

**XXIX.
KONFERENCE
RADIOKOMUNIKACE**

**15. - 17. 10.
2019**



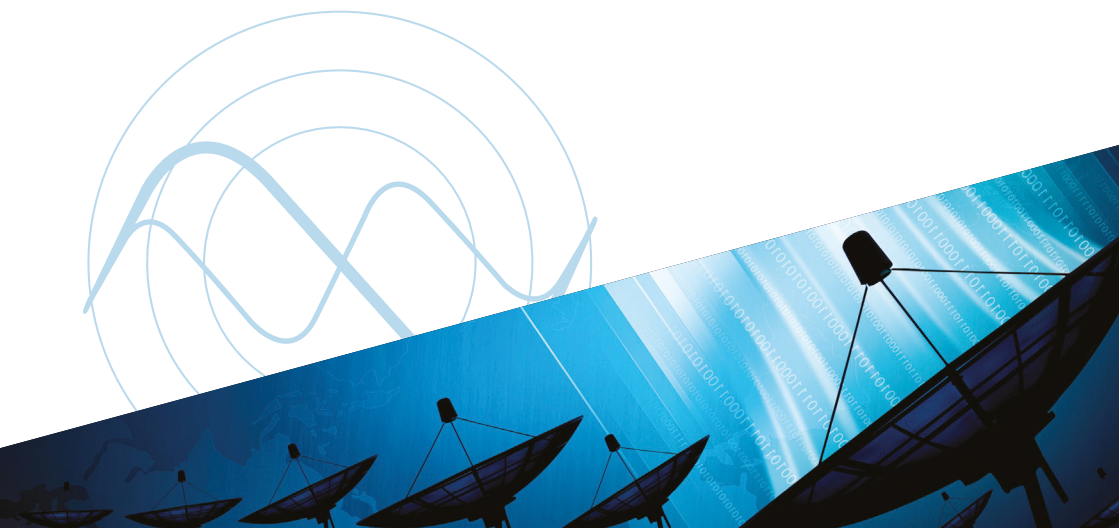
Český telekomunikační úřad



XXIX. konference Radiokomunikace

Sborník přednášek

pod záštitou Ing. Mgr. Jaromíra Nováka
předsedy Rady Českého telekomunikačního úřadu



RADIOKOMUNIKACE 2019

Přípravný výbor konference:

Ing. Pavel Ellinger, Český telekomunikační úřad
Ing. Pavel Gregora, Praha
Prof. Ing. Miroslav Husák, ČVUT v Praze
Ing. Jan Kramosil, odborný konzultant BC Service
Doc. Ing. Jiří Masopust, CSc., Západočeská univerzita v Plzni
Ing. Karel Mikuláščík, ČVUT v Praze
Ing. Olga Müllerová, CSc., Praha
Ing. Martin Roztočil, Marro s. r. o.
Ing. Václav Udatný, Vaud Praha
Ing. Josef Vít, Praha
Doc. Ing. Václav Žalud, CSc., ČVUT v Praze
Ing. Jaromír Žiška, Český telekomunikační úřad

Pořádající organizace:

UNIT s. r. o.

Generální partner



Hlavní partneři



ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



Hlavní mediální partneři

TELEVIZNÍWEB.cz
Vše o DVBT2 na jednom místě ▲▲

 **Český rozhlas** | Digitální rádio

RELA:POHODA



Mediální partneři



Vystavovatelé



Výběrové řízení v pásmech 700 MHz a 3,5 GHz

Ing. Martin Hanuš

Český telekomunikační úřad

Český telekomunikační úřad (ČTÚ) v současné době pokračuje v přípravě výběrového řízení za účelem udělení práv k využívání rádiových kmitočtů pro zajištění sítí elektronických komunikací v kmitočtových pásmech 700 MHz a 3 400–3 600 MHz (*Výběrové řízení*). Tento příspěvek shrnuje základní navržené podmínky Výběrového řízení ve stavu po provedení veřejné konzultace (tzn. ke konci srpna 2019).

Vzhledem k datu uzávěrky tohoto příspěvku není možno vyloučit změnu níže uvedených podmínek výběrového řízení před jeho vyhlášením.

1. Úvod

ČTÚ již v červnu 2018 zveřejnil první návrh základních principů Výběrového řízení na udělení práv k využívání rádiových kmitočtů v pásmu 700 MHz s cílem získat stanoviska nebo připomínky dotčených subjektů k tomuto návrhu. K obdržným připomínkám ČTÚ v srpnu 2018 zveřejnil svoji rámcovou pozici.

Následně v lednu 2019 ČTÚ zveřejnil upravený návrh základních principů, který již obsahoval rozšíření předmětu výběrového řízení o pásmo 3 400–3 600 MHz (pásmo 3,5 GHz). Svoji rámcovou pozici k předloženým připomínkám následně ČTÚ zveřejnil v březnu 2019.

ČTÚ následně ve spolupráci s externí poradenskou společností *Grant Thornton Advisory s. r. o.* vypracoval úplný návrh podmínek Výběrového řízení, který v červenci 2019 předložil k veřejné konzultaci s dotčenými subjekty podle § 130 zákona č. 127/2005 Sb. (*ZEK*). Připomínky předložené v rámci veřejné konzultace ČTÚ vyřádal a toto vypořádání zveřejnil dne 26. 8. 2019 na svých internetových stránkách.

V době uzávěrky tohoto článku probíhá v souladu se *ZEK* konzultace podmínek Výběrového řízení s Úřadem pro ochranu hospodářské soutěže. Následně bude návrh podmínek Výběrového řízení dle požadavků usnesení vlády České republiky č. 293 ze dne 16. května 2018 předložen vládě České republiky.

2. Cíle Výběrového řízení

Cílem Výběrového řízení je umožnit využití uceleného souboru rádiových kmitočtů z obou kmitočtových pásem, které jsou předmětem výběrového řízení, a tím vytvořit podmínky pro:

- podporu prohloubení *hospodářské soutěže* v oblasti služeb elektronických komunikací;
- zajištění *efektivního využití* rádiových kmitočtů ku prospěchu koncových uživatelů;

- rozvoj *nových služeb* elektronických komunikací prostřednictvím bezdrátových vysokorychlostních sítí a vytvoření podmínek pro technologickou inovaci sítí a služeb elektronických komunikací, zejména s předpokladem budoucího rozvoje sítí 5G a služeb na nich poskytovaných.

Podmínky Výběrového řízení mají dále za cíl, s ohledem na usnesení Vlády České republiky č. 293 ze dne 16. května 2018, podpořit budoucí řešení krizové komunikace bezpečnostních a krizových složek prostřednictvím sítě elektronických komunikací (*PPDR komunikace*).

3. Předmět výběrového řízení

3.1 Pásmo 700 MHz

Pásmo 700 MHz je pásmo vymezené rádiovými kmitočty 694–790 MHz. Základními harmonizačními dokumenty pro využití rádiových kmitočtů v pásmu 700 MHz jsou prováděcí rozhodnutí Komise č. 2016/687 [1] a rozhodnutí Evropského parlamentu a Rady č. 2017/899 [2]. Podmínky využívání pásma 700 MHz na území České republiky jsou stanoveny v příslušné části plánu využití rádiového spektra pro kmitočtové pásmo 470–960 MHz [3].

Předmětem Výběrového řízení jsou pouze párové úseky kmitočtů 703–733 MHz a 758–788 MHz určené pro zemské systémy k poskytování bezdrátových širokopásmových služeb elektronických komunikací, které budou rozděleny na následující aukční bloky:

- *jeden aukční blok* o velikosti 2×10 MHz, který je vyhrazený výhradně pro *nového operátora*, tzn. pro zájemce, který není držitelem přidělení rádiových kmitočtů v pásmech 800 MHz a 900 MHz;
- *ostatní aukční bloky jsou nevyhrazené*, tedy není omezen okruh zájemců, kteří na ně mohou podávat své nabídky. Jedná se o dva aukční bloky o velikosti 2×5 MHz a jeden aukční blok o velikosti 2×10 MHz.

V pásmu 700 MHz je pro toto Výběrové řízení stanoveno omezení celkového množství rádiových kmitočtů přidělené jednomu držiteli na 2×10 MHz, minimální rozsah kmitočtů držených jedním žadatelem potom odpovídá jednomu nabízenému bloku o velikosti 2×5 MHz.

Přidělené velikosti bloků tedy budou násobky 2×5 MHz. Režimem provozu bude duplex s kmitočtovým dělením FDD (*frequency division duplex*). Duplexní odstup je 55 MHz, přičemž k vysílání terminálů (*FDD uplink*) je určena dolní část kmitočtového pásma, tzn. úsek 703–733 MHz, a k vysílání základnových stanic (*FDD downlink*) je určena horní část kmitočtového pásma, tzn. úsek 758–788 MHz.

Ostatní kmitočty z pásma 700 MHz nejsou předmětem tohoto Výběrového řízení a o jejich budoucím využití rozhodne ČTÚ samostatně. Možné varianty využití těchto kmitočtů popisuje rozhodnutí [1]. Jedná se např. o využití pro doplňkový SDL (*supple-*

mentary downlink) zemských systémů k poskytování bezdrátových širokopásmových služeb elektronických komunikací, využití pro PPDR komunikaci, využití pro rádiovou komunikaci mezi stroji M2M (*machine to machine*) nebo využití pro bezdrátová zařízení pro přenos zvuku PMSE (*programme making and special events*).

3.2 Pásmo 3,5 GHz

Pásmo 3,5 GHz je nepárové pásmo vymezené rádiovými kmitočty 3 400 MHz a 3 600 MHz, které je souhrnně s pásmem 3,7 GHz, které je vymezeno rádiovými kmitočty 3 600 MHz a 3 800 MHz, harmonizováno prováděcím rozhodnutím Komise č. 2019/235 [4] pro zemské poskytování služeb elektronických komunikací, především se zaměřením na bezdrátové širokopásmové služby pro koncové uživatele. Podmínky využívání pásma 3,5 GHz a 3,7 GHz na území České republiky jsou stanoveny v příslušné části plánu využití rádiového spektra pro kmitočtové pásmo 2 700–4 200 MHz [5].

Předmětem Výběrového řízení jsou nepárové kmitočty v celém úseku 3 400–3 600 MHz pro využití na celém území České republiky, které budou pro účely Výběrového řízení rozděleny do aukčních bloků o dvou velikostech 20 MHz a 40 MHz tak, aby bylo všem žadatelům v souhrnu s kmitočtovým pásmem 3,7 GHz, které bylo přiděleno v předchozím výběrovém řízení uskutečněném v roce 2017, umožněno dosáhnout optimální velikosti souvislých bloků 80–100 MHz dle požadavků rozhodnutí [4]. Pro účely následného scelení přidělů v pásmech 3,5 GHz a 3,7 GHz ČTÚ v tomto i předchozím výběrovém řízení stanovil povinnost budoucího *refarmingu* kmitočtů v celém kmitočtovém úseku 3 400–3 800 MHz.

Minimální rozsah kmitočtů držených jedním žadatelem v celém úseku 3 400–3 800 MHz je stejně jako v předchozím výběrovém řízení stanoven na 40 MHz.

4. Podmínky využívání přidělených rádiových kmitočtů

4.1 Zajištění účelného využívání rádiových kmitočtů

Pro zajištění efektivního využívání přidělených rádiových kmitočtů jsou specifikována kritéria, která jsou pro držitele přidělu závazná z hlediska naplnění a která zahrnují zejména termíny pro zahájení využívání rádiových kmitočtů a zajištění pokrytí území a obyvatel nabídkou komerčních veřejně dostupných služeb elektronických komunikací prostřednictvím veřejných komunikačních sítí s využitím rádiových kmitočtů přidělených v tomto Výběrovém řízení.

Pro pásmo 700 MHz jsou stanovena rozvojová kritéria pro zajištění následujících cílů:

- pokrytí 95 % obyvatel obcí identifikovaných jako *bílá místa* do 3 let. Jde o obce, ve kterých souhrnně pokrytí všech operátorů nedosahuje ke dni vyhlášení Výběrového řízení uvedené požadované úrovně; Tento požadavek je stanoven z důvodu zajištění pokrytí obyvatel dosud nepokrytých obcí sítěmi ve standardu 4G;

- pokrytí celoevropských železničních a silničních koridorů TEN-T (*trans-european transport network*) do 5 let. Tento požadavek je stanoven z důvodu zajištění rozvoje pokrytí dopravní infrastruktury sítěmi 5G;
- pokrytí 95 % katastrálního území každého města ČR nad 50 000 obyvatel do 5 let; Tento požadavek je stanoven z důvodu zajištění rozvoje sítí 5G na území velkých měst;
- pokrytí 80 % území České republiky do 5 let. Tento požadavek platí pouze pro držitele nevyhrazeného bloku v pásmu 700 MHz o velikosti 2×10 MHz a slouží k zajištění plošného pokrytí území ČR splňující požadavky kladené na síť určené pro komunikaci PPDR;
- pokrytí 99 % obyvatel a 90 % území každého okresu ČR do 10 let. Tento požadavek je stanoven z důvodu zajištění plošného rozvoje pokrytí území a obyvatel sítěmi 5G;

Do plnění vybraných rozvojových kritérií je možno započítat i pokrytí vybudované v dříve přidělených kmitočtových pásmech 800 MHz, 900 MHz, 1 800 MHz, 2 100 MHz a 2 600 MHz, u kterých bude splněna podmínka aktualizace na požadovaný standard.

Pro pásmo 3,5 GHz jsou, vzhledem k jeho kapacitní povaze, stanovena rozvojová kritéria pouze počtem požadovaných základnových stanic splňujících standard 5G. Rozvojová kritéria jsou stanovena tak, aby síť v tomto pásmu byly budovány na celém území České republiky, nikoliv pouze regionálně. Do plnění rozvojových kritérií v tomto pásmu je možno započítat i stanice provozované na základě přidělu v pásmu 3,7 GHz, u kterých bude splněna podmínka aktualizace na standard 5G.

4.2 Podmínky ochrany zemského televizního vysílání

K zajištění ochrany příjmu zemského televizního vysílání ČTÚ stanovil obdobné podmínky jako byly stanoveny v případě pásma 800 MHz. Základním požadavkem je testovací provoz každé nově spuštěné základnové stanice v délce minimálně 60 dní. Po tuto dobu platí povinnost vypnutí základnové stanice v případě rušení více než deseti míst televizního příjmu nebo minimálně jednoho zařízení společného televizního příjmu, a to na dobu nezbytnou k provedení odstranění rušení, a to až do odsouhlasení ČTÚ možnosti pokračovat ve zkušebním provozu. Před uvedením základnové stanice do trvalého provozu musí být veškeré oprávněné podněty vztahující se k rušení příjmu zemského televizního vysílání vyřešeny, a to buď realizací ochranných opatření na straně televizního příjmu nebo na straně základnové stanice.

Držitel přidělu je nově povinen kromě ČTÚ před spuštěním nově instalovaných základnových stanic do zkušebního provozu informovat též příslušné orgány místních

samospráv obcí případně příslušných městských částí pokrytých z takové základnové stanice.

4.3 Doba platnosti přidělu rádiových kmitočtů

Příděly rádiových kmitočtů v pásmu 700 MHz budou uděleny s platností do 30. června 2036, příděly rádiových kmitočtů v pásmu 3,5 GHz potom se shodnou platností jako byla stanovena u pásma 3,7 GHz, tedy do 30. června 2032.

4.4 Podmínky pro převod přidělu rádiových kmitočtů a pronájem práv vyplývající z individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů

Převod přidělu rádiových kmitočtů je upraven v ustanovení § 23 ZEK. Aby případným převodem přidělu rádiových kmitočtů nebyla narušena hospodářská soutěž, stanovil dále ČTÚ podmínku týkající se vyhrazeného bloku v pásmu 700 MHz. Tento přiděl ani jeho část nesmí jeho držitel po dobu 11 let převést na stávajícího operátora ani na člena jeho podnikatelského seskupení.

Pronájem práv vyplývajících z individuálního oprávnění bude umožněn pouze s předchozím souhlasem ČTÚ. Pronájmem práv vyplývajících z individuálního oprávnění nesmí dojít ze strany nájemce práv, respektive podnikatelského seskupení, jehož je členem, k překročení spektrálních limitů stanovených v tomto Výběrovém řízení.

5. Závazky převzaté v průběhu Výběrového řízení

5.1 Závazek národního roamingu

Závazek národního roamingu se týká výlučně stávajících operátorů, kteří jsou držiteli přidělů v pásmech 800 MHz a 900 MHz a kteří se stanou držiteli přidělu v pásmu 700 MHz. Obsahem závazku je povinnost poskytnout na základě smlouvy o národním roamingu národní roaming ve prospěch nového operátora, který je držitelem přidělu v pásmu 700 MHz a který splní podmínku zajištění vlastního pokrytí alespoň 20 % obyvatelstva České republiky prostřednictvím jím provozované sítě elektronických komunikací.

Závazek národního roamingu je platný po dobu 6 let a vztahuje se pouze na sítě 2G, 3G a 4G. Jeho účelem je zajištění konkurenceschopnosti nového operátora po dobu budování jeho vlastní sítě, tzn. zajištění možnosti replikovat nabídky stávajících operátorů kombinací 5G služeb, které si bude zajišťovat prostřednictvím vlastní sítě, se službami 2G/3G/4G ke kterým bude mít přístup na základě závazku národního roamingu.

5.2 Závazek velkoobchodní nabídky

Závazek velkoobchodní nabídky se vztahuje výhradně na držitele přidělu v pásmu 700 MHz. Jeho účelem je vytvořit podmínky, které umožní všem zájemcům o přístup, kteří nejsou držiteli přidělu rádiových kmitočtů v pásmu 700 MHz a kteří uzavřou s držitelem přidělu v pásmu 700 MHz smlouvu o přístupu, poskytování elektronické

kých komunikačních služeb prostřednictvím elektronických komunikačních sítí provozovaných v pásmu 700 MHz. Cílem ČTÚ je v maximální možné míře zachovat a podpořit závazky velkoobchodní nabídky uložené v minulých výběrových řízeních a jejich účinky.

Závazek velkoobchodní nabídky je omezen na dobu do 24. 2. 2026.

5.3 Závazky PPDR

Pro potřeby zajištění mobilní krizové komunikace složek PPDR, tzn. komunikace prostřednictvím neveřejné mobilní sítě elektronických komunikací za účely stanovenými zákoně o integrovaném záchranném systému, zákoně o krizovém řízení, zákoně o Policii České republiky, zákoně o obecní policii, zákoně o Vojenské policii, zákoně o Generální inspekci bezpečnostních sborů a zákoně o zpravodajských službách České republiky stanovil ČTÚ následující závazky:

- *závazek prioritního BB-PPDR*, který se týká všech držitelů přidělů v pásmu 700 MHz o velikosti 2×10 MHz s výjimkou držitele přidělu vyhrazeného bloku pro nového operátora. Stanovuje povinnost účasti ve výběrovém řízení na výstavbu sítě pro zajištění budoucí komunikace PPDR;
- *závazek národního roamingu* pro PPDR, který se týká všech držitelů přidělů rádiových kmitočtů v pásmu 700 MHz, a který stanovuje povinnost přístupu k veřejným komunikačním sítím provozovaným v pásmech 700 MHz a 800 Hz formou národního roamingu v rozsahu Full-MVNO.

5.4 Závazek refarmingu pásem 3,5 GHz a 3,7 GHz

Závazek je stanoven s cílem zajištění účelného využívání rádiových kmitočtů nejen v pásmu 3,5 GHz, ale také v celém kmitočtovém pásmu 3 400–3 800 MHz umožněním scelení přidělů rádiových kmitočtů jednotlivých držitelů přidělu v rámci celého kmitočtového pásma 3 400–3 800 MHz. Obdobný závazek byl stanoven i v předchozím výběrovém řízení v pásmu 3,7 GHz, ve kterém získaly přiděly společnosti PODA a. s., Nordic Telecom 5G a. s., O2 Czech Republic a. s. a Vodafone Czech Republic a. s.

Tento závazek umožní vytvoření spojitých kmitočtových přidělů všech držitelů přidělů v pásmech 3,5 GHz a 3,7 GHz.

6. Průběh Výběrového řízení

6.1 Kvalifikační předpoklady

Základní podmínky účasti ve Výběrovém řízení odpovídají požadavkům stanoveným v předchozích výběrových řízeních. Žadatel musí ke dni podání žádosti oprávněn k podnikání v elektronických komunikacích podle § 8 a 13 ZEK, nesmí být ani v předchozích 3 letech v insolvenční či likvidační a nesmí být veden v rejstříku osob se zákazem plnění veřejných zakázek.

Ekonomické a finanční podmínky účasti ve Výběrovém řízení jsou splněny složením bankovní záruky v požadované výši. Záruka musí být v plné výši připsána na stanovený účet ČTÚ, a to nejpozději k poslednímu dni lhůty pro podání žádosti. Výše složené záruky v rozsahu 100 000 000 Kč až 1 250 000 000 Kč je přímo úměrná rozsahu rádiových kmitočtů na které bude příslušný žadatel následně oprávněn podávat nabídky a v uvedeném rozsahu je na jeho volbě.

Samotná žádost musí zejména obsahovat výpis z obchodního rejstříku, grafické znázornění podnikatelského seskupení dokládající oprávněnost žadatele účastnit se Výběrového řízení a prohlášení o přijetí závazků.

Výběrového řízení se mohou zúčastnit pouze subjekty, které jsou na sobě vzájemně ekonomicky nezávislé. Podnikatelská seskupení mohou podat pouze jednu žádost do Výběrového řízení prostřednictvím pouze jednoho subjektu. Pokud je členem podnikatelského seskupení stávající operátor, může se toto podnikatelské seskupení zúčastnit Výběrového řízení pouze prostřednictvím tohoto stávajícího operátora. Tato podmínka byla stanovena s cílem zamezení obcházení stanovených závazků.

6.2 Aukce

Cílem aukce je stanovení ceny za přiděly rádiových kmitočtů a vítězů aukce, kteří se po splnění všech náležitostí Výběrového řízení mohou stát držiteli přidělů jednotlivých úseků rádiových kmitočtů, které jsou předmětem Výběrového řízení.

Samotná aukce je rozdělena na 2 fáze:

- *aukční fáze*, ve které jsou metodou souběžné vícekolové aukce (SMRA) rozděleny nabízené aukční bloky mezi účastníky aukce, kteří v závěrečném aukčním kole nabídli za jednotlivé aukční bloky nejvyšší cenu; Aukce probíhá v elektronickém aukčním systému, ke kterému účastníci aukce přistupují dálkově;
- *fáze rozdělení kmitočtů*, ve které dojde k rozdělení konkrétních úseků nabízeného rádiového spektra úspěšným účastníkům aukční fáze v rozsahu a struktuře odpovídající jejich zisku aukčních bloků v aukční fázi.

Všechny aukční bloky jsou v aukční fázi nabízeny současně v po sobě jdoucích aukčních kolech, ve kterých účastníci aukce umísťují své nabídky na jimi vybrané aukční bloky. V průběhu aukční fáze účastníci aukce zvyšují nabídkovou cenu aukčních bloků oproti předchozí nejvyšší nabídce. Po vyhodnocení každého aukčního kola jsou všem účastníkům aukce k dispozici informace o obsazenosti a nejvyšší podané nabídce na každém aukčním bloku, nicméně totožnost účastníků aukce je v průběhu celé aukční fáze utajena.

6.3 Postup po ukončení aukce

Na základě výsledků aukce budou nejprve zamítnuty žádosti neúspěšných účastníků aukce. Následně ČTÚ vyzve všechny vítěze aukce k zaplacení ceny za získané rádiové kmitočty (složená bankovní záruka bude z této ceny odečtena), po jejímž zaplacení

budou úspěšným účastníkům aukce vydána rozhodnutí o udělení přidělu rádiových kmitočtů podle § 22 ZEK.

Do jednoho měsíce od ukončení Výběrového řízení a udělení přidělu rádiových kmitočtů všem vítězům aukce zveřejní ČTÚ zprávu o jeho průběhu a výsledcích včetně.

7. Seznam odkazů

- [1] Prováděcí rozhodnutí Komise 2016/687 ze dne 28. dubna 2016 o harmonizaci kmitočtového pásma 694–790 MHz pro zemské systémy k poskytování bezdrátových širokopásmových služeb elektronických komunikací a flexibilní vnitrostátní využívání v Unii, dostupné online: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016D0687>>.
- [2] Rozhodnutí Evropského parlamentu a Rady 2017/899 ze dne 17. května 2017 o využití rádiového kmitočtového pásma 470–790 MHz v Unii, dostupné online: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D0899>>.
- [3] Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/10/03.2019-3 pro kmitočtové pásmo 470–960 MHz, dostupné online: <<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/sdeleni-o-vydani-opatreni-obecne-povahy-casti-planu-vyuziti-radioveho-spektra-c.pv-p/10/03.2019-3-pro-kmitoctove-pasmo-470-960-mhz/obrazky/pv-p1003.2019-3podpis.pdf>>.
- [4] Prováděcí rozhodnutí Komise 2019/235 ze dne 24. ledna 2019, kterým se mění rozhodnutí 2008/411/ES, pokud jde o aktualizaci příslušných technických podmínek, které se uplatní v kmitočtovém pásmu 3400–3800 MHz, dostupné online: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019D0235>>.
- [5] Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/7/06.2019-5 pro kmitočtové pásmo 2700–4200 MHz, dostupné online: <<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/sdeleni-o-vydani-opatreni-obecne-povahy-casti-planu-vyuziti-radioveho-spektra-c.pv-p/7/06.2019-5-pro-kmitoctove-pasmo-2700-4200-mhz/obrazky/pvrs7podpis.pdf>>.

Příprava ČR na Světovou radiokomunikační konferenci (WRC-19)

Ing. Karel Antoušek

Český telekomunikační úřad

Na úvod něco málo „retra“. V říjnu 2014 byl zpracován a prezentován na konferenci „Radiokomunikace 2014“ příspěvek, který se věnoval některým obecným zásadám kmitočtového managementu se zaměřením na oblast mezinárodního managementu a jeho dopadů do národních podmínek využívání rádiového spektra. V té době byla pro toto téma vhodná doba, protože bylo krátce po vydání prvního uceleného dokumentu pod názvem „Strategie správy kmitočtového spektra“. Dokumentu, který obsahl a popsal věcné souvislosti správy kmitočtového spektra v návaznosti na mezinárodní vývoj, technologický rozvoj, dokumentu, který otevřel debatu o efektivním a účelném využitím rádiového spektra o jeho ekonomické hodnotě, o pojmech jako je „*spectrum trading*“, dynamický management a další. Součástí informací byla i situace v přípravě ČR na Světovou radiokomunikační konferenci (WRC) 2015.

Považuji za užitečné se k příspěvku z roku 2014 alespoň krátce vrátit. Důvod je docela prostý. Dostatečný přístup k rádiovému spektru a jeho účelné a efektivní využití se prolíná všemi odvětvími hospodářství, vlastně celou společností a má výrazný podíl na růstu a prosperitě země. V soutěžním prostředí je předmětem tvrdého konkurenčního boje a kolem této skutečnosti se vždy vyrojí řada fabulací, spekulací, domněnek a mýtů, z nichž některé byly popsány v příspěvku z roku 2014. A porovná-li pozorný čtenář tyto mýty se skutečným průběhem věcí potom snadněji dospěje k vlastnímu názoru na tvorbu kmitočtové politiky, snadněji rozpozná jednotlivé souvislosti, získá určitý nadhled na situaci v oblasti využívání rádiového spektra a pokud výsledkem bude uplatnění některých moderních poznatků v oblasti využívání rádiového spektra ve svém podnikání v oblasti elektronických komunikací, potom se blýská na lepší časy pro kmitočtový management.

Tento krátký „retro“ úvod by měl být spojovníkem, nebo „oslím můstkem“ chcete-li to takto nazvat pro ty čtenáře, kteří si položí otázky:

- Proč vlastně WRC, proč nezorganizovat jinou konferenci, proč nevymyslet jiný způsob globálního řešení problematiky využívání/harmonizace rádiového spektra? Za jakým účelem je organizována WRC?
- Kdy vlastně začíná příprava na WRC?
- Na jakých úrovních probíhá příprava?
- Jaké se uplatňují procesy a postupy v rámci studijního cyklu mezi konferencemi?
- Jaké jsou výstupy z přípravy na jednotlivých úrovních?
- Body programu WRC-19.

A dala by se definovat celá řada dalších otázek na jednotlivé detaily. Nicméně, takové detailní popisy jdou za rámec zadání pro konferenci Radiokomunikace 2019.

1. WRC a její účel

Odpověď na první, ale zásadní otázku, je poměrně jednoduchá. Mezinárodní telekomunikační unie (ITU), jako organizace OSN, má ve své gesci pravidla přístupu k rádiovému spektru a orbitálním drahám.

Rozhodování a stanovení pravidel je prováděno na úrovni:

- *konference vládních zmocněnců* ITU (Otázky globálního charakteru, strategie, Ústavy, Úmluvy, Rozpočtu ITU apod.),
- *světové konference sektorů*:
 - *radiokomunikačního* (ITU-R),
 - *standardizačního* (ITU-T),
 - *rozvojového* (ITU-D).

Zásadním výstupem z jednání Světové radiokomunikační konference jsou odsouhlasené změny Radiokomunikačního řádu.

2. Zahájení přípravy na WRC

Obecně lze konstatovat, že každá WRC má danou strukturu a součástí této struktury je stálý bod programu konference (AI 10). V rámci tohoto bodu jsou definovány a následně po projednání konferencí schváleny návrhy bodů programu následující konference (konference v roce 2015 navrhla body programu pro WRC-19 a definovala předběžně několik bodů/programových okruhů pro WRC-23). Body programu WRC-19, schválené WRC-15, byly následně jednáním CPM-1-19 (*Conference preparatory meeting for WRC-19*) přiděleny příslušným studijním skupinám ITU-R k provedení studií sdílení a kompatibility. První jednání CPM probíhá vždy bezprostředně po ukončení jednání WRC. Odpověď na otázku, kdy začíná příprava na WRC je tedy velmi jednoduchá. Začíná hned druhý den po skončení WRC.

3. Úrovně přípravy na WRC-19

Příprava na WRC-19 probíhá na následujících úrovních:

- *globální* na úrovni Mezinárodní telekomunikační unie,
- *regionální* na úrovni regionálních organizací (CEPT, CITELE, RCC, APT, ASMG, ATU),
- *mezinárodních organizací* (EU, NATO, ICAO, IMO, CRAF, EBU, APWPT a další),
- *národní*.

3.1 Příprava na WRC-19 na globální úrovni

Bezprostředně po skončení WRC proběhne jednání CPM (*conference preparatory meeting*), které přidělí body programu následné konference jednotlivým studijním skupinám ITU-R (SG1–SG7) a jejich pracovními podskupinami k provedení studií sdílení

a kompatibility. Ve specifických případech může být v rámci studijní skupiny zřízena podskupina (*task force*), řešící většinou komplikovanou problematiku, kdy se taková problematika prolíná více studijními skupinami. Do tohoto procesu vstupují národní státy a regionální organizace a sektoroví členové ve formě vstupních příspěvků pro jednotlivá jednání. Výstupem práce studijních skupin je „Zpráva CPM“, která shrnuje výsledky studií sdílení a kompatibility, navrhuje metody řešení pro konferenci a uvádí příklady možných regulačních opatření pro jednotlivé body WRC. V průběhu studijního cyklu dochází k pravidelné výměně informací o průběhu prací mezi studijními skupinami.

3.2 Příprava na WRC na regionální úrovni

Příprava na regionální úrovni probíhá, stejně jako příprava na úrovni mezinárodních organizací a národní příprav paralelně s přípravou globální. Smyslem regionální přípravy je akcentovat regionální specifika, stav rozvoje technologií, situaci na trzích ve vazbě na soutěžní prostředí a další aspekty. Zájmy Evropy zastupuje CEPT (Evropská konference poštovních a telekomunikačních správ) se zvláštní vazbou na Evropskou unii. CEPT vytvořil pro přípravu WRC specifickou organizační strukturu – skupinu CPG (*conference preparatory group*), členěnou do čtyř Projektových týmů. Výstupem skupiny je „Zpráva CEPT“ ke každému bodu WRC, která slouží jako návod pro národní administrace, jak pohlížet na jednotlivé body programu a „Společné evropské návrhy“ ECP (*European common proposal*), která vyjadřují pozice CEPT a které CEPT na WRC následně představí a obhajuje. Činnost CPG a projektových týmů řídí jejich předsedové, za přípravu Zprávy CEPT a ECP pro jednotlivé body programu odpovídají vybraní experti v roli CEPT koordinátorů. ČR již druhý studijní cyklus koordinuje postup zemí CEPT ke stálým bodům programu (AI2 a AI4).

3.3 Příprava na WRC na úrovni mezinárodních organizací

Mezinárodní organizace formátu ICAO, IMO, NATO provádí analýzu bodů programu následně konference, které se vztahují k jejich působnosti. ICAO např. akcentuje bezpečnost leteckého provozu, NATO zase hájí zájmy vojáků ve smyslu vyváženého přístupu k rádiovému spektru pro operace ve smyslu čl. 5 Washingtonské smlouvy a pro přístup ke spektru pro účely výcviku na území členských států. Jednotlivé mezinárodní organizace prosazují svoje zájmy prostřednictvím členských států prostřednictvím různých apelů, bilaterálních a multilaterálních jednání a konzultací.

Výjimkou v tomto procesu je Evropská unie, která si vymohla prosazování pozic Unie formou Rozhodnutí Rady EU, které je pro členské státy EU závazné. Jako příklad rozdílného pohledu Komise a některých členských zemí EU, včetně ČR lze uvést problematiku nového družicového operátora GMDSS (AI 1.8 Issue B), část problematiky rozšíření kmitočtových pásem (5 GHz) pro RLAN a některé další, kde se pohledy liší v určitých detailech. Položí-li si pozorný čtenář-laik otázku: K čemu tedy je čtyřletý proces přípravy na úrovni CEPT, když ve svém důsledku se budou muset členské státy

podřídit rozhodnutí v případě, kdy pohled některých členských států na řešení příslušné problematiky je rozdílný? Tento vážený čtenář si bude muset odpovědět na takovou otázku sám, nicméně s vědomím, že taková rozhodnutí nejsou věcí „bruselského úředníka“, ale společným aktem představitelů členských států.

3.4 Příprava na WRC na národní úrovni

Přípravu ČR na WRC-19 je možno rozdělit do dvou částí:

- *technicko-odborné,*
- *administrativní.*

3.4.1 Technicko-odborná příprava

V rámci přípravy byla na základě předchozích zkušeností ustavena mezirezortní pracovní skupina pro přípravu ČR na WRC-19 (PSWRC). Skupina má roli odborného poradního orgánu, přípravu na WRC zajišťuje a koordinuje Český telekomunikační úřad. Součástí PSWRC byly odborné sekce Úřadu, operátoři mobilních a pevných sítí, operátoři televizních a rozhlasových sítí, zástupci resortů dopravy, obrany, vnitra, Akademie věd a další subjekty, které mají výrazný podíl na využívání rádiového spektra v ČR. Na každé jednání PSWRC byl připraven dokument „*Český Brief pro WRC-19*“, obsahující aktuální souhrn dostupných informací o stavu příprav na nadnárodní úrovni a formulované pozice ČR k jednotlivým bodům programu WRC.

3.4.2 Administrativní příprava

V rámci administrativní přípravy proběhly konzultace s resorty, které se rozhodly nominovat svoje zástupce do české delegace, zajištění ubytování, letecké přepravy do/z místa konání WRC-19, zajištění registrace a víz, rozdělení odpovědnosti za jednotlivé body programu, diskutovaly se možné postupy účinné koordinace v rámci národní delegace, způsob transferu informací v závislosti na informačním systému apod. Zároveň probíhal intenzivní výměna informací mezi MPO a Úřadem s cílem zajistit úspěšné působení české delegace na WRC-19.

4. Jaké se uplatňují procesy a postupy v rámci studijního cyklu mezi konferencemi?

Jak je uvedeno v kapitole 3.1, bezprostředně po jednání WRC následuje jednání CPM-1, které stanoví odpovědnost studijním skupinám (SG1–SG7) a jejím pracovním podskupinám za schválené body programu následně WRC. V rámci studijního cyklu mezi konferencemi probíhají studie sdílení a kompatibility. Vlastní výstupy jsou odvislé od produktivity členských států, průmyslu, sektorových členů a dalších. V rámci studijního cyklu je z národního hlediska podstatné účastnit se práce v pracovních skupinách na nejnižší úrovni, protože tam se vedou odborné debaty a tvoří se podstatná část výstupů v podobě technických detailů a regulatorních návrhů. K tomu je ale bezpodmínečně nutné mít k dispozici příslušné odborníky, a to nejen na úrovni technické,

ale i s mezinárodními zkušenostmi z vyjednávání se smyslem pro kompromis, dostatek finančních prostředků a podporu mateřských organizací.

5. Jaké jsou výstupy z přípravy na jednotlivých úrovních?

Na úrovni WRC – schválené změny Radiokomunikačního řádu (RR), uvedené v „*Provisional Acts*“ a následované vydáním nové edice RR.

Na úrovni ITU – Zpráva CPM a Zpráva ředitele Radiokomunikačního úřadu.

Na úrovni regionální (evropské měřítko) jsou to Společné evropské návrhy (ECP). V případě, že v rámci regionálního uskupení nedojde k dohodě na společných návrzích je standardně v praxi využíván nástroj „*Multicountry proposal*“. Specifikem Evropy je „Rozhodnutí Rady EU k WRC“, které zavazuje členské státy k obhajobě pozic, uvedených v tomto rozhodnutí.

Na úrovni mezinárodních organizací se zpravidla jedná o „Pozice k WRC“.

Na národní úrovni se zpravidla jedná o přípravu národních pozic pro tvorbu ECP a v závěru přípravy vyjádření podpory přistoupením k ECP.

6. Body programu WRC-19

Body programu WRC-19 lze obecně rozdělit do dvou skupin:

- *stálé body programu* každé konference (body AI 2, 4, 8, 9, 10),
- *pracovní body programu WRC-19* (AI 1 až 16).

Jednotlivé body programu WRC jsou potom přiděleny k projednání v rámci definované struktury WRC. Např. stálé body programu jsou projednávány v rámci „*Committee 6*“, pracovní body programu potom v „*Committee 4 a 5*“. Ostatní výbory řeší otázku pověřovacích listin, rozpočtu konference, editace výstupních dokumentů apod.

ČR, přes limity např. v oblasti možného rozsahu provedení studií a odborných expertíz, se do přípravy WRC-19 zapojila aktivně na všech úrovních. Dokladem toho je úspěšná koordinace bodů programu AI 2 a AI 4 v rámci CEPT a aktivní angažovanost v rámci bodů programu AII.1 (přidělení pásma 50–54 MHz radioamatérské službě, AI 1.8 (Issue A a Issue B) – modernizace GMDSS a nový družicový operátor GMDSS v pásmu L, AI 1.10 (GADSS – obdoba GMDSS pro letecké služby), AI 1.13 (IMT), AI 1.16 (WAS/RLAN) a AI 10 (body programu konference v roce 2023).

Výčet samozřejmě nic nevyovídá o důležitosti jednotlivých bodů agendy, ale minimálně naznačuje, že výstup WRC-19 může významnějším způsobem ovlivnit využívání rádiového spektra v ČR. Např. určení kmitočtových pásem pro síť 5G (AI 1.13) je toho zřejmým dokladem. Jednotlivé body programu WRC-19, jejich popis, návrh způsobu řešení a pozice ČR jsou uvedeny v poslední verzi Českého Briefu po 4. zasedání PSWR. Vzhledem k rozsahu Českého Briefu a vzhledem k tomu, že nikoliv všechny body programu mohou zásadním způsobem ovlivnit využívání rádiového

spektra v ČR, není účelné uvádět větší technické a regulační detaily, protože jsou uvedeny v prezentaci k tomuto bodu programu konference radiokomunikace 2019. Přesto je pro laickou i odbornou veřejnost účelné uvést alespoň základní členění bodů programu konference:

- *stálé body* programu každé konference,
- *problematika letecké, námořní a radioamatérské služby*,
- *problematika družicových služeb* (pevná, pohyblivá, rozhlasová, procesy a procedury pro zápis, koordinaci a notifikaci družicových sítí),
- *problematika vědeckých služeb*,
- *návrh bodů* programu WRC-23,
- *zpráva ředitele* radiokomunikačního úřadu ITU.

ČR se podílela na práci ve studijních skupinách ITU i na práci regionální organizace CEPT. Významným způsobem přispěla ke konsenzuální tvorbě evropských pozičních dokumentů a ECP. CPG připravila 3 sady ECP. Po konzultaci se členy PSWRC byly ECP podepsány. Česká republika se tím zařadila mezi státy, které jsou na návrzích zaslaných konferenci CEPT uvedeny jako jejich spolupředkladatelé.

Kompletaci ECP do jednotného formátu příspěvků konferenci a zaslání ITU-R provedl Úřad pro elektronické komunikace (ECO), podpůrná organizace CEPT.

Role koordinátorů CEPT ustanovených k řízení přípravy k jednotlivým bodům programu konference tím nekončí. Koordinátoři na WRC-19 představí návrhy konference, účastní se jejich projednávání příslušných výborech, pracovních skupinách a podskupinách a koordinují přítom postup zástupců ostatních administrací CEPT.

CPG připravilo celkem 70 matečných ECP a většina z těchto návrhů obsahuje řadu dílčích elementů, které celkový počet návrhů výrazně zvyšují (např. ECP k bodu programu AI 4, předloženého ČR obsahuje 38 elementů). ECP budou na konferenci z hlediska možných řešení konfrontovány s návrhy dalších regionálních organizací (CITEL, APT, ASMG, ATU a RCC). Typickým příkladem takové konfrontace může být pásmo 26 GHz pro síť 5G (v rámci bodu programu AI 1.13 – IMT). Předmětem ostré debaty budou požadované limity ochrany pasivních služeb (EESS) v přilehlém pásmu (23,6–24 GHz), kdy Evropa (CEPT, resp. země EU) podporují přísné limity ochrany, zatímco ASMG, CITEL, ATU a APT navrhuje limity až řádově mírnější. Dalším takovým předmětem vyostřené debaty může být bod AI 1.1 (který se týká pouze Regionu 1), kdy Evropa přistoupila na kompromisní návrh na přidělení pásma 50–52 MHz radioamatérské službě, z toho prvních 500 kHz v kategorii primární služby, RCC je názoru, že pro radioamatérskou službu je harmonizace 200 kHz spektra více jak dostačující. Při tom Region 2 a Region 3 má harmonizováno celé pásmo 50–54 MHz pro radioamatérskou službu (zde je ale potřeba si uvědomit, že pásmo je přiděleno v Regionu 1 rozhlasové službě, což není problém Regionu 2 a Regionu 3). Tento stručný výčet neznamená, že u ostatních bodů programu nebude diskuse složitá, protože

návrhy řešení rozvojových států se mnohdy výrazně liší od návrhů rozvinutých zemí, což se může projevit např. u návrhů na harmonizaci kmitočtových pásem pro systém HAPS.

V průběhu WRC-19 lze tedy očekávat složitá vyjednávání, a protože výsledek konference je věcí konsenzu, je žádoucí, aby národní administrace vyslaly na konferenci zkušené vyjednavče a odborníky, kteří v maximální míře naplní to, co Vice Admirál U.S. Navy pan John L. Boyes prohlásil o lidech, pracujících v kmitočtovém managementu:

„Radio frequency management is done by experts who meld years of experience with a curious blend of regulation, electronics, politics and not a little bit of larceny. They justify requirements, horsetrade, coerce, bluff and gamble with an intuition that cannot be taught other than by long experience.“

Region 1, 2, 3	členění kontinentů dle Radiokom. řádu (Evropa, Afrika a část Asie patří do regionu 1)
CITEL	regionální organizace zastupující zájmy Severní a Jižní Ameriky
ASMG	regionální organizace zastupující zájmy arabských zemí
ATU	regionální organizace zastupující zájmy afrických zemí
APT	regionální organizace zastupující zájmy pacifických zemí
RCC	regionální organizace zastupující zájmy zemí bývalého SSSR
ECO	servisní organizace Výboru pro elektronické komunikace (ECC)
HAPS	High Altitude Platform Station
GMDSS	Global Maritime Distress Safety System

Tabulka 1: Vysvětlivky k vybraným zkratkám

Novinky v oblasti volného využívání rádiových kmitočtů a legislativy pro rádiová zařízení

Ing. Jiří Macek

Český telekomunikační úřad

1. Úvod

Světový a evropský trend ve využívání rádiových kmitočtů směřuje stále více od „klasického“ využívání převážně na základě individuálních oprávnění k prodeji rádiového spektra, které je obchodovatelné, na straně jedné (aukce rádiových kmitočtů) a k volnému využívání rádiových kmitočtů na základě všeobecných oprávnění na straně druhé.

Všeobecná oprávnění, která v České republice vydává Český telekomunikační úřad, umožňují tam, kde je to možné a vhodné, využívání rádiových kmitočtů a provozování rádiových zařízení bez nutnosti žádat o individuální oprávnění a platit poplatky za využívání kmitočtů, což je pro uživatele velmi výhodné. Na druhou stranu musí být stanovena pravidla pro minimalizaci nežádoucího rušení, aby využívání kmitočtů bylo efektivní.

Typickými kandidáty na všeobecné oprávnění jsou zařízení krátkého dosahu, která se stávají stále častěji součástí našeho běžného života, ale i různé další aplikace (WiFi, IoT, drony, některé pevné spoje, ...).

Tento článek se zaměřuje zejména na změny, k nimž došlo v oblasti všeobecných oprávnění a legislativy po roce 2015.

2. Přehled všeobecných oprávnění

Přehled všeobecných oprávnění je uveden v tabulce 1.

číslo VO	název VO	změny 2016–19
VO-R/1/12.2018-8	k provozování uživatelských terminálů rádiových sítí elektronických komunikací	2018
VO-R/2/05.2018-5	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování stanic bezdrátových místních informačních systémů (BMIS) v kmitočtovém pásmu 70 MHz	2018
VO-R/3/6.2016-9	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení PMR 446	2016
VO-R/7/11.2016-12	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování občanských radiostanic v pásmu 27 MHz	2016
VO-R/8/08.2005-23	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení bezšňůrové telekomunikace standardu DECT	
VO-R/10/01.2019-1	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu	2019 (bude další 2019–20)

VO-R/12/09.2010-12	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4–66 GHz	bude 2019–20
VO-R/14/12.2012-17	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení v pásmu 10 GHz	
VO-R/15/08.2005-27	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro dálkové ovládání modelů v pásmech 13–40 MHz	
VO-R/16/08.2005-28	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení provozovaných společně na určených kmitočtech v pásmech 27–450 MHz	
VO-R/17/08.2005-29	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování bezšňurových telefonních přístrojů standardu CT0	
VO-R/23/08.2017-6	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pevné služby v pásmech 71–76 GHz a 81–86 GHz	2017
VO-R/24/05.2019-4	k provozování zařízení infrastruktury pro šíření rádiových signálů uvnitř tunelů, budov a vlaků	2019
VO-R/25/11.2017-8	k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro sledování pohybu psů	nové VO 2017

Tabulka 1: Přehled všeobecných oprávnění

Zvýrazněná všeobecná oprávnění se vztahují na provozování zařízení (terminálů, opakovačů) v sítích, na něž bylo vydáno individuální oprávnění. Ostatní všeobecná oprávnění opravňují k využívání rádiových kmitočtů i k provozování zařízení.

3. Evropská harmonizace

Kmitočtové plánování v České republice je zachyceno v těchto dokumentech, které jsou k dispozici na <http://www.ctu.cz>:

- *plán přidělení kmitočtových pásem* (národní kmitočtová tabulka) – Rámcový dokument vydávaný MPO, vychází z Radiokomunikačního řádu ITU;
- *plán využití rádiového spektra* – ve svých 27 částech podrobně specifikuje využití jednotlivých kmitočtových pásem, vychází z plánů ITU, z evropských harmonizačních dokumentů i z národních potřeb;
- *všeobecná oprávnění* – podrobně specifikují podmínky využití těch částí rádiového spektra, které je možno využívat bez koordinace jednotlivých zařízení, bez poplatku a bez potřeby žádat o individuální oprávnění k využívání rádiových kmitočtů.

Kmitočtová pásma a podmínky uvedené ve všeobecných oprávněních vycházejí ve velké míře z harmonizačních dokumentů Evropské komise a Evropské konference poštovních a telekomunikačních správ (CEPT). Česká republika tak v rámci Evropy dosahuje vysokého stupně harmonizace.

Z rozhodnutí Evropské komise je třeba se zmínit zejména prováděcí rozhodnutí Komise (EU) 2017/1483, o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého

dosahu, které stanoví kmitočtová pásma závazná pro všechny členské státy EU. Z doporučení CEPT je to pak zejména obsáhlé doporučení ERC/REC 70-03 k používání zařízení krátkého dosahu. Toto doporučení je zpravidla každoročně aktualizováno a tyto aktualizace jsou následně promítnuty i do českého všeobecného oprávnění.

Společné využívání jednotlivých kmitočtů různými uživateli je zpravidla umožněno malým výkonem zařízení a dále použitím moderních technologií, například nízkým klíčovacím poměrem (*duty cycle*), technikou rozprostřeného spektra či UWB (*ultra-wide band*), vysíláním pouze na základě vyhodnocení provozu LBT (*listen before talk*), automatickou regulací výkonu či dynamickou volbou kmitočtu DFS (*dynamic frequency selection*), kognitivní technologie apod. Tím je významně minimalizováno škodlivé rušení.

4. Jednotlivá všeobecná oprávnění (VO) a jejich změny v letech 2016–19

4.1 VO na terminály (VO-R/1)

Toto všeobecné oprávnění vzniklo v roce 2012 sloučením deseti dosavadních všeobecných oprávnění pro jednotlivé druhy terminálů. Zahrnuje terminály pro veřejné sítě typu GSM, UMTS, LTE, terminály pro širokopásmové přístupové sítě, družicové terminály i specifické terminály (TETRA, terminály železničních sítí apod.). Změny v letech 2016–18 přinesly zejména přidání kmitočtových pásem 700 MHz a 3 400–3 800 MHz pro terminály v sítích, které jsou předmětem posledních aukcí kmitočtů, a úpravu podmínek pro družicové terminály.

4.2 VO na místní informační systémy BMIS (VO-R/2)

Vzhledem k velkému zájmu o bezdrátové místní informační systémy BMIS („obecní rozhlas“) bylo v roce 2018 přidáno osm nových kmitočtů v pásmu 80 MHz.

4.3 VO na stanice PMR 446 (VO-R/3)

V roce 2016 bylo v souladu s rozhodnutím ECC rozšířeno využívání obou kmitočtových úseků pro systémy s analogovou i digitální modulací.

4.4 VO na občanské (CB) stanice v pásmu 27 MHz (VO-R/7)

Po větší změně podmínek provozování občanských radiostanic v roce 2015 byla provedena drobná změna v roce 2016 (povoleno vysílání krátkých varovných informačních zpráv subjekty dopravní infrastruktury).

4.5 VO na bezšňůrové telefony DECT (VO-R/8)

Zde nedochází ke změnám a s využitím pásma se počítá i nadále, i když význam bezšňůrových telefonů dále klesá.

4.6 VO na zařízení krátkého dosahu (VO-R/10)

Toto obsáhlé všeobecné rozhodnutí bývá každoročně aktualizováno, zpravidla v návaznosti na aktualizace evropských rozhodnutí a doporučení. Mezi nejvýznamnější změny posledních čtyř let patří:

- přidání podmínek pro pásmo < 9 kHz, v souladu s novou evropskou legislativou, která v definici rádiového vysílání odstraňuje spodní hranici 9 kHz;
- upřesnění kmitočtů pro bezdrátové mikrofony (bude ukončen provoz v pásmu 694–786 MHz, přidáno pásmo 863–865 MHz, rozšířeno pásmo 1 800 MHz);
- nová pásma pro širokopásmová zařízení krátkého dosahu 853–868 MHz, 874 MHz, 917–919 MHz).

4.7 VO pro širokopásmový přenos dat 2,4–66 GHz (VO-R/12)

V tomto VO zatím nedošlo ke změnám, ale v souvislosti s rozšířením pro účely RLAN (5,8 GHz; 6,4 GHz; 60 GHz – viz přednáška Ing. Šístka) se předpokládá změna v nejbližším období.

4.8 VO pro pevné spoje v pásmu 10 GHz (VO-R/14)

Jedná se o specificky české využití tohoto pásma. O ukončení provozu se zatím neuvažuje.

4.9 VO pro ovládání modelů 13–40 MHz (VO-R/15)

Neuvažuje se o změnách (viz též bod 5.3 – drony).

4.10 VO pro „sdílené kmitočty“ 27–450 MHz (VO-R/16)

Neuvažuje se o změnách. Je však nutno upozornit, že jde o specificky české kmitočty, které není možno takto využívat nikde v zahraničí.

4.11 VO pro bezšňůrové telefony CT0 (VO-R/17)

Jedná se již o „historické“ využívání kmitočtů v pásmu 30 MHz. Z důvodu malého zájmu o toto kmitočtové pásmo se zatím neuvažuje o změnách.

4.12 VO pro pevné spoje 70/80 GHz (VO-R/23)

V roce 2017 byly upřesněny podmínky využití pásma v souvislosti se změnou harmonizované normy. V tomto pásmu se již úspěšně používá elektronická evidence spojů (registrace), která by se měla v budoucnu použít i pro spoje v dalších nově zpřístupněných pásmech.

4.13 VO pro opakovače uvnitř tunelů, budov a vlaků (VO-R/24)

Na základě zájmu o zlepšení pokrytí vnitřků vlakových vagonů pomocí opakovačů byl v roce 2019 přidán článek 5 vztahující se na pokrytí vnitřků vagonů vlaků signálem širokopásmových mobilních sítí. V tomto článku byly stanoveny podmínky vycházející

z provedených měření a poznatků z monitorování rádiového spektra a provádění kontroly složkami ČTÚ.

4.14 VO pro sledování pohybu psů (VO-R/25)

V roce 2017 bylo vydáno nové všeobecné oprávnění pro kmitočet 155,45 MHz, který může být nyní využíván zařízeními pro sledování pohybu psů. Tento kmitočet je pro tyto účely volně přístupný v několika evropských zemích (tzv. „Jagdfrequenz“), u nás bylo dříve jeho využití omezeno.

5. Další výhled ve všeobecných oprávněních

5.1 Zařízení pro bezdrátový přenos zvuku

V této kategorii (dříve označované jako „Bezdrátové mikrofony“) patří Česká republika k liberálnějším zemím v rámci EU – ve mnoha státech je používání mikrofonů v pásmech UHF regulováno nutností získat za poplatek povolení nebo provést registraci. Rozvoj širokopásmových sítí však přináší s omezením pásem pro TV vysílání i omezení pásem pro audio aplikace. První a druhá digitální dividenda (2013 a 2020) tak omezují původní pásmo 470–862 MHz až na 470–694 MHz. Určitou kompenzací jsou tak nová pásma 863–865 MHz (volně přístupné v celé EU) a 1785–1805 MHz (volně přístupné v některých státech), v nichž již jsou mikrofony dostupné na trhu.

5.2 Zařízení IoT, M2M

Zařízení Internetu věcí IoT (*internet of things*) a komunikace mezi zařízeními M2M (*machine-to-machine*) zažívají rychlý vzestup v nejrůznějších oblastech – mohou to být různé senzory, kamerové dohledové systémy, automatické měřiče energií, v průmyslu pak systémy automatizace rozvodných sítí (*smart grid*), systémy identifikace zboží RFID (*radio frequency identification*), aplikace bezkontaktních plateb, ovládání poličního osvětlení, monitoring kvality vzduchu, správa výdejových automatů, dohled výtahových systémů, radarová čidla, čidla tlaku v pneumatikách v automobilech apod.

Tato zařízení využívají nejrůznější kmitočtová pásma v rámci všeobecných oprávnění. Velkou podporu těmto technologiím představují již provedená i v blízké budoucnosti připravovaná zavedení nových volných pásem pro širokopásmový přenos dat zařízení krátkého dosahu.

5.3 Drony

V červnu 2019 byla zveřejněna nařízení EK 2019/947 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel a nařízení EK 2019/945 o bezpilotních systémech a o provozovateli bezpilotních systémů ze třetích zemí. Tato nařízení definují třídy dronů (do 250 g, do 4 kg, do a nad 25 kg) a podmínky jejich provozování. Nařízení stanoví povinnosti provozovatelů, aby veškerý provoz efektivně využíval rádiové spektrum a podporoval jeho účinné využívání, aby se zabránilo škodlivé interferenci. Drony tak mohou využívat různé kmitočty na všeobecná i individuální oprávnění,

pokud splňují stanovené podmínky. Specifické všeobecné oprávnění pro drony tak nemusí být vydáno.

Zpráva CEPT uvádí jako příklad vhodných volných kmitočtů pro drony tato pásma:

- 27 MHz; 35 MHz; 40 MHz (VO-R/15);
- 27 MHz; 40 MHz; 433 MHz; 863–870 MHz; 2,4 GHz; 5,725–5,875 GHz (VO-R/10);
- 2,4 GHz (VO-R/12).

Za pásma v Evropě pro drony nepoužitelná jsou naopak označována pásma 5,15–5,35 GHz (povoleno pouze indoor provoz) či 5,47–5,725 GHz (drony nesplňují podmínku DFS).

5.4 Bezdrátový přenos energie

V současnosti probíhají paralelně studie v několika různých regulačních a normalizačních orgánech (ITU, ETSI, CISPR atd.), týkající se bezdrátového přenosu energie WPT (*wireless power transmission*) nejen pro zařízení typu mobilní telefony, ale i např. pro vysoko-výkonová nabíjení elektromobilů. Typické kmitočty pro tyto aplikace jsou 9–300 kHz, 6,7 MHz či 13,56 MHz. Nabíječky se považují za rádiová zařízení, pokud u nich současně s nabíjením dochází i k přenosu informace.

5.5 Dopravní aplikace

Kromě u nás známých mýtných systémů nabývají na významu aplikace typu ITS (*intelligent transport systems*), UrbanRail (příměstské vlaky, často bez řidiče) apod. Pro tyto aplikace se hledají další bezlicenční pásma, typicky nad 5,8 GHz.

6. Požadavky na rádiová zařízení

Od roku 2017 je možné uvádět na trh a do provozu pouze rádiová zařízení, u nichž byla posouzena shoda se základními požadavky směrnice 2014/53/EU, o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání rádiových zařízení na trh a zrušení směrnice 1999/5/ES (u nás implementované nařízením vlády č. 426/2016 Sb., o posuzování shody rádiových zařízení při jejich dodávání na trh a zákonem č. 90/2016 Sb., o posuzování shody stanovených výrobků při jejich dodávání na trh). Každé rádiové zařízení musí mít označení CE a musí k němu být k dispozici EU Prohlášení o shodě (*EU Declaration of Conformity*), které deklaruje shodu se třemi základními požadavky, jimiž jsou účelné využívání rádiového spektra, EMC a bezpečnost. Evropská komise v současnosti projednává akty v přenesené pravomoci, jimiž se stanoví další základní požadavky pro některá zařízení (jednotné nabíječky, ochrana osobních údajů a soukromí uživatele, přístup k tísňovým službám, požadavky na software).

7. Závěr

Množství zařízení využívajících rádiové kmitočty v domácnostech i v průmyslu se stále zvětšuje. Kromě potřeby koordinovaných sítí nových generací (5G) jsou zapotřebí i nová pásma pro volné využití v rámci všeobecných oprávnění. Takové využití však s sebou nese zvýšené nebezpečí nežádoucího rušení, a proto je třeba na evropské i národní úrovni nadále upřesňovat podmínky pro takové využití spektra a dodržování těchto podmínek účinně kontrolovat, aby všichni uživatelé měli možnost svá zařízení efektivně používat.

8. Literatura

- [1] Web Českého telekomunikačního úřadu <<http://www.ctu.cz>> (obsahující opatření obecné povahy – všeobecná oprávnění a plán využití rádiového spektra).
- [2] PROVÁDĚCÍ ROZHODNUTÍ KOMISE (EU) 2017/1483, kterým se mění rozhodnutí 2006/771/ES o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého dosahu a zrušuje rozhodnutí 2006/804/ES.
- [3] ERC Recommendation 70-03, Relating to the use of Short Range Devices (SRD).
- [4] Macek, J.: Novinky ve všeobecných oprávněních. Sborník přednášek XXV. konference Radiokomunikace, Pardubice 2015.

Rozšíření pásem 5 GHz pro účely RLAN (5,8 GHz, 6,4 GHz, 60 GHz)

Ing. Pavel Šístek

Český telekomunikační úřad

1. Úvod

Požadavky na vysokorychlostní připojení zákazníků směřují pozornost k bezdrátovým řešením v pásmech s režimem všeobecného oprávnění, a to z řady důvodů. V ČR k nim patří určitá tradice v oblasti oblíbenosti rádiové platformy a také praktické důvody řešení na poslední metry v místech, kde z řady důvodů (časových, investičních, procesních aj.) nelze zřídit optickou či metalickou kabelovou přípojku, nebo kde například potenciální zákazníci představují zajímavou obchodní příležitost (soutěžní aspekty). V evropském kontextu je společným rysem také hledání prostoru pro širší rádiové kanály, které přispívají k vyšším dosažitelným rychlostem, a to i v situaci poměrně nevýhodných omezení (např. limitovaný vyzářený výkon nebo omezení na provoz jen uvnitř budov). Tyto požadavky soustředily zájem do pásem 6,4 GHz a 5,8 GHz, která jsou v Evropě předmětem studií organizace CEPT [1] pro harmonizované nasazení WAS/RLAN¹.

K atraktivním pásmům pro venkovní provoz WAS/RLAN a pro další aplikace patří také pásmo 60 GHz, v němž byl zahájen národní inovativní záměr zpřístupnění pásma pro sdílené využití různými typy technologií, zahrnujícími jak ty, které jsou již technologicky uzpůsobeny ke vzájemnému sdílení kmitočtů bez potřeby koordinace, tak i aplikacemi, které nejsou vybaveny mitigačními technikami a pro své umístění předpokládají koordinaci.

Příspěvek je zaměřen zejména na podmínky využívání rádiových kmitočtů a na přípravu uvolnění uvedených pásem v ČR a v Evropě. Popsány jsou i hlavní souvislosti, které vedly k formulaci záměrů pro jednotlivá pásma.

2. Jak se myšlenka pásem 5,8 GHz, 6,4 GHz a 60 GHz zrodila?

Hledání pásem pro přímé připojení zákazníků a související harmonizace ve světě je úzce propojena s řešením harmonizace pásem pro sítě IMT, k nimž patří sítě 4G a 5G. Požadavky na mobilitu na úrovni koncových přenosných terminálů soustřeďují zájem na technologii z rodiny IMT2020 (mobilní aplikace) a z rodiny IEEE 802 (lokálních sítí). Jednotlivé platformy se vzájemně doplňují; dokladem této synergie je například standardní výbava každého smartphone (a dalších přenosných zařízení) připojením na LTE, WiFi a Bluetooth. S ohledem na růst spotřeby dat a zvyšování nároků na dosažitelné rychlosti bezdrátového připojení probíhá na úrovni mezinárodních organizací trvalé hledání dalších kmitočtových pásem pro jednotlivé platformy, a to někdy i za cenu poměrně náročných požadavků na výroby nebo provozní podmínky (příkladem je 5G

¹ Bezdrátové přístupové systémy WAS (*wireless access systems*), jejichž součástí jsou rádiové místní sítě RLAN (*radio local area network*).

v pásmu 26 GHz). Hledání nových pásem přitom musí probíhat ve velkém časovém předstihu před očekávaným požadavkem zákazníků nebo vývojem vlastních aplikací. Významnou roli proto hrají predikční modely.

2.1 Pásmo 5,8 GHz

V roce 2012 Světová radiokomunikační konference WRC-12 otevřela studijní bod Agenda Item AI 1.1 s cílem identifikovat další pásma pro systémy IMT na konferenci WRC-15. V evropské organizaci CEPT [1] byl úkol svěřen týmu CPG PT-D (jenž úzce spolupracoval s týmem ECC PT1 zabývajícím se IMT), který připravoval návrhy pozic na konferenci WRC-15. Ke zkoumaným úsekům patřila pásma 5 350–5 470 MHz, 5 725–5 850 MHz a 5 850–5 925 MHz. S ohledem na složitou kompatibilitu s dalšími službami využívajícími pásma zůstalo po nějakou dobu ve hře jen pásmo 5 725–5 850 MHz (dále jen „5,8 GHz“) s tím, že potenciální aplikací by mohl být LTE-LAA² nebo RLAN s přihlédnutím k jeho využití v řadě regionů amerického kontinentu, v Asii a jinde. Vzhledem k velkému vytížení expertů při zpracování návrhů globální harmonizace prioritních pásem 700 MHz (bod AI 1.2) a 3,4–3,8 GHz ale byly dále rozpracovány návrhy pro další pásma AI 1.1, a tato „nedořešená“ pásma (vč. pásma 5,8 GHz) byla Evropou navržena na WRC-15 k analýze pro druhé studijní období (období WRC-19), a to v rámci bodu agendy AI 1.16, jehož se opět ujal tým CPG PT-D.

Národní koncepční záměr pro pásmo 5,8 GHz byl oznámen ve Strategii správy rádiového spektra (2015)³. ČTÚ zahájil přípravu zpřístupnění pásma v červnu 2016 s tím, že návrh řešení v létě 2018 dospěl do natolik stabilizované podoby, že ČR navrhla v týmu CPG PT-D v rámci bodu AI 1.16 řešení, které by splnilo jednak zadání z WRC-15 (Rezoluce 239), a jednak by mohlo vyřešit specifické požadavky Evropy k ochraně rádiových částí výběru elektronického myta, a přispět k ochraně necivilních radiolokačních systémů. Řešení bylo založeno mj. na:

- *registraci stanic WAS/RLAN,*
- *vymezení ochranných zón* v oblastech, kde není provoz WAS/RLAN žádoucí,
- *doplňkově instalaci autonomních měřicích sond,* které jsou instalovány v problematických místech s cílem monitorovat využití kmitočtů.

Z důvodu potřeby jasného zajištění kompatibility s necivilními radiolokačními systémy provozovanými v řadě evropských zemí ale návrh ČR (podporovaný dalšími zeměmi) k AI 1.16 nezískal potřebnou většinovou podporu zemí CEPT v rámci přípravy Evropy na globální konferenci WRC. Záměr byl proto procesně převeden na úroveň evropskou, a to s cílem ošetřit čistě evropské potřeby, a získal nakonec potřebný zájem administrací pro hledání řešení v regionu Evropy a na jednání CEPT WGFM v červnu 2019, kde byl schválen nový pracovní bod (mimo agendu WRC), jehož cílem je formulace podmínek pro využití pásma 5,8 GHz s nasazením geolokace a dalších inovativních

² LTE-LAA (*long term evolution – license assisted access*).

³ Strategie správy rádiového spektra (přijata vládou 2015).

postupů. Termínem pro první výstupy je rok 2020 a nadále se předpokládá aktivní účast ČR.

2.2 Pásmo 6,4 GHz

Vzhledem ke složitosti harmonizace pásma 5,8 GHz se pozornost telekomunikačních správ v roce 2017 přesunula do pásma 5925–6425 MHz (pásmo „6,4 GHz“), jehož určení pro (obecně) vysokorychlostní aplikace (vč. WAS) navrhla Ruská federace již v roce 2014, ale koncept nebyl žádnou evropskou zemí v té době podpořen, protože pásmo je v řadě zemí využíváno mikrovlnnými spoji na dlouhé vzdálenosti. Přesto se po podrobnějším zpracování iniciačních analýz ukázalo, že proveditelnost sdílení WAS/RLAN s mikrovlnnými spoji civilních uživatelů je pravděpodobně schůdnější, než proveditelnost sdílení WAS/RLAN s necivilní radiolokací v pásmu 5,8 GHz, a výsledkem je Mandát Evropské komise organizaci CEPT z roku 2017 [2] ke studiu podmínek sdílení WAS/RLAN v pásmu 6,4 GHz. Úkol byl svěřen v rámci CEPT skupině, která se nově zabývá i pásmem 5,8 GHz. Nelze rovněž vyloučit, že v průběhu jednání konference WRC-19 nebude vznesen návrh na určení pásma 6,4 GHz pro aplikace IMT.

2.3 Pásmo 60 GHz

Toto pásmo se vyznačuje fyzikálním aspektem útlumu atmosférickými plyny (kyslíková absorpce), který významně omezuje dosah použitelné rádiové komunikace, ale zároveň snižuje také dosah potenciálního rušení. S ohledem na potenciální význam pro rozvoj internetu v ČR bylo oznámeno přehodnocení podmínek v pásmu 60 GHz ve Strategii správy rádiového spektra (2015)⁴. Prvním krokem bylo uvolnění uceleného rozsahu 57–66 GHz od přednostního necivilního uživatele v pevné službě prostřednictvím vydání Národní kmitočtové tabulky (2017), a souběžně s tím byly sníženy roční poplatky za využití kmitočtů v pevné službě na 10 %. Tento krok ale nevedl ke zvýšení zájmu o využívání kmitočtů založeném na získání individuálního oprávnění. V expertní mezirezortní skupině PPS Spektrum (zřízené MPO v rámci projednávání bodů Akčního plánu k provedení nedotačních opatření) byl proto otevřen koncem léta 2018 návrh na zpřístupnění pásma 59–66 GHz pro venkovní aplikace na základě všeobecného oprávnění. Pro aplikace typu WAS/RLAN, označované v tomto pásmu také WiGig, MGWS, FWA (norma EN 302 567) by teoreticky stačilo pouze přistoupit k administrativní úpravě příslušných opatření obecné povahy vydávaných ČTÚ, protože tyto aplikace jsou již z výroby vybaveny technikami zmírňujícími vzájemné rušení⁵ a není tedy třeba dalších dodatečných regulatorních opatření. Telekomunikační sektor v ČR ale vyjádřil zájem o možnost provozu pevných mikrovlnných spojů typu bod-bod (norma EN 302 217; označováno také FLANE), které se mohou významně uplatnit při zajišťování vysokorychlostního připojení v ČR⁶. Pevné mikrovlnné spoje

⁴ Úkol ze Strategie zněl takto: „V pásmech nad 57 GHz budou přehodnocovány způsoby autorizace s cílem rozšíření počtu těchto pásem dostupných na základě VO“.

⁵ Zejména CCA/ED (*channel clearance assesment/energy detection*).

⁶ Příležitosti pro tyto aplikace jsou popsány v jiném příspěvku této konference.

ale nejsou technikami zmírňujícími rušení vybaveny a jejich instalace tedy předpokládá předchozí koordinaci. Po analýze problému koexistence dvou nekompatibilních technologií a s přihlédnutím ke studiím kompatibility zpracovaným ve zprávě [3] se ukázalo pro podmínky v ČR jako schůdné řešení formou provozu stanic na všeobecné oprávnění, ale s registrací všech pevných venkovních stanic (viz dále).

V mezičase od roku 2017 probíhala v CEPT harmonizace po dvou liniích: jedna směřovala k povolení pevných venkovních instalací WiGig/MGWS s tím, že využití pásma 60 GHz pevnými mikrovlnnými spoji bude postupně utlumováno. Druhá aktivita probíhala v rámci přípravy CEPT na WRC-19 ve skupině ECC PT1, která projednávala návrhy nových pásem pro IMT, a která připravovala návrh podmínek pro IMT/5G ve shora přilehlém pásmu 66–71 GHz⁷. Na 58. jednání ECC PT1 v dubnu 2018 v Praze byl vznesen požadavek na to, aby v pásmu 66–71 GHz mohly vedle 5G koexistovat také aplikace WiGig/MGWS. Požadavku bylo vyhověno, a výsledkem je rozšíření harmonizace v CEPT pro aplikace WiGig/MGWS v Doporučení ERC 70-03 a v Prováděcím rozhodnutí Evropské komise⁸ pro celé pásmo 57–71 GHz, zatímco podmínky pro IMT/5G jsou teprve předmětem projednání na WRC-19⁹ a případně dalšího vývoje¹⁰.

3. Předpokládané podmínky využití pásma 5,8 GHz a 60 GHz v ČR

Poznámka: Následující předpoklady podmínek vycházejí ze stavu interní přípravy v ČTÚ k datu předání článku do tisku; finální podmínky se mohou změnit podle výsledků veřejné diskuse a dalších okolností.

Na základě stavu vývoje harmonizace v Evropě a s ohledem na příležitosti v ČR byly na úrovni MPO prostřednictvím Akčního plánu 2.0¹¹ navrženy následující kroky směřující k uvolnění kmitočtů vhodných pro řešení jak posledních metrů připojení k zákazníkovi, tak i k propojení infrastruktury sítí:

- *připojení pásma 5 725–5 875 MHz k již využívaným pásmům RLAN,*
- *v pásmu 59–66 GHz rozšířit podmínky o možnost provozu MGWS/RLAN/PtP ve venkovním prostředí, a to s povinností registrace,*
- *v pásmu 66–71 GHz je zvažováno zavedení podmínek pro venkovní provoz pevných instalací MGWS bez dalších regulatorních povinností (tj. bez registrace).*

⁷ V tomto pásmu se již absorpce atmosférickými plyny neprojevuje tak významně, jako v 60 GHz.

⁸ Prováděcí rozhodnutí Komise ze dne 2. 8. 2019 (EU) 2019/1345, kterým se mění rozhodnutí 2006/771/ES o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého dosahu.

⁹ Rámcové podmínky pro 5G budou v případě akceptování Konferencí upraveny pravděpodobně rezolucí WRC.

¹⁰ Technologie 5G pro pásmo 70 GHz zatím nebyly představeny.

¹¹ Akční plán 2.0 k provedení nedotačních opatření pro podporu plánování a výstavby sítí elektronických komunikací.

3.1 Pásmo 5,8 GHz

Připravovaná úprava v ČR předpokládá rozšíření stávajících technických podmínek stanovených pro pásmo 5470–5725 MHz (1 W EIRP¹²) i do pásma 5725–5850 MHz s tím, že podle záměru uživatelé stanic WAS/RLAN budou své stanice v pásmu 5,8 GHz registrovat na novém portále ČTÚ. K hlavním důvodům pro registraci stanic patří:

- *ochrana rádiových částí systému výběru elektronického mytá v ČR*
- *zajištění ochrany radiokomunikačních služeb v mimo ČR v souladu s Ustanoveními 4.2 a 4.4 mezinárodního Radiokomunikačního řádu. Druhá podmínka zahrnuje částečně ochranu radiolokační služby v sousedních zemích a dále ochranu kosmických stanic v družicové službě¹³.*

Uživatelé pásma 5,8 GHz budou mít na portále k dispozici řadu funkcionalit k usnadnění správy svých stanic (mapové vizualizace, import a export údajů a další). Pro registraci bude využit jen minimální nezbytný rozsah údajů s tím, že rozsah těchto údajů bude z hlediska GDPR¹⁴ odůvodněn proporcionálním testem¹⁵ (balanční test), jímž bude provedeno odůvodnění veřejného zájmu při zavedení registračního portálu a zpracování osobních údajů. Balanční test sestává z testu potřebnosti (vhodnosti)¹⁶, testu nutnosti¹⁷ a popisu legitimního očekávání¹⁸.

3.2 Pásmo 60 GHz

Zde jsou připravovány národní regulatorní podmínky, které umožní jak venkovní provoz¹⁹ pevně instalovaných stanic podle evropsky harmonizovaných podmínek (aplikace WiGig/MGWS/FWA, EN 302 567), tak navíc i provoz mikrovlnných stanic typu bod-bod (též označováno FLANE, EN 302 217). Předpokládané podmínky v ČR jsou tyto:

Provoz na základě všeobecného oprávnění k využívání kmitočtů VO-R/12 a zamýšlená registrace pevných venkovních instalací prostřednictvím webového portálu.

Předpokládány jsou tři způsoby využití spektra zahrnující oba typy technologií a směrové i sektorové antény:

- *směrové WAS/WiGig/MGWS (EN 302 567): max. EIRP 55 dBm, zisk min. 30 dBi;*

¹² A další upřesňující parametry.

¹³ V tomto případě jde o agregovaný efekt provozu WAS/RLAN vůči přijímačům kosmických stanic.

¹⁴ Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2016/679 ze dne 27. dubna 2016, o ochraně fyzických osob v souvislosti se zpracováním osobních údajů a o volném pohybu těchto údajů a o zrušení směrnice 95/46/ES.

¹⁵ Posouzení vlivu na ochranu osobních údajů ke Všeobecnému oprávnění stanovujícímu podmínky k využití pásma 5,8 GHz a k Registračnímu portálu.

¹⁶ Zejména popis očekávaných přínosů a posouzení alternativních variant.

¹⁷ Posouzení zvoleného přístupu a přiměřenosti.

¹⁸ Sem patří mj. informování subjektu údajů, zamýšlený účel a metoda zpracování údajů, předpokládané očekávání subjektu údajů, dopady, popis rizik a další.

¹⁹ Provoz malovýkonových SRD (EN 305 550) vč. vnitřních SRD je možný na základě všeobecného oprávnění VO R/10.

- *nesměrové WAS/WiGig/MGWS* (EN 302 567): max. EIRP 40 dBm a přivedený výkon max. 27 dBm;
- *pevné spoje* podle EN 302 217: max. EIRP 55 dBm, zisk min. 30 dBi.

Provozní podmínky pro směrové stanice obou typů technologií jsou tedy shodné. Protože stanice podle EN 302 217 vyžadují odlišné provozní podmínky z hlediska akceptovatelné míry rušení (C/I), jejich umístění předpokládá provedení některých základních prvků zjednodušené koordinace s dalšími uživateli. K tomuto účelu uvede v rámci registrace každý uživatel jakékoliv venkovní pevně instalované stanice sadu několika základních údajů²⁰, které algoritmus portálu vyhodnotí a vrátí uživateli indikativní ukazatele k volbě umístění stanic a jejich parametrů²¹. Podle aktuálních předpokladů budou z hlediska GDPR uvedeny jen minimální nezbytné údaje potřebné pro vzájemnou koordinaci uživatelů²² s tím, že tyto údaje nebudou zveřejněny.

4. Závěr

Pro překlenutí posledních desítek či stovek metrů při zajišťování pevného bezdrátového připojení k internetu s využitím technologií dostupných na trhu nabízejí potenciální využití pásma 5,8 GHz a 60 GHz. Na evropské úrovni je rovněž studováno pásmo 6,4 GHz. Společným rysem je využití kmitočtů na základě všeobecného oprávnění, s případným doplněním o registraci pevně instalovaných venkovních stanic v těch zemích, kde se předpokládá koexistence s technologiemi, které nejsou výrobně či provozně uzpůsobeny na sdílení. S ohledem na proveditelnost společného využití kmitočtů jsou hledány inovativní způsoby sdílení, včetně prvků geolokačních databází, které postupně přenášejí odpovědnost za společné využívání národního zdroje – rádiového spektra – na samotné uživatele, bez potřeby úkonů na straně správce spektra. Tzn., že se uplatňuje efektivní zajištění přístupu uživatelů ke spektru na principu samoregulace. S ohledem na potřebu zpracování některých osobních údajů v registračních databázích v situacích, kdy není zmocnění pro jejich zpracování specificky upraveno zákonem o elektronických komunikacích, je vhodné stanovit jejich rozsah formou balančního testu.

Některé prvky konceptů registračních databází připravovaných v ČR jsou či budou projednávány v rámci evropské harmonizace.

5. Seznam použitých zdrojů

- [1] Evropská konference správ pošt a telekomunikací CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations), <<http://www.cept.org>>.

²⁰ Geografické souřadnice, EIRP, šířky kanálů a další údaje.

²¹ Tzv. koordinační kalkulačka.

²² Zejména e-mailová adresa.

- [2] Mandate to CEPT to study feasibility and identify harmonised technical conditions for wireless access systems including radio local area networks in the 5 925–6 425 MHz band for the provision of wireless broadband services, <<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/radio-spectrum-cept-mandates-0>>.
- [3] Zpráva ECC 288 z ledna 2019: Podmínky koexistence mezi pevnou službou a dalšími venkovními aplikacemi v pásmu 57–66 GHz.

Plánované aktivity státu v elektronických komunikacích

Ing. Vilém Veselý

Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR

Za hlavní aktivity státu považujeme zejména transpozici Evropského kodexu pro elektronické komunikace, a dále finální fázi přechodu zemského digitálního TV vysílání na standard DVB-T2/HEVC, včetně výhledu v oblasti TV vysílání do roku 2030. Dalšími připravovanými dokumenty jsou Národní plán rozvoje sítí s velmi vysokou kapacitou, Akční plán 2.0 k provedení nedotačních opatření pro podporu plánování a výstavby sítí elektronických komunikací, stejně jako informační materiál k zavádění mobilních sítí páté generace.

Finalizace přechodu zemského televizního vysílání na nový standard bude spočívat v ukončení vysílání ve standardu DVB-T a přeladění vysílacích sestav na kmitočty použité ve finálních sítích DVB-T2/HEVC, což bude řízený proces v souladu s Technickým plánem přechodu, který schválila vláda v srpnu 2018 jako nařízení vlády č. 199/2018 Sb.¹ Samotný průběh se bude opírat především o postupné vypínání stávajícího vysílání na všech vysílacích lokalitách mezi listopadem 2019 a červnem 2020. Plánuje se přestávka v prosinci, aby v tomto období nebyla nepříznivě ovlivněna možnost sledování oblíbených pořadů.

Nedílnou součástí přechodu na nový vysílací standard je ovšem také proces prodloužení přidělů rádiových kmitočtů pro operátory vysílacích sítí a finanční kompenzace ze strany státu. Tyto kroky nejsou samoučelné, navíc jsou vyvolané vnějšími faktory, které významně ovlivňují stav výhradně zemské platformy digitálního televizního vysílání. Jednotlivé souvislosti obecného postupu, který má za cíl co nejmenší dopad na příjemce zemského televizního vysílání, stanovila již v roce 2016 vláda ve Strategii rozvoje zemského digitálního televizního vysílání, kterou schválila svým usnesením ze dne 20. července 2016 č. 648.²

Plánovaný souběh vysílání v obou standardech odráží statistické údaje o průměrné době obměny televizních přijímačů v domácnostech (což je přibližně 7 let), je po dohodě na vládní úrovni stanoven zhruba na polovinu této doby. Základní představa je, že v průběhu této doby by si „statistická polovina“ domácností stejně pořídila nový přijímač, který by již zvládal příjem v novém systému, proto by se vynucené zkrácení cyklu obměny týkalo pouze zbývajících poloviny domácností.

S ohledem na fakt, že proces implicitně obsahuje prvky státní podpory, probíhá už od podzimu 2016 intenzivní komunikace ČR s generálním ředitelstvím Evropské komise pro hospodářskou soutěž. Státy jsou povinny Evropské komisi notifikovat

¹ <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-199>

² <https://www.mpo.cz/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepcie-a-strategie/strategie-rozvoje-zemskoho-digitalniho-televizniho-vysilani/strategie-rozvoje-zemskoho-digitalniho-televizniho-vysilani--178373/>

případy státní podpory a spolupracovat na posouzení, zda jsou slučitelné s právem EU, či nikoliv. V zájmu co nejjednoduššího průběhu formálního správního řízení v posouzení slučitelnosti státní podpory s právem EU probíhá neformální „prenotifikační“ proces, v němž dochází k postupnému vyjasňování záměrů ČR a formování stanoviska Evropské komise.

V současné době se jednání nachází ve stavu, kdy Komise již neformálně přijala argumentaci ČR v otázce nefinančních kroků, tedy prodloužení kmitočtových přidělů pro stávající provozovatele zemských vysílacích sítí do roku 2030, v souladu s článkem 4 Rozhodnutí Evropského parlamentu a Rady (EU) 2017/899 o využívání kmitočtového pásma 470–790 MHz v Unii.³

Důležitým bodem, který zbývá přes obsáhlou korespondenci a několik osobních diskusí a jednání vyjasnit, tak zůstává zejména konstrukce systému finančních kompenzací, které se ČR připravuje vyplatit provozovatelům zemských vysílacích sítí za politické rozhodnutí o opuštění kmitočtového pásma 700 MHz před vypršením platnosti kmitočtových přidělů celoplošných vysílacích sítí č. 1, 2, 3 a 4. Nejde přitom o „plnou“ úhradu investičních nákladů, ale o kompenzaci za náklady vynaložené na „přeladění“ zemských televizních vysílacích sítí ze standardu DVB-T na DVB-T2, resp. na přechodové sítě 11, 12 a 13 – tedy od března 2017 do června 2020. ČR předává do Bruselu striktně věcné a právně a odborně opodstatněné argumenty pro to, aby proces kompenzací mohl být nakonec v notifikačním řízení ze strany Evropské komise schválen.

Jak plyne z výše uvedeného, strategií státu tedy je uspořádání systému zemského digitálního televizního vysílání v ČR do roku 2030 v rozsahu vládou schváleného Technického plánu přechodu a dalších dokumentů (jako je třeba Zákon č. 252/2017 Sb., kterým se mění zákon o elektronických komunikacích a zákon o České televizi), a to z důvodů udržitelnosti, stability a investiční jistoty na trhu zemského televizního vysílání. K dispozici bude i pátá finální síť a v případě, že to technické a fyzikální podmínky dovolí, bude sestavena i šestá síť, která se zaměří hlavně na regionální vysílání.

Účelem v žádném případě není protežování jedné vysílací platformy. Hlavním smyslem je zachování jediné možnosti bezplatného příjmu televizního vysílání v co největší možné míře odpovídající současnému stavu, kdy dle uskutečněných průzkumů na zemském televizním vysílání plně závisí (je jediným zdrojem příjmu televizního signálu) cca 40 % domácností a jako jeden z druhů příjmu jej uvádí přibližně 60 % českých domácností. Způsob a uspořádání využití kmitočtového pásma do 700 MHz po roce 2030 pak bude do značné míry záviset na výsledcích jednání Světových radiokomunikačních konferencí Mezinárodní telekomunikační unie, a také na jejich převedení do prostředí EU. V současné době nelze jednoduše a jednoznačně uvést, zda dojde k zásadním změnám, nebo bude toto pásmo i nadále zachováno pro zemské televizní vysílání.

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32017D0899>

Pokud jde o transpozici Evropského kodexu pro elektronické komunikace – Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1972, kterou se stanoví evropský kodex pro elektronické komunikace⁴ – do českého právního řádu, Ministerstvo průmyslu a obchodu intenzivně pracuje na přípravě novely zákona o elektronických komunikacích, za úzké spolupráce s ČTÚ, ale i s odbornou veřejností.

Do současné doby (přelom července a srpna) se konalo několik tematických jednání, na kterých se diskutovalo nad návrhy ministerstva, jak transponovat jednotlivé části kodexu do českého právního řádu. Kodex přitom nepřináší velkou sadu zásadních změn v koncepci regulace odvětví elektronických komunikací, jako spíše řadu dílčích aktualizací a modernizací právní úpravy tak, aby odpovídala současnému stavu technologického a ekonomického rozvoje této oblasti. Hlavní viditelnou úpravou tak je konsolidace 4 směrnic (rámcové, přístupové, autorizační a o univerzální službě) do jednoho všeobjímajícího textu kodexu. Právě z tohoto důvodu byla zvolena cesta novelizace stávající právní úpravy namísto vytvoření úplně nového zákona. Namnoze totiž bylo analýzou textu zjištěno, že transpoziční úpravy v českém právu nebudou nutné, neboť i při změnách je současná úprava postačující pro naplnění cílů směrnice.

Časový plán přijetí novelizovaného zákona o elektronických komunikacích nadále zůstává následující: na podzim bude připraven text pro meziresortní připomínkové řízení, po jeho proběhnutí a vypořádání připomínek bude text předložen ke schválení vládě, a následně potom k projednání parlamentu tak, aby finální text byl přijat a vyšel ve sbírce zákonů nejpozději v prosinci 2021.

Pokud jde o správu kmitočtového spektra, přináší kodex například širší možnosti národních regulátorů při výběrových řízeních na využití těch částí spektra, pro něž byly stanoveny harmonizované podmínky technickými prováděcími opatřeními v souladu s rozhodnutím o předpisovém rámci pro politiku rádiového spektra (676/2002/ES) s cílem umožnit jeho využití pro bezdrátové širokopásmové sítě a služby. V takovém případě regulační orgán informuje RSPG (*radio spectrum policy group*) o příslušných návrzích opatření, a zároveň je možné požádat, aby RSPG svolala fórum pro vzájemné hodnocení – *Peer Review Forum*. Členské státy mají zajistit, aby přidělená práva byla platná po dobu alespoň 15 let a aby v případě potřeby zahrnovala možnost přiměřeného prodloužení této doby v souladu se stanovenými podmínkami. Nejpozději dva roky před uplynutím původní doby platnosti individuálního práva na užívání provede národní regulační orgán objektivní a do budoucna zaměřené posouzení obecných kritérií stanovených pro prodloužení platnosti uvedeného práva na užívání. V případě, že držitel oprávnění splní všechny požadované podmínky, uvažuje se v návrhu české právní úpravy s možností prodloužení o 5 let. Kritéria podle kodexu znamenají zajištění účinného a efektivního užívání dotyčného rádiového spektra, plnění cílů obecného zájmu týkajících se zajištění bezpečnosti života, veřejného pořádku, veřejné bezpečnosti nebo

⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32018L1972>

obranu, nebo zajištění nenarušené hospodářské soutěže. Tento model „15 + 5“ jistě ještě bude předmětem dalších diskusí v průběhu schvalovacího procesu.

Kodex také nově upravuje přístup k místním rádiovým sítím. Státy mají zajistit, aby poskytovatelé veřejných sítí elektronických komunikací nebo veřejně dostupných služeb elektronických komunikací jednostranně neomezovali koncové uživatele ani jim nebránili v přístupu k rádiovým místním sítím poskytovaným třetími stranami podle svého výběru, nebo v umožňování recipročního nebo širšího přístupu jiným koncovým uživatelům k sítím těchto poskytovatelů prostřednictvím rádiových místních sítí. Státy nemají omezovat koncové uživatele v umožňování přístupu jiným koncovým uživatelům, ať již recipročně či jinak, k jejich rádiovým místním sítím, ani jim v tom bránit.

Kodex zmiňuje i koordinované načasování přidělení konkrétních pásem 5G. Pokud jde o pozemní systémy schopné poskytovat bezdrátové širokopásmové služby, členské státy do 31. prosince 2020 přijmou veškerá vhodná opatření s cílem nově uspořádat pásmo 3,4–3,8 GHz a umožnit využívání dostatečně širokých úseků tohoto pásma, umožnit užívání alespoň 1 GHz v pásmu 24,25–27,50 GHz, pokud je jasně prokázána tržní poptávka a absence závažných překážek, které by bránily přechodu stávajících uživatelů pásma nebo uvolnění pásma.

Z dalších aktivit státu na poli elektronických komunikací je třeba zmínit některé připravované a projednávané dokumenty, mající charakter koncepcí, strategií, či alespoň vizí.

Jedním z nich je „Akční plán 2.0 k provedení nedotačních opatření pro podporu plánování a výstavby sítí elektronických komunikací“, který prochází schvalovacím řízením. Hlavní myšlenkou je, že plnohodnotných hospodářských a sociálních přínosů digitální ekonomiky v České republice bude možné dosáhnout jen tehdy, pokud se dokáže zajistit široké zavádění a používání pevných a mobilních vysokokapacitních sítí elektronických komunikací, a to ve venkovských oblastech i městských aglomeracích. Proto bude nezbytné provést řadu opatření, která postupně nastaví podmínky pro akceleraci investování do infrastruktury elektronických komunikací. Ministerstvo průmyslu a obchodu a Český telekomunikační úřad, spolu s ostatními ústředními orgány státní správy a společně s platformou odborné veřejnosti, průběžně realizovali dříve stanovené úkoly a postupně vyvstala otázka vzniku aktuálního dokumentu, který bude efektivněji řešit předmětnou problematiku v postupně se měnícím prostředí stavebního práva České republiky. Ministerstvo průmyslu a obchodu bude pravidelně informovat vládu o pokroku v realizaci Akčního plánu 2.0, a to s roční periodicitou vždy do 30. října každého kalendářního roku. Konkrétně se nový akční plán, mimo jiné, věnuje překážkám a zvýšeným finančním nárokům negativně ovlivňujícím plánování a výstavbu sítí elektronických komunikací, otázkám územního plánování, sdílení informací o neveřejně pasivní infrastruktuře, sdílení vnitřních komunikačních vedení, zjednodušení procesu vyvlastnění, vytvoření digitálních technických map kompatibil-

ních s modelem stávajících krajských projektů DTM, výši náhrad za zřizování věcných břemen, umístování sítí elektronických komunikací do zelených ploch, přijetí opatření, které povede k povinnému umístování fyzické infrastruktury v liniových stavbách realizovaných v extravilánu státními podniky a krajskými organizacemi, včetně silnic 2. a 3. tříd.

Jedním z již schválených a platných dokumentů, které se týkají zejména oblasti výstavby infrastruktury elektronických komunikací, je Metodická pracovní pomůcka k vztahu mezi zákonem o elektronických komunikacích, zákonem o opatřeních ke snížení nákladů na zavádění vysokorychlostních sítí elektronických komunikací, stavebním zákonem a zákonem o urychlení výstavby dopravní, vodní a energetické infrastruktury a infrastruktury elektronických komunikací. Jde o metodické doporučení Ministerstva pro místní rozvoj a Ministerstva průmyslu a obchodu.⁵ Cílem této pomůcky je vysvětlit vzájemný vztah zákonů upravujících pravidla zavádění vysokorychlostních sítí, podmínky podnikání a výkon státní správy včetně regulace trhu v oblasti elektronických komunikací a postupy při přípravě, umístování a povolování staveb infrastruktury elektronických komunikací, při získávání práv k pozemkům a stavbám potřebných pro uskutečnění uvedených staveb a uvádění těchto staveb do užívání, který se v praxi ukazuje jako problematický.

Připravuje se také materiál s předběžným názvem „Implementace a rozvoj sítí 5G v České republice“, který je spíše shrnutím vizí, má být informačním zdrojem o tom, co je 5G, co se od 5G očekává, včetně návrhu časového plánu zavádění sítí páté generace. Stejně tak je v přípravě nový národní plán rozvoje sítí elektronických komunikací s velmi vysokou kapacitou, který by měl definovat, co stát v této oblasti zamýšlí, jakým způsobem celou záležitost uchopí a jak chce zajistit, aby elektronické komunikace byly především podporou a oporou obyvatelům ČR při jejich práci, vzdělávání a dalších činnostech.

Jak vidno, aktivit v tak dynamickém odvětví, jakým jsou elektronické komunikace, je nepřehledné množství nejenom na straně státu, ale pochopitelně i na straně průmyslu, firem, které se zabývají ať už technikou, výrobou a instalací jednotlivých prvků infrastruktury, nebo poskytováním služeb v podobě přenosů informací nebo třeba uživatelských aplikací. Je zřejmé, že aktivita bude do budoucna spíše narůstat, ale troufám si tvrdit, že jsme na tento fakt připraveni a že se tedy budoucnosti nemusíme obávat.

⁵ <https://www.mpo.cz/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/narodni-legislativa-a-predpisy/metodicka-pracovni-pomucka--246718/>

Zavádění DTT v evropských zemích – historický přehled a srovnání

Ing. Václav Udatný

Televizní web

1. Úvod

V Evropě 80. let minulého století se TV vysílání šířilo, jak barevně v PAL, PAL+, SECAM, tak i s černobílými pozůstatky s různým počtem řádků (819, 625, 405). TV standardy byly politickou záležitostí, neboť i tehdy již představovaly podporu vlastnímu průmyslu. Jejich roztržštění a snaha o zvýšení kvality byla základem zavádění standardů MAC (*multiplexed analogue componets*) – analogově-digitální rodině systémů. Tyto standardy začala Evropská hospodářská komise direktivně zavádět od roku 1986 pro kabelové a rozvíjející se družicové vysílání. To vyvrcholilo v roce 1992 zavedením dokonce HD-MAC (1 152 řádků/50 snímků) a D2-MAC jako závazné pro satelitní vysílání. I přes masivní propagaci těchto systémů (na OH 1992 v Albertville a Barceloně) nakonec tyto systémy skončily na hřbitově technických dějin v důsledku toho, že se na družice dostal dříve PAL.

2. Základní kameny digitální televize

První návrhy komplexního digitálního systému ale začaly již v roce 1980. Výzvou bylo najít systém, který by byl použitelný všemi, ale nezároveň by žádný ze stávajících analogových systémů. Systém „win-win“ byl potřebný. To umožnily dvě průlomové myšlenky – použití „komponentního kódování“ a volba vzorkovací frekvence jasového signálu, která byla společným násobkem řádkových frekvencí všech analogových systémů. Na tomto místě je nutno připomenout, že problém, co přenášet v řádkových zatemňovacích intervalech, byl úspěšně vyřešen českými pracovníky tehdejšího Výzkumného ústavu rozhlasu a televize (VÚRT) pány Ing. Benešem a Ing. Líškou. Základní krok k rozvoji digitální televize pak byl učiněn již v roce 1982, kdy byl schválen světový standard CCIR Rec. 601 (dnes ITU-R BT.601), definující parametry kódování digitální televize pro televizní studia. Standard využívá vzorkovací kmitočet 13,5 MHz pro jasový signál a poloviční vzorkovací kmitočet pro chrominanci signály C_B a C_R (systém 4:2:2), 720 vzorků na aktivním řádku kódovaných 8 příp. 10 bity. Tyto parametry byly a jsou společné pro systémy 625/50 i 525/60 a jsou základem i pro nynější standardy HDTV [3].

Rastrový formát videa podle Doporučení BT. 601 byl následně používán v řadě pozdějších standardů, včetně komprimovaných formátů ISO/IEC MPEG a ITU-T H26x. První praktická využití kódování komponentních televizních signálů byla pro kontribuční kvalitu na trasách podle ETSI 300 174 z roku 1992, se symetrickým řešením kodér–dekodér. Tento standard byl základem synchronních sítí SDH s přenosovou kapacitou 34Mbit/s. Pro spotřebitelské aplikace – přijímače – bylo toto řešení příliš nákladné a tak se postupně zavedla řešení nesymetrická – drahý kodér/levný dekodér.

Profesionální komprimované formáty také používají barevné vzorkování 4:2:2, zatímco pro běžné spotřebitele distribučních/vysílacích sítí je *chroma sampling* redukován na 4:2:0.

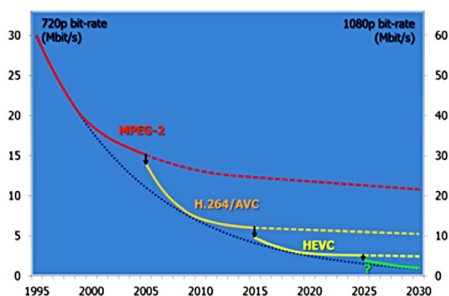
3. Kompresní formáty

Současná generace používaných kompresních technologií byla vyvinuta společně ISO/IEC *Moving Picture Experts Group* (MPEG) a ITU-T *Video Coding Experts Group* (VCEG) a jsou založeny na ztrátové kompresi videa a audia.

standard	oficiální standardizační orgán		rok	vlastnosti
H.261		ITU-T - 198811	1988	vyvinut pro videokonference přes ISDN
MPEG-1 part 2	ISO/IEC 11172-2		1993	vyvinut pro video a audio ukládání na CD ROM
MPEG-1 Layer III	ISO/IEC 11172-3		1993	mp3 audio standard
MPEG-2 part 2	ISO/IEC 13818-2		1995	podporuje 4:2:0 i 4:2:2, main profile/high level vhodný pro HDTV
MPEG-4 part 2	ISO/IEC 14996-2		1999	podpora nízkých rychlostí multimediálních aplikací na internetu
MPEG-4 part 10/H.264	ISO/IEC 14996-10	ITU-T Rec. H.264	2003	výrazné zvýšení kvality obrazu
H.265/HEVC		ITU-T Rec. H.265	2013	podpora UHD TV, výrazně efektivnější v úspoře bitové rychlosti

Tabulka 1: Přehled vývoje kompresních standardů: skupiny MPEG a H26x

Tabulka uvádí přehled vývoje a data publikací jednotlivých standardů a je doplněna i těmi, které přímo nesouvisí s distribucí televizních programů. V tabulce nejsou uvedeny standardy, které byly vyvinuty SMPTE (VC-1 nebo WMV9) nebo další jako VP8 a VP9, či nejnověji jako AV1. Účinnost, resp. požadavek na stejnou kvalitu při nižší bitové rychlosti, se s každým novým standardem zvyšuje 2x resp. bitová rychlost snižuje. Názorně to představuje obrázek 1, reprezentující McCannovo pravidlo: bitová rychlost potřebná k dosažení určité kvality videa se snižuje na polovinu každých pět let. Následně bylo revidováno tak, že bitová rychlost potřebná k dosažení dané kvality videa se snižuje na polovinu po 7 letech. Očekává se proto, že další standard bude publikován v roce 2020, ať to bude VVC od skupiny MPEG/VCEG nebo od nově založené MC-IF (*media coding industry forum*) MPEG-5 EVC. Z praxe je známo, že dnes funkční 3 standardy byly vždy po jednom roce začleněny do specifikací DVB a první vysílací služby byly zahájeny po dalším roce.



Obrázek 1: Vývoj kompresních standardů, levá strana grafu představuje typickou bitovou rychlost potřebnou pro formát 720p, pravá strana rychlost pro Full HD 1080p, zdroj: [1]

Na novém standardu VVC se usilovně pracuje, přičemž „konečný standard“ pod názvem „H266/MPEG/VVC“ by měl být zveřejněn do července příštího roku. Tento doporučený standard se snaží dosáhnout další 50% komprese v porovnání s H265 (HEVC).

4. DVB standardy jako pilíř vysílání digitální televize v Evropě

Kromě postupného zlepšování kompresních algoritmů a dalších evolučních technik rozvoj digitální televize by nebyl myslitelný bez kvalitních vysílacích standardů akceptovaných všemi zainteresovanými hráči na trhu – televizními společnostmi, operátory vysílacích sítí, výrobci zařízení a regulačními orgány. Vypracování takových standardů zajistilo konsorcium DVB (*digital video broadcasting*), které vzniklo v roce 1993 ze skupiny ELG (*European launching group*) zabývající se od roku 1991 zavedením digitální televize v Evropě, když politici uznali, že je lepší nechat výběr standardu na dohodě zainteresovaných zástupců průmyslu a odborníků.

Již od roku 1990 bylo jasné, že družice a kabel poskytnou první služby digitální televize. Dle tehdejší priority trhu se muselo rychle rozvíjet digitální satelitní a kabelové vysílání. Méně technických problémů a jednodušší regulační prostředí znamenalo, že by se mohly vyvíjet rychleji než zemské systémy.

4.1 Standardy 1. generace

Systém DVB-S pro digitální družicové vysílání byl vyvinut v roce 1993 a publikován jako standard ETSI ETS 300 421 v prosinci 1994. Jedná se o poměrně přímočarý systém využívající modulace QPSK. Specifikace popsala různé nástroje pro kódování kanálů a ochranu proti chybám, které byly později použity pro jiné mediální systémy šíření.

DVB-C systém pro digitální kabelové sítě byl publikován také v roce 1994 jako standard ETSI ETS 300 429. Je zaměřen na využití 64QAM a pro evropské satelitní a kabelové prostředí a může v případě potřeby převést kompletní satelitní kanál multi-

plexu na kabelový kanál. Doplněná specifikace DVB-CS popsala verzi, která může být použita pro instalaci společné satelitní televizní antény.

Systém pro digitální zemské televizní vysílání DVB-T byl složitější, protože byl určen do odlišného šumového a vícecestného prostředí s omezenou šířkou pásma a byl publikován v březnu 1997 jako ETS 300 774. Systém má několik způsobů příjmu, kdy je přijímač povinen přizpůsobit jeho dekódování podle signalizace. Klíčovým prvkem je použití modulace OFDM. Existují dva režimy: 2k nosné plus QAM, 8k nosné plus QAM. Režim 8k může umožnit vícenásobnou ochranu, ale režim 2k může nabídnout výhody tam, kde je přijímač v pohybu (Dopplerův efekt).

4.2 Standardy 2. generace

Další rozvoj zaznamenaly standardy druhé generace s vyšší účinností. DVB-S2 (EN 302 307 z března 2005) a poslední modifikace DVB-S2x (EN 302 307-2 z října 2014), které umožňují o 30 % větší datovou propustnost vzhledem k použité modulaci 8PSK a LDPC kódu. Ve výčtu nelze zapomenout na DVB-H – systém pro příjem na mobilních přijímačích, který snižuje spotřebu a šetří baterie. Ten se ale prakticky neuchytil.

Kabelový systém DVB-C2 z roku 2010 (publikován v říjnu 2015 jako ETSI EN 302 769) může pracovat s více transportními toky a rozšířit kapacitu až o 60 %. Tento standard druhé generace je určen pro kabelovou distribuci s vysokou spektrální účinností a rozšíření se dá očekávat až s programy v 8K. Vychází ze standardu DVB-T2, s nímž má některé stejné vlastnosti a parametry – např. stejnou modulaci COFDM a stejné protichybové zabezpečení.

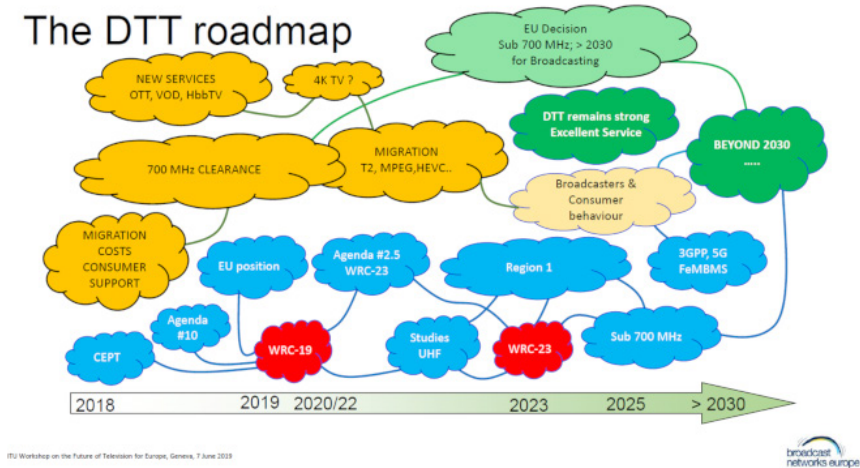
DVB-T2 z roku 2009 (poslední verze z června 2015 jako ETSI EN 302 755 v1.4.1) je dnes nejvyspělejší digitální zemský televizní systém (DTT) na světě, který nabízí větší robustnost, flexibilitu a minimálně o 50 % vyšší účinnost než kterýkoli jiný DTT systém s výjimkou amerického ATSC 3.0. Podporuje SD, HD, UHD, mobilní televizi nebo jakoukoli jejich kombinaci.

Všechny tři standardy druhé generace používají místo konvolučního kódování protichybové zabezpečení LDPC (*low density parity check*) v kombinaci s kódem BCH (*Bose Chaudhuri Hocquenghem*), který nahradil Reed-Solomonovo vnější kódování. Všechny dosavadní standardy DVB jsou založeny na kompresi a transportním toku MPEG-2. S rozvojem IP další nové DVB specifikace, jak se zdá, tuto téměř 25letou tradici po letošku ukončí zavedením standardu DVB-I pro budoucí síť 5G.

5. Směr budoucího vývoje

Na konferenci ITU o budoucnosti televizního vysílání v Evropě [2] v červnu tohoto roku zástupce BNE (*Broadcast Network Europe*) uvedl, že DTT, ať už pomocí DVB-T nebo (stále více) DVB-T2, zůstane v dohledné době ve většině evropských zemí populární. Zdůraznil vysokou míru pronikání uživatelského vybavení, univerzální pokrytí, vysokou a předvídatelnou kvalitu služeb a s volným přístupem, což je zvláště důležité

pro veřejnoprávní vysílací organizace. Vývoj pro období do roku 2030, kdy pásma pro televizní zemské vysílání jsou garantována Světovou radiokomunikační konferencí WRC 2015, je složitý a vazby znázorňuje obrázek 2.



Obrázek 2: Vliv na vývoj zemského digitálního vysílání DTT do roku 2030, zdroj: [2]

Dle predikce BNE i po roce 2030 zůstane DTT silnou platformou s výbornými službami v mnoha zemích v závislosti na rozhodnutí EU o užití pásma pod 700 MHz a chování vysílatelů a spotřebitelů. Velký vliv bude mít rovněž standardizace 3GPP a poslední verze, které v systému HPHT ve spojení s buňkovými sítěmi umožňují simplexní vysílací provoz.

6. Vývoj televizního vysílání v ČR

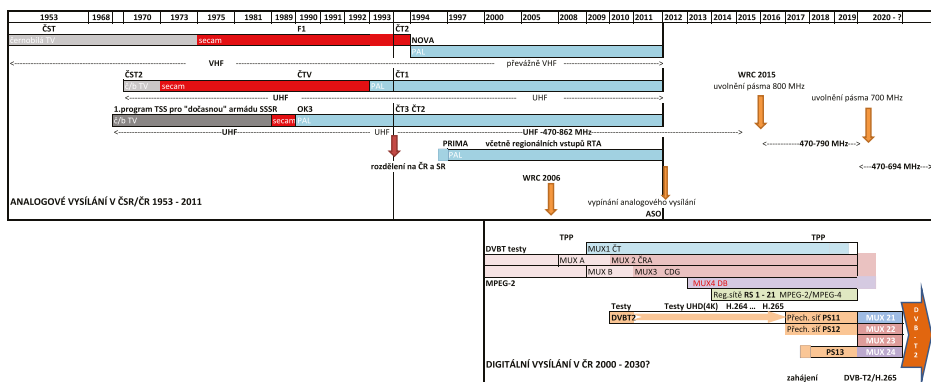
Přehled vývoje systémů a standardů v ČR (včetně analogového vysílání v Československu) na základě [3] je zpracováno v podobě grafu na obrázku 3, kde je vidět několik přechodů televizního vysílání na nové technologie (Č/B → SECAM → PAL → DVB-T → DVB-T2).

7. Příklady přechodu na DVB-T2 v některých evropských zemích

První země v Evropě zahájily pravidelné digitální vysílání DVB-T mezi lety 1998 až 2005 (v pořadí: Velká Británie, Švédsko, Španělsko, Finsko, Švýcarsko, Německo, Belgie, Holandsko, Itálie, Francie, Malta a ČR) a to s kompresí MPEG-2. Podrobnosti jsou u všech zemí uvedeny v souhrnných tabulkách 2A/2B v závěru tohoto článku, která zobrazuje stav ke květnu tohoto roku podle údajů DVB. Ve většině zemí je přechod na standard druhé generace DVB-T2 spojen s uvolňováním pásma 700 MHz pro širokopásmové služby [5].

Německo zahájilo přechod na DVB-T2/HEVC v HD rozlišení před 2 lety a tak celé 700 MHz pásmo bylo televizí a bezdrátovými mikrofony (PMSE) uvolněno v prvním čtvrtletí tohoto roku.

V Rakousku byl přechod na DVB-T2 zahájen v roce 2013 a ukončen 24. 10. 2017 v Korutanech, Tirolsku a Vorarlbergu. Je možno jej přijímat v rámci platformy Simply TV s jednotnými parametry: H264, 64QAM, FFT 32k, kódový poměr $\frac{3}{4}$, ochranný interval $\frac{1}{16}$, z čehož pro 8 MHz kanál vyplývá užitečná bitová rychlost 30–32 Mbit/s. Video v multiplexu je děleno statistickým multiplexem s průměrnou hodnotou na jeden HDTV program 4,75 Mbit/s, pro SD programy je počítáno s průměrem 1,6 Mbit/s.



Obrázek 3: Vývoj televizního vysílání v ČR

Slovensko uvolní 700 MHz pásmo v souladu s Rozhodnutím EU 2017/899 do konce června 2020. V současné době proto probíhá postupné přeladování kmitočtů Multiplexů 1–3, které vysílají v DVB-T/MPEG-2. Multiplex 4 je provozován v DVB-T2/H264 a používá kmitočty, které nejsou v pásmu 700 MHz. Vzhledem k tomu, že multiplexy 2, 3 a 4 mají provozní povolení do 9. 9. 2029, vyhlásil za účelem sjednocení tohoto termínu slovenský Úrad pre reguláciu elektronických komunikácií a poštových služieb výběrové řízení bez elektronické aukce pro nový multiplex 1. Nová SFN síť podle podmínek řízení bude v DVB-T2 v systému minimálně 16k, s modulací minimálně 64 QAM a vertikální polarizací. Nejpozději od ledna 2024 bude použito zdrojové kódování H265/HEVC.

V Polsku začal přechod na DTT v roce 2012 a 22. 7. 2013 bylo ukončeno digitálním vysíláním v DVB-T/H264 s pokrytím 99,5% obyvatelstva. Jedná se o 4 multiplexy v UHF pásmu (z toho jeden placený); od konce roku 2016 přibyl Multiplex 8 v pásmu VHF se šířkou pásma 7 MHz a celoplošným pokrytím (modulace 64QAM, COFDM, 8k, GI $\frac{1}{4}$, FEC $\frac{5}{6}$ jak s vertikální, tak i horizontální polarizací). Vzhledem k uděleným licencím a nevyjasněným plánům se sousedními nečlenskými zeměmi EU bude uvolnění pásma 700 MHz posunuto na polovinu roku 2022.

Zásady přechodu ve Francii byly položeny již v roce 2014, kdy tehdejší předseda vlády rozhodl o snížení počtu 8 provozovaných multiplexů na 6, zavedení kompresního formátu MPEG-4 (H264) a ukončení souběhu SD a HD. K tomu došlo 5. dubna 2016 a obsah v HD rozlišení byl šířen prakticky na všech kanálech. K tomuto datu byl také kompletně ukončen provoz v pásmu 700 MHz v Paříži a okolí a do 25. 6. 2019 došlo ve 13 etapách k úplnému uvolnění tohoto pásma. Kmitočtová aukce na využití kmitočtů pásma 700 MHz byla ukončena v prosinci 2015 a autorizovaní mobilní operátoři využívají kmitočty podle zmíněného etapového plánu při respektování specifických procedur, aby nedocházelo k interferencím s televizním vysíláním. V loňském roce byl představen návrh francouzského Audio-Vizuálního Digitálního Fóra (FAVN) na přechod zemského digitálního vysílání DTT na vysílání v UHDTV k roku 2024 v DVB-T2 – termínu konání Letních olympijských her v Paříži. Tento návrh, pod patronací CSA (*Conceil supérieur de l'audiovisuel*), zahrnuje postupný přechod na standardy HD s HDR a WCG (HD s vysokým dynamickým rozsahem a rozšířeným barevným gamutem), přechodem kódování z MPEG-4 na HEVC a vysílání z DVB-T na DVB-T2. Rychlejší pohyby budou zaváděny včetně HFR (vyšší kmitočtový rozsah) již ve 4násobném rozlišení dnešního HD ve 4K neboli UHDTV. Návrh počítá také se zavedením modulu HbbTV [6].

V září 2010 byl v Chorvatsku vypnut poslední analogový vysílač v Dalmácii a v provozu byly v DVB-T tři multiplexy MPEG 2 s volným přístupem. Když následně v prosinci 2010 začalo italské vysílání DVB-T, v severozápadních částech Istriie a později v oblastech kolem Zadaru a Šibeniku, došlo k rušení příjmu, které bylo způsobeno použitím kmitočtů přidělených Chorvatsku italskými vysílači s nadlimitními výkony. Po stížnostech z chorvatské strany až na vládní úrovni a zásahu Regulačního výboru ITU byl tento problém odstraněn až v průběhu roku 2011. Po tu dobu musely být na zasaženém území použity náhradní vysílače. Další dva multiplexy s podmíněným přístupem jsou od roku 2011 postupně provozovány v některých oblastech v DVB-T2 s kódováním videa v H264/MPEG 4 AVC.

Od 15. září letošního roku zahájil chorvatský národní operátor OiV vysílání televizních programů na vysílači Sljeme v novém multiplexu M2 HD v systému DVB-T2 s kódovacím standardem HEVC pro oblast Záhřebu a do 15. listopadu v celé Chorvatské republice zajistí příjem pro více než 97 % populace paralelně se stávajícími programy v systému DVB-T v rozlišení SD. Síť SFN DVB-T2 multiplexu M2 bude budována pro celkovou kapacitu 36,52 Mbit/s (s parametry 256QAM, vysílacím módem 32ext, kódovým poměrem $\frac{2}{3}$, ochranným intervalem $1\frac{1}{2}_{256}$ a pilotními vzorky PP4). Nová síť M1, která je tvořena převážně kmitočty do 694 MHz, přejde na DVB-T2/HEVC. Celá síť bude robustnější a stavěna na celkovou kapacitu datového toku 27,3 Mbit/s (s parametry 64QAM, vysílacím módem 32ext, kódovým poměrem $\frac{2}{3}$, ochranným intervalem $1\frac{1}{2}_{256}$ a pilotními vzorky PP4). Plného pokrytí 99,29 % obyvatelstva dosáhne síť M1 na dostupných kanálech k 1. červenci 2020. I placené multiplexy, provozovatele EVO TV, přecházejí postupně na kódování HEVC. [8]

Maďarský regulátor NNMH v červnu oznámil, že stávající operátor, státem ovládaná společnost Antenna Hungária Zrt. (AH), bude i nadále provozovat digitální pozemní televizní síť v zemi dalších 12 let po vypršení platnosti stávající licence v září 2020, což je do roku 2032. Operátor zemského digitálního vysílání AH vystaví a bude provozovat celkem 5 DTT sítí s podmínkou, že dvě budou pro veřejnoprávní službu bez poplatků pro diváky, nepřerušene a beze změny kvality, což znamená, že ti diváci, kteří využívají volný (FTA) příjem, budou mít příjem zajištěn i nadále v DVB-T MPEG-4 AVC (s parametry ochranného intervalu 224 μ s s kódovým poměrem $\frac{3}{4}$ nebo méně). Obsah, který bude k dispozici na základě podmíněného přístupu, tedy placený, bude v DVB-T2 HEVC. Tři nové multiplexy s efektivnějšími technologiemi DVB-T2/HEVC s ochranným intervalem 448 nebo 532 μ s a kódovým poměrem $\frac{3}{4}$ nebo méně. Další podrobnosti o kmitočtech byly uvedeny v [9].

Rumunsko, v prosinci 2005 operátor RADIOCOM, jako národní radiokomunikační společnost se statutem veřejného zájmu, uvedl do provozu prostřednictvím pilotního projektu první digitální pozemní televizní vysílač v Rumunsku, v oblasti Bukurešť-Herastrau, na 54. kanálu. Následovala další pilotní vysílání. Následně rozhodnutím vlády Rumunsko převzalo lhůtu pro ukončení analogového televizního vysílání k 1. lednu 2012. Avšak v srpnu 2010 ministerstvo komunikací rozhodlo a podpořilo nové vládní rozhodnutí, že obyvatelstvo ještě není připraveno na přechod na nový typ televizního příjmu. Lhůta pro ukončení analogu tak byla prodloužena do 1. ledna 2015. Ale i další termín vypnutí analogového vysílání k lednu 2015 nakonec nebyl splněn. Nové analogové vysílání mělo pokračovat v pásmu VHF do konce roku 2017 pro veřejnoprávní televizi TVR, byť s různými omezeními v důsledku již platných dalších mezinárodních dohod. Nakonec v roce 2016 došlo k prodloužení vysílací sítě na kanálech 6–11 pro veřejnoprávní TVR až do 31. 12. 2019. Tím dojde k ASO – konečnému vypnutí analogového vysílání v Rumunsku až v letošním roce.

Restart přechodu na digitální zemské vysílání pro veřejné televizní programy začal 17. 6. 2015, ale dosud nebyl ukončen. Vysílacím standardem přijatým Rumunskem se stalo DVB-T2 s kódováním videa MPEG-4. Výsledkem v konečné podobě bude výstavba 228 vysílačů s pokrytím 94% populace a 81% území s TV signály FTA pro veřejnoprávní službu (TVR1, TVR2, TVR3, TVR HD a 5 regionálních TVR stanic). Výstavba těchto vysílacích míst by podle harmonogramu měla být ukončena do konce listopadu 2019. V konečné verzi by měly být k dispozici další 2 multiplexy pro placené komerční vysílání.

Ve Španělsku, s vysokou až 80% penetrací zemského vysílání, se jedná o třetí digitální přechod, kterým tato země v současnosti prochází. První digitální migrace proběhla při přechodu z analogového na DVB-T vysílání mezi lety 2000–2010, kdy byl ASO ukončen. Druhá migrace byla ukončena k 31. 3. 2015, ve které přibližně 13 milionů domácností přeladilo tehdy své antény, aby uvolnilo pásmo 800 MHz pro nasazení LTE 4G. Letos vláda po schválení EU vyčlenila finanční prostředky na pomoc Španělům při přeladování antén a rozvodů pro majitele domů v přibližně 850 000 budovách.

Nový plán přechodu DTT zajistí, že provozovatelé vysílání uvolní aktuální pásmo 694–790 MHz pro použití službami 5G. Místo toho se přesunou do pásma 470–694 MHz s osmi digitálními multiplexy. To má být realizováno do června 2020. V přímé návaznosti na to ustaví Španělsko národní fórum pro UHD, které má napomoci rozvoji trhu. Asociace UHD, kterou podporuje skupina Medina Media, zahájí svou činnost na summitu 4K v Malaze 8. listopadu 2019.

K popisu situace ve Španělsku je nutno uvést, že Cellnex Europe, nezávislý operátor bezdrátové telekomunikační infrastruktury, vybudoval na bázi HbbTV systém LOVEStv – službu bezproblémového spojení mezi broadcastingem a broadbandem. LOVEStv je navržen jako otevřená platforma, která umožňuje integraci všech vysílacích stanic (veřejnoprávních i soukromých), které chtějí obohatit svou nabídku obsahu službou kombinující výhody lineárního DTT a interaktivity poskytované technologií HbbTV [7].

Švýcarsko zahájilo DVB-T vysílání jako jedni z prvních v Evropě v roce 2001. Avšak dnem 3. 6. 2019 byly v celé zemi vypnuty vysílače zemského digitálního vysílání DVB-T, které šířily veřejnoprávní programy SRG, SSR a RSI. Ve Švýcarsku používalo v roce 2018 signál DVB-T pouze méně než 2 % domácností. Podle vyjádření veřejnoprávní televize provozní náklady činily více než 10 milionů franků ročně a SRG musí ušetřit, protože poplatky za veřejnoprávní televizi byl snížen Federální radou Švýcarské konfederace a současně klesají příjmy z reklamy. Náhradou má být kabel, IPTV nebo satelit, který je po pořízení jednorázového poplatku zdarma. Ne všude je však možné složitě instalovat satelitní antény a tak mnozí kritizují, že pro příjem veřejnoprávní služby musí dvakrát platit: koncesionářský poplatek a předplatné soukromým společností. Celé spektrum je uvolňováno pro další rozvoj sítí 5G, které již dnes pokrývají ve dvou sítích téměř 300 aglomerací. [10]

8. Současný stav DTT v Evropě

Vlivy na digitalizaci televizního vysílání v Evropě je nutno hledat historicky na konci minulého století s nástupem nových technologií na jedné straně a změnou geopolitického uspořádání v závislosti na úrovni hospodářské prosperity na straně druhé. Tehdy byly distribuční prostředky pro televizní vysílání obsazeny převážně veřejnoprávními vysílateli a s nástupem licencování soukromých mediálních společností vyvstala potřeba nového prostoru pro jejich cestu k divákovi. I s ohledem na volný pohyb osob a kapitálu v EU a bezhraniční tok informací byly podporovány družicové a návazné kabelové distribuční sítě jako technologicky a investičně nejjednodušší. K tomu přispělo i zakonzervování kmitočtových plánů terestrického vysílání dle ERC Stockholm 61, které byly zásadně revidovány až po 45 letech na konferenci WRC Geneva 2006, tedy až po zahájení DTT v některých zemích. Ty však potom doznaly změn v podobě tzv. Digitálních dividend I. a II. v důsledku priority budování informační společnosti. Výsledkem je současné nerovnoměrné rozložení různých distribučních platform v jednotlivých zemích evropského regionu. Tento stav vystihují nejlépe tabulky 2A

a 2B, které jsou částečným výpisem interní databáze, kterou autorovi s laskavým svolením Petera MacAvocka, předsedy DVB, poskytli jeho spolupracovníci. S ohledem na omezený rozsah jsou údaje v nich zobrazeny pouze některé a jen částečně, údaje o primární penetraci nezobrazují data podle Special Eurobarometru 462.

Country	TV households (M)	DTT total pen. (% of TVHH)	DISTRIBUTION MARKET OVERVIEW			DTT MILESTONES		DTT SYSTEM CHOICES			HD Y/N (Test/ e.g. DVB-T to DVB-T2)	Pilot
			Notes (Primary penetration figures via Digital TV Research, ASD data on order planned)	start date	start date	ASO start (planned)	ASO end (actual)	DTT Standard	Video Coding			
Albania	0.953	49.2	DTT 28%; ATV 8%; Satellite 38%; IPTV 12%;	2004	2019	-	DVB-T2	MPEG-4	Y	DVB-T2 was called out in 2015/2016; some DVB-T services remained on air initially, including		
Andorra	-	-	DTT 33%; Satellite 67%;	2015	2015	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Austria	3.723	18.2	DTT 5%; Satellite 95%; IPTV 22%; Cable 22%;	2005	2011	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	Transition to DVB-T2 took place from 2014 to 2017.		
Azerbaijan	1.884	52.7	DTT 44%; Satellite 35%; IPTV 4%; Cable 20%;	2008	2011	Y	DVB-T2	MPEG-4	-	DVB-T2 transition started in 2013.		
Belarus	3.669	40.9	DTT 14%; ATV 0.5%; Satellite 9.5%; IPTV 45%;	2005	2015	Y	DVB-T2	MPEG-4	-	Transition from DVB-T to DVB-T2 completed.		
Belgium	4.748	23.9	DTT 5%; Satellite 4%; IPTV 35%; Cable 57%;	2002	2010	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	N	XTI ended its DVB-T service in 2013. Its programmes are available in DVB-T2 on the Antio		
Bulgaria	1.782	85.7	DTT 10%; Satellite 4%; IPTV 1%; Cable 84%;	2002	2010	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	N	On a recent decision to change from DVB-T to DVB-T2, this hasn't been made, however progress was		
Bulgaria	1.749	48.1	DTT 24%; Satellite 43%; IPTV 13%; Cable 20%;	2013	2013	Y	DVB-T	MPEG-4	N	Transition to DVB-T2 is planned for 2024.		
Croatia	2.483	51.6	DTT 31%; Satellite 30%; IPTV 28%; Cable 11%;	2007	2011	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
Cyprus	0.31	66.7	DTT 51%; Satellite 32%; IPTV 49%; Cable 16%;	2010	2011	Y	DVB-T	MPEG-2-4	Y	No plans to migrate to DVB-T2.		
Czech Republic	4.204	63.4	DTT 42%; Satellite 32%; IPTV 7%; Cable 20%;	2005	2011	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
Denmark	3.159	82.8	DTT 42%; Satellite 32%; IPTV 7%; Cable 20%;	2005	2011	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
Egypt	0.937	58	DTT 22%; Satellite 11%; IPTV 12%; Cable 52%;	2009	2019	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
Estonia	0.937	58	DTT 22%; Satellite 11%; IPTV 12%; Cable 52%;	2009	2019	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
France	27.353	70.3	DTT 35%; Satellite 22%; IPTV 35%; Cable 66%;	2005	2011	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
Germany	49.8	21.4	DTT 4%; Satellite 28%; IPTV 51%; Cable 19%;	2014	2015	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
Germany	49.8	21.4	DTT 4%; Satellite 28%; IPTV 51%; Cable 19%;	2014	2015	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	Transition Roadmap IS NOT adopted yet (2019-02-15) DVB-T2 MPEG-4 two multiplexes are		
Greece	3.909	49.4	DTT 10%; Satellite 24%; IPTV 19%; Cable 48%;	2008	2013	Y	DVB-T	MPEG-2-4	Y	Transition to DVB-T2 is planned for 2024.		
Hungary	3.909	49.4	DTT 10%; Satellite 24%; IPTV 19%; Cable 48%;	2008	2013	Y	DVB-T	MPEG-2-4	Y	Transition to DVB-T2 is planned for 2024.		
Iceland	0.124	66.6	DTT 13%; Satellite 41%; IPTV 87%;	2005	2015	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	Transition to DVB-T2 is planned for 2024.		
Ireland	1.679	52.1	DTT 13%; Satellite 53%; IPTV 6%; Cable 19%;	2011	2012	Y	DVB-T	MPEG-4	Y	Transition to DVB-T2 is planned for 2024.		
Israel	2.41	59.8	DTT 40%; Satellite 28%; Cable 32%;	2003	2011	Y	DVB-T2	MPEG-4	N	No plans to migrate the DVB-T mux to DVB-T2.		
Italy	2.41	59.8	DTT 40%; Satellite 28%; Cable 32%;	2003	2011	Y	DVB-T2	MPEG-4	N	No plans to migrate the DVB-T mux to DVB-T2.		
Kazakhstan	3.186	34.9	DTT 23%; ATV 15%; Satellite 23%; IPTV 18%;	2011	2024	-	DVB-T2	MPEG-4	N	A migration to DVB-T2 has been discussed for 2020, however an updated decision from NISB		
Latvia	0.821	65.7	DTT 31%; Satellite 13%; IPTV 23%; Cable 34%;	2009	2010	Y	DVB-T	MPEG-4	Y	The roadmap for the release of the 700 MHz band foresees permitting those broadcasters w		
Liechtenstein	-	-	-	-	-	-	DVB-T	-	Y	-		
Lithuania	1.227	65.5	DTT 41%; Satellite 9%; IPTV 19%; Cable 32%;	2008	2012	Y	DVB-T	MPEG-4	Y	The roadmap for the release of the 700 MHz band foresees permitting those broadcasters w		
Luxembourg	0.69	55.4	DTT 42%; Satellite 28%; Cable 32%;	2003	2011	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	The roadmap for the release of the 700 MHz band foresees permitting those broadcasters w		
Luxembourg	0.69	55.4	DTT 42%; Satellite 28%; Cable 32%;	2003	2011	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	The roadmap for the release of the 700 MHz band foresees permitting those broadcasters w		
Malta	0.159	59.9	DTT 23%; ATV 15%; Satellite 23%; IPTV 18%;	2011	2024	-	DVB-T2	MPEG-4	N	A migration to DVB-T2 has been discussed for 2020, however an updated decision from NISB		
Moldova	1.195	12.8	DTT 10%; ATV 50%; Satellite 13%; IPTV 13%;	2016	2020	-	DVB-T2	MPEG-4	N	The national roadmap for the UHF band foresees a transition to DVB-T2 and MPEG-4.		
Monaco	-	-	-	-	-	-	DVB-T	-	-	-		
Montenegro	0.195	28.2	DTT 5%; Satellite 35%; IPTV 29%; Cable 34%;	2011	2015	Y	DVB-T	MPEG-4	Y	-		
Netherlands	2.3	69.9	DTT 14%; Satellite 23%; IPTV 29%; Cable 34%;	2007	2009	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Netherlands	2.3	69.9	DTT 14%; Satellite 23%; IPTV 29%; Cable 34%;	2007	2009	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Norway	2.3	69.9	DTT 14%; Satellite 23%; IPTV 29%; Cable 34%;	2007	2009	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Poland	14.959	41.7	DTT 21%; Satellite 46%; IPTV 4%; Cable 29%;	2009	2013	Y	DVB-T	MPEG-4	Y	Both NPO and KSN (Dzienniki) will transition to DVB-T2 and HEVC in 2018/2019.		
Portugal	3.858	30.6	DTT 2%; Satellite 15%; IPTV 48%; Cable 35%;	2009	2012	Y	DVB-T	MPEG-4	N	The national plan for changing the allocation of the 700 MHz band foresees a switch from L		
Romania	7.279	15.2	DTT 51%; ATV 11%; Satellite 33%; IPTV 2%;	2005	2018	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Romania	7.279	15.2	DTT 51%; ATV 11%; Satellite 33%; IPTV 2%;	2005	2018	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Russia Federation	54.978	45.9	DTT 16%; ATV 3%; Satellite 35%; IPTV 13%;	2012	2012	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Saudi Arabia	2.5	60.1	DTT 39%; Satellite 12%; IPTV 17%; Cable 32%;	2012	2012	Y	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
Slovakia	1.387	45.4	DTT 16%; Satellite 43%; IPTV 12%; Cable 30%;	2009	2012	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	It is envisaged that the final transition of digital terrestrial TV from DVB-T to DVB-T2 would.		
Slovenia	0.81	55.3	DTT 20%; Satellite 5%; IPTV 43%; Cable 32%;	2006	2011	Y	DVB-T	MPEG-4	Y	No plans to convert DVB-T services to DVB-T2, but new services may use DVB-T2 + HEVC		
Spain	17.882	65.7	DTT 16%; Satellite 3%; IPTV 24%; Cable 56%;	2009	2010	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	Experimental UHF services using DVB-T2 are on air in live cities. It was reported that RTVE		
Spain	17.882	65.7	DTT 16%; Satellite 3%; IPTV 24%; Cable 56%;	2009	2010	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	Experimental UHF services using DVB-T2 are on air in live cities. It was reported that RTVE		
Switzerland	4.135	18.1	DTT 3%; Satellite 4%; IPTV 36%; Cable 57%;	2001	2008	Y	DVB-T	MPEG-2-4	N	The DVB-T network will cease operation in June 2018. DTT has very low penetration in Swi		
Turkey	19.845	-	ATV 28%; Satellite 68%; IPTV 6%; Cable 6%;	2009	-	-	DVB-T2	HEVC	Y	-		
Ukraine	17.481	43.1	DTT 38%; ATV 24%; Satellite 24%; IPTV 14%;	2009	-	-	DVB-T2	MPEG-4	Y	-		
United Kingdom	26.958	69	DTT 35%; Satellite 40%; IPTV 12%; Cable 14%;	1998	2012	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	-		
United Kingdom	26.958	69	DTT 35%; Satellite 40%; IPTV 12%; Cable 14%;	1998	2012	Y	DVB-T2	MPEG-2-4	Y	-		
Version	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Version: 2019-05-27
Version	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Version: 2019-05-27

Tabulka 2a: Stav zemského digitálního vysílání (DTT) v Evropě podle zemí

Country	DTT NETWORKS			DTT CONTENT OFFER		DTT PayTV Offer			ACTORS & ORGANIZATION				
	tech. Coverage (% of pop.)	Total for Muxes local/regio	of which local/regio	Network Notes	National or Regional Progs	Local or Regional Progs	HbbTV	DTT PayTV Operator(s)	Comm. ercial PayTV Sub PayTV Coalt Progs	Frequency Regulator	Broadcast Network Operator(s)	Mux Operator(s)	Public Broadcaster
Albania	96.5	7	-	-	13	-	-	DigitalAb, Tring, TV Shqip	92	Electronic and P4	DigitalAB	-	RTSH
Andorra	100	3	-	-	30	-	-	-	-	Public Services R	Andorra Telecom	-	Public TV Com
Armenia	90	4	-	-	19	-	-	-	-	Armenian Regulator	ORF, MUX TV ORF	-	-
Austria	98	2	1 (10)	-	22	-	-	HbbTV: In Austria there are ca. 1 million HbbTV users	40	Ministry of Posts	ORF	-	-
Bahrain	98	7	-	-	8	-	-	-	-	Ministry of Posts	-	-	-
Belgium	98	4	4	-	4	1	"Under consideration"	Antenne TV (TV Vlaanderen)	16	Belgian regulator	RTBF, RTBF, RTBF, RTBF	RTBF (and VLMR, RTBF)	-
Bosnia & Herzegovina	95.2	2	-	-	6	1	"In regular operation"	None as of April 2018	-	Communications	RTF, RTF & RTF, Oostfland, RTF, RTF & RTF, Oostfland	-	-
Bulgaria	98.5	1	-	-	24	-	-	There were ca. 265,000 connected HbbTV users as of April 2018	58	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Croatia	98.5	3	-	-	12	-	-	HbbTV services was launched in March 2012 (DNA Finlay Oy, P4P, P4H)	58	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Cyprus	100	5	-	-	24	-	-	HbbTV services was launched in March 2012 (DNA Finlay Oy, P4P, P4H)	58	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Czech Republic	99.8	4	-	-	29	-	-	September. New channels offer HbbTV service	49	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Denmark	99.8	6	-	-	169	-	-	HbbTV was launched in January 2015 by 4 (Euros)	25	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Estonia	99.9	3	-	-	6	-	-	HbbTV was launched in January 2015 by 4 (Euros)	25	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Finland	99.9	6	-	-	49	-	-	HbbTV services was launched in March 2012 (DNA Finlay Oy, P4P, P4H)	49	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
France	97.3	6	1 (17)	-	27	-	-	September. New channels offer HbbTV service	193	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Germany	99	6	1 (17)	-	48	-	-	HbbTV was launched in January 2015 by 4 (Euros)	25	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Greece	96	5	-	-	21	-	-	HbbTV services was launched in March 2012 (DNA Finlay Oy, P4P, P4H)	49	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Hungary	99	6	-	-	12	-	-	September. New channels offer HbbTV service	193	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Ireland	98	2	-	-	10	-	-	HbbTV 1.0 reaches over 70% of households (recent TV)	20	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Israel	98	2	-	-	11	-	-	In February 2015 it was announced that the above service ceased in 2015	69	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Italy	77.8	2	-	-	15	-	-	In 2015 there were 500,000 HbbTV users	69	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Latvia	98	7	-	-	5	-	-	In April 2012, NoDin, the digital TV standard	61	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Lithuania	95	4	-	-	3	-	-	At the moment there are about 15 DTT users	72	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Luxembourg	95	4	-	-	3	-	-	2 national, Centro Europe	72	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Malta	95	7	-	-	10	-	-	Latviancom Latvian Star	61	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Macedonia	95	7	-	-	10	-	-	HbbTV services to be launched during 2018	72	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Malta	95	5	-	-	8	-	-	Now, the HbbTV 1.3 standard, digital TV (NRK, Telcel, the public broadcaster RTP is part of the EME as of April 2018	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Moldova	100	7	-	-	29	-	-	The public broadcaster RTP is supporting in the EME as of April 2018	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Montenegro	97	2	-	-	5	-	-	The public broadcaster RTP is supporting in the EME as of April 2018	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Netherlands	100	4	-	-	5	-	-	None as of April 2018	100	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Norway	95	5	-	-	14	-	-	TV2SV6	30	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Poland	92	1	-	-	20	-	-	HbbTV 1.3 is used in the Netherlands, the digital TV (NRK, Telcel, the public broadcaster RTP is supporting in the EME as of April 2018	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Portugal	92	1	-	-	7	-	-	None as of April 2018	100	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Romania	90	1	-	-	9	-	-	None as of April 2018	100	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Russian Federation	98.8	2	-	-	20	-	-	None as of April 2018	100	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Slovakia	97	3	-	-	9	-	-	None as of April 2018	100	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Slovenia	99	5	1 (5)	-	11	-	-	The commercial broadcaster TV Muzika has been launched during 2018	27	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Spain	98	3	1 (5)	-	10	-	-	The commercial broadcaster TV Muzika has been launched during 2018	27	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Sweden	99.8	6	-	-	20	-	-	Public broadcaster RTVSLO has an HbbTV license awarded August 2018	58	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Switzerland	95	6	-	-	13	-	-	NoDin, the digital TV standard body for DVB-T2 (Combin, also in the EME as of April 2018)	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Taiwan	92.5	5	-	-	5	-	-	HbbTV has 80% market reach in Switzerland (Fahnestab will cease in April 2018)	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
United Kingdom	95.5	8	-	-	16	-	-	In April 2015 the public broadcaster RTÉ has been launched	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-
Vatican	98.5	5	-	-	70	-	-	Freeview, the free-to-air DTT network, opened in April 2018	50	Office of Electronic Media	CyBC (P&S), Valister Ltd (P&A), Oostfland 1, vevo (OV)	CyBC, Valister (CyBC)	-

Version: 2018-05-27

zdroj: DVB

Tabulka 2b: Stav zemského digitálního vysílání (DTT) v Evropě podle zemí

9. Odkazy

- [1] Ken McCann, Adriana Mattei, Jeff Gledhill, Guy Hirson: The Technical Evolution of the DTT Platform; January 2012.
- [2] <<http://www.televizniweb.cz/2019/07/mezinarodni-telekomunikacni-unie-probirala-na-seminari-v-zeneve-budoucnost-televizniho-vysilani-v-evrope/>>.
- [3] Ing. Dušan Líška: Vzpomínky na začátky barevné televize v Čechách, Sdělovací technika 4/2013 a Vzpomínky na začátky digitální televize v Čechách, Sdělovací technika 8/2013.
- [4] Ing. Dušan Líška: Sborníky konference Radiokomunikace 2007–2014.
- [5] Václav Udatný: články na <<http://www.televizniweb.cz>>. k tematice DVB-T2 u sousedů.
- [6] <<http://www.televizniweb.cz/2017/12/uvolnovani-pasma-700-mhz-po-francouzsku-jak-televize-vyklidi-cast-spektra-pro-mobilni-site/>>.
- [7] <<http://www.televizniweb.cz/2019/07/spanelske-pozemni-digitalni-televizni-vysilani-a-uvolneni-pasma-700-mhz/>>.
- [8] <<http://www.televizniweb.cz/2019/08/dvb-t2-v-chorvatsku-na-pristi-dovolenou-k-mori-jedte-uz-s-novym-prijimacem/>>.
- [9] <<http://www.televizniweb.cz/2019/08/madarska-cesta-k-uvolneni-pasma-700-mhz-nove-site-pro-televizi-az-do-roku-2032/>>.
- [10] <<https://www.xavierstuder.com/2018/12/la-fin-de-tnt-pour-le-3-juin-2019-et-de-la-fm-pour-fin-2019-2020/>>.

Moderní zobrazovače a zobrazovací metody v současných TV přijímačích

Prof. Ing. Václav Říčný, CSc.

VUT Brno, FEKT, Ústav radioelektroniky

1. Úvod

V zobrazovačích televizních přijímačích se již řadu let užívají tři základní principy elektro-optické transformace na bázi:

- řízených tekutých krystalů – zobrazovače LCD (*liquid crystal display*),
- řízené generace plasmového výboje plynu a následné fotoluminiscence – plasmové zobrazovače,
- řízené elektroluminiscence v organických materiálech – zobrazovače OLED (*organic light emitting diode*).

Zobrazovače byly v posledních letech technicky a zlepšovány a zobrazování v televizorech bylo doplněno sofistikovaným signálovým zpracováním (HDR aj.), které vlastnosti elektrooptické transformace výrazně zlepšilo. Tato přednáška bude proto zaměřena hlavně na tyto inovace. Technologická zlepšení v posledních letech se týkala především zvýšení *nativního rozlišení*, zlepšení (zvýšení) *dynamického rozsahu jasu*, *zlepšení reprodukce rychlých pohybů ve scéně* a *zvětšení rozsahu zobrazitelných barev (gamut)*. *Optoelektronická* ani *elektronicko-optická transformace* ve snímacích a zobrazovacích a systémech nejsou lineární. Popisují je jejich převodní charakteristiky, které musí systémy pro zlepšení kvality obrazu (např. HDR) respektovat.

2. Zobrazovače LCD (liquid crystal display)

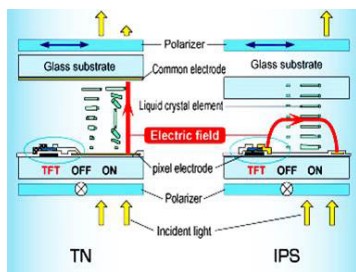
2.1 Princip a technologie

Technologie LCD byla v průběhu 90. let minulého století zásadní pro zrod plochých zobrazovačů. Tekuté krystaly (dále LC) jsou zvláštním stavem některých organických sloučenin (např. cholesteste-rylbenzoátu) mezi pevnou a kapalnou fází i za pokojové teploty. Natočení jejich podlouhlých molekul lze ovládat elektrickým polem. Technologie LC se výrazně měnila. Princip nejstarší technologie *TN* je patrný z levé části obrázku 1. Přes první *polarizační filtr* dopadá světlo ze zdroje zadního podsvícení na vrstvu LC, která je umístěna mezi dvěma průhlednými elektrodami, na nichž jsou vrypy vzájemně natočené o 90°, orientující natočení první vrstvy molekul LC. Její tloušťka je taková, že se molekuly spirálovitě otočí přesně o 90°. *Výstupní polarizační filtr* je orientován *opačně než vstupní*. Světlo proto buňkou prochází.

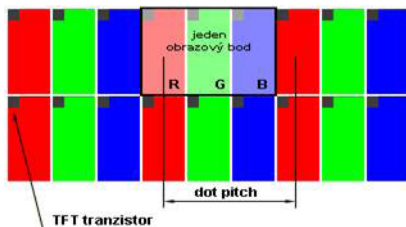
Proměnným napětím na elektrodách pak lze natočení LC spojitě měnit a tak řídit velikost procházejícího světelného toku.

Postupně vzniklo několik technologií LCD:

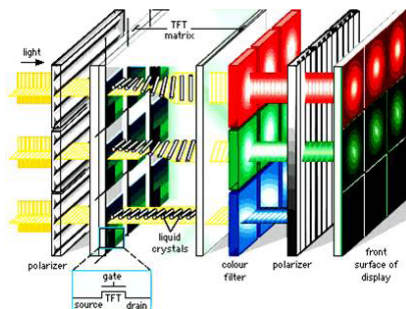
- TN, STN (*super/twisted nematic*) – nejstarší technologie s malým kontrastem a dlouhou dobou odezvy (přechodu z otevřeného do zavřeného stavu),
- VA (*vertical alignment*) – molekuly LC jsou orientované vertikálně a natáčí se jen o 45° pro dosažení kratší doby odezvy,
- MVA (*multi-domain VA*) – zlepšená technologie VA,
- IPS (*in plane switching*) – zatím nejlepší technologie s nejkratší dobou odezvy a pozorovacím úhlem až 178°. Verze S-IPS (*super IPS*) je dnes nejrozšířenější technologií LCD.



Obrázek 1: Princip technologií TN a IPS, zdroj: [1]



Obrázek 2: Příklad LCD subpixelů RGB s TNT



Obrázek 3: Výřez části struktury zobrazovače LCD, zdroj: [2]

Pro *aktivní* řízení jednotlivých buněk (pixelů) LC se užívá ve struktuře integrovaná matice (obrázek 3) „tenkých“ tranzistorů TNT (*think film transistor*). V barevných LCD každý obrazový bod (pixel) LC tvoří více *subpixelů* základních barev RGB (obrázek 2), jejichž tvary odpovídají geometrii barevné filtrace. Existuje více tvarů, ale i počtu subpixelů (např. jeden červený i modrý a dva zelené). Jas každého z nich lze ovládat nezávisle. Kombinací jejich jasů lze vytvářet velké množství barevných tónů (pro 8 bitovou prezentaci jasu každé ze tří barev 16,8 milionů a v případě 10 bitové reprezentace více jak miliardu barevných tónů).

2.2 Vlastnosti zobrazovačů LCD

Vybrané vlastnosti LCD:

- *vysoké rozlišení* – vyrábí se s nativním rozlišením *HD Ready* (1 366 × 768 bodů), *Full HD* (1 920 × 1 080 bodů), ale i *UHDTV – 4K* (3 840 × 2 160 bodů),
- *dobré barevné podání*,
- jas (dle zdroje zadního podsvícení až 800 nitů),
- statický kontrast až 1000 : 1,
- pozorovací úhel až 175 ° (závisí na technologii LC),
- doba odezvy (přechod z uzavření do otevření průchodu světla) je dnes již kratší než 3 ms (je závislá na použité technologii LC).

Nevýhodou zobrazovačů LCD je relativně *malý kontrast*, protože buňky LC nelze dokonale uzavřít (LCD není primární zářič) a *dlouhá doba odezvy*. Ta se projevuje nedokonalým zobrazením rychlých pohybů ve scéně.

Pro *zvýšení kontrastu* v zobrazovačích *LED-LCD* se místo klasického zadního podsvícení výbojkami CCFL užívá *řízená matice diod LED*, jejichž osvětlení se mění *místně* i *časově dle okamžité distribuce jasu* v obraze (tzv. lokální stmívání).

Zvýšení kontrastu lze řešit také *softwarově*. Video-procesor analyzuje okamžitou jasovou distribuci bodů v obraze a seřadí je do několika skupin odstínu šedi. Podle tohoto rozložení se vytvoří nelineární korekční funkce, která změní původní jas pixelů tak, že světlejší body tmavé části obrazu se posunou směrem k bílé a naopak tmavší body světlé části obrazu směrem k černé). Tím lze rovněž dosáhnout zvýšení kontrastu. Proto výrobci uvádějí kromě statického i tzv. *dynamický kontrast*, který bývá až o řád větší.

V současné době jsou v televizních přijímačích nejrozšířenějším typem LED-LCD zobrazovače.

Významné zlepšení vlastností zobrazovačů v posledních letech představuje aplikace vrstvy tzv. kvantových teček (*quantum dots*) do zadního podsvícení (firma Samsung), které dalo vzniknout zcela nové kategorii zobrazovačů *QLED*. Problematice bude věnován odstavec 5.

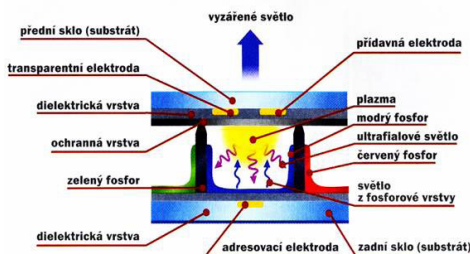
Poznámka: Videosignál je před vlastním zobrazením (elektrooptickou transformací) zpracováván ve video-procesoru, který umí řadu nedokonalostí zobrazovače softwarově „opravit“. Plní řadu funkcí – především přepočítávání rozlišení (*upscaling*) obrazového obsahu na přirozené (nativní) rozlišení zobrazovače a zobrazování zvýšeného počtu snímků za sekundu pro snížení jasového blikání. Provádí se v něm ale i řada dalších operací – např. programy pro zlepšení vjemu rychlého pohybu ve scéně aj. Jejich názvy se liší podle výrobců. K nejkvalitnějším z nich patří např. systémy *MOVIE PLUS*, *Perfect Pixel HD – Engine*, *Clear LCD*, *Motion Picture* a spousta dalších. Jiným příkladem jsou programy typu *Ambiente*, které přizpůsobují zobrazení okolí televizoru. Algoritmy těchto operací představují přísně chráněné know-how renomovaných výrobců.

3. Plasmové zobrazovače

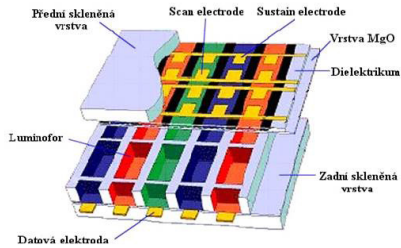
Zde si jen popíšeme základní princip a vlastnosti, protože plasmové zobrazovače v posledním desetiletí nedoznaly významnější inovaci a jejich výroba i prodej dnes klesají. Některé jejich vynikající vlastnosti jim na počátku 21. století předurčovaly skvělou budoucnost, ale s rozvojem jiných technologií jejich význam klesal a po roce 2013 jejich výrobu ukončili někteří velcí výrobci (např. Panasonic, Samsung). Dnes se jejich podíl na trhu stolních televizorů pohybuje pod 10 %.

3.1 Princip

Plasmový zobrazovač je, na rozdíl od LCD, primární zářič. Využívá povrchový plasmový výboj plynu (např. směsi Ne, Xe, He) – obrázky 4 a 5. Ten vzniká vlivem střídavého pulsního napětí (cca 100 kHz) mezi elektrodami v horní části buňky (transparentní pro světlo). V aktivované skleněné evakuované buňce se vytvoří plazma (směs volných elektronů a iontů plynu), která generuje ultra-fialové záření. To budí fosfory nanesené na stěnách buněk, které září v základních barvách R, G, B. Minimální dosažitelná velikost evakuovaných skleněných buněk však omezuje dosažitelné rozlišení a konstrukce současně zvyšuje hmotnost zobrazovače.



Obrázek 4: Řez buňkou plasmového zobrazovače, zdroj: [4]



Obrázek 5: Výřez částí plasmového zobrazovače, zdroj: [4]

3.2 Vlastnosti plasmových zobrazovačů

Vybrané vlastnosti plazmových zobrazovačů:

- vysoký dosažitelný jas – až 1 500 nitů,
- vysoký statický kontrast (plasmový zobrazovač primární zářič) – až 25 000:1, což umožňuje pozorování obrazu i při velkém vnějším osvětlení,
- velmi krátká doba odezvy – cca 0,001 ms,
- pozorovací úhel blíží se 180°.

K nevýhodám patří:

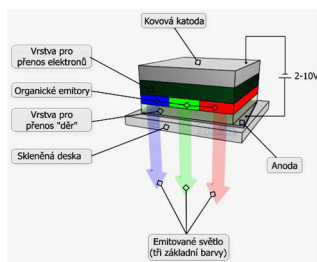
- menší nativní rozlišení u menších rozměrů zobrazovačů,
- větší příkon ve srovnání se zobrazovači LCD stejných rozměrů,
- možnost vypalování lumínoforů u statických částí obrazu s vysokým jasnem (např. statická programová loga v obraze apod.),
- komplikovaný systém řízení jasu – plazmové zobrazovače pracují dvoustavově, řízení jasu je proto poměrně komplikované; jde o složitý elektronický systém časově postupného zobrazování každého snímku v několika dílčích snímcích s různou dobou trvání, která klesá geometrickou řadou; divák vnímá *integrál jasu* této sekvence dílčích snímků.

4. Zobrazovače OLED (organic light emitting diode)

4.1 Princip

Využívají známý princip organických elektroluminiscenčních diod LED. Tuto technologii vyvinula firma Eastman Kodak již v roce 1986. Panel OLED byl poprvé komerčně využit již v roce 1988 v autorádiích firmy Pioneer. Později se používaly v malých displejích – např. v digitálních fotoaparátech, mobilních telefonech aj. Dnes již s vývojem technologie pronikly i do stolních televizorů jako velké a tenké zobrazovače s vynikajícími parametry. V současnosti jsou to nejlepší, ale také nejdražší zobrazovače. O jejich hromadnou výrobu se pokoušela neúspěšně řada renomovaných výrobců

(Samsung, Sony aj.), ale ekonomicky úspěšně to dokázala zatím jen jihokorejská firma LG. Na obrázku 6 je zobrazena buňka panelu OLED. Panel tvoří *matice organických luminiscenčních diod*, které vytváří jednotlivé obrazové body. Každá buňka je složena z tenkých vrstev polovodičů. Vrstvy LED, tvořené vysoce svítivými organickými molekulami nebo polymery, vyzařují přes čelní skleněnou desku nebo pružný film tři složková barevná světla RGB. Horní kovová elektroda světlo odráží. Zobrazovač OLED je *primární zdroj světla*, který nevyžaduje prosvětlovací zdroj ani barevný filtr. Může zobrazit i zcela černý obrazový bod a proto má obraz *velký kontrast*. Konstrukce umožňuje výrobu tenkých (s technologií FOLED také prohnutých) zobrazovačů libovolných rozměrů. Ukazuje se však, že výhoda televizorů s prohnutým zobrazovačem (obrázek 7) je vhodná jen u velkých úhlopříček. Zdánlivě lepší vjem obrazu má jen divák sedící uprostřed.



Obrázek 6: Buňka zobrazovače OLED, zdroj: [5]

4.2 Technologie

Podobně jako u zobrazovačů LCD se pro řízení používá pasivní nebo aktivní adresovatelná matice (v případě pasivního řízení zkřížených adresovacích elektrod připojených v místě křížení na anodu a katodu každé buňky):

- *pasivní matice PMOLED (passive matrix OLED)* – jsou nejlevnější, používají se pro jednodušší zobrazení – např. textu,
- *aktivní matice AMOLED (active matrix OLED)* – umožňují dosažení velkého rozlišení a používají se zejména pro televizní zobrazovače; obrazové body (pixels) jsou, podobně jako u zobrazovačů LCD, buzeny maticí tenkovrstvých tranzistorů *TFT*; nevýhodou je složitější struktura a tedy vyšší cena; kromě základních existují také zlepšené technologie OLED, např.:
 - *PHOLED (phosphorescent OLED)* – až 4× větší světelná účinnost,
 - *FOLED (flexible OLED)* – struktura OLED je umístěna na ohebné folii,
 - *TOLED (transparent OLED)* – téměř průhledný displej umožňující zobrazení na jedné nebo na obou stranách.



Obrázek 7: Televizor FOLED s prohnutým zobrazovačem, zdroj: [6]

4.3 Vlastnosti zobrazovačů OLED

Výhody:

- rozlišení – u větších úhlopříček i UHDTV – 4K, příp. 8K,
- vysoký statický kontrast – $10^5:1$ i více (primární zářiče),
- dosažitelný jas – cca 800 nitů,
- krátká doba odezvy – cca 0,01 ms,
- relativně malá spotřeba (závislá na nastaveném jasu),
- velmi tenký panel – několik mm,
- pozorovací úhel – cca 170° ,
- energetická účinnost – větší jak 30 %.

Dnes představují nejkvalitnější zobrazovače na trhu televizních přijímačů. Jejich vývoj zřejmě přispěl k poklesu zájmu o plasmové zobrazovače. Jejich nevýhodou je zatím vysoká cena. Nejasná je i životnost – zejména pro modrou barvu, která se odhaduje na cca 60 tisíc hodin. Nevýhodou je rovněž určitá paměť organických LED, která se projevuje při delším zobrazování statických částí scény (podobný efekt se projevoval u plasmových zobrazovačů).

5. Zobrazovače QLED

Význam zkratky není úplně jasný, ale zřejmě má vystihovat novou technologii *Quantum (dots) LED*, se kterou přišla před několika léty jihokorejské firma *Samsung*. Podobnou technologii vyvíjela již v roce 2013 firma *Sony*, ale neuspěla. Firma *Samsung* se původně snažila vyrábět zobrazovače OLED, ale posléze se vydala jinou cestou. Ač je zkratka podobná názvu technologie OLED, nemá s ní nic společného. Jde v podstatě o změnu technologie LED-LCD, která přinesla takové zlepšení vlastností elektrooptické transformace, že se QLED staly velkým konkurentem zobrazovačů OLED.

5.1 Princip

Princip funkce spočívá ve změně podsvícení – užívá se obvykle *matice modrých* LED. Před ní je vložena vrstva tzv. kvantových teček (*quantum dots*). Jsou to anorganické nanočástice s pozoruhodnými optickými vlastnostmi o rozměrech několika nm. Lze je vkládat do téměř jakéhokoli materiálu – sklo, polymer, film a jiné. Modré světlo v nich vybudí záření, jehož *vlnová délka* (barva) závisí na *velikosti teček*. Menší generují kratší vlnové délky a naopak. Pokud modré fotony ($\lambda \approx 450$ nm) zasáhnou *3 nm* kvantovou tečku, začne emitovat *zelené světlo* s téměř 100% sytostí. Pohltí-li je větší kvantová tečka, *7 nm*, vyzáří *sytě červené světlo*. Zelené a červené spektrální světla, vytvářená kvantovými tečkami, vytváří spolu s modrým světlem LED výsledné bílé světlo, které je složené ze tří základních spektrálních barev. Lze zobrazit až o 50 % větší počet barevných tónů, zvýšit průchodnost barevného filtru a tím také dosáhnout větší jas (až 1 500 nitů) ve srovnání s jinými zobrazovači. Optická folie s kvantovými tečkami se označuje zkratkou QDEF (*quantum dot enhancement film*).



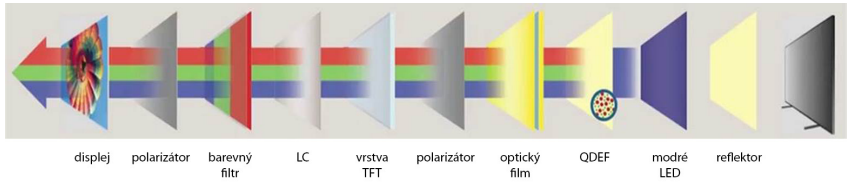
Obrázek 8: Princip zobrazovače QLED, zdroj: [4]

5.2 Technologie

Existuje více technologií pro zavedení kvantových teček do LCD displeje – od zapouzdření kvantových teček do skleněné trubice nebo lišty umístěné před modrými LED (společnosti *QD Vision*) až po optickou folii s kvantovými tečkami (QDEF) umístěnou za vrstvu *LGP (light guide panel)* před maticí modrých LED, která rozvádí rovnoměrně podsvícení (společnosti *3M* a *Nanosys*) Princip je patrný z obrázku 9. Fólie QDEF se skládá ze tří vrstev – horní a spodní bariérová fólie a prostřední vrstva kvantových teček rozptýlených v polymeru.

Výhodou technologie QDEF je, že ji lze použít v zobrazovacích libovolných rozměrech.

Jiný způsob vkládání kvantových teček do LCD zobrazovačů vyvinula např. firma *Pacific Light Technologies*. Spočívá v nanášení kvantových teček přímo na vrstvu modrých LED.



Obrázek 9: Uspořádání zobrazovače QLED s vrstvou QDEF, zdroj: [7]

5.3 Vlastnosti zobrazovačů QLED

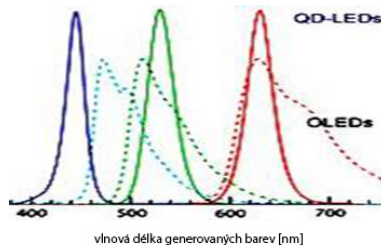
Jejich vlastnosti jsou srovnatelné s dosud nejkvalitnějšími zobrazovací OLED. Ve srovnání s nimi dosahují:

- vyšší jas (až 1 500 nitů) vlivem vyšší výtěžnosti vrstvy QDEF a možné vyšší propustnosti barevného filtru,
- poněkud menší příkon při stejné velikosti,
- rozlišení (srovnatelné s OLED) – UHDTV 4K pro velké panely 60" a více i 8K,
- nemají paměťový efekt,
- zvětšený rozsah (až o 50 %) barev (gamut). Je ovlivněn spektrálním složením spektra podsvícení, které obsahuje základní složková světla s téměř 100% sytostí, viz obrázek 10.

Zobrazovače QLED nejsou primární zářiče. Jejich obraz má proto, ve srovnání se zobrazovací OLED, menší kontrast. Cenově se zatím zobrazovače QLED blíží zobrazovačům OLED.

Očekává se, že technologie kvantových teček se bude v oblasti zobrazovačů dále vyvíjet a pronikne v blízké budoucnosti i do technologií OLED.

Poznámka: V této přednášce není zmíněna problematika 3D zobrazovačů. Ukázalo se, že 3D televize je do jisté míry slepá ulička a její význam není tak velký jak se původně předpokládalo. Navíc 3D zobrazovače televizorů užívají prakticky shodné technologie a jsou jen v některých systémech 3D zobrazení doplněny vnějšími polarizačními filtry).



Obrázek 10: Spektra základních barev QLED a OLED, zdroj: [10]

U zobrazovačů s *velmi vysokým rozlišením* se projevuje experimentálně ověřený, ale teoreticky nezdůvodněný jev. Divák si při sledování takového 2D obrazu podstatně snadněji vytváří chybějící rozměr (hloubku scény) – tedy vnímá jej prostorově.

6. Systémy pro zvýšení kvality obrazu

Zvýšení kvality vjemu obrazu přineslo v posledním desetiletí především zvýšení *rozlišovací schopnosti* zobrazovačů, které muselo být podpořeno i změnou přenosových systémů a standardů.

Na kvalitu obrazu má však velký vliv také jasový kontrast a rozsah zobrazitelných barev. Pokrok kvality zobrazování v televizní technice se v posledním období projevila právě v těchto oblastech. Tyto vlivy jsou do značné míry provázány. Proto také jistý zlom přinesly nové technologie zobrazovačů (OLED, QLED) současně s rozlišením UHDTV.

6.1 Systém HDR (*high dynamic range*)

HDR zlepšuje zobrazení zejména hůře osvětlených částí scény zvětšením počtu stupňů šedi (obrázek 11). Principy tvorby HDR obrazu ve fotografii a v televizní technice jsou zcela rozdílné. Ve fotografii se HDR vytváří při *snímání* jako *kompozice* několika různě exponovaných snímků (pro ten proces existují také speciální software).



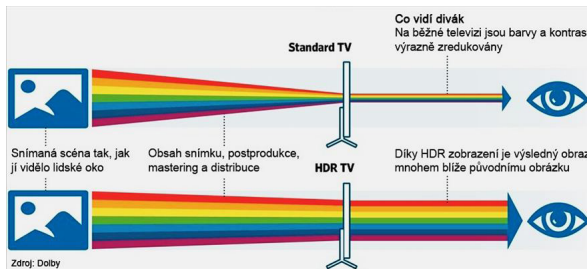
Obrázek 11: Vliv HDR na obraz, zdroj: [4]

V televizi se HDR video naopak vytváří *při zobrazování*. Současné televizní vysílání ale i záznam na DVD, Blu-ray disky a na jiná media stále ještě odpovídají době, kdy televizní technika neumožňovala zpracovat plný rozsah jasu. Standardní dynamický rozsah obrazového signálu, označovaný SDR (*standard dynamic range*), je proto silně komprimován, jak je patrné z obrázku 12, na kterém je princip obou systémů zjednodušeně zobrazen.

Aby byl systém HDR funkční, musí mít nejen zobrazovač, ale i *celý řetěz* zpracování – tedy snímání, zdrojové kódování i dekódování obrazového signálu potřebné para-

metry. Například průměrný jas současných LCD zobrazovačů pro bílou je přibližně 800 nitů. V HDR ale musí zobrazovač generovat jas nejméně 1000 nitů. Měl by být také opatřen technologií, která brání průniku světla do sousedních pixelů HDR zobrazovače vyžadují 10–12 bitovou reprezentaci jasu signálů základních barev. Zvětšený bitový rozsah však sám o sobě nestačí. Pro HDR jsou s obrazovým signálem přenášena tzv. *metadata*. Ta řídí jasové mapování scény. Problém představuje také existence více formátů (standardů) – *HDR10*, *HDR10+*, *Dolby Vision*, *HLG*. Systém HDR10 užívá 10 bitovou reprezentaci a *statická metadata*, která ovládají limitní hodnoty jasu a jeho mapování pro celou sekvenci snímků najednou. Systém HDR10+ užívá *dynamická metadata* (mapování jasových hladin lze měnit prakticky pro každý snímek), stejně jako v případě systému *Dolby Vision*. Ten navíc využívá 12bitovou reprezentaci jasového signálu. Jediným výrobcem, jehož televizory v roce 2017 podporovaly všechny formáty, byla firma LG.

Pro sledování HDR kteréhokoliv z těchto formátů, musí mít televizor odpovídající dekodér a jeho zobrazovač musí být schopný tento signál zobrazit. To se týká i sledování videa z disků 4K Blu-Ray (nejčastěji formát HDR10 nebo *Dolby Vision*) nebo internetového vysílání – např. *YouTube* (užívá kodek HLG), *Netflix*, který užívá HDR10+ a *Dolby Vision*.



Obrázek 12: Srovnání SDR a HDR, zdroj: [4]

Poznámka: Certifikace *Ultra HD Premium* (UHDP) slouží ke sjednocení parametrů jednotlivých formátů. Označení televizoru *Ultra HD Premium* garantuje plnou podporu HDR. Zaručuje, že bude-li mít kromě televizoru, požadované parametry, také přijímaný obsah, Blu-Ray přehrávač, Blu-Ray disk, ale i propojující HDMI 2.0 kabel, získá divák obraz v nejlepší možné kvalitě. Certifikace byla sice navržena pro rozlišení UHDTV, ale HDR může fungovat i pro jiná (menší) rozlišení, protože se týká především kvality a počtu stupňů jasu obrazu.

Certifikace UHDP pro zobrazovače – požadavky:

- rozlišení displeje 3840×2160 obrazových bodů,
- barevná hloubka (bitová reprezentace) 10 bitů,
- schopnost zpracovat standardy WCG a ITU R BT.2020,

- reprodukce barev pokrývající více než 90 % P3,
- standard HDR (SMPTE ST2084 EOTF),
- rozsah jasu 0,05–1 000 nitů pro LCD panely a 0,0005–540 nitů pro OLED panely.

7. WCG (wide color gamut)

7.1 Úvod

Jakýkoli zobrazovač nebude nikdy schopen barevně věrně zobrazit reálnou scénu už jenom proto, že snímač neuskuteční její dokonalou optoelektrickou transformaci. Dalším důvodem je skutečnost, že žádný současný zobrazovač využívající tři základních barevných složkových světél neobsáhne celý rozsah barev vnímatelných člověkem. Pro zlepšení vjemu barevného obrazu je třeba:

- zvětšit počet zobrazovačem reprodukovatelných barevných tónů a jejich jasu,
- zvýšit počet jasových úrovní.

Pro splnění první podmínky je nutný zásah do technologie zobrazovačů a vytvoření nových zdrojů základních barevných světél se sytými (spektrálními) barvami. To se povedlo až u zobrazovačů OLED a zejména pomocí techniky kvantový teček u zobrazovačů QLED. Pro splnění druhé podmínky je nutný systémový zásah do celého řetězu snímání, přenosu a zobrazení zavedením 10, příp. 12 bitového vyjádření složkových barevných signálů, Stejný problém je řešen v HDR a to vlastně oba systémy spojuje. Protože se zvýšení bitové reprezentace projeví i zvýšením nároků na přenosovou (bitovou) rychlost stejně jako vyšší rozlišení, nastal logicky nástup HDR i WCG spolu se zavedením standardů UHD TV.

7.2 Obrazec CIE

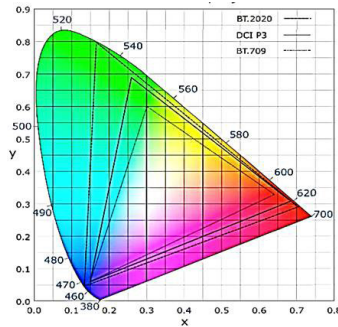
CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) – Mezinárodní komise pro osvětlování zavedla již v roce 1931 pro znázornění člověkem vnímaných barev chromatický 2D diagram, který se stále užívá (obrázek 13). Lze v něm zakreslit množinu barev zobrazitelných zobrazovačem ve formě trojúhelníka, jehož vrcholy tvoří souřadnice konkrétních základních složkových barev, které zobrazovač používá. V 2D diagramu se ale zobrazuje jen *tón barvy* (definovaný její vlnovou délkou) a její *sytost*. Barevný vjem diváka však ovlivňuje i *jas* jednotlivých barev.

V diagramu CIE na obrázku 13 jsou takto zakresleny tři oblasti reprodukovatelných barev v televizních a jiných aplikacích a označené *BT.709*, *DCI-P3* a *BT.2020* (existují i jiné barevné prostory např. Adobe RGB aj.

BT.709 (známé i pod zkratkou *Rec.709*) odpovídá *Doporučení ITU-R BT.709* z roku 1990. Je to platný standard pro televizní formáty s *vyšším rozlišením HDTV*. Prostor člověkem vnímatelných barev *pokrývá cca z 36 %*.

Doporučení *DCI-P3* je návrhem sdružení *Digital Cinema Initiative*, Oblast reprodukovatelných barev je protažena do oblasti zelené barvy a zahrnuje cca 53% pokrytí rozsahu člověkem vnímatelných barev.

Doporučení *BT.2020* bylo schváleno v rámci standardu *BT.2020 ITU-R UHDTV* v roce 2015. Je určeno pro *ultravysoké rozlišení* na velkých zobrazovačích s *HDR*. Jeho součástí je i širší barevný gamut *WCG* s cca 75% pokrytím zejména v oblasti zelené barvy a s větší barevnou hloubkou (10–12 bitů). Nejasné zůstává, zda se v nejbližších letech výrobcům zobrazovačů podaří požadavky splnit.

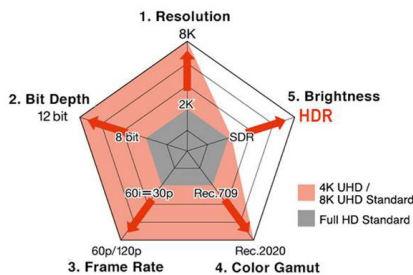


Obrázek 13: Diagram CIE, zdroj: [8]

7.3 Shrnutí

Pět hlavních faktorů, které ovlivňují subjektivní kvalitu obrazu v televizních systémech je symbolicky znázorněno na obrázku 14.

Nejnovější doporučení *ITU-R BT.2100* z roku 2016 umožňuje navazuje na doporučení *BT.2020*. Operátorům televizního obsahu umožňuje vybírat z rozlišení *HDTV*, *UHDTV 4K*, a *UHDTV 8K* pro progresivní zobrazovací systémy s rozšířeným dynamickým rozsahem a barevným gamutem.



Obrázek 14: Faktory ovlivňující kvalitu obrazu, zdroj: [9]

8. Zdroje

- [1] Pelikán, J.: Technické vybavení počítačů <<http://www.fi.muni.cz/usr/pelikan/vyuka/PV094/predn11/predn.pdf>>.
- [2] <<https://www.androidauthority.com/amoled-vs-lcd-differences-572859/>>.
- [3] Říčný, V.: Novinky v TV technice. Sborník semináře České elektrotechnické společnosti. Praha, 2017.
- [4] Říčný, V.: Moderní zobrazovače. Sborník přednášek semináře UNIT. Brno, 2017.
- [5] <<http://poli.cs.vsb.cz/edu/apps/down/monitory.pdf>>.
- [6] <<https://www.novinky.cz/internet-a-pc/325554-prvni-prohnuty-televizor.html>>.
- [7] <<https://www.displaydaily.com/article/display-daily/future-of-quantum-dot-display-niche-or-mainstream>>.
- [8] <<https://www.cnet.com/news/ultra-hd-tv-color-part-ii-the-future/>>.
- [9] <<https://www.eizo.cz/poznatky-z-praxe/vedomosti-o-monitorech/hdr-detailne-co-je-hdr/>>.
- [10] <<https://avmania.e15.cz/kvantove-tecky-prichazeji-do-tv-co-muzeme-od-novinky-cekat>>.
- [11] Hubinsky, R. Zobrazovacie technologie televizorov <<https://www.pcrevue.sk/s/zobrazovacie-technologie-televizorov>>.

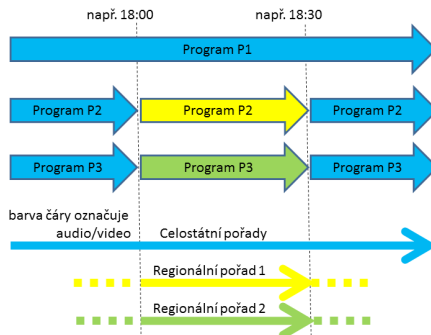
Regionální vysílání České televize v síti DVB-T2

Ing. Karel Trpák

Česká televize, vysílací technika

O přechodu zemského vysílání na standard DVB-T2 tady na konferenci Radio-komunikace hovoříme již několik let, a to z nejrůznějších úhlů pohledu. Je však ještě jedna oblast, o které jsme se příliš nezmiňovali, a to je regionální vysílání České televize. Původní záměr byl vytvořit jednu síť určenou speciálně pro regionální vysílání, a to nejen veřejnoprávní, ale i soukromé. Tento záměr nejspíš ještě není mrtev, ale doba jeho možné realizace se oddálila natolik, že Česká televize, která má regionální vysílání a jeho rozšiřování jako jednu z významných priorit (odkazují na projekt generálního ředitele ČT Petra Dvořáka s názvem #CT2023), se musela vážně zabývat myšlenkou, jak tomuto úkolu dostat. A dlužno říci, že neexistence regionální sítě České televize nám tento úkol nijak neulehčila. Jako budoucí operátor multiplexu 21 máme přidělenou prakticky na celém území České republiky jednofrekvenční síť na 26. kanálu. Protože SFN síť není možné teritoriálně dělit, nezbývalo, než sáhnout k použití tzv. dynamických PMT tabulek a statistického multiplexu. A to je téma, kterému se chci v dnešním příspěvku věnovat. Téma je o to aktuálnější, že právě ve dnech konání konference bude zprovozněn náš nový head-end využívající popisovanou technologii.

Dynamické PMT tabulky se pro regionální vysílání běžně používají v satelitním vysílání v sousedních státech (Rakousko a Německo) a také u operátora E4C group v satelitním vysílání České televize zde v České republice. Princip je jednoduchý. V konkrétním multiplexu jsou v PAT a PMT tabulkách nadefinovány vedle určitého hlavního programu i jeho regionální varianty. Po většinu času však tyto tabulky u regionálních programů odkazují na obrazový a zvukový stream hlavního (celostátního) programu a pouze v čase regionálního vysílání se odkaz v tabulkách změní na příslušný obrazový a zvukový stream s regionální mutací. Celá situace je naznačena graficky na obrázku 1.



Obrázek 1: Dynamické PMT tabulky

Existují obavy, a hned v úvodu přiznám, že v ojedinělých případech oprávněně, že některá přijímací zařízení nebudou dynamické změny v SI streamu vyhodnocovat správně. Nicméně, český D-Book, neboli dokument s oficiálním názvem „*Minimální požadavky na přijímací zařízení pro poskytování služeb v sítích DVB-T a DVB-T2*“, ve verzi 4.03 ze srpna 2016 v kapitole 3.3.3 říká doslova:

Podpora dynamických změn SI tabulek

Zařízení musí dynamicky vyhodnocovat změny tabulek PAT, PMT, SDT a NIT v jednotlivých transportních datových tocích a na tyto změny v reálném čase reagovat. Změny mohou nastat zejména:

- *při doplnění nového programu do transportního toku,*
- *při ukončení vysílání některého programu,*
- *při pravidelné výměně programů v denním nebo týdenním cyklu,*
- *při přepínání regionálních variant programu,*
- *při přidání resp. odebrání jazykových variant zvukového doprovodu,*
- *při přidání podtitulků,*
- *při plánované změně vysílacího kmitočtu (tabulka NIT),*
- *při přidání jiných datových služeb, jako je SSU apod.*

S každou změnou se inkrementuje číslo verze změněné tabulky.

A obdobné ustanovení bylo obsaženo ve verzi 2.06 tohoto dokumentu, která byla zveřejněna již v roce 2010. Výrobci i dovozci přijímacích zařízení tedy měli opravdu dostatek času, aby mohli požadovanou funkcionalitu do firmware svých přístrojů zapracovat. Skutečnost, že se bohužel na trhu vyskytuje několik set-top boxů, které toto ustanovení nespĺňují, jen podtrhuje důležitost normalizace a také testování a certifikace, aby zákazník kupující si konkrétní přijímací zařízení měl jistotu, že vše bude fungovat bezchybně. Je dobře, že v České republice se před časem normalizace ujal Český telekomunikační úřad, a certifikace pak společnost České radiokomunikace.

Pro úplné pochopení toho, co se při přepnutí na regionální programy ve služebních SI datech DVB multiplexu odehrává, se stačí podívat na začátek standardu ISO/IEC 13818-1:2000 „*Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems*“. Každý transportní tok sestavený podle tohoto standardu musí obsahovat datový stream s identifikátorem PID (*packet identifier*) 0x0000. Ten nese tzv. PAT (*program association table*). Ta obsahuje číselné identifikátory jednotlivých programů, které jsou v multiplexu obsaženy, a ke každému z nich mimo jiné udává číslo streamu, tzv. PID, který nese další popis tohoto programu. Na těchto streamech pak najdeme tzv. PMT (*program map table*), které jsou pro nás v daném okamžiku nejzajímavější. V nich jsou totiž uvedeny 13 bitové identifikátory streamů (PIDs) všech součástí daného programu, tedy obrazu, všech zvukových doprovodů, skrytých titulků, signalizace HbbTV, apod.

V okamžiku, kdy je potřeba přepnout na regionální vysílání, se příslušné tabulky PMT aktualizují a začnou odkazovat na jiné elementární streamy programových komponent.

Syntax	No. of bits	Mnemonic
<code>program_association_section() {</code>		
<code>table_id</code>	8	uimsbf
<code>section_syntax_indicator</code>	1	bslbf
<code>'0'</code>	1	bslbf
<code>reserved</code>	2	bslbf
<code>section_length</code>	12	uimsbf
<code>transport_stream_id</code>	16	uimsbf
<code>reserved</code>	2	bslbf
<code>version_number</code>	5	uimsbf
<code>current_next_indicator</code>	1	bslbf
<code>section_number</code>	8	uimsbf
<code>last_section_number</code>	8	uimsbf
<code>for (i = 0; i < N; i++) {</code>		
<code>program_number</code>	16	uimsbf
<code>reserved</code>	3	bslbf
<code>if (program_number == '0') {</code>		
<code>network_PID</code>	13	uimsbf
<code>}</code>		
<code>else {</code>		
<code>program_map_PID</code>	13	uimsbf
<code>}</code>		
<code>}</code>		
<code>CRC_32</code>	32	rpchof
<code>}</code>		

Obrázek 2: Struktura PAT tabulky

Syntax	No. of bits	Mnemonic
<code>TS_program_map_section() {</code>		
<code>table_id</code>	8	uimsbf
<code>section_syntax_indicator</code>	1	bslbf
<code>'0'</code>	1	bslbf
<code>reserved</code>	2	bslbf
<code>section_length</code>	12	uimsbf
<code>program_number</code>	16	uimsbf
<code>reserved</code>	2	bslbf
<code>version_number</code>	5	uimsbf
<code>current_next_indicator</code>	1	bslbf
<code>section_number</code>	8	uimsbf
<code>last_section_number</code>	8	uimsbf
<code>reserved</code>	3	bslbf
<code>PCR_PID</code>	13	uimsbf
<code>reserved</code>	4	bslbf
<code>program_info_length</code>	12	uimsbf
<code>for (i = 0; i < N; i++) {</code>		
<code>descriptor()</code>		
<code>}</code>		
<code>for (i = 0; i < N1; i++) {</code>		
<code>stream_type</code>	8	uimsbf
<code>reserved</code>	3	bslbf
<code>elementary_PID</code>	13	uimsbf
<code>}</code>		
<code>reserved</code>	4	bslbf
<code>ES_info_length</code>	12	uimsbf
<code>for (i = 0; i < N2; i++) {</code>		
<code>descriptor()</code>		
<code>}</code>		
<code>CRC_32</code>	32	rpchof
<code>}</code>		

Obrázek 3: Struktura PMT tabulky

Na obrázku 2 je struktura PAT tabulky, kde zeleně je podtržena položka odkazující na PMT tabulku příslušného programu, a na obrázku 3 je struktura PMT tabulky. Červeně podtržené jsou hodnoty, které se při přepnutí na regionální programy či zpět na celostátní program musí změnit. Jednak je to číslo verze, které se při každé změně inkrementuje, a jednak jsou to identifikátory všech streamů obrazu, zvuků, dat, atd. Lze také využít možnosti odvysílání následující připravené, ale dosud neplatné verze tabulky. To umožňuje čárkovaně podtržený parametr *current_next_indicator*. Má-li hodnotu 1, jedná se o právě aktuální platnou verzi tabulky, má-li hodnotu 0, jde o připravenou dosud neaktuální verzi tabulky, která bude platná při následující změně. To umožní dekodéru v předstihu se na změnu připravit.

Přepnutí na regionální programy a zpět je časově poměrně náročná operace. Aby se minimalizovaly rušivé efekty, které při tom mohou vzniknout, při výběru zařízení pro náš head-end jsme si definovali parametry, které musela technologie splnit. Na jedné straně jsme byli omezeni maximálním předstihem, se kterým může náš automatizovaný odbavovací systém dát povel k přepnutí, což je 8 sekund. Z programového hlediska je také omezená délka klipu, během něhož dojde k přepojení. Reakční doba od povelu ke změně až po dokončení změny módu na výstupu multiplexeru se nesmí měnit o víc než ± 1 sekundu a nesmí překročit součet osmisekundového předstihu a zpoždění signálu mezi vstupem enkodéru a výstupem multiplexeru, které jsme navíc omezili na max. 10 sekund. Přepnutí módu také nesmí způsobit výpadek obrazu ani zvuku na výstupu standardního televizního dekodéru na dobu delší než 2 GOP sekvence. Přestože jsou kodéry pro celostátní i regionální programy synchronizovány stejným hodinovým kmitočtem, tak v jeden okamžik nemusí GOP sekvence začínat na všech programech stejně. Dokonce to není ani žádoucí, aby statistický multiplex měl co největší efektivitu. Tím pádem ale při přepnutí streamů dojde k narušení GOP sekvence a tedy k viditelné poruše v obrazu, většinou zamrznutí nebo přechodu do černé, a k mžkové pauze ve zvuku. Výsledný efekt se liší podle výrobce a modelu přijímacího zařízení, resp. dekodéru.

Další důležitou vlastností, kterou jsme při výběru zařízení pro náš head-end posuzovali, byla schopnost kodérů využívat výhod statistického multiplexování a možnost dynamicky měnit jeho parametry v závislosti na počtu právě vysílaných programů. Protože parametry vysílací sítě 21 a tím i její přenosová kapacita jsou pevně dány (tabulka 1) a je nezbytné tuto kapacitu za všech okolností využívat co nejefektivněji, je zapotřebí při změně počtu programů měnit nastavení statistického multiplexu.

parametr	hodnota
kmitočtové pásmo	UHF, 8 MHz kanál
FFT	32k extended
pilot pattern	PP2
ochranný interval	1/8
konstelace	256 QAM s rotací

kódový poměr	2/3
odstup C/N (Riceův kanál)	20,0 dB – příjem typu „outdoor fixed“
datová kapacita	cca 33,35 Mbit/s

Tabulka 1: Parametry multiplexu 21

Při přepnutí na regionální vysílání se celkový bitový tok multiplexu samozřejmě nezmění, ale bude sdílen až 9 programy místo původních 5. Navíc se v té chvíli musí snížit součet bitových toků videa, aby se získal prostor především pro zvukové doprovody a DVB podtitulky přiřazené regionálním programům. Ostatní nastavení statistického multiplexu (výchozí bitové toky a priority jednotlivých programů) se musí změnit také. Návrh takového nastavení parametrů statistického multiplexu ukazuje tabulka 2. Rozdíl mezi datovým tokem věnovaným obrazu a celkovou kapacitou vysílacího multiplexu je samozřejmě dán zvukovými doprovody a datovými službami (podtitulky, HbbTV, apod.) nehledě na to, že některé streamy jsou společné pro celý multiplex. Z nich nejvýznamnější podíl má elektronický programový průvodce (EPG) s datovým tokem až 1 Mbit/s. V tabulce si všimněte již zmíněné skutečnosti, že při regionálním vysílání je celková přenosová kapacita, kterou je možné poskytnout pro obrazovou informaci, podstatně menší, než kapacita při celostátním vysílání. Opět je to samozřejmě způsobeno nezbytnými zvukovými doprovody a datovými službami, které ani u regionálních programů nesmí chybět. Konečně určitou malou část kapacity je potřeba v rozvaze nechat zcela nevyužitou pro pokrytí případných špiček v datových tocích. U dobrých zařízení je tento nezbytný bezpečnostní prostor zhruba 350 kbit/s.

program	celostátní vysílání		regionální vysílání	
	datový tok [kbit/s]	priorita [%]	datový tok [kbit/s]	priorita [%]
CT 1 HD	5300	60	2200	20
CT 2 HD	5300	60	3000	60
CT 24 HD	4300	40	2200	20
CT sport HD	5800	80	3000	60
CT :D/art HD	5300	60	3000	60
CT 1 SM HD			2200	20
CT 1 JM HD			2200	20
CT 1 SVC HD			2200	20
CT 1 JZC HD			2200	20
statmux pool	26000		22200	

Tabulka 2: Parametry statistického multiplexu

Velkou výhodou systému s využitím dynamických tabulek oproti systému s pevným regionálním rozdělením vysílací sítě je dostupnost kteréhokoli regionálního programu v libovolném místě pokrytém signálem DVB-T2. Vzpomínám na situaci, kdy obyvatelé v okolí vysílače Jihlava se neuměli dohodnout, zda chtějí mít možnost sledovat celostátní („české“) vysílání nebo vysílání zaměřené na jižní Moravu. Česká televize tehdy

na základě žádosti skupiny obcí žádala České radiokomunikace o změnu topologie distribuční sítě, aby po několika měsících na základě tlaku větší skupiny jiných obcí žádala o změnu zpět. Nyní, se zavedením dynamických tabulek ve vysílání DVB-T2, si nejen jednotlivé obce, ale i jednotliví diváci ve stejné obci budou moci zvolit, jakou variantu vysílání chtějí sledovat. A navštíví-li tetička z Břeclavi své příbuzné v Ústí nad Labem, potom i ta bude moci sledovat regionální zprávy ze svého Jihomoravského kraje.

Na závěr se zmiňme ještě o tom, jakými signály bude nový regionální head-end napájen. A začněme krátkým výletem do historie regionálního vysílání. Ostravské televizní studio vysílá od 31. prosince 1955. Zajímavé je, že toto studio zprvu nebylo součástí Československé televize, jednalo se o dvě samostatné organizace. Po roce pak byla Ostravská televize propojena pomocí radioreléové trasy s pražským studiem, což umožnilo výměnu pořadů. Teprve později se ostravské studio stalo pevnou součástí ČST. Brněnské studio se stalo čtvrtým regionálním studiem ČST až po Ostravě, Bratislavě a Košicích, a 6. července 1961 odvysílalo první živý pořad ze studia Typos. Kromě úvodní ostravské epizody však obě regionální studia v českých zemích po dlouhou dobu pouze přispívala do celostátního programu. Samostatné regionální vysílání pro severní a jižní oblasti Moravy započalo až v 70. letech minulého století na okruhu ČST1. Odpojování příslušných částí distribuční sítě zemského vysílání bylo přitom řešeno na úrovni společnosti České radiokomunikace. V roce 2003 se přešlo na digitální primární distribuci pomocí technologie ATM a i tehdy bylo možné odpojit jižní a severní moravskou část distribuční sítě pomocí tzv. splicingu. Teprve od roku 2010 bylo zavedeno centrální odbavování obou regionálních mutací programu ČT1 z Prahy, což následně umožnilo 3. ledna 2011 zahájit pravidelné satelitní vysílání regionálních programů. A ještě jedno datum je třeba zmínit – od listopadu 2016 jsou i regionální programy na satelitu k dispozici ve vysokém rozlišení (HD).

Jak jsem již zmínil v úvodu, jednou z hlavních priorit České televize je další posílení regionálního vysílání. Vedle výstavby krajských studií v Hradci Králové, Českých Budějovicích a nejnověji v Ústí nad Labem a Plzni, chystáme v síti DVB-T2 i další dva regionální programy s pracovními názvy Severovýchodní Čechy a Jihozápadní Čechy. Ostatně zkratky SVC a JZC jste si nejspíš všimli již ve výše uvedené tabulce 2. To však bude možné až po zásadní rekonstrukci odbavovacích pracovišť, tedy někdy po roce 2020. Věřím, že o této významné akci si tady na konferenci opět něco řekneme.

Technologicky pokročilé řešení STA v době přechodu na DVB-T2

Doc. Ing. Jiří Masopust, CSc.

ZČU v Plzni, FEL, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

V období přechodu na nový standard vysílání televize DVB-T2 s kódováním HEVC v České republice se naskytá otázka, jak řešit koncepci společných antén STA. Mění se a do dosažení konečného stavu se budou měnit televizní kanály, na nichž vysílají jednotlivé multiplexy. Týká se to nejen českých kanálů, ale v příhraničních oblastech i kanálů ze sousedních států. Některé kmitočty se uvolňují, na jiných vysílání zahajuje. Klasické řešení hlavních stanic STA pomocí pevně nastavených kanálových zesilovačů přináší v období přechodu velký problém. Při každé změně je třeba kanálový zesilovač nahradit či minimálně přeladit a nastavit výstupní úroveň. To je drahé jak z hlediska materiálu, tak ceny servisních prací. Již v minulosti bylo možné HS osadit technologií programovatelných kanálových zesilovačů s automatickou regulací zisku. Tato technologie však byla mnohem dražší a byla nasazována jen sporadicky.

Prudký technologický pokrok a metody pokročilého zpracování signálů však přinesly nové koncepce integrovaného řešení HS STA s vynikajícími parametry.

Příspěvek se zabývá právě příkladem takového řešení, které se vyznačuje velkou flexibilitou a extrémně nízkou cenou při zachování vynikajících parametrů STA. Samozřejmostí je pak přepěťová ochrana na vstupech HS, kvalitní LTE filtry a automatické udržování úrovní signálů jednotlivých multiplexů v STA.

1. Situace STA v Období přechodu na DVB-T2 HEVC

Ukázkou složitosti situace řešení STA v době přechodu na nový standard DVB-T2 s kódováním HEVC může být situace v Plzni:

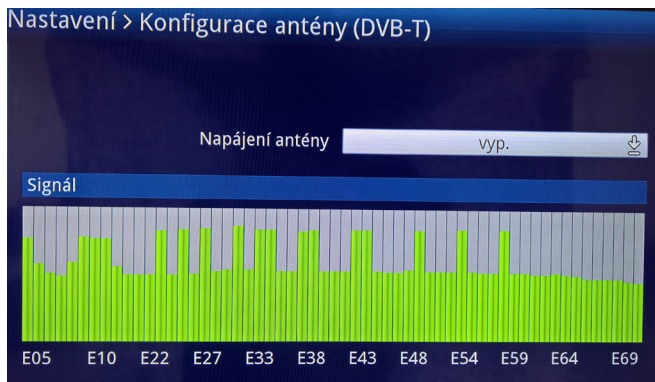
STA na panelovém domě ve čtvrti Plzeň Lobzy zajišťuje příjem třinácti multiplexů DVB-T a DVB-T2, z nichž většina změní během přechodu kmitočet nebo bude vypnuta. Dále umožňuje příjem multiplexů DAB na kanálech 10, 11 a 13 a vysílání v pásmu FM. Navíc se zde vyskytují tři dvojice multiplexů na sousedních kanálech. V těchto sousedících kanálech jsou na vstupu STA rozdíly v úrovních i více než 20 dB. Rozložení kanálů je vidět na obrázku 1, který ukazuje kopii konfiguračního menu přijímače Technisat připojeného k STA počátkem roku 2019.

Je zřejmé, že podobnou situaci nalezneme nejen v Plzni, ale i na mnohých dalších místech ČR.

Jaké jsou tedy základní problémy, jež je třeba u STA v tomto období řešit:

- počet kanálových zesilovačů osazených v STA,
- flexibilita v nastavení přijímaného kmitočtu,
- regulace zisku jednotlivých kanálů,
- selektivita a potlačení intermodulačních kmitočtů,

- potlačení signálů LTE sítí,
- případné kmitočtové konverze,
- ochrana před atmosférickou elektřinou,
- spotřeba a provozní náklady,
- cena rekonstrukce hlavní stanice STA,
- cena následného nastavení či změny konfigurace během jednotlivých fází přechodu.



Obrázek 1: Rozložení kanálů na STA

2. Příklad integrovaného pokročilého řešení hlavní stanice STA

Výše uvedené požadavky lze samozřejmě řešit klasickými technologiemi. Složitost, finanční náročnost i energetická spotřeba jsou však dosti vysoké. Například při osazení hlavní stanice v požadované konfiguraci technologií ALCAD řady 900 musíme použít až 17 kanálových zesilovačů, dva napájecí zdroje s odběrem kolem 100 W, separátní LTE filtry od každé antény, přepětové ochrany a předzesilovače.

Při každé změně v přijímaných multiplexech musíme při změně kmitočtu vyměnit či alespoň přeladit přijímaný kmitočet, nastavit úroveň a případně vyměnit LTE filtry. K ceně komponent musíme připočítat nemalou částku za kvalifikovanou práci. Ke změně konfigurace hlavní stanice dojde během přechodu na nový standard nejméně 4x!

Jak již bylo řečeno v úvodu, prudký technologický pokrok a metody pokročilého zpracování signálů přinesly nové koncepty integrovaného řešení flexibilních hlavních stanic STA s vynikajícími parametry za přijatelné ceny. Příkladem může být dále popsané řešení od výrobce UNITRON.

Na 5 vstupů lze připojit 4 antény UHF/VHF s případnými externími předzesilovači napájenými přes kabel napětím 12 nebo 24 V a jednu anténu FM.

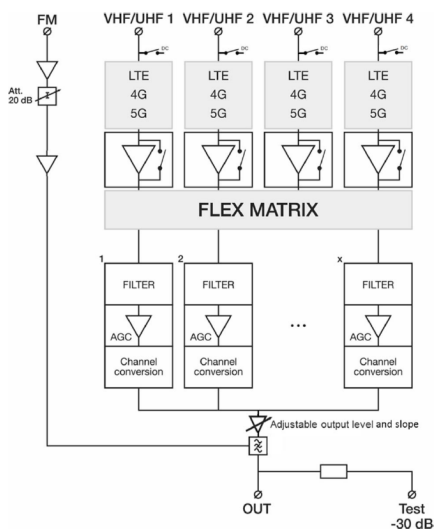
Na každém vstupu je osazena přepěťová ochrana a LTE filtr s volitelným mezním kmitočtem, jež se automaticky volí podle přiřazených zpracovávaných kanálů konkrétního vstupu (694 MHz, 790 MHz nebo vypnut). Následují odpojitelné interní předzesilovače.

Signál FM je nejprve předzesílen, úroveň je upravena v programovatelném atenuátoru a po výkonovém zesílení přiveden na výstup zesilovače.

Pro UHF a VHF signály je k dispozici čtveřice bloků filtrace, konverze a úpravy signálu. Do každého bloku lze přiřadit odpovídající počet kanálových či pásmových filtrů s programovatelnou strmostí (možnosti optimalizace dle separace kanálů či MER). Dále lze konvertovat každý přijímaný kanál na libovolný jiný kanál (optimalizace rozvodu). Maximální počet zpracovávaných kanálů (filtrace a případná konverze) je 50. Úroveň výstupu každého bloku je automaticky regulována na naprogramovanou úroveň. Výstup lze naprogramovat také jako náklonový zesilovač (kompenzace útlumu kabelových rozvodů).

Vstupní napětí zesilovače je pro FM 37–77 dB μ V a pro UHF/VHF 40–109 dB μ V. Maximální napětí na výstupu může být větší než 110 dB μ V. Pro případnou kontrolu je možné připojit měřicí aparaturu na testovací výstup –30 dB.

Zesilovač má i s vyměnitelným spínáním zdrojem hmotnost 0,8 kg, spotřebu méně než 15 W a cenu pod 8 000 Kč!



Obrázek 2: Blokové schéma zesilovače hlavní stanice s pokročilou technologií

To jsou parametry, jež umožňují jednoduchou a rychlou náhradu stávajících zesilovačů HS STA. Počet možných zpracovávaných kanálů DVB-T, DVB-T2 a DAB

s rezervou stačí na i tak složitou situaci, jaká je v některých lokalitách (Praha, Plzeň, Brno, příhraničí, ...). Takovéto řešení se pak dá uplatnit i pro malé STA např. v rodinných domcích či firmách a institucích.

Intuitivní naprogramování celého zesilovače netrvá déle než 10 minut a konfiguraci lze uložit na SD paměťovou kartu, což umožňuje v dané lokalitě velmi rychlou opakovanou instalaci.

Ve většině případů se instalace zesilovače obejde bez speciálních měřících přístrojů. Není nutné měřit úroveň (zesilovač je zobrazuje) ani nastavovat a měřit úroveň na výstupech kanálových zesilovačů (přítomnost AGC).

Změna konfigurace přijímaných multiplexů je velmi jednoduchá a vyžaduje jen několik málo minut. Na zapojení není třeba nic měnit, jen se naprogramují změny kanálů ovladačem na zesilovači (není potřeba žádný programátor!).

Nasazení a parametry byly s úspěchem ověřeny v lokalitě Plzeň-město začátkem roku 2019 (situace: 3× MUX DVB-T ze SRN, polarizace V, 6× MUX DAB, 3× MUX DVB-T2 ČR, 7× MUX DVB-T ČR). V březnu došlo k přechodu na DVB-T2 v SRN a ke změně kmitočtu dvou ze tří dotčených MUXů. Přenastavení bylo otázkou 5 minut. Parametry byly ověřeny měřením přístroji PROMAX, která prokázala zachování potřebných parametrů signálů na účastnických zásuvkách rozvodu STA.

3. Závěr

Závěrem lze konstatovat, že v obvyklých případech představuje zmíněné řešení HS STA optimální přístup jak z pohledu pořizovací ceny, provozních nákladů, tak z pohledu nízké ceny servisních zásahů v období přechodu na DVB-T2.

Nová pokročilá technologie programovatelných zesilovačů pro STA rozvody v praxi

*Jakub Melín
DVB Servis*

Počátkem roku 2018 přišla na trh s komponenty pro distribuci televizních a rozhlasových signálů nová DSP technologie programovatelných zesilovačů. Samotné programovatelné zesilovače jsou na trhu již delší dobu a za relativně nízkou cenu umožňují filtraci a zesílení signálu v systémech pro ITA/STA rozvody, až do nástupu této nové technologie nicméně nemohly konkurovat konvenčnímu řešení STA pomocí kanálových vložek a to zejména v parametrech selektivity a výkonu samotného zesilovače, které nebyly pro kvalitní řešení STA rozvodů mnohdy dostatečné.

Novou generaci DSP programovatelných zesilovačů přinesla na trh nejprve firma Unitron pod obchodním názvem Johansson Profiler Revolution, nedlouho na to se přidali s vlastními řešeními i další známí výrobci jako Teledesic, Ikusi nebo LEM Elettronica. Další značky zvolily OEM řešení, například Emme Esse, Fracarro nebo Triax prodávají výrobek Unitronu, Alcad pak zvolil italský LEM. Nejvýraznějším přínosem těchto zesilovačů je jejich vynikající selektivita, která dosahuje $> 35 \text{ dB/1 MHz}$, v tomto parametru se výrobky různých firem neliší, je daný použitým čipem. V parametru selektivity se tak tyto zesilovače dostaly na lepší úroveň, než mají v STA rozvodech nejčastěji používaná řešení postavená na kanálových vložkách (v ČR nejčastěji na komponentách Alcad).



Obrázek 1: Antennní systém STA pro DVB-T2, FM i DAB

Většina z DSP zesilovačů má 3–4 programovatelné UHF/VHF vstupy a disponuje možností konverze libovolných VHF/UHF kanálů. Zesilovače mají v pásmu UHF a VHF automatické AGC zesílení, což zajišťuje maximální zesílení bez ohledu na kolísání signálu a všechny disponují i vstupem pro pásmo VKV FM. Nejvýkonnější model v nabídce těchto zesilovačů Ikusi ONE+ pak umožňuje výstupní signál až 119 dBuV

pro 6 DVB-T/T2 multiplexů, čímž překonává i řešení postavené na kanálových vložkách a je vhodný i pro rozsáhlé STA rozvody ve velkých domech.

V praxi se zatím tato nová technologie programovatelných zesilovačů osvědčila na maximum. V porovnání s vložkovou technologií je selektivita srovnatelná s vložkami Alcad řady ZG-431 a výrazně překonává vložky Alcad ZG-401. Díky vysoké selektivitě spolu s možností konverze lze zesilovače využít i pro příjem slabých signálů (ty nejslabší je vhodné předzesílit), zejména u slabších signálů je vhodné pro maximální kvalitu výstupního signálu využít i konverzi s odstupem vždy o jeden UHF kanál. V pásmu VHF lze také filtrovat kanály a také zde funguje AGC, což lze využít pro příjem digitálního rozhlasu DAB+ a vyrovnání signálů různých multiplexů. V Praze a okolí lze takto do STA rozvodů přidat v dobré kvalitě třeba i německé DAB+ vysílání. Instalace je jednodušší jak díky kompaktním rozměrům zesilovačů, tak díky snadnému nastavení filtrů a dalších parametrů. Při nastavení se volí kanály, které chceme z daného vstupu zpracovat, jejich případná konverze a úroveň signálu na výstupu – a to je v mnoha případech vše. Zkušenému technikovi tedy zabere instalace moderního zesilovače i včetně kontroly výstupních parametrů signálu měřicím přístrojem jen chvilku.



Obrázek 2: Programovatelný zesilovač pro STA

Otázkou u každé nové technologie je její stabilita a životnost. Za necelé dva roky, kdy jsou tyto zesilovače na trhu, jsem se zatím při desítkách nasazených kusů nesetkal s problémy, až na dva vadné kusy z výroby, které dodavatel vyměnil. Bolístkou dnešní spotřební elektroniky jsou nejčastěji napájecí zdroje, v tomto ohledu je výhodou, že všechny typy DSP programovatelných zesilovačů využívají externí napájecí zdroje, které je snadné uživatelsky vyměnit i na místě instalace. U některých typů, které mají pro napájení klasický DC konektor, lze využít i jiný zdroj než dodává výrobce.

Zásadní výhodou nové generace programovatelných zesilovačů je pak jejich cena. Maloobchodní cena většiny typů se pohybuje pod hranicí 10000 Kč, pokud tedy srovnáme cenovou náročnost řešení se selektivními kanálovými vložkami (např. typ

Alcad ZG-431) pro 6 multiplexů a FM rozhlas, dostáváme se na méně než polovinu. S vyšším počtem přijímaných sítí se rozdíl ještě zvyšuje ve prospěch programovatelného zesilovače. Kvalitní STA systém s vysokou selektivitou lze tedy za dostupnou cenu postavit i v menších bytových domech, kde dosud mnohdy z cenových důvodů volili problematická řešení s využitím širokopásmových zesilovačů.

Jsme připraveni na generační změnu TV vysílání, která zasáhne 60 % domácností (!/?)

Ing. Marcel Procházka

České Radiokomunikace, a. s.

Uvolnění TV pásma 700MHz pro nové mobilní sítě 5G, které vyvolávají velká očekávání, je podmíněno přechodem z DVB-T na kmitočtově úspornější standard DVB-T2. První DVB-T vysílače budou vypnuty již v listopadu tohoto roku a celý proces přechodu na DVB-T2 a uvolnění pásma 700MHz má být dokončen v červnu 2020. Jaký je stav celého procesu, který bude zahájen již za několik měsíců a dotkne se 60 % domácností? Kam bude směřovat další vývoj mediálních služeb?

Příprava přechodu Vysílací sítě č. 4 DVB-T na Vysílací síť 24 DVB-T2 HEVC

Ing. Martin Roztočil
odborný konzultant Marro, s.r.o.

1. Úvod – digitální terestrické televizní vysílání (DTT) a ostatní platformy v ČR

Jak v poslední době ukazují výsledky různých průzkumů, české televizní prostředí není zatím výrazně ovlivněno nástupem globálních „on demand“ služeb. To mimo jiné také zaznělo vloni v říjnu na konferenci „Future of TV“. „Živá televizní sledovanost“ (lineární vysílání) zůstává v českém prostředí stále rozhodujícím způsobem sledování televize. Podíl živého televizního sledování představuje v české populaci stále 96 % celkové televizní sledovanosti. Odložená sledovanost (time shift, tj. sledování v jiném čase, než ve kterém se pořad vysílá) tvořila průměrně 4 % (platí pro diváckou skupinu 4+). V mladší divácké skupině 15–44, kde lze předpokládat větší příklon k odložené sledovanosti, představovala více než 6 %. Odloženou sledovanost využívají více než zmíněný 4% průměr vedle mladších diváků také diváci s VŠ vzděláním a z vyšších socioekonomických skupin. Dá se ale předpokládat, že se tato čísla budou v budoucnosti měnit. Odborníci předpovídají, že televizi v blízké budoucnosti čeká několik výzev, které by mohly vést k její proměně. Televize se z hlediska počtu diváků těší stále pevné pozici nejsilnějšího média. Stabilní jsou také příjmy ze strany zadavatelů reklamy, zřetelná je ale postupně vzrůstající konkurence v podobě velkých online hráčů.

Zatímco doménou televize je totiž celoplošná reklama s obrovským zásahem, zadavatelé i tak investují stále více peněz do online platform umožňujících přesnější cílení. Aby televize udržela krok, je potřeba jít rostoucí oblíbenosti personalizované reklamy naproti – a tedy ji zavést také. V průzkumu to potvrdilo až 88 % odborníků v dotazníku EGTA (Evropské asociace televizní a rádiové reklamy), kteří vidí v personalizované reklamě hlavní příležitost pro budoucnost televize.

Druhým problémem, na který bude muset televize v blízké budoucnosti pohořet, je pak tzv. *cord-cutting*, neboli odliv diváků od operátorů placené televize na jiné platformy, jakými jsou VOD služby typu Netflix. Nejvýraznější je tento odliv u diváků mladší věkové kategorie.

Je potřeba zde zmínit, že zatímco v některých státech západní a severní Evropy má některou z *video-on-demand* služeb předplaceno i více než 50 % domácností, v České republice je situace odlišná – z domácností je tu využívá jen několik málo procent.

Co se zobrazovačů týká, alespoň jednu televizní obrazovku mělo v loňském roce doma 94 % televizních domácností. Průměrná doba sledování televize v českých domácnostech se nesnižuje, ba právě naopak se za poslední období prodloužila a dosahuje 3 hodiny a 45 minut denně. Přičemž stále platí, že terestrický příjem televizních programů má u diváků v ČR stále zásadní význam.

Terestrické televizní vysílání je pro diváky zároveň tím nejlevnějším způsobem, jak si zajistit příjem televizního signálu, a to i po přechodu na nový vysílací standard DVB-T2. Ve své studii „Aktualizovaná studie selhání trhu šíření zemského digitálního televizního vysílání při vynuceném uvolnění kmitočtového pásma 700 MHz“ vypracované pro ministerstvo průmyslu a obchodu to konstatuje společnost Arthur Dr. Little. Jako nejdražší se jeví být IPTV, následuje kabel a satelit.

Televizní vysílání sleduje prostřednictvím zemských digitálních sítí 58 % české populace (satelitní příjem využívá 25 %, kabelový příjem asi 17 % a IPTV kolem 8 % domácností). Součet je vyšší než 100 %, protože mnoho domácností spoléhá na více zdrojů televizního signálu, například kombinuje příjem přes anténu s placenou nabídkou. Výhradně pozemní cestou bez kombinace s jakoukoliv další metodou přijímá televizní signál 40 % domácností.



www.shutterstock.com - 401695120

Obrázek 1: Průměrná doba sledování v ČR stále dosahuje 3 hodiny a 45 minut denně

2. Vysílací síť č. 4 – Multiplex 4 (DVB-T)

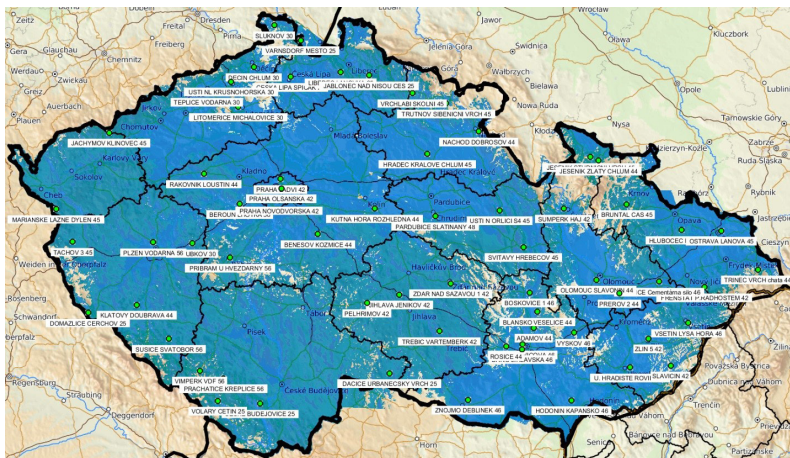
Operátor této celoplošné sítě, společnost Digital Broadcasting s. r. o. („DB“) dosáhl ve finálním stavu, při provozu 65 vysílačů, pokrytí 89,3 % území a 95,8 % obyvatel ČR (dle metody dle platné vyhlášky ČTÚ ITU-R P. 1546-2CA).

Protože se o této síti již, která zahájila provoz v roce 2012, napsalo už poměrně dost, lze se omezit na konstatování, že se velice rychle zařadila pod označením MUX 4 mezi plnohodnotné celoplošné multiplexy digitálního televizního vysílání v České republice, MUX 1, MUX 2 a MUX 3.

Kompletní seznam lokalit, parametry provozovaných technologií, aktuální seznam šířených televizních programů a průběžné aktuality v rámci této Vysílací sítě č. 4 lze nalézt na webových stránkách [9].

Aktuální informace o přípravných procesech zaměřených operátorem na její přechod na DVB-T2 lze nalézt na stránkách [10].

V současné době operátor připravuje „redesign“ [9], které jsou v současné grafické podobě již od roku 2012, resp. [13], které budou obsahovat informace související s přechodem na DVB-T2, zpočátku identicky se shodně zaměřenou složkou [10] (DVB-T2).



Obrázek 2: Mapa pokrytí MUX 4, s pokrytím 95,8% obyvatel ČR (dle platné vyhlášky ČTÚ, metody ITU-R P.1546-2CA).

3. Přechod na DVB-T2, technický plán přechodu

Technický plán přechodu („TPP“) stanoví pravidla pro přechod zemského digitálního televizního vysílání ve standardu DVB-T na standard DVB-T2, lhůty, podmínky a termíny vypínání DVB-T v České republice.

Jeho vzniku předcházela Zákon č. 252/2017 Sb., který zmocnil vládu k vydání nařízení vlády, kterým se stanoví technický plán přechodu zemského digitálního televizního vysílání ze standardu pro šíření zemského digitálního televizního vysílání DVB-T na standard pro šíření zemského digitálního televizního vysílání DVB-T2/HEVC za účelem uvolnění rádiových kmitočtů v kmitočtovém pásmu 694–790 MHz a sestavení jedné sítě elektronických komunikací pro multiplex veřejné služby (Česká televize) („ČT“) a dalších tří finálních celoplošných sítí elektronických komunikací pro šíření zemského digitálního televizního vysílání ve standardu DVB-T2. TPP vychází z výsledků mezinárodní koordinace jednotlivých rádiových kmitočtů pro přechodové sítě a finální sítě ve standardu DVB-T2 a byl připraven Koordinační expertní skupinou zřízenou Ministerstvem průmyslu a obchodu a dne 29. května 2018 byl schválen vládou ČR jako nařízení vlády č. 199/2018 Sb.

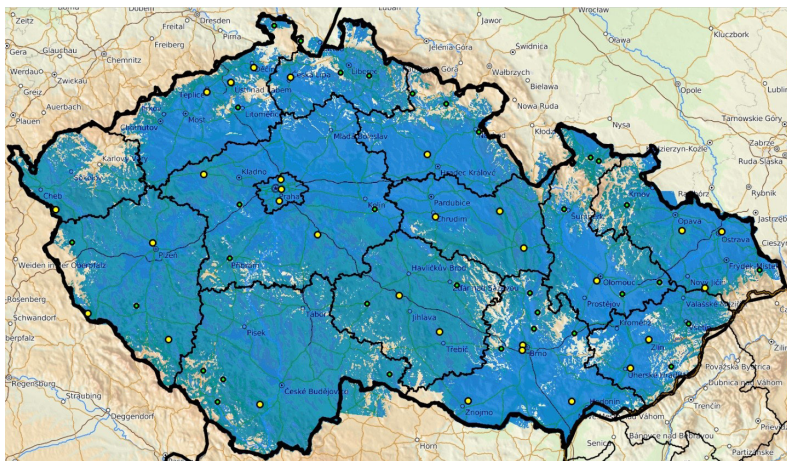
TPP tedy mimo jiné stanovuje termíny vypnutí stávajících celoplošných DTT sítí: MUX 1, MUX 2, MUX 3 a MUX 4, dále pak termíny provozu a parametry přechodových sítí: 11 (ČT), 12 (ČRa) a 13 (DB). Zde je možná vhodná vysvětlit že jednotlivé indexy znamenají označení jednotlivých přechodových sítí. Přechodová síť č. 1, č. 2,

resp. č. 3. A samozřejmě termíny vypnutí všech těchto stávajících celoplošných sítí DTT DVB-T a termíny zapnutí čtyř nových definitivních celoplošných sítí DTT DVB-T2: MUX 21 (ČT), MUX 22 (ČRa), MUX 23 (CDG) a MUX 24 (DB). Zde první číslo indexu signalizuje standard DVB-T2 a druhé číslo deklaruje shodu předchozích označení Vysílacích sítí č. 1, 2, 3 a 4.

4. Přechodová síť 13 DVB-T2/HEVC

V souladu s výše uvedeným TPP společnost Digital Broadcasting s. r. o., provozovala k 31. prosinci 2018 *Přechodovou síť 13 DVB-T2/HEVC* ve finálním rozsahu, který odpovídal možnosti penetrací pro *skoro 10 milionů diváků, tj. 94,1 % obyvatel*, kteří mohou následující celoplošné televizní programy:

Nova, Nova Cinema, Nova Action, Nova Gold, Nova 2, Prima Comedy Central, JOJ family, Kino Svět, RELAX, Rebel, regionalnitemeletevize.cz, ABC TV, POLAR, TV VI a TVS.



Obrázek 3: *Pokrytí Přechodové sítě 13 (63 vysílačů): 94,1 % obyvatel ČR (dle platné vyhlášky ČTÚ, metody ITU-R P.1546-2CA)*

Současně PS 13 disponovala k 31. srpnu 2019 volnou kapacitou datového toku pro lokality:

- 6,9 Mbit/s: Brno-Jihlavská, Hodonín a Uherské Hradiště Rovina,
- 4,8 Mbit/s : Hradec Králové, Pardubice, Ústí nad Orlicí, Praha-Ládví, Praha-Olašanská, Praha-Novodvorská, Olomouc, Jihlava, Sušice, Svitavy a Domažlice,
- 2,7 Mbit/s: Ostrava Lanová, Brno-Barvičova, Frenštát p. R., Třebíč, Zlín a Brunál.

Příčemž datové toky byly v PS 13 nominálně rozděleny takto (včetně TTX,EPG):

- *celoplošné TV programy:* Nova 2,6 Mbit/s, Nova Cinema 2,6 Mbit/s, Nova Action 2,6 Mbit/s, Nova Gold 2,6 Mbit/s, Nova 2 2,6 Mbit/s, Prima Comedy Central 2,6 Mbit/s, JOJ family 2,6 Mbit/s, Kino Svět 2,6 Mbit/s, RELAX 2,6 Mbit/s, Rebel 2,6 Mbit/s, regionalnitatelevize.cz 1,8 Mbit/s a ABC TV 1,8 Mbit/s;
- *regionální TV programy:* POLAR 2,1 Mbit/s z lokalit: Ostrava-Lanová, Brno-Barvičova, Frenštát p. R., Třebíč, Zlín, TVS 1,8 Mbit/s TV V1 2,1 Mbit/s z lokalit: Hradec Králové, Pardubice, Ústí nad Orlicí, Praha-Ládví, Praha-Olšanská, Praha-Novodvorská, Olomouc, Jihlava, Sušice, Svitavy, Domažlice.

region	stanoviště DB PS13	K	P	N ID	TS ID	východní délka	severní šířka	ERP [W]
Praha	Praha Ládví	24	H	0x3142	0x2311	14° 27' 56"	50° 08' 11"	19952
Praha	Praha Novodvorská	24	H	0x3142	0x2311	14° 27' 04"	50° 00' 59"	10000
Praha	Praha ÚTB	24	V	0x3142	0x2311	14° 28' 09"	50° 05' 01"	10000
Jihomoravský	Brno Barvičova	31	V	0x3142	0x2314	16° 34' 27"	49° 12' 09"	10000
Jihomoravský	Brno Jihlavská	43	H	0x3142	0x2313	16° 34' 14"	49° 10' 32"	10000
Jihomoravský	Hodonín Kapánsko	43	H	0x3142	0x2313	17° 00' 03"	48° 53' 01"	10000
Jihomoravský	Znojmo Deblínek	22	H	0x3142	0x2317	16° 05' 59"	48° 53' 12"	10000
Jihomoravský	Blansko Veselice	31	H	0x3142	0x2314	16° 42' 14"	49° 23' 21"	501
Jihomoravský	Vyškov	31	H	0x3142	0x2314	17° 01' 19"	49° 16' 13"	100
Jihomoravský	Boskovice	43	H	0x3142	0x2313	16° 38' 01"	49° 29' 51"	50
Jihomoravský	Adamov	56	H	0x3142	0x2314	16° 40' 22"	49° 17' 52"	5
Jihomoravský	Rosice	43	H	0x3142	0x2313	16° 25' 49"	49° 11' 36"	100
Středočeský	Benešov Kozmice	24	H	0x3142	0x2311	14° 47' 15"	49° 49' 38"	39810
Středočeský	Rakovník Louštín	24	H	0x3142	0x2311	13° 47' 36"	50° 09' 52"	63095
Středočeský	Příbram Hvězdárna	24	H	0x3142	0x2311	14° 01' 20"	49° 41' 39"	79
Středočeský	Kutná Hora Rozhledna	24	H	0x3142	0x2311	15° 17' 06"	49° 58' 15"	251
Středočeský	Beroun Lhotka	24	H	0x3142	0x2311	14° 06' 27"	49° 59' 45"	316
Karlovarský	Mariánské Lázně Dyleň	28	H	0x3142	0x2312	12° 30' 11"	49° 58' 05"	15849
Karlovarský	Tachov	24	H	0x3142	0x2311	12° 38' 51"	49° 47' 03"	50
Plzeňský	Plzeň Vodárna	24	H	0x3142	0x2311	13° 21' 06"	49° 46' 51"	31622
Plzeňský	Sušice Svatobor	24	H	0x3142	0x2311	13° 29' 18"	49° 14' 07"	5011
Plzeňský	Domažlice Čerchov	24	H	0x3142	0x2311	12° 47' 02"	49° 23' 01"	6310
Plzeňský	Klatovy Doubrava	24	H	0x3142	0x2311	13° 12' 24"	49° 25' 39"	251
Ústecký	Ústí n/L Krušnohorská	28	H	0x3142	0x2312	14° 01' 50"	50° 40' 36"	10000
Ústecký	Teplice Vodárna	28	H	0x3142	0x2312	13° 49' 16"	50° 37' 15"	10000
Ústecký	Děčín Chlum	28	H	0x3142	0x2312	14° 13' 45"	50° 45' 26"	2512
Ústecký	Varnsdorf Město	28	H	0x3142	0x2312	14° 38' 15"	50° 54' 15"	31
Ústecký	Litoměřice Michalovice	28	H	0x3142	0x2312	14° 05' 38"	50° 32' 11"	158
Ústecký	Šluknov	28	H	0x3142	0x2312	14° 24' 23"	50° 59' 14"	100
Královéhradecký	Hradec Králové Chlum	24	H	0x3142	0x2311	15° 44' 35"	50° 16' 32"	10000

Královéhradecký	Náchod Dobrošov	24	H	0x3142	0x2311	16° 11' 34"	50° 24' 01"	158
Královéhradecký	Trutnov Šibeniční Vrch	24	H	0x3142	0x2311	15° 54' 25"	50° 33' 22"	158
Královéhradecký	Vrchlabí	24	H	0x3142	0x2311	15° 36' 50"	50° 37' 05"	50
Pardubický	Ústí n/O Andrl. Chlum	24	H	0x3142	0x2311	16° 22' 26"	49° 57' 37"	10 000
Pardubický	Pardubice Slatiňany	24	H	0x3142	0x2311	15° 48' 41"	49° 55' 40"	19 952
Pardubický	Svitavy Hřebečov	24	H	0x3142	0x2311	16° 34' 56"	49° 45' 12"	5 011
Zlínský	Zlín Segment	31	H	0x3142	0x2314	17° 40' 11"	49° 14' 13"	10 000
Zlínský	Uherské Hrad. Rovnina	43	H	0x3142	0x2313	17° 30' 47"	49° 04' 17"	10 000
Zlínský	Vsetín Lysá hora	31	H	0x3142	0x2314	18° 01' 11"	49° 19' 29"	251
Zlínský	Slavičín	43	H	0x3142	0x2313	17° 51' 59"	49° 04' 55"	25
Moravskoslezský	Hlubočec Hůrka	31	H	0x3142	0x2314	17° 57' 40"	49° 51' 00"	39 810
Moravskoslezský	Ostrava Lanová	31	H	0x3142	0x2314	18° 18' 32"	49° 50' 44"	10 000
Moravskoslezský	Frenštát p. Radhoštěm	31	H	0x3142	0x2314	18° 09' 39"	49° 31' 38"	10 000
Moravskoslezský	Třinec Vrch	31	H	0x3142	0x2314	18° 38' 04"	49° 37' 41"	50
Moravskoslezský	Bruntál Čas	31	H	0x3142	0x2314	17° 28' 50"	49° 59' 41"	316
Liberecký	Jablonec n/N Černá St.	24	H	0x3142	0x2311	15° 14' 02"	50° 42' 41"	10 000
Liberecký	Česká Lípa Špičák	28	H	0x3142	0x2312	14° 32' 58"	50° 42' 10"	3 162
Liberecký	Liberec MV	24	H	0x3142	0x2311	14° 59' 16"	50° 43' 45"	501
Vysočina	Jihlava Jeníkov	24	H	0x3142	0x2311	15° 29' 58"	49° 29' 08"	10 000
Vysočina	Třebíč Vartemberk	56	H	0x3142	0x2311	15° 50' 54"	49° 16' 43"	5 012
Vysočina	Pelhřimov Hod. Vod.	24	H	0x3142	0x2311	15° 12' 59"	49° 26' 16"	251
Vysočina	Žďár nad Sázavou	24	H	0x3142	0x2311	15° 56' 50"	49° 32' 56"	100
Olomoucký	Olomouc Slavonín	24	H	0x3142	0x2311	17° 13' 11"	49° 34' 08"	10 000
Olomoucký	Šumperk Háj	24	H	0x3142	0x2311	16° 56' 02"	49° 58' 14"	251
Olomoucký	Jeseník Studniční vrch	24	H	0x3142	0x2311	17° 10' 01"	50° 15' 29"	501
Olomoucký	Jeseník Zlatý Chlum	24	V	0x3142	0x2311	17° 14' 15"	50° 14' 17"	100
Olomoucký	Hranice na Moravě	31	H	0x3142	0x2314	17° 46' 00"	49° 33' 32"	251
Olomoucký	Přerov Čekyně	31	H	0x3142	0x2314	17° 25' 04"	49° 29' 34"	251
Jihočeský	České Budějovice Klet	32	H	0x3142	0x2316	14° 16' 59"	48° 51' 55"	63 095
Jihočeský	Prachatice Křeplice	24	H	0x3142	0x2311	13° 57' 54"	49° 00' 33"	501
Jihočeský	Dačice Urban. Vrch	24	H	0x3142	0x2311	15° 24' 50"	49° 02' 18"	200
Jihočeský	Vimperk Vodafone	24	H	0x3142	0x2311	13° 45' 29"	49° 03' 10"	100
Jihočeský	Volary Cetin	32	H	0x3142	0x2311	13° 54' 58"	48° 52' 48"	316

Tabulka 1: Regiony a lokality Přechodové sítě 13 k 1. srpnu 2019.

Rozdíl v počtu lokalit u MUX 4 65 lokalit, resp. u PS 13 63 lokalit je způsoben tím, že v PS 13 nejsou v porovnání s MUX 4 provozovány dvě lokality. Jednou z nich je v MUX 4 v Plzeňském regionu lokalita Holoubkov, vysílající na 30 k VAS H s ERP 2 W. Druhou je v Karlovarském regionu lokalita Jáchymov – Klínovec vysílající v MUX 4 na 45 k VAS H s ERP 40 kW. V prvním případě je důvodem relativně malý vyzařovací výkon, takže v této lokalitě by neměl být problém přejít tzv. „strihem“ a v druhém případě je to, že 38 k, plánovaný pro Jáchymov – Klínovec v PS 13, je v současné době využíván pro tuto lokalitu v rámci RS 7.

5. TPP, souběžné vysílání MUX 4 a PS 13, jejich vypínání a zahájení provozu sítě 24

V procesu přechodu se dle TPP postupuje po dotčených územních oblastech, které jsou vymezeny pro každou stávající vysílací síť samostatně podle konkrétních podmínek technického a kmitočtového řešení stávající vysílací sítě 1 až 4. Dotčené územní oblasti jsou vymezeny vypočtenou hodnotou minimální plánovací intenzity signálu zemského televizního vysílání z příslušných vysílačů velkého výkonu a vysílačů malého výkonu.

K vypnutí zemského digitálního televizního vysílání ve standardu DVB-T v termínech uvedených v přílohách TPP č. 1 až 4 může dojít pouze za podmínky, že je v příslušné dotčené územní oblasti zajištěno pokrytí obyvatelstva signálem finální nebo přechodové vysílací sítě zemského digitálního televizního vysílání ve standardu DVB-T2 nejméně v rozsahu vysílání stávajících sítí DVB-T a pokud tomu nebrání technické nebo provozní důvody.

Tabulka 2 navazuje na obsah přílohy č. 4 TPP a řeší výše uvedený proces (d) přechodu stávající Vysílací sítě č. 4 (MUX 4) DVB-T na finální vysílací síť 24 DVB-T2.

Finální vysílací síť 24 pro šíření zemského digitálního televizního vysílání ve standardu DVB-T2 je tvořena rádiovými kanály: 21, 30, 42, 43, 44, 45, 46. Pro vysílače malého výkonu mohou být použity i jiné rádiové kanály.

	současné regionální zařazení	název lokality	kanál MUX 4	kanál PS13	kanál MUX 24	termíny vypnutí MUX 4, PS13 a zapnutí MUX 24
1	Praha	Praha Ládví	42	24	42	8. 1. 2020
2	Praha	Praha Novodvorská	42	24	42	8. 1. 2020
3	Praha	Praha ÚTB	42	24	42	8. 1. 2020
4	Středočeský	Rakovník Loustín	44	24	44	9. 1. 2020
5	Středočeský	Benešov Kozmice	44	24	44	9. 1. 2020
6	Středočeský	Beroun Lhotka	56	24	30	9. 1. 2020
7	Středočeský	Litoměřice Michalovice	30	28	21	9. 1. 2020
8	Středočeský	Příbram U Hvězdárny	56	24	45	9. 1. 2020
9	Ústecký	Teplice Vodárna	30	28	21	7. 2. 2020
10	Ústecký	Ústí n. Labem Krušnohorská	30	28	21	7. 2. 2020
11	Ústecký	Děčín Chlum	30	28	21	7. 2. 2020
12	Ústecký	Šluknov	30	28	21	7. 2. 2020
13	Karlovarský	Mariánské Lázně Dyleň	45	28	45	19. 2. 2020
14	Karlovarský	Jáchymov Klínovec	45	38	45	19. 2. 2020
15	Karlovarský	Tachov	45	24	45	19. 2. 2020
16	Liberecký	Jablonec n/N Černá Studnice	25	24	43	26. 2. 2020
17	Liberecký	Česká Lípa Špičák	25	28	43	26. 2. 2020

18	Liberecký	Liberec	25	24	43	26. 2. 2020
19	Liberecký	Trutnov Šibeniční Vrch	45	24	45	26. 2. 2020
20	Liberecký	Varnsdorf město	25	28	44	26. 2. 2020
21	Plzeňský	Plzeň Vodárna	56	24	43	27. 2. 2020
22	Plzeňský	Sušice Svatobor	56	24	42	27. 2. 2020
23	Plzeňský	Domazlice Čerchov	25	24	43	27. 2. 2020
24	Plzeňský	Klatovy Doubrava	44	24	44	27. 2. 2020
25	Plzeňský	Holoubkov	30	24	21	27. 2. 2020
26	Královéhradecký	Hradec Králové Chlum	45	24	45	29. 4. 2020
27	Královéhradecký	Kutná Hora Rozhledna	44	24	44	29. 4. 2020
28	Královéhradecký	Náchod Dobrošov	44	24	44	29. 4. 2020
29	Královéhradecký	Vrchlabí	45	24	45	29. 4. 2020
30	Pardubický	Pardubice Slatiňany	48	24	21	30. 4. 2020
31	Pardubický	Ústí n. O. Andrlův Chlum	45	24	21	30. 4. 2020
32	Pardubický	Svitavy Hřebečov	45	24	21	30. 4. 2020
33	Jihomoravský	Brno Barvičova	46	31	46	4. 5. 2020
34	Jihomoravský	Brno Jihlavská	46	43	46	4. 5. 2020
35	Jihomoravský	Hodonín Kapánsko	46	43	46	4. 5. 2020
36	Jihomoravský	Znojmo Deblínek	46	22	46	4. 5. 2020
37	Jihomoravský	Blansko Veselice	44	31	44	4. 5. 2020
38	Jihomoravský	Rosice	44	43	44	4. 5. 2020
39	Jihomoravský	Boskovice	46	43	46	4. 5. 2020
40	Jihomoravský	Adamov	44	31	44	4. 5. 2020
41	Olomoucký	Olomouc Slavonín	44	24	44	5. 5. 2020
42	Olomoucký	Přerov Čekyně	44	31	44	5. 5. 2020
43	Olomoucký	Šumperk Háj	42	24	38	5. 5. 2020
44	Olomoucký	Vyškov	46	31	46	5. 5. 2020
45	Olomoucký	Hranice na Moravě	46	31	46	5. 5. 2020
46	Moravskoslezský	Opava Hlubočec Hůrka	45	31	45	27. 5. 2020
47	Moravskoslezský	Ostrava Lanová	45	31	45	27. 5. 2020
48	Moravskoslezský	Bruntál Čas	45	31	45	27. 5. 2020
49	Moravskoslezský	Třinec	44	31	44	27. 5. 2020
50	Zlínský	Frenštát p. R. Velký Javorník	42	31	42/45	28. 5. 2020
51	Zlínský	Uherské Hradiště Rovnina	42	43	42	28. 5. 2020
52	Zlínský	Zlín Segment	42	31	42	28. 5. 2020
53	Zlínský	Vsetín Lysá Hora	46	31	46	28. 5. 2020
54	Zlínský	Slavičín Hrádek	42	43	42	28. 5. 2020
55	Olomoucký	Jeseník Studniční Vrch	45	24	45	29. 5. 2020
56	Olomoucký	Jeseník Zlatý Chlum	44	24	44	29. 5. 2020
57	Jihočeský	České Budějovice Klet'	25	32	30	20. 02. 2020
58	Jihočeský	Prachatice Kreplice	56	24	36	20. 02. 2020
59	Jihočeský	Volary	25	32	30	20. 02. 2020
60	Jihočeský	Dačice	25	24	30	20. 02. 2020

61	Jihočeský	Vimperk Pod Homolkou	56	24	30	20. 02. 2020
62	Vysočina	Jihlava Jeníkov	42	24	42	26. 05. 2020
63	Vysočina	Třebíč Vartemberk	42	56	42	26. 05. 2020
64	Vysočina	Pelhřimov Hořejšovická	42	24	42	26. 05. 2020
65	Vysočina	Žďár nad Sázavou	42	24	42	26. 05. 2020

Tabulka 2: Termíny vypnutí MUX 4, PS 13 a zahájení provozu Vysílací sítě 24

6. Informační kampaň k přechodu na DVB-T2

Operátor Digital Broadcasting s.r.o., ve snaze udržet, resp. zvýšit dosaženou penetraci Vysílací sítě č. 4, v průběhu přechodu na standard DVB-T2 prostřednictvím Přechodové sítě 13 a následně pak definitivní sítě 24 proto zahájil svou individuální informační kampaň, ve snaze maximálně informovat diváky, odbornou i laickou veřejnost o důležitých informacích, změnách a doporučovaných postupech, jak co nejlépe přechod terestrické televizní platformy na standard DVB-T2 zvládnout.

Tato informační kampaň, i když je zaměřena na Vysílací síť č. 4, Přechodovou síť 13 a definitivní síť 24, je koncipována v souladu s informačními kampaněmi ostatních dotčených subjektů (zejména ČT, ČRa, CDG) a zastřešena informační kampaní ČR, kterou zajišťuje Ministerstvo obchodu a průmyslu. Info kampaň Digital Broadcasting s.r.o. k přechodu na DVB-T2 obsahuje 4 základní bloky.

6.1 Semináře se servisními technikami a odborníky

V letošním roce se zatím uskutečnily 4 semináře v Praze a 2 semináře v Brně. Celkem bylo proškoleny 130 účastníků, z nichž 95 % to byli zástupci servisních firem, zajišťující instalaci, provoz a údržbu společných a individuálních televizních antén.



Obrázek 4: Na 4 seminářích v Praze a 2 seminářích v Brně bylo celkem proškoleny 130 účastníků

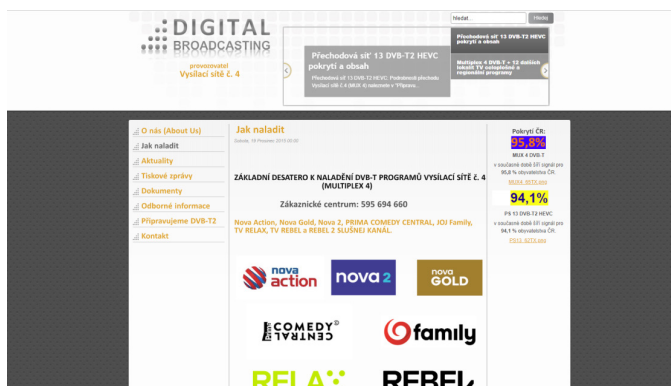
Cílem seminářů bylo:

- informovat o legislativě a státní strategii pro DTT,

- informovat o procesech přechodu na DVB-T2 v rámci MUX 4, PS 13 a MUX 24,
- představit spolupráci s nejdůležitějším zákazníkem TV Nova,
- informovat o spolupráci s regulátorem ČTÚ,
- ukázat stávající DVB-T a nové DVB-T2 vysílací technologie,
- domluvit postupy, podporu, vzájemnou spolupráci pro dosažení maximální penetrace.

6.2 Webové stránky

Stránky [13] a *redesign* [9].



Obrázek 5: Stávající webové stránky, zdroj: [9]

Stávající grafická úprava stránek Multiplexu 4 je na obrázku 5. Nová grafická úprava Multiplexu 4 i 24 bude zprovozněna do konce tohoto roku.

6.3 TV spoty

Předpokládají se TV spoty se základními, všeobecnými informacemi o přechodu DVB-T/DVB-T2, s časovým harmonogramem přechodu DVB-T/DVB-T2 (MUX 4→PS 13→MUX 24), s všeobecnými ale i konkrétními informacemi našich interních a externích servisních techniků a TV spoty obsahující aktuality a zajímavé informace pro diváky.

6.4 TV info: „Televize přes anténu“

Program „Televize přes anténu“ bude zaměřen na informace o dění v oblasti digitálního televizního vysílání. Program bude šířen v Regionální síti 7 resp. Multiplexu 4.

7. Závěr

Přechod v rámci zemského digitálního televizního vysílání z DVB-T na DVB-T2 má a bude mít po celou dobu jeho průběhu v ČR poměrně velký význam pro zajištění kvality příjmu této platformy, která se tradičně u nás těší největšímu zájmu diváků.

Článek se snaží popsat a připravované a v současné době již některé realizované záměry a postupy společnosti Digital Broadgasting s.r.o., operátora celoplošných vysílacích sítí: Vysílací sítě č. 4 (DVB-T), Přechodové sítě 13 (DVB-T2/HEVC) a síť 24 (DVB-T2/HEVC), včetně základních parametrů technologií na jednotlivých lokalitách a harmonogramu vypínání a zapínání, které by mohly být přínosem jak pro diváky, servisní techniky, tak i odbornou veřejnost.

8. Zdroje

- [1] Petr Michl: Konference Future of TV, jak budoucnost televize vidí její diváci a zadavatelé reklamy.
- [2] Pavel Müller: V čem se může televizní vysílání inspirovat u internetové konkurence?
- [3] Arthur Dr. Little: Aktualizovaná studie selhání trhu šíření zemského digitálního televizního vysílání při vynuceném uvolnění kmitočtového pásma 700 MHz
- [4] Filip Rožánek: Studie vyčíslila náklady na druhou digitalizaci. Kolik kdo zaplatí za přechod na DVB-T2?
- [5] Strategie udržitelného rozvoje digitálního terestrického televizního vysílání.
- [6] Text dokumentu Technického Plánu Přechodu.
- [7] Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/20/1.2016-1 pro kmitočtové pásmo 960–1700 MHz, uveřejněná v částce 1/2016 Telekomunikačního věstníku.
- [8] Report IHS – ScreenDigest: Cross-platform Television Viewing Time a EBU Forecast 2012–2020.
- [9] <<http://www.multiplex4.cz>>.
- [10] <<http://www.multiplex4.cz/pripravujeme>>.
- [11] <<http://www.mux7.cz>>.
- [12] <<https://www.mpo.cz/cz/e-komunikace-a-posta/dvb-t2/>>.
- [13] <<http://www.multiplex24.cz>>.

Výstavba první celoplošné sítě pro digitální rádio DAB+ v ČR

Ing. Karel Zýka

Český rozhlas

1. Start řádného vysílání DAB+

Český rozhlas provozuje DAB+ multiplex na kanálech 12C (kmitočet 227,360 MHz) v Čechách a 12D (229,072 MHz) na Moravě a to na základě individuálních oprávnění, jimiž Český telekomunikační úřad vyhradil Českému rozhlasu příslušné rádiové kmitočty. Řádné vysílání DAB+ zahájil Český rozhlas 1. 6. 2017 plynulým přechodem z režimu experimentálního. Umožnilo to usnesení vlády ČR č. 730/2016 z 24. srpna 2016. Start řádného DAB+ vysílání tak fakticky znamenal formální překlopení stávajícího pražského vysílače Mahlerovy sady do řádného režimu a následnou výstavbu tří vysílačů v hlavních aglomeracích České republiky, tedy v Brně (Hády), Ostravě (Hošťálkovice) a v Plzni (Radeč). Ty byly spuštěny 30. 11. 2017. Tuto základní síť doplnil 24. 10. 2017 vysílač v Berouně (vrch Děd), který zajistil homogenní pokrytí dálnice D5 v prostoru mezi pražským a plzeňským vysílačem (a stal se prvním vysílačem, na kterém bylo detailně testováno optimální nastavení parametrů pro budování sítě SFN). Pokrytí signálem DAB+ v rámci této první fáze dosáhlo více než 40 % populace České republiky.

vysílač	lokality	ERP [kW]	kanál
Praha	Mahlerovy sady	20,0	12C
Brno	Hády	5,0	12D
Ostrava	Hošťálkovice	10,0	12D
Plzeň	Radeč	10,0	12C
Beroun	vrch Děd	0,3	12C

Tabulka 1: Přehled a parametry DAB+ vysílačů ČRo zprovozněných v 1. fázi

2. Druhá fáze výstavby sítě CRo DAB+

Zhruba po roce od spuštění první fáze sítě DAB+ spustil Český rozhlas 28. prosince 2018 fázi druhou. Ta byla orientována především na pokrytí dálničních tahů, ale také na další hustě osídlené aglomerace. Deset nových vysílačů zvýšilo pokrytí DAB+ multiplexu Českého rozhlasu na 61 % populace České republiky a zajistilo kvalitní signál na dálnicích D1, D5, D8, D10 a D11.

K pěti vysílačům, spuštěným v první fázi, přibýly dva vysílače velkého výkonu: Ústí nad Labem – Buková hora a Trutnov – Černá hora. Poslední, příhraniční úsek dálnice D5 pokrýval vysílač Tachov – Rozsocha. Klíčovou součástí této fáze bylo zajištění kvalitního signálu DAB+ na klíčové dopravní tepně – dálnici D1, zatím mezi Prahou a Brnem. To je řešeno stuhovým pokrytím s centrálním vysílačem Strážník poblíž Jihlavy a vždy třemi menšími směrovými vysílači po obou jeho stranách, koncentrujícími vyzařovací diagram na samotnou dálnici. Směrem do Prahy jde o Kácov – Zliv, Měchnov – Vrchy,

Čtyřkoly – Dubsko a směrem do Brna je to pak Velké Meziříčí – Fajtův vrch, Křoví – Rozcestí a Rosice – Obora.

vysílač	lokality	ERP [kW]	kanál
Ústí nad Labem	Buková hora	10,0	12C
Trutnov	Černá hora	10,0	12C
Tachov	Rozsocha	1,0	12C
Jihlava	Strážník	5,0	12D
Čtyřkoly	Dubsko	0,2	12C
Měchnov	Vrchy	0,2	12C
Kácov	Zliv	0,2	12C
Velké Meziříčí	Fajtův vrch	0,2	12D
Křoví	Rozcestí	0,2	12D
Rosice	Obora	0,2	12D

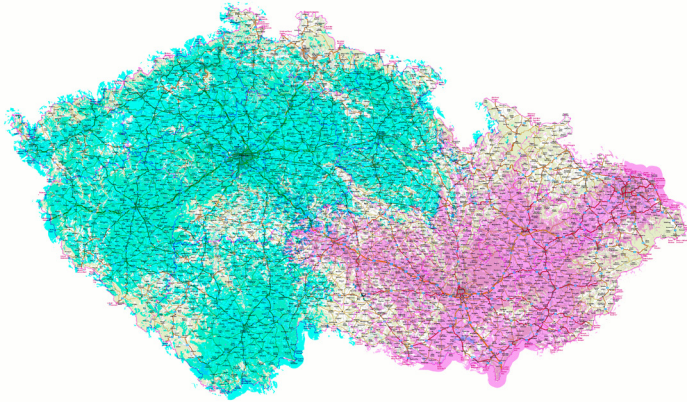
Tabulka 2: Přehled a parametry DAB+ vysílačů ČRo zprovozněných ve 2. fázi

3. Třetí fáze výstavby sítě CRo DAB+

V současné době se dokončuje výstavba třetí fáze. Devět nových vysílačů rozšíří na konci roku 2019 pokrytí signálem multiplexu ČRo DAB+ na 80 % populace České republiky. Do konce roku 2019 tak budou spuštěny čtyři vysílače velkého výkonu: České Budějovice – Kleť, Brno – Kojál, Zlín – Tlustá hora a Jáchymov – Klínovec, které pokryjí Jihočeský, Zlínský a Karlovarský kraj a také střední Moravu. Olomoucký region bude pokrývat vysílač Olomouc – Radíkov, který, spolu s vysílačem Nový Jičín – Veselý kopec a zejména s již zmíněným vysílačem Kojál, zajistí pokrytí druhé části dálnice D1 mezi Brnem a Ostravou. Navíc budou v tomto období, tedy do konce roku 2019, spuštěny ještě vysílače Plzeň – Sylván, který výrazně zlepší pokrytí v Plzni, dokrývač Tasov – Za šibeníci, jehož úkolem je zlepšení stuhového pokrytí dálnice D1 a vysílač Klatovy – Doubrava posilující západ Plzeňského kraje. Stanoviště nových vysílačů byla zvolena zejména s ohledem na maximální efektivitu provozu a na zajištění kvalitního příjmu ve městech a na dálnicích.

vysílač	lokality	ERP [kW]	kanál
České Budějovice	Kleť	20,0	12C
Jáchymov	Klínovec	10,0	12C
Brno	Kojál	10,0	12D
Zlín	Tlustá hora	10,0	12D
Klatovy	Doubrava	5,0	12C
Olomouc	Radíkov	2,0	12D
Plzeň	Sylván	1,0	12C
Nový Jičín	Veselý kopec	1,0	12D
Tasov	Za šibeníci	0,3	12D

Tabulka 3: Přehled a parametry DAB+ vysílačů ČRo zprovozněných ve 3. fázi



Obrázek 1: Matematický model pokrytí sítě ČRo DAB+ dle ITU pro 58 dBuV/m a FEC 3A ve 3. fázi výstavby (80 % populace ČR) s barevným rozlišením dvou SFN – zelená 12C a fialová 12D.

4. Další rozvoj

V současnosti jsou v multiplexu ČRo DAB+ šířeny tyto stanice Českého rozhlasu: celoplošné stanice: ČRo Radiožurnál, ČRo Dvojka, ČRo Vltava, ČRo Plus, regionální stanice: ČRo Rádio DAB Praha, ČRo Region, ČRo Brno, ČRo Ostrava, ČRo Plzeň a ČRo Vysočina, digitální stanice: Radio Wave, Rádio Junior, D-dur, ČRo Jazz, Rádio Retro.

Součástí aktuálně probíhající třetí etapy rozvoje sítě je i vybudování druhého „headendu“, který umožní celoplošnou síť rozpojit na dvě teritoriální části (12C a 12D) a umístit tak do multiplexu všechny regionální stanice Českého rozhlasu při zachování vysoké zvukové kvality.

Aktuální pokrytí DAB+ multiplexu ČRo (srpen 2019) je dle údajů ČTÚ, měřené dle příslušné vyhlášky, 61 % populace České republiky. Probíhající výstavba třetí fáze jej do konce roku 2019 rozšíří na 80 % populace České republiky. Už nyní je v přípravě další (čtvrtá) fáze pokrytí, zaměřená zejména na další zvýšení robustnosti sítě a dokrytí zbylých „bílých“ míst. Obecně lze konstatovat, že hlavní výkonné vysílače efektivně pokrývají velká území, ale v detailním přiblížení jsou příjmové podmínky v členitých prostředích (městská zástavba) složitější a tak lze očekávat, že v některých případech bude nutné doplnění lokálních dokrývačů. Velkou výhodou je technologie jednofrekvenčních sítí (SFN), kdy je možné opakováním stejného kmitočtu zahustit síť a výrazně zvýšit kvalitu lokálního signálu. Příkladem v síti ČRo může být město Plzeň, kde využití vysílače Radeč nevedlo, vzhledem k jeho vzdálenosti od města, k dostatečnému pokrytí a do sítě byl proto navíc doplněn městský vysílač Plzeň – Sylván. Při projektování sítě je též nutné brát zřetel na využití ochranného intervalu systému (*guard interval*) pro korektní funkci jednofrekvenčních sítí s neekvidistantní vzdáleností jednotlivých vysílačů.

DAB+ síť Českého rozhlasu využívá vyšší stupeň zabezpečení signálu (*protection level*) FEC 2A než je standardní FEC 3A, pro který je uvedený výpočet pokrytí realizován. V důsledku toho je homogenita signálu pokrytého území i rádius pokrytí výrazně lepší než dle výpočtu, v reálu odpovídající dvojnásobným vyzářeným výkonům.

Zvláštní pozornost byla věnována způsobu zpracování zvukové složky vysílání, jejíž vysoká subjektivní kvalita byla zásadní podmínkou při konfiguraci parametrů sítě. Při projektování byla testována a vyhodnocována míra vlivu ztrátového zvukového kódování a zřetězení různých typů neentropických kodeků ve vysílacím řetězci na výsledný vjem subjektivní zvukové kvality. Na základě výsledků testů byly pro kódování zvuku multiplexu Českého rozhlasu zvoleny algoritmy HE-AACv1 (AAC+SBR) a HE-AAC v2 (AAC+SBR+PS), které zajišťují vysokou zvukovou kvalitu a zároveň efektivitu provozu.

5. DAB+ vs. FM a rok 2025

Dlouhodobá strategie Českého rozhlasu počítá s plnohodnotným vysíláním jak v pásmu FM, tak v rámci DAB+. Český rozhlas bude i v budoucnu podporovat všechny vysílací platformy, které mají perspektivu a které jsou posluchači využívány. Spolu s FM a DAB+ tak bude i nadále vysílat v DVB-T2, DVB-S2 a na Internetu. Ve střednědobém horizontu naopak hodlá opustit AM vysílání.

Důležitým tématem zůstává národní řešení platform pro rozhlasové vysílání po roce 2025 a zapojení provozovatelů soukromého vysílání do vysílání DAB+. Držitelé tzv. transformačních licencí, resp. všichni současní vysílatelé v pásmu FM, by měli nejpozději v říjnu 2025 zahájit vysílání v DAB+ a to minimálně v rozsahu pokrytí odpovídajícímu jejich pokrytí v FM. Stát by pak měl takovým subjektům umožnit souběh obou platform a poskytnout jim za tímto účelem automatické prodloužení analogových licencí po dobu souběhu. Český rozhlas se řídí zákonem o Českém rozhlasu, a proto bude v pásmu FM vysílat i nadále bez ohledu na rok 2025, pokud se nezmění příslušná zákonná úprava.

Český rozhlas buduje a provozuje první celoplošnou DAB+ síť v České republice. Stále se ale z legislativního pohledu jedná o tzv. pilotní vysílání omezené do konce roku 2021. Další postup čeká na národní strategii a rozhodnutí státních orgánů. Pro plnění veřejné služby, definované zákonem o Českém rozhlasu, je klíčová garance disponibilních technických prostředků, kterou lze zajistit jedině provozováním vlastního veřejnoprávního DAB+ multiplexu. Stejně je tomu v případě České televize, ale i v případě současného analogového FM vysílání Českého rozhlasu.

6. Závěr

DAB+ je novým evropským standardem pro rozhlasové vysílání. Od 1. ledna 2021 jsou všechny členské státy EU povinny upravit svoji legislativu tak, aby nebylo možno na území EU prodávat nové automobily bez DAB+ přijímače (pokud je rádiem vybaven). Totéž by mělo nastat v oblasti radiopřijímačů obecně. Tato druhá část má zatím

formu doporučení, nicméně řada evropských zemí už nyní avizuje, že bude v zájmu ochrany spotřebitelů aplikovat povinnost i zde. DAB+ představuje zásadní rozšíření rozhlasového vysílání. Na rozdíl od stávajícího analogového FM, kde je počet stanic značně limitován, nabízí DAB+ prostor pro stovky nových stanic. Důležitý je i kvalitativní posun. Díky doprovodným službám a snadné integraci s internetovým streamem (hybridní rádio) dokáže DAB+ nabídnout posluchačům kvalitu a služby, na které jsou zvyklí z moderních digitálních platforem a které právem očekávají i od rádia.

Na konci letošního roku dosáhne pokrytí multiplexu DAB+ Českého rozhlasu hranice 80 % populace ČR. Jedná se o velmi významný milník, protože dostupnost této nové platformy se tím prakticky vyrovnává dostupnosti signálu FM celoplošných stanic.

7. Literatura

- [1] O' NEILL, B. DAB Eureka-147: The European Platform for Digital Radio. *New Media Society*, 2009, vol. 11, no. 1-2, pp. 261–278. DOI: 10.1177/1461444808099578.
- [2] ETSI ETSI Technical Specification TS 102 563, Digital Audio Broadcasting (DAB); Transport of Advanced Audio Coding (AAC) Audio, Sophia Antipolis Cedex, France, 2010.
- [3] ITU RADIOCOMMUNICATION SECTOR, GENEVA SWITZERLAND. Audio coding for digital broadcasting. BS Series Broadcasting service (sound). Recommendation ITU-R BS.1196. 2001–2017. Approved in 2017-12.
- [4] ITU RADIOCOMMUNICATION SECTOR, GENEVA SWITZERLAND. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. Recommendation ITU-R P.1546-2. Approved in 2013-09.
- [5] ITU RADIOCOMMUNICATION SECTOR, GENEVA SWITZERLAND. Method for the subjective assessment of intermediate quality levels of coding systems. Recommendation ITU-R BS.1534. 2001-2015. Approved in 2015-10.
- [6] NATIONAL REGULATORY AUTHORITY (CTO) Part of the Radio Spectrum Utilisation Plan for the frequency band 174-380 MHz No. PV-P/21/01.2018-2, 2018.
- [7] STRANAK, P. Interfering DC Component, Suppression and Influence to Digital Signal Processing. *Radioengineering*, September 2008, vol. 17, no. 3, pp. 121–123.
- [8] Hoeg, W., Lauterbach, T. *Digital Audio Broadcasting: Principles and Applications of DAB, DAB+ and DMB*, John Wiley & Sons 3rd Ed, 2009.

- [9] ETSI ETSI European Standard EN 300 401 V2.1.1 Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to Mobile, Portable and Fixed Receivers, 01/2017.

Novinky ze světa DAB vysílání

Ing. Tomáš Řapek

TELEKO digital, a. s.

Hybridní příjem rozhlasu je již realitou, české rozhlasové stanice ale na něj stále nejsou připravené! Budou širokopásmové DAB vysílače, vysílající několik kanálů najednou, úspěšné?

Doprovodné multimediální služby digitálního rozhlasu DAB+

Ing. Roman Kropáček

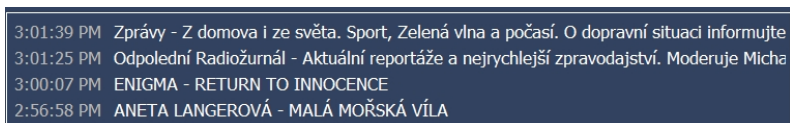
RTI cz s. r. o.

1. DAB+

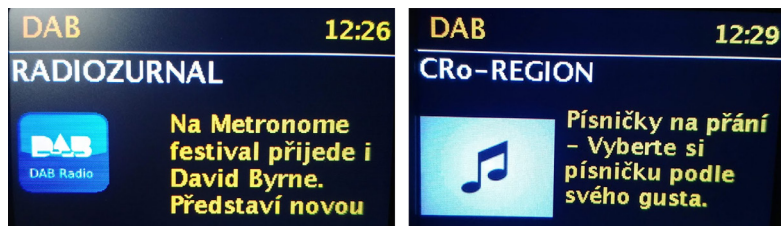
Dost často se setkávám s názorem, že rádio je od toho, aby se poslouchalo, a ostatní informace je možné najít na internetu. Dnešní posluchači ale mají rádi ucelené informace, tak proč jim nevyhovět při poslechu oblíbené rozhlasové stanice. Moderní rozhlasové vysílání přináší posluchači kromě audia i spoustu doprovodných informací. Internetové vysílání může splnit požadavky náročného posluchače ale stále je a bude závislé na placeném internetovém připojení. A v případě poslechu, například v automobilu, do doby než dojdou mobilní data. Nabízí se tedy řešení v podobě terestrického digitálního rozhlasového vysílání DAB+. Asi nejnámější doprovodné služby se dnes používají textové (*dynamic label*) a obrazové (*slideshow*) informace. Systém DAB (*digital audio broadcasting*) umožňuje ale mnohem více.

1.1 DL – Dynamic Label (textové zprávy)

Obdobu těchto textových informací známe z analogového vysílání pod názvem *RadioText* (RT). Je však limitován jedním řádkem a omezeným počtem písmen. Digitální vysílání umožňuje několika řádkové zobrazení na displeji rádia s několika násobným počtem znaků. Kromě např. názvu písničky, interpreta, nebo telefonního čísla do studia je možné zobrazovat i RSS feeds webové stránky rozhlasové stanice, nebo zpravodajských serverů. Posluchač tedy získává aktuální a kompletní informace o tom co se děje u nás i ve světě přímo na displeji rádia.



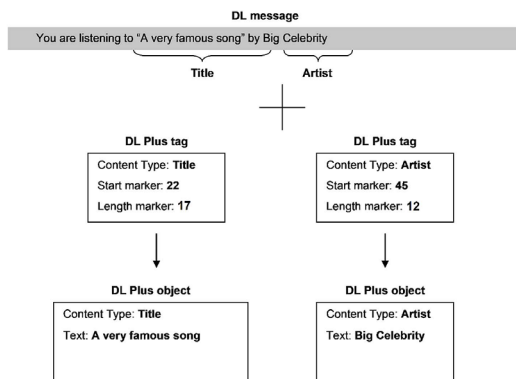
Obrázek 1: ČRo Radiožurnál – textové informace Dynamic Label



Obrázek 2: ČRo Radiožurnál / ČRo Region – textové informace Dynamic Label na displeji rádia

1.2 DL+ – Dynamic Label+ (krátké textové informace)

Rozšířené krátké textové informace vycházejí z původního textu *Dynamic Label* a většinou se zobrazují samostatně po stisknutí tlačítka INFO. Tato funkce vybírá z původního textu pouze předem nadefinované důležité informace jako název interpreta (*artist*), název skladby (*title*), telefon, slogan, nebo webovou stránku stanice. Například z textu „Volejte do studia na telefonní číslo +420 606 606 606“, zobrazí *Dynamic Label+* pouze Phone: +420 606 606 606.



Obrázek 3: Příklad zjednodušeného schématu vytváření objektů DL Plus ze zpráv DL

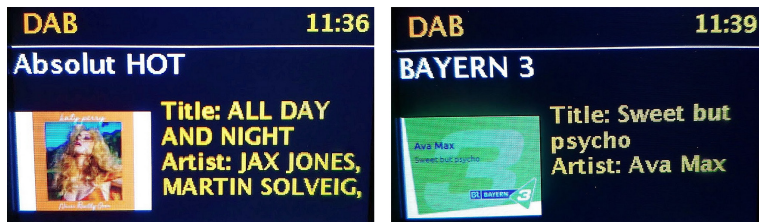


Obrázek 4: Porovnání *Dynamic Label* (horní část) a *Dynamic Label+* (spodní část)

1.3 SLS – SlideShow (obrazové informace)

Tyto obrazové informace používá dnes každá stanice vysílající v DAB+. Může mít mnoho podob, jako logo stanice, interpret, který právě hraje, obal alba, graficky zpracované počasí, dopravní informace, nebo na grafické předloze krátké textové zprávy. Některé stanice vysílají i tzv. QR kód, který po naskenování mobilním telefonem zobrazí další informace, které lze uložit do telefonu, jako například kontakt nebo adresu do studia. Stanice používají jednotnou grafiku pro lepší okamžitou identifikaci.

SlideShow může sloužit jako nové reklamní médium nebo upozornit posluchače na promo akce stanice.



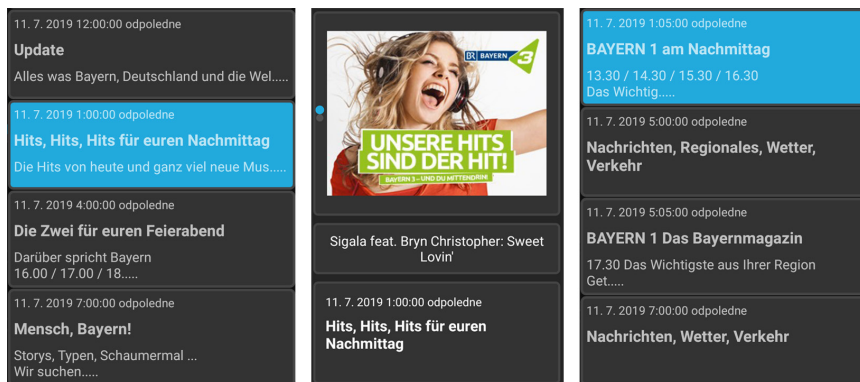
Obrázek 5: Zobrazení Dynamic Label+ na displeji rádia



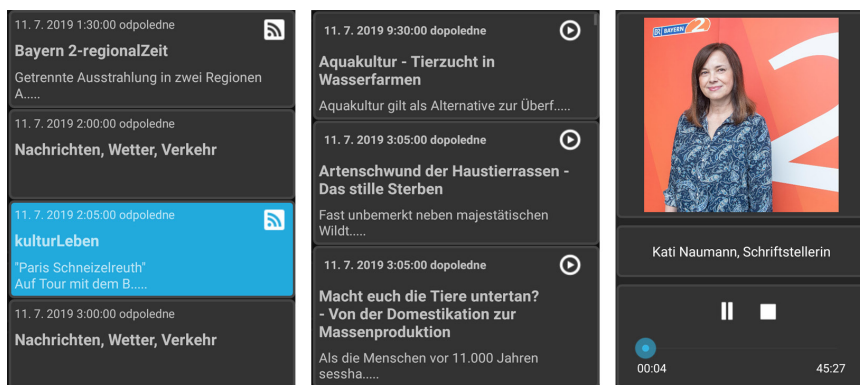
Obrázek 6: Příklad SlideShow

1.4 EPG – Electronic Program Guide (Elektronický programový průvodce)

Elektronický programový průvodce (EPG) známe především z televizního vysílání. Využít se dá i pro rozhlasové stanice v digitálním vysílání DAB+. Program rozhlasové stanice na celý týden dopředu může být doplněn podrobnějšími informacemi konkrétního pořadu. Zajímavé řešení nabízí například Německá stanice Bayern 2, kdy přímo v Elektronickém průvodci nabízí u pořadů spojení s Podcasty. K této nabídce je již potřeba připojení k internetu. U vybraných pořadů se v EPG zobrazí ikona nabízející Podcast, která po kliknutí nabídne možnost, poslechnout si odvysílaný pořad několik hodin, dnů i týdnů nazpátek. Audio přehrávač poté nabízí i obrázek související s pořadem.



Obrázek 7: Elektronický programový průvodce EPG



Obrázek 8: Elektronický programový průvodce EPG ve spojení s Podcasty

1.5 Journaline (pokročilé textové informace)

Journaline je platforma umožňující efektivní textové informační služby v digitálním rádiu DAB+.

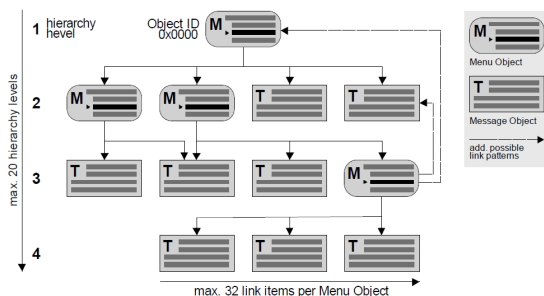
Elektronický časopis nazvaný jako teletext v radiu je zatím méně známá služba umožňující podstatně rozšířit domácí i zahraniční zpravodajství, informace z burzy, sportovní výsledky nebo časy přiletů a odletů letadel atd. Journaline byl mezinárodně standardizován společností WorldDAB pro použití v DAB+ již v roce 2007.

Logická struktura služby Journaline je uživateli zobrazována jako strom nabídek, podnabídek a zpráv.

Journaline aktuálně určuje 4 typy objektů:

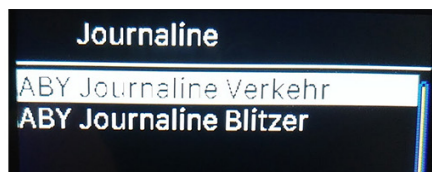
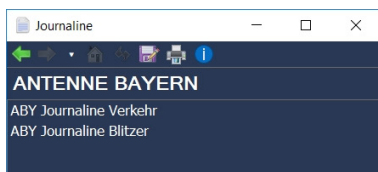
- menu,

- textové zprávy,
- titulky,
- seznam zpráv.



Obrázek 9: Příklad zobrazení jednotlivých úrovní Journaline

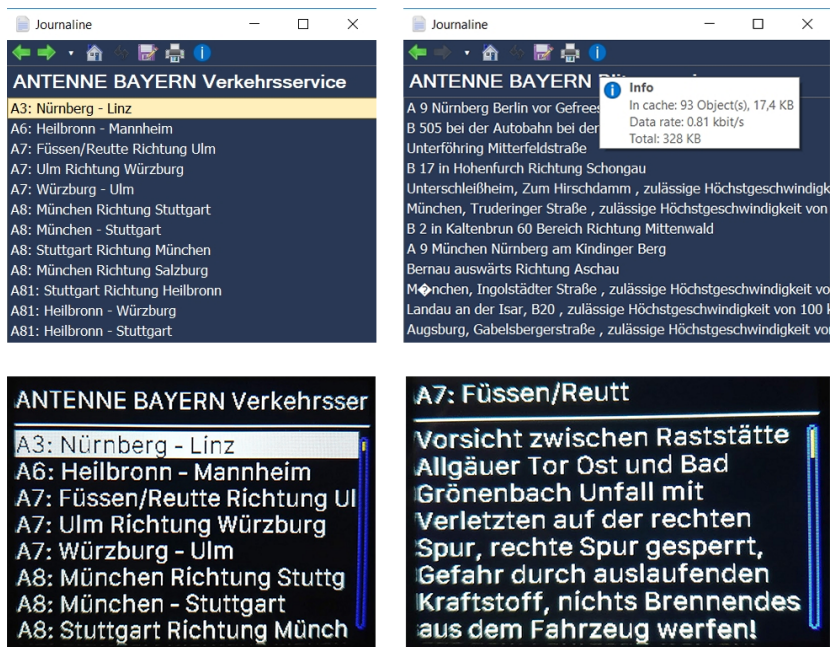
Každý objekt (nabídka nebo text) je zakódován v JML (*journaline markup language*), což je binární obsah ve formátu XML. Pro kódování textových znaků se používá formát *Unicode UTF-8*. To umožňuje službě Journaline podporovat jakýkoli mezinárodní skript a znakovou sadu, jako je čínština, arabština, azbuka atd. Informační stránky jsou omezeny na maximální velikost 4 kB. Doručené informace se ukládají do mezipaměti rozhlasového přijímače.



Obrázek 10: Antenne Bayern – základní nabídka Journaline

Journaline jako textová informační služba je ideálním předpokladem pro převod textu na řeč (*text to speech*). Příkladem je rádio NOXON dRadio1, které kromě příjmu Journaline je přizpůsobené pro nevidomé a slabozraké, využívající funkci *text to speech* pomocí audiosouborů na Flash disku. Rádio přečte kompletní menu včetně názvu rozhlasové stanice. Zde využívá jedinečného SId/PI (*service identifier/programme identification*) které má přidělena každá rozhlasová stanice.

Journaline je možné šířit v Digital Audio Broadcasting dvěma způsoby. Služba může být vysílána jako uživatelská aplikace přes DAB/DAB+ nebo jako PAD (*programme associated data*), který se používá k přenosu informací souvisejících s vysílaným programem. Oba tyto přenosové režimy mohou být volně přenášeny ve stejném multiplexu. Doporučení pro výrobce podporující službu Journaline je aby bylo možné dekodovat oba druhy dopravy. Journaline může být vysílán i prostřednictvím DRM.



Obrázek 11: Antenne Bayern – jednotlivé položky zpráv Journaline



Obrázek 12: NOXON dRadio1 umožňující příjem doprovodných multimediálních služeb DAB/DAB+, včetně Journaline



Obrázek 13: TechniSat DigitRadio 140 moderní rozhlasový přijímač umožňující příjem doprovodných multimediálních služeb DAB/DAB+ včetně internetových

2. Závěr

Digitální rozhlasové vysílání DAB/DAB+ dnes umožňuje poslat posluchači téměř neomezené množství informací jak v textové, tak obrazové podobě přímo na displej rozhlasového přijímače. Ve spojení s připojením do internetu se nabízí další možnosti jako zpětný kanál např. pro online rozhlasové soutěže, nebo poslech Podcastu přímo v elektronickém programovém průvodci (EPG).

Možností je opravdu hodně a záleží pouze na rozhlasové stanici, jaký doprovodný obsah nabídne svému posluchači.

3. Zdroje

- [1] DAB Principles and Applications of Digital Radio, Wolfgang Hoeg, Thomas Lauterbach, 1996.
- [2] Application specification ETSI TS 102 980 V2.1.2 (2019-02).
- [3] Electronic Programme Guide, ETSI TS 102 371 V1.1.1 (2005-01).
- [4] SlideShow, ETSI TS 101 499 V3.1.1 (2015-01).
- [5] Journaline, Dipl.-Ing. Alexander Zink, MBA Fraunhofer IIS, 2014.
- [6] Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, <<http://www.iis.fraunhofer.de>>, 2019.
- [7] WorldDAB, <<http://www.worlddab.org>>, 2019.
- [8] Webový portál o digitálním vysílání DAB, <<http://www.dab-plus.cz>>, 2019.

Pokryvání stanic i tunelů pražského metra signálem mobilních operátorů

Ing. Karel Mikuláščík

T-Mobile Czech Republic a. s., Praha

1. Úvod

Možnost plnohodnotně využívat hlasové i datové služby mobilních operátorů v prostorech pražské podzemní dráhy a zejména v tunelech je letitým přáním cestujících. Současnému již realizačně úspěšnému projektu výstavby předcházelo po řadu let několik neúspěšných projektových záměrů, které zkrachovaly vždy především na finančních otázkách.

Rozvoj mobilních sítí 4. generace (LTE), velké rozšíření „chytrých“ telefonů a masivní využívání datových přenosů uživateli zdůraznilo další neudržitelnost stavu velmi limitované dostupnosti mobilního signálu v metru. Začalo být zřejmé, že odpovídající pokrytí pražského metra signálem je u zúčastněných subjektů v zájmu nejen mobilních operátorů, ale i dopravního podniku a města Prahy. Řadu měsíců probíhající projektová příprava se tak nyní mohla soustředit na řešení technických a legislativních otázek a překážek.

Téměř 20 let byly (a ve větší části linek dosud jsou) v pražském metru pokryty signálem mobilních operátorů pouze stanice systémem GSM. Tento stav se změnil až na přelomu let 2015/2016, kdy v podzemí na novém úseku metra V. A ze stanice Dejvická do stanice Nemocnice Motol bylo nově možné využívat i systémy 3G a LTE a poprvé zde byly pokryty také návazné tunely.

Na podzim roku 2018 pak mobilní operátoři uvedli do provozu komplexní pokrytí úseku Roztyly – Muzeum na nejvytíženější trase C pražského metra. Na pokrytí dalších úseků se nyní pracuje s cílem dokončit vše do roku 2022. Tento příspěvek si klade za cíl představit technické řešení i související nutné aktivity pro správné fungování systému jako celku. Speciálně se jedná o řešení pasivních intermodulací (PIM).

2. Popis technických prostředků

Pokrytí vnitřních prostor se dá obecně docílit několika přístupy a případně i jejich kombinacemi. Univerzálnějším řešením je z hlediska využití více operátory a systémy v různých frekvenčních pásmech instalace pasivních distribuovaných anténních systémů (DAS). Pro jedno-operátorská řešení s jedním nebo dvěma použitými frekvenčními pásmy může být zajímavé řešení s aktivními prvky zapojenými prostřednictvím IP. Pasivní DAS může být napájen z klasických technologií pro základnové stanice a jejich variací nebo pomocí systému optických opakovačů. Prostředí metra přináší ve vztahu k určitému řešení různá omezení – například limitované možnosti napájení, chlazení

i prostoru pro umístění technologie samotné nebo omezené možnosti vedení sdělovacích kabelů v tunelech.

Repeaterová řešení většinou koncentrují technologie mobilních sítí do centrálního bodu. Tady dochází již na repeaterové technologii nezávislé na konkrétní technologii mobilních sítí k nízko-výkonovému sloučení operátorů/frekvenčních pásem a k převodu signálů do optického spektra. Do stanic propojených s centrálním bodem optickými kabely se pak umísťují pro opto-elektronický převod jen subtilní boxy s malým odběrem obsluhující pro všechny operátory vždy jedno nebo dvě frekvenční pásma. Výstupní signál se již jen rozbočuje, pokud má pasivní DAS více větví. Do hry vstupuje technologie dalšího dodavatele, dohledovaná a spravovaná z pohledu operátora jiným způsobem, než je zbytek jeho sítě.

Konvenční řešení s využitím technologie základnových stanic pracuje s výkonovým sloučením operátorů/frekvenčních pásem následované případným rozbočením signálu do více větví. Především radiové transceivery je potřeba napájet dostatečně dimenzovanými rozvody elektrické energie a jejich ztrátový výkon je nutné účinně odvést mimo prostory umístění technologie. Dohled a správa technologie probíhá standardním způsobem jako ve zbytku sítě každého mobilního operátora. Toto řešení poskytuje větší flexibilitu v rychlém nasazení nových frekvenčních pásem/systémů a zpravidla nabízí vyšší výkonovou rezervu pro návrh pasivních DAS, zvláště pokud je uvažováno použití vyzářovacích kabelů. Práce s vyššími výkony zvyšuje riziko vzniku pasivních intermodulací (PIM) a nutnost s tímto fenoménem zásadněji pracovat.

2.1 Stávající řešení pokrytí signálem GSM ve většině stanic

Na Centrálním dispečinku Dopravního podniku hlavního města Prahy je umístěna GSM technologie všech mobilních operátorů. GSM signál v pásmu 900 MHz je odtud rozveden vždy jedním optickým vláknem pro oba směry komunikace pro dvě až tři stanice. Frekvenční plán jednotlivých operátorů musí počítat s tím, že každá stanice obsluhovaná daným optickým vláknem musí mít přidělen jiný kanál a nesmí sousedit s kanálem jiného operátora. Optický repeater ve stanicích umožňuje dálkově nastavit až 8 GSM kanálů, které se následně přenášejí do pasivního DAS v dané stanici. V praxi se jedná vždy o dva kanály pro každého mobilního operátora. Prostor nástupiště, jezdících schodů a vestibulu obsluhuje jednoduchý pasivní rozvod s několika anténami pro vnitřní pokrytí. Systém umožňuje solidní hovorovou komunikaci ve stanicích metra. Schopnost pokrýt požadavky na datovou komunikaci je však s ohledem na množství terminálů hlásících se o slovo například při příjezdu soupravy metra do stanice tristní.

2.2 Pokrytí GSM, 3G a LTE v nejmladším úseku pražského metra – V. A

Technologie všech systémů a operátorů je opět umístěna centrálně a o přenos signálu do stanic se starají elektro-optické převodníky pomocí obousměrně využitých optických vláken. Moduly optických repeaterů obsluhují u všech tří mobilních operátorů GSM v pásmu 900 MHz a 3G v pásmu 2100 MHz, resp. LTE v pásmu 800 Hz.

Poprvé je zde signál mobilních operátorů výkonově rozdělen pro stanice i do vyzářovacích kabelů vedených ze stanice čtyřmi tunelovými troubami. Pokrytí tohoto úseku mělo využít synergie při výstavbě metra a poprvé otestovat možnosti pokrytí tunelů různými systémy v různých frekvenčních pásmech.

2.3 Aktuálně budované pokrytí stanic a tunelů systémy GSM, 3G, LTE, (5G)

V jednotlivých stanicích je pro všechny operátory rozmístěna v otevřených prostorech konvenční technologie s radiovými jednotkami RRU (*radio remote unit*) [2] pro pásma LTE 800 MHz, GSM 900 MHz, LTE 1 800 MHz, 3G/LTE 2 100 MHz a LTE 2 600 MHz. Již je počítáno s rezervou pro pásmo 700 MHz (5G). Pro sloučení operátorů/frekvenčních pásem a zároveň výkonové rozdělení výsledného signálu do jednotlivých větví pasivního DAS byl navržen kompaktní nerozebíratelný „HC slučovač“ splňující speciální požadavky na požární odolnost v podzemních prostorech a především stabilitu podmínek sloučení/rozdělení signálů.



Obrázek 1: RRU „hnízdo“ s napájecími boxy



Obrázek 2: „HC slučovač“

Prostory stanic, schodišť, spojovacích chodeb a vestibulů obsluhuje pasivní rozvod využívající anténní jednotky s dvěma anténními cestami umožňujícími v LTE provozovat režim MIMO 2×2. Z důvodu dostatečně homogenity signálu na nástupišti i návaznosti na pokrytí z vyzařovacích kabelů v tunelu jsou nástupiště osazena konfigurací minimálně šesti antén. Pokrytí tunelů využívá pro všechny systémy pouze jednu anténní cestu, tj. v LTE režim SISO.

Umístění RRU i prvků sloučení signálu v otevřených technologických prostorech ve stanicích metra zajišťuje jejich dostatečné pasivní chlazení. Systémy pro napájení 48 V, BBU (*base band unit*) [2] jednotky a konektivita jednotlivých operátorů jsou umístěny v uzavřené technologické místnosti.

Výstavbu a provoz nového systému pokrytí pražského metra zajišťuje konsorcium mobilních operátorů vedené T-Mobile. Operátoři T-Mobile, O2 a Vodafone si zajišťují vlastními prostředky radiovou technologii (RRU a BBU) a dělí se rovným dílem o náklady na společné části systému i provoz.

3. Pasivní intermodulace (PIM)

Signály mobilních sítí čtvrté generace (LTE) využívají proti starším systémům výrazně širší frekvenční kanály – v našich podmínkách 10, 15 a 20 MHz. Pokud dojde k interakci signálů více operátorů šířených v rozvodu vnitřního pokrytí, výsledné intermodulační produkty znehodnocují kvalitu přenosu plošně v downlinkové spektru a často mocně zasahují i do uplinkového spektra daného frekvenčního pásma, případně napříč frekvenčními pásmy.

Zdrojem PIM mohou být vyjma přímo vadných prvků rozvodu například nevhodně umístěné antény nebo vyzařovací kabel poblíž vodivých předmětů, špatně provedené nebo nedostatečně utažené konektory a podobně. Prostředí metra navíc trpí značnými vibracemi, které neustále prověřují stálost jakýchkoliv spojů.

Zdroje pasivních intermodulací se za provozu obtížně hledají a eliminují, je tedy vhodné je pokud možno řešit už v rámci přípravy a výstavby pasivního DAS. Značná pozornost byla věnovaná výběru vhodných „nízko PIMových“ antén a vyzařovacího kabelu i hledání nejvhodnějšího způsobu jejich uchycení. Výběr podpořila řada testů a měření jak v laboratorních podmínkách tak přímo ve stanicích a tunelech metra.

Při postupném zapojování jednotlivých větví pasivního rozvodu se provádí měření přístrojem „PIM master“, který v daném frekvenčním pásmu nastoluje podmínky pro vzájemnou interakci více signálů o proměnlivé frekvenci. Výsledkem měření je zjištění míry problému s PIM a odhad místa vzniku PIM. Již za provozu umožňuje problémy související s PIM detekovat i dohledová část mobilní sítě prostřednictvím měření rušení na uplinku daného frekvenčního pásma.

4. Závěr

Nově budované pokrytí stanic a tunelů pražského metra signálem všech soudobých systémů pro mobilní komunikaci přináší uživatelům ty nejlepší podmínky pro využití datových služeb v rámci jejich domovských sítí i s výhledem na příchod systémů 5G. Špičkové datové rychlosti díky agregaci všech frekvenční pásem LTE šplhají až k hodnotě 600 Mbit/s.

5. Literatura

- [1] Černý, R.: Metody pokrývání tunelů signálem telekomunikačních sítí, sborník konference Radiokomunikace 2016, UNIT Pardubice.
- [2] Mikuláščík, K.: Moderní rádiové prvky v sítích pro mobilní komunikaci, sborník konference Radiokomunikace 2016, UNIT Pardubice.

Zemské digitální rozhlasové vysílání před branami 20. let 21. století

Ing. Karel Mikuláščík

ČVUT v Praze, FEL, Katedra radioelektroniky

1. Úvod

Již přibližně dvacet let se na této konferenci bavíme o digitalizaci rozhlasového vysílání. Za stejné časové období vešly například v mobilní komunikaci do praxe systémy třetí a později čtvrté generace *LTE* a nyní se již mocně věnujeme tématům souvisejícím s *5G*. Podobně jsme u televizního vysílání ve zkoumaném čase stihli zdigitalizovat zemské televizní vysílání a nyní jsme blízko realizace přechodu na druhou generaci zemského vysílání – *DVB-T2*.

V České republice již řadu let probíhá řádné vysílání digitálních rozhlasových multiplexů *DAB+* několika provozovatelů [6], většinou nadšenců. Bohužel podoba vysílání stále odpovídá režimu technicky omezenému stávající legislativou. Velká část odborné i laické veřejnosti se totiž k rozhlasové digitalizaci staví vlažně. Nezřídka zaznívají názory, že zemské digitální rozhlasové vysílání vlastně vůbec nepotřebujeme, případně že digitalizaci rozhlasového vysílání již vyřešil všemocný internet.

Tento příspěvek si klade za cíl rozklíčovat a zhodnotit význam rozhlasové digitalizace. Výsledkem snahy o nezaujatý postoj k problematice rozhlasového vysílání je několik argumentů, proč stojí za to i po dvaceti letech usilovat ve značně změněných možnostech distribuce signálu rozhlasových stanic o přípravu podmínek vhodných pro provedení digitalizace zemského rozhlasového vysílání.

2. Analogové rozhlasové vysílání

Analogový systém pro zemské stereofonní rozhlasové vysílání v pásmu velmi krátkých vln, nazývaný zjednodušeně *VKV-FM*, nabízí při dobrých radiových podmínkách velmi kvalitní přenos zvuku limitovaný pouze kvalitou zdrojového signálu přenášeného dnes určitě digitální linkou ze studia na vysílač. Žádná další přidaná hodnota v podobě *HD*, *Ultra HD* ani *3D* se v případě stereofonního přenosu zvuku ve srovnání s přenosem obrazu nekoná, snad jen s výjimkou šíření vícekanálového zvuku pro speciální aplikace související například s filmovými projekcemi. Analogové amplitudově modulované rozhlasové vysílání na dlouhých, středních a krátkých vlnách pro potřeby srovnání s digitálními systémy s dovořením neuvažují.

Moderní „analogové“ *VKV-FM* rozhlasové přijímače navíc dokáží, paradoxně díky digitálnímu zpracování vstupního radiového signálu, do určité míry potlačit subjektivní důsledky slabšího signálu a rušení známé ze starších přijímačů s čistě analogovým zpracováním radiového signálu.

VKV-FM vysílání doplněně standardně o *RDS* (*radio data system*) přenáší mimo jiné název stanice, textové informace i data umožňující přeladování autorádií v rámci

jednoho programu, popřípadě přepnutí na aktuálně probíhající dopravní zpravodajství z jiné stanice nebo jiného zdroje audiosignálu. Na jednodušším přijímači vybaveném pouze textovým displejem tak nemusí běžný posluchač na první pohled ani poslech rozlišit, zda přijímá analogové, či digitální vysílání.

V analogovém systému se okamžité hodnoty zvukového signálu (v podstatě nekonečně mnoho stavů) bezprostředně promítají do spektra vysílaného radiového signálu a na přijímací straně zase naopak. Analogový systém je limitovaný především šumem, dále pak rušením a zkreslením přenášeného signálu vlivem vícecestného šíření.

Zvukové podání vysílaného audiosignálu se upravuje modulačními procesory tak, aby byly maximálně využity možnosti přiděleného vysokofrekvenčního spektra v rámci povolených mezí. Většinou kvůli tomu dochází k významné kompresi dynamiky i ovlivnění spektrálního průběhu původního audiosignálu.

Moderní VKV-FM přijímače používají SDR (*software defined radio*) zpracování radiového signálu, jehož zadáním je snížit nepříznivé efekty analogového systému na minimum. Vstupní vysokofrekvenční signál je v přijímači záhy navzorkován a dále je zpracováván digitálně. Přijímače tohoto ražení se ve velké míře více než deset let instalují do automobilů, máme je v mobilních telefonech i v digitálně laděných přenosných přijímačích. SDR zpracování signálu je zde totiž nesporně levnější a efektivnější než zpracování konvenčními analogovými obvody.

Rozhlasové přijímače s SDR zpracováním při horším signálu nešumí ani příliš neprskají a podobně. Eliminace zmíněných nepříznivých jevů však samozřejmě není zadarmo. Moderní analogové přijímače poměrně brzy při snižování úrovně přijímaného signálu postupně zmenšují separaci levého a pravého audiokanálu. Při ještě slabším přijímaném signálu pak u prakticky monofonního audiosignálu navíc dochází k zužování spektra užitečného zvukového signálu. Tyto fenomény doprovázejí vysoké procento území příjmu. Důsledkem je, že plnohodnotný stereofonní příjem provází například posluchače v automobilu, pokud zrovna nejezdí kolem vysílače, pouze zlomek cesty. Stav analogového vysílání VKV-FM v České republice přibližuje [3].

3. Digitální rozhlasové vysílání

V evropském prostoru jsou pro nahrazení stávajícího analogového vysílání VKV-FM standardizované a sdružením EBU (*European Broadcasting Union*) doporučené systémy DAB+ (*digital audio broadcasting*) a DRM+ (*digital radio mondiale*) [1, 2] vycházející z podobných principů jako systémy pro digitální televizní vysílání.

Přidělené frekvenční spektrum vyplňuje několik set nosných kmitočtů modulovaných čtyřstavovou, případně šestnáctistavovou modulací. Přijímač je schopen jednotlivé stavy rozlišit i při dost zašumělém (slabém) nebo zkresleném vysokofrekvenčním signálu. Protichybové zabezpečení přenášených dat pak dokáže opravit, nebo alespoň detekovat řadu chyb i v případě špatného určení konkrétního stavu modulace.

Díky tomu digitální systém vyžaduje pro stejné pokrytí o více než jeden řád nižší výkon vysílače v přepočtu na jednu rozhlasovou stanici. Systém s více nosnými kmitočty a ochranným intervalem pak také do značné míry řeší problémy vícecestného šíření elektromagnetických vln, resp. možnost využít pro vysílání na stejném kmitočtu více vysílačů. V oblasti pokrytí digitální systém vždy přináší stejný plnohodnotný stereofonní audiosignál, stejně (ne)kvalitní, jako byl na začátku vysílacího řetězce.

Na vyšší efektivitě digitálního přenosu oproti analogovému se samozřejmě podílí také zdrojové kódování audiosignálu. Kodeky HE-AAC (*high-efficiency advanced audio coding*) použité v systémech pro digitální rozhlasové vysílání nabízejí solidní subjektivně vnímanou kvalitu zvuku v širokém rozsahu datových toků (cca 40–128 kb/s).

U datových toků na horní hranici uvedeného rozmezí se dá hovořit o kvalitě srovnatelné se zvukem přehrávaným z CD nosiče. U nízkých datových toků si však řada náročnějších posluchačů stěžuje na horší zvukový zážitek ve srovnání s *VKV-FM*.

Na kvalitu výstupního zvukového signálu má vyjma datového toku také vliv řetězec zpracování zdrojového audiosignálu (kodéru) a nastavení řady jeho parametrů. Dá se říci, že se jedná o určitý druh alchymie, jejímž cílem je připravit zvuk takový, který většina posluchačů přijme a jenž ocení i „fajnšmekři“.

Použití nižších datových toků je bohužel u systému umožňujícího přenášet najednou větší počet rozhlasových stanic velmi svůdné. Ušetřený datový tok je možné – vyjma přidání dalších stanic – investovat do vyššího zabezpečení radiového přenosu.

DAB+ využívá několikanásobně širší frekvenční spektrum než analogové *VKV-FM*. Kmitočtové přiděly jsou plánovány ve III. pásmu – na frekvencích přibližně v rozsahu 180–230 MHz. V závislosti na zvoleném zabezpečení přenosu a datové rychlosti umožňuje přenášet více než deset rozhlasových stanic. Z pohledu využití frekvenčního spektra je tak spíš analogií televizních multiplexů.

Obdobně také vkládá mezi provozovatele rozhlasové stanice a posluchače nový článek – provozovatele multiplexu. Je to citelné hlavně v případech, kdy si dnes rozhlasová stanice provozuje svůj vysílač vlastními prostředky. Naopak pro provozovatele vysílacích služeb, který na jedné lokalitě obsluhuje více *VKV-FM* vysílačů různých stanic, implementace *DAB+* znamená, že stávající stanice bude moci obsloužit jedním zařízením a zbylou kapacitu ještě nabídne dalším stanicím.

DAB+ vysílání probíhá řadu let v několika evropských zemích. Díky tomu je i pro náš trh k dispozici široká paleta přenosných přijímačů, dají se koupit Hi-Fi komponenty nebo autorádia podporující tento systém. Je otázkou, jestli si časem najde cestu i do mobilních telefonů.

DRM+ respektuje šířkou spektra 96 kHz kmitočtový rastr *VKV-FM* 100 kHz, je tedy užší než spektrum analogového systému. Umožňuje přenášet jednu, případně dvě stanice. Z pohledu přístupu k frekvenčnímu spektru je do značné míry analogií k *VKV-FM*. Pásmo *VKV* (87,5–108 MHz) je také domovským pásmem tohoto systému.

Díky možnosti využívat jednofrekvenční sítě může v budoucnosti přinést revoluci využití tohoto pásma.

Aktuálně ale o nasazení tohoto systému v Evropě hlasitěji uvažuje pouze Rusko. *Konsorcium DRM* své síly investuje především do propagace a podpory budování sítí *DRM30* pro střední a krátké vlny v odlehlejších částech světa, především v Indii a Brazílii.

K zásadnější propagaci možností *DRM+* a soutěži s *DAB+* v Evropě prakticky nedošlo. Není tedy překvapením, že několik vzorků přenosných přijímačů pro *DRM+* jsme dosud mohli vidět pouze na propagačních fotografiích čínských výrobců.

Přesto se nedá vyloučit, že se díky přítomnosti modulů pro příjem *VKV-FM* v řadě moderních přístrojů jednoho dne díky softwarovým aktualizacím náhle objeví bezpočet *DRM+* přijímačů. Nejsnáze například v mobilních telefonech nebo multimediálních přístrojích, u kterých je možné provádět aktualizace jejich firmware přes internet. Nástup *DRM+* se však zřejmě nedá očekávat dříve, než dojde k utlumení stávajícího analogového vysílání na *VKV-FM*.

Realitami českého rozhlasového trhu ve vztahu k přechodu na digitální systémy se zabývá [3].

4. Digitální rozhlasové vysílání versus Internet

Zemské rozhlasové vysílání, v odborné terminologii označované jako „broadcast“, umožňuje v oblasti pokrytí signálem příjem prakticky neomezenému počtu posluchačů. Internetový přenos rozhlasového vysílání oproti tomu stále převážně funguje v režimu „unicast“ – ke každému posluchači proudí separátní datový tok přes řadu síťových prvků. Každý další posluchač zvyšuje náklady za internetové šíření.

Služby streamovacích serverů u nás v České republice využívají v současné době v jeden konkrétní okamžik až desetitisíce posluchačů v celkovém pohledu, u jednotlivých stanic se může jednat o stovky až tisíce posluchačů. Pokud bychom chtěli všechny posluchače obsloužit výhradně pomocí internetového vysílání, zmíněné počty by vyrostly přibližně stonásobně.

Dnešní představa o tom, že na internetu je vše vlastně „zadarmo“, by pravděpodobně vzala za své. Náklady na mnohonásobné rozšíření serverové kapacity, zvýšené nároky na internetovou infrastrukturu i řešení „úzkých hrdel“, by zajisté chtěl někdo zaplatit.

Zemské vysílání pro stávající broadcastery představuje jakousi výstavní skříň, kde se o přízeň posluchačů utkávají s omezenou množinou regionálních a celoplošných stanic, často cílených na rozličné preference posluchače. V bezbřehém světě tisíců internetových stanic různých žánrů hraje do karet tuzemským stanicím jazyková bariéra a právě známost stanic nabytá pomocí rozhlasového éteru.

Internetové vysílání není příliš spolehlivé v případě řešení krizových událostí. Zkušenosti hovoří o přetížení serverů i internetových spojů, případně i o dlouhodobějších

výpadcích připojení. Internetový přenos vysílání rozhlasových stanic je naopak vynikající pro poslech specializovaných programů, které není hlavně z finančních důvodů reálné umístit do zemského vysílání.

Poslech se může uskutečňovat díky mobilním sítím čtvrté generace téměř kdekoliv, byť výdrž baterie terminálu znatelně klesne. Ve vnitřních prostorách, kde není ani pokrytí mobilních sítí, pomohou sítě *Wi-Fi*. Od uživatelů skrytých za obrazovky, klávesnice, myši a sluchátka svých počítačů připojených nejlépe na pevné internetové sítě by bylo samozřejmě bláhové požadovat, aby poslouchali rozhlasové vysílání jinak než prostřednictvím svých PC.

Výhody „broadcastového“ vysílání i živého internetového streamingu v různých podobách se snaží skloubit technologie hybridního rádia zastřešená společností *RadioDNS* [5]. Multimediální zařízení vybavená patřičným rozhlasovým přijímačem i přístupem k internetu (*Wi-Fi*, *LTE*), doplněná odpovídajícím software, umožňují automaticky zvolit právě využitý zdroj distribuce konkrétního rozhlasového programu. Hybridní rádio primárně řeší identifikaci rozhlasových programů na různých platformách a jejich párování napříč těmito platformami. Dále obhospodařuje kritéria pro výběr konkrétní distribuční cesty rozhlasového programu v daných podmínkách. Velkou výzvou je práce s různě zpožděnými signály rozhlasových stanic z různých distribučních zdrojů zvláště v podmínkách, kdy je nutné distribuční cesty často měnit.

5. Analogové versus digitální rozhlasové vysílání

Moderní vysílače i přijímače pro *VKV-FM* dnes provádějí drtivou část zpracování signálu digitálně. Analogový signál se tak v řetězci vysílač–přijímač vyskytuje prakticky jen od bloku výkonového zesílení na vysílací straně po vstupní díl přijímače. Do rozhlasového éteru „pumpujeme“ nasimulovaný analogový signál určený pro moderní i letité *VKV-FM* přijímače v obavě, že si posluchač nebude ochoten koupit nový přijímač pro digitální vysílání, který se ale od toho moderního „analogového“ ve své podstatě příliš neliší.

Z výše uvedeného je patrné, že s dostupnými digitálními prostředky použitými pro analogové účely maříme klidně i 90 % vysílané energie, což bychom v případě přechodu stávajícího rozsahu vysílání do digitální formy nemuseli.

Často se skloňuje všemi pády, že jsou přijímače pro digitální rozhlasové vysílání drahé. Jak toto tvrzení obstojí ve srovnání s tím, že velká část domácností bude muset v nadcházejícím roce bez mrknutí oka doplnit své televizory o nový DVB-T2 set-top box, nebo rovnou koupit televizi novou? Nebo s tím, že velká část populace od žáků prvního stupně základní školy po mladší důchodce propadla mámení několikanásobně dražších chytrých telefonů, které každému rozhodně nebudou stačit/sloužit déle než maximálně pět let?

Nové přijímače pro digitální rozhlas většinou disponují dobrou citlivostí na radiový signál, snadným (automatickým) naladěním stanic a dobrým zvukem reproduktoru.

U moderních audiosystémů pracujících s dalšími digitálními zdroji audiosignálu je synergie s přijímačem digitálního rozhlasu poskytujícím signál ve stejném nebo podobném formátu jako ostatní zdroje zřejmá.

6. Závěry

Troufám si zde vyslovit myšlenku, že dobře promyšlená digitalizační kampaň může dokonce vést k renesanci poslechu rozhlasu.

Většina moderních komponent vysílačích řetězce analogového *VKV-FM* už pracuje na základě principů digitální techniky. Přechod na digitální vysílání je tedy logickým krokem k úspornější a pestřejší budoucnosti.

Řada rozhlasových stanic, které se dlouhá léta prostřednictvím postupně koordinovaných vysílačů *VKV-FM* malých výkonů lopotně propracovávají k většímu pokrytí, se díky digitalizaci rozhlasového vysílání dostane k plnohodnotnému celoplošnému pokrytí.

Rozhlasová digitalizace je obzvláště atraktivní pro mediální domy vlastníci většiny počet stanic s celostátní působností, ale dosud limitovaným pokrytím v různých oblastech – dostanou možnost rozšířit pokrytí všech svých stanic na téměř celé území ČR.

Díky současné dobré pozici internetového šíření rozhlasového vysílání nemusí být systémy pro zemské digitální rozhlasové vysílání dimenzovány na pokrytí významněji stíněných vnitřních prostor budov, kde je možné si snadno vypomoci například *Wi-Fi*. Náklady na digitální pokrývání tak mohou být dále nižší než v případě analogového vysílání.

Zemské digitální rozhlasové vysílání má své místo v multimediálním světě. Můžeme ho chápat jako základní rozhlasovou platformu, kterou smysluplně doplňují další systémy pro přístup k vysílání rozhlasových stanic – internetové připojení, satelitní vysílání, *CATV*, *IPTV*... Různé distribuční cesty propojí a pro výběr posluchačů je učiní transparentní systém hybridního rádia.

Pro zdárný průběh rozhlasové digitalizace je důležité, aby se systémové úspory a zisky rozprostřely mezi hráče na vysílači straně rozhlasového hřiště. Je také potřeba, aby posluchači přijali nový stav pozitivně na základě dostatečné zvukové kvality, minimálně srovnatelné s ostatními dostupnými zdroji, i díky rozšíření programové nabídky o stanice, které v daném regionu nemusely být dosud k dispozici.

V podmínkách České republiky je potřeba zajistit realizaci alespoň dvou vrstev *DAB+* sítí pro soukromé stanice [3]. Může se jednat o síť s celostátní působností, případně alternativně o více sítí tak, aby v každém regionu byly k dispozici minimálně dvě sítě nabízející dostatečnou kapacitu stávajícím provozovatelům rozhlasového vysílání. Nové multiplexy musí respektovat regionalizaci reklamního trhu.

Kromě dalších systémových benefitů je hlavním úkolem digitalizace zemského rozhlasového vysílání zajistit všem dnes vysílajícím stanicím obdobné, v praxi pak značně lepší podmínky pro pokrytí obyvatel a území, než mají dnes.

Zahájení procesu digitalizace rozhlasového vysílání je podmíněno výběrem budoucích operátorů plnohodnotných DAB+ multiplexů a nastavením jejich motivace k budování sítí tak, aby byly k dispozici v dostatečném předstihu před rokem 2025, případně dle rozhodnutí zákonodárců později. Zazní určitě také otázka možného spoluvlastnictví DAB+ multiplexů provozovateli stanic spojená se zajištěním neutrality pro přístup do sítí DAB+.

Myslenky tohoto příspěvku dále rozvádějí a náhled do situace ve vybraných Evropských zemích přinášejí mé články na serveru *digizone.cz* [4]

7. Literatura

- [1] EN 300 401 v2.1.1: Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. ETSI, leden 2017.
- [2] ES 201 980 v4.1.2: Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification. ETSI, duben 2017.
- [3] Přehled stavu VKV-FM vysílání v ČR, požadavky na síť DAB+ <<https://www.lupa.cz/clanky/prestehuji-se-soukroma-radia-do-dab-podle-zakona-na-to-maji-jeste-par-let/>>.
- [4] Cyklus článků o digitálním rozhlasovém vysílání <<https://www.lupa.cz/autori/mikulastik/>>.
- [5] Webové stránky projektu RadioDNS Hybrid Radio <<https://radiodns.org/>>.
- [6] Přehled vysílačů, obsahu multiplexů a technických parametrů systému T-DAB(+) v ČR, <<http://digital-radio.cz/>>.

Dimenzování částí pevných přístupových sítí NGA – Agregace

Ing. Jan Kramosil

BC Service

1. Úvod

Pro operátora sítě elektronických komunikací, který poskytuje připojení k internetu, je jednou z klíčových úvah, úvaha o úrovni agregace datového provozu v jednotlivých částech sítě a o vývoji úrovně agregace v čase.

Tato úvaha má pro operátora zásadní význam jak při projektování nové sítě, tak při hodnocení stability a kvality provozu ve stávající síti v souvislosti s nárůstem požadavků uživatelů na vlastní připojení k síti internet. Význam této úvahy ještě dále roste, pokud se jedná o síť s velmi vysokou kapacitou (VHCN) umožňující vysoko-rychlostního připojení k internetu tedy o síť NGA.

Jsou vlastně hledány odpovědi na dvě základní otázky:

- jak velká má být kapacita (propustnost, Mbit/s) přípojné, distribuční či uživatelské části přístupové sítě NGA, aby bylo možno zajistit kvalitní připojení konkrétního počtu uživatelů k síti internet při stanovené (smluvní) hodnotě reálné rychlosti připojení uživatele (Mbit/s)?

anebo

- kolik uživatelů se stanovenou (smluvní) hodnotou reálné rychlosti připojení lze připojit k příslušné části přístupové sítě NGA s danou kapacitou (propustností)?

Tento příspěvek předkládá dva z více možných modelových příkladů, jak lze při úvaze o úrovni agregace postupovat. Nicméně zde zmíněné postupy jsou skutečně pouze modelovými příklady, které slouží zejména k prvotnímu návrhu či posouzení stavu a možností sítě.

Pro celkové objektivní hodnocení skutečného stavu a dostatečné kapacity sítě je zásadní skutečnost, zda je operátor prostřednictvím infrastruktury schopen poskytnout dostatečně kvalitní a spolehlivou službu připojení s požadovanými parametry (např. smlouvou stanovená reálná rychlost připojení a další kvalitativní – doplňkové parametry), nikoliv zda naplňuje zde uvedená modelová kritéria či hodnoty.

Jedním z příkladů objektivního hodnocení skutečného stavu sítě je měření stanovených parametrů podle platné „*Metodiky pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací*“ [ČTÚ], například v rámci provádění státní kontroly elektronických komunikací.

V dobách masivního rozvoje internetového připojení prostřednictvím sítí WAS (lidově „WiFi“¹ – období 2008–2012), které jsou z pohledu poskytování připojení k internetu rovněž považovány za pevné sítě, byl pro odhad postačující reálné propustnosti přístupového bodu (AP), či pro odhad maximálního počtu přípojek, které je možno přístupovým bodem obsluhovat, používán jednoduchý v praxi ověřený vztah:

$$n = \frac{P}{R} \cdot A, \quad (1)$$

kde n je počet připojení na AP, P je reálná propustnost AP, R je reálná rychlost požadovaná pro přípojku a A je agregační poměr.

V praxi bylo také postupně ověřeno, že pro v té době aktuální charakter provozu přípojek k síti internet (chování uživatelů, typ využívaných služeb, objemy stahovaných dat) poměrně dobře odpovídá použití hodnoty agregačního poměru (agregace) 4: 1.

Při použití této hodnoty bylo možno očekávat i zajistit stanovenou a smluvně potvrzenou reálnou rychlost stahování (odesílání) na jedné přípojce přibližně pro vypočítaný počet přípojek připojených na AP se známou hodnotou maximální reálné propustnosti.

Za reálnou rychlost stahování (odesílání) [1] se již tehdy považovala hodnota rychlosti, kterou mohl uživatel na přípojce očekávat po většinu času realizovaného připojení. V dnešní době je tato hodnota rychlosti označována jako *běžně dostupná rychlost* (dále i BDR) [2].

Příklad:

AP – Cambium PMP 100 (původně Motorola Canopy), propustnost: 14 Mbit/s,

reálná rychlost požadovaná pro přípojku: 4 Mbit/s,

agregační poměr: 4: 1,

počet přípojek na AP: 14.

Pokud by AP v tomto případě se stejnou propustností obsluhoval větší počet přípojek, zvyšuje se úměrně jejich počtu agregační poměr a úměrně klesá pravděpodobnost, že uživatel na přípojce bude mít k dispozici běžně dostupnou rychlost, kterou by mu podle smlouvy měl poskytovatel připojení zajistit.

Za posledních 11 let se poměrně výrazně změnil původní charakter provozu přípojek k síti internet. V současnosti výrazně stoupá objem dat stahovaných uživatelem na přípojce za měsíc a zároveň začíná převažovat např. stahování video obsahu,

¹ Rádiové systémy zejména v zapojení P-MP (*point-multipoint*), které jsou v ČR využívány pro zajištění přístupu k internetu zejména ve vnějším prostředí (na evropské poměry naprosto unikátních cca 31,7 % ze všech přípojek k internetu v ČR, tedy z cca 3,526 mil., ČTÚ 31. 12. 2018), pro komunikaci využívají většinou proprietární přístupové protokoly výrobců (Ubiquity, Cambium, MikroTik, aj.) nikoliv ale protokoly typu IEEE 802.11. Proto je nutné tyto systémy označovat nikoliv jako WiFi ale jako WAS - viz. např. rozhodnutí CEPT ECC/DEC/(04)08 Zařízení WLAN/RLAN a tedy i zmíněné WiFi spadají do kategorie zařízení dle čl. 56 a 57 Směrnice (EU)2018/1972 [5], nikoliv však systémy WAS obecně.

jehož poměr se z původních průměrných jednotek procent dostává až k současným téměř 70 % staženého objemu dat (viz. tabulka 1, pro ČR údaje pro západní Evropu).

region		Severní Amerika	Latinská Amerika	západní Evropa	střední a východní Evropa	střední a východní Afrika	Asie a Pacific	globálně
uživatelé [% populace]	2017	92,0	57,0	85,0	68,0	23,0	47,0	45,0
	2022	94,0	69,0	89,0	73,0	32,0	62,0	60,0
objem dat [GB/měs./uživ.]	2017	94,0	20,0	36,0	17,0	9,0	20,0	29,0
	2022	261,0	38,0	98,0	48,0	37,0	69,0	85,0
připoj. zařízení na osobu	2017	8,0	2,1	5,4	2,5	1,1	2,1	2,4
	2022	13,4	2,9	9,4	3,9	1,4	3,1	3,6
videa z objemu dat [%]	2017	75,0	68,0	69,0	60,0	64,0	68,0	70,0
	2022	79,0	82,0	78,0	77,0	81,0	82,0	80,0
pr. rychlost BB [Mbit/s]	2017	43,0	12,0	38,0	33,0	8,0	46,0	39,0
	2022	94,0	28,0	76,0	47,0	20,0	99,0	75,0
pr. rychlost WiFi [Mbit/s]	2017	37,0	9,0	25,0	19,5	6,0	27,0	24,0
	2022	84,0	17,0	50,0	33,0	11,0	63,0	54,0

Tabulka 1: Současnost a výhled hodnot vybraných ukazatelů internetového připojení ve světě, zdroj: CISCO VNI 2018

V případě stahování video obsahu a zejména v případě služeb typu IPTV jsou klade-ny zvýšené požadavky na spolehlivost zajištění deklarované běžně dostupné rychlosti a dále potom dalších kvalitativních parametrů (latence, jitter, ztrátovost paketů).

Při zmíněném jednoduchém orientačním výpočtu je pak nezbytné snižovat agre-gační poměr na hodnoty 3:1 nebo i 2:1. Přesto však již v současné době téměř nelze díky rychlému vývoji charakteru poskytovaných služeb a nároků na ně ani orientačně stanovit parametry přístupové sítě takto jednoduchým způsobem.

Jsou tedy hledány další metody, které by zajistily předběžný odhad parametrů přístupové sítě, jenž by vyhovoval současným podmínkám a byl využitelný obecně. V praxi jsou využívány různé metody méně či více přesného odhadu. V tomto příspěvku jsou uvedeny dvě poměrně jednoduché metody, které dávají výsledky postačující pro přibližné dimenzování či kontrolu sítě.

2. Metoda odhadu parametrů přístupové sítě 1

Metoda využívá pro předběžný odhad parametrů přístupové sítě výpočet založený na zpracování informací o počtu uživatelů (připojek) ve sdíleném segmentu sítě (AP), průměrném objemu stahovaných dat jedním uživatelem za jednotku času (např. GB/měs./uživ.) a garantované (požadované) běžně dostupné rychlosti připojení uživatele [3].

Cílem této metody je vhodně definovat konkrétní agregační funkci pro vyšetřovaný případ. Podle charakteru provozu generovaného uživatelem lze definovat agregační funkce pro datový provoz či provoz při stahování videa jak pro unicast, tak pro multicast. Pro vlastní definici agregační funkce je do jisté míry určující, a to i z pohledu přesnosti, rovněž kalibrace agregační křivky, kterou lze provést jednobodově i vícebodově.

Pro vysvětlení metody a zjednodušení použijeme konstrukci agregační funkce pro datový provoz s jednobodovou kalibrací agregační křivky. Hodnota C_T – koeficient nárůstu ustáleného toku [b/s/uživatel] – je výchozím údajem pro stanovení úrovně agregace ve zkoumané části sítě. Pro stanovení její hodnoty platí vztah:

$$C_T = \frac{Q_{T(N_S)}}{N_T \cdot N_S}, \quad (2)$$

kde N_S je počet uživatelů, N_T je časový úsek [s] a $Q_{T(N_S)}$ je průměrné množství přenesených (stažených) dat [B] počtem uživatelů N_S .

2.1 Příklad výpočtu

Sdílený segment sítě obsahuje 50 uživatelů, kteří za 30 dnů stáhnou průměrně 100 GB dat.

$$N_S = 50 \text{ [uživatelů]},$$

$$N_T = 30 \text{ [dnů]} = 30 \cdot 24 \cdot 3600 = 2,592 \cdot 10^6 \text{ [s]},$$

$$Q_{T(N_S, N_T)} = 100 \text{ GB} = 100 \cdot 8 \cdot 10^{24} = 8,58993 \cdot 10^{11} \text{ [b]}$$

$$Q_{T(N_S=1, N_T)} = 2 \text{ GB} = 2 \cdot 8 \cdot 10^{24} = 0,17179 \cdot 10^{11} \text{ [b]}$$

$$C_T = \frac{Q_{T(N_S)}}{N_T \cdot N_S} = \frac{100}{30 \cdot 50} = 6628 \text{ [b/s/uživatel]}, \quad (3)$$

tedy 6,628 [kb/s/uživatel] nebo 0,00663 [Mb/s/uživatel] (1 kB = 1024 B).

Na základě výše uvedeného příkladu lze tedy sestavit následující tabulku a graf pro závislost hodnoty koeficientu nárůstu ustáleného toku C_T na objemu stažených dat Q_T

Q_T (1 uživ./30 dnů) [GB]	Q_T (1 uživ./1 den) [MB]	C_T [kb/s/uživ.]	C_T [Mb/s/uživ.]
1	34,13	3,31	0,00331
2	68,27	6,63	0,00663
4	136,53	13,26	0,01326
7	238,93	23,20	0,02320
10	341,33	33,14	0,03314
12	409,60	39,77	0,03977
15	477,87	49,71	0,04971

17	580,27	56,34	0,05634
20	682,67	66,28	0,06628
40	1365,33	132,56	0,13256
70	2389,33	231,98	0,23198
100	3413,33	331,40	0,33140
125	3413,33	414,25	0,41425
165	5632,00	546,81	0,54681
170	5802,67	563,38	0,56338
225	7680,00	745,65	0,74565
300	10240,00	994,21	0,99421
400	13653,33	1325,61	1,32561

Tabulka 2: Závislost hodnoty C_T na objemu stažených dat Q_T

Pro stanovení míry závislosti požadované kapacity připojení H_N na počtu uživatelů N_S ve vyšetřované části přístupové sítě při požadované hodnotě běžně dostupné rychlosti připojení uživatele H_Z a při průměrném objemu stažených dat Q_T platí následující vztahy:

$$H_Z(N_S) \cong A^{-1}(N_S, H_Z) \cdot H_N(N_S, H_Z), \quad (4)$$

$$A(N_S, H_Z) = A_P(N_S) + A_S(N_S, H_Z), \quad (5)$$

$$A_P(N_S) = 1 + N_{S^{E1}} - N_{S^{E2}}, \quad (6)$$

$$A_S(N_S, H_Z) = C_T \cdot (N_S - 1), \quad (7)$$

kde A je agregační funkce, A_P je náhodná (špičková) část agregační funkce, A_S je statistická část agregační funkce, $E1$ exponenciální koeficient s hodnotou $+0,2$ a $E2$ je exponenciální koeficient s hodnotou $-0,6$.

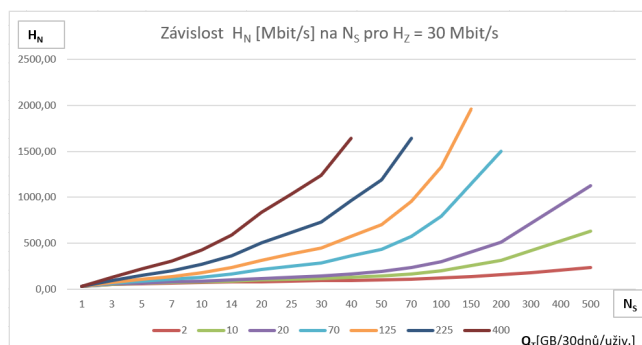
Prostřednictvím uvedených vztahů lze předběžně určit přibližnou míru závislosti požadované kapacity připojení H_N na počtu uživatelů N_S ve vyšetřované části sítě při průměrném objemu stažených dat Q_T , jak ukazuje tabulka 3 a graf 1.

N_S	A_P	A_S	A	H_Z [Mb/s]			
				6	15	30	100
				H_N [Mb/s]			
1	1,00	0,00	1,00	6,00	15,00	30,00	100,00
3	1,73	0,46	2,19	13,15	32,89	65,77	219,24
5	2,00	0,93	2,93	17,56	43,90	87,81	292,69
7	2,16	1,39	3,56	21,34	53,35	106,70	355,65
10	2,33	2,09	4,42	26,53	66,32	132,65	442,15
14	2,49	3,02	5,51	33,03	82,59	165,17	550,57
20	2,65	4,41	7,06	42,37	105,94	211,87	706,25
25	2,76	5,57	8,33	49,96	124,89	249,79	832,62
30	2,84	6,73	9,57	57,43	143,58	287,16	957,18

40	2,98	9,05	12,03	72,17	180,44	360,87	1 202,92
50	3,09	11,37	14,46	86,75	216,87	433,74	1 445,81
70	3,26	16,01	19,27	115,60	289,01	578,02	1 926,74
100	3,45	22,97	26,41	158,49	396,22	792,44	2 641,48
150	3,67	34,57	38,24	229,44	573,59	1 147,19	3 823,96
200	3,84	46,16	50,01	300,05	750,12	1 500,23	5 000,78
300	4,10	69,36	73,46	440,75	1 101,88	2 203,76	7 345,85
400	4,29	92,56	96,85	581,08	1 452,71	2 905,41	9 684,70
500	4,44	115,76	120,20	721,20	1 803,00	3 605,99	12 019,97
C_T [Mb/s/uživ.]							0,23198
Q_T [GB] (uživ./30dnů)							70

Tabulka 3: Závislost kapacity připojení H_N na počtu uživatelů N_S ; je sestavena jako příklad pro objem 70 GB stažených dat na uživatele za 30 dnů; viz údaje pro Evropu v tabulce 1, cca 70 % video obsahu z celkového objemu dat

Graf 1 ukazuje průběhy agregačních křivek pro několik hodnot parametru Q_T při omezení kapacity přípojné sítě či A_p do reálných 2000 Mbit/s.



Graf 1: Průběhy agregačních křivek pro vybrané hodnoty parametru Q_T

3. Metoda odhadu parametrů přístupové sítě 2

Metoda využívá výpočet založený na využití „Kritéria pro rozšíření kapacity“ přístupové části sítě AP. Východiskem je definice „uživatelského prožitku“ (*user experience*), kdy vlastní kritérium je formulováno s využitím výpočetní metody, kterou popsal dánský matematik Agner Krarup Erlang (1878–1929) již v roce 1917 a označovanou jako „rovnice Erlang – B“ (další jeho známé rovnice Erlang – C, rozšířená Erlang – B). Metoda byla původně navržena pro oblast hlasové služby a vychází z aplikace Poissonova rozdělení [4].

Poznámka: V textu je použita zkratka *UE* (*user equipment*) – uživatelské zařízení, případně ve tvaru množného čísla jako *UEs*.

Kritérium pro rozšíření kapacity založené na uživatelském prožitku lze popsat následujícím způsobem:

- *UEs* přistupují do sítě ke službám náhodně a nezávisle se stejnou pravděpodobností,
- pravděpodobnost, že k *UEs* využívá službu ve stejný čas, vyhovuje Poissonovu rozdělení:

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad k=0, 1, \dots; \quad (8)$$

- plně zatížená buňka (AP) má přenosovou rychlost Y [Mbit/s]. Míra uživatelského prožitku klesá s rostoucím počtem *UEs*,
- aby bylo možné zajistit, že míra uživatelského prožitku (vyjádřeno rychlostí) nebude nižší než X [Mbit/s] nesmí být počet *UEs* současně přenášejících data větší než Z :

$$Z = \frac{Y}{X}; \quad (9)$$

- aby bylo možno zajistit, že spokojenost uživatele má hodnotu větší než 90 %, (platí $P(k \leq Z) \geq 90 \%$), použije se k výpočtu mezní hodnoty pro rozšíření kapacity *prahová hodnota průměrného počtu λ *UEs* současně přenášejících data*, která je získána podle Poissonova vztahu:

$$P(k \leq Z) = P(k=0) + \dots + P(k=Z) = \sum_{k=0}^Z \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \geq 90 \%. \quad (10)$$

Cílem výpočtů podle této metody je nalézt tzv. „Mezní hodnotu pro rozšíření kapacity“, kterou se rozumí mezní hodnota průměrného počtu *UEs* připojených na AP, registrovaných v síti a připravených přenášet data. V terminologii sítí LTE (WTTx) se jedná o provozní mód *UE RRC_CONNECTED* (*RRC – radio resource control*).

3.1 Výpočet „Mezní hodnoty (kritéria) pro rozšíření kapacity“ založený na uživatelském prožitku

Základní parametry, na nichž je výpočet postaven.

- *garantovaná BDR pro uživatele X [Mbit/s]*, může vycházet z požadavků daných poskytovanou službou anebo z požadavků a pravidel stanovených operátorem;
- *přenosová rychlost plně zatížené buňky Y [Mbit/s]* je přenosová rychlost, kterou může AP, či přípojná linka zajistit a je určována použitou technologií;
- *maximální počet *UEs* současně přenášejících data Z* , pokud počet *UEs* současně přenášejících data přesáhne hodnotu Z a rychlost přenosu na jedno *UE* je nižší než X , potom uživatelský prožitek nesplní předem definované požadavky (9);
- *míra spokojenosti uživatele P [%]* odpovídá procentu *UEs*, u kterých je dosažena míra uživatelského prožitku X [Mbit/s] a více během měřící periody. Doporuču-

je se nastavit mezní hodnotu míry spokojenosti uživatele na hodnotu 90 % nebo 95 %. Mezní hodnota míry spokojenosti uživatele může být nastavena na základě požadavků vyplývajících rozdělení hustoty osídlení (regionální požadavky) anebo podle požadavků vyplývajících ze scénáře konkrétního projektového záměru. Například hodnota P může být nastavena na 95 % pro městskou oblast a 90 % pro vesnické území. Obdobný parametr je užíván z pohledu stability připojení, kdy je definováno, že míra dosažitelnosti konkrétní hodnoty BDR musí být alespoň 90 % času době špičky (17:00–23:00 hod), nebo 95 % v průběhu celého dne;

- poměr vytížení UEs R [%], (UEs duty rate), hodnota je dána poměrem $R = \text{Počet UEs přenášejících data} / \text{Průměrný počet UEs}$ v módu RRC_CONNECTED, a to v časovém intervalu.

Výpočtem s využitím předchozích zásadních parametrů je pak získána:

- prahová hodnota průměrného počtu UEs současně přenášejících data Q , je střední hodnotou Q Poissonova rozdělení (ve vztahu (10) označená jako λ – práh pro rozšíření kapacity) získanou, pokud pravděpodobnost, že uživatelský prožitek je roven nebo větší než X [Mbit/s] (tedy počet UEs současně přenášejících data je menší než anebo roven Z), je rovna anebo větší než P [%]:

$$P(k \leq Z) = P(k=0) + \dots + P(k=Z) = \sum_{k=0}^Z \frac{Q^k}{k!} e^{-Q} \geq 90 \% . \quad (11)$$

3.2 Příklad výpočtu mezní hodnoty pro rozšíření kapacity

Základní parametry, na nichž je příklad výpočtu postaven.

Kapacita plně zatížené buňky $Y = 30$ Mbit/s,

Garantovaná BDR pro uživatele $X = 5$ Mbit/s,

Míra spokojenosti uživatele $P = 90$ %,

Poměr vytížení UE $R = 15$ %.

Předcházející položky a následující rovnice jsou použity pro výpočet prahové hodnoty průměrného počtu UEs aktuálně zajišťujících přenos dat Q :

$$P \leq \sum_{k=0}^Z \frac{Q^k}{k!} e^{-Q} [\%], \quad (12)$$

$$90 \leq \sum_{k=0}^{\frac{30}{5}=6} \frac{Q^k}{k!} e^{-Q} [\%]. \quad (13)$$

Výpočet:

- nástroj Microsoft Excel,
- funkce POISSON anebo POISSON.DIST (k , střední, kumulativní),
- postup výpočtu:

- argument k udává maximální počet UEs současně přenášejících data; je to známá vstupní hodnota,
- argument *kumulativní* je nastaven na hodnotu PRAVDA,
- argument *střední* je hledaná hodnota Q ,
- exhaustní metodou s využitím nástroje MS Excel je vypočítána hodnota Q pro případ, kdy výsledek výpočtu podle funkce POISSON(k , Q , PRAVDA) je větší nebo roven 90 %.

Výsledky výpočtu a hodnocení: $Q = 3,89$.

Potom: „Mezní hodnota průměrného počtu UEs v módu RRC_CONNECTED“ = $Q/R = 3,89/15\% = 25,9 \approx 26$.

Aby tedy bylo možno zajistit, že míra uživatelského prožitku bude rovna nebo větší než 5 Mbit/s pro 90 % a více UEs během měřicí periody (nebo po 90 % definovaného času), je nutno navýšit kapacitu buňky, pokud mezní hodnota průměrného počtu UEs v módu RRC_CONNECTED, tedy *mezní hodnota pro rozšíření kapacity*, překročí hodnotu 26.

Vypočítaná mezní hodnota je tak využita ke stanovení, zda je nezbytné navýšit kapacitu v rámci doposud funkční sítě.

Z údajů získaných z praktického provozu sítí a s využitím detailů a postupů uvedených v rámci popisu metody je možno sestavit tabulku 4.

Y [Mbit/s]	X [Mbit/s]	Z	střední hodnota Q	R [%]	mezní hodnota pro rozšíření kapacity [uživ.]	poznámka
14	4	3,50	1,74	13	14	
30	5	6,00	3,89	15	26	běžný provoz v síti LTE
155	15	10,33	7,02	29	24	přípoj. kapacita pro WAS AP
30	5	6,00	3,89	30	13	video v síti LTE
88	15	5,87	3,15	35	9	WAS AP sektor

Tabulka 4: Odhad mezních hodnot pro rozšíření kapacity

4. Závěr

Jedním z problémů, který dříve anebo později musí operátor jako poskytovatel připojení k internetu řešit, je návrh správného dimenzování přenosových kapacit sítě spojený s optimální návazností jejich částí, a to od páteřní sítě přes přístupovou část sítě až po rozhraní vlastního uživatele.

Výsledky získané využitím některé z metod odhadu parametrů jsou obvykle využívány pro řešení několika základních úloh:

- *návrh architektury zcela nově budované sítě*, v tomto případě jsou do výpočtu vkládány údaje o geografickém rozložení budoucích uživatelů, jejich nárocích

na BDR připojení či o dedikované BDR připojení a zároveň je využívána i znalost požadavků na poskytování konkrétních služeb realizovaných prostřednictvím sítě internetu. Zásadní je pro návrh i znalost (odhad) postupného vývoje jednotlivých parametrů a prognóza požadavků v budoucím čase;

- *odhad optimálního rozložení nezbytných rozšíření kapacit stávající sítě v čase*, v tomto případě jsou již známé údaje získané měřením v již funkční síti vkládány do výpočtu a podle konkrétního chování uživatelů (objemy dat, typy využívaných služeb atd.), podle úrovně znalostí všeobecných souvislostí a podle celkového vývoje v sektoru elektronických komunikací jsou pomocí metod odhadu definovány optimální etapy rozšiřování kapacit sítě rozdělené v čase. Tímto způsobem lze nastavit příznivé podmínky pro strukturu střednědobých obchodních plánů;
- *prověření realizovatelnosti nabízeného projektu*, s využitím metod odhadu lze poměrně jednoduše ověřit, zda nabízený projekt je i za stávajících podmínek (hodnoty vstupních parametrů) realizovatelný a zda splňuje požadavky, které jsou na něj kladeny budoucím operátorem anebo např. poskytovatelem dotačních prostředků. Nicméně budoucí operátor musí při přípravě či volbě projektu respektovat mimo jiné i kritérium udržitelnosti klíčových parametrů. Proto po realizaci projektu může většinou v jistých časových intervalech probíhat objektivní kontrola stanovených parametrů sítě či koncového připojení uživatele měřením. Kromě toho stejně jako v předchozím případě zpravidla probíhají práce na přípravě rozšíření sítě v závislosti na vývoji poptávky trhu po službách a v závislosti na vývoji jednotlivých parametrů sítě, které jsou průběžně a postupně operátorem získávány měřením na síti.

5. Zkratky a pojmy

Operátor – podle návrhu technické novely ZEK §2 písm. e) „podnikatel, který zajišťuje nebo je oprávněn zajišťovat veřejnou komunikační síť nebo přiřazené prostředky“, tedy pro okruh problematiky řešené v příspěvku rovněž i provozovatel sítě, poskytovatel připojení, ISP, atd.

Uživatel – podle návrhu technické novely ZEK §2 písm. b) „každý, kdo využívá nebo žádá veřejně dostupnou službu elektronických komunikací“, tedy pro okruh problematiky řešené v příspěvku jsou takto pokrývány i pojmy jako koncový uživatel, spotřebitel či původně účastník.

Sít s velmi vysokou kapacitou – podle návrhu technické novely ZEK §2a písm. a) „sít elektronických komunikací, která zcela sestává z optických prvků přinejmenším do rozvodného bodu v obslužném místě, nebo síť elektronických komunikací, která je schopna za obvyklých podmínek v době špičky dosahovat podobné výkonnosti, pokud jde o dostupnou přenosovou rychlost pro stahování a vkládání dat, odolnost, parametry související s chybovostí a latencí a její kolísání. Výkonnost sítě lze považovat

za podobnou bez ohledu na to, zda se vnímání ze strany koncového uživatele liší kvůli odlišným vlastnostem vyplývajícím z podstaty média, kterým je síť nakonec spojena s koncovým bodem sítě.

Vysokorychlostní připojení k internetu – podle návrhu technické novely ZEK §2a písm. x) „připojení s parametry jejichž dodržení umožňují síť s velmi vysokou kapacitou“.

Exhaustní metoda – způsob užívaný k výpočtu velikostí geometrických útvarů před objevením integrálního počtu. Tvůrcem exhaustní metody byl řecký matematik Eudoxos (asi 408–356 př. n. l.); užil ji Archimédes při výpočtu obsahu ploch, například při výpočtu obsahu kruhu a parabolické úseče.

AP	Access Point, přístupový bod
BDR	běžně dostupná rychlost
BEREC	Body of European Regulators for Electronic Communications
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
IPTV	Internet protocol TV
ISP	Internet Service Provider
LTE	Long Term Evolution
NGA	New Generation Access
RLAN	Radio Local Area Network
UE	User Equipment, uživatelské zařízení
VHCN	Very High Capacity Network
WAS	Wireless Access System
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WTTx	Wireless to the X

Tabulka 5: Zkratky

6. Zdroje

- [1] Národní plán rozvoje sítí nové generace z 5. října 2016.
- [2] Pokyny BEREC BoR (16)127, ze srpna 2016.
- [3] Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací, (Metodický postup), ČTÚ 21/12/2016, verze 1.1.1.
- [4] WTTx Capacity White Paper, Huawei, 18.3.2016, 1. vydání.
- [5] Směrnice (EU) 2018/1972, Evropský kodex pro elektronické komunikace, z 11. prosince 2018.

Kmitočtová pásma 3,5 GHz a 60 GHz a vysokorychlostní internet

Ing. Vladimír Petržílka

Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR

Berte prosím tento pohled na věc jako privátní stanovisko autora, nikoli jako oficiální vyjádření MPO, byť autor je úředníkem tohoto úřadu státní správy.

Po éře 2,4 a 5 GHz P-P (*point to point*) i P-MP (*point to multipoint*) bezdrátových linek si někteří provozovatelé této infrastruktury konečně uvědomili, že tudy cesta ke spolehlivému vysokorychlostnímu připojení zákazníků zřejmě nepovede. Stačí si spočítat maximální přenosovou rychlost, vydělit poměrem download/upload, odečíst ztrátovost paketů, vyvolanou rušením a připravit si kalkulačku, pro kolik jednotek procent zákazníků takové zařízení to spolehlivé vysokorychlostní připojení lze zajistit. Samozřejmě, někteří ISP se takovým přemýšlením ku vlastní škodě nezabývají. Další „volné pásmo“ 10 GHz je z hlediska rušení ve městech víceméně stejné a pokud ne dnes, tak jistě nejspíše za pár týdnů a před alespoň občasným kolapsem z přetížení vlivem velké chybovosti jsou P-P linky chráněny jen směrovou anténou, a to všechno proto, že toto pásmo je přístupné všem.

Pro spolehlivé připojení je nutno se poohlédnout po jiných kmitočtech, kde má bezdrátová komunikace nějakou ochranu a ta sdílená pásma nechat k využití těm, kterým na nějakém tom výpadku nezáleží. V poslední době se v ČR nabízí dvě možnosti – pásma 3,7 a 60/80 GHz.

1. Pásmo 3,7 GHz

Kmitočtové pásmo v rozsahu 3,4–3,8 GHz je především v Evropě identifikováno a harmonizováno (např. prováděcí rozhodnutí Komise 2014/276) jako jedno z prioritních pásem pro splnění akčního plánu 5G MFCN (*mobile and fixed communication networks*) do roku 2020 – Směrnice (EU) 2018/1972 „Kodex“. V ČR stanovuje podmínky pro využití tohoto kmitočtového pásma PVRS-7. V polovině roku 2017 skončila v ČR aukční fáze výběrového řízení na udělení práv k využívání rádiových kmitočtů v pásmu 3 600–3 800 MHz (pásmo 3,7 GHz) pro vysokorychlostní datové sítě. Kmitočtové přiděly o šířce 40 MHz získaly celkem čtyři podnikatelské subjekty. Jde o poměrně nízký kmitočet, který tedy má schopnost dobře pokrýt obsluhované území i mimo optickou viditelnost. Šířená elektromagnetická energie se dobře odráží a láme na překážkách a datový přenos je schopen částečně projít i přes vegetaci a zdivo. Tato výhoda šíření je však zároveň nevýhodou – k vzájemnému rušení jednotlivých stanic může docházet i na větší vzdálenost podobně, jako to známe u sítí mobilních telefonů na nižších kmitočtech. Další nevýhodou jsou poměrně úzké kmitočtové kanály (20 MHz). To v reálném životě vede k overbookingu, tedy „přetečení“ požadavků na přenosovou kapacitu u takového úzkého hrdla, a tedy k situaci, kterou operátoři důvěrně znají z pásem 5 a 10 GHz. Smutné ovšem je, že operátoři zatím k využití tohoto pásma přistupují

podobně, jako to známe z RLAN/WLAN (lidově WiFi) aplikací. Přirozeně, využití přiděleného (koupeného, vydraženého) kmitočtového přídělu lze pro účely pevného datového připojení P-MP trochu „nafouknout“ použitím systému vícenásobného MIMO. Teoreticky je tak možno v přenosovém kanálu 20 MHz přenést např. až 400 Mbit/s¹ datového toku (v praxi to bude trochu méně, ale berme to tak). Při konfiguraci „optická přípojna síť k základnové stanici 3,7 GHz, umístěné na vhodném místě nad menším městem“ operátoři zastávají názor, že s uvedenou kapacitou lze zajistit spolehlivou konektivitu „až do 100 Mbit/s“ pro více jak 100 zákazníků a v současné době se na start tohoto úžasného businessu připravují. Horší je, pokud se domnívali, že s touto konektivitou lze zajistit provoz i lokálních RLAN/WLAN buňkových sítí a zajistit tak vysokorychlostní připojení pro další desítky, nebo dokonce stovky zákazníků. Jenže takhle ta naše standardní (nikoli kvantová) fyzika zkrátka nefunguje.

Navýšení přenosové kapacity nad uvedených (trochu nereálně dobrých 400 Mbit/s) je ale samozřejmě možné extenzivně – použitím druhého 20 MHz kanálu, případně ještě lépe jejich spojením do jednoho 40 MHz kmitočtového segmentu.

Jenže:

Radiové kanály v tomto pásmu jsou totiž využívány především v režimu TDM, nikoli FDM, jak tomu bylo v rámci dřívějšího využití kmitočtového segmentu 3,4–3,6 GHz systémy WIMAX. A to znamená, že z proklamované datové kapacity musíme „ukrojit“ část pro komunikaci ve zpětném směru a protože datový provoz od jednotlivých zákazníků není synchronní, musíme ho synchronizovat – což opět ukrojí pár těch Mbit/s. Ale buďme velkorysí a řekněme si, že přenosový systém je řízen tak chytře, že stále ještě bude mít v dopředném směru 300 a ve zpětném téměř 100 Mbit/s, protože je obecně známo, že nesymetrie provozu v dopředném a zpětném směru je v praxi větší (1 : 4 až 1 : 6), než požadovaných 1 : 3, zbyde ještě pár těch kb/s na řízení provozu.

Kolik zákazníků takový systém obslouží? Vráťím se k tomu níže.

Ale co tam, kde přenosová kapacita ani takového bezdrátového systému nestačí? Nabízí se útek do oblasti skutečně mikrovlnných kmitočtů – tedy pásem, u kterých je délka vlny kratší než 1 cm (30 GHz).

2. Pásmo 60 GHz

V rámci mezinárodní harmonizace kmitočtů v EU mohou být pro mikrovlnné systémy P-MP použity kanály v pásmu 60 GHz (57–66 GHz) ovšem s omezením, že se nesmí jednat o stálé venkovní instalace. Jenže ten spodní segment (cca do 59 GHz) je již vyhrazen pro placené profesionální instalace (na základě IO, například propojení kamer úsekového měření rychlosti), takže pro reálné využití zůstávají zatím 3 sdělovací kanály o šířce 2 GHz. V návaznosti na vývoj evropské harmonizace rádiových kmitočtů, např. Prováděcí rozhodnutí (EU)2019/1345 kterým se mění roz-

¹ <http://www.protext.cz/zprava.php?id=25249>

hodnutí 2006/771/ES o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého dosahu, je i v ČR připravována úprava podmínek pro využití pásma 60 GHz, umožňující venkovní provoz zařízení typu WiGig, MGWS, FWA (EN302567) spolu se systémy typu bod-bod (označované jako FLANE, EN302217).

Pokud vezmeme v úvahu nějaká ochranná pásma na okraji spektra, je to přes 6 GHz pásma (!). Zdálo by se tedy, že problém s přenosovou kapacitou je vyřešen. Podle Shannon-Hartley teoremu (naše generace jej zná spíše jako Kotelnikovův teorém) se v pásmu o šířce 2 GHz (jeden ze 3 kanálů) dá přenést až 20 Gbit/s použitím vyšších modulačních řádů a MIMO antén. Jenže – fyzika se ohnout nedá: dosažení těmto snových hodnot brání odstup signál/šum. Pásmo 60 GHz je umístěno v maximu útlumu šíření v atmosféře (vlivem vodní páry – ty grafy útlumu jistě znáte) a v praxi tedy nastává problém se zajištěním odstupu S/N. Jinak řečeno: na jakou vzdálenost lze takové mikrovlnné pojítko použít a jaký výkon (vyzářený) má jeho vysílač a jaké šumové číslo přijímač. A aby toho nebylo málo, šumí (a má nějaký jitter) i vlastní přenosová cesta, protože vygenerovat na takovém pásmu signál se zanedbatelným postranním (fázovým) šumem je doslova konstruktérský oříšek. Totéž se týká vyšších stupňů modulace. Použití QAM64, či dokonce QAM256 a vyšší jde z uvedených důvodů fázového šumu a linearity vysílače proti sobě. K dalším omezením se navíc přidává regulátor úrovně vyzařovaného výkonu. Takže se dá očekávat, že v současnosti lze u této technologie počítat u levnějších pojítek s reálnou přenosovou rychlostí cca 1 Gbit/s a pravděpodobně během následujících několika let (2025?) dojde k jejímu zdvojnásobení. Výsledkem bude mj. omezení dosahu takového bezdrátového přenosu – u AP P-MP se dá očekávat dosah do 200 m, u přenosu P-P potom okolo 500 m. Představy ISP techniků o použití této technologie k zajištění spolehlivého a kvalitního spojení až na 1,5 km i více jsou ve sféře snů (dokud bude mít Země atmosféru).

Co z toho plyne?

V případě použití pásma 60 GHz jde o perspektivní bezdrátovou infrastrukturu, která má sice nevýhodu v omezeném dosahu, ale naopak velkou výhodu v tom, že díky vysokému útlumu šíření lze provozní kmitočty opakovat, aniž by v rámci typické zástavby došlo ke vzájemnému rušení, které dnes zcela zahltilo pásmo 5 GHz. P-MP přístupové body (AP) tak mohou být od sebe vzdáleny i jen 1–2 km (na stejném kmitočtu).

A protože dnes rezidenční zákazníci nevyžadují navýšení rychlosti připojení nad 100 Mbit/s (ale v dalších letech budou), lze jedním takovým AP obsluhovat několik zákazníků o uvedené rychlosti připojení (a splnit tím třeba základní technologická kritéria pro možnost získání dotační podpory).

Jenže, kolik takových 100 Mbit/s zákazníků lze vlastně jedním 60 GHz AP obsloužit? A jak ho připojit do datové sítě?

V současné době jsou běžně na trhu 60 GHz pojitka s přenosovou kapacitou 1 Gbit/s (GbE) v provozním režimu half duplex. Toto pojitko lze SW upgradovat na full Gbit/s duplex. Podívejme se na potřeby zákazníka.

Dokumenty EU chtějí na ČR, aby do roku 2025 zajistila pro všechny obyvatele přístup k připojení k internetu o rychlosti 100 Mbit/s s možným navýšením až na 1 Gbit/s (dokument 2018/C 307/23).²

Ačkoli s tím požadavkem zvýšení přístupové rychlosti až na 1 Gbit/s to pro rezidenční uživatele asi nebude v nejbližších letech tak žhavé, je nepopíratelné, že během několika málo let se stane 100 Mbit/s připojení k internetu standardem. A všechny nové i upgradované sítě budou muset tomuto požadavku vyhovovat, pokud se chtějí udržet na trhu. Zatímco v ostatních zemích EU provozovatelé vsadili na masivní výstavbu optických sítí, nízká koupěschopnost obyvatel ČR a relativně roztržštěné osídlení, s mnoha malými městy a vesnicemi (a neregulované ceny věcných břemen), vedly v ČR provozovatele připojení k masivní výstavbě bezdrátových RLAN/WLAN sítí. Těch je dnes již tolik, že vzájemná konkurence je dovedla k tak nízkým cenám, že nejsou schopni dalších zásadních inovací a navíc se vzájemně ruší a tím dále degradují své služby (na jednu základní sídelní jednotku dnes v průměru připadá cca 2,8 provozovatelů bezdrátových RLAN/WLAN sítí a průměrná rychlost připojení se dnes pohybuje těsně nad hranicí 15 Mbit/s). Taková situace je dlouhodobě neudržitelná. A právě inovační skok do pásem 3,7 a 60 GHz s tím jednotlivým ISP operátorům umožňuje něco dělat. Proto je zcela na místě položit výše uvedenou otázku: kolik takových 100 Mbit/s zákazníků taková inovovaná síť vlastně unese?

Dobrá otázka, složitá odpověď. Ten problém se jmenuje agregace – jinak řečeno, kolik prostoru v přenosové kapacitě přístupové sítě je nutno rezervovat pro jednoho průměrného zákazníka, aby jeho provoz neúměrně neomezoval další zákazníky?

Problém nalezení exaktní odpovědi je spíše společensko-psychologický než provozně technický. Nicméně jedna věc je evidentní: Na robustních datových sítích (FTTH, FTTB a CATV), kde provozovatelé nenabízejí zákazníkům pomalejší konektivitu, než 100 Mbit/s, a zákazníci mají s takovou službou připojení k internetu minimálně roční zkušenosti, začal vysoký růst objemu stažených dat za časovou jednotku – přístupová síť je tak mnohem více zatížena než v minulosti.

Souvisí to s tím, že každý zákazník se nějakou dobu učí využívat služby, související s vysokorychlostním připojením. I po 18 měsících jeho objem stažených dat stále ještě měsíc za měsícem roste, ale již to není tak výrazné, jako na začátku. Obvykle má tempo nárůstu objemu datového přenosu tvar S-křivky. Rezidenční zákazníci na síti s trvalou přístupovou rychlostí 100 Mbps a více obvykle měsíčně stahují balík dat uvedený na přehledu dále. Při objemu (download) 400 GB měsíčně to představuje

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/cs/txt/pdf/?uri=CELEX:52017IP0234&qid=1560423544868&from=CS>

průměrnou ustálenou rychlost cca 1,25 Mbps na jednoho zákazníka. To přenese každá síť. Ovšem stahování dat u zákazníka není v čase ustálené.

Pokud chceme odhadnout, jak máme dimenzovat síť, potřebujeme vědět, jaká je průměrná rychlost na jednoho zákazníka v období špičky. Ta se v ČR pohybuje mezi 18 a 23 hodinou všedního dne.

Z monitorování provozu několika sítí, která všem zákazníkům poskytuje připojení 100 Mbps a více vyplývá, že pokud je na takové přípojce zároveň dostupná služba lineární digitální HDTV služby, průměrný zákazník v tomto období stahuje data rychlostí téměř 40 Mbps! Průměrná rychlost se v době špičky tedy navýší cca 30×!

Požadavky na růst přenosové kapacity se navíc nezastaví. Předpoklad růstu (podle srovnání s ostatními vyspělými státy) je cca 26 % ročně (podle Cisco). To by teoreticky odpovídalo tomu, že množství stažených dat se do konce roku 2022 téměř ztrojnásobí. V predikci Cisco jsou uvedeny i mobilní data (s průměrným růstem 46 % ročně) ovšem jsou započtena zvláště a výše uvedená hodnota růstu (26 %) odpovídá pevnému připojení. Je však také faktem, že tento trend vychází z nižšího odhadu současného průměrného objemu stažených dat na zákazníka a měsíc (26 GB), než je uvedeno výše u zákazníků na 100 Mbps přípojkách (cca 100 GB u zákazníků na sítích CATV a 400 GB na sítích FTTH). Lze tedy předpokládat, že růst bude nižší. Tahounem bude IPTV (HDTV) a cloudová řešení.

Budme však konzervativní a předpokládejme, že takový růst bude v ČR „jen“ cca 20 % (průměrný růst na síti UPC v dopředném směru za 2 roky je za poslední 2 roky ale přes 40 %). To by ovšem znamenalo, že musíme počítat s tím, že v době špičky bude průměrná rychlost na zákazníka, kterou musí být síť schopna spolehlivě přenést, cca 46 Mbps. Tomu musí odpovídat propustnost sítě! A to nejen na úseku poslední míle, ale i, a to zejména, distribuční a přípojné sítě (konektivita do páteří optické sítě). Jenže, jak známo, ďábel se skrývá v detailech a matematická statistika je mrcha. Čím menší bude vzorek domácností s vysokorychlostním připojením, tím větší budou statistické odchylky od průměrné rychlosti, které zákazník stahuje v době špičkového provozu! Pokud je v obci více mladých lidí ve věku 12–20 let, s tím větší kapacitní rezervou síť bude muset provozovatel sítě počítat a investor zaplatit! Výsledkem je, že si během následujících 5–7 let prakticky nelze představit (s výjimkou u zcela malých obcí do cca 50 trvale osídlených domácností), že by pro internetové připojení ještě mohla být použita jiná, než optická konektivita! I když opak dnes některé společnosti svým zákazníkům přímo „vnucují“.

Ovšem šedá je každá teorie a zelený strom života. Ruku v ruce s vyššími požadavky na využívání komerčních služeb u zákazníka rovněž pokročily metody kódování a přenosových ochranných TV přenosu v IPTV kanálu. Vždyť jen pokročilejší způsoby kódování, např. HEVC dokáží snížit bitrate u HDTV na úroveň okolo 5 Mbit/s, takže se dá odhadnout komunikační potřeba jedné domácnosti na cca 15 Mbit/s (2× TV plus ostatní traffic). Připravte se tedy prosím na to, že jeden 60 GHz P-MP AP účastnické sítě bude

schopen obsloužit jen cca 30 až 35 residenčních zákazníků, a pokud bude AP využívat všechny tři 60 GHz kanály, které jsou k dispozici, bude to cca 100 domácností. Jenže takovou přenosovou kapacitu 2 Gbit/s vám zajistí jen optický kabel, nebo 80 GHz P-P pojítka. Možná, že však se u nás přece jen bude postavena vysokokapacitní mobilní datová síť 5G a celkové požadavky na využívání datových přípojek v dedikovaných RLAN/WLAN sítích se tak částečně sníží.

Samozřejmě bude záležet na technickém vývoji v dalších letech a jak jsem již uvedl, přenosová kapacita mikrovlnných technologií se v průběhu dalších 5 let může zhruba zdvojnásobit díky vyšším modulacím. A jak známo, v oblasti počítačové technologie je technicko-ekonomická doba života právě těch cca 5–6 let. Takže zbývá si spočítat, zda si za těch 5 let na další inovační krok takový lokální provozovatel vydělá a podle toho si vybrat vhodný technický a investiční model. Tím nechci říci, že 80 GHz P-P mikrovlnné linky jsou neperspektivní – jen si musí investor uvědomit, zda výstavba přístupové sítě s 80 GHz P-P linkami (zvláště pokud by jich muselo být více vedle sebe) bude ještě levnější než tam použít optické kabelové připojení. Pro malé obce jistě, ale bude to platit i pro obce o počtu obyvatel 1000 a více, kde je silná konkurence?

Co se ale nezmění: dosah mikrovlnné technologie v pásmu 60 GHz (u P-MP) stále bude jen okolo 200 m. A pokud snad zvažujete také výnosy za pronájem vysokokapacitní datové sítě pro provozovatele mobilní datové sítě 5G, zapomeňte na ně, nemáte-li v zájmové oblasti optickou síť. Požadovaná budou zejména nenasvícená vlákna, neboť 10 Gbps konektivita pro každou základnovou stanici 5G bude spíše standardem než výjimkou.

Zapamatujte si:

- bezdrátové připojení k internetu se již nebude za několik let odehrávat v pásmu 10 a 5 GHz, ale spíše 80 a 60 GHz,
- 100 Mbit/s připojení domácnosti bude standardem, ne výjimkou,
- zapomeňte na míru agregace 1:4. Ta v době provozu HDTV IPTV a dalších moderních IP služeb zvyšujících potřebu průměrného objemu stažených dat v GB za měsíc na účastníka jistě stačit nebude; maximální možnou agregaci bude nutné řídit lokálně podle chování reálných zákazníků;
- provozovatel bude muset ručit za spolehlivost připojení zákazníka (rychlost, latence, atd), protože parametry provozu a s tím související chybovost by mohly výrazně negativně ovlivnit propustnost sítě a mít negativní vliv na schopnost bezchybného přenosu HDTV a cloudových aplikací;
- výnosy od zákazníků výrazně neporostou, naopak přijde konkurence 5G mobilních dat,
- bude to tvrdý business, ne všechny ISP firmy přežijí a jistě dojde k další konsolidaci trhu.

3. Závěrem

Upgrade současných bezdrátových sítí přístupu k internetu na bázi technologie RLAN/WLAN je proces možný a žádoucí. (Naopak pouhé udržování dosavadních bezdrátových sítí v 5 GHz a 10 GHz pásmu je cestou do slepé uličky.) Je však nezbytné si uvědomit velikost obce a počet případných zákazníků v zájmové oblasti. Ne vždy je to investičně nejlevnější řešení současně nejsprávnější z hlediska udržitelnosti podnikání. Provozovatelé často zapomínají na fakt, že údržba optických sítí je z hlediska provozních nákladů výhodnější než údržba bezdrátové technologie. Při této změně pohledu dnešních provozovatelů sítí se dá očekávat masivní rozvoj infrastruktury typu FTTH a v případě individuální zástavby (obce) zajištění optické konektivity do obce, distribuční síť v pásmu 80 GHz a poslední míle s využitím 60 GHz technologie. 100 Mbit/s připojení do domácnosti se stane standardem a v jednotlivých případech umožní i další navyšování.

Otázka na rozloučenou tedy nezní, jakou cestou se vydat, ale především kdo to zaplatí. Samozřejmě to musí být zákazníci. Ale těžko z nich poskytovatel služby dostane více, jak 450 Kč měsíčně (vč. DPH) za 100 Mbit/s připojení (v hodnotě současné kupní síly). Poskytování služby bezdrátového vysokorychlostního připojení k internetu tedy již zřejmě nebude mít charakter slepice, která snáší zlatá vejce (jak tomu bylo více, než 10 let), ale spíše jen „business as usual“.

Jaké objemy dat (downlink/uplink) se dají očekávat v datové síti připojení k internetu s Běžně dostupnou rychlostí (BDR) 100 Mbit/s?

připojení	data [GB/měsíc/zákazník]			poznámka
	2016	2017	2018	
UPC	71/15	85/21	98/24	bez lineární TV, ale včetně nelineární TV
CATV + FTTH			102/34	bez lineární TV, ale včetně nelineární TV
pouze FTTH			403/101	včetně TV (všechna TV, lineární i nelineární)

Tabulka 1: Průměrná data po 3 letech provozu přípojek 100+ Mbit/s

Oproti těmto výsledkům se dnes obvykle stažený objem dat na bezdrátové síti s deklarovanou rychlostí 30 Mbit/s pohybuje jen do 30 GB. Je tedy nutné počítat s tím, že na nové síti, kde bude mít každý zákazník 100 Mbit/s přístupovou rychlost, objem dat výrazně poroste a to min. na hodnoty uvedené výše. Tím se zároveň vracím k výše otevřené otázce, kolika zákazníkům je schopen provozovatel sítě v pásmu 3,7 GHz (který provozuje přístupovou síť pro služby připojení k internetu v pevném místě) zajistit spolehlivé připojení k internetu s rychlostí 100 Mbit/s. Pokud bude mít kmitočtový přiděl 40 MHz pásma, potom tento počet zřejmě příliš nepřesáhne počet 40 zákazníků. A to na větší obec, či menší město asi stačit nebude. Provozovatelé těchto sítí si to samozřejmě uvědomují a intenzívně se snaží získat další kmitočtové přiděly v pásmu 3,4–3,6 GHz, které jsou mezinárodně zamýšleny pro mobilní datovou síť 5G (nikoli primárně pro přístup k internetu v pevném místě). Rozhodnutí bude na ČTÚ.

Moderní radarové systémy 3D a UWB

Ing. Pavel Šedivý

Retia, a. s.

Radar, tehdy ovšem ještě nazývaný telemobiloskop, vynalezl v roce 1904 Christian Hülsmeyer [1]. Jeho vynález se však nerozšířil a téměř upadl v zapomnění. Velký rozvoj nastal až o tři desetiletí později v předvečer druhé světové války v oblasti vojenských aplikací. Radarové systémy v té době byly velká těžká zařízení a používaly se především pro sledování vzdušného prostoru.

Po druhé světové válce se radary začínají používat i pro civilní přehledové aplikace – řízení letového provozu. Později se začíná použití rozšiřovat i na řízení lodního provozu na řekách a mořích. Radary v civilních aplikacích zajišťovaly přehledové funkce a vyhodnocovaly pouze vzdálenost a azimut cíle (2D). Potřeba měření výšky při rostoucím provozu byla pro civilní řízení letového provozu vyřešena zavedením sekundárního přehledového radaru.

Vojenské radary zajišťovaly podstatně větší rozsah funkcí. Kromě přehledu se vojenské radary „naučily“ měřit výšku (nejdříve jako samostatné výškoměry a později jako funkci 3D radarů), navádět hlavňové prostředky i rakety či mapovat terén (SAR). Vojenské radary se přirozeně staly součástí instalací na zemi, moři, ve vzduchu i v kosmu. Všechny tyto čtyři domény se staly samozřejmě i předmětem jejich pozorování. S rostoucími možnostmi elektroniky a především prostředků zpracování signálu a dat se u vojenských radarových systémů začala, nejdříve u palubních radarů letadel, objevovat schopnost plnění několika typů úloh – multifunkčnost (například přehled o vzdušné situaci, navádění palubních zbraní a mapování terénu).

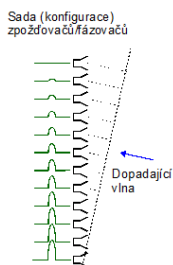
V současné době musí celý svět, radary nevyjímaje, reflektovat nové hrozby. Mezi nejvýznamnější hrozby patří bezpilotní prostředky (drony/UAV/RPAS) snadno zneužitelné pro teroristické aktivity států i nestátních organizací. Tyto hrozby vrací váhu primárním radarům, které na rozdíl od sekundárních a pasivních radarů detekují i nekooperující cíle. Primární radary jsou navíc v případě kooperujících cílů nezávislé na signálech a údajích poskytovaných přímo cílem (jeden z mnoha aspektů Cyber security).

Dalším zásadním faktorem ovlivňujícím vývoj radarů je rozvoj elektroniky přinášející nové příležitosti. Dnes běžně dostupná hradlové pole a vývoj obvodů tvarování svazků pro sítě 5G zpřístupňují technologie pro vývoj 3D radarů, dříve exkluzivně dostupné pro několik globálních mocností a jejich armády/výrobce.

Príspevek ilustruje popsané trendy popisem dvou konkrétních systémů – 3D radaru krátkého dosahu *ReGUARD* navržený primárně pro detekci velmi malých cílů UAV (*unmanned aerial vehicle*) a UWB (*ultra-wideband*) radaru velmi krátkého dosahu *ReTWis* pro sledování objektů za zdí. Pro srozumitelnost je doplněn popis základních principů 3D radarů a UWB technologie.

1. 3D Radary

3D radary [2–5] jsou radary schopné určovat úhlovou polohu v obou osách – *azimutu* i *elevaci*. Pro získání informace o úhlové poloze cíle se využívá vyzářovací charakteristika antény s několika svazky nebo jedním svazkem s proměnnou polohou. Typickým způsobem realizace antény s elektronickým ovládním polohy svazku je fázovaná anténní řada. Fázovaná anténní řada kombinuje fázově (u velkých anténních řad i časově) posunutě a amplitudově váhované signály přijaté několika anténními prvky do jednoho výstupu. Amplitudové váhování má, stejně jako u jiných typů antén, vliv na úroveň postranních laloků vyzářovacího diagramu antény. Fázové posuny kompenzují dráhový rozdíl dopadající rovinné vlny a jejich změnou se tak vychyluje svazek (viz obrázek 1). Rozteč anténních prvků je typicky mezi polovinou a 80 % vlnové délky.



Obrázek 1: Vztah fázových posunů a polohy hlavního laloku antény

3D radary využívají různé strategie vyzářování energie do prohledávaného prostoru a jeho příjmu. Mezi nejvýznamnější strategie patří [6]:

- vysílání a příjem signálu několika svazky na různých frekvencích (např. ST-68U pracující v pásmu S [7]),
- jeden vysílací svazek ozařující celý rozsah elevací a několik přijímacích svazků (*stacked beam*, např. AN/TPS-43, pracující v pásmu S, špičkový výkon 4 MW, střední 6,7 kW [8], obrázek 2),
- tužkový svazek prohledávající prostor – mechanické či elektrické vychylování.

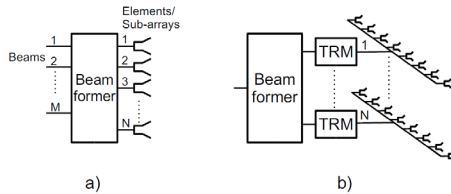


Obrázek 2: Radar AN/TPS-43, Luftwaffe museum Berlin Gatow

Přehledové radarové systémy *stacked beam* s rotující anténou historicky využívaly pro tvarování vysílacího svazku vysílání pouze částí apertury (rozšíření svazku) a pro příjem převod signálu jednotlivých řad na svazky Buttlerovou maticí (obrázek 3a). Svazky jsou v této konfiguraci tvarovány pouze ve vertikální rovině a v azimutu je vyzářovací diagram pevný. Tato struktura používala centralizovaný vysílač a odstup signál-šum přijímaného signálu byl ovlivněn průchozím útlumem tvarovací matice.

Nejmodernější generace 3D radarů AESA (*active electronic steering array*) – aktivní elektronicky vychylovaná anténní řada – využívá digitálně řízené vysílací/přijímací moduly TRM (*transmit receive module*), obrázek 3b. Tento způsob implementace využívá rozdělení vysílače mezi jednotlivé moduly – realizaci polovodičovými prvky s vysokým činitelem plnění a bez ovlivnění výstupního výkonu a šumového čísla ztrátami slučovací sítě. Distribuovaný vysílač přináší další výhodu v případě poruchy některého z vysílacích prvků – degradace parametrů je v takovém případě většinou nevýznamná. Digitální řízení fáze a amplitudy vysílaného signálu jednotlivých řad umožňuje přesné tvarování svazku. Na příjmu je neefektivnější a nejpokrokovější implementací digitalizace signálu každé z řad a následné digitální formování signálů několika svazků.

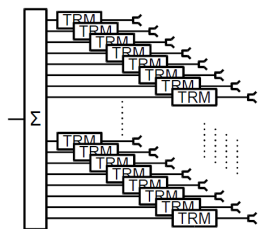
Příkladem moderního systému s distribuovanými TR moduly a digitálním tvarováním svazku je radarový systém RL-3DM firmy RETIA.



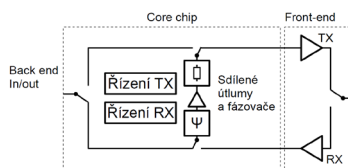
Obrázek 3: Struktura 3D systému *stacked beam* – a) s Buttlerovou maticí, b) s digitálním řízením TRM (*transmit receive module*)

Další často používanou konfigurací je anténní systém s vychylováním svazků v obou rovinách. V tomto případě jsou TR moduly uspořádány plošně – fáze a amplituda je samostatně řízena u každého elementu antény (obrázek 4).

Klíčovým blokem je i zde TR modul. Aktuálně dostupné technologie prakticky neumožňují přímou digitalizaci signálu u každého anténního prvku a tak je fázování a tvarování svazku zajištěno digitálně řízenými analogovými fázovači a útlumy. Struktura TR modulu je znázorněna na obrázku 5. Klíčové funkce TR modulů je dnes možné řešit integrovanými obvody, typické je dělení mezi dva typy obvodů – *core-chip* (řízení amplitudy a fáze) a *front-end* (výkonový zesilovač vysílače, LNA přijímače a PIN diodový přepínač).



Obrázek 4: Struktura bloků 3D radaru AESA s vychylováním v obou rovinách



Obrázek 5: Struktura TR modulu

TR modul u každého prvku anténní řady umožňuje vychylování svazku v obou rovinách zcela dle potřeb detekce a obnovy informace o cíli – rychlé založení tracku, prokládání aktivity sledování prioritního cíle s prohledáváním prostoru, TWS (*track while scan*) [9].

1.1 Radar ReGUARD

Aplikací popsaných principů do pozemního plně polovodičového, multifunkčního 3D radaru krátkého dosahu optimalizovaného pro detekci malých pomalých nízkoletících cílů LSS (*low slow small*) je radar ReGUARD (obrázek 6). Radar ReGUARD pracuje v pásmu X a umožňuje vychylování svazku v obou rovinách. Radar může být provozována se stálou polohou anténního systému i na rotující základně.



Obrázek 6: Radarová hlava a anténní řada 3D radarového systému ReGUARD

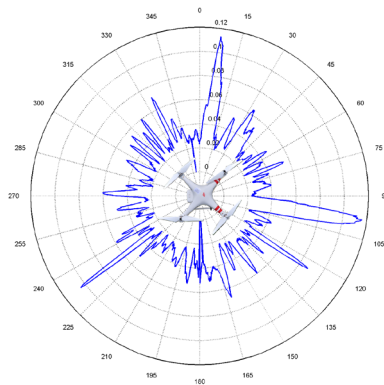
Radar může zajišťovat detekci pozemních cílů, standardních vzdušných cílů i cílů LSS. Jednotlivé režimy se liší prohledávaným prostorem, přístrojovými dosahy a dobou obnovy informace. Tyto režimy mohou být prokládány (u konkurenčních systémů

obvykle popisováno jako současné vysílání několika svazků, skutečná realizace je sekvencí vysílání a velmi rychlé vychylování).

Schopnost určení elevace přispívá ke schopnosti rozlišení zájmových LSS cílů – dronů od cílů pozemních (aut, cyklistů, ...).

Radar ReGUARD využívá anténní aperturu s anténními prvky typu *patch*. Ke každému anténnímu prvku je připojen TR modul (integrované obvody front endu a core chipu – vysílač s výkonem několika W, LNA, fázovač a řízený útlum). Jednotlivé TR moduly jsou s generátorem vysílaného signálu a přijímačem propojeny dělicí/slučovací sítí. Struktura slučovací sítě umožňuje monopulsní vyhodnocení odchylky cíle od osy svazku v obou rovinách.

Radar je navržen pro detekci cílů s radarovou odraznou plochou (RCS) od $0,01 \text{ m}^2$ (tj. menších než UAV DJI Phantom, viz obrázek 7). Tato citlivost způsobuje extrémní množství detekcí falešných (reálných, nezajímavých) cílů. Klíčovou součástí radaru jsou tak algoritmy zpracování signálu a dat včetně klasifikace typu cíle.



Obrázek 7: Radarová odrazná plocha UAV DJI Phantom 3

2. UWB

Využití UWB signálů je relativně novým oborem radiotechniky. UWB signály mají šířku pásma větší než 500 MHz nebo relativní šířku pásma větší než 20 % střední frekvence [10]. UWB signály lze využít například pro vysokokapacitní komunikaci, přesnou lokalizaci a radary. UWB signály pro radarové aplikace mohou být generovány různými způsoby, využívají se zejména impulsní (sub nanosekundové impulsy) a FSK-CW.

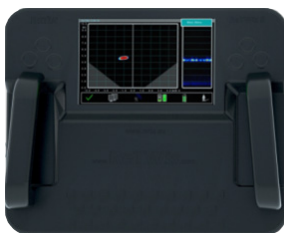
UWB signály typicky překrývají rádiové pásmo běžných úzkopásmových služeb a pro provoz bez postřehnutelných interferencí musí být vznikající rušení úzkopásmových služeb velmi malé a/nebo k němu musí docházet velmi krátkodobě a zřídka. UWB signály tak mohou být generovány pouze s malým výkonem a lze je použít pouze

pro krátko-dosahové SRD (*short range device*) aplikace. Použití UWB signálů dnes regulují [11, 12].

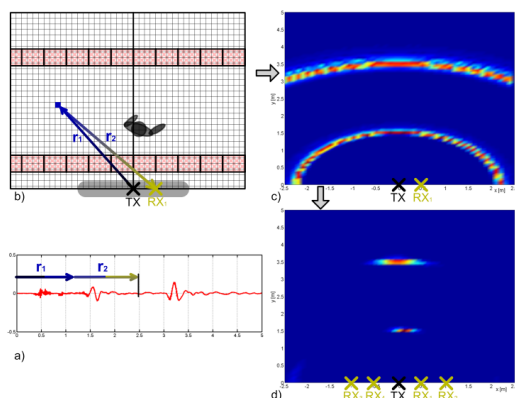
UWB radary vysílají signály s extrémně velkou šířkou pásma a využívají výhod velké rozlišovací schopnosti. Aplikace jsou zejména při pozorování objektů přes zeď, monitorování stavu stavebních konstrukcí WPR (*wall penetrating radar*) a monitorování objektů/dutin v podloží GPR (*ground penetrating radar*). Pro tyto radary definují normy limity vysílaného výkonu kolem -50 dBm/MHz (průměrná hodnota, EIRP) a -30 dBm/MHz (špičková hodnota, EIRP).

2.1 Radar ReTWis

Radar ReTWis (obrázek 8) je ruční zařízení určené pro detekci osob za zdmi. Radar je napájen bateriemi s výdrží až 5 hodin. Radar pracuje na poměrně nízkých frekvencích (spodní okraj pracovního pásma pod 2 GHz), aby signál zdmi procházel s přijatelným útlumem a bylo možné pozorovat odrazy objektů za zdí.



Obrázek 8: Radar ReTWis 5.0



Obrázek 9: Způsob určení polohy cíle UWB radarem

Použití UWB signálů zajišťuje velmi vysokou rozlišovací schopnost v dálce, ale sám o sobě neumožňuje získání informace o úhlové poloze cíle. Úhlovou polohu cíle radar zjišťuje na základě přepínání dvojic antén s různou polohou. Pro každou dvojici antén

leží cíl na elipse a přepínání umožňuje vyhodnotit polohu cíle v místě průsečíku posunutých elips. UWB radar tak používá principy multistatické radiolokace. Princip činnosti ilustruje obrázek 9.

3. Literatura

- [1] MARTIN HOLLMANN. Christian Huelsmeyer, the inventor [online]. Dostupné z: <<http://www.radarworld.org/huelsmeyer.html>>.
- [2] SKOBELEV, Sergei P. Phased Array Antennas with Optimized Element Patterns. B. m.: Artech House, 2011. ISBN 978-1-60807-190-6.
- [3] STURDIVANT, Rick, Clifton QUAN a Enson CHANG. Systems Engineering of Phased Arrays. 2018. ISBN 978-1-63081-488-5.
- [4] ВЕНДИК, О. Г., М. Д. ПАРНЕС а Л. Д. БАХРАХ. Антенны с электрическим сканированием. 2001.
- [5] BHATTACHARYYA, Arun K. Phased Array Antennas: Floquet Analysis, Synthesis, BFNs and Active Array Systems. B. m.: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 978-0-471-76911-8.
- [6] SKOLNIK, Merrill I. Radar Handbook, Third Edition. B. m.: McGraw-Hill Education, 2008. ISBN 978-0-07-148547-0.
- [7] ST-68U [online]. 2019 [vid. 2019-08-14]. Dostupné z: <<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=ST-68U&oldid=187474836>>.
- [8] AN/TPS-43 [online]. nedatováno [vid. 2019-08-14]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=AN/TPS-43&oldid=904582600>>.
- [9] BLACKMAN, Samuel S. a Robert POPOLI. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. B. m.: Artech House, 1999. ISBN 978-1-58053-006-4.
- [10] ITU. Rec. ITU-R SM.1755-0 Characteristics of ultra-wideband technology [online]. 2006. Dostupné z: <http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1755-0-200605-I!!PDF-E.pdf>.
- [11] ČTÚ. všeobecné oprávnění č. VO-R/10/12.2017-10kvyžívání rádiových kmitočtů akprovizování zařízení krátkého dosahu. [online]. 19. prosinec 2017. Dostupné z: <<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/12.2017-10/obrazky/vo-r10-122017-10.pdf>>.
- [12] ERC. ERC Recommendation70-03 Relating to the use of Short Range Devices (SRD) [online]. červen 2019. Dostupné z: <<https://www.ecodocdb.dk/download/25c41779-cd6e/Rec7003e.pdf>>.

Systémy 5G s nízkou latencí

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc.

ČVUT v Praze, FEL, Katedra radioelektroniky

Pátá generace mobilních komunikačních sítí (5G) bude splňovat tradiční, avšak stále rostoucí nároky na vysokou uživatelskou datovou rychlost i systémovou propustnost. Novým fenoménem bude zavedení masivní komunikace strojového typu mMTC (*massive machine type communication*) a komunikace s ultravysokou spolehlivostí a nízkou latencí URLLC (*ultra reliable low latency communication*). Některé aplikace URLLC vyžadují současně vysokou spolehlivost (URC) i nízkou latenci (LLC). Oba požadavky však mají protichůdné nároky na parametry sítě, takže jim nelze současně vyhovět. Situace se ale zjednoduší, pokud se akcentuje jen jediný z nich při mírnějších nárocích na požadavek druhý. Komunikace URLLC se stává nutnou součástí technologií pro inteligentní dopravní systémy (včetně autonomních dopravních prostředků), systémů pro dálkovou robotickou chirurgii, virtuální a rozšířenou realitu VR/AR a pro řadu dalších aplikací.

Dále jsou shrnuty základní poznatky o sítích 4G a jejich přechodu k 5G. Poté je podán přehled tří technických přístupů, vedoucích ke komunikaci LLC, jejichž kooperace může zajistit v sítích LLC jednosměrnou latenci přenosu E2E (*end to end*) pod 1 ms. Tato hodnota vyhovuje i nejnáročnějším požadavkům, jaké vyžadují chytré elektrorozvodné sítě SG (*smart grids*), speciální aplikace ve světě Industry 4.0 a další [1, 2].

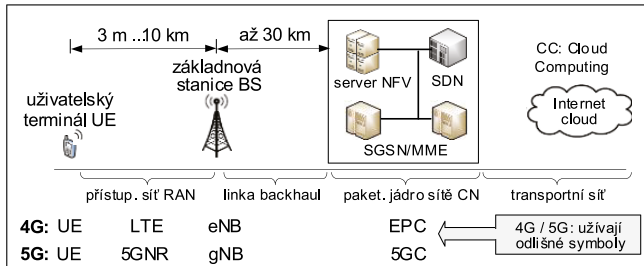
1. Rekapitulace základních poznatků o sítích 4G a přechod k sítím 5G

1.1 Architektura sítí 4G

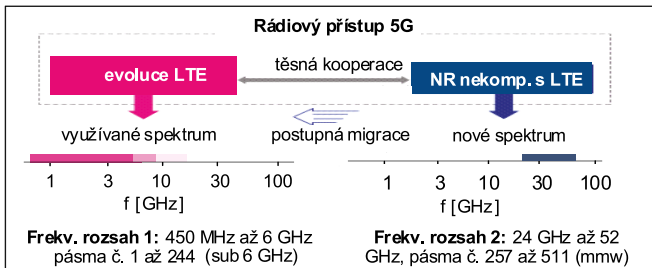
Na obrázku 1 je zobrazena zjednodušená architektura sítě 4G [1, 2]. Mobilní uživatelské terminály UE jsou spojené přes rádiové kanály se základnovou stanicí BS, která je hlavním blokem rádiové přístupové sítě 4G RAN/LTE (*radio access network/long term evolution*). Tato síť využívá frekvenční rozsahy 1 (FR1), omezené shora frekvencí cca 6 GHz, obrázek 2 vlevo. Vůči předchozí generaci 3G RAN je sice velkým pokrokem, avšak prudce narůstající nároky na její kapacitu a propustnost si vynucují postupný přechod k podstatně efektivnější variantě C-RAN (*cloud RAN*), která se pak naplno rozvine v systému 5G.

Stanice BS je spojena fixním širokopásmovým spojem „backhaul“ s jádrem sítě 4G CN/EPC (*core network/evolved packet core*). To plní funkce radiokomunikační ústředny a databáze uživatelů, k nimž se postupně přiřazují entity určené k softwarizaci a virtualizaci hlavních síťových operací (SDN a NFV). Jádro EPC je propojeno s Internetem a případně i s jinými externími systémy, což potom otevírá sítím 4G vstup do běžné telefonní sítě, do mobilních sítí starších generací (2G GSM, 3G UMTS), systémů WiFi apod. Velké objemy dat nutí sítě 5G užívat techniku CC (*cloud computing*),

což je ukládání, zálohování a zpracování dat v samostatných cloudových externích výpočetních centrech.



Obrázek 1: Architektura sítě 4G, do níž byly postupně zaváděny nové funkční bloky a softwarové metody; síť 5G používají pro označení svých entit odlišné symboly



Obrázek 2: Frekvenční pásma systému 4G/5G, zahrnující tradiční „mobilní“ frekvenční rozsah FR1 (sub 6 GHz) a část milimetrové oblasti FR2 (mmW)

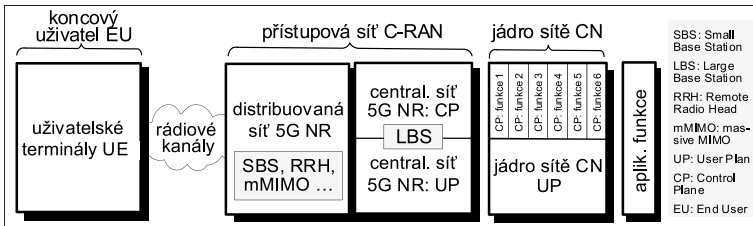
1.2 Přechod k architektuře 5G

Architektura sítě 5G obsahuje základní entity shodné se sítí 4G, které se však označují jinými symboly, obrázek 1 dole. Kompletní přístupová síť 5G v sobě zahrnuje jednak inovovanou podobu přístupu 4G LTE, jednak zcela novou rádiovou přístupovou technologii zvanou „nové rádio 5G NR“ (5G new radio), situovanou do mm pásem FR2, obrázek 2 vpravo, která však není s 4G LTE kompatibilní [1].

V přístupové síti 5G NR se budou využívat stejné typy modulací jako u LTE, tedy QPSK, 16QAM a 64QAM. K nim však postupně přibudou modulace vyšších řádů 256QAM a 1024QAM. Výrazné vylepšení představují dva nové typy kanálových kódů, a to kódy LDPC (low density parity check) a kódy polární (PC). V síti 5G NR se již naplno rozvinou také pokročilé technologie, jako jsou heterogenní buňkové sítě s kombinací velkých a malých buněk, dále anténní techniky mMIMO (massive multiple input multiple output) s mnoha vysílacími a přijímacími anténami, nové verze formování anténních svazků BF (beam forming), techniky plného duplexu v jediném pásmu IBFD (in band full duplex) aj.

K podstatnému snížení investičních a provozních nákladů (CAPEX/OPEX), zmenšení interferencí a zjednodušení managementu přispěje v 5G NR již důsledná náhrada přístupu RAN koncepcí C-RAN (*cloud/centralized RAN*). Ta se skládá z distribuované sekce s malými buňkami a centralizované sekce s makrobuňkami, v níž je oddělena rovina uživatelská UP (*user plane*) od kontrolní CP (*control plane*). Nově se také objeví vnitřní koncový computing MEC (*mobile edge computing*) a FOG computing, nahrazující externí CC (*cloud computing*) sítě 4G.

V jádru 5GC se již naplno uplatní softwarově definované síťování SDN (*software defined networking*) a virtualizace síťových funkcí NFV (*network function virtualization*). Kontrolní rovina CP (*control plane*) je zde rovněž oddělena od uživatelské roviny UP (*user plane*), čímž se celý systém stává mnohem flexibilnějším a efektivnějším. Rovina CP je členěna do několika kontrolních funkcí, které usnadňují její management. Jádro 5GC je k jádru EPC blízké a proto mohou být i při rozdílných přístupech 4G LTE a 5G NR obě varianty sdruženy do jediného subsystému.



Obrázek 3: Nová servisně orientovaná architektura 5G, jež zajišťuje pro každou kontrolní funkci f_1, f_2, f_3, \dots příslušné služby, a to pomocí aplikačně programovatelných rozhraní (API); v centralizované síti C-RAN i v jádru CN jsou odděleny roviny CP a UP

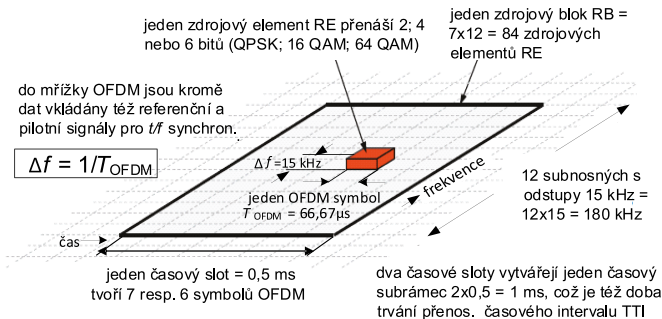
V počátku svého rozvoje po roce 2020 síť 5G nedokáže zajistit kompletně celý mobilní provoz a proto bude nutná jejich těsná kooperace se sítěmi 4G. Po dlouhou dobu tedy musí být uživatelům k dispozici jak dosavadní terminály 4G UE, tak nové terminály 5G UE. Tento režim, označovaný zkratkou NSA (*non stand alone*), bude mít několik variant (*options*). Po dalším zdokonalování však veškerý provoz bude zajišťovat už jen „čistý“ systém 5G, což označuje zkratka SA (*stand alone*).

1.3 Časově frekvenční struktura signálů přístupové sítě 4G LTE

Síť 4G LTE na trase DL využívá přístup OFDMA (*orthogonally frequency division multiple access*) s cyklickým prefixem CP a s odstupem subnosných vln $\Delta f = 15 \text{ kHz}$. Aplikuje již jen paketový přenos, s podporou duplexu FDD/TDD. Je zde používána 2D alokace zdrojů v podobě čtvercové mřížky podle obrázku 4, která je schopna účinně čelit frekvenčně selektivním a časově proměnným únikům.

Základem přenosu v síti LTE je zdrojový element RE (*resource element*), zaujímající ve frekvenční oblasti úsek $\Delta f = 15 \text{ kHz}$, v němž leží jediná subnosná vlna. Tato hodnota tedy určuje odstup subnosných SCS (*sub carrier spacing*). V čase zabírá RE úsek

odpovídající jednomu symbolu OFDM, určenému jako reciproká hodnota Δf , tedy $T_{\text{OFDM}} = 1/\Delta f \approx 66,67 \mu\text{s}$. Parametry $\Delta f = 15 \text{ kHz}$ a $T_{\text{OFDM}} = 66,67 \mu\text{s}$ v síti LTE odpovídají *numerologii 1x*. Z několika symbolů OFDM se vytváří časový slot s délkou $T_s = 0,5 \text{ ms}$. Při tzv. normálním cyklickém prefixu CP (4,7 ms) je slot složen ze 7 symbolů OFDM, při rozšířeném CP (16,67 ms) jen ze 6 symbolů. Sdružováním zdrojových elementů RE vzniká zdrojový blok RB (*resource block*), který je určen časovým úsekem odpovídajícím trvání slotu $T_s = 0,5 \text{ ms}$ a frekvenčním úsekem 180 kHz (12 subnosných s odstupem $\Delta f = 15 \text{ kHz}$). Dva časové sloty vytvářejí jeden časový subrámeček o délce $2 \times 0,5 \text{ ms} = 1 \text{ ms}$. Tato doba se shoduje s nejkratším přenosovým časovým intervalem TTI. Deset časových subrámečků vytváří jeden časový rámeček, o délce $10 \times 1 \text{ ms} = 10 \text{ ms}$. Celá *numerologie 1* a tedy i odstup subnosných 15 kHz a délka OFDM symbolu 66,67 μs , je pro síť 4G LTE fixní. To ale ve svých důsledcích brání jejímu nasazení v nových aplikacích URLLC. U sítě 5G NR se proto užívá škálovatelná numerologie. V ní se zvětšují odstupy subnosných vln Δf na násobky 15 kHz, čímž se zkracují doby trvání OFDM symbolů $T_{\text{OFDM}} = 1/\Delta f$. Úměrně tomu se zkracují také časové sloty a časové subrámečky a tedy i intervaly TTI (*transmission time interval*), což je zásadní podmínka pro radikální snižování latence systému URLLC.



Obrázek 4: Časově-frekvenční mřížka standardu 4G LTE; v pozemní digitální komunikaci je nutné přenášena data chránit proti rušivým vlivům kanálovým kódováním; proto se rádiový přenos realizuje v blocích, složených z datových bitů, k nimž se přidávají ochranné paritní bity; doba nutná k vyslání jediného bloku určuje přenosový časový interval TTI; ten určuje základní složku latence E2E; u sítě LTE se interval TTI rovná 1 ms, což vede k celkové latenci E2E cca 30–50 ms, ta je ale u sítě 5G LLC výrazně zmenšena

2. Zdroje latence v buňkových sítích 4G a 5G

V systému 4G ale i 5G se rozeznává latence v uživatelské rovině UP a latence v kontrolní rovině CP. Latenci E2E v rovině UP vyjadřuje čas, odpovídající přenosu paketu od uživatelského terminálu UE přes síť RAN a jádro CN, až k připojení na koncovou destinaci, jíž je např. Internet nebo cloudové úložiště. Pro komunikaci 5G LLC musí být tato latence v rovině UP nejvýše 1 ms, a to pro trasu UL i DL. Latence v rovině

CP je určena jako čas, který vyžaduje uživatelský terminál k přepnutí z nečinného do aktivního stavu; v síti 5G by měla být menší než 10 ms.

V buňkových sítích 4G/5G při přenosu paketů je zpoždění v rovině UP způsobeno více složkami, které vyplývají z obrázku 1. Vyvolává ho fyzická vrstva PHY rádiové přístupové sítě RAN a linka *backhaul*. Ovlivňuje ho však i samotné jádro sítě CN a jeho spojení s cloudem, realizované Internetem. Celkový čas E2E systému 4G LTE je tedy dán vztahem [1–3]:

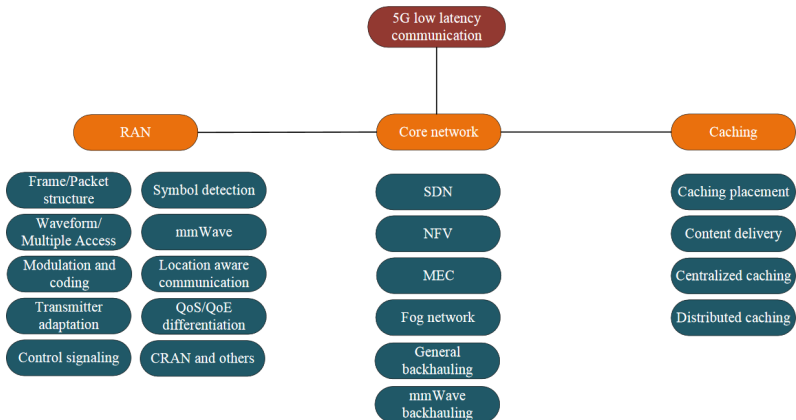
$$T_{E2E} = T_{PHY} + T_{Backhaul} + T_{Core} + T_{Transport} \quad (1)$$

kde T_{PHY} je latence paketů ve fyzické vrstvě PHY, $T_{Backhaul}$ je latence linky *backhaul*, realizované metalickými, resp. rádiovými, resp. optickými spoji, T_{Core} je procesní čas v jádru sítě CN, $T_{Transport}$ je latence v datové komunikaci mezi jádrem CN a Internetem resp. cloudem.

Latenci fyzické vrstvy T_{PHY} lze dále rozdělit do pěti složek [3]:

$$T_{PHY} = T_{sig} + T_{proc} + T_{ttt} + T_{prop} + T_{retx} \quad (2)$$

kde T_{sig} je předprocesní čas (*preprocessing time*), vyžadovaný pro výměnu signalizace, do něhož je zahrnutý požadavek na spojení (*connection request*), tréninková sekvence kanálu a zpětná vazba (*channel training and feedback*) a také čas čekání „ve frontě“ (*queuing delay*); T_{proc} je čas, skládající se z času nutného ke kódování a dekódování paketů, kontrole chyb atd.; T_{ttt} je čas potřebný k odeslání paketu (*transmission latency*), jež je shodný s časovým intervalem TTI; T_{prop} je čas potřebný k přenosu rádiového signálu od vysílače k přijímači (*propagation time*); T_{retx} je čas potřebný pro opakování přenosu HARQ.



Obrázek 5: Tři základní kategorie metod, vedoucích v systému 5G ke snížení latence přenosu

3. Základní metody snižování latence v sítích 5G

K dosažení komunikace s nízkou latencí LLC se užívají tři základní metody (*solutions*): prvá se uplatňuje v rádiové přístupové síti RAN, druhá v jádru sítě CN a třetí je založena na metodách cachingu (*information-centric networking*). Přehled příslušných technik je uveden na obrázku 5, dále jsou však zmíněna pouze hlavní řešení RAN [3, 4].

3.1 Snižování latence v rádiové přístupové síti 5G RAN

3.1.1 Nová flexibilní struktura rámců a paketů

Podle projektu 3GPP Rel. 15 systém 5G NR bude využívat nejprve škálovatelný přístup CP OFDMA, který náleží do třídy OMA (*orthogonally multiple access*). Metody přístupu i typy modulací však jsou stále ve vývoji, takže se brzo objeví nové formáty na bázi neortogonálního mnohonásobného přístupu NOMA (*non OMA*).

Struktura signálů OFDMA v systému 5G NR vychází z časově-frekvenční mřížky, podobné jako u systému 4G LTE, obrázek 4. Příslušná numerologie je však výrazně variabilní. V časové doméně je opět definována odstupem Δf subnosných, který však kromě hodnoty 15 kHz použité u 4G LTE a odpovídající *numerologii* 1 \times , definuje ještě *numerologie* 2 \times ; 4 \times ; 8 \times a 16 \times s odstupy subnosných vln zvětšenými na 30; 60; 120 a 240 kHz, které potom vedou od původní doby trvání OFDM symbolu 66,67 ms ke zkráceným dobám 33,33; 16,67; 8,33 a 4,17 μ s. Úměrně tomu se redukuje i délka slotů a subrámců a tedy i intervalu TTI, tak jak pro numerologie 1 \times ; 2 \times ; 4 \times ukazuje tabulka 1. Jelikož v některých aplikacích jsou i redukované sloty příliš dlouhé, zavádí se v systému 5G NR ještě třída mini-slotů, které dále zkracují interval TTI. Ty jsou výhodné v nižších pásmech $f < 6$ GHz.

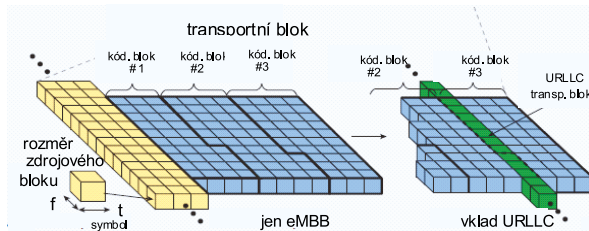
trvání symbolů, slotů, subrámců a mini-slotů [μ s] pro různé numerologie				
numerologie/ Δf	symbol OFDM	slot	subrámec/TTI	mini-slot
1 \times /15kHz	66,67	500	1 000	142/241
2 \times /30kHz	33,33	250	500	71
4 \times /60kHz	16,67	125	250	36

Tabulka 1: Škálovatelný multiplex OFDM v přístupové síti 5G NR, pro numerologie 1 \times ; 2 \times ; 4 \times

3.1.2 Zajištění priority přenosu dat kritických na latenci URLLC před službami eMBB a mMTC

Je-li v síti 5G požadován na DL v určitém čase přenos konkrétní služby URLLC, základnová stanice musí vyslat paket URLLC okamžitě. Právě probíhající přenos paketů eMBB resp. eMTC je proto nutné ihned přerušit a některé ze symbolů eMBB nahradit symboly z URLLC paketu, tak jak ukazuje obrázek 6. Jelikož přerušování není předem ohlášeno aktivní mobilní stanici UE, kvalita příjmu služeb eMBB a mMTC by se tím

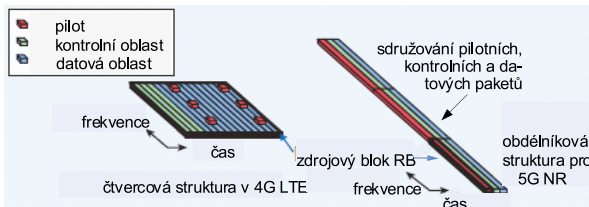
mohla výrazně zhoršit. Proto je tento problém vzájemné koexistence různých služeb v systému 3GPP NR řešen zvláštními technikami.



Obrázek 6: Rozvrhování URLLC paketů do eMBB

3.1.3 Flexibilní struktura paketů

Malou latenci systému 5G URLLC v porovnání se 4G LTE lze dále podpořit tak, že se minimalizuje přenosová latence T_{ttt} a procesní latence T_{proc} . Přenosová latence T_{ttt} se zmenší přechodem od čtvercové struktury paketů 4G LTE na obdélníkovou strukturu, obrázek 7, výrazně stlačenou v časové oblasti a rozšířenou ve frekvenční oblasti. Ke zmenšení latence T_{proc} jsou zde navíc tři složky balíku, a to pilotní, kontrolní a datová, sdruženy a tak vytvářejí rychlé „potrubní zpracování“ celého mechanismu zachycení kanálu, dekodování kontrolního kanálu a detekování dat.



Obrázek 7: URLLC balíky komprimované v čase

3.1.4 Další nové metody v síti RAN snižující latenci přenosu

Pro síť 5G s aplikacemi LLC se vedle škálovatelného přístupu CP OFDMA ukazuje jako velmi vhodný ortogonální formát UFMC (*universal filtered multicarrier*), který lze též škálovat a použít ve spojení s krátkými balíky a v různých frekvenčních pásmech. Zásadní zlepšení však přinesou intenzivně zkoumané neortogonální techniky, jako je PD NOMA (*power domain non orthogonally multiple acces*) a další. Snižování latence v sítích LLC lze dosáhnout též technikou agregace nosných vln v milimetrové oblasti.

3.2 Snižování latence v jádru CN a technika *cachingu*

V jádru CN lze výrazně zvýšit propustnost, při současném snížení latence, aplikací architektur se softwarově definovaným síťováním SDN, dále virtualizací síťových funkcí NFV a také podporou mobilního koncového computingu MEC [1, 2].

Technika *chachingu* (zachycení) spočívá v uložení populárních kontentů, generovaných obvykle v originálních vzdálených serverech, v lokálních úložištích. Ta mohou být situována do jádra sítě CN, nebo do stanic BS sítě RAN, tedy co nejbližší k uživatelům (rádiový *cachung*). Tím se výrazně snižuje latence v doručování těchto kontentů – třeba i vícenásobném – a zvyšuje se kapacita celé sítě [4].

4. Literatura

- [1] Dahlman, Parkvall, Skold: 5G NR The Next Generat. Wireless Access Technology. Elsevier 2018.
- [2] 5G for the Connected World. Edit. by D. Chandramouli et al. ©2019 John Wiley & Sons Ltd, 2019.
- [3] Ji H. et al.: Ultra-Reliable and Low Latency...IEEE Wireless Communication, June 2018.
- [4] Parvez I. et al.: A Survey on Low Lat. Towards 5G... arXiv:1708.02562v1 [cs NI] 8. August 2017.

Mobilní systémy 5G s ultravysokou spolehlivostí

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc.

ČVUT v Praze, FEL, Katedra radioelektroniky

Pátá generace mobilních komunikačních sítí 5G kromě tradičních mobilních širokopásmových aplikací MBB (*mobile broadband*) přinese i aplikace zcela nové. Jednou z nich je komunikace s ultravysokou spolehlivostí a nízkou latencí URLLC (*ultra reliable low latency communication*). Podle projektu 3GPP Rel.15 je v 5G URLLC vyžadována latence E2E (*end to end*) pod 1 ms. Požadovaná spolehlivost je specifikována blokovou chybovostí BLER (*block error rate*) nepřesahující hodnotu 10^{-5} , dosahovanou v čase 1 ms při přenosu krátkých paketů o délce 32 bytů. V kritických aplikacích však musí být spolehlivost i o několik řádů vyšší. Tento příspěvek je zaměřen jen na komunikaci s ultravysokou spolehlivostí 5G URC. Ta závisí na rádiové přístupové síti RAN i na jádru CN a je ovšem ovlivňována i kooperujícím Internetem, cloudovými úložišti a dalšími složkami systému.

V mobilní komunikaci spolehlivost přenosu nejčastěji ohrožuje pokles výkonu užitečného signálu v přijímači, způsobený zhoršenými parametry rádiového kanálu. Druhou příčinou jsou interference a šum doprovázející užitečný signál. Odolnost vůči těmto rušivým činitelům zvyšuje u současných sítí ochranné kanálové kódování s dopřednou korekcí chyb FEC (*forward error correction*), opakování přenosu ARQ (*automatic repeat request*) a HARQ (*hybrid ARQ*) a různé varianty rádiové diverzity. Ty doplňují techniky ekvalizace a prokládání. V sítích 4G spolehlivost podporuje navíc mobilní koncový computing MEC (*mobile edge computing*), virtualizace síťových funkcí NFV (*network function virtualization*) a další síťová opatření. V sítích 5G URC však nároky na spolehlivost ještě dále narůstají a proto je nutné doplnit zmíněné „klasické“ metody ochrany o některé nové přístupy.

1. Definice spolehlivosti, dostupnosti a bezpečnosti rádiového komunikačního systému

Důkladným rozбором spolehlivosti komunikačních systémů a souvisejících pojmů se zabývá spolehlivostní inženýrství (*reliability engineering*). Dále jsou uvedeny jen základní poznatky z tohoto oboru.

Spolehlivost (reliability) radiokomunikačního systému je jeho schopnost vykonávat v určeném časovém období a za daných podmínek požadované funkce. Vyjadřuje se obvykle podílem času s bezporuchovým provozem (resp. s přípustnou poruchovostí) ku celkovému provoznímu času. Spolehlivost systému se zvětšuje při zmenšování jeho chybovosti (bitové, paketové apod) a naopak.

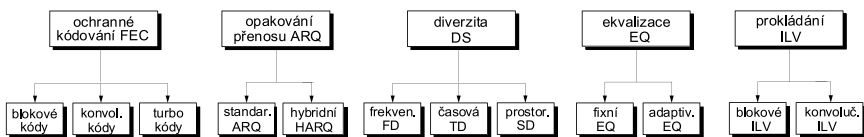
Dostupnost (availability) radiokomunikačního systému je jeho způsobilost vykonávat danou funkci ve specifikovaném okamžiku nebo časovém intervalu. Pojmy dostupnost a spolehlivost spolu souvisí, nelze je však ztotožňovat.

Bezpečnost (*security*) radiokomunikačního systému se rozumí jeho schopnost zabránit fyzickému přístupu a zneužití vnitřní infrastruktury nepovolaným subjek-
tům. Vztah mezi spolehlivostí a bezpečností určitého systému však není jednoznačný. V určitých konkrétních scénářích zvýšení spolehlivosti přináší současně i zvýšení bezpečnosti. V jiných situacích snaha o zvýšení spolehlivosti systému vede ke snížení jeho bezpečnosti (efekt „*reliability security trade – off*“).

Z hlediska ultravysoké spolehlivosti jsou zvláště kritické např. systémy pro dálkovou robotickou chirurgii a automatické řízení automobilů, kde se vyžaduje cílová spolehlivost během periody 1 ms nejméně ($1-10^{-7}$). Jen mírně zmenšené jsou nároky na spolehlivost u systémů pro automatizaci výrobních procesů (Industry 4.0), dále pro elektrické distribuční sítě se středním a vysokým napětím, pro inteligentní systé-
my pro řízení dopravy a některé další speciální aplikace.

2. Klasické metody ochrany rádiového přenosu

Základním prostředkem k zajištění náležitě spolehlivosti komunikačních systémů je použití spolehlivého hardwaru i softwaru již při jejich realizaci. Vysokou provozní spolehlivost potom podporují ještě další metody. V přístupové síti RAN současných ge-
nerací 2G/3G/4G to jsou metody ochranného kanálového kódování FEC, dále techniky opakování přenosu ARQ a HARQ a různé varianty diverzity DS, dále techniky ekvalizace EQ a prokládání ILV. Všechny uvedené metody jsou založené na záměrném přidávání redundandní složky k přenášeným datům. Nedostatky rádiového kanálu, zejména jeho frekvenční zkreslení a vytváření shluků bitových chyb, kompenzují techniky ekvalizace a prokládání. Tyto klasické metody ochrany, znázorněné na obr. 1, byly již podrobně probrány na minulých roční-
cích konferencích RK (*RK'10: Moderní způsoby ochrany... a další*). Tento příspěvek proto přináší nové poznatky z daného oboru, zaměřené již jen na síť 5G, z nichž však většina vychází právě z koncepcí podle obrázku 1.



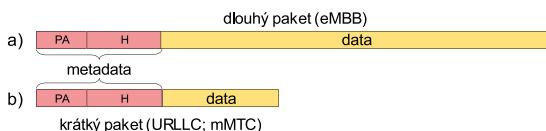
Obrázek 1: Pět hlavních metod ochrany rádiového přenosu v sítích pozemní mobilní komunikace generací 2G až 4G

3. Ochranné kanálové kódování FEC v sítích 5G URLLC

Podobně jako u dosavadních sítí, spolehlivost komunikace 5G URLLC zvyšuje ochranné kanálové kódování. Podle základní práce jeho protagonisty C. E. Shannona z roku 1948 [1] je v ideálním rádiovém kanálu se šířkou pásma W , při působení šumu AWGN a výstupním poměru signálu k šumu a interferencím SNR, maximální dosa-
žitelná přenosová rychlost tj. kapacita C , určena vztahem $C = W \log_2(1 + SNR)$ [bit/s].

Pokud je skutečná bitová rychlost přenosu R nižší, než hodnota C , je možné vždy nalézt takový ochranný kód, při němž bitová chybovost BER (*bit error rate*) limituje k nule. Tento kód ale musí používat kódové bloky (slova), blížíci se svou délkou k nekonečnu. To je v praxi nedosažitelné, avšak již v padesátých letech min. století byly sestaveny první kanálové kódy, které při kódových blocích s konečnou délkou výrazně zvyšovaly spolehlivost přenosu, i když jejich rychlost R byla ještě hluboko pod Shannonovým limitem. Přitom u nich bylo možné – oproti nechráněnému přenosu – podstatně zmenšit vysílací výkon, ovšem za cenu rozšíření rádiového pásma a složitější implementace. Během dalšího vývoje však byly postupně specifikovány efektivní ochranné kódy, které se svou rychlostí stále těsněji blíží k Shannonovu limitu. K nim patří zejména turbo kódy, uplatňující se v sítích 3G a 4G. Avšak jejich složité iterativní dekódování vede k nižší propustnosti a vyšší latenci a navíc ke špatné funkci při malých poměrech SNR, a proto jsou pro síť 5G nevhodné [2, 3].

Sítě 4G i síť 5G jsou založeny na přenosu s přepojováním paketů PS (*packet switching*). Ten nabízí v porovnání se starší technikou přepojování okruhů CS (*circuit switching*) podstatně vyšší efektivitu ve využití rádiových kanálů, kompatibilitu s Internetem i jinými paketovými sítěmi (PDN) a další přednosti. U paketových systémů se typický paket (obrázek 2) skládá z preamble PA (*preamble*) a ze záhlaví H (*header*), obsahujících tzv. metadata, za nimiž následuje datový úsek D (*payload*) [4]. U dlouhých paketů je délka tohoto úseku mnohem větší než délka metadata a díky tomu na ně lze aplikovat klasickou Shannonovu teorii. U krátkých paketů jsou obě jejich složky zhruba stejně dlouhé, což ale působí potíže při kanálovém kódování, které se potom vymyká Shannonovu přístupu.



Obrázek 2: Struktura dlouhých a krátkých paketů, používaných v různých typech komunikace v sítích 5G

Sítě 5G mohou zajistit vspělou mobilní širokopásmovou komunikaci eMBB (*evolved mobile broadband*), při níž se přenášejí velké objemy dat vysokou rychlostí. K tomu jsou vhodné dlouhé pakety podle obrázku 2a. U nich je splněna relace $D \gg PA + H$, takže zátěž metadata je relativně malá a tudíž téměř celá kapacita kanálu je věnována přenosu dat D, což přináší módu eMBB vysokou propustnost. Pro ochranu komunikace eMBB lze využít turbo kódy, avšak podstatně lepší zde jsou nové kódy LDPC (*low density parity check*), které netrpí zmíněnými nedostatky turbo kódů. Proto byly již dříve zavedeny např. do lokálních sítí IEEE 802.11 a TV systémů DVB a ATSC. V sítích 5G NR se při komunikaci eMBB kódy LDPC uplatní hlavně při větších délkách (počtu datových bitů ≥ 256), a to hlavně v datových kanálech nevyžadujících příliš nízkou chybovost.

Při komunikaci URLLC a mMTC v sítích 5G NR je však otázka účinného kanálového kódování složitější. V tomto módu se totiž většinou přenášejí krátká sdělení s nízkou bitovou rychlostí (< 500 bit/s), avšak se silnou ochranou přenosu. Pro přenos jsou zde proto vhodné krátké pakety podle obrázku 2b. U těch platí relace $D \approx PA + H$, takže zátěž metadaty je velká a propustnost omezená. Kromě toho se krátké pakety nemohou přiblížit k Shannonovým požadavkům na bezchybný přenos. V těchto aplikacích jsou potom nevhodné nejen turbo kódy, ale většinou i kódy LDPC.

Velmi slibným řešením zde však jsou polární kódy PC, představující novou třídu lineárních blokových kódů, vcházející do praxe teprve nedávno [5]. Ty se uplatní hlavně při menších délkách kódů (< 128 bitů) a nižších kódových rychlostech, tj. při požadované silné ochraně přenosu. Avšak při aplikaci jednoduchých technik punktuování a krácení mají PC kódy vynikající parametry i v širším rozsahu délek kódu a stupňů ochrany. Jsou schopné zajistit spolehlivost přenosu 99,999 %, která je pro většinu aplikací 5G URLLC nezbytná. V porovnání s turbo kódy mají díky jednoduchým algoritmům kódování i dekódování až $20\times$ nižší výkonovou spotřebu. Na rozdíl od jiných kódů s ekvivalentní kódovou rychlostí polární kódy také zmírňují nároky na potřebný poměr SNR, čímž dosahují vyšší kódový zisk i vyšší spektrální účinnost.

4. Systémy opakování přenosu ARQ a HARQ

Systém ARQ: V systému ARQ se data vysílají v blocích, doplněných detekčním kódem (CRC). Nepřesáhne-li při prvním vysílání daného bloku v přijatém bloku bitová chybovost BER stanovený horní limit, přijímač to sdělí zpětným kanálem formou potvrzení ACK (*acknowledgement*) vysílači a tento blok postupuje k dalšímu zpracování. V opačném případě přijímač požádá negativním potvrzením NACK vysílače o opakovaný přenos (*retransmission*) uvedeného chybného bloku. Tento proces se může opakovat až do té doby, než chybovost přijatého bloku klesne pod daný limit. Poté vysílač začne vysílat další blok.

Systém HARQ: Zdokonalená varianta zvaná hybridní HARQ, kombinuje techniku ARQ s kódováním FEC, které se při případných opakováních přitvrzuje. Díky tomu se počet opakování v porovnání s ARQ zmenšuje a tím je celý proces urychlován.

Původní technika HARQ se neustále zdokonaluje a směřuje k větší flexibilitě. Zavádějí se do ní např. perspektivní koncepce agregovaného nebo slepého opakovaného vysílání (*aggregated retransmission* or *blind retransmission*) a další progresivní algoritmy. Díky tomu je již vhodná i pro náročnou komunikaci 5G URLLC. Opakované přenosy však zvětšují latenci, takže se HARQ pro aplikace URLLC nehodí.

5. Automatické opakované vysílání

K nejstarším způsobům ochrany rádiového přenosu patří prosté opakované vysílání jednotlivých datových či kontrolních bitů, nebo jejich skupin, bez vyžádání příjemce. Na přijímací straně se přijatý signál vyhodnocuje na principech majoritní logiky (výskytu většiny). Tato koncepce je jednoduchá, neboť nevyžaduje zpětný kanál Rx – Tx

ani další pomocné operace. Nevýhodou je znatelné – a někdy i zbytečné – prodlužování doby přenosu. V komunikaci URLLC však často nachází úspěšné uplatnění [2].

6. Prostorová mikrodiverzita a makrodiverzita

Prostorová mikrodiverzita (přijímací resp. vysílací diverzita) spočívá v rádiovém přenosu téhož datového signálu, při němž buď vysílač, nebo přijímač, nebo obě strany mají dvě nebo více elementárních antén (MIMO), jejichž vzájemná vzdálenost odpovídá, nebo je menší, než délka vlny λ . Pro služby URLLC se preferuje diverzita typu 1×2 (přijímací), resp. 2×1 (vysílací), kde systém přenáší jediný anténní svazek (*stream*). Postupně se však přechází k diverzitním koncepcím vyšších řádů (4×2 , 4×4 atd.).

Prostorová makrodiverzita využívá pro přenos jediného signálu rovněž několik vysílacích antén, jejichž vzdálenost je však mnohem větší, než délka vlny λ . U sítí buňkových nebo WLAN, se toho dosáhne umístěním vysílacích antén na různých základnových stanicích resp. přístupových bodech. Přijímací anténní systém určitého terminálu potom musí vhodně kombinovat signály přicházející od různých vysílačů (na maximum poměru SNR apod.) [2, 3].

Obě uvedené diverzitní techniky zvětšují spolehlivost rádiového přenosu, avšak na jeho kapacitu nemají prakticky přímý vliv.

7. Kontrolní kanály s vysokou spolehlivostí

Většina aplikací URLLC vyžaduje současně vysokou spolehlivost i nízkou latenci kontrolních kanálů, přenášejících informace ACK/NACK a další, která musí být vyšší než u datových kanálů. Tu lze zajistit několika moderními technikami, jako je asymetrická detekce ACK/NACK, opakování rozvrhovacích informací aj. [2, 3].

8. Potlačení interferencí

Zvýšení spolehlivosti komunikace URLLC lze dosáhnout nejen zvýšením poměru SNR v přijímači, ale také potlačením interferencí. To lze realizovat např. formováním anténních svazků (*beam forming*). Interference od sousedních buněk výrazně snižuje metoda jejich koordinace ICIC (*inter-cell interference coordination*), účinná je i technika MMSE-IRC (*minimum mean square error-interference rejection combining*) [2, 3].

9. Závěr

Tento příspěvek pojednává o pokročilých metodách vedoucích k podstatnému zvyšování spolehlivosti komunikace URLLC v systémech 5G. Výzkum uvedeného problému však není v počátku roku 2019 ani zdaleka zakončen, takže v příštích letech lze očekávat jeho další pokračování, které přinese nové výsledky.

10. Literatura

- [1] Shannon E. C.: The Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, 1948.

- [2] Chandramouli D., et al.: 5G for the connected world. J. Wiley&Sons, 2019.
- [3] Dahlman, Parkvall, Skold: 5G NR The Next Generation Wireless Access Technology. Elsevier 2018.
- [4] Durisi Y.: Towards Mas. RLLC Wir. Com. with Short Packets. <<https://arxiv.org/abs/1504.06526>>.
- [5] Bioglio V, et al.: Design of Polar Codes in 5G New Radio. arXiv:1804.04389v2 [cs.IT] 9 Jan 2019.

FeMBMS: Multimediální služby pro rozhlasové a multikastové vysílání v sítích 5G

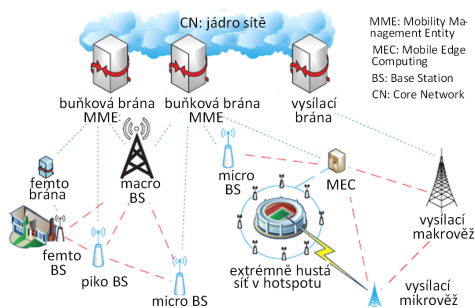
Doc. Ing. Václav Žalud, CSc.

ČVUT v Praze, FEL, Katedra radioelektroniky

1. Konvergence sítí pozemního vysílání a mobilních širokopásmových systémů

Základní koncepce multimediálních vysílacích a multikastových služeb MBMS (*multimedia broadcast/multicast service*) spočívá ve vysílání těchto multimediálních obsahů buď ke všem uživatelům, kteří o ně mají zájem (*broadcast*), nebo jen k jejich vybraným skupinám (*multicast*). To je ovšem zásadní rozdíl oproti unicastovým koncepcím (*unicast*), v nichž různé služby směřují k individuálním uživatelům.

Myšlenka MBMS se objevila ve světě radiokomunikací téměř již před dvěma dekadami, avšak její efektivní implementaci zřejmě umožní až nastupující síť 5G. Velice různorodé požadavky služeb MBMS ovšem nemůže splnit jediný kompaktní systém. Typická buňková duplexní síť totiž zajišťuje flexibilní interaktivní služby, kdežto vysílací síť se simplexním provozem poskytuje extrémní pokrytí, s teoreticky neomezeným počtem uživatelů. Jedno slibné řešení, vedoucí k jejich konvergenci, však představuje heterogenní síť HetNet (*heterogeneous network*) s hierarchickou architekturou podle obrázek 1 [1]. V této koncepci různé komunikační sítě, zahrnující síť buňkové (a případně i lokální síť WLAN a metropolitní WMAN), jakož i síť vysílací, tj. rozhlasové a televizní, spolu kooperují. Tato kooperace je ale složitá, neboť pro určitou aplikaci jsou operační mechanismy buňkových sítí a tradičních vysílacích sítí velice rozdílné. Díky tomu mohou uspokojit požadavky různých služeb. Mají-li však být sdruženy do jediného systému a přitom je žádoucí zachovat jejich osobité rysy, jsou nezbytné nové funkční uzly a také nové koordinační mechanismy, označované jako křížová koordinace technologií rádiového přístupu RAT (*cross radio access technology coordination*), uplatňující se napříč vrstvami.



Obrázek 1: Fyzická architektura konvergovaných buňkových sítí a vysílacích sítí

Je-li provoz realizován sítí HetNet, je podstatný výběr přenosových služeb (*bearer services*), který by měl být v souladu se servisními požadavky a systémovými informacemi. Tento proces se označuje jako vertikální handover VHO. K jeho implementaci je nutné neustále mít k dispozici údaje o intenzitě všech přijímaných signálů, parametrech terminálů, dostupné šířce pásma, zátěži sítí a preferencích uživatelů. Tyto informace se využívají jako kritéria při rozhodování o způsobu realizace VHO. Detaily tohoto procesu mohou určit moderní aktuální algoritmy, jako je algoritmus fuzzy logiky, algoritmus neuronových sítí ap. Soudobý výzkum se soustřeďuje hlavně na kooperaci mezi buňkovými sítěmi a sítěmi WLAN a WMAN, avšak vysílacím sítím se téměř nevěnuje pozornost. Plánovaný simultánní provoz všech složek systému také zatím nebyl řešen. Avšak pokročilé metody koordinace RAT jsou schopné potřebné funkce výrazně podpořit.

Budoucí mobilní komunikační síť 5G musí disponovat nejen extrémní šířkou pásma a kapacitou, ale i dokonalým pokrytím. To je ovšem náročný úkol, zejména vezmou-li se v úvahu cenová omezení a rozmanité servisní požadavky. Nadějně řešení zde představují právě kombinované sítě podle obrázku 1, které se skládají z původních makrobuněk a nových mikrobuněk, pikobuněk a femtobuněk. Ty vytvářejí mnoho-
vrstevnatou strukturu, s rozdílným pokrytím, vysílacími výkony a funkcionalitami. Základnové stanice BS s velkými výkony v makrobuněkách zajišťují dokonalé pokrytí a implementují kontrolní funkce. Naproti tomu nízkovýkonové stanice BS v mikro, piko a femtobuněkách přinášejí, díky agresivnímu opakování frekvencí, mohutné navýšení datové rychlosti a kapacity. V této koncepci makrovysílače na televizních věžích mohou zajišťovat veřejné služby, kdežto mikrovysílače přispívají k celkovému provozu svou distribucí populárních kontentů v hotspotech. Přitom uživatelské terminály s malou mobilitou komunikují s nízkovýkonovými uzly, kdežto terminály s velkou mobilitou jsou obsluhovány uzly s velkým výkonem.

Na systém FeMBMS je zaměřena výzkumná činnost mnoha institucí. Významný je zejména projekt 5G-Xcast: *Broadcast and Multicast Communication Enablers for the Fifth Generation of Wireless Systems* řešený v rámci výzkumného programu EU Horizon 2020, od 1. 6. 2017 do 31. 5. 2019 [2].

2. Zdroje

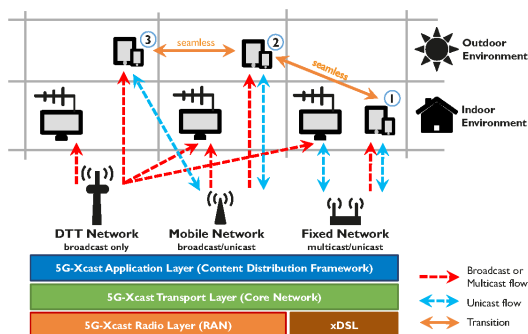
- [1] Zhang, W. et al.: Convergence of a Terrestrial Networks and a Mobile Broad-band Networks. IEEE Communication Magazine, March 2018.
- [2] <<https://5g-ppp.eu/5g-xcast/>>.

FeMBMS: Multimediální služby pro rozhlasové a multikastové vysílání v sítích 5G

Dr. Ing. Petr Vitek
CzechInvest

1. Projekt 5G-Xcast a nové možnosti pro provozovatele multimediálních služeb

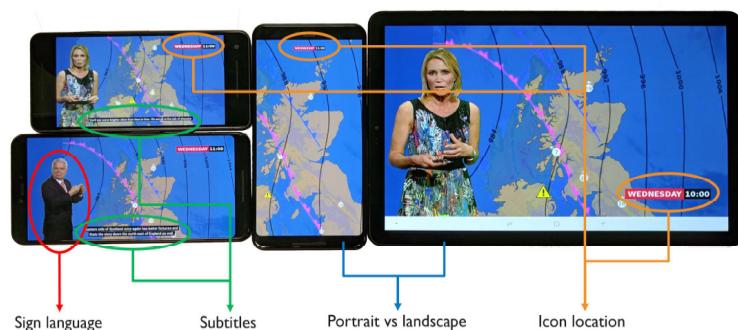
Jak už sám název evropského projektu *5G-Xcast* napovídá, jedná se o projekt řešící různé možnosti šíření multimediální obsahu (*X-cast: uni-cast, multi-cast, broad-cast*) sítěmi elektronických komunikací postavených na platformě 5. generace (5G) včetně analýzy využití techniky s lokálním zásobníkem tzv. „*local caching*“. Zaměřuje se především na vysílací a multikastový mód, protože tyto módy nebyly doposud uspokojivě implementovány v buňkových radiových sítích mobilních komunikací. Základní distribuční architektura pro různé typy konzumace multimediálního obsahu je uvedena na obrázku 1.



Obrázek 1: Základní distribuční architektura 5G-Xcast spolupracujících sítí, zdroj: 5G-Xcast

V této architektuře byly navrženy jednotlivé vrstvy (aplikační, přenosová a radio vrstva) tak, aby splňovaly požadavky pro předem definované služby (hybridní vysílání, objektově orientované vysílání a služba zasílání varovných zpráv včetně multimediálního obsahu) a u vysílacího módu především požadavky provozovatelů televizního vysílání. Mezi ty základní patří zejména volné bezplatné šíření multimediálního obsahu s celoplošným pokrytím, příjem bez nutnosti užití SIM karty, flexibilní používání síťové kapacity, fixní nebo mobilní příjem, provozování všech druhů příjmu (*x-cast*), předvídatelná a udržitelná kvalita služeb QoS (*quality of service*), vysoká spolehlivost a bezpečnost šíření obsahu, podpora standardních televizních formátů a provozování samostatné sítě eMBMS. Některé požadavky vycházejí z dosavadních zkušeností poskytování multimediálních služeb v prostředí internetu.

Jednou z nových služeb, která byla vyvinuta v rámci projektu 5G-Xcast a využívá inovací 5G sítě je objektově-orientované vysílání multimediálního obsahu. Cílem této služby je nabídnout koncovému uživateli možnost složit si pořad (audiovizuální prezentaci/reprodukcii) z jednotlivých komponent multimediálního obsahu tak, aby to vyhovovalo jeho potřebám a reprodukčním schopnostem koncového zařízení. Jednotlivé komponenty jsou standardně vytvářeny v produkčním procesu TV stanic a společně s metadaty tvoří celkový obsah pořadu. Nezbytnou podmínkou nabídky této služby je udržovat tyto komponenty v odděleném stavu pro možnost jejich odbavení v distribučních centrech. Služba byla demonstrována na příkladu výroby a vysílání pořadu předpovědi počasí a skládala se z následujících komponent: moderátor, moderátor znakové řeči, skryté titulky, pozadí s grafikou a grafickými elementy jak je znázorněno obrázku 2.



Obrázek 2: Jednotlivé komponenty pořadu a jejich uživatelsky volená reprodukce na různých typech zařízení, zdroj: 5G-Xcast

Tato služba, která byla vyvinuta ve spolupráci BBC a University of Surrey, využívá techniky dynamického adaptivního streamování pro IP multicast DASM (*dynamic adaptive streaming over IP multicast*) pro šíření „společných“ komponent, MPEG-DASH, přenosové módy 5G multicast a unicast pro šíření personalizovaných komponent.

5G Today – zkušební TV vysílání v módu 5G FeMBMS

Ing. Tomáš Straka

Rohde & Schwarz Praha, s. r. o.

5G standard není pouhou pátou generací mobilní komunikační technologie s vyšší přenosovou rychlostí a nižší latencí. Je to také systém, který bude do budoucna spojovat lidi a věci, díky technologické konvergenci měnit průmyslová odvětví a trhy. Umožní chytré domácnosti a chytrá města, lékařské operace na dálku, autonomní řízení a velký potenciál představuje také pro oblast médií. Mobilní uživatelé s tablety a smartphony, jejichž datové nároky každým rokem rapidně rostou díky streamování videa, budou moci těžit z výhod z vysílání TV programů v nezávislé, jednoduše přístupné síti nebo v případě konvergence se sítěmi mobilních operátorů ze sledování videí on-demand.

V dnešní době můžeme přijímat lineární televizi např. v pozemním televizním vysílání ve standardu DVB-T, který v červnu příštího roku 2020 definitivně přejde na standard DVB-T2. Technologie 5G Broadcast však již nyní představuje perspektivní řešení pro TV vysílání do budoucna. Organizace 3GPP totiž svou vizi podpořit digitální televizi v éře 5G zohledňuje ve verzi 14 a definuje v ní rozšíření standardu LTE broadcast mode eMBMS do standardu FeMBMS. Ten zavádí důležité požadavky na ekonomické vysílání TV programů ve velkých buňkách 4G a 5G sítí. Poprvé tak umožňuje LTE/5G vysílání v topologii HPHT (*high-power high-tower*) a v *downlink only* mode při využití celé signálové šířky pásma pro multimediální *broadcastové* a *multicastové* služby a aplikace.

Vysílání v topologii HPHT je možné vysílat velkým výkonem do velkých oblastí a díky definovanému ochrannému intervalu *extended cyclic prefix* (200 μ s 3GPP release 14, > 300 μ s v budoucím 3GPP release 16) vytvářet i rozsáhlé jednofrekvenční síť tak, jak je například známe ze standardu DVB-T nebo T2. Při tomto vysílání mohou být vzdálenosti mezi jednotlivými vysílači více než 60 km. Standard tímto umožňuje rozšířit dnešní celulární síť o překryvnou HPHT síť, jejíž finanční náročnost na výstavbu je nepoměrně menší v porovnání s výstavbou 5G sítí provozovanou mobilním operátorem.

Downlink only mode umožňuje vysílat bez potřeby zpětného kanálu, to znamená přijímat broadcastové aplikace bez SIM karty a bez autentifikace. Výsledkem řešení je mobilita uživatelů s příjmem obsahu ve vysoké kvalitě, s nízkou latencí, se zajištěnou dostupností, bez spotřeby datového tarifu uživatele a datové kapacity mobilního operátora.

Technologie 5G Broadcast však nemusí být uplatněna pouze pro lineární TV, ale své uplatnění může najít i v jiných oblastech, kdy je nutné distribuovat identický obsah k velkému množství zařízení. Příkladem může být aktualizace *firmware* zařízení v chytrých domácnostech, aktualizace dopravní situace, map, navigace, zaslání bezpečnostních zpráv široké veřejnosti apod.

V současnosti se provádí několik funkčních testů 5G Broadcast a jedním z nich je i zkušební vysílání v rámci „5G TODAY Bavarian research project“. Testy jsou plánovány pro období 28 měsíců a spolupracují na něm společnosti Broadcast Technology Institute (IRT), Rohde & Schwarz, Kathrein, Telefónica Germany a Bayerischer Rundfunk.

Institut IRT je koordinátorem projektu, podílí se na plánování vysílací sítě a měření. Vzhledem k současné absenci chytrých telefonů a tabletů na trhu schopných přijímat signál 5G Broadcast IRT vyvinul FeMBMS přijímač založený na technologii SDR (*software defined radio*). Firma Rohde & Schwarz instalovala dva kapalinou chlazené vysílače doplněné o FeMBMS funkce na vysílacích stanovištích operátora Bayerischer Rundfunk na hoře Wendelstein (5kW) a v Mnichově-Ismaningu (7kW) s vyzářenými výkony 100kW ERP. Firma Kathrein v rámci projektu vyvinula anténu s 12 segmenty s kruhovou polarizací a instalovala ji na vysílacím středisku Mnichov-Ismaning. Firma také doplnila svůj signálový analyzátor o FeMBMS funkcionalitu. Společnost Telefónica Germany poskytla pro vysílání potřebné spektrum.

Projekt byl zahájen 1. července 2017 měsíc po uvolnění standardu FeMBMS v 3GPP Release 14. Následoval rok příprav, vývoje, plánování a plnění regulačních a licenčních záležitostí. Na podzim 2018 byl instalován vysílač na lokalitě Wendelstein a oficiálně byl do provozu spuštěn 4. prosince 2018 jako první HPHT vysílač na světě. V následujících dnech byl spuštěn i druhý vysílač z lokality Mnichov-Ismaning a vytvořena první SFN síť. V následujících měsících jsou plánována měření, ověření pokrytí a mobility v dopravních prostředcích a projekt má být ukončen ke dni 31. října 2019.

Ve standardu FeMBMS v 3GPP Release 14 se pro vysílání definují šířky pásma 1,4; 3; 5; 10; 15 a 20 MHz. V projektu „5G Today“ byly testy zahájeny na frekvenci 754 MHz (původní TV kanál 56) s šířkou pásma 5 MHz a budou pokračovat na šířce pásma 10 MHz (tzn. částečně i na kanále 57). V závislosti na modulačních a kódovacích schématech je možné v šířce pásma 5 MHz vysílat až 40 SD služeb nebo 7 HD programů (MCS 27; 15,4 Mbit/s; 64QAM). Testy byly zahájeny s vysíláním jednoho živého HD programu s robustní QPSK modulací (MCS 9; 3,92 Mbit/s; QPSK).

V rámci projektu „5G Today“ je za kompletní modulační cestu zodpovědná firma Rohde & Schwarz. Služby jsou kódované v H265, které operátor Bayerischer Rundfunk vysílá z headendu R&S AVHE100. Signál vchází dále do zařízení R&S BSCC, které zapouzdřuje video a audio data společně se SFN synchronizační informací do EPC protokolu. Signál nakonec přichází do vysílačů R&S THU9evo, které obsahují jednotky R&S SDE900 (FeMBMS funkce) a budiče R&S TCE901.

Cílem projektu je vyvinout a v praxi otestovat zařízení pro budoucí TV vysílání a funkčnost celého systému ověřit měřeními v terénu. Vyhodnocení celého projektu bude k dispozici po skončení testu.

Rádiová komunikace s kosmickými sondami

Prof. Ing. Miroslav Kasal, CSc.

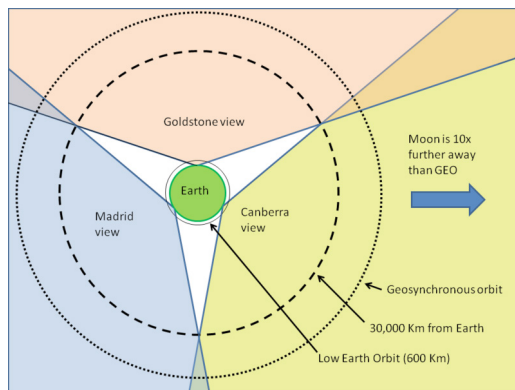
VUT v Brně, FEKT, Ústav radioelektroniky

Abstrakt

Rádiová komunikace v meziplanetárním a dnes již dokonce v mezihvězdném prostoru, patří ke špičkovým aplikacím současné radiotechniky. Komunikace probíhá v mikrovlnných pásmech s pozemním segmentem sítě DSN (*deep space network*), řízeným JPL v Pasadeně. Při prezentaci budou stručně popsány nejzajímavější projekty z tohoto hlediska – Voyager I a II, Cassini&Huygens, New Horizons, MRO – Curiosity a sondy v libračních bodech.

1. Pozemní segment sítě pro spojení se vzdáleným vesmírem

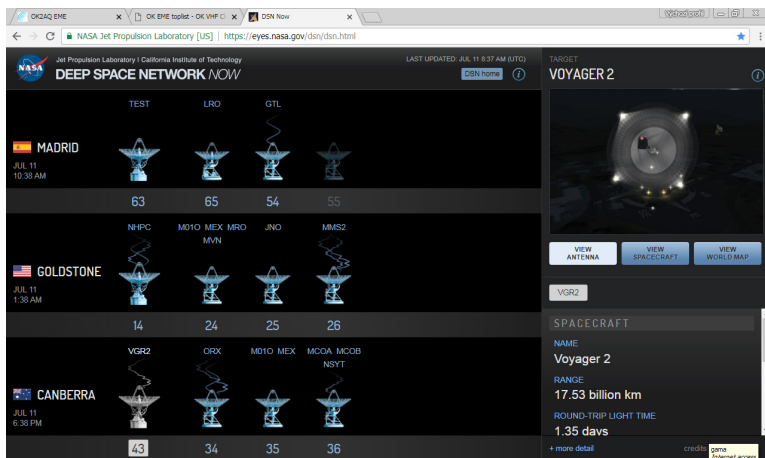
Pozemní segment sítě pro spojení se vzdáleným vesmírem DSN (*deep space network*) tvoří tři podobně vybavená pracoviště DSCC (*deep space communication complex*) v Goldstone (USA) s DSS14, 24, 25, 26, u Madridu DSS63, 65, 54, 55, a u Canberry v Austrálii DSS43, 34, 35, a 36. Jejich rozmístění je dáno požadavky na pokrytí „všech“ směrů, obrázek 1 [2] a samozřejmě požadavky na nerušený příjem extrémně slabých signálů přicházejících z kosmu. Každé ze tří pracovišť má čtyři DSS (*deep space station*) – lišící se číslem a vlastní anténou. První je s průměrem apertury 70 m a další tři až pět s aperturou 34 m (které postupně nahrazují antény s průměrem 26 m).



Obrázek 1: Pokrytí kosmického prostoru stanicemi DSN, zdroj: [2]

Řízení sítě přísluší JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) v Pasadeně. Touto Laboratoří je také realizována většina projektů sond k vzdáleným objektům ve vesmíru. Na webové stránce [1] můžete vidět aktuální stav, která DSS právě komunikuje a také se kterým vesmírným objektem, obrázek 2.

Komunikace probíhá většinou v pásmech L, S, X a v posledních letech i v Ka pásmu.



Obrázek 2: Aktivita sítě DSN, zdroj: [1]

DSS14, DSS63 a DSS43 – 70 m mají pro uplink vysílače 20kW pro pásma S a X. Jenom DSS43 má pro pásmo S ještě 400 kW vysílač. Pásma S/X jsou oddělena dichroickým zrcadlem a diplexery. Pro uplink i downlink se používají kruhové polarizace RHCP a LHCP. Přijímače jsou vybaveny kvalitními nízkošumovými zesilovači LNA. Do roku 2010 byly používány LNA s masery, které jsou nyní nahrazeny zesilovači s HEMTy, pro vyšší pásma X, Ku a Ka chlazené v kryostatech.

DSS s anténami 34 m jsou dvojího typu – BWG (*beam waveguide*) a HEF (*high efficiency*). Vývojově poslední jsou právě BWG – DSS35. DSS jsou koncipovány velmi flexibilně tak, aby bylo možné pro každou aplikaci zvolit optimální konfiguraci. Např. pracuje-li DSS momentálně na jednom pásmu, lze vyřadit diplexer pro dosažení nižší šumové teploty. Kromě DSN slouží DSS ve volném čase také pro radioastronomické účely a naopak do sítě DSN mohou být účelově zahrnuty i jiné radioteleskopy, je-li to potřeba.

DSS	pásmo				
	34 m BWG			70 m	
	S	X	Ka	S	X
zisk [dBi]	56,3/56,8	67,1/68,2	79,5/78,9	63,0/63,6	73,2/74,6
HPBW [deg]	0,263	0,077	0,016	0,128	0,038
výkon [kW]	20,0	20,0	0,8	20,0/400,0	20,0
EiRP [dBm]	128,7	139,6	138,2	135,6/148,7	145,8
š. teplota [K]	26,1	20,2	27,9	10,5	20,2
kmit. up [MHz]	2 110–2 118	7 149–7 188	34 315–34 415	2 110–2 118	7 149–7 188
kmit. dw [MHz]	2 200–2 300	8 400–8 500	31 800–32 300	2 200–2 300	8 400–8 500

Tabulka 1: Typické parametry DSS, zdroj: [3]

Stanice DSS komunikují s kosmickými objekty ve třech základních módech:

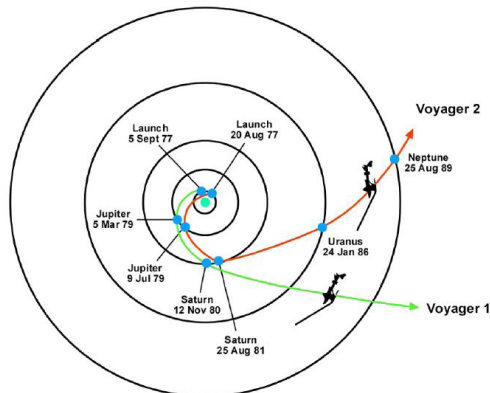
- radiometrická data – Doppler a Ranging,
- povelování s/c – stream, file, command delivery,
- demodulace a dekodování telemetrie.

2. Meziplanetární sondy

2.1 Voyager – mezihvězdná mise

Počátkem sedmdesátých let se přišlo na to, že v roce 1977 nastane situace v postavení vnějších planet sluneční soustavy, které umožní jednou sondou obletět Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Podobná situace nastane za 176 let. Během tří let byly proto na platformě sond Mariner připraveny ke startu sondy Voyager I a Voyager II, obrázek 4. A tak pět let po startu sond Pioneer 10 a 11 odstartovaly 20. srpna 1977 nejprve Voyager II a o šesnáct dní později Voyager I, obrázek 3. Je to bezesporu jedna z nejpovedenějších kosmických misí s přesahem do současnosti a snad ještě do dalšího desetiletí. Vzhledem k tomu, že obě sondy již opustily sluneční soustavu, jsou také velmi zajímavé z hlediska rádiové komunikace [4].

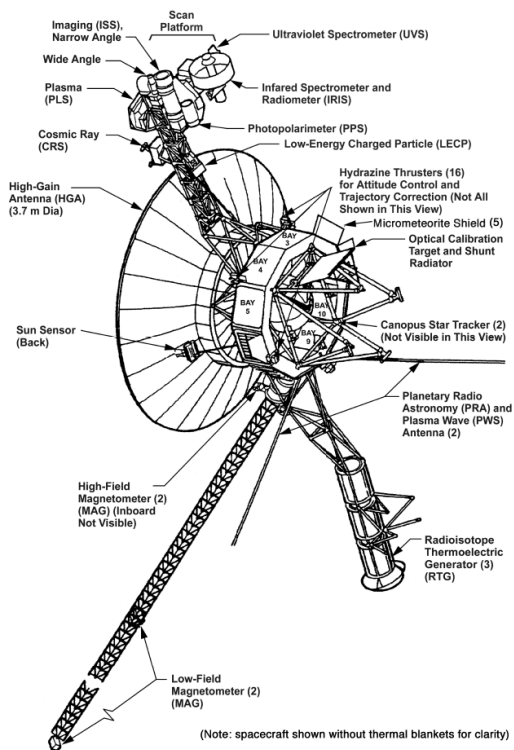
V době psaní tohoto příspěvku byl Voyager II vzdálen od Země více než 18 miliard kilometrů (120 AU), což představuje v pásmu S útlum 304,0 dB a pásmu X 316,1 dB. Doba odezvy sondy je 1,39 dne (33,36 hod.). S Voyagerem II komunikuje nyní pouze DSS v Canbeře, neboť není ze severní polokoule viditelný. Naopak Voyager I byl posledním manévrem nasměrován nad ekliptiku a komunikují s ním DSS v Madridu a Goldstone.



Obrázek 3: Trajektorie sond Voyager v meziplanetárním prostoru, zdroj: [4]

Některá zařízení, jako nízko-zisková anténa a S band downlink, byla použita jen na počátku mise. Frekvence pro S band uplink jsou 2114,676697 MHz (Voyager I), re-

spektive 2113,312500 MHz (Voyager II). Nosná může být nedomulovaná, modulovaná povelom nebo sekvencí pro ranging nebo oběma současně. Příjímač komunikačního transpondéru má fázový závěs, jehož zalokované VCO tvoří referenci pro downlink, který je pak koherentní s uplinkem. Pokud není VCO zalokované, je nosná pro downlink odvozena od USO (*ultra stable oscillator*) – ultra stabilní oscilátor 10^{-12} , který je navíc zálohován.



Obrázek 4: Sonda Voyager, zdroj: [4]

Modulace pro ranging – standardní DSN sekvence pro ranging je demodulována a zpětně namodulována na nosnou dowlinku v pásmu S nebo X nebo na obě. Transponder musí být v koherentním módu.

Povely – jsou modulovány na pravoúhlu subnosnou uplinku 512 Hz modulací BPSK 16 bps s kódováním Manchester.

Telemetrie – má dva nezávislé kanály. Nízkorychlostní kanál je modulován nekódovaně NRZ BPSK 40 bps. Vysokorychlostní kanál má modulační rychlosti od 10 bps do 115,2 kbps a je modulován kódovanými symboly s pevnou délkou ($k=7$,

$r = \frac{1}{2}$). Každý BPSK modulátor může modulovat subnosnou 22,5 kHz nebo 360 kHz (tu lze použít pro rychlosti větší než 7,2 kbps).

Nosné downlinku – pokud transponder pracuje v dvoucestném koherentním módu, jsou poměry frekvencí downlink/uplink 240/221 v pásmu S a 840/221 v pásmu X. V pásmu X jsou potom frekvence downlinku Voyager I 8420,432097 MHz a Voyager II 8415,000000 MHz. V nekoherentním módu se obě frekvence prohodí. Pro pásmo X mají obě sondy dva vysílače s TWT, z nichž jedna generuje RHCP a druhá LHCP vlnu.

Antény – high gain anténa se sestává z osově symetrického parabolického zrcadla o průměru 37 m a soustavy ozařovačů. V pásmu S je zisk 36 dBi RHCP a v pásmu X 48 dBi alternativně pro RHCP a LHCP. Low gain anténa je instalována pouze pro pásmo S a její zisk je 7 dBi. Byla použita hned po startu, než se sonda prostorově zorientovala. Po roce 1980 vzhledem k vzdálenosti sond již nedostačuje.

Jak se vyvíjejí komunikační parametry systému Voyager, je patrné z tabulky 2.

družice		Voyager I	Voyager II
elektrický zdroj		2023	2023
schopnost telemetrie	7 200 bps, 70/34 m pole HEF	1994	1998
	1 400 bps, 70 m	2007	2011
	600 bps, 70 m HEF	2026	2030
	600 bps, 34 m HEF	2003	2007
	160 bps, 34 m HEF	2024	2029
	40 bps, 34 m HEF	2050	2057
palivo pro korekci výšky		2040	2048

Tabulka 2: Odhad životnosti a komunikačních parametrů v průběhu let, zdroj: [4]

Aktuální energetická bilance S band uplink

$$Tx \text{ Power } 20 \text{ kW} = 33 \text{ dBW}$$

$$GT_{34} = 56,3 \text{ dBi}, EiRP = 89,3 \text{ dBiW}$$

$$GT_{70} = 63,0 \text{ dBi}, EiRP = 96,0 \text{ dBiW}$$

$$G_R = 36 \text{ dBi}, T_s 40 \text{ K} = 16 \text{ dB (K)} \quad G/T = 36 - 16 = 20 \text{ dBi/K}$$

$$f_s = 600 \text{ bps} = 27,8 \text{ dB (s)}$$

$$E_b/N_0 = Eirp - L_0 + G/T + 228,6 - f_s$$

$$E_b/N_0 = 89,3 - 304,2 + 20 + 228,6 - 27,8 = 5,9 \text{ dB (34 m)}$$

$$E_b/N_0 = 96,0 - 304,2 + 20 + 228,6 - 27,8 = 12,6 \text{ dB (70 m)}$$

Aktuální energetická bilance X band downlink

$$Tx \text{ Power } 18 \text{ W} = 12,5 \text{ dBW}$$

$$G_T = 48,0 \text{ dBi}, EiRP = 60,5 \text{ dBiW (high power)}$$

$$G_{R34} = 68,2 \text{ dBi}, T_s = 20,2 \text{ K} = 13,0 \text{ dB (K)} \quad G/T = 68,2 - 13,0 = 55,2 \text{ dBi/K}$$

$$G_{R70} = 74,6 \text{ dBi}, T_s = 20,2 \text{ K} = 13,0 \text{ dB (K)} \quad G/T = 74,6 - 13,0 = 61,6 \text{ dBi/K}$$

$$f_s = 600 \text{ bps} = 27,8 \text{ dB (s)}$$

$$E_b/N_0 = \text{Eirp} - L_0 + G/T + 228,6 - f_s$$

$$E_b/N_0 = 60,5 - 315,7 + 55,2 + 228,6 - 27,8 = 0,8 \text{ dB (34 m)}$$

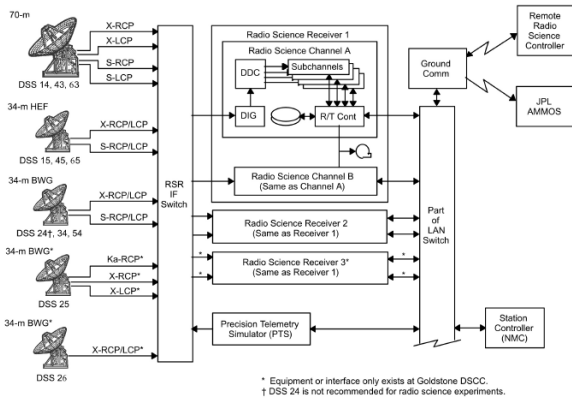
$$E_b/N_0 = 60,5 - 315,7 + 61,6 + 228,6 - 27,8 = 7,2 \text{ dB (70 m)}$$

V současnosti se řeší důležitý problém. Jak sondy stárnou, ochabují také jejich energetické zdroje. Každá sonda má tři radioizotopové termoelektrické generátory RTG. Samozřejmě nejdůležitější jsou komunikační systémy a polohová stabilizace sond, aby úzce směrová anténa mířila k Zemi. A tak se rozhodovalo, který přístroj, resp. jeho ohřev vypnout a část energie tak ušetřit. U Voyagera II byl tedy vypnut ohřev CRS (*cosmic ray subsystem*). Zatím stále pracuje, i když jeho teplota poklesla již na -59°C .

2.2 Cassini – Huygens

V roce 1997 byla vypuštěna sonda Cassini pro podrobný výzkum Saturnu. Cesta k Saturnu jí trvala 7 let s využitím gravitace Venuše (2×), Země a Jupitera v prvních třech letech. Sonda nesla modul Huygens, jenž měkce přistál na měsíci Titan s hustou uhlovodíkovou atmosférou [5]. Nakonec byla mise velmi úspěšná a podstatně rozšířila naše znalosti o této části vesmíru. Vlastní průběh mise byl však velmi dramatický. Uplink a downlink sondy Cassini se stanicemi sítě DSN pracoval v pásmu X a oba linky zajišťovaly všechny tři základní funkce (povelování, telemetrii a radiometrii). Kromě toho bylo úkolem sondy, přenášet na Zemi data z modulu Huygens vysílaná v pásmu S. V průběhu letu k planetě se však přišlo na to, že v návrhu modulu Huygens je fatální chyba. Radioelektronický systém v pásmu S sestupového modulu nedovoloval kompenzovat Dopplerův posuv tak, aby bylo možné zajistit synchronizaci pro demodulaci dat, které modul při sestupu atmosférou a po měkkém přistání na povrchu měsíce Titan měl vysílat. Není třeba zdůrazňovat, že nejzajímavější část mise byla vážně ohrožena. Po několika měsících úpěnlivých snah najít nějaké řešení bylo oznámeno, že se našlo. Dráha sondy Cassini byla změněna tak, aby v době sestupu sondy a její aktivní činnosti na povrchu Titanu byl relativní pohyb mezi sondou a modulem Huygens minimální a tím i Dopplerův posuv. Cenou za tuto změnu bylo vynechání velmi nízkého průletu nad Titanem (1 200 km), neboť nová oběžná dráha byla ve výšce 60 000 km.

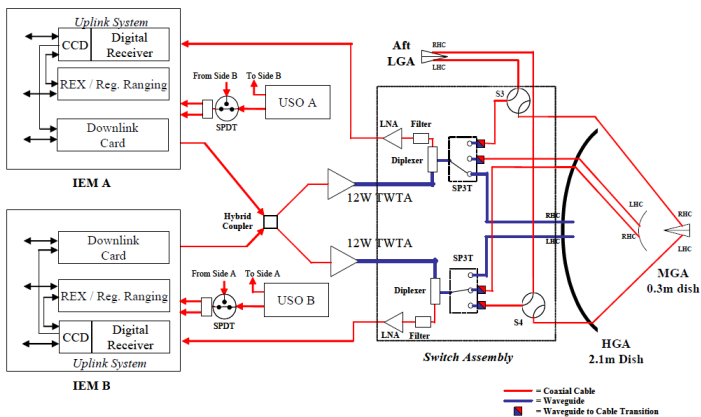
Typická konfigurace stanic DSN je na obrázku 5. Zatímco při pohybu po „vnitřní“ dráze používala sonda Cassini antény LGA, při pohybu po vnější dráze potom HGA s nutným zajištěním přesné orientace. V tomto případě byla standardně použita rychlost 500 bps s modulačním zdvihem 1,3 rad a 3 dB potlačenou nosnou. Downlink pro přenos telemetrie měl rychlost 14 220 bps s modulačním zdvihem 80° pro ranging 0,27 rad. Prahové hodnoty E_b/N_0 popř. P_r/N_0 byly stejné pro obě antény. Pro nekódovaný povelovací kanál s BER 10^{-5} je hodnota +9,6 dB a pro telemetrický kanál s konvolučním kódováním a BER $5 \cdot 10^{-3}$ pouze +0,31 dB.



Obrázek 5: Konfigurace stanic sítě DSN, zdroj: [5]

2.3 New Horizons

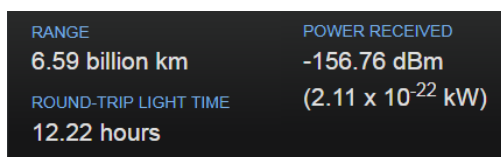
V současnosti je další nejvíce vzdálenou kosmickou sondou New Horizons, která byla po gravitačním urychlení Jupiterem poslána k Plutu a jeho největšímu měsíci Charonu [6]. Následně proletěla v lednu 2019 v blízkosti dalšího objektu v Kuiperově pásu planetek na samém okraji sluneční soustavy – 2014 MU69 Ultima Thule. Vzdálenost sondy při této komunikaci je 32 až 40 AU a signál se při ní vrátí asi za 8 až 10 hodin. Pozemní segment zajišťuje síť DSN. Samotná sonda je však poněkud odlišné koncepce, protože ji navrhla a realizovala Laboratoř Aplikované Fyziky Hopkinsovy Univerzity v Baltimore, MD. Blokové schéma je na obrázku 6.



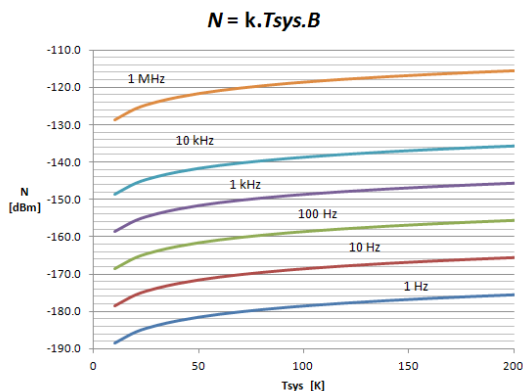
Obrázek 6: Blokové schéma sondy New Horizons, zdroj: [6]

Zvláštností je anténa se středním ziskem MGA sloužící především pro povelování a dále regenerativní ranging, který byl použit poprvé. Minimální přenosová rychlost je 600 bps. Komunikace probíhá v pásmu X na frekvenci uplinku 7 182 MHz a downlinku 8 438 MHz.

Parametry komunikace v srpnu 2019 jsou patrné z obrázku 7. Z aktivity sítě DSN jsme zjistili, že sonda New Horizons byla přijímána v Canbeře anténou 43 m ze vzdálenosti téměř 44 AU. Zpoždění odezvy signálu bylo 12,22 hod. a jeho úroveň (nosné) $-156,8$ dBm. Ekvivalentní šumová teplota systému SDN 43 v pásmu X je okolo 20 K, viz tabulka 1. Z grafu na obrázku 8 vyplývá, že stejná úroveň tepelného šumu je při šířce pásma 1 kHz. Pro poměr $SNR > 1$ musí být tedy šumová šířka pásma menší než 1 kHz a přenosová rychlost dosahuje deklarované minimální hodnoty 600 bps.



Obrázek 7: Vzdálenost a úroveň přijímaného signálu New Horizons 3. 8. 2019



Obrázek 8: Výkon tepelného šumu v závislosti na T_{sys} a B

2.4 Mars Odyssey a Reconnaissance Orbiter

Obě tyto sondy jsou orbitery Marsu a měly své předchůdce. Kromě řady přístrojů pro dálkový průzkum planety, slouží jako rádiová relé pro známá výzkumná vozítka Spirit a Opportunity a později Curiosity. Mars Reconnaissance Orbiter [7] umožňuje přenos dat na Zemi až 6 Mbps. Má 3 m zrcadlo a kromě pásma X umožňuje i komunikaci v pásmu Ka (32 GHz), která byla úspěšně demonstrována během letu k Marsu. Přenos se může uskutečňovat buď v reálném čase nebo z paměti (*store&forward*). Marsovská

voztíka komunikují s orbitery v pásmu UHF (400 MHz) ale mohou komunikovat pomalou rychlostí přímo se Zemí v pásmu X, především při povelování. Ve srovnání s předchozími sondami jde o komunikaci na „malé“ vzdálenosti asi 250 mil. km, kdy se signál vrátí na Zemi za 28 minut.

2.5 Sondy v libračních bodech

Lagrangeových libračních bodů soustavy Slunce – Země je pět a některé z nich se využívají pro umístění sond pro výzkum Slunce, především bod L1, který leží asi 1,5 mil km od Země na spojnici Země – Slunce. Na opačné straně od Země je ve stejné vzdálenosti L2, který zase umožňuje výhodné umístění sondy pro výzkum vzdáleného vesmíru, neboť je dokonale odstíněna od Slunce. V L1 je např. umístěna velmi úspěšná sonda SOHO [8], která byla vypuštěna v roce 1995 a pracuje do dneška. Problém rádiové komunikace se sondou v L1 spočívá v tom, že pozemní velmi směrové antény míří přesně do Slunce, které v oboru rádiových frekvencí velmi šumí a tato interference prakticky komunikaci znemožňuje. SOHO (a podobně další sondy) je proto navedena na eliptickou dráhu v rovině kolmé na spojnici Slunce – Země, přičemž bod L1 je v ohnisku této dráhy. Perioda oběhu je šest měsíců a umožňuje se sondou komunikovat prakticky nepřetržitě.

3. Závěr

Pokusili jsme se velmi stručně popsat systémy rádiové komunikace sítě DSN s těmi nejvzdálenějšími a také nejzajímavějšími objekty ve vesmíru právě z pohledu rádiového spojení s nimi. Vzhledem k rozsahu textu jsme ale celou řadu zajímavých projektů museli vynechat. Jmenujme alespoň projekt GALILEO k Jupiteru, první sondy MARINER, Rosetta&Philae nebo projekt STEREO. Na jedné straně jsou z pohledu rádiové komunikace podobné, protože také používají stejné technologie a zařízení DSS, které se však neustále zdokonalují. Na druhé straně nejzajímavější okamžiky nastávají, dojde-li k nějaké nepředvídané události jako výše popsany případ Cassini–Huygens nebo sondy STEREO-B [9]. Sondou se po hybernaci před konjunkcí se Sluncem nepodařilo probudit. Díky špatné orientaci solárních článků se nedobýjela baterie. Postupným odpojováním různých systémů sondy (na slepo) se podařilo snížit spotřebu natolik, že se baterie po téměř dvou letech zotavila a sonda začala vysílat a být ovladatelná. Takových situací je v kosmické komunikaci známa celá řada. Některé případy dávají vyniknout lidské inteligenci i neuvěřitelné náhodě.

4. Literatura

- [1] <<https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>>.
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_Deep_Space_Network>.
- [3] <<https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/>>.
- [4] <https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso4--Voyager_new.pdf>.

- [5] <<http://sci.esa.int/cassini-huygens/27650-esa-and-nasa-agree-a-new-mission-scenario-for-cassini-huygens/>>.
- [6] Ch. C. DeBoy, Ch. B. Haskins, T. A. Brown, R. C. Schulze, M. A. Bernacik, J. R. Jensen, W. Millard, D. Duven, S. Hill: The RF Telecommunications System for the New Horizons Mission to Pluto. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720)
- [7] <<https://mars.nasa.gov/mro/mission/overview/>>.
- [8] <https://www.nasa.gov/mission_pages/soho/index.html>.
- [9] <<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nasa-establishes-contact-with-stereo-mission>>.

Přístroje moderní radioastronomie

RNDr. Miroslav Bárta, Ph. D.

Astronomický ústav AV ČR, v. v. i., observatoř Ondřejov

Radiová astronomie, byť jde o relativně mladý obor, zažívá v posledních letech díky průlomům v technologiích, zejména digitálních, období nového obrovského rozkvětu. Přestože mediální pozornost přitahují především mamutí *single-dish* projekty, jako např. nedávno zprovozněný čínský radioteleskop FAST, momentálně největší na světě, daleko většího vědeckého průlomů bylo dosaženo v oblasti radiové interferometrie a aperturní syntézy s pomocí velkých anténních soustav složených z mnohem menších antén. Zejména rozšíření této metody do milimetrového (sub-THz) pásma spolu s postupným prodloužením délky základny až na globální škálu Země stojí za mnoha vědeckými úspěchy včetně toho dosud asi nejvýraznějšího, jímž je první zobrazení okolí horizontu černé díry v centru galaxie M87 zveřejněné v dubnu 2019. V příspěvku se tedy po úvodní přehledové partii zaměříme především na nyní aktuální doménu radiové (včetně mm/sub-mm) interferometrie, její fyzikální základy a přístroje, které na tomto principu pracují. Podrobněji se zastavíme zejména u mikrovlnné obří observatoře ALMA (*Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array*), která sehrála naprosto klíčovou roli i ve výše zmíněném zobrazení černé díry. Ne úplně všeobecně se ví, že ČR je v tomto mezinárodním projektu významně zastoupena – jeden ze sedmi uzlů infrastruktury *European ALMA Regional Center* (EU ARC) sídlí na Astronomickém ústavu AVČR v Ondřejově. Náš uzel má – mimo jiné – především v Evropě zcela unikátní expertizu pro sluneční výzkum s observatoří ALMA. Díky tomu vedl v letech 2014-17 evropskou účast v celosvětovém úsilí o vývoj specifického režimu pro sluneční pozorování (*solar ALMA Observing Mode*) a od roku 2017 koordinuje všechny evropské vědecké projekty zacílené na sluneční výzkum s observatoří ALMA.

1. Úvodem aneb „Na velikosti záleží...“

... tedy alespoň v radioastronomii. Klíčovými kvalitami radioteleskopu jsou totiž jeho:

- rozlišení,
- citlivost.

Rozlišení (populárně řečeno „zvětšení“), tedy nejmenší úhel, pod kterým nám dva blízké bodové zdroje nesplynou v jeden, je zhruba dáno poměrem λ/D , kde λ je vlnová délka přijímaného záření a D je charakteristický rozměr antény (např. průměr parabolického zrcadla) nebo anténní soustavy (délka spojnice – tzv. základny – dvou vzájemně nejdlehlších antén v soustavě). Protože vlnová délka je v radiové astronomii stále nejméně o tři řády větší než v oblasti optického pozorování, tlak na velikost antén nebo jejich soustav motivovaný zvýšením rozlišení je zřejmý. I druhý důležitý parametr, citlivost (nejmenší signál, který jsme ještě schopni detekovat nad tepelným šumem

přístroje, zemské atmosféry a dalších zdrojů pozadí), je vázán na velikost přístroje – jako rozhodující parametr do něj totiž vstupuje (efektivní) plocha antény (to aby-
chom pochytili co nejvíce fotonů ze zkoumaného zdroje) a ta samozřejmě také souvisí
s rozměry přístroje (a počtem prvků v případě anténních soustav). Honba za velikostí
radioastronomických přístrojů tedy není projevem nekompenzované megalomanie
astrofyziků, ale přirozeným vyústěním konfliktu mezi naší snahou o novou kvalitu
pozorování a omezeními, které nám v tom kladou přírodní zákony. Uspokojit tuto
touhu lze v zásadě dvěma způsoby: Stavbou obřích *single-dish* teleskopů, nebo jejich
náhradou velkými anténními soustavami. Obě varianty rozebereme v dalším.

2. Velké mísy

Obří parabolický reflektor (*single-dish*) je očividně to nejpřímočařejší řešení
a v mnoha aplikacích často i to nejefektivnější. Podobně jako u zrcadel optických
dalekohledů dochází i u radiových teleskopů k růstu jejich velikosti. Hlavní výhodou
těchto přístrojů je přímé zobrazení zdroje a tím i nepřítomnost různých artefaktů,
se kterými občas bojujeme v interferometrii (viz níže). Dosahujeme ho skenováním
rozložení radiového jasu zdroje na obloze hlavním svazkem antény. Čím je zrcadlo
větší (měřeno v počtu vlnových délek, které se vejdou do jeho průměru), tím je ten
„prst“, kterým oblohu osaháváme, tenčí a získaný obraz ostřejší (odborně řečeno: zís-
kaná radiová mapa je konvolucí skutečného rozložení jasu na obloze a radiometrického
tělesa antény). Zjevně inspirováni optickou astronomií začali radioastronomové zvy-
šovat efektivitu skenování umístováním celé plošné soustavy detektorů do ohniskové
roviny radioteleskopu (v analogii s CCD čipy optických dalekohledů), skenování je pak
rychlejší, protože se v jednom jeho kroku posouváme o násobek šířky hlavního svazku
antény. Příkladem může být *multi-feed* detektor ALFA skládající se ze sedmi elementů
umístěný na známém radio-teleskopu Arecibo v Portoriku. Další výhodou velkých
single-dish systémů je jejich velká citlivost dosažená obrovskou anténní plochou.
To je klíčové pro detekci slabých zdrojů (ze vzdáleného vesmíru) ale také pro pozoro-
vání s vysokým spektrálním rozlišením (např. velmi úzké čáry molekul mezihvězdné
hmoty) – vedle celkového počtu fotonů shromážděných anténou je totiž klíčovým
parametrem pro citlivost i šířka pásma, tedy kolik z těch všech fotonů lapených anté-
nou dopadne do daného frekvenčního intervalu. Čím užší jsou naše spektrální kanály,
tím více musíme tento „hlad po fotonech“ kompenzovat větší sběrnou plochou antény
(a/nebo střádáním signálu – prodlužováním pozorování, to ovšem jde jen u objektů
s dlouhou časovou škálou jejich vlastní dynamiky).

Budování mamutích *single-dish* radiových přístrojů – byť je z hlediska PR prezen-
tace velmi vděčné – má ale také svoje technické limity. Především, celkem přirozeným
požadavkem na teleskop je možnost jeho zacílení na prakticky libovolný objekt viditel-
ný na místní obloze. Velké přístroje jsou samozřejmě ale zároveň také těžké (a náchylné
na vliv větru) a je proto obtížné postavit je jako plně pohyblivé. Největšími plně pohy-
blivými anténami na světě tak zůstávají GBT (*Green Bank Observatory*), provozovaná

poslední roky americkou NSF, a radioteleskop německého Ústavu Maxe Plancka pro radioastronomii v Effelsbergu poblíž Bonnu, obě s průměrem hlavního zrcadla cca 100 m. Zdá se, že to jsou z mnoha důvodů přístroje svou velikostí na hranici technických možností a další vývoj v tomto směru se nepředpokládá. Trochu jiná situace je v oblasti milimetrových a pod-milimetrových vlnových délek, jejichž pozorování je náročné na přesnost tvaru antény. Dosavadní reflektory operující v této frekvenční oblasti byly historicky nesrovnatelně menší, nicméně technologický pokrok umožňuje jejich další růst až k anténám o rozměrech v desítkách metrů – např. třicetimetřový radioteleskop francouzského Ústavu pro milimetrovou radioastronomii (IRAM) poblíž Grenoblu, který sehrál roli významného bodu v globální VLBI síti milimetrové radioastronomie EHT použité pro zobrazení černé díry v galaxii M87 – o tom podrobněji na konci tohoto příspěvku. V tomto směru je významný i SPT (*South Pole telescope*), první světlo 2007, poslední upgrade 2017, postavený v nehostinné Antarktidě, který svou velikostí 10 m sice není příliš impozantní, ale doplňuje globální síť milimetrových VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) – viz oddíl 5 níže – přístrojů o další důležitou stanici.



Obrázek 1: Půlkilometrový radioteleskop FAST, současný největší *single-dish* přístroj na světě, zdroj: <http://fast.bao.ac.cn/en/>

Nicméně mediálně „nejpropíranější“ pokrok v posledních letech v oblasti *single-dish* přístrojů se jistě týká „čínského Areciba“ – radioteleskopu FAST (*Five hundred meter Aperture Spherical Telescope*), obrázek 1, o průměru zrcadla 500 m (s naráz osvětlenou plochou odpovídající anténě o průměru 300 m), dosud největšího dalekohledu „z jednoho kusu“ na světě, uvedeného do zkušebního provozu v létě 2016. Podobně jako dalekohled v Arecibu, s nímž je často srovnáván, je FAST přístroj s velmi omezenou pohyblivostí, který je možno zacílit na daný (a ne každý) objekt:

- pohybem detektoru v ohniskové rovině,
- částečnou změnou geometrie primárního zrcadla

- s využitím rotace Země, díky němuž se objekty v zorném poli střídají.

A stejně jako Arecibo také FAST využívá pro formování sférického tvaru svého zrcadla přírodní proláklinu. Na rozdíl od dalekohledu v Arecibu, který může fungovat i jako aktivní radar (což se využívá ve výzkumu blízkozemních asteroidů), FAST je klasickým, tedy pasivním radioteleskopem. Mezi jeho hlavní vědecké cíle patří výzkum pulsarů, rozložení mezihvězdného vodíku na čáře 1 420 MHz, molekul v mezihvězdném plynu, a počítá se i s jeho zapojením do sítí VLBI a programu pro hledání mimozemských civilizací SETI. Přístroj je dosud ve zkušebním provozu (*Commissioning and Science Verification*) a tak si na jeho první vědecké výsledky budeme muset ještě počkat.

3. Anténní soustavy: E pluribus unum

Toto motto ve státním znaku USA „Z mnohého jeden“ by si za své klidně mohla vzít i disciplína radiové a mikrovlnné interferometrie a aperturní syntézy. Jde vlastně o to, jak obejít výše popsaná omezení a nahradit *jednu* obří anténu soustavou *mnoha* vzájemně kooperujících antén. Myšlenka to vůbec není nová, ale k jejímu uskutečnění v kvalitě a rozsahu moderních radioastronomických observatoří nám až do nedávna chyběla jedna podstatná věc: dostatečně rychlá a výkonná digitální technologie, o tom ale až později.

Jak už to bývá, i tento nápad samotný má více cest realizace. Ta historicky první spočívá v konstrukci *fázovaných soustav* antén ve formě řídkých anténních řad (viz např. [11]), kombinovaných často kvůli rozlišení v obou směrech dvourozměrné nebeské sféry do tvaru křížů nebo písmene „T“. Signál ze všech antén spojených vlnovodem s přesně nastavenou délkou se *sčítá*, s fázovým zpožděním odpovídajícím pozici antény. Princip je podobný interferenční optické mřížce, kde také dochází k součtu signálů od jednotlivých vrypů. Sfázovaná anténní řada pak funguje jako jedna velká anténa. Šířka jejího hlavního svazku je opět řádu λ/D , nyní ale D reprezentuje nikoli rozměr jedné z antén ale délku celé řady (resp. její projekce do roviny kolmé k zornému paprsku), tedy vzájemnou vzdálenost krajních antén. Proč nám tedy nestačí jen tyto dvě krajní antény? Radiometrické těleso takové hodně řídké (dvouprvkové) soustavy by se skládalo sice z úzkého svazku, ale ten by se v prostoru periodicky opakoval s periodou jen $2\times$ větší, než je sama šířka svazku, dostali bychom tak zcela nejednoznačný obraz zdroje. Lze to jinými slovy říci i tak, že takový dvouprvkový systém má mnoho postranních laloků, stejně významných, jako ten hlavní. Právě antény uvnitř řady tyto laloky potlačí (čím více antén, tím lépe) a zůstane jen jeden dominantní svazek celé soustavy. Tím pak skenujeme nebe jako v případě *single-dish* antény. Naštěstí není nutné mít pro tento účel celou soustavu na nějaké obří pohyblivé platformě – skenování lze zařídit elektronicky vložением vhodného časově proměnného fázového zpoždění (úměrně vzdálenosti antény od referenčního centra soustavy) do jednotlivých vlnovodů antén a tím pohyb celé soustavy nahradit. Pokud nebazírujeme na tom, že všechny obrazové body (pixely) v naší radiové mapě jsou na přesně stejné frekvenci, lze obraz

složit i bez skenování s využitím toho, že poloha hlavního svazku fázované soustavy (s výjimkou polohy zdroje v paprsku kolmém na anténní řadu) je závislá na vlnové délce. Tento způsob byl před rekonstrukcí využíván např. ve slunečním radiovém interferometru SSRT (*Siberian Solar Radio Telescope*), obrázek 2. Ústavu pro výzkum slunečně-zemské fyziky ISTP v Badarech u Irkustka.



Obrázek 2: Část antén radioheliografu SSRT v Badarech před započítím rekonstrukce; v té době fungoval interferometr na principu zkřížených fázovaných anténních řad, s využitím multifrekvenčního svazku; nyní se přestavuje na přístroj s aperturní syntézou

Realizaci interferometrických anténních soustav pomocí fázovaných polí lze provést čistě analogově, a proto se využívala již od padesátých let 20. století [2, 11]. Anténní soustavy pracující na tomto principu jsou snadno rozpoznatelné podle své uspořádanosti do pravidelných (ekvidistantních) řad, proti nimž moderní přístroje pracující na principu *korelací*, jimž se budeme věnovat za okamžik, vypadají jako naprostý chaos designovaný avantgardním umělcem v extázi. Příkladem fázovaných řad je radiový interferometr ve francouzském Nancy nebo již zmíněný přístroj v sibiřských Badarech (obrázek 2). Nicméně i tento způsob má své slabší stránky. Především, pracujeme s analogovými frekvenčními filtry a obrazy se tak vytváří jen pro konečný (a to dost malý) počet diskretních frekvenčních kanálů s nepříliš úzkou šířkou pásma (tj. nemáme spektrální informaci, která je v astronomii velice podstatná). Rovněž skenování (syntetickým) svazkem soustavy, byť prováděné parametrickou změnou elektrických délek vlnovodů, je poměrně časově náročné a u dynamických objektů (typicky Slunce a jeho aktivita) z důvodu variace zdroje v průběhu skenu i značně problematické. S nástupem digitální techniky je tento způsob stále více vytlačován modernější metodou aperturní syntézy a interferometrických soustav s korelátorem, které tyto nedostatky nemají. Protože článek cílí na současnost a budoucnost radioastronomie, pojďme se přesunout k nim.

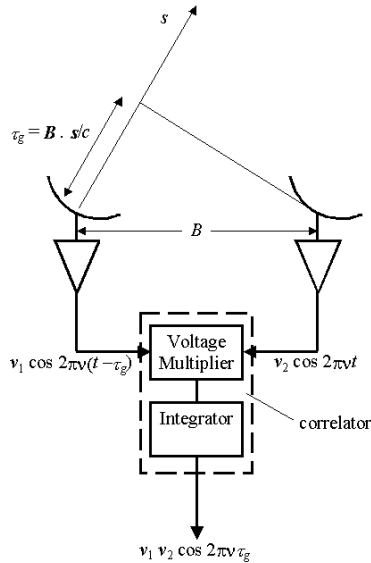
4. Moderní interferometrie/aperturní syntéza: Jak to funguje?

Tato metoda je založena na nepřímém zobrazení radiové mapy (tj. rozložení radiového jasu na obloze). V jejich základech stojí van Cittert-Zernikeův (vC-Z) teorém. Ten praví, že korelace, tedy (komplexní) *součin* (na rozdíl od *součtu* ve fázovaných polích) signálů z (každé) dvojice antén v soustavě zprůměrovaný přes několik (mnoho) vlnových period odpovídá za určitých (celkem vždy oprávněných) předpokladů jedné *Fourierovské komponentě* (prostorové 2D Fourierovy transformace) reálného obrazu, tedy radiové mapy (obrázek 3). Jaká je to komponenta (čili jaký je její vlnový vektor), to je určeno vzdáleností a orientací spojnice těchto dvou antén, tzv. základny (*baseline*). Čím delší je základna, tím vyšší je vlnové číslo fourierovské komponenty: dlouhé základny jsou tedy citlivé na malé škály v obraze, zatímco páry vzájemně blízkých antén nám poskytují informaci o prostorově pomalu se měnící složce obrazu. Máme-li v poli N antén, je možno vytvořit jejich kombinováním $Nx(N-1)/2$ různých párů a napočítat (pro každý frekvenční kanál zvlášť) stejný počet korelací, též zvaných *interferometric visibilities*. Přesněji řečeno, délku a orientaci základny je pro účely zjištění jejich souřadnic ve Fourierově prostoru třeba jako vektor promítnout do roviny kolmé k zornému paprsku. Jak se vlivem rotace Země zorný paprsek (a s ním i rovina kolmá k němu) mění, mění se i tyto projekce základen, to nám umožňuje při delším pozorování získat více fourierovských komponent a zajistit tak větší věrnost zobrazení (pokud se ovšem zdroj sám nemění rychle s časem). Tomuto způsobu se říká aperturní syntéza – pojem vychází z představy, že *celá oblast* pokrytá anténami je jedna velká apertura idealizované gigantické antény a protože je pokrytá dost na řídko, obraz z ní se skládá (syntetizuje) kombinací jednotlivých antén soustavy. Pro matematické fanoušky uvedme alespoň základní matematický vztah, na němž celá metoda stojí (vC-Z teorém, např. [1]):

$$V(u, v, w)e^{-i2\pi w} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y)I(x, y)e^{i2\pi(ux+vy)} dx dy . \quad (1)$$

Zde u a v mají význam souřadnic ve 2D Fourierově prostoru, který vznikne zobrazením reálné 2D radiové mapy na obloze Fourierovou transformací (FT). Jejich třetí komponenta w se uplatňuje jen výjimečně v případech opravdu velmi rozsáhlých objektů a souvisí s problematikou (ne specificky interferometrickou) volby vhodné projekce nebeské sféry do roviny; v drtivé většině případů, kdy deformace vzniklá „zplacněním“ malé části kulové plochy je zanedbatelná, lze položit $w=0$. $V(u, v, w=0)$ jsou *interferometric visibilities*, které získáme výpočtem dvou-anténových korelací signálu, $I(x, y)$ je reálná radiová mapa, tedy jas v závislosti na nebeských (úhlových) souřadnicích x a y , a $A(x, y)$ je směrový diagram (radiometrické těleso) antény vyjádřený anténní plochou (v tomto zjednodušeném vztahu se předpokládají všechny antény v soustavě stejné, ale interferometrie funguje dobře i s heterogenními poli). Jak je patrné, stačí v principu vzít tyto fourierovské komponenty obrazu – *visibilities* $V(u, v, 0)$ – použít inverzní FT (IFT), vydělit signál radiometrickým tělesem jedné antény $A(x, y)$ (tzv. *primary-beam correction*) a získat tak reálný obraz radiového zdroje

$I(x, y)$. Pro ty, kdo matematiku nemusí, se to pokusím převyprávět: FT představuje rozklad intenzity obrazu $I(x, y)$ jakožto funkce dvou proměnných do různých „sinusovek“ (vlnek s různou periodou, běžících různým směrem). Měření kombinací (korelací) signálů z každého jednoho páru antén (tj. základny) nám pak dává kuchařský recept na „váhu“, se kterou musíme sinusovku odpovídající této základně do výsledné směsi přimíchat, abychom „uvařili“ výsledný reálný obraz (viz např. [5]). Podobný přístup se využívá např. při kódování a kompresi obrázků ve formátu JPEG nebo v digitálním TV vysílání (kde se ovšem rozklad neprovádí do sinusovek, nýbrž do pravouhlých *waveletů*).



Obrázek 3: Měření dvouanténových korelací signálu – princip moderní interferometrie a aperturní syntézy; korelace měříme mezi každými dvěma anténami v poli, zdroj: D. Gary, NJIT <https://web.njit.edu/~gary/728/Lecture7.html>

Čistě teoreticky je tedy postup získání radiové mapy celkem přímočarý, potíže nastanou při bližším pohledu. IFT je totiž jednoznačná, pokud známe *všechny* komponenty obrazu, resp. při diskrétní reprezentaci alespoň s Nyquistovským vzorkováním. To je ovšem v praktickém případě dost vzdálené realitě. Například ALMA (viz níže), asi nejdokonalejší současný přístroj svého druhu na světě, získá svými padesáti anténami hlavního pole v jednom okamžiku, na jednom frekvenčním kanále a v jedné nezávislé polarizaci $50 \times 49/2 = 1225$ four. komponent obrazu. Přitom typický reálný obrázek z ALMA Band 3 (100 GHz) má velikost 256×256 pixelů, tedy cca $50 \times$ více „stupňů volnosti“, než máme fourierovských komponent. Pravda, pozorujeme (v Bandu 3) na celkem 512 frekvenčních kanálech od 93 GHz po 107 GHz, což každý

bod ve Fourierově prostoru (v radioastronomické hantýrce mluvíme o *uv-space*) protáhne do krátké úsečky (délka základny se totiž měří v násobcích vlnové délky) a pokrytí tak trochulepší. Pro časově stálé zdroje (třeba vzdálené galaxie) můžeme využít i rotace Země a s ní spojenou proměnnou projekci základen, což situacilepší mnohem výrazněji (z těch velmi krátkých úseček v *uv-space* mohou být i solidně dlouhé obloučky), nicméně deficit informace stále zůstává – velká část *uv*-prostoru se skví bílými místy. K neúplnosti naší informace přistupuje navíc ještě šum a další degradace, z nichž nejvýraznější je atmosférická turbulence (pro dlouhé vlny v ionosféře, pro ty krátké zas v troposféře), která vnáší do paprsků mířících od zdroje k různým anténám různá a časově náhodná fázová zpoždění. Rekonstrukce interferometrického obrazu (tj. vytvoření skutečné radiové mapy ze změřených *visibilities*) je tedy náročný proces na pomezí exaktní vědy a čistého šamanismu, který zahrnuje v zásadě tři fáze:

- *výběr dat* a vyloučení zjevně chybných bodů měření (*flagging*),
- *kalibraci*, neboli odstranění co možná nejvíce z vlivů přístroje a atmosféry pomocí pozorování srovnávacích radiových zdrojů (tzv. kalibrátorů), jejichž obraz se domníváme, že známe (nejčastěji jde o vzdálené bodové zdroje – kvasary), a to pseudo-simultánně se zkoumaným neznámým objektem,
- *Fourierovskou inverzi a čištění obrazu (imaging/cleaning)*, kdy nejprve známé four. komponenty interpolujeme na pravidelnou kartézskou mříž, provedeme IFT, čímž dostaneme tzv. *dirty image* s mnoha artefakty způsobenými neúplností informace v *uv*-prostoru, a ten následně *čistíme* – tedy snažíme se z něj iterativním způsobem vyextrahovat skutečnou radiovou emisi.

Proces čištění (škarohlíd by řekl, že jde o cucání chybějící informace z prstu) je založen na celkem plausibilních předpokladech o hustotě radiového toku jakožto funkci dvou proměnných, a existují pro něj různé algoritmy implementující různé modelové představy o zdroji – např. starší Hogbomův algoritmus *CLEAN* předpokládá, že zdroj se skládá z konečného počtu „bodových“ (ve skutečnosti nejde o body, ale o velmi malé objekty o velikosti tzv. syntetického svazku) komponent, a je vhodný spíše pro kompaktní zdroje, zatímco pro difuzní objekty se využívá jeho zobecnění *multi-scale clean* nebo metrika založená na entropii v obraze, kdy algoritmus se iterativně snaží dosáhnout jejího maxima (MEM) [1]. Celkově lze říci, že celý proces rekonstrukce obrazu od počátku do konce obsahuje spoustu větvících bodů náročných na rozhodování datového analytika (případně heuristického softwaru – *pipeline* a v budoucnosti snad i umělé inteligence – AI) a právě tento prvek do něho vnáší i tu špetku „magie“; zcela jistě ovšem vyžaduje poměrně velké zkušenosti a kus citu pro realitu (např. cca 20 % dat z produkce observatoře ALMA stále vyžaduje kalibraci/imaging s lidskou interakcí neboť heuristická *pipeline* na nich selhala a odpovídající AI nástroje dosud nejsou vyvinuty).

Ještě malá poznámka ke konfiguracím anténních soustav pro aperturní syntézu. Z principu je jasné, že potřebujeme co nejvíce nezávislých four. komponent a tedy

i co nejvíce různých základěn, které se liší délkou a/nebo orientací. Tomu ovšem pravidelné řady užívané ve fázovaných systémech ani trochu nevyhovují, např. každé dvě sousední dvojice antén v ekvidistanční řadě poskytují stejnou four. komponentu obrazu, mohou tedy maximálně zlepšit citlivost, ale jinak je jejich informace redundantní. Design interferomerních polí pro aperturní syntézu vypadá právě proto na první pohled velmi neuspořádaně (obrázky 4–6), nicméně je vyprojektován s velkým důmyslem právě s ohledem na optimální pokrytí (Fourierovského) uv -prostoru.

Přestože i princip aperturní syntézy je letitý (vC-Z teorém je starý prakticky jako sama radioastronomie, tedy zhruba 80 let), metoda se masivně rozšířila až v posledních letech. Proč je to tak? Počítání korelací, tedy časových integrálů z komplexních součinů dvou signálů (přičemž k jednomu z nich ještě přičítáme fázové zpoždění, které nám celý systém jakoby centruje na střed radiového zdroje – tzv. *phase center* z důvodů, které pro jednoduchost neuvádím – obrázek 3) stejně jako úzkopásmová fourierovská filtrace umožňující studium radiového záření s vysokým spektrálním rozlišením, si přímo říkají o digitální zpracování signálu. V případě vysokých frekvencí, jako je tomu u milimetrové (radio)astronomie¹, tak byt' samozřejmě používáme heterodynní příjem s *down*-konverzí, pohybujeme se stále v řádech jednotek GHz. Signál s proměnností na škále GHz si ovšem žádá i odpovídající rychlost vzorkování. V případě rozsáhlého anténního pole a mnoha frekvenčních kanálů pak vzorkování a výpočet korelací, zvláště na GHz a vyšších frekvencích, představuje náročný výpočetní problém, který zvládla teprve moderní digitální technika. Např. korelátor (superpočítač, který se o to stará) observatoře ALMA zabírá podstatnou část budovy horní části observatoře (AOS). Skutečné rozšíření metody aperturní syntézy do dnešní podoby je tedy neodmyslitelně spjata s průlomem v digitální technice posledních desetiletí. A jak to funguje prakticky? Antény v rámci observatoře jsou připojeny optickými kabely ke korelátoru. Po nich se do korelátoru šíří již zdigitalizovaný signál ze směšovače (v každé s antén), v němž se přijímané radiové záření mixuje s kmity místního oscilátoru (LO). Korelátor pak on-line (v reálném čase) počítá *visibilities*. Kabely zároveň slouží pro vzájemnou synchronizaci LO ve všech anténách pomocí zpětnovazební smyčky. Čistě digitální zpracování signálu má ale ještě jednu velkou výhodu: Antény ve skutečnosti vůbec fyzicky propojeny být nemusí! Pokud dosáhneme synchronizace LO v jednotlivých anténách jiným vhodným způsobem – např. pomocí atomových hodin – je možné digitalizované signály z jednotlivých antén s vypálenými časovými značkami nahrát zvlášť a v superpočítači vyčíslit jejich vzájemné korelace až off-line, *ex post*. Tento způsob se využívá pro vzájemně velmi vzdálené stanice (i mezikontinentálně), mluvíme pak o interferometrii s velmi dlouhou základnou – VLBI. Pojdme se teď podívat na moderní přístroje, které metodu aperturní syntézy (AS) využívají, ať už jsou synchronizovány a korelovány fyzickým propojením nebo pomocí VLBI.

¹ Zde si neodpustím malou vsuvku: Někteří autoři (např. [12]) se dokonce zdráhají řadit oblast pozorování na mm vlnách do radioastronomie. Nicméně ve smyslu oblíbených operacionalistických definic ve fyzice typu „radioastronomie je když ... na něco namíříme anténu a hodnotu měříme voltmetrem“, do ní i mm astronomie jistě patří.

5. Současné interferometrické soustavy pro AS

Následující stručný výčet současných a plánovaných přístrojů pro AS je pouze ilustrativní. Je velmi neúplný a otevřeně přiznávám, že i silně tendenční, protože jakožto sluneční fyzik a radioastronom mám samozřejmě sklony k preferování přístrojů dedikovaných pro pozorování Slunce (nebo ho aspoň umožňující), z nichž mnohé jsem měl příležitost navštívit. Snad i čtenář ocení, že díky tomu zmíním i jiné přístroje, než ty notoricky známé. Stručný popis těch dalších lze nalézt např. v [13, 14].

5.1 FASR & EOVS

FASR (*Frequency-Agile Solar Radiotelescope*) je nebo – nebo spíše byl – nerealizovaný projekt spektro-interferometru založeného na multikanálové aperturní syntéze. Rozsahem frekvencí 0,03–30 GHz by byl pokrýval prakticky celou sluneční atmosféru od dolní chromosféry po vnější korónu (dominantní vyzařovaná frekvence se totiž mění s hustotou plazmatu, tedy i s výškou ve sluneční atmosféře). Nejdlejší základna byla plánována na 6 km. Tomu odpovídající mezní rozlišení (při 30 GHz) je 0,3" (úhlové vteřiny). Projekt byl navržen radioastronomickou skupinou na New Jersey Institute of Technology (NJIT) a zpočátku velmi dobře hodnocen, s vysokými nadějemi na realizaci. První měření měl poskytovat již v roce 2008 – stal by se tak prvním přístrojem poskytujícím multi-frekvenční radiové mapy Slunce s vysokým spektrálním rozlišením. Bohužel, jak již bylo uvedeno, celý projekt zůstal pouze na papíře a k jeho realizaci v plném rozsahu nedošlo. Naštěstí byl v posledních letech alespoň částečně oživen v nově rekonstruovaném *Expanded Owens Valley Solar (radio) Array* (E-OVSA, 3–18 GHz, max. základna 3 km) patřícím rovněž institutu NJIT.

5.2 SSRT

SSRT (obrázek 2) je již zmiňovaný radioheliograf Ústavu slunečně-zemské fyziky v ruském Irkutsku. Dosud fungoval jako dvojice ekvidistantních anténních řad ve tvaru kříže v severo-j jižním a východo-západním směru na frekvenci 5,7 GHz. Mezi moderními přístroji ho znovu zmiňujeme proto, že v současnosti prochází rozsáhlou přestavbou na systém aperturní syntézy (kvůli tomu se zásadně mění i konfigurace celkem 256 antén, z nichž se systém skládá) a dojde i k rozšíření počtu frekvencí, na kterých přístroj pozoruje. Je ukázkou přechodu z fázovaných soustav k aperturní syntéze, ke kterému v posledních letech dochází.

5.3 MUSER

MUSER (*Mingantu Spectral Radioheliograph*) na obrázku 4 je rovněž přístroj poskytující radiové mapy Slunce na mnoha frekvenčních kanálech; máme tedy k dispozici plnou informaci jak o prostorovém tak spektrálním rozložení radiové emise. Krom toho, díky relativně silnému signálu ze Slunce a kvůli jeho variabilitě, bude přístroj disponovat i solidním časovým rozlišením. Uživatelé tak budou mít k dispozici hustou časovou řadu 3D datových kostek. MUSER se ve skutečnosti skládá ze dvou podsystémů:

nízkofrekvenčního (400–2000 MHz) a vysokofrekvenčního (2–15 GHz) interferometrického pole. Nízkofrekvenční část sestává z čtyřicítky parabolických antén, každá o průměru 4,5 m, vysokofrekvenční pole je tvořeno šedesáti dvoumetrovými anténami. Maximální základna pro aperturní syntézu je 3 km, což dává mezní rozlišení 10" pro nízkofrekvenční a 1,4" pro vysokofrekvenční část. Přístroj, který staví Skupina sluneční radioastronomie Národní astronomické observatoře Čínské akademie věd (NAOC) poblíž města Zhengxianbaiqi v provincii Vnitřní Mongolsko je momentálně v podstatě dokončován a poskytuje již první data, která ovšem slouží pouze k technickému ověření funkčnosti a „ladění“ přístroje (tzv. *commissioning*). Na první vědecká data si tedy ještě nějakou chvíli počkáme.



Obrázek 4: Centrální část spektro-radioheliografu MUSER v horské stepi v čínské provincii Vnitřní Mongolsko; budova v pozadí ukrývá i srdce přístroje – dedikovaný rychlý počítač/korelátor

5.4 GMRT

GMRT (*Grand Meterwave Radio Telescope*) je nedávno dokončený interferometr založený na aperturní syntéze a provozovaný Národním ústavem pro radiovou astrofyziku (NACR TIFR) v Khodadu u Pune v Indii. Nemá sice detailní spektrální rozlišení, ale v metrovém pásmu vlnových délek poskytuje obrazy na celkem šesti ne velmi vzdálených frekvencích 50, 153, 233, 325, 610 a 1 420 MHz. Tím tuto oblast pokrývá celkem dostatečně. Nejdelší základna je 25 km, poskytující mezní rozlišení 2" při 1,42 GHz. Přístroj není dedikován pro sluneční pozorování, přesto se občas k pozorování Slunce používá.

5.5 LOFAR

LOFAR (*Low Frequency Array*) je velký, poměrně nedávno (do provozu oficiálně uveden v prosinci 2012) dokončený interferometr pracující na relativně dlouhých radiových vlnách v rozsahu frekvencí 10–240 MHz. Byl vybudován mezinárodním

konsorciem evropských zemí a jeho antény jsou rozmístěny na území bezmála celé západní a střední Evropy, na ploše jejíž lineární rozměry přesahují 1 000 km. Nyní je pod názvem *LOFAR2* v běhu projekt jeho rozšíření, o vstupu do konsorcia a vybudování jedné ze stanic na území ČR (zatím zcela nezávazně) uvažují i ústavy Akademie věd. Přístroj poskytuje velmi dlouhé základny a pracuje na principu VLBI. Synchronizace LO ve vzdálených stanicích se u LOFARu realizuje s využitím dedikovaných širokopásmových internetových propojení. Tento systém se ovšem používá pro komunikaci mezi vzdálenými anténami (tj. pro dlouhé základny, které poskytují Fourierovy komponenty pro krátké škály v obraze), samotná „hnízda“ antén na jednotlivých stanicích mají mnohem kratší základny (zobrazují tedy střední a dlouhé prostorové škály radiového zdroje) a jsou vzájemně propojena standardními vlnovody. Primárním cílem přístroje sice není pozorování Slunce, nicméně jedna ze šesti klíčových vědeckých oblastí pokrytá projektem LOFAR má název „Sluneční fyzika a kosmické počasí“.

5.6 NOEMA

NOEMA (*Northern Extended Millimeter Array*) je menší sestřička observatoře ALMA (jíž je věnován rozsáhlejší text níže) vybudovaná a provozovaná již citovaným Ústavem pro milimetrovou radioastronomii (IRAM) ve francouzském Grenoblu (tento ústav je společným projektem francouzské CNRS, německé MPG a španělského IGN). Samotná observatoř je umístěna na Plateau-du-Bure ve Francouzských Alpách. Jde o živý, stále se rozšiřující projekt – v současnosti je vybavena dvanácti anténami o průměru 15 m umístěných na železniční trati, což umožňuje proměnnou konfiguraci celého pole s největší základnou 1,6 km. Pozoruje severní oblohu (nedosažitelnou z Almy) v oblasti mm vlnových délek 70–370 GHz.

5.7 (E)VLA

(E)VLA (*Expanded Very Large Array*) je velmi známý interferometr v americkém Novém Mexiku („zahrál si“ i v několika hollywoodských sci-fi filmech), procházející nyní rozsáhlou modernizací (VLA → EVLA). Pracuje v pásmu 1–50 GHz a výborně tak doplňuje pozorování nízkofrekvenčního pole LOFAR a vysokofrekvenční observatoře ALMA. Antény (E)VLA spolu s dalšími devíti radioteleskopy v USA (např. již zmíněné GBT a Owens Valley) mohou kooperovat v rámci VLBI interferometrie, celá soustava se pak nazývá VLBA (*very long baseline array*).

5.8 SKA

SKA (*Square Kilometer Array*) na obrázku 5 je zatím hudbou budoucnosti. Tento mezinárodní projekt, pokud bude realizován, přinese podle plánů první vědecká data až po roce 2023, jeho úplné dokončení je plánováno na rok 2030. Po zkušenostech s budováním observatoře ALMA lze ale asi bezpečně říci, že v případě takto gigantického projektu dojde nejspíše k určitému zpoždění – což je u průkopnických projektů, nasazujících dosud nevyzkoušenou novou technologii, spíše normální. Kromě nepřed-

stavitelné citlivosti přístroje dané celkovou efektivní sběrnou plochou antén cca 1 km^2 (odtud i název přístroje) by observatoř SKA dosahovala i bezprecedentního rozlišení – její antény mají totiž být rozmístěny na dvou kontinentech, v Jižní Africe a v Austrálii a na Novém Zélandu. Samozřejmostí je proto použití technologie VLBI pro vzájemnou korelaci mezikontinentálních antén. Nutnou synchronizaci by v tomto případě měly opatřit atomové hodiny. SKA by mělo pokrývat poměrně velký a spojitý rozsah frekvencí od 50 MHz až po 14 GHz (s plánem na rozšíření do 30 GHz). Protože ideální parametry antén se v tak širokém intervalu mění, bude celé pole realizováno jak dva podsystémy pro dlouhé a pro střední+krátké vlnové délky (plus doplňkové menší *survey array*). Ani v tomto případě není primárním cílem pozorování Slunce, nicméně jeden z vědeckých programů nazvaný „Kosmický magnetismus“ implicitně počítá i s výzkumem magnetických polí Slunce tímto přístrojem (čeští sluneční radioastronomové jsou zapojeni do příslušné mezinárodní pracovní skupiny). Pokud bude tento projekt skutečně v plném rozsahu realizován, přinese pravděpodobně další převrat v astrofyzice. Pole SKA už má své menší „předskokany“, na nichž se testují technologie projektované pro použití ve větším měřítku na SKA – jde o interferometrické soustavy MeerKAT v Jihoafrické republice a MWA (*Murchinson Widefield Array*) v Austrálii.



Obrázek 5: Umělecká představa rozmístění antén vysokofrekvenční části plánovaného mamutího interferometru Square Kilometer Array (SKA) v polopoušti jižní Afriky, zdroj: Wikipedia

6. ALMA

Observatoř ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) na obrázku 6 si svým významem jak z hlediska nedávných objevů tak i přímé účasti ČR na tomto projektu jistě zaslouží samostatný oddíl.

ALMA je projekt interferometrické soustavy (AS) pro příjem radiových vln milimetrových a submilimetrových délek, rozkládajících se na ploše téměř 200 km^2 . Je vybudovaný a provozovaný společným úsilím Evropské jižní observatoře (ESO),

americké National Radio Astronomy Observatory (NRAO) a japonské National Astronomical Observatories of Japan (NAOJ) v chilské poušti Atacama v nadmořské výšce 5000 m, na jednom z nejušších míst světa, kde absorpce přicházejícího záření v plynech zemské atmosféry (zejména ve vodní páře) ruší pozorování co nejméně. Stala se klíčovým přístrojem astrofyzikálního výzkumu nejméně pro celou následující dekádu. Vedle objektů vzdáleného vesmíru, pro jejichž studium byl teleskop primárně navržen, se nyní věnuje i výzkumu naší nejbližší hvězdy – Slunce; více o slunečních pozorováních a významném příspěvku ČR k jejich přípravě a realizaci uvádím níže. Z mnoha hledisek lze říci, že ALMA zahajuje novou éru v pozorovací astronomii. Nejenže prakticky otevírá úplně nové pozorovací okno v oblasti THz frekvencí, ale poskytuje i bezprecedentní prostorové a frekvenční rozlišení ve dvou nezávislých polarizacích a díky velké celkové sběrné ploše antén disponuje dosud nebývalou citlivostí. Od roku 2013 je ALMA oficiálně v plném provozu. V současnosti probíhá již šestý řádný pozorovací cyklus. Podat vědecký projekt na pozorování s ALMA může (a zdarma!) prakticky kdokoli – stačí si zřídit účet na *ALMA Science portal*. Návrh je pak mezinárodní odbornou komisí přísně posuzován z hlediska vědecké kvality a technické proveditelnosti a projekty, které v soutěži o pozorovací čas uspějí, jsou schváleny k realizaci. Nicméně, i přes oficiální zahájení provozu rozvoj observatoře ALMA dále pokračuje. Jsou vyvíjeny nové módy pozorování, mimo jiné např. pozorování Slunce s využitím dlouhých základen. Vedle toho se postupně rozšiřuje rozsah frekvencí, ve kterém ALMA operuje a po roce 2020 se počítá i s významnou technologickou obměnou hardwaru. Předmětem vážných úvah je i rozšíření nejdelších základen ze stávajících 16 km na dvojnásobek. Čili projekt je stále živý a trvale „ve výstavbě“.



Obrázek 6: Pohled na centrální část anténního pole observatoře ALMA na Chajnantor plateau ve výšce 5 100 m n. m.

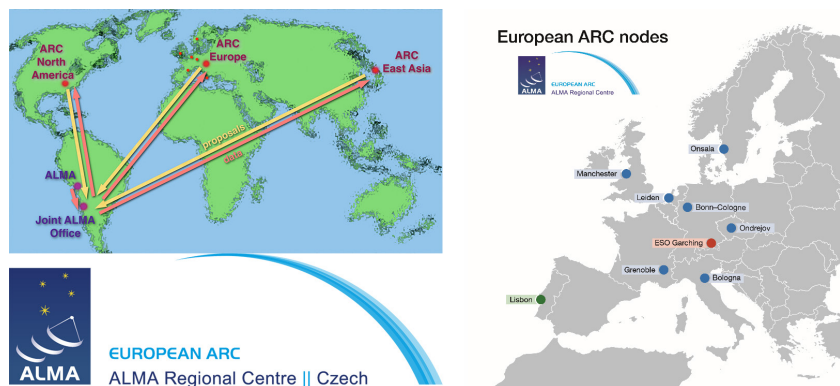
Design observatoře ALMA není úplně jednoduchý. Je to anténní soustava 66 velmi přesných antén s parabolickým reflektorem. Z nich 50 o průměru 12 m tvoří tzv. *hlavní pole*. Doplňuje je systém dvanácti sedmimetrových antén – ten tvoří speciální podsyst-

tém celé soustavy, tzv. ACA (*Atacama Compact Array*). Jak název napovídá, obsahuje ACA pouze krátké základny (to proto je složen z menších antén, které lze natěsnat blíže k sobě) a je díky tomu citlivý na delší prostorové škály. Spolu s větším zorným polem (šířkou svazku jednotlivé antény) je proto předurčen ke zobrazování větších škál u rozsáhlejších objektů. Objekty ještě větší, než je primární svazek sedmimetrové antény, by ale stále nebyly zobrazeny věrně – z toho důvodu je celý systém doplněn ještě čtyřmi 12 m anténami umístěných na montáži umožňující rychlé skenování jejich hlavním svazkem a vybavených zařízením pro absolutní kalibraci signálu. Tomuto doplňkovému sub-systému se říká *Total power array* (TP). Antény hlavního pole ALMA jsou umístěny na železobetonových plošinách, kterých je asi 3× více, než je antén. To umožňuje měnit s časem konfiguraci celého interferometru od kompaktní až po nejvíce rozlehlou, u které nejdelší základna dosahuje délky 16 km. Proměnná konfigurace soustavy se využívá kvůli různým nárokům výzkumných projektů: některé vyžadují velké prostorové rozlišení a přitom jim stačí malé zorné pole – ty pak využívají rozlehlou (*extended*) konfiguraci. Naopak pro projekty s jinými nároky než je extrémní prostorové rozlišení (např. hustší *uv* pokrytí) je vhodnější sevřená (*compact*) konfigurace. Celé pole tak v průběhu ročního pozorovacího cyklu „dýchá“. ALMA, kromě toho že pracuje jako velice citlivý interferometr, poskytuje i velmi vysoké spektrální rozlišení. Neměří totiž na jedné frekvenci, ale je (resp. po úplném dokončení bude) schopna pracovat v širokém rozsahu vlnových délek od 0,25 mm po 5 mm. Tento široký spektrální rozsah je z praktických důvodů rozdělen do jedenácti pásem (*bands*), zvolených tak, aby pokud možno co nejvíce eliminovaly vliv absorpce v zemské atmosféře a přitom umožnily pozorování nejzajímavějších molekulárních čar ve vesmíru. ALMA má možnost pozorovat s frekvenčním rozlišením až 30 kHz, což je při pozorovaných frekvencích v řádu stovek GHz přesnost skutečně pozoruhodná. Data jsou ukládána v hlavním archivu v Chile a zrcadlena na serverech v sídlech regionálních center ALMA (ARCs – podrobněji budou zmíněna za chvíli). Datová politika je taková, že jeden rok po napozorování jsou data chráněna pro výzkumný tým, který daný úspěšný projekt navrhl. Po uplynutí této lhůty jsou data k dispozici všem. ALMA ale zdaleka není jen vlastní soustava antén v poušti a několik jí obsluhujících operátorů. Tento složitý systém sloužící celosvětové komunitě astrofyziků a pozorující kolem tisícovky vědeckých projektů ročně by nemohl fungovat bez své podpůrné infrastruktury. Tu tvoří globální síť ARCs (*ALMA Regional Centers*).

6.1 Regionální centra ALMA a česká účast v projektu

Jak již bylo řečeno, přístroj ALMA vznikl v mezinárodní kooperaci evropské ESO, americké NRAO a japonské NAOJ, ve spolupráci s Chile. Tomu odpovídá i struktura organizace, která pozorování s ALMA zabezpečuje. Kromě sdílené a relativně malé JAO (*Joint ALMA Observatory*), jež má na starosti samotné vědecko-technické operace přímo v Chile, ji tvoří i celosvětová obslužná infrastruktura zahrnující tři regionální centra – ARCs (*ALMA Regional Centers*): evropské, vytvořené kolem ESO (EU ARC),

severoamerické se sídlem v NRAO (NA ARC) a východoasijské zformované kolem NAOJ (EA ARC) – struktura je znázorněna na obrázku 7. Jedním z cílů těchto center je i přímá účast na dalším rozvoji přístroje ALMA – podílí se např. na vývoji a testech obslužného softwaru ALMA OT a CASA nebo v rámci *Development studies* navrhují a zkoumají nové pozorovací režimy observatoře. Nicméně, jejich hlavním úkolem je uživatelská podpora výzkumníkům, kteří chtějí s observatoří ALMA pozorovat. Tato podpora sahá od pomoci s přípravou projektu v nástroji *ALMA Observing Tool*, přes asistenci s konverzí dat v návrhu na pozorování do pozorovacího programu (ruční úpravy sekvence *Scheduling Blocks*), v případě projektů orientovaných na výzkum Slunce jde u českého uzlu (viz níže) i o koordinaci zařazení evropských projektů do fronty a naši přímou účast na pozorování v roli asistenta pro *Astronomer on Duty* (fyzicky nebo přes telemost), až po kalibraci, imaging a kontrolu kvality napozorovaných dat (tzv. QA2 procedura) a následném předání kalibrovaných a rekonstruovaných obrazů (v ALMA hantýrce zvaných *products*) výzkumnému týmu – zadavateli. Podpora je poskytována vždy na osobní bázi – v příslušném ARCu (nebo jeho uzlu) je určen CSS (*Contact Support Scientist*), který tuto službu pro daný realizovaný projekt poskytuje. Lze tedy říci, že infrastruktura ARC funguje jako oddělení pro příjem a předzpracování zakázek a zároveň dílna pro finální zpracování produktu, kontrolu jakosti a výdejní sklad. Operátoři JAO v Chile se tak soustředí na vlastní pozorování podle programů SBs (*scheduling blocks*), které se generují strojově z formulářů úspěšných návrhů na pozorování a v případě potřeby jsou ručně doladěny na některém z ARCů nebo (v Evropě) uzlů EU ARC.



Obrázek 7: Celosvětová infrastruktura tří ALMA Regionálních center (ARC) – EU ARC, NA ARC a EA ARC, a detailní pohled na sedm uzlů evropské sítě EU ARC, jeden z nichž je na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově, zdroj: ALMA/EU ARC

Samotný evropský ARC (EU ARC) nemá monolitickou strukturu, ale vedle koordináčního centra, které sídlí v budově ředitelství ESO v Garchingu u Mnichova (SRN), jsou jeho funkce distribuovány do sedmi uzlů – tzv. *ARC nodes* (a jednoho *Centra exper-*

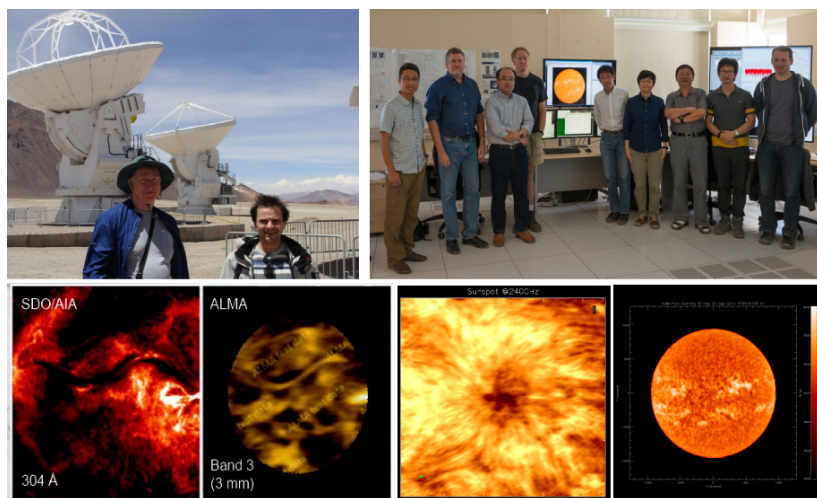
tizy/CoE, jakéhosi čekatele na plnoprávný uzel v Lisabonu) – viz obrázek 7. Jeden z uzlů evropského ARCu sídlí od roku 2009 na observatoři Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově. Od roku 2015 pak požívá status jedné z cca padesáti *Výzkumných infrastruktur ČR*. Český ARC node poskytuje expertizu v oblastech galaktické a extragalaktické astronomie, fyziky akrečních disků a hvězdných obálek. V těchto oborech poskytuje podporu uživatelům z celého širšího regionu střední a východní Evropy – západoevropští uživatelé totiž najdou podobnou expertizu na některém z jim geograficky bližších uzlů. Naše nejsilnější stránka ovšem je v celé Evropě jedinečná expertiza pro pozorování Slunce s observatoří ALMA – další centra s podobným zaměřením existují ve světě už pouze na East Asian ARC v Tokiu-Mitace a North American ARC v Charlottesville v USA. Díky této v rámci EU ARC unikátní odbornosti zpracováváme a podporujeme všechny evropské sluneční projekty a zásadním způsobem jsme přispěli k tomu, že ALMA vůbec Slunce pozorovat umí. Když už jsme toto téma nakousli, tak si o něm řekněme trochu více.

6.2 ALMA a pozorování Slunce

Na přelomu roku 2016/2017 byl po více než dvou letech vývoje schválen a zařazen do programu standardních vědeckých pozorování observatoře ALMA její speciální režim určený pro pozorování Slunce – tzv. *ALMA Solar Observing Mode*. Na tomto úspěchu se významně podíleli i pracovníci českého uzlu, kteří v tomto celosvětovém úsilí vedli a zastupovali celou evropskou účast. Tři z celkem devatenácti členů mezinárodního *Solar ALMA Development Team* (kromě českého uzlu EU ARC se zúčastnili pracovníci z ESO, severoamerické NRAO, a japonské NAOJ a samozřejmě z observatoře ALMA) jsou pracovníci českého ALMA centra. Někteří další výzkumníci z tohoto týmu pak s českým uzlem ARC externě spolupracovali v rámci projektu *ALMA Development Study: Solar Research with ALMA*, jehož řešení svěřilo ESO právě ondřejovskému pracovišti.

Vědecké cíle pro pozorování Slunce s observatoří ALMA byly definovány již v projektovém návrhu observatoře a jejich dosažení je skutečně lákavé: ALMA by mohla např. zodpovědět dlouhotrvající otázku ohřevu horních vrstev sluneční atmosféry nebo ukázat skutečnou jemnou strukturu protuberancí a pomoci s měřením slunečního magnetismu. Nicméně, na cestě k realizaci vědeckého studia Slunce s teleskopy ALMA museli vývojáři z mezinárodního týmu překonat řadu překážek a navrhnout řešení pro „zvláštnosti“, kterými se Slunce liší od jiných cílů výzkumu observatoře – především nesouměřitelně vyšší jas v oblasti milimetrových vln oproti srovnávacím objektům (tzv. kalibrátorům), které ALMA pozoruje spolu s vědeckým cílem v rámci jednoho časového bloku, nebo například fakt, že Slunce se má v důsledku oběhu (a rotace) Země mezi hvězdami svůj vlastní pohyb, který se navíc ještě sčítá s pohybem cílových objektů (např. filamentů nebo skvrn) na Slunci samotném v rámci složité dynamiky sluneční atmosféry, jejímiž hlavními složkami jsou diferenciální rotace a meridionální cirkulace. Nicméně, všechny problémy se týmu podařilo postupně

překonat a navržená řešení otestovat přímo na místě na ALMA OSF v Chile v rámci testovacích pozorovacích kampaní CSV (*Commissioning and Science Verification*), dvou z nich (v prosinci 2014 a 2015) se zúčastnili i pracovníci českého uzlu (obrázek 8). Ti se, vedle testování a on-line zpracování dat z kampaní přímo na místě, podíleli i na optimalizaci parametrů pozorování pro seznam jednotlivých vědeckých cílů (tzv. *science cases* – např. protuberance, skvrny, klidná chromosféra, atd.) a simulacích očekávaných výstupů pozorování. Nejvíce ceněným příspěvkem českého týmu je ovšem vývoj speciálního software – *Solar Ephemeris Generator*, nástroje, který s nejlepší znalostí dynamiky zvoleného cílového objektu na Slunci spočte (a uloží ve standardním vstupním formátu pro ALMA) předpověď jeho nebeských souřadnic (tzv. efemeridu) s odpovídající přesností na dva dny dopředu. Tento SW nejen že využívají sluneční fyzici z celého světa pro přípravu svých pozorování s ALMA, ale pro svoji uživatelskou přívětivost a přesnost výsledků ho začali pro pozorování Slunce využívat i jiné radiové observatoře, např. již zmíněná americká VLA (*very large array*). Metodika slunečních pozorování byla publikována jednak ve formě výzkumných zpráv, které český uzel EU ARC vypracoval pro ESO, dále jako dokumenty tzv. *ALMA Memo series* a také jako dva rozsáhlé články publikované na konci roku 2017 v časopise *Solar Physics* [7, 8].



Obrázek 8: *Solar ALMA CSV Observing Campaigns* – pozorování pro ověření procedur slunečního pozorovacího režimu v letech 2014 a 2015: zúčastnění pracovníci z mezinárodního Solar ALMA Development Teamu (nahore) a vzorky získaných testovacích (tzv. *science verification/SV*) dat: interferometrický obrázek filamentu na frekvenci 100 GHz a jeho srovnání s daty přístroje AIA na sondě Solar Dynamic Observatory/SDO (první dva panely vlevo dole); interferometrický detailní pohled na sluneční skvrnu na frekvenci 240 GHz (třetí panel dole); celodisková mapa Slunce získaná metodou rychlého skenování jednou anténou na frekvenci 100 GHz (zcela vpravo dole), zdroj: autor, ALMA, SDO

Stručné shrnutí několika let vývoje režimu observatoře ALMA umožňující pozorování Slunce z pera členů mezinárodního *ALMA Solar Observing Mode Development Team* přineslo vydání časopisu *The ESO Messenger* v březnu 2018 [3]. Poznamenejme, že i přes tento přelom vývoj slunečního pozorovacího modu observatoře ALMA i nadále pokračuje a český uzel EU ARC je u toho. Pro další pozorovací cykly se připravuje rozšíření možností pozorování (např. spektroskopie, měření polarizace) a rozvíjí se i procedury pro zpracování slunečních dat (např. tzv. *time-domain imaging* vyvíjený přímo na českém uzlu). Náš uzel byl také od roku 2018 pověřen koordinací procedur pro zpracování (kalibrace, imaging a kontrola kvality – QA2) slunečních pozorování z ALMA a dokumentace k nim na celosvětové úrovni – spravujeme příslušnou webovou wiki stránku v Chile. Pracovníci českého ALMA centra chystají navíc nový velký mezinárodní projekt v rámci dalšího kola výzvy *ALMA Development Studies*, tentokrát zacílený na rozšíření *Solar ALMA ObsMode* do rozsáhlejších konfigurací pole ALMA, podávat se bude na podzim roku 2019.

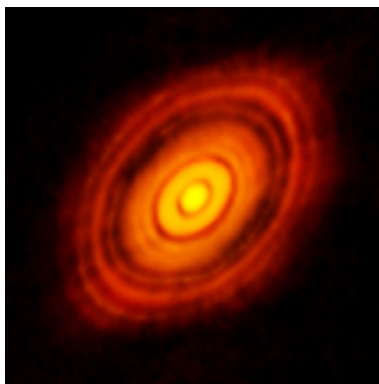
Sluneční fyzika, byť z hlediska české účasti jde jistě o významný podíl na uskutečňování světově špičkové vědy, je poměrně úzkým a specifickým segmentem výzkumu observatoře ALMA. Pojďme se tedy vrátit k jejím typičtějším vědeckým cílům, na nichž byl zároveň docílen ohromný technologický úspěch milimetrové interferometrie na extrémně dlouhých základnách.

6.3 Pozorování s vysokým rozlišením: Long-baseline ALMA campaign a zapojení do globálního VLBI systému EHT

Jedním z technologických a vědeckých cílů observatoře ALMA bylo uskutečnění zcela průkopnických interferometrických pozorování v milimetrové oblasti vlnových délek na dlouhých základnách. Dosažení koherence na základně 16 km je při vlnové délce 1 mm skutečná výzva – pro představu, je to jako realizovat klasický školní experiment interference na dvou štěrbínách s červeným He-Ne laserem ovšem se vzájemnou vzdáleností štěrbín cca 12 m! Kampaň CSV, která měla tuto schopnost ALMA prověřit (mimořádně, probíhala zhruba ve stejné době jako „naše“ sluneční CSV) tedy začínala s celkem pochopitelnou lehkou skepsí. O to větší byla radost z úspěchu – obrázek protoplanetárního disku (rodící se planetární soustavy) kolem hvězdy HL Tau (obrázek 9) v souhvězdí Býka obletěl v roce 2015 celý svět. Mimořádně, protoplanetární disky kolem dnes už mnoha hvězd se staly jedním z největších a neočekávaných hitů pozorování observatoře ALMA.

Úspěšná CSV *ALMA Long-baseline Campaign* pak nejenže odstartovala sérii vědeckých úspěchů založených na pozorováních rozlehlých konfigurací observatoře ALMA v jejích krátkovlnných pásmech, ale zároveň vlila do žil život projektu, který byl mnohými pokládán za sníkovství: šlo o ideu mezikontinentálního VLBI interferometru na globální škále, který by byl schopen, mimo jiné, také rozlišit okolí horizontu událostí černé díry v centru naší Mléčné dráhy nebo jiných blízkých galaxií. V roce 2015 se uskutečnil – opět úspěšně – test dosažení koherence na interkontinentální základně

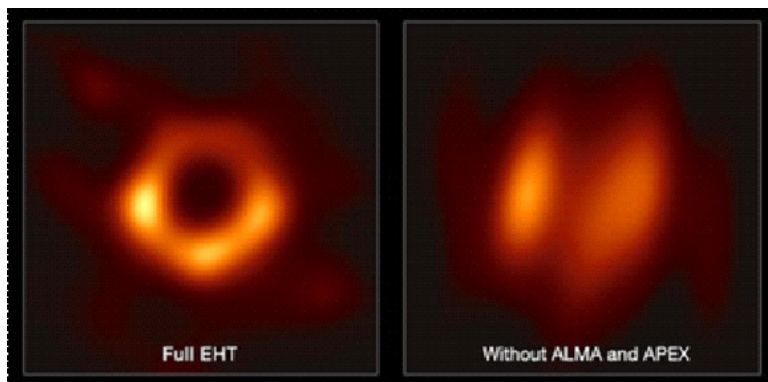
mezi Atacamou a Plateau-du-Bure (ALMA a NOEMA 30 m), který akceleroval plány na globální mm VLBI interferometrii. Vidina úspěchu sice v první fázi způsobila i konkurenční boj mezi dvěma vědeckými projekty mířícími na stejný cíl: EHT (*Event Horizon Telescope*) a BHC (*Black Hole Cam*), nicméně časem došlo k jejich splynutí (pod názvem *EHT*) a kooperaci, což bylo vzhledem k omezenému počtu využitelných radiových teleskopů nejrozsáhlejší východisko. Cílem už sjednocené skupiny se staly černé díry v centru naší Galaxie (radiový zdroj *Sagittarius A**) a v galaxii M87 v souhvězdí Panny (*Virgo A*). Ta první je sice o dost blíže, nicméně není to ten nejnadějnější objekt – naše Galaxie je radiově tichá, což naznačuje, že v jejím jádru nedochází momentálně k žádné bouřlivé akreci spojené s tvorbou horkého disku, jež by bylo možné na mm vlnách pozorovat, a také ji pozorujeme z galaktické roviny, tedy akreční disk bychom viděli „z profilu“ (*edge-on*). V tomto směru byla slibnější – a nakonec se ukázalo, že pro účely průkazného potvrzení našich představ oprávněně – galaxie M87, jejíž centrální černá díra je mohutnější, k akreci prokazatelně dochází (jak ukazují výtrysky kolmé k její rovině pozorované na delších radiových vlnách) a na její rovinu se díváme pod rozumně velkým úhlem. Pozorování, do nichž se zapojilo celkem 8 observatoří (interferometrických soustav ale většinou jen jednotlivých antén) na prakticky šesti odlehlých místech naší planety (ALMA a APEX v Chile stejně jako JCMT a SMA na Havaji jsou z hlediska globální škály prakticky v jednom bodě) proběhla v roce 2017 a skoro dva roky trvalo, než byly signály s pomocí několika superpočítačů off-line zko-relovány a nakonec vytvořena věrohodná zrekonstruovaná radiová mapa (česky o tom např. v [4]).



Obrázek 9: Rodící se planetární systém kolem hvězdy HL Tauris – úspěšný výsledek ALMA Long Baseline CSV Campaign (2015), která zahájila éru milimetrové interferometrie na dlouhých základnách, zdroj: ALMA

Výsledky byly zveřejněny na několika paralelně uskutečněných tiskových konferencích; význam tohoto úspěchu ale trochu pompéznímu PR skutečně plně odpovídá. V poněkud zkresleném mediálním obrazu celé události ovšem zanikl zásadní podíl

observatoře ALMA na získaném výsledku – díky celkové anténní ploše Almy se citlivost celé soustavy EHT zvýšila desetinásobně, základny ALMA – další teleskop byly v systému zcela dominantní. Porovnání získaného obrazu M87 s tím, jak by vypadal při vynechání soustavy ALMA/APEX² (obrázek 10), mluví, myslím, za vše. Nicméně lze říci, že tento obrovských úspěch odstartoval éru milimetrové VLBI interferometrie na celoplanetární škále a observační projekty zapojující Almu do sítě VLBI se od letoška staly téměř běžnou součástí její agendy.



Obrázek 10: Rekonstruovaný interferometrický obraz okolí černé díry v centru galaxie M87; vlevo s celým VLBI polem EHT, vpravo při vynechání základen obsahujících observatoř ALMA/APEX, zdroj: ALMA/EHT

7. Budoucnost radioastronomie

Posledně zmíněným tématem jsme se dotkli žhavé současnosti s přesahem do budoucnosti radioastronomie jako disciplíny. Netroufám si věštit z křišťálové koule, spíše tedy půjde o vystižení současných trendů a jejich střednědobou extrapolaci. Je zřejmé, že pokračující revoluce v digitální technice přeje budování rozsáhlých interferometrických soustav s mnoha anténami a aperturní syntéze – už nyní je to dominantní trend oproti konstrukcím mamutích (s rozměry v řádu stovek metrů) *single-dish* teleskopů, které narazily na své technické limity. Typickým příkladem je projekt pole SKA. V oblasti mm VLBI lze očekávat „zahuštění“ celoplanetární sítě stavbou dalších jednotlivých teleskopů o rozměrech typicky 10 až 30 metrů, první vlaštovky v tomto směru jsou už zmíněný *South Pole Telescope* nebo jeho protějšek v Grónsku. Zrychlují se digitizéry, což umožňuje zvětšit šířku najednou snímaného pásma a rozšířit tak naši spektrální informaci o zdroji (a zlepšit *uv*-pokrytí). Chlazené detektory v mm astronomii, pracující nyní až na samé hranici kvantového šumu, zlevňují, což dovoluje vytváření jejich polí (*feed arrays*) umístěných do ohniskové roviny a tím významné zvětšení zorného pole – pro Almu jsou již po roce 2020 navrhovány matice 7×7 , taková mikrovlnná

² APEX – Atacama Pathfinder EXperiment: samostatná „ALMA“ anténa umístěná trochu stranou hlavního pole, takový pokusný králik, na němž se testují technologie později využitelné na Almě.

„mini-CCD“ – několik takových projektů bylo představeno na *ALMA Development Workshopu* v červnu 2019 v Garchingu u Mnichova. Technologický pokrok nám také umožňuje zvyšovat pozorované frekvence, čímž jednak zužujeme oblast *terry incognity* mezi THz frekvencemi a infračerveným pásmem a také – pokud se podaří VLBI interferometrie i v tomto pásmu – zvětšujeme rozlišení našich pozorování. Myslím, že hlad po ještě větším rozlišení, který nás tlačí směrem k prodlužování základen a ke zvyšování frekvencí do oblasti, kde omezující vliv zemské atmosféry je už neúnosný, nás nakonec v delší perspektivě vyžene do kosmického prostoru, velikost interferometrických soustav tak nebude omezena rozměry planety Země. Radioastronomie se tedy o budoucnost rozhodně obávat nemusí: už její současnost je zářivá – jak o tom svědčí stále rychleji rostoucí množství vědeckých úspěchů tak i fakt, že řada současných radiových observatoří nejsou „konzervy“ ale spíše živé projekty jaksi trvale „ve stavu výstavby“. A plány do budoucna, ať už mají podobu reálných detailních projektů „na papíře“ jako SKA nebo jsou zatím ve fázi snů, jsou ještě smelejší.

8. Literatura

- [1] Wilson T.L., Rohlf K., Hüttenmeister S. (2008): *Tools of Radioastronomy* (5th edition), Springer.
- [2] Budějický J., Plavcová Z., Plavec M. (1962): *Radioastronomie*, NČSAV Praha.
- [3] Bastian T.S., Bárta M., Brajša R. et al. (2018): *Exploring the Sun with ALMA*, *The ESO Messenger* 171.
- [4] Podolský J. (2019): *Jak spatřit nespátřitelné*, *Astropis* 118.
- [5] Bárta, M. (2014): *Sluneční radioastronomie v éře ALMA*. Populárně naučný text určený původně pro projekt pozorovanislunce.eu Hvězdárny ve Valašském Meziříčí http://wave.asu.cas.cz/barta/pub/czech/slunecni_radioastronomie, viz též <http://pozorovanislunce.eu/odborne-clanky.html>.
- [6] Bárta, M.; Skokić, I.; Brajša, R. & the Czech ARC Node Team (2017): *Solar research with ALMA: Czech node of the European ARC as your user-support infrastructure*, In: *Proc. of 9th International Workshop on Solar Influences on Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere*, Burgas, Bulgaria, http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2017simi.conf..127B&db_key=AST&link_type=ARTICLE.
- [7] Shimojo, M. et al. (2017): *Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): High-Resolution Interferometric Imaging*, *Solar Physics*, vol. 292, id. 87, <https://arxiv.org/abs/1704.03236>.
- [8] White, S. et al. (2017): *Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): Fast-Scan Single-Dish Mapping*, *Solar Physics*, vol. 292, id. 88, <https://arxiv.org/abs/1705.04766>.

- [9] Bárta, M. (2018): Introduction to Radio Astronomy – Lecture Notes. Prezentace přednášek a doplňující studijní materiály k semestrálnímu kursu Úvod do radioastronomie, přednášenému na MFF UK, <<http://wave.asu.cas.cz/barta/lectures/radioastronomy>>.
- [10] Solar ALMA Development Team / ALMA Observatory (2014, 2015): Data z testovacích Science Verification kampaní v letech 2014 a 2015, <<https://almascience.eso.org/alma-data/science-verification>>.
- [11] Kolář, J. (2014): Elektromagnetické záření z vesmíru, Sborník přednášek konference Radiokomunikace 2014, UNIT Pardubice.
- [12] Tichý, M. (2018): Elektromagnetická okna do vesmíru, Sborník přednášek konference Radiokomunikace 2018, UNIT Pardubice.
- [13] Martínek, F.: Radioteleskopy: Část I a II. <<https://www.branadovesmiru.eu/odborne-clanky/radioteleskopy-ii-cast.html>>.
- [14] Wikipedia: (Neúplný) seznam radioteleskopů a radioastronomických observatoří, <https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_radio_telescopes>.

Užití elektricky fázovaných anténních řad v satelitní komunikaci

Ing. Michal Pokorný, Ph. D.

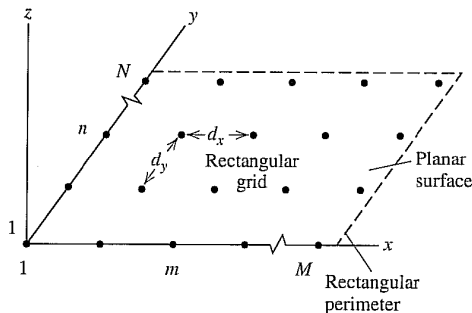
ZČU v Plzni, FEL, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

1. Úvod

Pro komunikaci s družicemi se používají pozemní stanice s anténami pro rozličná frekvenční pásma. Vlivem velké komunikační vzdálenosti jsou pro tento účel požadované antény s vysokým ziskem, což je často spojené s velmi úzkými vyzařovacími diagramy. Pro nízko drážní LEO družice je současně nezbytné tyto anténní systémy poměrně přesně zaměřovat (měnit azimut a elevaci) v reálném čase, což vyžaduje vysoké nároky na anténní rotátory. Vlivem aplikací těchto mechanických částí je komplikované rozšíření pozemních stanic, jejich servis, kalibrace a vůbec bezobslužný provoz. Tyto nedostatky odstraňují elektricky fázovatelné anténní řady, které mají v dnešní době široké uplatnění v radarové, telekomunikační či automobilové technice. S rostoucí dostupností vysokofrekvenčních a mikrovlnných integrovaných obvodů pro ISM, WLAN, UMTS, WIMAX apod. komunikační systémy je možné realizovat takové antény i pro radioamatérskou satelitní komunikaci. Tento příspěvek se bude zabývat možnostmi realizace takových antén, shrne dosažené výsledky vědeckých týmů z celého světa, zabývající se touto problematikou a představí náš začínající projekt. Ten si dává za cíl zkonstruovat elektricky fázovatelnou anténní řadu pro satelitní komunikaci v S mikrovlnném radioamatérském pásmu.

2. Základní principy fázovatelných anténních řad

Elektricky fázovatelná anténní řada [1] představuje 1D či 2D pole elementárních antén, jak je schematicky zobrazeno na obrázku 1, na kterém je zobrazena transverzální konfigurace planárních antén.



Obrázek 1: Ploché transverzální anténní pole

Změnou fáze a amplitudy v napájení jednotlivých anténních elementů lze měnit tvar směrové charakteristiky (vlivem různé amplitudami pro jednotlivé elementy) a směr maxima směrové charakteristiky (vlivem různé fáze). V případě, že by jednotlivé anténní elementy byly reprezentovány v ideálním případě všesměrovými (izotropickými) zářiči a jednotlivé elementy se vzájemně neovlivňovaly, tak by bylo možné hlavní vyzařovací maximum vychylovat teoreticky v libovolném směru. Reálné anténní elementy takové směrové vlastnosti však nevykazují, každý z nich je reprezentován svou směrovou charakteristikou $F_{m,n}(\theta, \phi)$. Potom celková směrová charakteristika (bez zahrnutí vzájemného vlivu jednotlivých) je reprezentován rovnicí:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} F_{m,n}(\theta, \phi) I_{m,n} e^{jkr_{m,n}}, \quad (1)$$

kde poloměr $r_{m,n}$ je dán následujícími transformacemi kartézských souřadnic poloh jednotlivých zářičů do kulových souřadnic a reprezentuje vliv pozice jednotlivých zářičů na celkovou směrovou charakteristiku celého pole, viz dále:

$$\begin{aligned} r_{m,n} &= m \cdot d_x \bar{x}_0 + n \cdot d_y \bar{y}_0 \\ r_{m,n} &= \sin \theta (m \cdot d_x \cos \theta + n \cdot d_y \sin \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

3. Vlastnosti a přednosti elektricky fázovatelných anténních řad

V tabulce 1 jsou shrnuty základní parametry [4] pro standardní provedení antén s mechanickými rotátory a pro elektricky fázovanou anténní řadu. Toto porovnání je především uváděno především pro anténní řadu s planárními elementy. Zde je zřejmé, že odolnost na nepříznivé počasí (především vítr), stabilita zaměřování či přesnost je jistě lepší. Zkušenosti s anténním systémem s mechanickým pohonem, který provozujeme na naší fakultě pro komunikaci s pikosatelitem VZLUSAT-1 nám mnohé vlastnosti potvrzují. Tento systém v provozu vykazuje časem vznik odchylky v zaměření, a proto je vždy nezbytná kalibrace. Taktéž přesnost zaměření je dána mechanickými kroky pohonu. Tyto dva faktory snižují možnost použití tohoto provedení např. pro velké průměry parabolických reflektorů. Např. pro náš zmiňovaný anténní systém pozemního segmentu, který je zobrazen na obrázku 2, vykazuje kombinace ozařovače a parabolického reflektor pro S mikrovlnné pásmo o průměru 1,8 metru šířku hlavního vyzařovacího laloku (-3 dB) $\pm 3^\circ$. Pro větší průměry je tento úhel samozřejmě nižší, což vede na konstrukci velmi robustních a přesných pohonů, které především musí při sledování satelitu i odolávat silnému větru.

	konvenční řešení	fázovaná anténní řada
odolnost na počasí	nízká	vysoká
stabilita zaměřování	nízká	vysoká
přesnost zaměření	závislá na mechanickém pohonu	závislá na přesnosti posouvače fáze
rychlost zaměření	nízká	velmi vysoká
počet sledovaných cílů	1	> 1

nároky na údržbu	velmi vysoká	nízká
nejnáročnější části	mechanické části	vf a elektrické systémy

Tabulka 1: Porovnání konvenčních anténních systémů s elektricky fázovatelnými anténními řadami



Obrázek 2: Anténní systém pozemního segmentu VZLUSAT-1 a PilsenCUBE na budově FEL ZČU

Dalším limitujícím parametrem může být rychlost zaměření, tedy dynamické vlastnosti. Samozřejmě mechanicky zaměřované antény vyhovují v případě, že bychom požadovali sledování pouze jediné družice, která se vyskytuje nad obzorem. Elektrické vychylování hlavního vyzařovacího diagramu však disponuje značně vyšší rychlostí, která teoreticky umožňuje sledování více satelitů najednou. Nejednoduší způsob je určitě pomocí časového multiplexu TDMA, ale také je zde možnost osazení vícero VF *front endů* a tím on-line zajistit sledování více družic najednou. Další významnou vlastností lze jistě považovat i mnohem nižší nároky na údržbu, což je výhodné pro rozšíření takových pozemních segmentů s dálkovým řízením po celém světě a spravovat je z jednoho místa. Při umístění takových pozemních stanic do severních zeměpisných šířek a zároveň pro polární (nebo skoro polární) orbitální dráhy se taktéž významně prodlouží délka a četnost komunikačních oken. Zde však zpravidla vládnou velmi nehostinné klimatické podmínky. Nevýhody elektricky fázovatelných anténních řad vyplývají především z jejich fyzikálního principu. Pokud např. uvažujeme jednoduchý planární panel osazený reálnými *patchovými anténami*, tak tyto antény zdaleka nemají široký hlavní vyzařovací lalok (zpravidla menší než 70°). Z definice výše uvedených matematických vztahů je zřejmé, že při dodržení stejné šířky tohoto laloku s rostoucím úhlem odklonu od hlavní osy dochází k poklesu zisk. Taktéž i vlivem vzájemné vazby jednotlivých anténních elementů také klesá zisk a dochází k nárůstu postranních laloků. Na těchto negativních efektech se podílí i „nenulový“ krok fázových posouvačů. Proto konstrukce s pouze jediným plochým anténním panelem je pro pokrytí celého obzoru prakticky nemožné. Proto reálný anténní systém musí být složen z více panelů [3] nebo musí být složen z „neplanárních“ elementů [2], jak bude ukázáno u příkladů projektů, jež budou zmíněny v další kapitole.

4. Obvodová řešení používaná na tvarování anténního laloku anténních řad

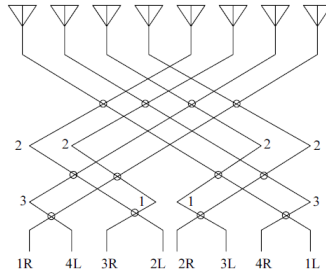
Analogové směřování a tvarování: Každý anténní element má svůj fázový posouvač a atenuátor. Řízením těchto prvků dochází k požadovanému směřování a tvarování anténního laloku. RF front end a digitální zpracování se nachází až na výstupu/vstupu antény.

Digitální směřování a tvarování: Každý anténní element má svůj RF front end a digitální zpracování. K tvarování a směřování hlavního laloku se provádí digitálně.

Hybridní směřování a tvarování: Každý anténní element má svůj posouvač fáze a atenuátor, ale pak určitá skupina sloučených anténních elementů má své digitální zpracování.

Pro návrh vhodné topologie analogové části hybridního směřování se mimo fázových posouvačů používají následující obvodové topologie.

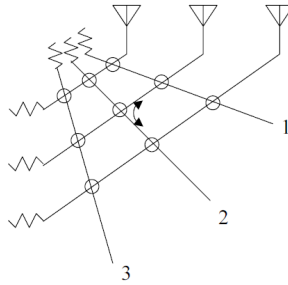
Butlerova matice [5]: Pasivní struktura $N \times N$ pro řízení směřování, obrázek 3. Struktura pro analogové směřování anténního laloku, která použitím vhodné obvodové topologie se zapojením kvadraturních SVC, pevných fázových posunů a RF křížení umožňuje analogové směřování anténního laloku pomocí přepínačů. Výhodou tohoto provedení je jeho jednoduchost a absence analogových nebo krokových fázových posouvačů, avšak to neřeší tvarování anténního laloku.



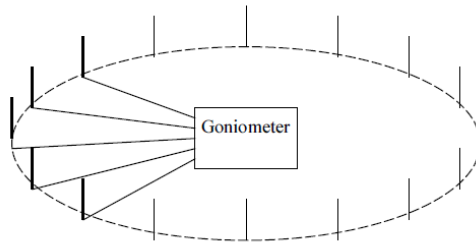
Obrázek 3: Butlerova matice (kružnice jsou 90° hybridní SVC, čísla fázový posun $\pi/8$)

Blass matice [6]: Využívá úseky vedení a směrově odbočnice k tvarování vyzářovacího laloku, jak je vidět na obrázku 4. K příčným liniím jsou připojeny jednotlivé anténní elementy a k vodorovným napájecí porty. V uzlech se nacházejí směrové odbočnice. Vodorovné linie mají stejné délky a vykazují konstantní zpoždění. Příčné pak mají různé délky a tedy i zpoždění. Spínáním zdroje signálu pro jednotlivé porty lze realizovat různé fázové posuvy pro jednotlivé anténní elementy a tím i směřování anténního laloku.

Wullenweber pole [7]: Skládá se z kruhového uspořádání anténních elementů v azimutu (pokrytí plných 360°). Řízení je prováděno přepínáním signálů anténních prvků v daném směru, obrázek 5.

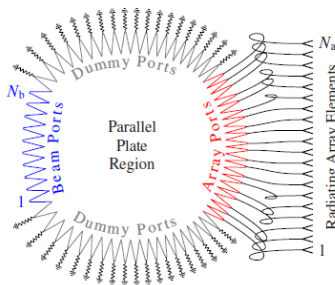


Obrázek 4: *Blass matice (kružnice jsou 90° hybridní SVČ)*



Obrázek 5: *Wullenweber pole*

Rotmanova čočka [8]: Je „parallel plate“ planární struktura pro směřování anténního laloku, vykazující velkou širokopásmovost. Některé porty jsou zakončeny vlnovou impedancí (*dummy ports*), jiné slouží k napájení jednotlivých zářičů (*array ports*) a výběrem jednoho z napájecího portu (*beam ports*) dochází k diskrétnímu vychylování hlavního anténního laloku, jak je zobrazeno na obrázku 6.



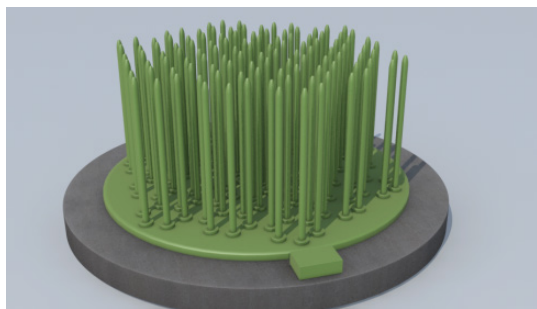
Obrázek 6: *Rotmanova čočka*

5. Metody řízení (zaměřování) anténního pole

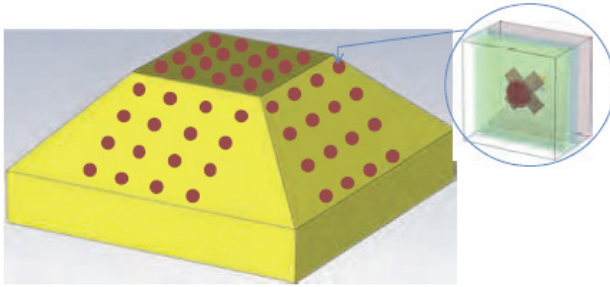
Cílem adaptivní algoritmu je zaměřovat a tvarovat anténní lalok tak, aby bylo dosaženo maximální amplitudy nebo signál/šum poměru na portu antény [7]. To je docíleno nastavením parametru (fázové posuny, amplitudy apod. – váhové parametry) anténní řady tak, aby bylo dosaženo minimální střední kvadratické odchylky (*mean squared error*) mezi výstupním signálem anténní řady a referenční zdrojovým signálem. Používají se např. metody LMS (*least mean squares*), DMI (*direct sample covariance matrix inversion*), RLS (*recursive least squares*), CMA (*constant modulus algorithm*) apod.

6. Příklady podobných projektů ve světě

Řešením elektricky fázovatelných anténních řad pro satelitní komunikaci se zabývá mnoho výzkumných a vývojových týmů na světě. V této kapitole bych chtěl představit dva reprezentanty dvou zajímavých uspořádání. Každé z nich představuje jinou konstrukční koncepci. První z nich je anténní systém, vyvíjený týmem pod vedením prof. Nobuyuki Kayi na univerzitě v Kobe [2], které je zobrazené na obrázku 7. Základem tohoto systému je pole čtvrt vlnných dipólů, které jako elementární antény vykazují relativně všesměrové vlastnosti a tedy možnost pokrytí téměř celého obzoru pouze jediným anténním panelem. Tato anténa byla navržena pro satelitní komunikaci v X mikrovlnném pásmu. Pro řízení (směrování) těchto antén byly použity integrované 6 bitové fázové posouvače, které vykazují minimální krok $5,62^\circ$. Dalším zajímavým provedením, které je na rozdíl od předchozího plně planární, je výsledkem vývoje týmu pod vedením pana prof. Miguela A. Salas Natera na Madridské polytechnice. Toto provedení, jež je zobrazené na obrázku 8, se skládá z několika planárních panelů, který každý obsahuje 16 *kruhových patchů* pro kruhovou polarizaci. Tato anténa je opět navržena pro komunikaci v X mikrovlnném pásmu (Tx 7,9–8,4 GHz a Rx 7,25–7,75 GHz) a dokáže dosáhnout maximálního zisku 25 dB při šířce hlavního vyzářovacího laloku $\pm 2,5^\circ$.



Obrázek 7: Anténní řada Univerzita v Kobe

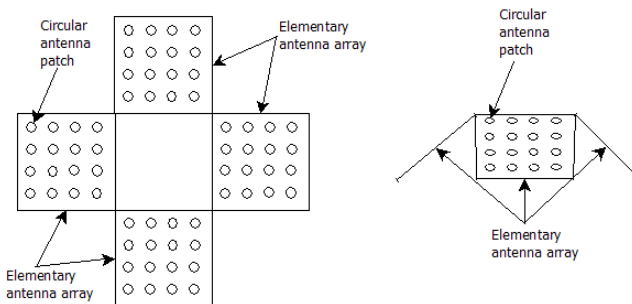


Obrázek 8: Anténní řada Univerzita v Madridu

7. Představení projektu a základní koncepce satelitní antény

Po počátečních zkušenostech s komunikací se satelitem VZLUSAT-1 bylo našemu týmu zřejmé, že pro zvýšení počtu komunikačních oken (a možnosti stažení většího objemu dat) a pro další satelitní mise (např. pro PilsenCUBE) bude v budoucnu nezbytné navýšit počet pozemních segmentů po světě, které by měly být řízeny a dálkově spravovány z našeho oddělení. Projekt byl zahájen cca v květnu 2017 a má za cíl postavit elektricky fázovatelnou anténu pro S mikrovlnné pásmo a případně uvážit možnost realizace také pro UHF, které se nyní nejčastěji používá pro komunikaci s pikosatelity.

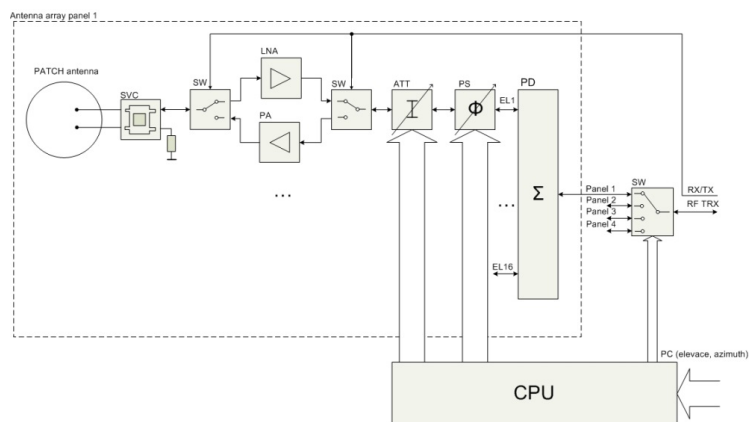
Pro realizaci naší elektricky fázovatelné antény [5] jsme se rozhodli pro provedení s několika planárními anténními poli. Ze statistické analýzy jednotlivých přeletů je zřejmé, že více než 50 % času se satelit nachází na elevacích nižších než 10° . To zohledňuje naše základní koncepcce, která je zobrazena na obrázku 9.



Obrázek 9: Koncepcce elektricky fázovatelné anténní řady PilsenCUBE

Celý anténní systém by se měl skládat z minimálně ze 4 elementárních planárních anténních polí (podobně jako u [3]). Tímto provedením by měla být pokryta většina obzoru pro nízké elevace. Vždy by měla být aktivní pouze jedna stěna v závislosti na aktuální pozici satelitu. Každé elementární anténní pole se skládá z jednotlivých *patchových antén*. Pro satelitní komunikaci se většinou používají antény s lineární

polarizací na družici a s kruhovou polarizací na pozemním segmentu. Proto jako elementární záříč byl vybrán *kruhový patch* s kruhovou polarizací, dvoubodovým napájením a příčkovým směrovým vazebním členem pro vytvoření požadovaného fázového posunu 0° a 90° . Tato topologie umožňuje přidáním dvou RF přepínačů pro možnost změny polarizace z pravotočivé na levotočivou. Každý elementární patch by měl obsahovat svůj vlastní RF *front end*. Nejjednodušší provedení této části by mohlo být složeno pouze z fázových posouvačů, symetrickým děličem výkonu a popř. z říditelného atenuátoru (pro změnu tvaru hlavního vyzařovacího laloku). Tedy kompletně „pasivní“ řešení. Taková anténa by však vlivem vložných útlumů jednotlivých komponentů vykazovala vysoké šumové číslo. Proto každý anténní element musí také obsahovat i nízkošumový LNA a výkonový PA zesilovač s příslušnými SPT přepínači, jak je zobrazeno na obrázku 10. Jde v podstatě o rozproštěné rozmístění aktivních prvků, které mohou vykazovat menší zisk pro LNA a menší výstupní výkon pro PA a i ostatní součástky dimenzované pro menší výkony. Pro některá pásma jako je právě mikrovlnné S existuje mnoho integrovaných *front endů*, které jsou navrženy pro ISM a 2,4GHz WLAN popř. UMTS apod. pásmo, což chceme v tomto projektu využít. Pro tyto systémy také existují integrované řešení krokových posouvačů fáze a atenuátorů s TTL-CMOS řízením, vhodném pro řízení pomocí mikroprocesorů. Signál do každého anténního panelu by měl být spínán jedním hlavním přepínačem, čímž bude zajištěno, že bude aktivní pouze jediný panel. Řídicí procesor bude mít za úkol konverzi údaje o nastavené elevaci a azimutu konvertovat na požadovanou hodnotu fázového posunu, útlumu a stavu jednotlivých RF přepínačů, včetně RX/TX.

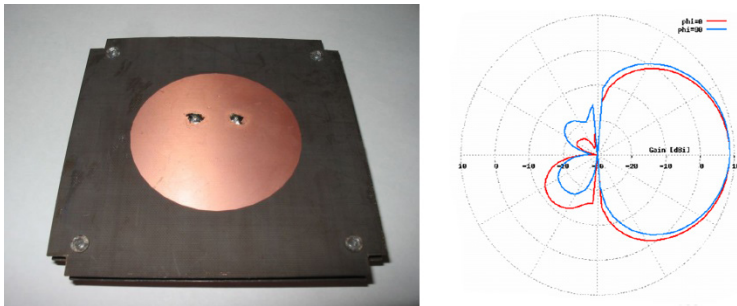


Obrázek 10: Blokové schéma elementárního anténního elementu a řídicí elektroniky

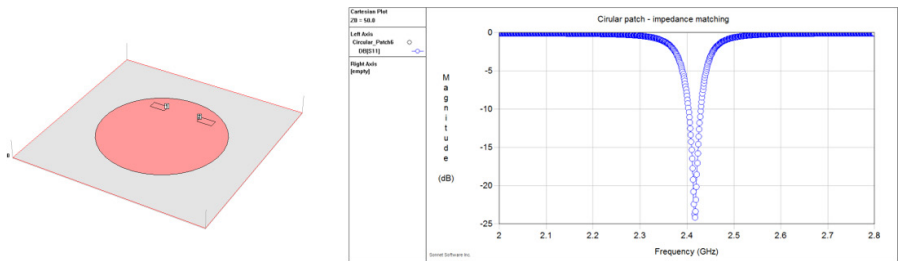
8. Realizace a blízké cíle

Pro počáteční testy bylo rozhodnuto realizovat elementární anténní pole o velikosti 4×4 . Jako elementární anténa byl zvolený *kruhový patch* pro kruhovou polarizaci.

Byl vybrán element podobný kruhovému patchy, který byl uvažován pro umístění na satelitu czCUBE [5] a jehož vlastnosti jsou zobrazeny na obrázku 11. Tato anténa vykazuje 8 dBi zisk a $\pm 35^\circ$ šířka hlavního vyzářovacího laloku (3 dB). V této konfiguraci by teoreticky uvedené anténní pole mělo dosahovat maximálního zisku 17 dBi, což je v porovnání s kombinací ozařovače a parabolického reflektoru z obrázku 2 (který dosahuje zisku cca 30 dBi) velmi malé číslo. Pro porovnatelný výsledek bychom museli realizovat cca 12–16× větší pole, o což se uvažuje později. Pro přesnější analýzu byla provedena analýza a zpřesněný návrh výše uvedené antény v programech Sonnet viz. obrázek 12 a CST Microwave studio, obrázek 13.

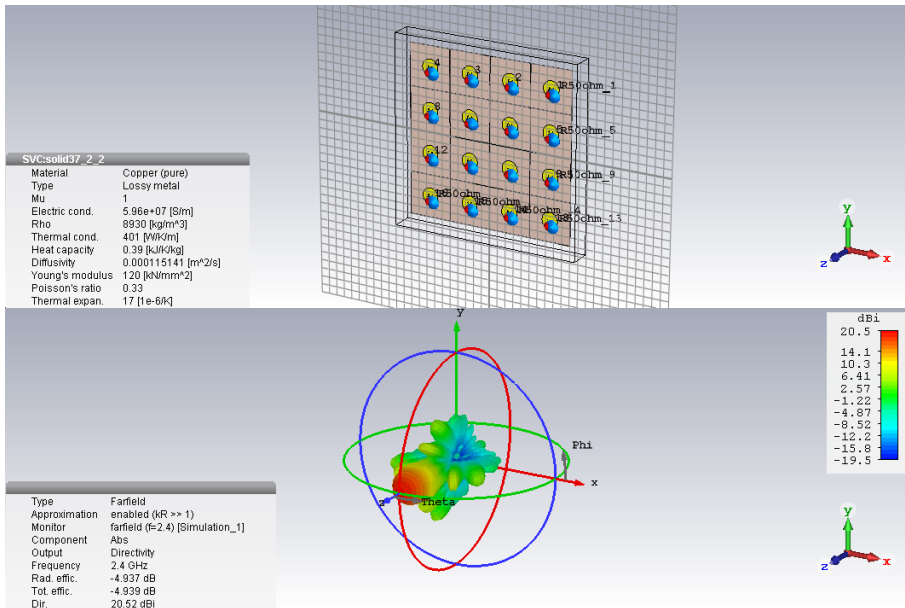


Obrázek 11: Elementární patch pro pravotočivou kruhovou polarizaci a směrová charakteristika



Obrázek 12: Simulace patchové antény pro kruhovou polarizaci – simulace Sonnet

Jako RF *front endy* byly vybrány Skyworks RFX2401C pro ISM 2,4 GHz, který obsahuje i oba SPT přepínače, výkonový zesilovač s výstupním výkonem 22 dBm a 25 dB ziskem. Nízkošumový zesilovač LNA pak dosahuje 2,5 dB šumové číslo a 12 dB zisk. Posouvač fáze byl zvolen Peregrine PE44820, který je 8-bitový s maximální úhlovým krokem $1,4^\circ$ pro frekvenční rozsah 1,7–2,2 GHz v širokopásmovém módu, ale může pracovat až do 3 GHz v úzkopásmovém módu. Řízení je možno realizovat paralelní a sériovou sběrnicí. Jako krokový atenuátor byl vybrán Peregrine PE43705, který má 7 bitů a 0,25 dB minimální krok ve frekvenčním rozsahu 0,05–8 GHz. Řízení tohoto atenuátoru je opět přes paralelní nebo sériovou sběrnicí.



Obrázek 13: Simulace anténního pole 4×4 v CST Microwave office

9. Literatura

- [1] Sean Victor Hum: Antenna arrays: ECE422 Radio and Microwave Wireless Systems.
- [2] S. Ooe, S. Nakata, M. Iwashita, N. Kaya: New Receiving Ground Antenna Using Active Phased Array Antenna for Nano-Satellites: The 5th Nano-Satellite Symposium Tokyo 2013.
- [3] Miquel A. Salas Natera at al: New Antenna Array Architectures for Satellite Communication: <<http://www.intechopen.com>>.
- [4] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [5] J. Butler and R. Lowe, “Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas,” *Electronic Design*, pp. 170–173, April 12, 1961.
- [6] J. Blass, “Multidirectional Antenna: A New Approach to Stacked Beams,” *IRE International Conference Record*, Vol. 8, Part 1, 1960.
- [7] S. Mano, et al., “Application of Planar Multibeam array Antennas to Diversity Reception,” *Electronics and Communications in Japan*, Part 1, Vol. 79, No. 11, pp. 104–112, 1996.

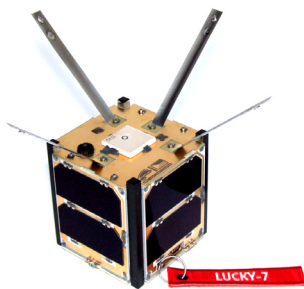
- [8] Chan, K. K., “Field analysis of planar bootlace lens feeds,” Proc.Int. Conf. Radar, Paris, France, Apr. 1989.
- [9] Michal Pokorný, Ivo Veřtát, Richard Linhart, Jiří Masopust: Beamforming array antenna for the LEO satellites ground stations: PINA Workshop Würzburg 2017.
- [10] <<http://www.czcube.cz>>.

Lucky-7, česká družice pro studium vlivu kosmického prostředí na elektroniku

Ing. Jaroslav Laifr, Ph. D.
SkyFox Labs s. r. o.

1. Lucky-7

Počátky projektu družice Lucky-7 lze datovat již od roku 2011, kdy Jaroslav Laifr v rámci svého doktorského studia založil studentským týmem a začal konstruovat projekt satelitu s názvem CzechTechSat. V roce 2014 však bylo jasné, že projekt nebude možné dokončit s pomocí veřejné finanční podpory a byl proto pozastaven. Vzniká soukromý projekt sedmé české vědecké družice Lucky-7, jehož vznik byl podmíněn založením společnosti SkyFox Labs s. r. o., která si ambiciózně kladla za cíl materializovat nové výsledky soukromého výzkumu a vývoje do takové míry, že umožní financování stavby, dokončení a zejména uhrazení nákladů na vypuštění družice do vesmíru. Prvním produktem firmy se stal speciálně vyvinutý navigační GPS přijímač konstrukce Doc. Pavla Kováře, který ho věnoval jako své soukromé know-how do společného projektu. Později se portfolio firmy rozrostlo o další kosmický hardware a související služby se zákazníky dnes ve více jak 10 zemích světa.



Obrázek 1: Družice Lucky-7

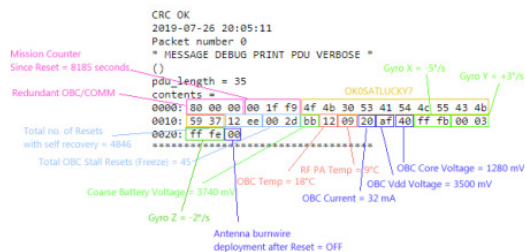
V květnu roku 2018 došlo k podpisu kontraktu, který byl následován dokončovacími pracemi a testovací kampaní. Společné aktivity společnosti SkyFox Labs s. r. o. a poskytovatelem startu berlínskou firmou EXOLAUNCH GmbH vyvrcholily 5. července 2019 v 7:41 SELČ startem družice z kosmodromu Vostočnyj v Amurské oblasti Ruské federace na palubě lodi Soyuz 2.1b, s hlavním nákladem meteorologickou družicí Meteor-M N2-2 a třicítkou dalších malých družic. Aktuální parametry dráhy jsou 512×549 km, s inklinací $97,5^\circ$, oběžná doba činí 95 minut.

Družice se dle předpokladu svým radiomajákem identifikovala hned při prvním přeletu nad pozemní stanicí v ČR téhož dne ve 14:11:57 SELČ. Hned při druhém obletu byla stažena první data z iniciační fáze s telemetrickými údaji.

Satelit komunikuje na kmitočtu 437,525 MHz, s modulací GFSK, bitovou rychlostí 4800 bps a šířkou pásma 18 kHz, pomocí zdvojeného systému radiomodemů, hlavních počítačů a antén. Výstupní zesilovač s výkonem 30 dBm (1 W) je připojený na přizpůsobený V-dipól s úhlem otevření 120° a kvazi-všesměrovým vyzařovacím diagramem. Celkovým vysílaný výkon se pohybuje cca od 25–30 dBm EIRP.

V následujících týdnech radioamatér Daniel Estévez EA4GPZ ve spolupráci s realizačním týmem družice nezávisle sestavil softwarový dekodér na bázi softwarově definovaného rádia (GNU SDR, gr-satellites), který je volně dostupný ke stažení. Jeho instalaci a úspěšný provoz provedl na území USA jako první radioamatér Scott Chapman K4KDR. Na obrázku 2 je uveden rozpis významu jednotlivých datových polí radiomajáku družice Lucky-7, kde je patrný počet restartů palubního počítače OBC (*onboard computer*), dále údaje o úhlových rychlostech rotace satelitu (*gyro x, y, z*) nebo teploty koncového zesilovače (*RF power amplifier*) a hlavního mikrokontroléru počítače (*OBC temperature*). Datagram informuje i o stavu povelu pro jednorázový topný rezistor pro uvolnění anténního systému.

DESCRIPTION OF THE LUCKY-7 BEACON FORMAT DECODED USING EA4GPZ SW DECODER
DATA CAPTURED BY K4KDR

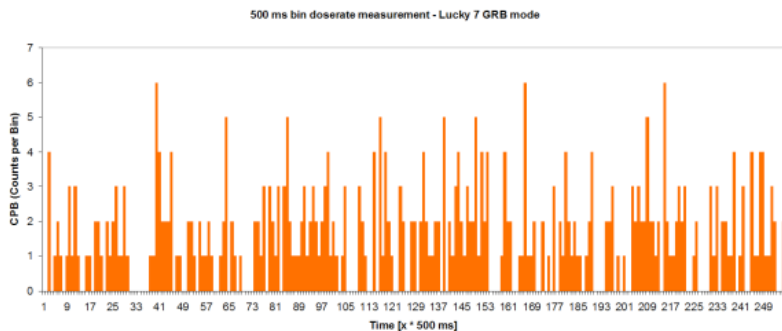


Obrázek 2: Ukázka významu datových polí radiomajáku družice Lucky-7 dekodovaná prostřednictvím GNU radia a softwarového dekodéru Daniela Estéveze EA4GPZ

1.1 Předpokládané výstupy mise

Mezi plánované cíle mise patří k již získaným měřením periodicky monitorovat dávkový příkon v oblastech okolo $\pm 25^\circ$ zeměpisné šířky (rovníkové oblasti), kde přirozené radiální pozadí dosahuje v rámci orbity svého minima. Na oběžné dráze s podobnou inklinací je rovněž provozován vědecký satelit NASA s názvem Fermi. V této oblasti očekáváme nenulovou pravděpodobnost úspěšné detekce tzv. záblesků gama (*gamma ray burst*). K detekci energetického záření gama se využívá konvertor vlnových délek fotonů za použití efektu *scintilace*, kdy vysoce energetický foton předává při kontaktu s materiálem *scintilačního krystalu* svou energii. Tím dojde k excitaci elektronů daného materiálu na vyšší hladinu a návrat na původní hladinu je doprovázen emisí kvanta fotonů o definované (delší) vlnové délce než je vlnová délka původního záření. Výsled-

ný záblesk ve viditelném spektru je poté skrze opticky čirý krystal na bázi Thalliem dopovaného Cesium-India (CsI-Tl) snímán na boku umístěnou plošnou fotodiodou. Intenzita záblesku je poté vyhodnocena špičkovým detektorem a dle amplitudy (energie gama fotonu) je přiřazena pozice v histogramu. Použitý spektrometr má *scintilační krystal* s užitečným objemem 5 cm³ a je možné ho provozovat v režimu s integračním časem 500 nebo 1 000 ms. Prvotní data na obrázku 3 potvrzují, že měřicí rozsah je nastaven v příznivém integračním intervalu. Citlivost systému a radiační pozadí vyhovuje předpokladům pro detekci GRB.



Obrázek 3: Ukázka měření dávkového příkonu s integračním časem 500 ms, naměřeno v rovníkové oblasti orbity družice Lucky-7

Mezi další cíle patří pozorování stavu telemetrických dat, zejména dodaným proudům do jednotlivých elektronických systémů, s cílem vyhledávat nárůst proudů nebo diagnostikovat parametry napájecího zdroje v průběhu času (včetně sledování maximálního výkonu solárních panelů).

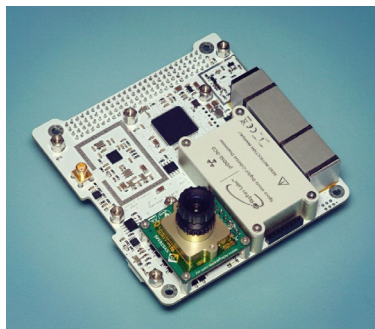
1.2 Diskuze prvních naměřených dat

Pro sběr vědeckých dat je družice vybavena elektronickou deskou obsahující většinu sensorického vybavení. Na obrázku 4 je zobrazena sensorová deska družice Lucky-7 před montáží EMC stínění, radiačního zapouzdření a před chemickou konzervací (lepení, povrchová úprava).

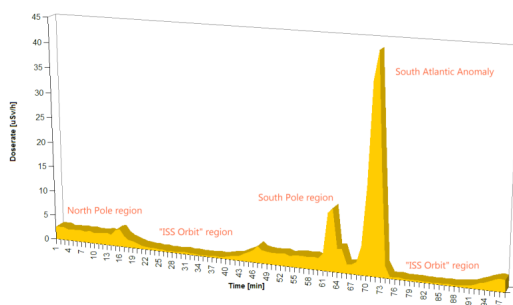
1.3 Dozimetr

Ukázka výstupu dat z dozimetru piDOSE je uvedena na obrázku 5. Průběh zobrazuje názornou představu o rozložení radiačního příkonu podél oběžné dráhy při jednom obletu družice. Graf zleva doprava znázorňuje nejprve průlet oblastí severního pólu, poté rovníkovou oblastí (oblast zájmu pro detekci GRB), pokračující dále přes jižní pól a vstupující přes oblast tzv. jiho-atlantické magnetické anomálie SAA (*South Atlantic anomaly*). Data dále plynule navazují na další vstup do oblasti severního pólu. V oblast

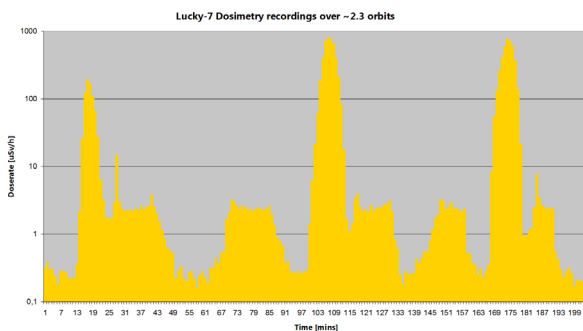
SAA dosahují dávkové příkony téměř skokově takové intenzity, že je zapotřebí je v grafu zobrazovat na logaritmickém měřítku, obrázek 6.



Obrázek 4: Senzorová deska družice Lucky-7 v nezakrytované podobě



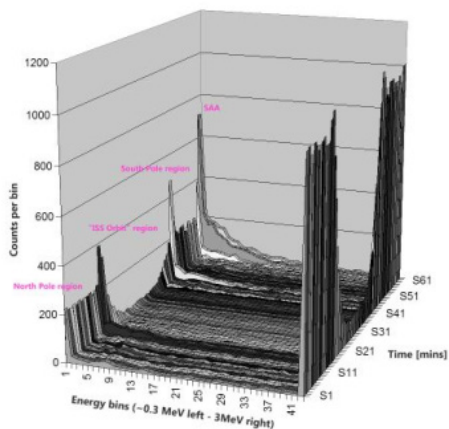
Obrázek 5: Záznam dat z dozimetru gama záření piDOSE pořízeného během jednoho obletu (~95 min) družice Lucky-7 kolem Země



Obrázek 6: Ukázka záznamu dávkového příkonu během tří obletů, znázorňující celkem tři průchody skrze oblast jihoatlantické magnetické anomálie (SAA)

1.4 Spektrometr gama záření

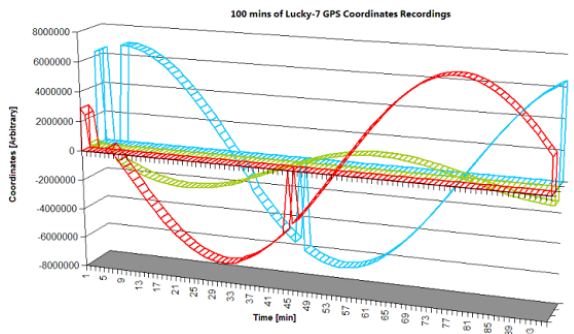
Použití *scintilačního krystalu* senzoru určeného pro detekci gama záblesků lze v průběhu mise alternovat za spektrometrický systém generující histogramy dopadající energie gama záření. Na obrázku 7 je uveden hodinový záznam dat s v režimu s rozlišením 43 kanálů. Z grafu je rovněž patrný profil rozložení intenzity záření, který se velice dobře shoduje s dozimetrickým měřením na obrázku 5.



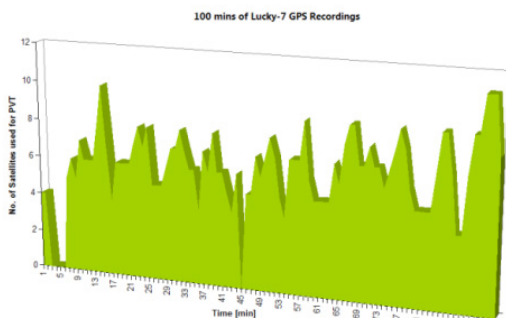
Obrázek 7: Rozložení energie gama záření detekované spektrometrem pořízené během 60 minut letu po oběžné dráze

1.5 GPS přijímač

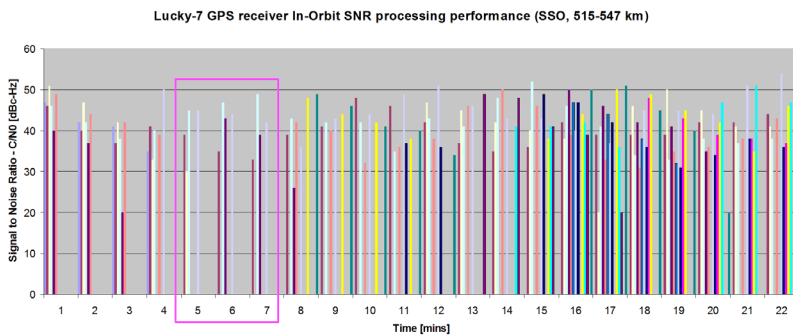
Vyvinutý navigační GPS přijímač byl konstruován s důrazem na minimalizaci spotřeby energie, která v porovnání s konkurenčními produkty v době vzniku a uvedení na trh dosahovala jen cca 10% (120 mW při 3,3 V), což systému dodalo skokovou přidanou hodnotu a vysokou konkurenční výhodu. K tomu byly využity expertní profesní znalosti Doc. Kováře, který v interním softwaru GPS přijímače omezil některé pro vesmírné prostředí nadbytečné funkce, jako kompenzace vícecestného průchodu signálu ionosférou. Plnohodnotný datový výstup přijímače je přímo v družicovém software příslušně kvantován tak, aby poskytoval data o poloze, rychlosti, čase a provozních parametrech příjmu s přednastaveným minutovým intervalem pro redukci dat. Dle údajů z telemetrických měření systém pracuje dle předpokladů, obrázek 8. Na obrázku 9 je uveden příklad záznamu jednoho z provozních parametrů přijímače, počet zpracovávaných satelitů pro výpočet polohy, rychlosti a času tzv. parametr PVT (*position, velocity, time*), kde minimum pro určování polohy jsou 4 satelity.



Obrázek 8: Záznam polohy v souřadnicích ECEF pořízený během jednoho obletu



Obrázek 9: Záznam vybraného provozního parametru příjmu (počet družic použitých pro výpočet polohy, rychlosti a času) během jednoho obletu

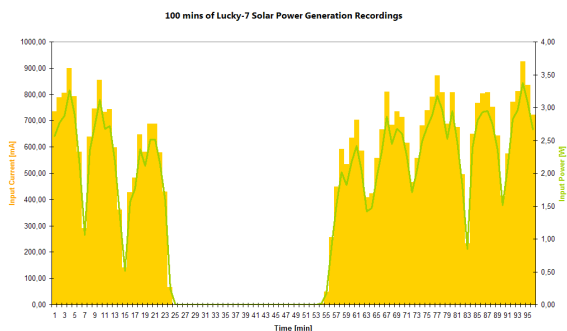


Obrázek 10: Detailní zobrazení obsazenosti kanálů GPS přijímače v průběhu letu, vyznačená oblast zobrazuje okamžiky, kdy k výpočtu PVT jsou k dispozici méně jak 4 družice

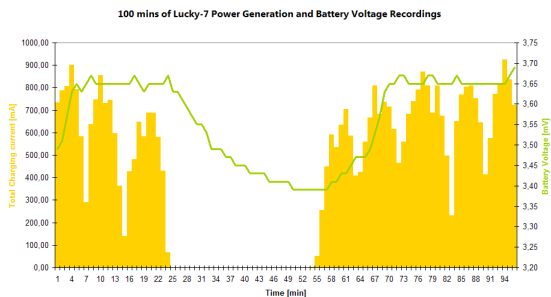
V polárních oblastech, při uvažované rotaci satelitu Lucky-7 může docházet ke krátkodobým výpádkům poskytování dat, neboť počet družic pro výpočet PVT nemusí dosahovat 4, z důvodů rozložení konstelace satelitů GPS ve spojení s vektorem letu družice Lucky-7 a její rotací, případně přijímaný signál z alespoň 4 satelitů nesplní podmínku elevační masky nebo SNR filtru (minimum prahu filtru nastaveno na úroveň 35 dBc/Hz). Detailní pohled na rozložení obsazenosti jednotlivých kanálů v oblasti s výpádkem je uveden na obrázku 10.

1.6 Napájecí zdroj

Vnější plášť satelitu pokrývá celkem 5 solárních panelů s celkem 10 řezů tří-přechodových solárních článků s vysokou konverzní účinností (cca 28 % při AM0, AU=1). Celkový průměrný energetický příkon systému dosahoval při daném obletu hodnoty 1,54 W, se započítáním neosvětlené části orbity v zemském stínu. Tato hodnota se však bude v závislosti na čase neustále proměňovat, neboť dochází k přirozenému pomalému driftu dráhy z plně do kvazi-synchronní.



Obrázek 11: Záznam celkového nabíjecího proudu ze solárních panelů a rozložení nabíjecího výkonu v průběhu letu po oběžné dráze



Obrázek 12: Záznam celkového nabíjecího proudu ze solárních panelů a rozložení napětí akumulátorů v průběhu letu po oběžné dráze

Maximální dodávaný příkon se dle předpokladů navíc zvýšil o cca 15 % v porovnání s pozemním příkonem ($Air\ Mass = 1,5$), který je limitovaný průchodem slunečního záření atmosférou. Přebytek energie je redukován trojicí výkonových rezistorů s automatickou regulací vybíjení. Vzniklá tepelná energie je přenášena do tělesa lithiových akumulátorů. Obrázek 12 zobrazuje tentýž časový úsek se zobrazením napětí akumulátorů. Z grafu je jasně patrná pomalá rotace družice a oblast zemského stínu. K vybíjení z maximálního napětí 3,60 V na provozní hodnotu cca 3,40 V (95% nabití) dochází na neosvětlené straně díky periodickému vysílání radiomajáku (perioda 20 s), při krátkodobém příkonu vysílače cca 3 W.

1.7 Kamera

Experimentální modul kamery má již na kontě několik snímků, včetně historický prvního barevného obrazu zemského povrchu pořízeného českou umělou družicí ve vesmíru, obrázek 13.



Obrázek 13: První barevný snímek zemského povrchu pořízený českou umělou družicí

Speciálně upravený kamerový systém s rozlišením VGA (640×480) a vestavěnou kompresí dat JPEG lze operovat celkem ve 125 kombinacích nastavení expozice, světlosti a kontrastu. Rozdíly v nastavení jsou patrné na následujících snímcích zemského povrchu (obrázek 14), Měsíce (obrázek 15) nebo nočního snímku v oblasti severní Itálie (obrázek 16). Kvůli nízkému úhlovému rozlišení je měsíční disk i ze zemské orbity ve výšce 500 km patrný pouze jako oblast cca 10×10 obrazových bodů.



Obrázek 14: Druhý snímek zemského povrchu pořízený českou umělou družicí ve vesmíru



Obrázek 15: Snímek Měsíce pořízený družicí Lucky-7



Obrázek 16: Noční snímek oblasti severní Itálie

2. Výhled dalších aktivit

Setrvalá funkce satelitu na oběžné dráze již v komunitě vývojářů malých družic vytvořila pozitivní dojem a některé týmy na základě publikovaných dat poptávají různorodé části elektrických systémů podobné konstrukce. Spolehlivost a funkce satelitu však nelze garantovat a celý systém tak může v dalších dnech selhat nebo se úplně odmlčet. V době finalizace tohoto příspěvku (26. 8. 2019) je stav všech systémů satelitu stále nedotčen a systém plně funkční.

V rámci stejného letu firma dodala i další letový hardware, jehož funkce byla zákazníkem nezávisle potvrzena stažením dat z jiného satelitu. Z důvodů obchodního tajemství však nemůžeme konkretizovat o jaký satelit a jaký subsystém se jednalo.

Z hlediska rozšiřování portfolia se společnost bude nadále zajímat i o komercializaci přenosového radiového spoje pro radioamatérské pásmo. Při průměrné době trvání jednoho přeletu nad územím jedné pozemní sledovací stanice je systém schopen přenést přibližně 70 kB dat, což je pro pásmo 70 cm téměř dvojnásobek dosavadních přenosových kapacit. Výsledku bylo dosaženo zejména návrhem nového binárního přenosového protokolu s výraznou asymetrií přenosu datovým kanálem v poměru času cca 250:1 (downlink/uplink).

Měření a analýza hluku s využitím mobilních sítí

Doc. Ing. Jiří Chod, CSc.

ČVUT v Praze, FEL, Katedra telekomunikační techniky

Abstrakt

Měření hluku – akustické zátěže – představuje jednu z obvyklých kontrolních činností pro praxi. Nejčastější bývá použito při kontrole limitů hygienických norem, kde akustická měření často rozhodují o vlivu hluku například na stavební povolení objektu. Základním problémem současnosti je, že standardní přístroje jsou relativně drahé a zejména vyžadují kvalifikovanou obsluhu po celou dobu měření, není je možno ponechat bez dozoru a jejich dlouhodobá aplikace je tedy obtížná. Popisovaná varianta nového přístupu k této problematice v příspěvku ukazuje možnosti současných technologií umožňující osazení jednoho nebo více snímacích mikrofónů do prostoru (nejenom plošně, ale i výškově) a jejich propojení, po základním zpracování, přes mobilní sítě 2,75G–4G s centrálním serverem kde jsou data uložena. Významnou výhodou je, že tato data lze měřit dlouhodobě a zpracovávat dle současných, ale i budoucích, akustických norem v libovolném čase, samozřejmě i v reálném. V tomto případě není třeba data předzpracovávat dle křivek norem ČSN EN, ale cílem je dodat jako „RAW“ data ke zpracování. To přináší jednak zlevnění konstrukce zařízení, ale i netušené možnosti budoucího zpracování. Data jsou doplněna meteorologickými (rychlost větru, teplota, atd.) a časovými údaji a údaji o poloze mikrofónu z GNSS. V samotném uspořádání měřícího kompletu lze aplikovat veškeré myslitelné varianty jak sítí PAN, tak sítí WAN.

Příspěvek ukazuje část výsledků spolupráce ČVUT FEL v Praze a společnosti EKOLA group, spol. s r. o. [1, 2] na návrhu zařízení nového měřícího kompletu řešícího tuto problematiku. Samotný projekt byl podpořen MPO ČR grantem FV 101636 „Automatizovaný systém pro prostorové monitorování hluku“ – AMS.

1. Úvod

Vnímání zvuku je důležité pro řadu činností člověka počínaje samotnou komunikací v podobě řeči. Jestliže však jsou zvukové vjemy příliš hlasité, rušivé nebo nepříjemné, nebo pokud se vyskytují v nevhodnou dobu, působí na člověka nepříznivě. Takové nežádoucí působení zvuku nazýváme hlukem.

Měření hluku – akustické zátěže – představuje jednu z obvyklých kontrolních činností pro praxi. Nejčastější bývá použito při kontrole limitů hygienických norem, kde akustická měření často rozhodují o vlivu hluku například na stavební povolení objektu. V ČR jsou hygienické limity hluku v současné době dány výchozím nařízením vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací [6], resp. jejich změnami dle nařízení vlády č. 217/2016 Sb. a nařízení vlády č. 241/2018 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací a řady dalších norem.

Stejně tak jsou standardizovány jak metody měření hluku, tak metody kontroly zdrojů hluku, např. dopravy, strojů, atd.

RAW data	primární (surová) nezpracovaná data
GNSS	Global navigation satellite system – Globální satelitní navigační systém [3, 4]
PAN	personal area network – osobní síť
WAN	wide area network – rozlehlá síť
AMS	automatizovaný systém pro prostorové monitorování hluku [1]
EZS	elektrická zabezpečovací signalizace
MESH	sítě se smíšenou topologií [8]

Tabulka 1: Zkratky použité v textu

Intenzita zvuku I je definována jako podíl výkonu P zvukového vlnění a plochy S , kterou vlnění prochází. Vyjadřuje se v decibelech [dB]. Vliv citlivosti lidského sluchu je charakterizován tzv. váhovací křivkou A, kterou je korigován naměřený kmitočtový průběh hladiny akustického tlaku (L_pA [dB]).

Hygienické limity hluku jsou pak stanoveny tabulkově pro následující prostory:

- chráněný venkovní prostor,
- chráněný venkovní prostor staveb,
- chráněný vnitřní prostor staveb,
- pracoviště.

Je tedy zřejmé, že konstrukce měřicích přístrojů je relativně složitá a v současnosti ji představují hybridní analogově/digitální konstrukce programově řízené. Přístroje musí samozřejmě splňovat i veškeré teplotní parametry s odpovídající přesností měření. Z toho plyne, že na obvodové i programové řešení jsou kladeny značné požadavky a situace na trhu ukazuje, že parametry splňuje jenom relativně malý počet výrobců.

V dalším se zaměříme na případy, kdy je třeba střednědobé a nebo dlouhodobé sledování hluku v určité oblasti a kde na rozdíl od jednorázové kontroly – tam je situace bezproblémová – je nutno měření provádět po delší dobu, typicky desítky nebo stovky hodin.

Stávající systémy stanic pro dlouhodobé monitorování hluku (obrázek 1) jsou zpravidla založeny na standardním zvukoměrném zařízení s možností ukládání a případně i přenosu dat. Jedná se většinou o klasický integrační zvukoměr, resp. analyzátor dodávaný některou z firem vyrábějících toto zařízení. Data z těchto zřízení jsou zpravidla ukládána přímo v paměti těchto zařízení a dávkově jsou předávána buď off-line nebo on-line do sběrného místa – serveru, či PC. Tento přenos se děje buď bezdrátově nebo po datových telefonních linkách, případně pomocí LAN, či optických kabelů, pokud jsou tyto v místě měření, resp. umístění systému dostupné.

Základním problémem je, že standardní přístroje jsou relativně drahé a zejména vyžadují kvalifikovanou obsluhu po celou dobu měření, není je možno ponechat bez dozoru a jejich dlouhodobá aplikace je tedy obtížná, nebo drahá.



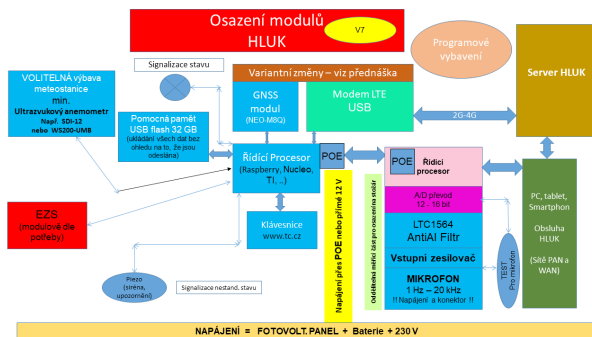
Obrázek 1: Příklad stacionárních monitorovacích zařízení pro akustická měření

2. Koncepce řešení

Existuje varianta měření, která mění princip sběru dat tak, aby data byla nasnímaná a uložena na serverech měřicího systému a teprve poté zpracována. Znamená to, že se využije „jenom“ snímání dat a jejich transport do úložiště, kde budou dále využívána.

Popisovaná varianta nového přístupu k této problematice v příspěvku ukazuje možnosti současných technologií umožňující osazení jednoho nebo více snímacích mikrofonů do prostoru (nejenom plošně, ale i výškově) a jejich propojení (pomocí sítí PAN) a po základním zpracování (pouze sestavení komunikační zprávy), přenos sejmутých dat pomocí sítí WAN, obvykle přes současné mobilní sítě 2,75G–4G do úložiště, kde jsou uložena. Významnou výhodou je, že tato data lze měřit dlouhodobě a zpracovávat dle současných, ale i budoucích, akustických norem v libovolném čase, samozřejmě i v reálném. Navíc lze provádět i řadu dalších měření jako např. další analýzu rozboru rušivých frekvencí a stanovení poměru jednotlivých zdrojů, plošné vytváření zvukových map, atd. V tomto případě není třeba data předzpracovávat dle křivek norem ČSN EN, ale cílem je dodat měřené veličiny jako „RAW data“ ke zpracování. To přináší jednak zlevnění konstrukce zařízení, ale i netušené možnosti budoucího zpracování. Data jsou doplněna meteorologickými (rychlost větru, teplota vzduchu, relativní vlhkost, výskyt srážek a míru srážek, atd.) a časovými údaji a údaji o poloze mikrofону z GNSS. V samotném uspořádání měřicího kompletu lze aplikovat veškeré myslitelné varianty jak sítí PAN, tak sítí WAN. Veškerá zaznamenaná analogová data budou tedy převedena do digitální podoby bez jakýchkoliv korekcí a další zpracování přenášených signálů je již softwarovou formou, a to včetně případných korekcí podle zařazeného typu filtru (A, C, Z) [7].

Základní koncepci jednoho z možných řešení zachycuje blokové schéma na obrázku 2.



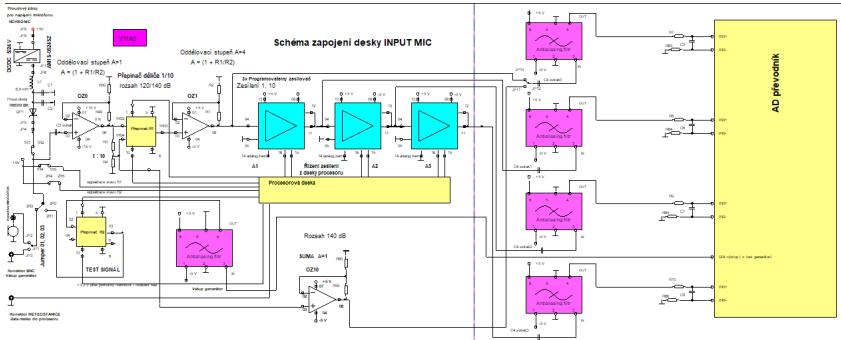
Obrázek 2: Blokové a komunikační schéma AMS

3. Realizace

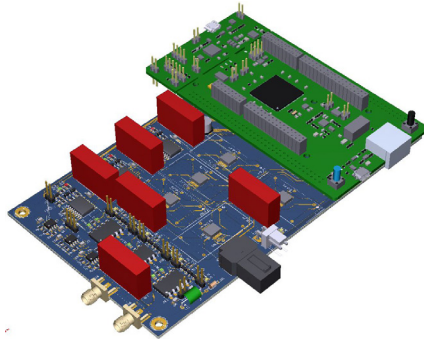
Každý z jednotlivých bloků sám o sobě představuje ucelené technické řešení, nicméně z hlediska konstrukce je zajímavá zejména část řešící vstup signálu z mikrofonu, jeho zesílení a regulace a po digitalizaci systém přenosu do serveru.

Na linearitu, stabilitu a přenosovou charakteristiku mikrofonu jsou kladeny extrémní požadavky, a proto je použit typový, certifikovaný, mikrofon firmy NORSONIC. Zvláštností je, že mikrofon předpokládá napájení z proudového zdroje a pro řešení obvodů je třeba mít v patrnosti, že požadovaný základní dynamický rozsah sahá od min. 40 dB do 120 dB, frekvenční charakteristika 1 Hz–20 kHz. Mikrofon poskytuje v této oblasti signál od 0,1 mV do 1 V a to klade opět extrémní nároky na regulaci zesílení, šum a stabilitu zesilovačů. Problém je dále zejména skoková změna vstupního signálu a překročení základního rozsahu např. při odpálení nálože v lomu a tedy až 140 dB (signál z mikrofonu je 10 V). To může vést i k (dočasněmu) zahlcení jednotlivých zesilovacích stupňů, a proto systém ukládání a digitalizace signálu využívá 4 kanálů A/D převodu, kde kromě koncových dat řetězce jsou odebírána i data jednotlivých zesilovacích stupňů. Princip je uveden na obrázku 3, kde je zároveň i vidět, že systém obsahuje i zpětně generovaný signál sloužící pro testování a kalibraci elektronické části zesilovače. V přednášce budou ukázána a komentována skutečná obvodová řešení vycházející z blokového schéma. Výsledek realizace plošného spoje v počítačové grafice a skutečné provedení ukazují obrázky 4 a 5. Výsledné provedení AMS pak obrázek 6.

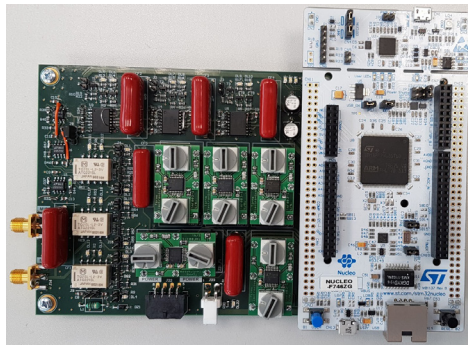
Data zpracovaná A/D převodníkem jsou doplněna údaji času, daty z městoastance a údaji o poloze z GNSS a jednak uložena na pomocnou paměťovou kartu a jednak odeslána na server pro další zpracování. Princip programového zajištění je uveden dále.



Obrázek 3: Blokové přehledové schéma vstupních obvodů



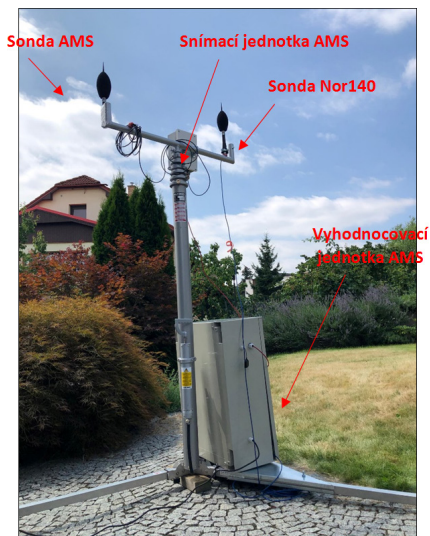
Obrázek 4: Celkový pohled na sestavu vstupních obvodů a její propojení na řídicí procesor v počítačové grafice



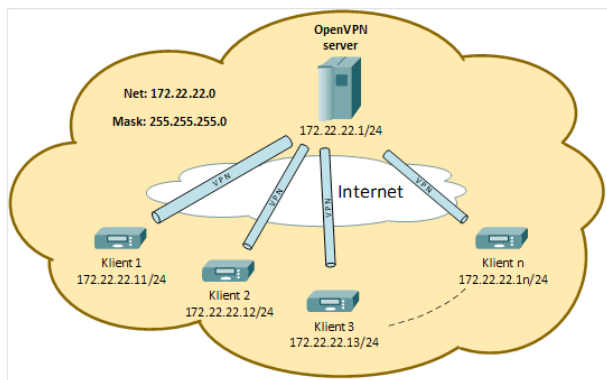
Obrázek 5: Skutečná realizace plošného spoje vstupních obvodů

Pro zabezpečení komunikace jednotlivých klientů se serverem v nezabezpečeném prostředí Internetu byla zvolena platforma OpenVPN založená na knihovně

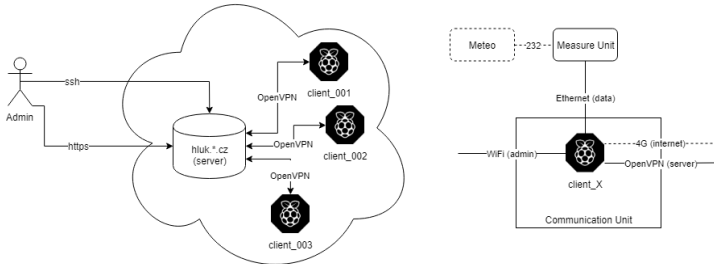
OpenSSL. Jednotlivé klientské stanice se připojují k centrálnímu OpenVPN serveru. Ověření probíhá prostřednictvím certifikátů podepsaných prostřednictvím připravené certifikační autority. Uvedená koncepce tak umožňuje revokaci zcizených certifikátů např. v případě krádeže zařízení. Logická topologie a použitý privátní adresní rozsah je zobrazen na obrázku 7, propojení jednotek se serverem a zasiťování v rámci jednotky je pak na obrázku 8.



Obrázek 6: Pohled na sestavu AMS



Obrázek 7: Logická topologie OpenVPN sítě včetně užitého privátního adresního rozsahu



Obrázek 8: Propojení jednotek se serverem a zasítování v rámci jednotky

Výsledné technické parametry:

- on line/off line zpracování informací,
- volitelný 12 nebo 16 bit A/D převod,
- 48 kHz vzorkování,
- přenos dat na server s průběžným ukládáním i do vnitřní paměti,
- data přenášena jako RAW,
- vysoká odolnost proti rušení – viz typ přenosu dat mezi jednotkami,
- možnosti připojení přídatných jednotek (meteorologická stanice, EZS, ...) a variabilita dalšího rozvoje systému,
- možnosti pro připojení *individuálně cejchovaných mikrofonů*,
- propojení i v síti MESH,
- propojení pomocí sítí PAN i WAN,
- dostatečná kapacita procesorů pro autonomní nasazení vč. výpočtu.

Možnosti nasazení:

- *obslužné/bezobslužné provedení*,
- autonomní/neautonomní systém.

4. Závěr

Navržený a realizovaný systém představuje novou variantu pro dlouhodobou kontrolu potřebných lokalit a prostorů. Tím, že měření mohou být bezobslužná a dlouhodobá zároveň ukazuje trendy a maximální zátěže a v souborech dat lze zpětně hledat i data, která původně neměla být brána vůbec v úvahu. Lze tedy například zpětně stanovit, co bylo rušivým zvukem a eliminovat jeho působení. Oblasti nasazení lze předpokládat nejenom v dopravě, případně ve výrobních halách, na letištích, ale i hledání optimálního umístění větrných elektráren.

System je názornou ukázkou aplikace mobilních komunikací jak v propojení jednotek mezi sebou, tak v napojení na vzdálený dohled a přenos dat.

5. Literatura

- [1] <<http://www.ekolagroup.cz/>>.
- [2] <<http://www.fel.cvut.cz/cz/>>.
- [3] Vejražka, F.: Systémy GNSS a jejich aktuální stav, Sborník přednášek konference Radiokomunikace 2009, UNIT Pardubice.
- [4] Vejražka, F.: Novinky v satelitní navigaci, Sborník přednášek konference Radiokomunikace 2017, UNIT Pardubice.
- [5] Kovář P.: Witch Navigator – softwarový přijímač GNSS pro výzkum a výuku Sborník přednášek konference Radiokomunikace 2011, UNIT Pardubice.
- [6] Sběrka zákonů a Sběrka mezinárodních smluv, <<https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/start.aspx>>.
- [7] Váhové filtry pro měření zvuku, <<https://www.ekosoftware.cz/vahove-filtry-pro-mereni-zvuku>>.
- [8] Žalud, V.: Moderní buňkové sítě, rádiové sítě AD-hoc a sítě mesh: obecné principy, Sborník přednášek konference Radiokomunikace 2011, UNIT Pardubice.

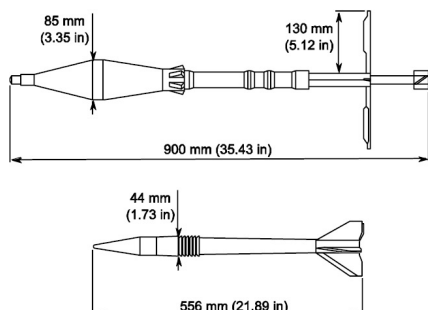
Vývoj radarových senzorů pro aktivní ochranu bojových vozidel

Doc. Ing. Přemysl Hudec, CSc.

ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektromagnetického pole

1. Úvod

Aktivní ochrana (AO) patří mezi nově vyvíjené způsoby ochrany bojových vozidel. Základním principem je detekce přibližujících se ohrožujících střel a aktivace vhodné protistřely, která ohrožující střelu zneškodní nebo alespoň výrazně sníží její účinky. Pracoviště ČVUT-FEL na tomto projektu již řadu let spolupracuje s Vojenským výzkumným ústavem Brno a společností Explosia Pardubice. Hlavním úkolem našeho týmu je návrh radarových senzorů schopných detekovat velmi rychlé střely, sledovat je až do bezprostřední blízkosti bojových vozidel a stanovit jejich případný bod dopadu POI (*point of impact*) a čas dopadu TOI (*time of impact*) na vozidlo. Jako ohrožující střely byly a jsou uvažovány zejména střely typu RPG-7 letící rychlostí 120–240 m/s a v některých testech i kinetické podkaliberní střely letící rychlostí až 1 700 m/s, obrázek 1.



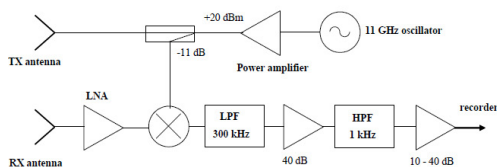
Obrázek 1: Rozměry typických ohrožujících střel (vlevo), střela RPG-7 v odpalovači (vpravo)

Navržené prostředky zneškodnění se vyznačují tím, že jsou schopné zlikvidovat střely v těsné blízkosti chráněného vozidla. Je tedy možné reagovat i na ohrožující střely typu RPG-7 vypálené 20–30 m od vozidla, což odpovídá požadavkům na funkci AO například i v městském prostředí. V rámci vývoje byla navržena a testována celá řada různých struktur a konfigurací a byla řešena široká související problematika.

2. CW senzory

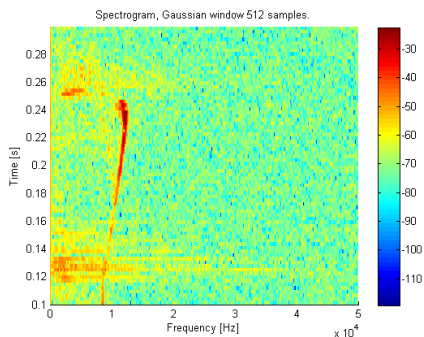
Od začátku byla pozornost soustředěna na senzory typu CW pracující s kontinuální elektromagnetickou vlnou, obrázek 2. Pro danou aplikaci je jejich zásadní výhodou nulová mrtvá zóna a velmi přesné měření rychlosti. První senzory používaly čistou CW strukturu a pro lokalizaci ohrožujících střel speciální konfigurace antén. Funkce je mimořádně jednoduchá: místní oscilátor generuje CW signál, který je zesílen

a vyslán k cíli vysílací anténou. Frekvence signálu odraženého od pohybujícího se cíle je vzhledem k vysílanému signálu posunuta o dopplerovský posuv f_d . Odražený signál je přijat přijímací anténou, zesílen LNA a přiveden na vstup směšovače fungujícího jako down-konvertor do základního pásma (BB), kde se objevuje přímo signál s frekvencí f_d .



Obrázek 2: Blokové schéma jednoduchého CW senzoru (vlevo), realizace pro první střelecké testy (vpravo)

Výstupní NF signály byly vzorkovány ADC a zpracovány FFT většinou ve formě spektrogramů, příklad je uveden na obrázku 3.



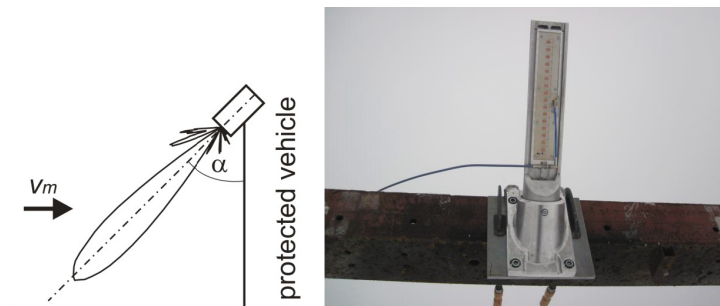
Obrázku 3: Příklad vypočteného spektrogramu

Uvedený graf ukazuje, že i takto velmi jednoduchá struktura byla schopná detekovat střely typu RPG na několik desítek metrů, měřit jejich rychlost a detekovat například i zapálení raketového motoru v čase 0,12 ms. CW struktury ale neumí měřit vzdálenost. Pro aktivaci protistřel byla vyzkoušena a nějaký čas docela s úspěchem používána koncepce mikrovlnné závory, obrázek 4.

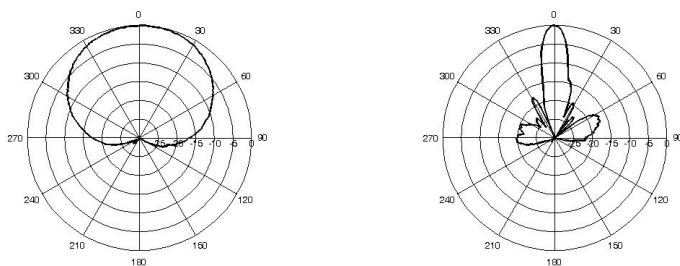
Mikrovlnné závory byly vybaveny anténami s širokými vyzářovacími diagramy v horizontální rovině a úzkými vyzářovacími diagramy ve vertikální rovině, obrázek 5, s tím, že antény byly skloněny pod relativně ostrým úhlem ve vztahu k přilétajícím střelám.

Pokud OS prolétla tímto vyzářovacím diagramem, tak z výstupních signálů senzoru bylo možné vygenerovat spouštěcí signály. Následující fotografie, obrázek 6, ukazují

umístění mikrovlnných závor na tanku a výsledky při testování aktivní ochrany proti podkaliberním kinetickým střelám.



Obrázek 4: Princip mikrovlnné závor (vlevo), příklad použité antény (vpravo)



Obrázek 5: Vyzářovací diagramy antén pro mikrovlnné závor, v horizontální rovině (vlevo), ve vertikální rovině (vpravo)



Obrázek 6: Mikrovlnné závor na tanku (vlevo), svědečný plech s výsledky (vpravo)

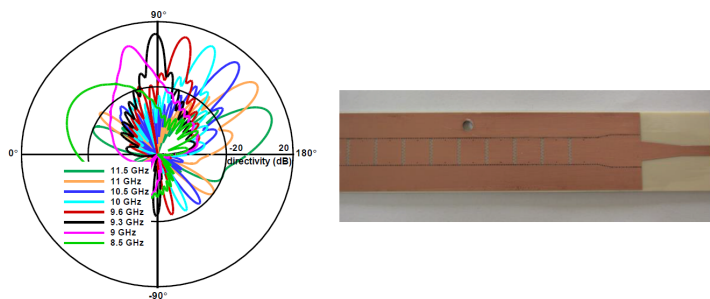
Několik kg hmotné kinetické šípky mají tak vysokou energii, že je protistřela nemůže zlikvidovat. Nicméně pouhé vychýlení stačí na to, aby se hloubka průrazu v pancíři snížila z cca 50 cm na polovinu nebo třetinu, což v případě tanku zabezpečuje spolehlivé

přežití posádky. Na obrázku 7 jsou uvedeny výsledky testování střel RPG-7, což jsou mimořádně rozšířené a účinné kumulativní střely s projektilem formovaným výbuchem. Projektil získá výbuchem rychlost až 10 000 m/s a je schopný prostřelit až 30 cm nejlepší pancéřové oceli (15 desek tlustých 2 cm). Při aktivaci AO je možné hlavicí RPG-7 úplně zničit, takže dojde jen k malému prohnutí a ožehnutí plechu (8 mm pancíř odpovídající vozidlům Pandur).



Obrázek 7: Testování účinnosti RPG-7 (vlevo), svědečný plech při nasazení AO (vpravo)

Bylo také navrženo, realizováno a testováno i velmi zajímavé řešení založené na využití směrových antén typu „leaky-wave“. Ty jsou ve vertikální rovině směrové a umožňují tento směr měnit pouhou změnou pracovní frekvence, obrázek 8.

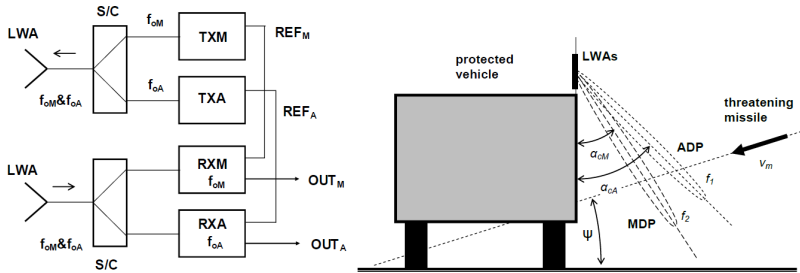


Obrázek 8: Vyzářovací diagramy antény „leaky-wave“ ve vertikální rovině (vlevo), realizace (vpravo)

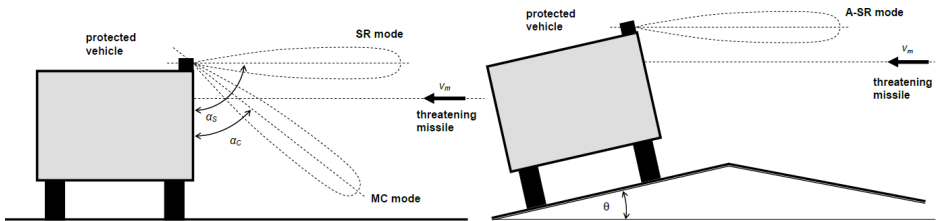
Pokud jsou takové antény provozovány současně na 2 různých frekvencích, tak lze zajistit snímání ze dvou různých elevací. Lze tak například realizovat 2 úroňovou mikrovlnnou závoru, obrázek 9.

Vyhodnocením průletu 2 různými rovinami a zpracováním signálů z více mikrovlnných závor vedle sebe lze bod dopadu ohrožující střely na vozidlo významně zpřesnit. Lze také adaptabilně přepínat mezi 2 úroňovou závoru a přehledovým

radarem s jednoduchou závorou, obrázek 10. Náклон přehledového radaru i závor lze adaptivně měnit při náklonu vozidla.

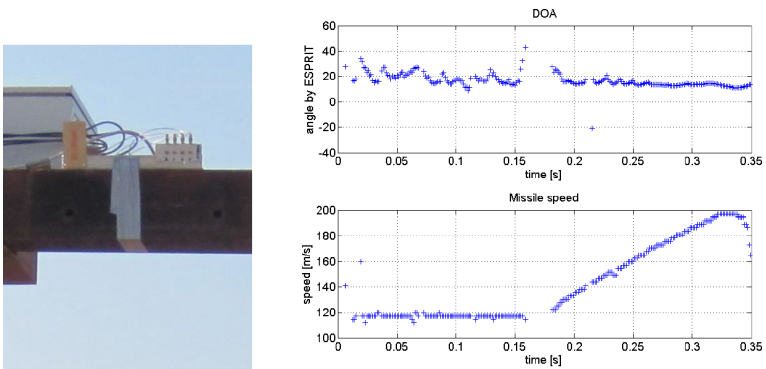


Obrázek 9: Zapojení senzoru pracujícího na 2 různých frekvencích (vlevo), realizace 2 úroňové mikrovlnné závor pomocí antén „leaky-wave“ (vpravo)



Obrázek 10: Senzor s anténami typu „leaky-wave“ v režimu přehledový radar plus mikrovlnná závor (vlevo), adaptabilní změna náklonu vyzařovacího diagramu (vpravo)

Testováno bylo také interferometrické vyhodnocování s použitím 4 kanálového přijímače s využitím metod ESPRIT a MUSIC. Pro určení POI byl vyhodnocován DOA (*direction of arrival*) ze 2 vzdálených radarů.

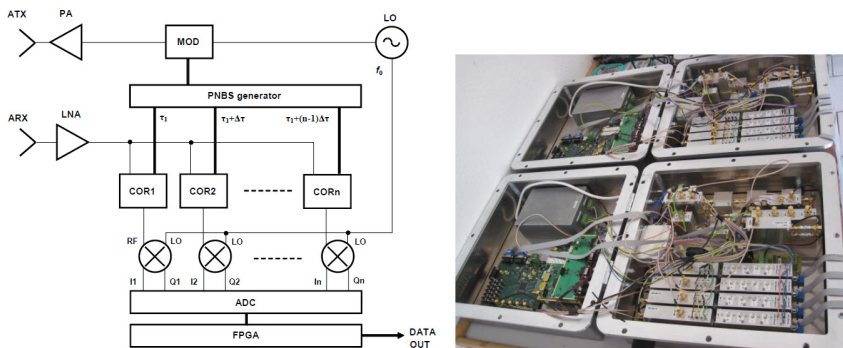


Obrázek 11: Interferometrický senzor se 4 kanálovým přijímačem (vlevo), příklad měření DOA (vpravo)

Celkově CW radary představují rychlé a překvapivě dobré senzory, nicméně přesné určení času dopadu a místa dopadu bez měření vzdálenosti nebylo s nimi dostatečně přesné a pro účely AO dostatečně spolehlivé.

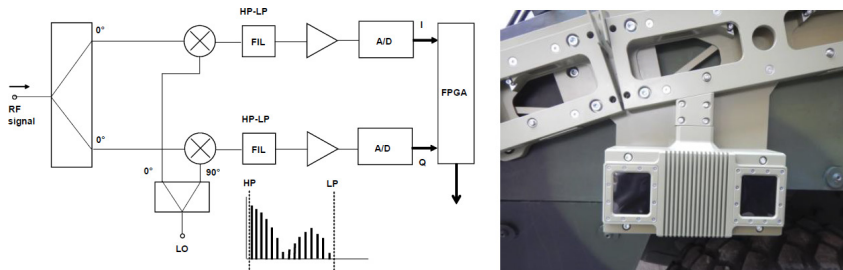
3. PN-CW radary

Poslední verze senzorů pracují s technikou PN-CW, tedy s digitální modulací CW signálu, obrázek 12. Tyto radary jsou schopné měřit vedle rychlosti cílů i jejich vzdálenosti.



Obrázek 12: Blokové schéma PN-CW radaru (vlevo), realizace s analogovou dekorelací (vpravo)

Vysílač vysílá CW signál s digitální modulací pomocí pseudonáhodné posloupnosti (PNBS). V přijímači je přijatý signál ve více kanálech korelován s časově posunutými vzorky PNBS. Vzdálenosti cílů lze určit z poloh korelačních špiček. Pro zvýšení rozlišení lze mezi 2 špičkami interpolovat. V první verzi byly sestaveny 4 kanálové PN-CW radary s analogovou dekorelací. Při čipové rychlosti 25 MHz byla vzdálenost 2 špiček 6 metrů a dosah 24 m. Tato verze ověřila funkčnost tohoto řešení, nicméně vykazovala značné rozměry a díky nízkému počtu kanálů měla jen omezený dosah. Zásadní pokrok nastal při realizaci verze PN-CW radaru s digitální dekorelací, obrázek 13.

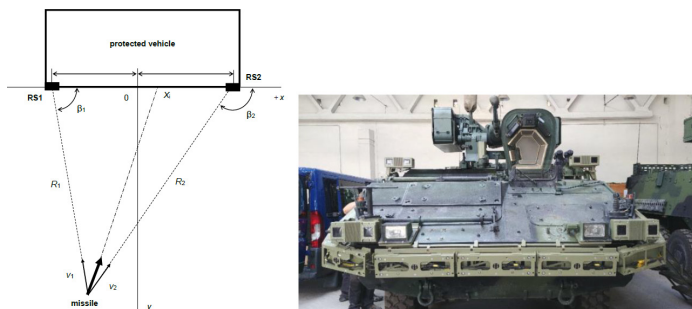


Obrázek 13: Blokové schéma PN-CW radaru s digitální dekorelací (vlevo), realizace (vpravo)

Základem těchto senzorů je IQ konverze přijatého modulovaného signálu do BB, dostatečně rychlé vzorkování a realizace dekorelace až v FPGA. Při $f_{chip} = 100$ MHz bylo použito vzorkování 500 MSaps, digitální zpracování v FPGA umožnilo realizaci mnoha desítek korelačních kanálů. Dosah stávající verze je cca 50 m, což je pro danou aplikaci zcela dostatečné. Technika PN-CW také potlačuje detekovatelnost radarů nepřitelem a jejich vzájemné rušení, takže na jednom vozidle může bez problémů fungovat více senzorů.

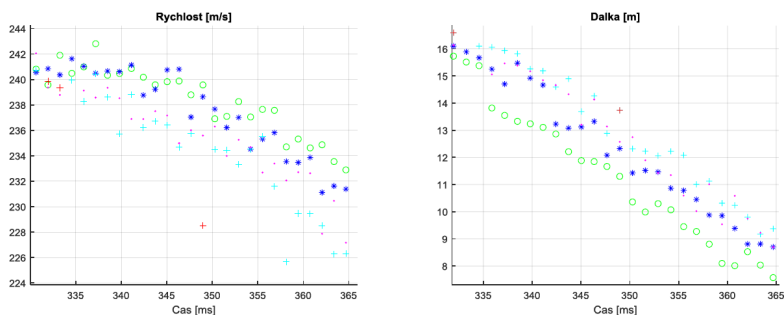
4. Měření POI a TOI

Celý systém pracuje jako multisenzorový s tím, že bod a čas dopadu jsou vyhodnocovány v centrální jednotce pomocí Kalmánovy filtrace (KF) z měření radiálních rychlostí a vzdáleností prováděných současně několika senzory, obrázek 14.



Obrázek 14: Princip určování POI, TOI (vlevo), 4 senzory instalované na předku vozidla Pandur (vpravo)

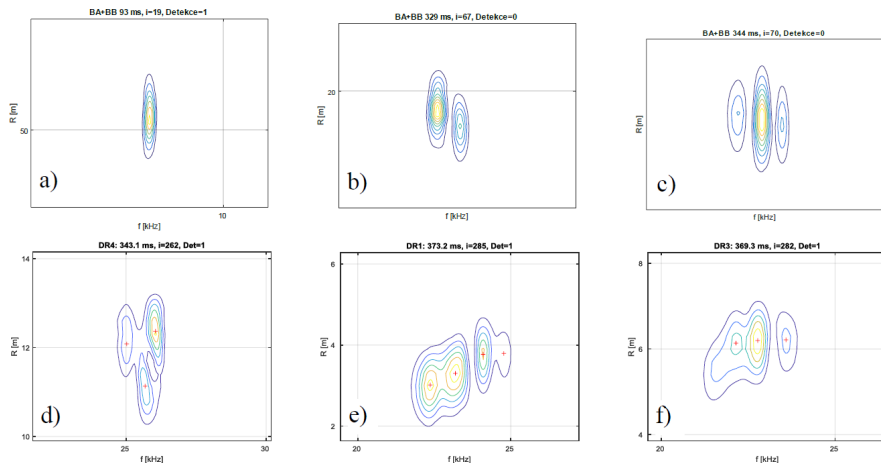
Příklady měření vzdáleností a rychlostí z více radarů vstupujících do KF jsou na obrázku 15.



Obrázek 15: Příklady měřených radiálních rychlostí (vlevo), a vzdáleností (vpravo) vstupujících do KF

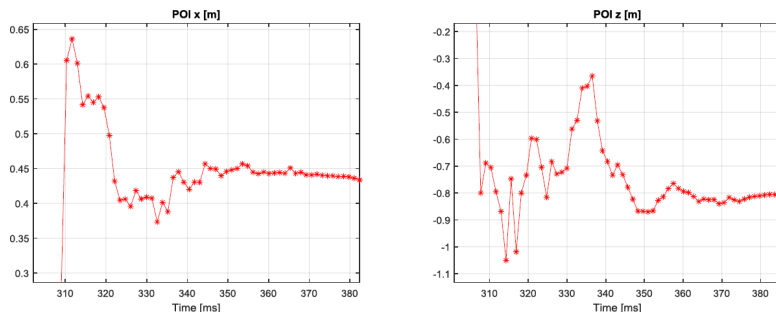
V ideálním případě by všechny průběhy měly být ve formě hladkých křivek. Praktické průběhy však často vykazují určité „odskoky“ a „nespojivosti“, které mohou do značné míry narušovat konvergenci KF. V ideálním případě by senzory měly deteko-

vat jeden cíl odpovídající špičce ohrožující střely, obrázek 16a). Rozlišení ve vzdálenosti je dáno čipovou rychlostí, rozlišení ve frekvenci nastavenými parametry FFT. V praxi je ale takto detekovaných cílů málo, skoro vždy je detekována množina více cílů, z nichž řada představuje falešné ve skutečnosti neexistující cíle.



Obrázek 16: Příklady detekovaných cílů zobrazených v rovině dopplerovská frekvence – vzdálenost

Na obrázcích b) a c) je vidět vliv vícecestného šíření, přičemž správný cíl je vždy ten s nejvyšší frekvencí a nejnižší vzdáleností. Na obrázcích d) a f) jsou ve větší vzdálenosti „vidět“ otáčející se křídélka. Na obrázku e) je znázorněna typická situace ve velmi blízké zóně. Problémem falešných cílů je to, že zhoršují konvergenci KF.



Obrázek 17: Příklady konvergence KF – výpočet POI v ose x (vlevo), výpočet POI v ose z (vpravo); správné hodnoty jsou $POI_x = 0,44\text{ m}$, $POI_z = -0,8\text{ m}$

Za nepříznivých podmínek může i jen několik málo špatně určených cílů (špatně vybraných z množiny detekovaných cílů) narušit konvergenci KF. To je vidět na obrázku 17, kdy v čase kolem 335 ms odskočí POI_z na zcela chybnou hodnotu. Proto je vývoj senzorů v poslední době soustředěn zejména na tuto problematiku.

5. Závěr

Vývoj senzorů pro aktivní ochranu byl od začátku zaměřen na radary typu CW, hlavním důvodem byla nulová mrtvá zóna a nekompromisní měření rychlosti. Implementace založené na čistých CW senzorech ale neposkytovaly dostatečnou přesnost a spolehlivost pro všechny úhly příletu ohrožujících střel. Jako vyhovující řešení se ukázala varianta PN-CW s digitální dekorrelací. Použitá metoda určení POI a TOI je založena na vyhodnocování údajů z více senzorů a umožňuje i ochranu střechy vozidla. Jako největší problém se docela nečekaně ukázala detekce vícenásobných cílů. Při špatném výběru cíle z množiny detekovaných cílů dochází k chybám konvergence KF a nižší spolehlivosti systému AO. Pokročilými metodami zpracování signálů se daří detekci falešných cílů již dosti účinně potlačovat. Praktické testy vyvíjeného systému aktivní ochrany vykazují velmi zajímavý stupeň funkčnosti, a to při střelbě z malých i velkých vzdáleností i pod různými úhly.

Rizika expozice člověka elektromagnetickému poli v pásmu cm a mm vln

Doc. Ing. Lukáš Jelínek, Ph. D.

Státní zdravotní ústav Praha

1. Úvod

Zavádění (léto 2019) telekomunikační sítě 5G je spojeno s obavami o zdraví osob, které budou exponovány elektromagnetickému poli ve frekvenčním pásmu centimetrových a milimetrových vln generovaných rádiovým rozhraním tohoto systému. S obavami přichází i značný počet dezinformací, které se za pomoci internetu rychle šíří. Následně apely některých občanů k zastavení budování nové telekomunikační sítě tak získávají iracionální nádech. V takové situaci je důležité danou problematiku racionalizovat a popsat vědecky ověřená rizika, která z používání dané technologie plynou. Tento postup se ukázal jako účinný i v předchozích vlnách obav, které byly spojeny s rádiovým a televizním vysíláním, rozvodem elektrické energie, počítačovými monitory a mobilními sítěmi předchozích generací, především té druhé. Důležitou ingrediencí úspěchu bylo též nepoužití principu předběžné opatrnosti, který by vedl jednak k rozdmýchání obav, a také k zastavení vývoje dané technologie a jejímu faktickému zániku, to vše bez pozitivního efektu na zdraví exponovaných osob [1, 2].

V tomto článku nejprve stručně popíšeme změny, které telekomunikační síť 5G z pohledu ochrany zdraví přináší. Dále popíšeme, jak je vystavěna ochrana zdraví před expozicí osob elektromagnetickým polím ve frekvenčním rozsahu od stovek MHz do stovek GHz, tedy ve frekvenčním rozsahu významně širším, než se kterým síť 5G počítá.

2. Telekomunikační síť 5G

K datu psaní tohoto textu (léto 2019) neexistuje definitivní standard pro síť 5G. Existují jen průmyslové standardy organizace 3GPP [4] pro postupné evoluční fáze systémů 5G a slib, že konečná verze by měla být dostupná v roce 2020 (IMT-2020 od mezinárodní telekomunikační unie [3]). Bez ohledu na chybějící standardizaci lze však bezpečně říci, že síť 5G se od sítě čtvrté generace nebude na radiové vrstvě lišit principiálně. Radiová část bude stále tvořena buňkovou sítí základnových stanic a k nim připojenými koncovými zařízeními. Základnové stanice v síti 5G budou dvou typů.

2.1 Makro-buňka

Základnová stanice pokrývající okolí do vzdálenosti větší než stovky metrů. Tyto základnové stanice budou velmi podobné těm, které jsou na střechách domů, stožárech, či věžích již dnes v síti generace čtvrté. Budou též disponovat podobným vysílaným výkonem v řádech desítek až stovek wattů. Makro-buňky budou typicky

pracovat s frekvencemi blízkými současné telekomunikační síti 4G (0,7–6 GHz). Jako dnes bude jejich nejbližší okolí nepřístupné neproškoleným osobám.

2.2 Mikro(piko)-buňka

Základnová stanice pokrývající malé plochy zajišťující vysokorychlostní komunikaci s velmi malým zpožděním. Vzhledem k požadavku na vysoké rychlosti se počítá s nasazením vyšších frekvenčních pásem (24 GHz a více) a anténních polí s vysokým ziskem (v okolí 25 dBi). Tato anténní pole budou tvořena stovkami elementárních zářičů a dokáží zformovat pro každou aktivní mobilní stanici jí určený „tužkový“ vyzařovací svazek. Tím se prakticky vyloučí expozice určitého uživatele signály všech ostatních aktivních uživatelů systému. Tento typ základnových stanic bude typicky umístěn na menší věži či zdi domu s přímým výhledem na pokrývané prostranství a bude pracovat s výkony do přibližně 10 W u *mikro-buněk* či do 1 W u *piko-buněk*. Expozice v těsné blízkosti stanice bude zamezena fyzickým umístěním stanice. Je důležité též poznamenat, že elektromagnetické pole z uvedených vysokých frekvenčních pásem bude provázet značný útlum při průchodu zdí nebo moderními okny s termoizolací, čímž bude prakticky anulována expozice osob uvnitř budov od těchto základnových stanic [5].

2.3 Koncová zařízení

Dalším expozičním faktorem budou vlastní koncová zařízení. Ta budou muset být schopna komunikovat se všemi zmíněnými typy základnových stanic a často i mezi sebou. Jejich časově střední vysílaný výkon se předpokládá na úrovni shodné s koncovými zařízeními v síti čtvrté generace v případě mobilních telefonů, případně významně nižší v případě zařízení internetu věcí. Detailní výkonové úrovně těchto zařízení nejsou v době psaní tohoto textu (léto 2019) známé.

Pro detailnější pojednání o radiovém rozhraní telekomunikační sítě 5G lze odkázat na [5–8] a v nich obsažené citace.

3. Ochrana zdraví před elektromagnetickým polem z frekvenčního pásma 0,1–300 GHz

Ochrana zdraví před konkrétním fyzikálním agens (v tomto případě vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem) je založena na zamezení zdravotních účinků jím působených. Na tomto místě je dobré poznamenat, že:

Zdravotním účinkem je v tomto kontextu míněn negativní efekt na zdraví člověka. Tyto zdravotní účinky je přitom důležité odlišit od fyzikálních účinků (jakýkoli fyzikální projev expozice) či biologických účinků (jakýkoli projev expozice na buněčné úrovni). Absolutní většina fyzikálních projevů expozice lidské tkáni elektromagnetickému poli není biologickým účinkem a už vůbec ne zdravotním účinkem. Dále pak platí, že zdaleka ne každý biologický účinek expozice elektromagnetickému pole má vliv na lidské zdraví. Mnohé biologické efekty jsou eliminovány fyziologickými procesy [9].

Často existuje celá řada zdravotních účinků daného expozičního agens. Tyto účinky však nastávají při různých intenzitách expozice. V takovém případě postačí nalézt ten zdravotní účinek, který nastává z hlediska intenzity expozice nejdříve. Ochrana před tímto zdravotním účinkem zaručuje i ochranu proti všem ostatním zdravotním účinkům daného expozičního agens.

V případě expozice člověka elektromagnetickému poli z frekvenčního pásma 0,1–300 GHz současný stav vědeckého poznání (více než 70 let systematického výzkumu) ukazuje, že zastřešujícím účinkem je ohřev tkáně a z něj vznikající fyziologické efekty. Ostatní efekty expozice buďto nastávají při vyšších intenzitách expozice, případně jsou spojeny s ohřevem [10–13]. V současné době existuje konsensus, že ohřev tkáně o méně než přibližně 1 °C nevede k žádným zdravotním účinkům expozice. Výzkumy zároveň ukazují, že efekty jsou akutní. Dlouhodobé účinky expozice nebyly potvrzeny, navzdory řadě studií zabývajících se i karcinogenitou a genotoxicitou [14, 15]. V případě vysokofrekvenčních polí také nebyla (s výjimkou neškodného jevu mikrovlnného slyšení [11]) nikdy potvrzena závislost expozice na konkrétním časovém průběhu exponujícího elektromagnetického pole. To umožňuje do dlouhodobých studií zahrnout i expozici radiovému a televiznímu vysílání (celoplošná expozice trvající téměř 100 let) či expozici telekomunikačním sítím první až čtvrté generace (v rozvinutých zemích trvající déle než 20 let). Ve všech těchto případech, stejně jako v plánované telekomunikační síti 5G, je elektromagnetické pole, kterému jsou lidé exponováni, do velké míry chaotické (interferující řečové a obrazové signály či fragmentovaná data) a jím působená expozice porovnatelná. Jediným rozdílem těchto technologií tak zůstává frekvence nosné vlny, jejíž efekt na hodnocení expozice je diskutován v následující sekci.

4. Expoziční limity

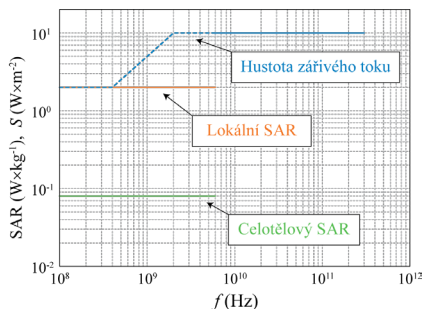
Expozičním limitem je typicky myšlena hodnota, platná pro danou expoziční situaci, jejíž nepřekročení zaručuje, že exponovaná osoba nebude poškozována na zdraví. Za velmi univerzální expoziční limit v případě expozice vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli by bylo možné použít ohřev tkáně. Takový limit je však nepraktický, jelikož jen zprostředkovaně souvisí s elektromagnetickou úlohou pro exponovanou osobu. Výhodnější je stanovit expoziční limit přímo pro elektromagnetické veličiny, tak, aby mohly být snadno použity běžně dostupné výpočetní modely. Nejpoužívanější expoziční limity [10, 16] tak jednotně používají:

- měrný absorbovaný výkon v tkáni,
- hustotu zářivého toku dopadající na exponovanou osobu.

V obou případech je hodnocen časový průměr zjišťované výkonové veličiny. V prvním případě je ustálen průměrovací interval na dobu šesti minut. Ve druhém se doba zkracuje s rostoucí frekvencí, více [10, 17].

V případě telekomunikační sítě 5G bude měrný absorbovaný výkon primárně hodnocen u koncových zařízení, která se mohou nacházet v těsné blízkosti exponované

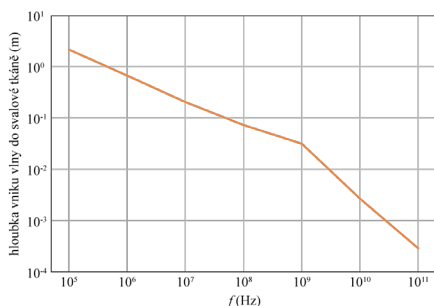
osoby. Základnové stanice jak *makro-*, *mikro-* tak *piko-* buněk budou primárně hodnoceny za pomoci hustoty zářivého toku, jelikož ve většině expozičních situací se bude exponovaná osoba nacházet v zářivé oblasti zdroje. Expoziční limity jsou ukázány na obrázku 1.



Obrázek 1: Expoziční limit platný pro ostatní osoby v komunálním prostředí (nekontrovaná expozice) a pro frekvenční interval 0,1–300 GHz

Ve frekvenčním intervalu překryvu, platí, že nepřekročení expozičního limitu pro hustotu zářivého toku nezaručuje nepřekročení expozičního limitu pro měrný absorbovaný výkon. Ekvivalence obou limitů je platná pouze při expozici ve zářivé zóně zdroje. V případě expozice v blízké zóně zdroje je třeba expozici hodnotit pomocí měrného absorbovaného výkonu.

Kromě konkrétních hodnot expozičních limitů obrázek 1 také ukazuje, že měrný absorbovaný výkon se striktně nepoužívá u frekvencí vyšších než přibližně 6 GHz. To je způsobeno fyzikálním mechanismem absorpce výkonu v lidské tkáni. Lidská tkáň jednak vykazuje silný povrchový jev, viz obrázek 2, a za druhé je při takto vysokých kmitočtech lidské tělo jako objekt nekoherentním přijímačem, lze ho tedy považovat za soustavu nezávislých absorpčních ploch.



Obrázek 2: Hloubka vniku rovinné elektromagnetické vlny do svalové tkáně

5. Ochrana zdraví před elektromagnetickým polem v telekomunikační síti 5G

Česká i světová legislativa disponuje již od počátku dvacátého prvního století expozičními limity pro celý interval frekvencí neionizujícího záření, tedy od statických polí až po ultrafialové záření. Tyto expoziční limity jsou vystavěny na detailní znalosti interakce elektromagnetického pole a živé tkáně a jsou proto zcela nezávislé na technologii, která elektromagnetické pole generuje. Legislativa pro ochranu zdraví je tedy zcela připravena na nástup telekomunikační sítě 5G, která v rámci frekvenčního intervalu neionizujícího záření zabírá méně než dvě tisíce procenta.

6. Otevřené otázky do budoucna

Bez ohledu na současnou připravenost bude dál probíhat výzkum v oblasti biologických a zdravotních účinků elektromagnetického pole na živé organismy. Jednou z hlavních oblastí současného zájmu se stává expozice ve frekvenční oblasti jednotek THz, kde existuje jen velmi málo experimentálních výsledků, což je způsobeno nevelkým počtem fyzikálních zdrojů, které jsou tato elektromagnetická pole schopna generovat. Jednotky THz jsou také frekvenční oblast, kde dochází ke styku dvou fyzikálních oblastí, mikrovlnné techniky na straně jedné a optiky na straně druhé. Tyto dvě fyzikální oblasti bude třeba spojit jak terminologicky, tak věcně, aby bylo možné vystavět robustní expoziční limity v této frekvenční oblasti. V současné době jsou limity v této frekvenční oblasti nesourodé, což odráží zcela odlišné požadavky na ochranu zdraví na spodní a horní hraně tohoto intervalu: úplné zamezení zdravotních účinků na straně mikrovlnné [10] versus ochrana před akutními termálními efekty především v oblasti oka na straně optické [18].

7. Literatura

- [1] Göthe, C. J., Molin, C., Nilsson C. G., "The environmental somatization syndrome", *Psychosomatics* 36, pp. 1–11, 1995.
- [2] Landgrebe, M., Barta, W., Rosengarth, K., Frick, U., Hauser, S., Langguth, B., Rutschmann, R., Greenlee, M. W., Hajak, G., Eichhammer, P., "Neuronal correlates of symptom formation in functional somatic syndromes: A fMRI study", *NeuroImage* 41, pp. 1336–1344, 2008.
- [3] <<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>>.
- [4] <<https://www.3gpp.org/>>.
- [5] Hemadeh, I. A., Satyanarayana, K., El-Hajjar, M. Hanzo, L., "Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget", *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20, pp. 870–913, 2018.
- [6] <<https://en.wikipedia.org/wiki/5G>>.
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/5G_NR_frequency_bands>.

- [8] Morgado, A., Mohammed Saidul Huq, K., Mumtaz, S., Rodriguez, J., "A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives", *Digital Communications and Networks* 4, pp. 87–97, 2018.
- [9] Valberg, A. P., Emilie van Deventer, T., Repacholi, M. H., "Base Stations and Wireless Networks –Radiofrequency (RF) Exposures and Health Consequences", *Environmental Health Perspectives* 115, pp. 416–423, 2007.
- [10] International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines on limiting exposure-to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics* 74, pp. 494–522, 1998.
- [11] Lin, J. C., "Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy", O. Gandhi, Ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall,, pp. 278–318, 1990.
- [12] Kappe, C. O., "Controlled Microwave Heating in Modern Organic Synthesis", *Angewandte Chemie* 43, pp. 6250–6284, 2004.
- [13] SSM:s Independent Expert Group on Electromagnetic Fields, "Recent Research on EMF and Health Risks. Sixth annual report from SSM:s independent", Rep. no. 2009:36.
- [14] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCE-NIHR), "Health Effects of Exposure to EMF", 2009.
- [15] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCE-NIHR), "Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)", 2015.
- [16] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) – International Committee on Electromagnetic Safety (ICES), "IEEE Approved Draft Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz", IEEE C95.1-2019.
- [17] Sbíрка zákonů české Republiky, "Nařízení vlády č. 291 / 2015 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením", Částka 120, str. 3690-3710, 2015.
- [18] International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP), "Icnirp statement on far infrared radiation exposure", *Health Physics* 91, pp. 630–645, 2006.

Řešení některých bezpečnostních rizik v sítích 5G

Prof. Ing. Karel Vlček, CSc.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, FAI, Ústav počítačových a komunikačních systémů

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc.

ČVUT v Praze, FEL, Katedra radioelektroniky

Anotace

Zabezpečení fyzické vrstvy, které má za cíl chránit utajovaná data přenášených zpráv, má své základy a oporu v poznacích oboru Teorie informace. V posledních několika letech je této problematice věnována značná pozornost. Základní myšlenkou zabezpečení fyzické vrstvy je využití kanálových kódů, totiž jejich náhodného charakteru, který se uplatňuje při konstrukci kanálových kódů a zároveň reprezentuje optimální postup při popisu prostředí přenosového kanálu. Rozvoj 5G sítí přestavuje novou příležitost pro výzkum zabezpečení při různých technických vlastnostech a způsobech provedení doporučovaných kódování zpráv pro prostředí fyzické vrstvy 5G.

1. Kódování fyzické vrstvy

Kvalita komunikačního systému je hodnocena podle spolehlivosti přenosu zpráv, ale i jeho odolnosti vůči odposlechu. Spolehlivost je určována nejvyšší dosažitelnou rychlostí přenosu informace. Je vyjádřena jako tzv. kapacita kanálu. Utajení je veličina, která má za cíl udržovat přenášenou informaci co nejvíce v tajnosti – nedostupnou pro odposlech. Jestliže se obě veličiny podílejí na přenosu zpráv, budou obě charakterizovat komunikační systém. Úroveň utajení je tedy možné měřit jako míru entropie zdroje utajovaných zpráv v závislosti na odposlechovém kanálu. Uvažujme situaci, při které jsou číslicová data spolehlivě přenášena diskrétním kanálem bez paměti DMC (*discrete memoryless channel*), ale jsou při příjmu vystavena odposlechu. Předpokládejme, že odposlech je zprostředkován rovněž DMC. Přizpůsobení vlastností LDPC kódů změnou parametrů je použito v [9]. Přitom je prováděno zakódování přenášené zprávy před vysláním a její dekodování po jejím příjmu přijímačem. Nicméně, kódy použité při těchto operacích, jsou tomu, kdo odposlech provádí, známé, návrhář se pokouší vestavět kodér a dekodér takovým způsobem, aby maximalizoval rychlost přenosu informace R i kapacitu v přeneseném smyslu slova (equivocation) d odposlechového kanálu DMC. Autor [11] uvádí vztah mezi R a d za předpokladu platnosti bezchybného přenosu. Konkrétně, jestliže d je rovno H_s , tedy entropii zdroje dat, pak můžeme tvrdit, že přenos bude moci dosáhnout dokonalého utajení. To naznačuje, že existuje $C_s > 0$ takové, že C_s bude moci splňovat podmínku dokonalého utajení.

Kódování informace fyzické vrstvy patří mezi první řešení zabezpečení kódem na fyzické vrstvě. Bylo popsáno již v 70. letech minulého století, přesto jsou tyto metody stále předmětem výzkumných studií, zejména pro jejich implementace, včetně začlenění těchto metod do prakticky používaných komunikačních systémů.

V textu je uveden přehled vlastností tří kódů; jako první je uveden LDPC kód, druhým je *polární* kód a třetím *lattice* kód (kód definovaný jako matematická struktura nazývaná svaz). Pro všechny tyto kódy je příznačné, že tvorba zakódování je blízká náhodnému charakteru vytváření kódových slov. Náhodné kódování bylo zavedeno i Claude E. Shannonem [1] pro podporu teoretických výsledků vyplývajících z nerovnosti:

$$\frac{E_b}{N_0} > 2^{\frac{R}{B}} - 1 = \frac{2^n - 1}{\eta}, \quad (1)$$

kteřá popisuje spektrální účinnost $\eta = R/B$ definované jako poměr rychlosti přenosu informace a šířky kmitočtového pásma.

Celá nerovnost (1) pak je definicí spektrální účinnosti v závislosti na reciproké energetické účinnosti. Nerovnost je výchozím vztahem pro definici veličiny nazývané kapacita přenosového kanálu. Vztah nerovnosti má velkou důležitost v teoretické oblasti, ale její důsledky ovlivňují implementaci ve smyslu délky kódových slov. Jeho platnost je vyjádřena limitou, a vyjadřuje pravděpodobnost výskytu chyby $P_{err}(K_n)$ při rostoucí délce kódových slov nebo, jak je to při použití konvolučního kódování, kódových posloupností. V obou případech má být splněna podmínka $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{err}(K_n) = 0. \quad (2)$$

Limita (2) je v praxi plněna, i když délka kódových posloupností nebude dosahovat neomezené délky. Platnost tohoto definičního relačního vztahu si zaslouží pozornost, podmínky limity jsou splněny s výhradou, ale v praxi jsou obecně platné a mohou být použity i v 5G sítích. Charakter prostředí přenosového kanálu je s ohledem na platnost aditivního vlivu prostředí chápána jako náhodná (nebo náhodným vlastnostem blízká) redundantní součást kódové zprávy. Tehdy zůstává platný popis prostředí kanálu AGWN (*additive gaussian white noise*) i definiční vztah limity (2).

Naším cílem je ukázat, že pro libovolně malé číslo $\varepsilon > 0$, existuje kód K_n o délce $n \rightarrow \infty$ s rychlostí přenosu informace $R(K_n) = C - \varepsilon$ s libovolně malou pravděpodobností chyby při přenosu $P_{err}(K_n)$. To je zde vyjádřeno požadavkem nalézt M takových binárních slov kódu K_n , z možných 2^n slov kódu, aby platilo $M = 2^{n(C-\varepsilon)}$. Ve skutečnosti, podle definice informační rychlosti, platí:

$$R(K_n) = \frac{n(C-\varepsilon)}{n} = C - \varepsilon. \quad (3)$$

Tím je potvrzena platnost limitní hodnoty pro $n \rightarrow \infty$. Praktické hodnoty nalézáme pro další hodnoty libovolně malého čísla $\varepsilon > 0$ stejným postupem, který byl popsán v předcházejícím textu. Autor publikace [2] studoval souvislost mezi kódy využívajícími ve vysoké míře kapacitu kanálu a utajením informace [15]. Pro definování bezpečnosti je tedy užívána veličina vzájemná informace (*mutual information*) stejně jako pro definici přenosového prostředí – přenosového kanálu.

Tato metrika může být definována jako silná nebo slabá pomocí definičních relačních vztahů následovně. Rovněž zde je pro obě definice je platnost podmíněna $n \rightarrow \infty$. Pro silné utajení (*strong secrecy*) má platit, podmínka $\lim_{n \rightarrow \infty} I(X^n, Z^n) = 0$ a pro slabé utajení (*weak secrecy*), za stejného předpokladu, pro $n \rightarrow \infty$ pak podmínka stanovená limitou $\lim_{n \rightarrow \infty} (I(X^n, Z^n) / n) = 0$. Použitím postupu výpočtu doporučeného v [17] je použito vztahu pro slabé utajení, protože to je vztaženo na jednotlivé symboly zprávy, kdežto silné utajení se týká zprávy jako celku.

2. Stanovení podmínek pro návrh kódu odposlechového kanálu

V uvedené literatuře [2] je dokázáno, že pro libovolný odposlechový kanál může být použito kódů, které zlepšují přenos zpráv a tím využítí kapacity kanálu. Této myšlenky autoři využili k návrhu konkrétních vlastností LDPC kódů. Navržené LDPC kódy, které jsou vhodné pro tento účel, mohou, při přenosu zpráv kódovanou modulací, zvýhodňovat přenos zpráv tím, že navýší odolnost zpráv proti chybám o tzv. kódový zisk. LDPC kódy zde působí jako prostředek k dosažení vyšší spektrální účinnosti, aniž by se musela měnit hodnota energetické účinnosti. Tuto vlastnost zprávě dodává použití kódu s velkou hodnotou minimální kódové vzdálenosti, kterou oplývají LDPC kódy. Tato vlastnost je dále zobecněna v [3] pomocí kódovacího schéma pro BEC (*binary erasure channel*), které svým cílem vyhovuje jak právoplatnému uživateli, tak tomu, kdo si toto právo chce přisvojit. Nicméně, doporučená konstrukce umožňuje numerickou optimalizaci rozdělení informačního toku mezi cílovou adresu a odposlechový kanál pomocí LDPC kódu. Rozdílné vlastnosti silného utajení a slabého utajení je v tomto případě nutné navrhovat s pečlivou pozorností, aby nedocházelo ke vzniku tzv. malých cyklů, respektive k uzavírání vazeb v Tannerově grafu dekódovaného LDPC kódu při iterativním dekódování [15, 16].

I pro dobré úrovně utajení mohou být použity některé relativně jednoduché kódy aplikované na přenášené soubory. Jak uvádí studie [4], která se zabývá konstrukcí LDPC kódů pro komunikaci na fyzické vrstvě [5] je přínosné vynechání některé opakující se redundantní části zprávy (*puncturing*). Takto upravené LDPC kódy mají nižší schopnost detekce chyby, mají-li být odhaleny na základě vynechaných redundantních bitů, ale na straně příjmu jsou rekonstruovány z neupravené části, která je přenesena v původním znění. Takový postup při kódování, dosahuje jiným postupem parametrů přenosu charakterizovaného vzdáleností od hraničního rozdělení podmínek přenosu zpráv na bezchybné přenosy podmiňované kódovým zabezpečením s podmínkou $n \rightarrow \infty$ a přenosy, které nulové chybovosti nemohou z teoretického hlediska dosáhnout. Aby byl tento problém řešitelný, je v [6] doporučováno použití nesystematických LDPC kódů, jejichž účinnost je zvyšována tím, že jejich kontrolní matice obsahuje větší počet nenulových prvků. Tento postup je doporučován i jako metoda, která může zlepšovat přenos zpráv do cílové destinace, jak o tom pojednává studie uveřejněná ve sborníku naší konference RK'18, uvedená v seznamu literatury tohoto článku jako položka [9].

Jak je uvedeno v [6], je to metoda srovnatelná s postupem nazývaným „scrambling“ snižujícím pravděpodobnost chyb přenosu $P_{err}(K_n)$ bez nutnosti měnit energetickou účinnost. Tato metoda nazývaná „scrambling“ rozšiřuje aplikace do paralelních kanálů nazvaných podle statistického rozdělení „Rayleigh channel distribution“. Využitím podobnosti hlavního kanálu, které nacházíme i u odposlechového kanálu, přijali autoři [7] tento postup jako metodu řešení, s konečnou délkou slova LDPC kódu. Na základě tohoto algoritmu jsou následně konstruována slova kódu s prakticky použitelnou malou délkou kódového slova. Monografie [10] je přináší vyjádření Rayleighovy pravděpodobnostní distribuční funkce definiční relací:

$$F(x) = P(X \leq x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) & 0 \leq x < \infty \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Uvedená relace (4) přináší výsledky například při popisu šíření radiových vln v pozemních komunikačních kanálech, v souběžných, ale nestejně dlouhých vzdálenostech přenosu. Rayleighova pravděpodobnostní distribuční funkce $F(x)$ zde může být použita i pro „nízkofrekvenční“ modulační obálku Gaussovského šumu na výstupu úzkopásmových dílů přijímačů, ale i v obdobných situacích, například při konfiguraci řetězených bloků systémů [10].

Při zpracování příspěvku bylo akceptováno doporučení programového výboru RK'19 ke změně názvu na: „Řešení některých bezpečnostních rizik v sítích 5G“, přestože je méně konkrétní, než původní název ve znění: „Zabezpečení fyzické vrstvy bezdrátových sítí 5G pomocí náhodného charakteru redundantních kanálových kódů“. Jedním z důležitých zdrojů, o který se při psaní tohoto přehledového příspěvku opíráme, je monografie [10]. Z této publikace jsou čerpány odkazy na souvislosti s popisem Gaussovského šumu v radiových systémech, ale cenným zdrojem informace je i původní práce A. D. Wynera [11] z roku 1975, která řeší základní aspekty této problematiky odstupu signálu od šumu v hlavním a odposlechovém kanálu. Uvedená citace je retrospektivním pohledem a čtenáři pomáhá vytvořit si názor, aby lépe porozuměl motivaci pro aplikaci kanálových LDPC kódů, ale i dalších kanálových kódů, o kterých rovněž bude zmínka v tomto textu, pro účely utajení.

K problematice přispívají svými poznatky i autoři publikace [8]. Podmínka se uplatňuje současně jak pro hlavní, tak i pro odposlechový přenosový kanál, binární symboly jsou tvořeny podobně jako náhodné. Tato vlastnost je splněna cíleně pro přenosový kanál a není přizpůsobována odposlechovému kanálu. V tomto odstavci jsou popisovány návrh a použití lineárních kódů pro odposlechový kanál. Je použita metoda, která byla poprvé popsána ve výzkumném projektu v [11]. Její použití bylo ve studii [2] ověřováno pro dvě varianty uspořádání odposlechových kanálů. Kritériem přitom byla také implementovatelnost kódů pro podmínky linearitu kódu. Pro přenos k -bitových zpráv zvolíme nejdříve lineární binární kód C s parametry (n, l) tak, aby pro něj, byla splněna nerovnost $k \leq n - l$.

Nejúčinnější uspořádání pro odposlech je uvedeno a popsáno v publikaci [15], je označeno EWT(ϵ), číslo ϵ vyjadřuje míru ztráty informace (Erasure Wiretapper's, při ϵ). Uspořádání sestává z hlavního kanálu bez šumu a binárního kanálu s vymazáváním BEC (*binary erasure channel*), který je připojen jako odposlechový. Pravděpodobnost, že dojde ke ztrátě informace je ϵ . Ve smyslu tohoto značení je následně uspořádána i skladba a propojení bloků, kterými je odposlech modelován a posléze i realizován. Kapacita kanálu, která je nutná pro zajištění bezpečnosti je vyjádřena hodnotou veličiny $V \rightarrow X \rightarrow (Y, Z)$. Obecný relační vztah uvádí [12]. Kódování pro odposlechový kanál s kapacitou C_s musí teoreticky splňovat podmínku:

$$C_s = \max \left(\max_{V \rightarrow X \rightarrow (Y, Z)} [(I(V, Y) - I(V, Z)), 0] \right), \quad (5)$$

zde je funkce maximum v argumentu vnější funkce maxima platná pro všechny hodnoty náhodné proměnné V pro společné rozdělení pravděpodobností veličin X , Y a Z tak, aby platilo, že $V \rightarrow X \rightarrow (Y, Z)$ jsou Markovské řetězce pro DMC (*discrete memory channel*) [2]. Poznamenejme, že C_s může dosáhnout nulové hodnoty až v případě, že V bude záporné. Je ale možné zajistit podmínku, která přesto výpočet zjednoduší a umožní vyčíslit hodnotu C_s podle:

$$C_s = \max_{P_X(x)} [(I(X, Y) - I(X, Z))] \quad (6)$$

Pro situaci, v níž se jedná o obecně definované diskretní přenosové kanály bez paměti, by byl tento problém neřešitelný. Nicméně, výpočet C_s může být zjednodušen pro případ vnuceného omezení. Relace (6) popisuje poměry mezi hlavním a odposlechovým kanálem [12] a tím zajišťuje platnost tohoto zjednodušeného vztahu. Díky tomuto omezení je maxima dosaženo přes všechna možná rozdělení $P_X(x)$ veličiny X . Z hlediska kódování byl takový výpočetní model zaveden v [1] (A. D. Wyner). Tomto textu jsou studovány základní omezení a kódovací postupy pro odposlechový kanál. Rovněž je uváděn důkaz platnosti kapacity odposlechového kanálu C_s . Tato veličina označovaná názvem „*secrecy capacity*“ odposlechového kanálu je největší hodnota poměru k/n pro něj jsou cíle utajení a spolehlivosti k dispozici (dosažitelné). Kapacita utajení je funkcí kapacity kanálů C1 a C2. Jestliže kapacita C1 (hlavní kanál) je větší, než kapacita C2 (odposlechový kanál) je možné intuitivně očekávat, že kapacita utajení bude kladná.

Toto intuitivní očekávání je oprávněné v několika případech. Wyner [11] ukázal, že jestliže C2 svými vlastnostmi horší, než C1 (C2 s C1 je zřetězeno a tvoří tak rovněž diskretní kanál bez paměti), pak kapacita pro utajení je kladná [26]. Csiszár a Körner [3] ukázali, že kapacita pro utajení je kladná pro případy, kdy C1 je méně zašuměná. Nicméně, výpočet kapacity pro utajení zůstává neřešitelným problémem. Největšího pokroku dosáhl M. van Dijk [13], když navrhl zjednodušující předpoklad pro výpočet tím, že na definoval konvexní funkci $I(X, Y) - I(X, Z)$ na stejném rozdělení $P_X(x)$.

Navíc, jak uvádí [13], je $I(X,Y) - I(X,Z)$ konvexní funkcí $P_x(x)$. Z toho plyne: Je-li hlavní kanál charakterizován menším šumem, než odposlechový kanál, znamená to dále, jak upozorňuje studie [13], že pro každý z kanálů je možné nalézt řešení. Jak pro hlavní kanál $I(X,Y)$ tak i pro odposlechový kanál $I(X,Z)$ a to na stejném rozdělení $P_x(x)$. Proto bude C_s vyčíslitelné jako hodnota kapacity hlavního kanálu zmenšená o kapacitu odposlechového kanálu. Použijeme-li vyjádření pomocí symbolického zápisu, je možné psát:

$$C_s = 1 - \text{Capacity}(\text{BEC}(1 - \varepsilon)) = 1 - (1 - (1 - \varepsilon)) = 1 - \varepsilon. \quad (7)$$

Metody kódování odposlechového kanálu pro uspořádání dle (7) je založeno na popisu náhodných symbolů. Přenáší k -bitovou zprávu tímto zjednodušením a představuje praktickou cestu, k vyčíslení podle vztahu (7) $C_s = 1 - \varepsilon$. Tento zjednodušený vztah přináší nejčastěji citovaná výzkumná zpráva [15]. Kromě toho je nutné se zmínit i o dalších výsledcích, zejména [6–8], které potvrzují aplikovatelnost a podmínky platnosti zjednodušeného vztahu (7) pro praktické použití ve většině případů uváděných pro systémy s odposlechy, uváděnými jako realizovatelné systémy na čipu [9]. Tato okolnost je důležitým ekonomickým ukazatelem proveditelnosti ochrany fyzické vrstvy použitím LDPC kódů. Zajímavý přístup pro přímé zjištění, tedy „kapacity utajení“, použili autoři [14], vztahu výchozího modelu pravděpodobnostní distribuční funkce, jejíž definiční relace ve tvaru $C_s = C_M - C_W$ je rozdílem kapacity kanálů hlavního, C_M a odposlechového C_W , které jsou vyjádřením rozdílu kapacit hlavního a odposlechového kanálu. Jejich rozdíl je pro případ Gaussovských kanálů popsán jako:

$$C_s = C_M - C_W = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{N_M} \right) - \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{N_W} \right). \quad (8)$$

Při vyjádření odstupu signálu od šumu v hlavním γ_M a v odposlechovém γ_W kanálu, pak bude:

$$C_s = \begin{cases} \log(1 + \gamma_M) - \log(1 + \gamma_W) & \gamma_M > \gamma_W \\ 0 & \gamma_M \leq \gamma_W \end{cases}. \quad (9)$$

Vyjádření (9) je v symbolice platné i pro Rayleighovu pravděpodobnostní distribuční funkci (4). Do této úvahy není zahrnována skutečnost, že se v některých případech vyskytují diskrétní, tj. nespojitě náhodné proměnné, jejichž rozložení určuje Poissonova distribuce, nazývaná také Poissonův zákon, více v [10].

3. Ochrana fyzické vrstvy použitím dalších vhodných redundantních kódů

Kromě ochrany fyzické vrstvy použitím LDPC kódů se náš příspěvek nutně musí zmínit i o řešení pomocí jiných redundantních kódů blízkých kódům náhodným, které mají předpoklad, že budou vyhovovat podmínce (1). V souvislosti s výzkumem tzv. „weak secrecy“ (WS) nachází většina prací uplatnění při použití kódových zabezpečení definovaných nad svazovými strukturami. Příkladem je použití „lattice codes“,

kteří přinášejí povzbudivé výsledky ve spojení s odposlechovým kanálem s AGWN charakteristikou přenosu a jsou v současné době intenzivně zkoumány. Lattice kódy, jinak také kódy definované nad svazovými strukturami [18], se vyznačují pseudonáhodnými algoritmy tvorby redundance kódových posloupností či kódových slov.

Zdůraznění popisované jako WS je významné, protože společnou vlastností těchto tří kódových zabezpečení (LDPC, polárních i Lattice) kódů je tvorba slov, kterou je pseudonáhodná charakteristika vytváření redundantních částí zpráv a tedy relativně obtížně dekódovatelná. To souvisí se strukturou svazové („svázané“) definiční veličiny, která naopak tuto vazbu zvyšuje, definiční veličina je zobrazitelná v jednodušších případech jako síť dané vazby nebo vazeb na sousední prvky kódu. Přestože je zde mezi prvky vazba pseudonáhodná, jejich definiční veličiny jsou dostatečně „svázané“ a to usnadňuje nalézt cestu k jejich dekódování. Obecný popis Lattice kódů [18] zahrnuje značnou variabilitu závislostí. Principiální vlastností je svaz, který je definovaný jako soubor bodů v uvažovaném n -rozměrném prostoru, ale který zahrnuje všechny lineární kombinace s celočíselnými koeficienty tvořícími bázi z n lineárně nezávislých vektorů. Tato vlastnost dovoluje, aby byla definována generující matice \mathbf{G} tak, aby tato matice obsahovala bázové (tj. lineárně nezávislé) vektory. Svaz je tedy popsán následující definiční relací $\Lambda = \{\lambda = \mathbf{G}x; x \in Z^n\}$. Tím je zaručován potřebný relační vztah „navíc“, který je použitelný pro uskutečnění algoritmu dekódování.

Jednu z konkrétních strukturovaných definičních množin studoval a objevil také autor Polárních kódů [19]. Byl inspirován *Hilbertovou transformací* (HT). Tak se HT stala výchozím bodem pro definování polárních kódů. Polární kódy jsou založeny na myšlence výběru takových bitů v příslušném přenosovém kanálu, které budou v tomto prostředí snáze přenášeny, pravděpodobnost chyby při přenosu je tím minimalizována. Vazba mezi redundantně vytvořenými prvky je použitím HT definována jako přidavná, nezávisle popsaná struktura definičního oboru.

Polární kódy prokazatelně dosahují rychlosti přenosu informace až do hodnoty kapacity kanálu pro binární symetrický kanál bez paměti s polynomiální závislostí a mají střední složitost algoritmů pro zakódování a dekódování popsanou výrazem $O(n \log(n))$, který je činí přitažlivým i pro průmyslové aplikace. Úprava, která umožnila iterativní vykonávání algoritmu dekódování, přináší další zlepšování, tímto způsobem je implementována řada průmyslových aplikací. V říjnu 2016 vyhlásila firma Huawei, že dosáhla hranice 27 Gbitů/s pro přenos dat ze serveru k zákazníkovi a tím vyhovět požadavkům 5G mobilních sítí použitím Polárních kódů [20]. V listopadu 2016 pak byla zveřejněna zpráva [21], ve které se uvádí, že stejné rychlosti přenosu informace bylo dosaženo i použitím LDPC kódu.

4. SoC je optimálním řešením implementace

Pro praktické uplatnění metod kódové ochrany fyzické vrstvy bude použito součástek, které kombinují architekturu ARM procesorů s více výpočetními jádry

a univerzální programovatelné součástky typu FPGA na společném čipu. Návrhové prostředí tvorby aplikací podporuje souběžný HW/SW Co-Design. Pro tuto metodiku práce byl v minulých letech úspěšně řešen na naší univerzitě projekt, který měl za cíl připravit úlohy pro laboratorní využití nejrůznějších aplikací pro komunikační systémy. Technické prostředky hardware a firmware jsou navrhovány souběžně s aplikačními programy, které se osvědčily v dřívějších pracích. Tyto aplikační zkušenosti jsou souhrnně obsaženy v závěrečné výzkumné zprávě zmíněného projektu [23]. Tento interní celouniverzitní projekt koncipoval prof. Vlček s cílem dosáhnout aktualizace HW/SW prostředků. Bližší informace o metodice práce, obsah shrnují následující odstavce.

Návrh zaměřený na rozvoj techniky s vestavěnými procesory představuje v současném výzkumu a vývoji technických prostředků digitálních komunikací základní orientaci, která přináší vysokou efektivitu při koncipování návrhu komunikačních systémů. Důležitost systémového přístupu je zřejmá již z koncepce a uspořádání čipu integrovaného obvodu. Cílem rozšíření souboru instrukcí ARM procesoru je dosažení vyšší efektivitě vykonávání speciálních operací implementovaných jako soubor instrukcí výpočetně náročných operací při přenosech, modulacích i demodulacích multimediálních zpráv. Návrh přídatných operací je dosažen návrhem speciálních instrukcí tohoto RISC procesoru.

Instrukce jsou implementovány jako přídatný dekodér instrukcí ARM procesoru. Tento dekodér je zapojen jako konečný automat s příslušnými registry z volně programovatelných hradel na čipu. Při častém opakování operací je dosažena žádaná úspora času. Pro popis prováděcích jednotek a přídatného dekodéru instrukcí je použit jazyk SystemC nejenom pro úroveň RTL (*register transaction level*), ale i s využitím popisu TLM (*transaction level modeling*), který dosahuje vyšší úrovně abstrakce, dovoluje přenositelnost návrhu, usnadňuje i volbu implementací. Metodický postup návrhu systému na čipu byl popsán již mnoha způsoby. Konkrétním výstupem, ke kterému směřuje navrhovaný projekt, bude detailní návrh SoC ověřený řešením vybraných typických případových studií vyhodnocených z hlediska praktických postupů [24]. Obecný metodický popis návrhu SoC zde představuje pouze rámec řešené problematiky, rámec podle kterého bude konkrétní problematika řešena s ohledem na charakter úlohy, proto jsou řešeny zvláštní případovou studií [25], kde je zkoumána metoda „*Voronoi Filtering*“.

Konkrétní popis technických a programových prostředků vestavěných procesorů je použit rovněž pro charakteristiku komunikace a pro zdůvodnění formátů bezpečného přenosu dat do procesoru při požadavku s vyhodnocovacím programem. Takovou případovou studií je například navrhovaný způsob vybavení technickými a programovými prostředky vestavěných procesorů pro zvýšení rychlosti přenosu informace použitím kódované modulace na základě využití kódového zisku, jak je popisován v projektu dostupném na stránkách Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.¹

¹ http://www.utb.cz/file/54806_1_1/

5. Další práce

Konkrétní výstupy navrhovaného systému budou zpracovány jako ucelené případové studie včetně úvodních simulací a závěrečných měření, které poskytnou možnost srovnání vyřešené úlohy s původním stavem neupraveného ARM procesoru. Rozvoj úloh implementačních technik založených na moderní součástkové základně vestavěných procesorů je stěžejní snahou, poskytuje absolventům Fakulty aplikované informatiky při hledání zaměstnání výhodu, která spočívá ve zvládnutí problematiky a ve zkušenosti s nejmodernější technikou používanou ve spojitosti s požadavky vysoké spolehlivosti, kladené na mobilní zařízení při přechodu na pokračující příchod komunikací 5G.

Poděkování: Základní i odvozené matematické relace pro vyjádření vztahů v této oblasti fyziky šíření elektromagnetických vln jsme konsultovali s odborníky s matematickou profesí. Rádi bychom proto na tomto místě poděkovali prof. Ing. R. Prokopovi, CSc., Ing. P. Martinkovi Ph.D. a RNDr. F. Včelařovi, CSc. za cenné rady pro vyjádření těchto skutečností podle zvyklostí, používaných odbornou veřejností s matematickou profesí v České republice i za trpělivost, kterou projevovali při četných konzultacích. Autoři této výzkumné práce rovněž vyjadřují díky projektu Cebia – Tech. No.: NPU-LO 1303, v jehož rámci byl výzkum realizován.

6. Literatura

- [1] Shannon, C., E.: Communication Theory of Secrecy Systems, Bell System Technical Journal, vol. 28, no. 4, (Oct. 1949), pp. 656–715.
- [2] Thangaraj, A., Dihidar, S., Calderbank, McLaughlin, S., W., Merolla, J.-M.: Applications of LDPC codes to the wiretap channel, IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 53, no. 8, pp. 2933–2945, Aug. 2007.
- [3] Rathi, V., Anderson, M., Thobaben, R., Kliwert, J., Skoglund, M.: Performance analysis and design of two edge-type LDPC codes for the BEC wiretap channel, IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 59, no. 2, pp. 148–164, Feb. 2013.
- [4] Subramanian, A., Thangaraj, A., Bloch, M., McLaughlin, S., W.: Strong secrecy on the binary erasure wiretap channel using large-girth LDPC codes, IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol. 6, no. 3, pp. 585–594, Sep. 2011.
- [5] Klinc, D., Ha, J., McLaughlin, S., W., Barros, J., Kwak, B.-J.: LDPC codes for the Gaussian wiretap channel, IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol. 6, no. 3, pp. 532–540, Sep. 2011.
- [6] Baldi, M., Bianchi, M., Chiaraluce, F.: Coding with scrambling concatenation, and HARQ for the AWGN wiretap channel: A security gap analysis, IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol. 7, no. 3, pp. 883–894, Jun. 2012.

- [7] Baldi, M., Chiaraluca, F., Laurenti, N., Tomasin, S., Renna, F: Secrecy transmission on parallel channels: Theoretical limits and performance of practical codes, *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 9, no. 11, pp. 1765–1779, Nov. 2014.
- [8] Baldi, M., Ricciutelli, G., Maturo, N., Chiaraluca, F.: Performance assessment and design of finite length LDPC codes for the Gaussian wiretap channel, in *Proc. Int. Commun. (ICC)*, London, U. K., Jun. 2015, pp. 435–440.
- [9] Vlček, K.: Optimalizace parametrů algoritmu dekódování LDPC kódu pro empirické modely přístupových sítí 5G, XXVIII. Radiokomunikace, (23–25. 10. 2018, Pardubice), ISBN 978-80-87942-45-1, pp. 235–243.
- [10] Dobeš, J., Žalud, V.: *Moderní radiotechnika*, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-132-2, pp. 52–56.
- [11] Wyner, A. D.: The Wire-Tap Channel, In the *Bell System Technical Journal*, vol. 54, No. 8, pp. 1355–1387, Oct. 1975.
- [12] Csiszár, I., Körner, J.: Broadcast channels with confidential messages, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-24, no. 3, pp. 339–348, May 1978.
- [13] M. van Dijk, On a special class of broadcast channels with confidential messages, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 43, no 2, pp. 712–714, Mar. 1997.
- [14] Barros, J., Rodrigues, M.R.D.: Secrecy Capacity of Wireless Channels, *ISIT 2006*, Seattle, USA, July 9 – 14, 2006, pp. 356 – 360.
- [15] Subramanian, A., Suresh, A. T., Raj, S., Thangaraj, A., Bloch, M., McLaughlin, S.: Strong and Weak Secrecy in Wiretap Channels, *IEEE International Symposium on Turbo Codes & Iterative Information Processing*, ISBN 978-1-4244-6746, (2010), pp 30–34.
- [16] Johnson, S., J.: *Iterative Error Correction*, Cambridge University Press, (2010), ISBN 978-0-521-87148-8.
- [17] Orlitsky, A., Viswanathan, K., Zhang, J.: Stopping set distribution of LDPC code ensembles, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 3, pp. 929–953, March 2005.
- [18] Burr, A.: *Lattice Coding and its Applications in Communications*, University of York, <<http://malb.io/discrete-subgroup/slides/2016-05-04-burr.pdf>>.
- [19] Arikan, E. (July 2009). "Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels". *IEEE Transactions on Information Theory*. 55(7): 3051–73. arXiv:0807.3917. doi:10.1109/TIT.2009.2021379.
- [20] „Huawei achieves 27 Gbps 5G speeds [www.telecomasia.net/with Polar Code](http://www.telecomasia.net/with-Polar-Code)“ (<<http://www.telecomasia.net/content/huawei-achieves-27gbps-5g-speeds-polar-code?>>>).

- [21] „3GPP RAN1 meeting #87 final report“ (<http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_87/Report/Final_Minutes_report_RAN1%2387_v100.zip>) 3GPP Retrieved 31 August 2017.
- [22] Amaro Barreal Fernández: Lattice Codes for Physical Layer Communications, arXiv: 1706.06364v1 [cs.IT] 20 Jun 2017.
- [23] Knot T., Kunčar, A.: Inovace předmětů Hradlová pole (AUPKS/A7HRP) a Pokročilé architektury procesorů (AUPKS/A8PAP), FAI1B1/2015, garant projektu prof. Ing. Karel Vlček, CSc. (In Czech.)
- [24] Abdurohman, M., Kuspriyanto, Sutikno, S., Sasongo A.: Transaction Level Modeling for Early Verification on Embedded System Design, Eight IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (2009), DOI 10.1109/ICIS.2009.41, ISBN 978-0-7695-3641-5/09, pp. 277–282.
- [25] Podoba, T., Tomšů, L., Vlček, K., Heczko, M.: Surface Reconstruction by Means of AI, in Proc. ICCES, vol. 15, no. 4, pp. 111–121, (2010).
- [26] Knot, T., Vlček, K.: Bezpečnost sítí 5G kódováním fyzické vrstvy (PLS), stránka je s volným přístupem, <<https://fai.utb.cz/mdocs-posts/physical-layer-security-final/>>..

Měření EMC v měřicích komorách

Prof. Ing. Miloš Mazánek, CSc.

ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektromagnetického pole

Abstrakt

Elektromagnetická kompatibilita – EMC, je technická disciplína, která se vyvíjí současně s rozvojem elektromagnetických aplikací. Dnes je nemyslitelné uvést do provozu zařízení, které by podle své třídy zařazení nebylo testované a výsledky nebyly porovnány s EMC normami. Vzhledem k tomu, že se z principu jedná o statistické zhodnocení chování testovaného zařízení, definují normy konkrétní uspořádání pro měření. V řadě případů je právě problematické hodnocení, jak zodpovědně prohlásit, že daný přístroj vyhovuje či nikoli. Chyby, které tvoří neurčitost měření jsou pro výrobce zařízení, z hlediska uvedení na trh, zásadní. Příspěvek se nezabývá konkrétním provedením zkoušek elektromagnetického vyzařování a odolnosti. Ty jsou dány normami. V kmitočtové oblasti od desítek MHz výše se věnuje problematice návrhu a realizaci vhodných prostor, uspořádání a využití potřebných komponent z fyzikálního hlediska. Tím je naznačena možná cesta pro před-certifikační měření, která by mohla představovat lacinější cestu odstranění problémů pro výrobce před finální certifikací.

1. Měření EMC, rušivé vyzařování (EMI – interference, radiation) a odolnost (EMS – susceptibility)

Elektromagnetická kompatibilita – slučitelnost, je definována (citace z [1]) jako „Schopnost zařízení vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí i jiné zdroje elektromagnetických signálů a polí a pochopitelně i naopak svou vlastní elektromagnetickou činností zařízení nesmí nepřijatelně ovlivňovat jiná zařízení“. Nesmí tedy vyzařovat signály a pole, které by rušily jiná zařízení v definovaném prostoru, obrázek 1.



Obrázek 1: Základní struktura EMC testu zařízení, zdroj: [1]

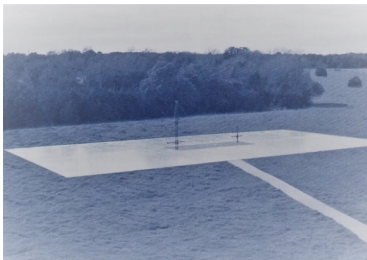
Elektromagnetická kompatibilita je tedy vyšší a širší pojem než pouhá spolehlivost. Porovnatelná měření vyzařovaných rušivých signálů a polí i odolnosti jsou základní problematikou EMC. Vzhledem k praktické nedosažitelnosti absolutních

hodnot, tedy nulového vyzařování a nekonečné odolnosti, jsou stanoveny meze rušení a odolnosti i podmínky měření tak, aby bylo možné porovnávat výsledky měření v jednotlivých zkušebních laboratořích. Měření se, podle povahy problému a účelu, provádějí umělou sítí, napěťovou nebo proudovou sondou, absorpčními kleštěmi a pomocí antén umístěných ve vhodné konfiguraci měřicího prostoru. Právě měřením ve specializovaných laboratořích a prostorách se budeme dále většinou zabývat. V rámci měření ve speciálních komorách je nutné sledovat jak parametry antén, tak měřicího prostoru právě s ohledem na neurčitost měření. Měření ve speciálních uspořádáních měřicích prostorů je možné rozčlenit na měření ve volném prostoru a na měření v měřicích komorách a uspořádáních jako jsou: měření ve stíněných celách případně bezodrazových prostorech (*anechoic*) komorách, *semianechoic* komorách, TEM, GTEM a „*reverberation*“ (nepřesně dozvukových) komorách. Ne všechny tyto možnosti jsou definovány stejně podrobně v rámci normativy EMC, pokud vůbec. Jsou to nicméně důležité cesty pro vývoj zařízení a systémů. Spíše než konkrétní normativou se budeme zabývat problematikou fyzikálních principů, která by nás měla orientovat k pochopení, „*čím, kde, jak a proč*“ v testech EMC měřit. Fyzikální principy totiž zůstanou platné a neměnné v rámci stavu obecného poznání v dané době. Konkrétní postupy dané normami budou vždy poplatné současnému stavu technického řešení i ekonomické stránce testování.

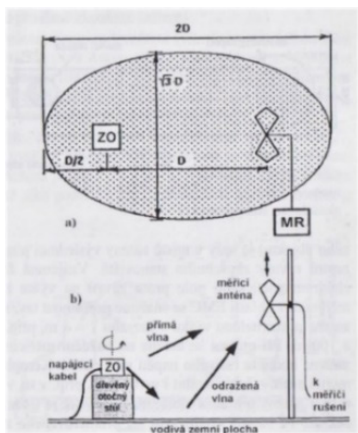
2. Volný – nekonečný prostor

Ideálním uspořádáním pro testy elektromagnetické kompatibility by bylo měření v nekonečném bezodrazovém prostoru. Při porovnání s reálným „nejhorším“ případem by se však neuvažoval reálný případ, kdy se do místa pozorování dostává výkon jak paprskem přímým od testovaného zdroje, tak paprskem záření odraženým od povrchu (především podlahy) místnosti. Ideální, dokonalý odraz může v teoretickém případě přinést až 3 dB navíc oproti nekonečnému prostoru, kdy se žádná část vyzářeného parazitního výkonu nevrací, respektive se nedostává k zařízení jinou cestou. Pochopitelně to je extrém, protože odraz od reálné podlahy nebude stoprocentní a zařízení nebude vyzařovat do všech směrů stejně. Zásadním problémem je postihnout nejhorší možný případ. Zde je vidět rozdíl oproti testování antén, kdy se měření provádí v nekonečném bezodrazovém prostoru. Případ měření ve volném prostoru ukazují obrázky 2–5, kde je vidět, jak velký rozměr a tvar dokonale vodivé podlahy (země), používáme. Jde o hledání potřebné výšky antény, což znamená přijímací anténou posunovat od minimální výšky až po výšku, kde se na dané frekvenci ve fázi sečtou paprsek přímý i odražený. Je tedy nutné uvážit frekvence měření, polarizace i řezy v charakteristice vyzařování atd. Zemnicí plocha má tvar elipsy s měřeným objektem a měřicí anténou v ohniscích vzdálených od sebe nejčastěji standardně 10 m. Používají se i jiné vzdálenosti – klasicky 3 m a výsledky se přepočítávají na standardních 10 m ale i 100 m. Je tedy nutné se smířit s tím, že měření je určitým kompromisem v uspořádání testu a vždy je něco nutné obětovat. Je věcí diskuse, jak najít maximální směr vyzařování, protože testovaný objekt nemusí vyzařovat maximum v rovinách hlavních řezů,

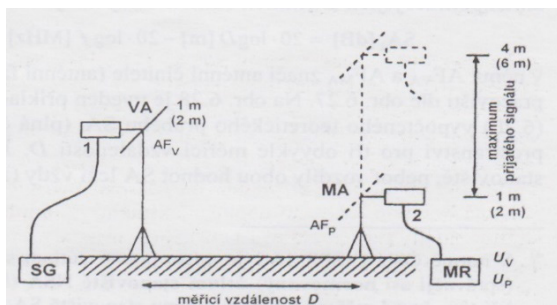
jak bývá většinou umístěn. Jiné měření není z provozně časového hlediska pro testovací laboratoře možné. Snad možnosti robotických měření jednou přinesou i pokrok v rychlosti měření, nicméně v současnosti není měření ve všech bodech na obklopující kouli ve velkém pásmu kmitočtů reálné.



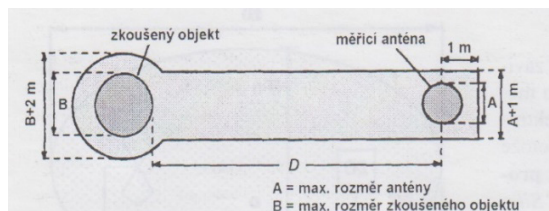
Obrázek 2: Měření EMC ve volném poloprostoru



Obrázek 3: Měření EMI v laboratoři, vyzařované pole



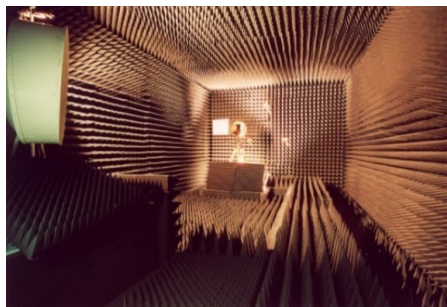
Obrázek 4: Schéma měření EMI v laboratoři



Obrázek 5: Minimalizované prostorové požadavky na uspořádání měření EMI

3. Měření ve stíněných, případně bezodrazových (anechoic) komorách a semianechoické komory

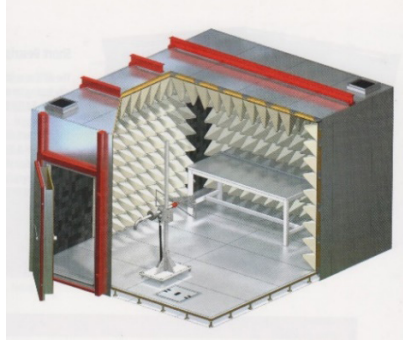
Z předchozího odstavce je možné vysledovat, že pro EMC měření je nutné hledat kompromisy v daleko větší míře než pro měření antén. Vzhledem ke stále obtížnějšímu nalezení skutečně bezodrazového poloprostoru a s rostoucí úrovní parazitních signálů a průmyslového šumu okolí se měření přesouvají do vnitřních většinou elektricky, případně elektromagneticky, stíněných laboratoří. Pro klasická uspořádání měření EMC je možné doplnit původní anténní komory o pokrytí podlahy vodivou strukturou, a tak vytvořit bezodrazový poloprostor. Obrázek 6 představuje elektricky stíněnou komoru Katedry elektromagnetického pole FEL ČVUT v Praze.



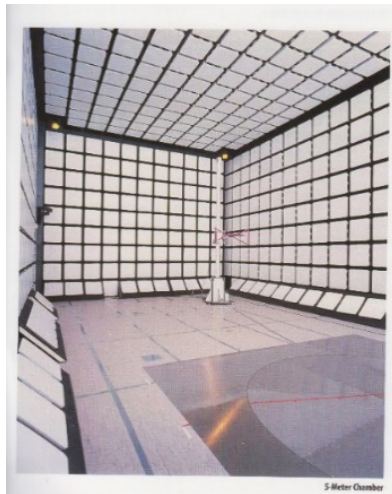
Obrázek 6: Bezodrazová komora Katedry elektromagnetického pole FEL ČVUT v Praze

Tato, původně koncipovaná jako anténní měřicí komora, byla budována pro anténní měření v rozsahu nad 500 MHz. Při vlastní realizaci byla podlaha ještě pokryta plechy o rozměrech 1×2 m a o tloušťce 2 mm. Plechy byly pospojovány vodivou páskou a spojeny se zemněním laboratoře včetně elektrického stínění stěn a stropu pod vlastními absorberými (pospojováno do jednoho bodu pro celou laboratoř). Polyuretanové, uhlíkem plněné jehlanové absorberý pokrývají pevně stěny i strop. Jejich nutná výška odpovídá doporučené čtvrtině vlnové délky nejnižší uvažované frekvence (konkrétně zde vyhoví nad 500 MHz, útlum odrazem bude minimálně 40 dB). Obrázek 7 představuje ukázkou profesionálního řešení EMC komory. Obrázky 8–15 ukazují jiné možné konstrukce laboratoří, resp. speciálních komor pro jednoúčelová měření urči-

tých typů testovaných produktů. Jsou zde představeny i feritové komory, obrázek 8. Problémem feritů může být velká váha, výhodou relativně nízký kmitočet s ohledem na šetření prostorem, ale na druhé straně je menší šířka pásma pro testování – typicky 80–600 MHz podle rezonance feritů. Vlastní střed rezonance bývá okolo 300 MHz.



Obrázek 7: Klasické spořádání EMC komory (Frankonia)



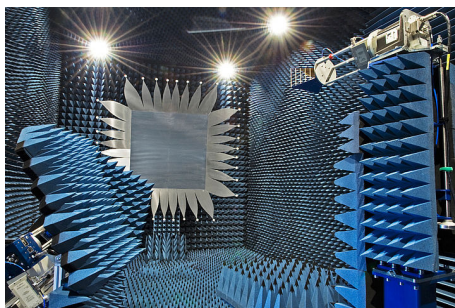
Obrázek 8: Feritová komora pro měření EMC

Obrázek 9 představuje stíněný stan, který je snadno přestavitelný. Obrázek 10 ukazuje řešení v kompaktním uspořádání (detaily na obrázcích 20 a 21), obrázek 11 dozvukovou (*reverberation*) komoru (viz dále). Vždy nelze splnit požadavky na dostatečné rozměry měřicí komory, někde standardy (zejména vojenské) specifikují požadavky jinak. Ukázka je obrázku 12. Zmiňované prostory pro jednoúčelová měření představují obrázky 13–15. Jde jednak o speciálně vybudované komory pro testování

aut, jednoúčelová testování mobilních telefonů, měření ve funkčním uspořádání radaru letadla s další.



Obrázek 9: Elektromagnetický stínící stan



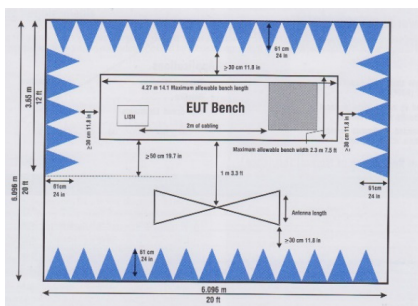
Obrázek 10: Měřicí komora se zrcadlem pro měření v kompaktním uspořádání (CATR)



Obrázek 11: Reverberační (dozvuková) komora s „pádly“ (stirrers) homogenizující měření

Tvary a způsoby rozmístění polyuretanových absorbérů jsou na obrázcích 16 a 17. Z předchozího je vidět, že problematika EMC je velmi rozsáhlá. Nejedná se jenom o vlastní komoru, ale i problematiku materiálů stínění, absorpční materiály, přijímací antény pro měření vyzařování, vysílací „výkonové“ antény pro ověřování elektromag-

netické odolnosti atd. Obrázek 18 představuje přijímací anténu s ploutvovým vedením pro kolmé polarizační roviny, obrázek 19 uvádí pouze anténu s jednou polarizací. Předností těchto antén je poměrně velká šířka pásma, typicky 1 : 10 i více. Je otázkou, vůči kterému parametru tuto šířku definujeme – jestli jde o zisk, vstupní impedanci, tvar charakteristiky, polarizační vlastnosti atd.



Obrázek 12: Nestandardní uspořádání měření EMC



Obrázek 13: Speciální uspořádání měřicího prostoru pro testování EMI celého vozidla



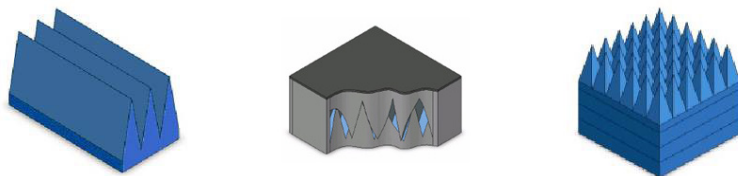
Obrázek 14: Speciální uspořádání měřicího prostoru pro testování EMI (Satimo)



Obrázek 15: Speciální uspořádání měřicího prostoru pro testování EMI mobilů (Satimo)



Obrázek 16: Feritové a pěnové (polyuretanové) absorbéry (DIM Electronics)

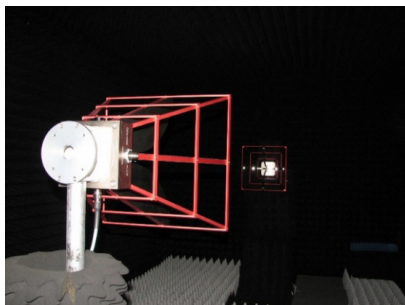


Obrázek 17: Pěnové širokopásmové absorbéry – různá provedení (DIM Electronic)

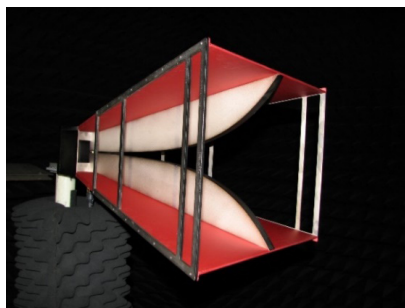
4. Reverberation komory

Jak snad již vyplynulo z předcházejícího textu, je měření v EMC měřením statistickým, nicméně musí být v tomto smyslu i reprodukovatelné. Tak pro získání správných a reprodukovatelných výsledků pro EMS (odolnosti zařízení) je třeba zajistit, aby intenzita zkušebního elektromagnetického pole měla ve smyslu norem v celém pásmu požadovaných kmitočtů specifikovanou velikost. Nebude se tedy jednat o konstantní hodnotu, ale o hodnotu, kterou norma uvádí, konkrétně v ploše $1,5 \times 1,5$ m ve výšce 0,8 m nad podlahou. Pole je pak považováno za homogenní, když v této ploše vymezí-

me síť tvořenou 4×4 body, ve kterých intenzita pole kolísá maximálně o ± 3 dB v 75 % bodů. Tedy např. z uvedených 16 musí být v toleranci alespoň 12 bodů.



Obrázek 18: Příklad antény pro měření EMI v kolmých polarizacích (RFspin)



Obrázek 19: Antény s ploutvovým vedením (RF spin)

K tomu přísluší řada dalších parametrů a předpokladů, které mají často velmi diskutabilní vysvětlení. Jedním z nich je velikost zkoušeného zařízení a jeho hlavní roviny pro měření. Uvažujeme tak zvané neporušené pole, tedy bez měřeného objektu a takto laboratoř kalibrujeme. Kalibrační intenzita pole v ploše homogenního pole má být 3–10 V/m i víc. Pro menší testované objekty může být plocha homogenního, tedy tak zvaného neporušeného pole jenom $0,5 \times 0,5$ m se 4 testovacími body. U všech bodů musí být splněna podmínka maximálního kolísání pod ± 3 dB. Přímá měření ve statistickém pojetí mohou přinést tak zvané reverberační, v překladu ne zcela výstižně „dozvukové“ komory, které využívají plně odraznou, vůči vnějšímu prostoru stíněnou (elektricky, případně elektromagneticky) měřicí komoru, obrázek 11. Uvnitř je umístěno jedno či více pohyblivých „pádel“ (*stirrer*) – míchadlo, které v čase rozbíjí pole a jeho rezonance uvnitř komory. Z měření, která probíhají po určitý čas, kdy se mění struktura pole uvnitř, je potom možné vyhodnotit jak EMI tak EMS. Vzhledem k naprosto odlišnému principu je nutné velmi pozorně přistupovat k výkladu získaných výsledků ve smyslu norem. Lze se domnívat, že tento postup je ve své podstatě velmi blízký realitě a do jisté míry řeší problematiku omezeného počtu měření fixně umís-

těného vzorku i problematiku neurčitosti kalibrace komory. I když se nejedná o zcela novou myšlenku, není zatím provozně příliš rozšířená patrně pro odlišnost podmínek měření a nutnost nového přístupu k interpretaci. Vynikající teoreticky pojatou publikací k těmto komorám je [3]. Pochopitelně i v této problematice zůstává velmi široké pole otevřených otázek k měření a vyhodnocení i možností nových měřicích struktur. Např. není řešeno, jak by situace vypadala při měření s „pohyblivými pádly“ v semianechoické komoře.



Obrázek 20: Zrcadlo pro měření v uspořádání CATR na Katedře elektromagnetického pole

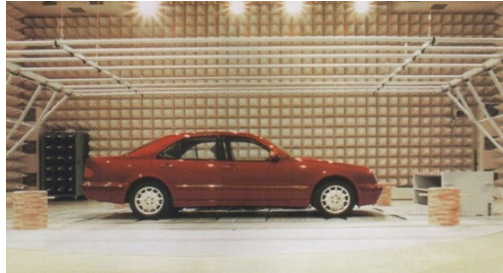


Obrázek 21: Detail zrcadla pro měření v uspořádání CATR (Compact Antenna Test Range) s minimalizací odraženého pole

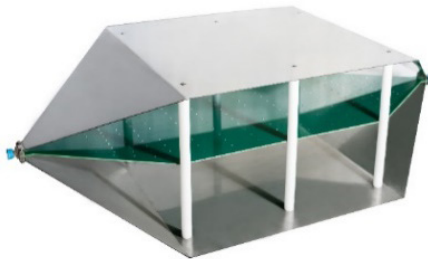
5. TEM a GTEM komory

Při návrhu speciálních měřicích komor pro EMC na vyšších kmitočtech, mluvíme o pásmu nad 80 MHz, specifikují normy několik podmínek, jejichž uplatňování má mnoho „ALE“. Počítáme, že zamezíme rušení z vnějšku – to je asi dosažitelné. Dále chceme komoru kalibrovat, což se děje v prázdné komoře, tedy v neporušeném poli. Vložením testovaného objektu ale pochopitelně pole narušíme. Chceme najít nejhorší možný stav, ale přitom měříme v řezech pouze v hlavních rovinách. Dále chceme, aby dopadající vlna byla příčná elektromagnetická TEM (*transverse electromagnetic*). To vše v požadovaném kmitočtovém rozsahu. Na první pohled elegantní měření v ko-

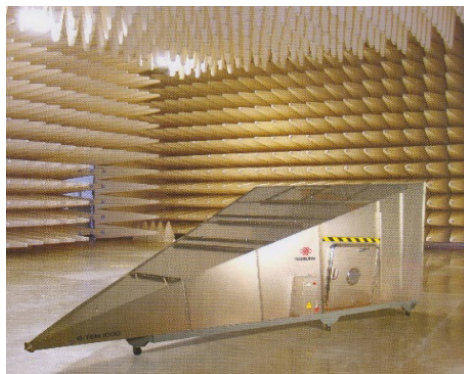
morách má však základní problém zejména při testování odolnosti zařízení. Intenzita elektrického pole klesá se vzdáleností od zdroje a chceme měření v rovinné (TEM) vlně, tedy vzdáleném poli např. o hodnotách např. 3 V/m, 10 V/m i více. Bude potřeba použít poměrně výkonný mikrovlnný generátor. Tento problém je řešitelný měřením v uspořádání, kdy se testované zařízení vkládá přímo do struktury generující zkušební pole. Ukázka takového uspořádání měření je na obrázcích 22 a 23.



Obrázek 22: TEM testovací pracoviště pro EMS

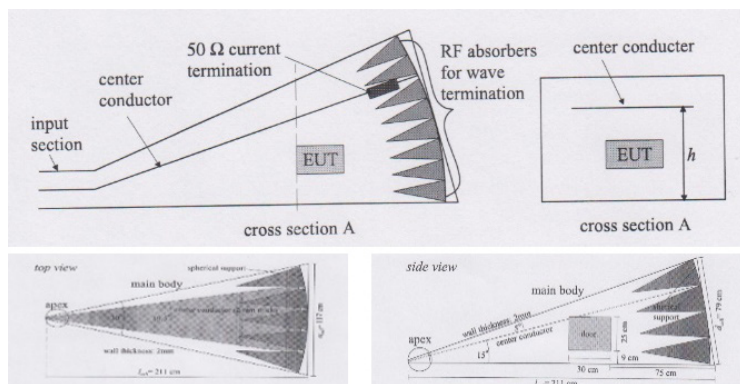


Obrázek 23: TEM cela pro měření EMC (EMS) a stíněná Crawfordova komora (vpravo)



Obrázek 24: GTEM komora

Jedná se o dvou deskové TEM uspořádání, které poskytuje v pracovní zóně dobrou strukturu pole. Nevýhodou je jeho rozptylové boční vyzařování a relativně malý prostor homogenního pole. Tyto nevýhody řeší druhé uspořádání – tak zvaná Crawfordova komora (obrázek 23 vpravo), která představuje stíněné TEM vedení s konstantní impedancí podél struktury. Výhodou je velmi dobrá homogennost pole v širokém pásmu kmitočtů. Ještě dokonalejší jsou tak zvané GTEM (*GHz transversal electromagnetic*) komory – obrázky 24 a 25. Staví se většinou v modulární struktuře, takže ji lze použitím modulů zvětšovat podle potřeb velikosti zkoušeného zařízení. Kmitočtové pásmo je dáno zejména provedením zatěžovacích impedancí, na nižších kmitočtech napařenými odpory, na vyšších absorbéry ve výstupní rovině.



Obrázek 25: GTEM komora – základní schéma

6. Normy, slabá místa měření a výhled do budoucnosti měření EMC, závěr

První otázky okolo problematiky EMC a jejich norem se objevují v 50. letech 20. století. Nástup započal většinou z oblasti vojenského testování a v podstatě tyto postupy trvají dodnes. Je třeba vidět, že vojenské specifikace norem označovaných MLT STD mají jiná specifika a nestandardní podmínky, jako je měření v malé vzdálenosti (např. 1 m od testovaného objektu). Již ale dříve se tomuto testování blížila měření, která byla testy celé struktury objektu v konkrétním uspořádání jako např. testy na ponorkách a lodích, letadlech atd. jako celku. I v současném testování EMC je stále mnoho otevřených otázek spojených nejenom s problematikou EMC jako testu EMI a EMS, ale v pojetí i stále více diskutované informační bezpečnosti. Rozdílem mezi pojetím testu EMC v civilních a vojenských normách je zejména v tom, že civilní testy uvažují kvazišpičkové detektory v testech, kdežto vojenské používají detektory špičkové. Vojenské standardy navíc mají řadu nespécifikovatelných podmínek nutných pro správnou činnost speciálních zařízení. Problematika se patrně stále více bude přenášet do sofistikovaného modelování již při návrhu a konstrukci zařízení. Modelování patrně převezme i část problematiky měření. Umožní nalezení kritických situací, které vzhle-

dem k omezenému rozsahu měření nebude prakticky možnost beze zbytku ověřit. Rychlost testování a jeho komplexnost by mohla přinést uspořádání s robotickou rukou, nicméně půjde o velké investice. Tento příspěvek popisuje pouze některé vlastnosti různých komor a TEM vedení jak pro měření rušivého vyzařování, tak elektromagnetické odolnosti. Popisy se tedy omezují pouze na měření ve vyšším kmitočtovém pásmu, kde se jedná o vazby pomocí šíření elektromagnetickou vlnou. Přitom horní kmitočet se stále posouvá výše. Vývoj testování je velmi rychlý, takže „kdo ví“, co přinese zítřek.

ČSN EN	České normy již harmonizované s evropskými normami
ANSI	Americký národní normalizační institut
MIL-STD	Military Standards, normy vzniklé především v amerických vojenských silách
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
CISPR	Výbor pro rádiovou interferenci
CEN	Evropská komise pro normalizaci
ČNI	Český normalizační institut
CELENEC	Komise pro normalizaci v elektrotechnice

Tabulka 1: Zkratky institucí a komisí z oblasti EMC norem a procesů jejich tvorby

Poděkování

Text tohoto příspěvku pro konferenci Radiokomunikace 2019 se opírá zejména o zkušenosti autora s vývojem a realizací anténní laboratoře, kdy Katedra elektromagnetického pole FEL ČVUT v Praze vybudovala vlastní bezodrazovou výukovou a výzkumnou laboratoř doplněnou následně o možnosti testování EMC, zejména EMI. Za mnoho realizací a úprav této laboratoře pro potřeby výuky i vývoje a výzkumu, které mi umožnily sepsat tento současný příspěvek, vděčím svým kolegům Ing. Tomáši Kořínkovi, Ph. D.; Ing. Václavu Kabourkovi, Ph. D. a Ing. Zdeňkovi Hradeckému, Ph. D. a mnoha dalším pracovníkům z katedry i mimo ni. Připomínám, že do dnešní doby je výborným základním akademicky teoreticky pojatým textem příručka [1] prof. Svačiny, který nadčasově poukázal na důležitost problematiky v akademicky pojaté výuce EMC. Tuto formu seznámení považoval pro absolventy za zásadní a do této doby se snažíme podržet jeho přístup.

7. Literatura

- [1] Svačina, J.: Elektromagnetická kompatibilita, principy a metody, VUT v Brně, 2001.
- [2] Icheln C.: The Construction and Application of a GTEM Cell, Master's Theses, Technical University of Hamburg-Harburg, Faculty of Electrical Engineering, Helsinki University of Technology, Nov. 1995.
- [3] Besnier, P., Démoulin, B.: Electromagnetic Reverberation Chambers, Wiley, ISTE Ltd., 2011.

- [4] ČSN, EN 55016-2-1, CISPR 16-2-1: 2014 Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti, část 2-1 Metody měření rušení a odolnosti: Měření rušení šířeného vedením.
- [5] ČSN, EN 55016-2-2, CISPR 16-2-2: 2010 Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti, část 2-2 Metody měření rušení a odolnosti: Měření rušení.
- [6] ČSN, EN 55016-2-3, CISPR 16-2-3: 2010 Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti, část 2-3 Metody měření rušení a odolnosti: Měření rušení šířeného zářením.
- [7] ČSN, EN 61000-4-20 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) Zkušební a měřicí technika – zkoušky emise a odolnosti ve vlnovodech s příčným elektromagnetickým polem TEM.

Použité firemní materiály a prospekty, internetové zdroje a další informace ke studiu problematiky, dostupné na Katedře elektromagnetického pole ČVUT v Praze.

- [8] FRANKONIA: EMC Test instruments and Components.
- [9] FRANKONIA: Anechoic Chambers/RF Shield Rooms.
- [10] SATIMO Antenna measurement and Radome Test Systems.
- [11] SATIMO Measurement System.
- [12] ETS LINGREN Chambers, Enclosure and Test Cell Solutions for Test and Measurement.
- [13] ETS LINGREN Antenna Catalog.
- [14] ETS LINGREN Microwave Absorber Selection Guide.
- [15] EMCO Selection Guide, EMC Test Systems.
- [16] TDK RF Solution Inc. Anechoic Chambers.
- [17] Orbit/Fr Compact Range Systems.
- [18] SIEPEL – Hyfral.
- [19] SIEPEL – Mode Stirred Reverberation Chambers.
- [20] EMC Screen.
- [21] Kolektor group – feriti: Application Note, Material for Reduction of Electromagnetic Noise.
- [22] Rfspin s. r. o.
- [23] DJM Electronics, EMI Filters RF Shielding Products.
- [24] GLOBAL EMC Electromagnetic Shielding and Anechoics, návrh bezodrazových komor.
- [25] <<https://elmag.fel.cvut.cz/katedra>>.

Aplikace kooperujících týmů létajících autonomních robotů

Ing. Martin Saska, Dr. rer. nat.

Ing. Vojtěch Spurný

ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra kybernetiky

Nasazení početných týmů létajících robotů v reálném prostředí (vnitřním i venkovním) bez přesné externí lokalizace představuje velkou vědeckou výzvu. V rámci přednášky budou prezentovány poslední výsledky vývoje plně autonomních rojů létajících robotů s vestavěnou umělou inteligencí, dosažené skupinou multi-robotických systémů na ČVUT v Praze¹.

V přednášce budou představeny způsoby stabilizace, řízení a plánování pohybu rojů a formací bezpilotních robotů. Důraz bude kladen na přírodou inspirované metody integrující rojové schopnosti individuálních členů skupiny s metodou *Model Predictive Control* respektující rychlou dynamiku autonomních helikoptér. Vedle základních principů letu ve formaci a stabilizace roje budou ukázány i příklady reálných aplikací využívajících navržené metody ve složitých vnitřních a venkovních prostředích. Posluchači se seznámí s využitím formací létajících robotů pro dokumentaci interiéru historických objektů (katedrál), kde jeden dron nese kameru a další drony se starají o nasvícení snímané scény podle zadaných požadavků na vzájemný úhel mezi kamerou a světly. Další prezentované aplikace, vyvinuté pro mezinárodní soutěže MBZIRC a DARPA, ukáží kooperativní manipulaci s objekty, využití dronu pro autonomní přistání na pohyblivém cíli a exploraci neznámého prostředí za použití pouze palubních dat. Nakonec bude prezentován systém *Eagle.one*, kde létající robot je využit pro odchyt neautorizovaných dronů.

¹ <http://mrs.felk.cvut.cz/>.

Obsah

Výběrové řízení v pásmech 700 MHz a 3,5 GHz	
<i>Martin Hanuš</i>	11
1. Úvod.....	11
2. Cíle Výběrového řízení	11
3. Předmět výběrového řízení.....	12
4. Podmínky využívání přidělených rádiových kmitočtů	13
5. Závazky převzaté v průběhu Výběrového řízení	15
6. Průběh Výběrového řízení	16
7. Seznam odkazů	18
Příprava ČR na Světovou radiokomunikační konferenci (WRC-19)	
<i>Karel Antoušek</i>	19
1. WRC a její účel.....	20
2. Zahájení přípravy na WRC.....	20
3. Úrovně přípravy na WRC-19.....	20
4. Jaké se uplatňují procesy a postupy v rámci studijního cyklu mezi konferencemi?	22
5. Jaké jsou výstupy z přípravy na jednotlivých úrovních?	23
6. Body programu WRC-19.....	23
Novinky v oblasti volného využívání rádiových kmitočtů a legislativy pro rádiová zařízení	
<i>Jiří Macek</i>	27
1. Úvod.....	27
2. Přehled všeobecných oprávnění.....	27
3. Evropská harmonizace	28
4. Jednotlivá všeobecná oprávnění (VO) a jejich změny v letech 2016–19.....	29
5. Další výhled ve všeobecných oprávněních	31
6. Požadavky na rádiová zařízení.....	32
7. Závěr	33
8. Literatura	33
Rozšíření pásma 5 GHz pro účely RLAN (5,8 GHz, 6,4 GHz, 60 GHz)	
<i>Pavel Šístek</i>	35
1. Úvod.....	35
2. Jak se myšlenka pásma 5,8 GHz, 6,4 GHz a 60 GHz zrodila?	35
3. Předpokládané podmínky využití pásma 5,8 GHz a 60 GHz v ČR.....	38
4. Závěr	40
5. Seznam použitých zdrojů	40

Plánované aktivity státu v elektronických komunikacích	
<i>Vilém Veselý</i>	43
Zavádění DTT v evropských zemích – historický přehled a srovnání	
<i>Václav Udatný</i>	49
1. Úvod.....	49
2. Základní kameny digitální televize	49
3. Kompresní formáty	50
4. DVB standardy jako pilíř vysílání digitální televize v Evropě.....	51
5. Směr budoucího vývoje	52
6. Vývoj televizního vysílání v ČR.....	53
7. Příklady přechodu na DVB-T2 v některých evropských zemích	53
8. Současný stav DTT v Evropě	57
9. Odkazy	61
Moderní zobrazovače a zobrazovací metody v současných TV přijímačích	
<i>Václav Říčný</i>	63
1. Úvod.....	63
2. Zobrazovače LCD (liquid crystal display).....	63
3. Plasmové zobrazovače.....	66
4. Zobrazovače OLED (organic light emitting diode).....	67
5. Zobrazovače QLED	69
6. Systémy pro zvýšení kvality obrazu	72
7. WCG (wide color gamut)	74
8. Zdroje	76
Regionální vysílání České televize v síti DVB-T2	
<i>Karel Trpák</i>	77
Technologicky pokročilé řešení STA v době přechodu na DVB-T2	
<i>Jiří Masopust</i>	83
1. Situace STA v Období přechodu na DVB-T2 HEVC.....	83
2. Příklad integrovaného pokročilého řešení hlavní stanice STA.....	84
3. Závěr	86
Nová pokročilá technologie programovatelných zesilovačů pro STA rozvody v praxi	
<i>Jakub Melín</i>	87
Jsmo připraveni na generační změnu TV vysílání, která zasáhne 60 % domácností (!/?)	
<i>Marcel Procházka</i>	91

Příprava přechodu Vysílací sítě č. 4 DVB-T na Vysílací síť 24 DVB-T2 HEVC	
<i>Martin Roztočil</i>	93
1. Úvod – digitální terestrické televizní vysílání (DTT) a ostatní platformy v ČR.....	93
2. Vysílací síť č. 4 – Multiplex 4 (DVB-T).....	94
3. Přechod na DVB-T2, technický plán přechodu.....	95
4. Přechodová síť 13 DVB-T2/HEVC.....	96
5. TPP, souběžné vysílání MUX 4 a PS 13, jejich vypínání a zahájení provozu sítě 24.....	99
6. Informační kampaň k přechodu na DVB-T2.....	101
7. Závěr.....	103
8. Zdroje.....	103
Výstavba první celoplošné sítě pro digitální rádio DAB+ v ČR	
<i>Karel Žyka</i>	105
1. Start řádného vysílání DAB+.....	105
2. Druhá fáze výstavby sítě CRo DAB+.....	105
3. Třetí fáze výstavby sítě CRo DAB+.....	106
4. Další rozvoj.....	107
5. DAB+ vs. FM a rok 2025.....	108
6. Závěr.....	108
7. Literatura.....	109
Novinky ze světa DAB vysílání	
<i>Tomáš Řapek</i>	111
Doprovodné multimediální služby digitálního rozhlasu DAB+	
<i>Roman Kropáček</i>	113
1. DAB+.....	113
2. Závěr.....	119
3. Zdroje.....	119
Pokryvání stanic i tunelů pražského metra signálem mobilních operátorů	
<i>Karel Mikuláštk</i>	121
1. Úvod.....	121
2. Popis technických prostředků.....	121
3. Pasivní intermodulace (PIM).....	124
4. Závěr.....	125
5. Literatura.....	125

Zemské digitální rozhlasové vysílání před branami 20. let 21. století	
<i>Karel Mikuláščík</i>	127
1. Úvod.....	127
2. Analogové rozhlasové vysílání.....	127
3. Digitální rozhlasové vysílání.....	128
4. Digitální rozhlasové vysílání versus Internet.....	130
5. Analogové versus digitální rozhlasové vysílání.....	131
6. Závěry.....	132
7. Literatura.....	133
Dimenzování částí pevných přístupových sítí NGA – Agregace	
<i>Jan Kramosil</i>	135
1. Úvod.....	135
2. Metoda odhadu parametrů přístupové sítě 1.....	137
3. Metoda odhadu parametrů přístupové sítě 2.....	140
4. Závěr.....	143
5. Zkratky a pojmy.....	144
6. Zdroje.....	145
Kmitočtová pásma 3,5 GHz a 60 GHz a vysokorychlostní internet	
<i>Vladimír Petržílka</i>	147
1. Pásmo 3,7 GHz.....	147
2. Pásmo 60 GHz.....	148
3. Závěrem.....	153
Moderní radarové systémy 3D a UWB	
<i>Pavel Šedivý</i>	155
1. 3D Radary.....	156
2. UWB.....	159
3. Literatura.....	161
Systémy 5G s nízkou latencí	
<i>Václav Žalud</i>	163
1. Rekapitulace základních poznatků o sítích 4G a přechod k sítím 5G.....	163
2. Zdroje latence v buňkových sítích 4G a 5G.....	166
3. Základní metody snižování latence v sítích 5G.....	168
4. Literatura.....	170

Mobilní systémy 5G s ultravysokou spolehlivostí	
<i>Václav Žalud</i>	171
1. Definice spolehlivosti, dostupnosti a bezpečnosti rádiového komunikačního systému.....	171
2. Klasické metody ochrany rádiového přenosu	172
3. Ochranné kanálové kódování FEC v sítích 5G URLLC	172
4. Systémy opakování přenosu ARQ a HARQ	174
5. Automatické opakované vysílání	174
6. Prostorová mikrodiverzita a makrodiverzita	175
7. Kontrolní kanály s vysokou spolehlivostí	175
8. Potlačení interferencí	175
9. Závěr	175
10. Literatura	175
FeMBMS: Multimediální služby pro rozhlasové a multikastové vysílání v sítích 5G	
<i>Václav Žalud</i>	177
1. Konvergence sítí pozemního vysílání a mobilních širokopásmových systémů.....	177
2. Zdroje	178
FeMBMS: Multimediální služby pro rozhlasové a multikastové vysílání v sítích 5G	
<i>Petr Vítek</i>	179
1. Projekt 5G-Xcast a nové možnosti pro provozovatele multimediálních služeb	179
5G Today – zkušební TV vysílání v módu 5G FeMBMS	
<i>Tomáš Straka</i>	181
Rádiová komunikace s kosmickými sondami	
<i>Miroslav Kasal</i>	183
1. Pozemní segment sítě pro spojení se vzdáleným vesmírem	183
2. Meziplanetární sondy	185
3. Závěr	191
4. Literatura	191

Přístroje moderní radioastronomie

<i>Miroslav Bárta</i>	193
1. Úvodem aneb „Na velikosti záleží...“	193
2. Velké mísy.....	194
3. Anténní soustavy: E pluribus unum.....	196
4. Moderní interferometrie/aperturní syntéza: Jak to funguje?	198
5. Současné interferometrické soustavy pro AS.....	202
6. ALMA.....	205
7. Budoucnost radioastronomie.....	213
8. Literatura	214

Užití elektricky fázovaných anténních řad v satelitní komunikaci

<i>Michal Pokorný</i>	217
1. Úvod.....	217
2. Základní principy fázovatelných anténních řad.....	217
3. Vlastnosti a přednosti elektricky fázovatelných anténních řad	218
4. Obvodová řešení používaná na tvarování anténního laloku anténních řad	220
5. Metody řízení (zaměřování) anténního pole	222
6. Příklady podobných projektů ve světě	222
7. Představení projektu a základní koncepce satelitní antény	223
8. Realizace a blízké cíle.....	224
9. Literatura.....	226

Lucky-7, česká družice pro studium vlivu kosmického prostředí
na elektroniku

<i>Jaroslav Laifr</i>	229
1. Lucky-7	229
2. Výhled dalších aktivit	238

Měření a analýza hluku s využitím mobilních sítí

<i>Jiří Chod</i>	239
1. Úvod.....	239
2. Koncepce řešení.....	241
3. Realizace	242
4. Závěr.....	245
5. Literatura	246

Vývoj radarových senzorů pro aktivní ochranu bojových vozidel	
<i>Přemysl Hudec</i>	247
1. Úvod.....	247
2. CW senzory.....	247
3. PN-CW radary.....	252
4. Měření POI a TOI.....	253
5. Závěr	255
Rizika expozice člověka elektromagnetickému poli v pásmu cm a mm vln	
<i>Lukáš Jelínek</i>	257
1. Úvod.....	257
2. Telekomunikační síť 5G.....	257
3. Ochrana zdraví před elektromagnetickým polem z frekvenčního pásma 0,1–300 GHz	258
4. Expoziční limity	259
5. Ochrana zdraví před elektromagnetickým pole v telekomunikační síti 5G.....	261
6. Otevřené otázky do budoucna.....	261
7. Literatura.....	261
Řešení některých bezpečnostních rizik v sítích 5G	
<i>Karel Vlček</i>	263
1. Kódování fyzické vrstvy	263
2. Stanovení podmínek pro návrh kódu odposlechového kanálu	265
3. Ochrana fyzické vrstvy použitím dalších vhodných redundantních kódů.....	268
4. SoC je optimálním řešením implementace	269
5. Další práce	271
6. Literatura	271
Měření EMC v měřicích komorách	
<i>Miloš Mazánek</i>	275
1. Měření EMC, rušivé vyzařování (EMI – interference, radiation) a odolnost (EMS – susceptibility)	275
2. Volný – nekonečný prostor	276
3. Měření ve stíněných, případně bezodrazových (anechoic) komorách a semianechoické komory	278
4. Reverberation komory	282
5. TEM a GTEM komory.....	284
6. Normy, slabá místa měření a výhled do budoucnosti měření EMC, závěr	286
7. Literatura.....	287

Aplikace kooperujících týmů létajících autonomních robotů	
<i>Martin Saska</i>	289

DVB-T VYSÍLACÍ SÍŤ RS7



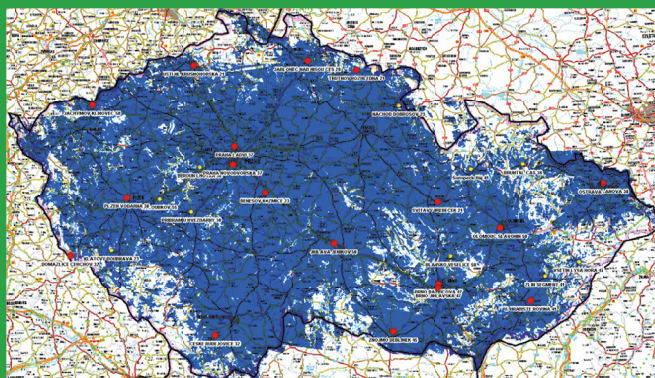
GALERIE



KINOSVĚT



- RS 7 šíří atraktivní celoplošné TV programy z 29 lokalit a dosáhl více jak 85 % pokrytí obyvatel ČR.
- RS 7 každý rok zvyšuje penetraci šířených televizních programů.
- RS 7 si již naladilo více jak 80 % diváků v porovnání s MUX 3 a více jak 70 % v porovnání s MUX 1 a MUX 2.
- RS 7 celoplošně šíří tyto televizní programy v SD kvalitě:
ABC TV, regionalnitatelevize.cz , GALERIE, REBEL 2 Slušnej kanál a KINOSVĚT.
- RS 7 celoplošně šíří tyto rozhlasové programy: Rádio Čas, Čas Rock Rádio a Rádio Dálnice.
- RS 7 podrobné informace podmínek k umístění vašeho TV programu a jak naladíte RS7 najdete na:
<http://www.mux7.cz/>



DVB-T VYSÍLACÍ SÍŤ - MUX 4



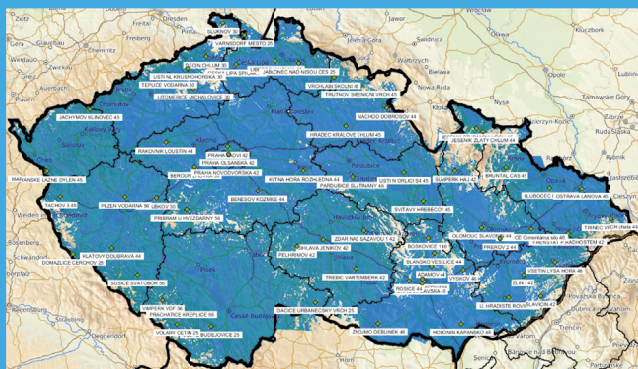
RELAX:REBEL



DIGITAL
BROADCASTING



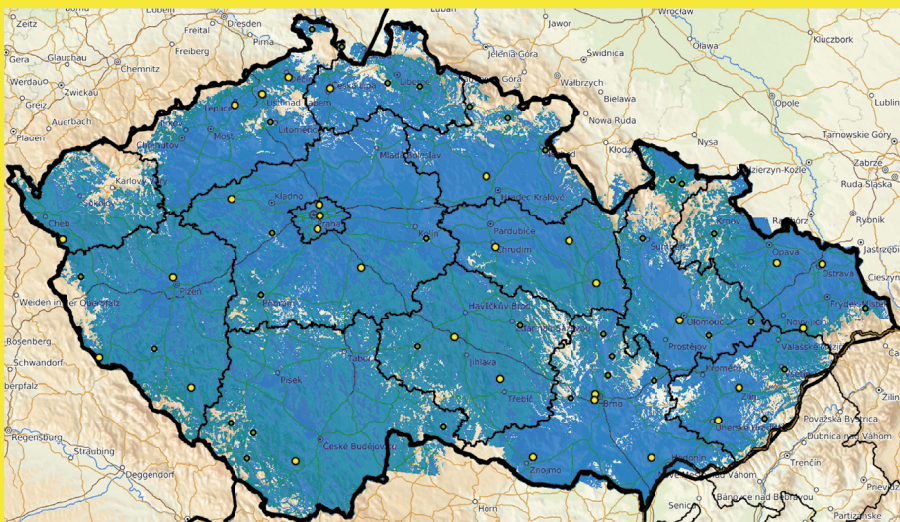
- MUX 4 šíří v současné době tyto celoplošné a regionální TV programy:
Nova Action, Nova Gold, Nova 2, Prima Comedy Central, JOJ Family, RELAX a Rebel
TV ZAK, JIHOČESKÁ TELEVIZE, rtm plus, V1, Info TV, TV MORAVA, TV Slovácko, POLAR a REBEL 2 SLUŠNEJ KANÁL
- MUX 4 je šířen již z 65 lokalit a dosáhl více jak 95,8 % pokrytí obyvatel ČR
- MUX 4 neustále zvyšuje svou penetraci a dosahuje největší nárůst ze zemských sítí DVB-T v ČR
- MUX 4 si již naložilo přes 95 % diváků v porovnání s MUX 3 a více jak 92 % v porovnání s MUX 1 a MUX 2
- MUX 4 umožňuje regionální vysílání zaměřené samostatně na hl. město Prahu a 12 regionálních oblastí
- MUX 4 dosahuje maximálního efektu pro regionálně cílenou reklamu
- MUX 4 přináší aktuální zpravodajství a informace o dění ve vašich regionech
- MUX 4 pomáhá informovat obyvatelstvo o aktuálním vývoji nenadálých krizových situací
- Jak si naložíte vaši lokalitu MUX 4, najdete na www.multiplex4.cz



DVB-T2 HEVC PŘECHODOVÁ SÍŤ 13



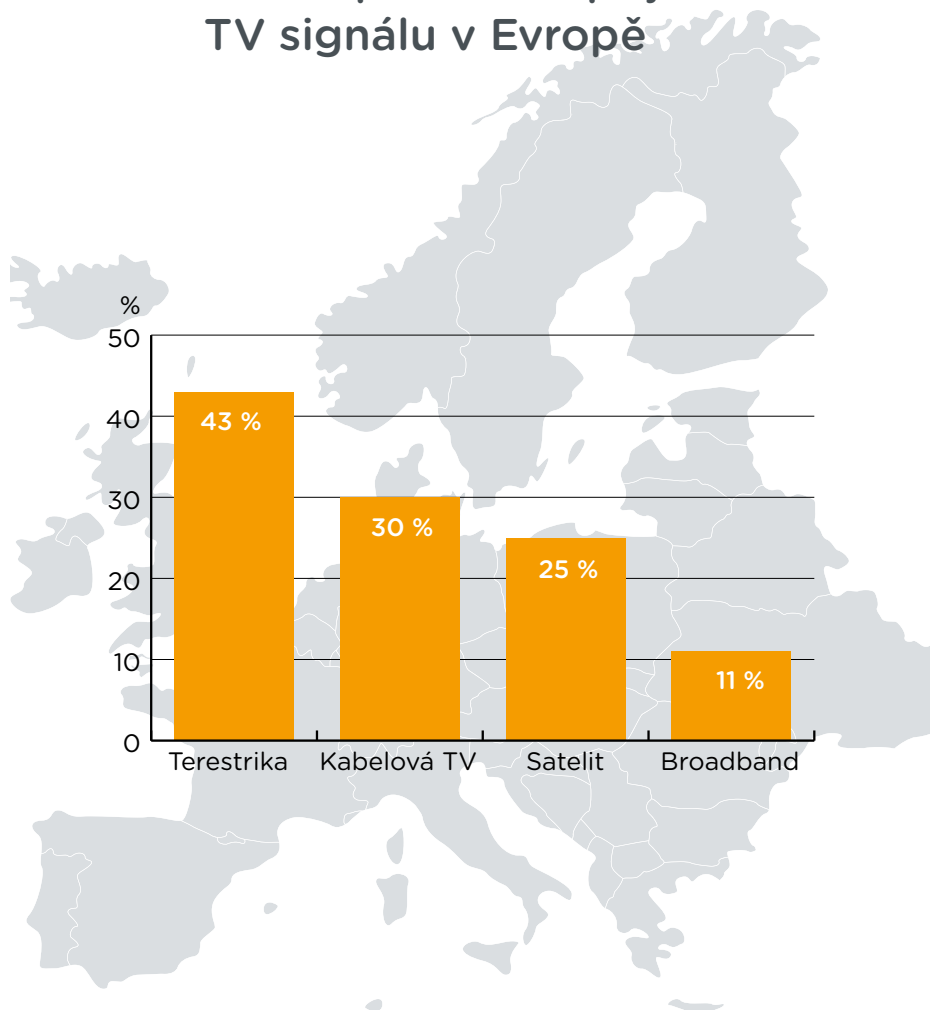
- PS 13 šíří v současné době tyto celoplošné a regionální TV programy: Nova, Nova Cinema, Nova Action, Nova Gold, Nova 2, Prima Comedy Central, JOJ Family, RELAX, Rebel a KINOSVĚT. TV V1, TV Slovácko a POLAR.
- PS 13 je šířena z 63 lokalit a dosáhl více jak 94,1 % pokrytí obyvatel ČR.
- PS 13 ve standardu DVB-T2 HEVC je šířena ze stejných lokalit jako MUX 4 a jako bude i definitivní síť MUX 24.
- Jak si naladíte vaši lokalitu v rámci PS 13, najdete na:
<https://www.multiplex4.cz/pripravujeme>
- http://www.multiplex4.cz/images/DB_PS_13_vyslac_verze_08042019.pdf





DIGITÁLNÍ TERESTRICKÉ VYSÍLÁNÍ:

Hlavní platforma příjmu
TV signálu v Evropě



Firemní technická školení na míru

ELEKTRO

- Revizní technik elektrických zařízení.
- Školení a přezkoušení dle vyhlášky č. 50/78 Sb., o odborné způsobilosti v elektrotechnice § 4-8 i § 10-11.

PLYN

- Revizní a zkušební technik plynových zařízení,
- montážní pracovník plynových zařízení,
- obsluha tlakových nádob stabilních, tlakových nádob na plyny.

ZÁKLADNÍ A OPAKOVANÁ ŠKOLENÍ

- Zdvihacích zařízení a ramp, jeřábníků a vazačů břemen,
- pohyblivých pracovních plošin, manipulačních vozíků.

RADIČNÍ OCHRANA

- Zdravotnická radiologická a průmyslová pracoviště,
- stomatologická a veterinární pracoviště.

BOZP

- Ve výškách a nad volnou hloubkou, v prostředí s nebezpečím výbuchu,
- pravidla při nakládání s vybranými chemickými látkami,
- provozování kontrol skladovacího zařízení.

Váš tým UNIT



UNIT s.r.o. | Gorkého 2573 | 530 02 Pardubice | +420 466 303 032 | unit@unit.cz | www.unit.cz

VŠE, CO JSTE CHTĚLI VĚDĚT O DVB-T2 A BÁLI JSTE SE ZEPTAT

TELEVIZNÍWEB.cz

DENNĚ AKTUÁLNÍ ČLÁNKY A ZPRÁVY

RECENZE TELEVIZNÍCH PŘIJÍMAČŮ DVB-T2

ROZHOVORY

ANALÝZY

KOMENTÁŘE

MAPY POKRYTÍ SÍTÍ DVB-T2

PŘEHLED OBSAHU JEDNOTLIVÝCH MULTIPLEXŮ

DISKUSNÍ FÓRUM

DVB T2
TERRESTRIAL

KVALITNÍ MOBILNÍ VERZE
A ÚČTY NA FACEBOOKU
A TWITTERU.



S NÁMI VÁM NEUNIKNE
NIC DŮLEŽITÉHO.



WWW.TELEVIZNIWEB.CZ

dobadabova.cz



NEZASPĚTE DOBU DABovou

Digitální vysílání DAB+ nabízí více než
rádiové FM vysílání. Tak nebudte včerejší!
Užijte si lepší kvalitu zvuku, větší počet
stanic a doprovodné grafické informace
včetně fotografií.

Doba DABová je tady.

 **Český rozhlas**


Více rádia

Cutting-edge performance in 5G technology.

When faced with analyzing 5G signals, component characterization or data shower applications, engineers rely on the best test and measurement solutions available.

Instruments like the R&S®SMW200A vector signal generator and the R&S®FSW signal and spectrum analyzer from Rohde & Schwarz – both with up to 2 GHz internal bandwidth – deliver cutting-edge performance as well as effortless integration for highly flexible test and measurement solutions.

See for yourself at www.rohde-schwarz.com/highend




ROHDE & SCHWARZ



Partner všech elektrotechniků

www.in-el.cz
obchod.in-el.cz

Vydavatelství odborné literatury

pro elektrotechniky, Normativních dokumentů ESČ, tiskopisu Protokolu o revizích a kontrolách elektrických spotřebičů a elektrického ručního nářadí.

Jako první v České republice vydáváme odborné příručky pro elektrotechniky i v elektronické podobě. **Naše e-knihy** umožňují standardní funkce, jako interaktivní obsah v levém rámci, přímé odkazy v celém textu na zmiňované kapitoly, obrázky, tabulky, přílohy, literaturu, webové stránky. Více na **obchod.in-el.cz**. E-knihy si můžete zakoupit jednotlivě, nebo si můžete pořídit **roční předplatné**, ve kterém máte ke stažení nejen všechny aktuální e-booky našeho vydavatelství, ale i ty, které vyjdou během platnosti vašeho předplatného.

Každý rok vydáváme 3 až 5 nových nebo starších – aktualizovaných příruček.



Tištěná literatura elektro

- Odborné příručky
- Dílenské příručky
- Normativní dokumenty

E-knihy

- Elektronické verze tištěných knih
- Předplatné e-knih

Informační systém iiSEL

- Vzdělávací portál pro elektrotechniky
- Informační servis pro zkoušky elektrotechniků
- Tříměsíční a roční předplatné

Bezpečnostní tabulky nejen pro elektrotechniky

- Značky výstrahy
- Příkazové, zákazové a informační
- Sdružené tabulky

Sledujte nás na sociálních sítích

- facebook.com/vydavatelstvi.INEL
- twitter.com/INELsro
- Zaregistrujte se na **www.in-el.cz** a získáte kompletní přehled v oboru.
- Literaturu a e-knihy koupíte na **obchod.in-el.cz**.

Radiofrekvenční a mikrovlnné komponenty

- KOAXIÁLNÍ A MIKROVLNNÉ KABELY
- VLNOVÉ KABELY
- KONEKTORY
- JUMPER KABELY
- PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY
- ZEMNÍČÍ KITY
- SPLITERY, DIPLEXERY, KAPLERY
- TERMINÁTORY, ATENUÁTORY
- TESTOVACÍ A MĚŘÍCÍ KABELY

 **HUBER+SUHNER**
Excellence in Connectivity Solutions

ELEKTRO

časopis pro elektrotechniku



FCC PUBLIC
ČASOPISY KNIHY KONFERENCE

FCC PUBLIC s. r. o., Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8, tel.: 286 583 011-12, 266 052 804, fax: 284 683 022, e-mail: elektro@fccgroup.cz

www.eel.cz

RADIOKOMUNIKACE 2019

1. vydání, říjen 2019

autoři:

Karel Antoušek	Miroslav Bárta	Martin Hanuš
Přemysl Hudec	Jiří Chod	Lukáš Jelínek
Miroslav Kasal	Jan Kramosil	Roman Kropáček
Jaroslav Laifr	Jiří Macek	Jiří Masopust
Miloš Mazánek	Jakub Melín	Karel Mikuláščík
Vladimír Petržílka	Michal Pokorný	Marcel Procházka
Martin Roztočil	Tomáš Řapek	Václav Říčný
Martin Saska	Vojtěch Spurný	Tomáš Straka
Pavel Šedivý	Pavel Šístek	Karel Trpák
Václav Udatný	Vilém Veselý	Petr Vítek
Karel Vlček	Karel Zýka	Václav Žalud

Vydal: UNIT s. r. o.
Gorkého 2573
530 02 Pardubice

Sazba: Ing. Milan Černocho

Tisk: Milan Rusňák – Tiskárna GRAFION
Gorkého 1455
530 02 Pardubice

© 2019 UNIT s. r. o. Pardubice

Neprošlo jazykovou úpravou

ISBN 978-80-87942-57-4