

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Vojtěch Bárta



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANALÝZA SFN SÍTÍ VYSÍLAČŮ DVB-T2

PERFORMANCE ANALYSIS OF SFNS TRANSMITTERS OF DVB-T2

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Bárta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2022



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Vojtěch Bárta

ID: 203188

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Analýza SFN sítí vysílačů DVB-T2

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce prostudujte problematiku návrhu jednofrekvenčních sítí SFN (Single Frequency Network) vysílačů pro zemské digitální vysílání druhé generace (DVB-T2). Zaměřte se na problematiku vícecestného šíření a správného nastavení ochranného intervalu signálu v sítích SFN. Navrhněte postup pro analýzu sítí SFN vysílačů DVB-T2.

V experimentální části práce, ve spolupráci ČTÚ, provedte analýzu SFN sítí vysílačů DVB-T2. Na základě získaných a analyzovaných dat navrhněte postup pro zlepšení výkonnosti sítí SFN. Výstupy práce přehledně zpracujte a diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FISCHER, Walter. Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide. 3rd ed. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-11611-7.

[2] Vaclav RICNY. Single Frequency Networks (SFN) in Digital Terrestrial Broadcasting. Radioengineering, vol. 16, no. 4, Dec. 2007, pp. 2-6. ISSN: 1210- 2512.

[3] MORGAGE, Javier, and et al. SFN-SISO and SFN-MISO Gain Performance Analysis for DVB-T2 Network Planning. IEEE Transactions on Broadcasting [online]. 2014, 60(2), 272-286 [cit. 2021-5-23]. ISSN 0018-9316.

Dostupné z: doi:10.1109/TBC.2013.2293852

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

Konzultant: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., Ing. Pavel Cídl

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a analýzou jednofrekvenčních sítí SFN (Single Frequency Network) vysílačů pro zemské digitální vysílání druhé generace DVB-T2. Tato práce využívá software české společnosti CRC data. Hlavní pozornost je zaměřena na výpočetní systém *Sítě SFN* pro analýzu a návrh SFN sítí DVB-T2, ve kterém byla provedena řada simulací vysílacího Multiplexu 21 (CH26). Výsledky založené na simulaci jsou využity k identifikaci míst s horším pokrytím signálem nebo rušivými zdroji a k nalezení vhodných přístupů k řešení těchto problémů. Korektnost provedených simulací je ověřena terénními měřeními ve spolupráci s Českým telekomunikačním úřadem (ČTÚ) a na závěr následuje diskuse nad možnostmi zlepšení výkonu SFN sítí.

Klíčová slova

DVB-T2, Jednofrekvenční sítě (SFN), RadioBase, RadioLab, Sítě SFN, ochranný interval, COFDM, vícecestné šíření

Abstract

The diploma thesis deals with the design and analysis of Single Frequency Networks (SFNs) transmitters for Digital Video Broadcasting – second generation of the Terrestrial (DVB-T2). In this thesis, the software of the Czech company CRC data is used. Main attention is focused on the SFN Networks computational system for the analysis and design of DVB-T2 SFN networks, in which a series of simulations of the transmitting Multiplex 21 (CH26) have been performed. The simulation-based results are used to identify locations with lower signal coverage or interfering sources as well as to find appropriate approaches to solve these issues. The rightness of the performed simulations is verified by field measurements in cooperation with the Czech Telecommunications Office (ČTÚ), and finally a discussion on how to improve the performance of SFN networks follows.

Keywords

DVB-T2, Single Frequency Networks (SFN), RadioBase, RadioLab, Networks SFN, guard interval, COFDM, multipath propagation

Bibliografická citace

BÁRTA, Vojtěch. Analýza SFN sítí vysílačů DVB-T2 [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141535>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ladislav Polák.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Vojtěch Bárta</i>
VUT ID studenta:	203188
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	<i>Analýza SFN sítí vysílačů DVB-T2</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost, ochotu, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce a také děkuji Ing. Pavlu Cídlvi za pomoc při řešení odborných a technických problémů.

V Brně dne: 25. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. STANDARD DVB-T2	13
1.1 VSTUPNÍ PŘEDZPRACOVÁNÍ A VSTUPNÍ ZPRACOVÁNÍ	13
1.2 BITOVĚ PROKLÁDANÉ KÓDOVÁNÍ A MODULACE.....	13
1.2.1 FEC kodér.....	14
1.2.2 Bitové prokládání.....	14
1.2.3 Mapování bitů do COFDM buněk.....	14
1.2.4 Rotovaná konstelace a cyklické Q-zpoždění.....	14
1.2.5 Buňkové prokládání	15
1.2.6 Časové prokládání	15
1.3 SESTAVENÍ RÁMCE T2.....	16
1.4 FREKVENČNÍ PROKLÁDÁNÍ.....	16
1.5 VYTVOŘENÍ COFDM SYMBOLŮ.....	16
1.5.1 Mapování pilotních nosných	17
1.5.2 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT).....	19
1.5.3 Ochranný interval	19
1.5.4 Vložení P1 symbolu.....	20
1.6 KONFIGURACE SYSTÉMU	20
1.7 MĚŘENÉ PARAMETRY V DVB-T2.....	21
2. SFN V DIGITÁLNÍM POZEMNÍM TV VYSÍLÁNÍ	22
2.1 PRINCIP SFN	22
2.1.1 Architektura sítě SFN.....	23
2.1.2 Časová synchronizace vysílačů v SFN	24
2.1.3 Mega rámeček	25
2.1.4 Omezení synchronizace a MIP.....	26
2.1.5 Princip modulace OFDM.....	26
2.1.6 Distribuční zpoždění	27
2.1.7 Zisk SFN.....	27
2.2 OCHRANNÝ INTERVAL V SÍTÍCH SFN	27
2.3 PRE-ECHO.....	30
2.4 0-DB ECHO.....	31
2.5 VÝBĚR PŘENOSOVÉHO MÓDU DVB-T2 PRO SFN	31
3. CRC DATA SOFTWARE	33
3.1 RADIOLAB 4.6.....	33
3.2 RADIOBASE 3.4.....	35
3.3 SÍŤ SFN 8.2.....	36
3.3.1 Organizace uživatelského rozhraní.....	37
4. ANALÝZA SFN SÍTÍ.....	39
4.1 VÝSTUPY Z PROGRAMU RADIOLAB.....	44

4.2	TERÉNNÍ MĚŘENÍ.....	48
4.2.1	1. měření v terénu	51
4.2.2	2. měření v terénu	55
4.2.3	3. měření v terénu	61
4.3	POTENCIÁLNÍ ZLEPŠENÍ VÝKONNOSTI SFN SÍŤE MULTIPLEXU 21	66
5.	ZÁVĚR.....	69
	LITERATURA.....	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zjednodušený blokový diagram systému DVB-T2 (na základě [6])	13
Obr. 2 Blokový diagram BICM (na základě [8])	13
Obr. 3 Rotovaný konstelační diagram modulační 16-QAM (na základě [11])	15
Obr. 4 Vytvoření COFDM symbolu	17
Obr. 5 Vzor rozptýlených nosných PP1 a PP5 – SISO (na základě [13])	18
Obr. 6 Vzor rozptýlených nosných PP8 – SISO (na základě [13])	18
Obr. 7 Ochranný interval (na základě [15])	19
Obr. 8 SISO konfigurace (na základě [1])	20
Obr. 9 MISO konfigurace (na základě [1])	20
Obr. 10 Srovnání topologie MFN a SFN (na základě [19])	23
Obr. 11 Architektura sítě SFN (na základě [20])	23
Obr. 12 Blokové schéma vysílače DVB-T2 (tečkovaná část je volitelná) (na základě [21])	24
Obr. 13 Blokové schéma přijímače DVB-T2 (tečkovaná část je volitelná) (na základě [21])	24
Obr. 14 Celková struktura Mega rámce (na základě [20])	25
Obr. 15 Příklad synchronizace dvou vysílačů SFN (na základě [22])	26
Obr. 16 Základní architektura sítě SFN pro digitální televizi DVB-T2 (na základě [1])	28
Obr. 17 Příjem datových symbolů při dodržení ochranného intervalu (na základě [24])	30
Obr. 18 Příjem datových symbolů při nedodržení ochranného intervalu (na základě [24])	31
Obr. 19 RadioBase – hlavní data vysílače	35
Obr. 20 Uživatelské rozhraní <i>Sítě SFN</i> – záložka Parametry	38
Obr. 21 Mapa České republiky – vysílače Multiplexu 21 (CH26)	43
Obr. 22 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/8, OFDM mód 32K Extended, modulace 256-QAM, kódový poměr 2/3	44
Obr. 23 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/4, OFDM mód 16K, modulace 256-QAM, kódový poměr 2/3	45
Obr. 24 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/128, OFDM mód 32K Extended, modulace 256-QAM, kódový poměr 2/3	45
Obr. 25 Vysílač Brno – město a spojnice k jednotlivým vysílačům SFN, které ho ovlivňují	46
Obr. 26 Vzdálenost mezi vysílačem Brno – město a vysílačem Praha (180,1 km)	47
Obr. 27 Časování SFN – vysílač Brno – město	47
Obr. 28 Specializovaný měřicí vůz ČTÚ s výsuvným anténním stožárem	48
Obr. 29 Technické vybavení měřicího vozu	49
Obr. 30 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: první signál	49
Obr. 31 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: první signál větší než minimální úroveň	50
Obr. 32 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: nejsilnější signál	50
Obr. 33 Zvolené měřicí body pro první terénní měření	51
Obr. 34 Pozice vysílačů a měřicích bodů a vzdálenosti mezi nimi – první terénní měření	52
Obr. 35 Echo vybraných míst – první terénní měření	53
Obr. 36 Přeskakování přijímače mezi vysílači s blízkou úrovní signálu – RANGER NEO 4	54
Obr. 37 RF spektra vybraných míst – první terénní měření	54
Obr. 38 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant – první terénní měření	54
Obr. 39 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: nejsilnější signál, rozšířený výpočet samorušení	55
Obr. 40 Zvolené měřicí body pro druhé terénní měření	56
Obr. 41 Pozice vysílačů a měřicích bodů a vzdálenosti mezi nimi – druhé terénní měření	56
Obr. 42 Echo vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření	58

Obr. 43 RF spektra vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření.....	58
Obr. 44 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření.....	58
Obr. 45 Echo vybraných míst, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření	60
Obr. 46 RF spektra vybraných míst, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření	60
Obr. 47 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření	60
Obr. 48 Zvolené měřicí body pro třetí terénní měření	61
Obr. 49 Pozice vysílačů a měřících bodů a vzdálenosti mezi nimi – třetí terénní měření.....	61
Obr. 50 Echo vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření.....	62
Obr. 51 RF spektra vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření	63
Obr. 52 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření.....	63
Obr. 53 Echo vybraných míst, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření.....	64
Obr. 54 RF spektra vybraných míst, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření.....	65
Obr. 55 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření	65
Obr. 56 Umístění vytvořeného vysílače.....	66
Obr. 57 Rozdíl v pokrytí při použití vytvořeného vysílače.....	66
Obr. 58 Rozdělení Multiplexu 21 podle kanálů	67
Obr. 59 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/8, OFDM mód 32K Extended, modulace 64-QAM, kódový poměr 2/3.....	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Používané vzory PP v závislosti na OFDM a GI – SISO, N/A → není povoleno (na základě [13])	17
Tab. 2 Parametry COFDM pro šířku pásma 8 MHz (na základě [13])	19
Tab. 3 Vzdálenosti vysílačů v závislosti na systémových parametrech systému DVB-T2 pro šířku pásma 8 MHz (na základě [1])	29
Tab. 4 Systémové parametry používané pro vysílání v ČR pro Multiplex 21 (CH26)	39
Tab. 5 Seznam použitých vysílačů pro simulaci v softwaru RadioLab pro Multiplex 21 (CH26) (1. část) [36]	41
Tab. 6 Seznam použitých vysílačů pro simulaci v softwaru RadioLab pro Multiplex 21 (CH26) (2. část) [36]	42
Tab. 7 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru – první terénní měření	52
Tab. 8 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů – první terénní měření	52
Tab. 9 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření	57
Tab. 10 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření	57
Tab. 11 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření	59
Tab. 12 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření	59
Tab. 13 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření	62
Tab. 14 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření	62
Tab. 15 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření	63
Tab. 16 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření	64

ÚVOD

Standard Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial (DVB-T2) je nástupcem první generace (DVB-T) pozemního vysílání digitální TV. DVB-T2 se vyznačuje velkou flexibilitou a díky pokročilejšímu zpracování signálu je schopen zvýšit kapacitu datového toku o více než 30 % za stejných přenosových podmínek oproti standardu DVB-T. Ačkoli jsou mezi jednotlivými standardy shody v některých systémových parametrech, tak DVB-T2 není zpětně kompatibilní s DVB-T [1], [2]. Kompletní přechod na standard DVB-T2 byl v České republice dokončen v roce 2021.

Vysílání ve standardu DVB-T2 je provozováno v tzv. jednofrekvenčních sítích SFN (Single Frequency Network – SFN). Hlavní výhodou využívání SFN sítí je efektivnější využití kmitočtového pásma, tzn. na jednom kmitočtu vysílá více vysílačů. Při plánování SFN sítí je kladen přísný požadavek na maximální vzdálenost mezi jednotlivými vysílači. Vzdálenost mezi nimi závisí na délce ochranného intervalu (Guard Interval – GI). Vysílače mezi sebou musí být synchronizovány v čase, frekvenci a v přenášeném datovém toku [3].

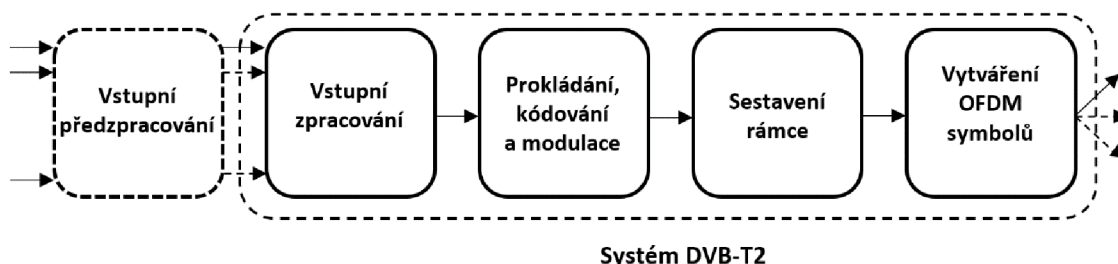
Cílem této práce je prozkoumat návrh sítí SFN vysílačů pro digitální vysílání DVB-T2 se zaměřením na problematiku vícecestného šíření a správného nastavení ochranného intervalu signálu v síti SFN. Dále, ve spolupráci s Českým telekomunikačním úřadem (ČTÚ), provést komplexní analýzu SFN sítí vysílačů DVB-T2 a na základě získaných a analyzovaných dat navrhnout postup pro zlepšení efektivity sítí SFN.

Práce je členěna do 4 hlavních kapitol. V první kapitole je stručně popsán standard DVB-T2. Druhá kapitola se detailně věnuje SFN sítím v digitálním pozemním vysílání. Ve třetí kapitole jsou popsány jednotlivé balíčky softwaru firmy CRC data, a to RadioLab 4.6, RadioBase 3.4 a Síť SFN 8.2, používané pro návrh SFN sítí pro DVB-T2. Ve čtvrté kapitole jsou prezentovány a diskutovány výsledky práce a poté následuje závěr.

1. STANDARD DVB-T2

Systém DVB-T2 je popsán normou ETSI EN 302 755 V1.2.1 a byl standardizován v roce 2009. Vysílání ve standardu DVB-T2 bylo poprvé zahájeno v roce 2010 ve Velké Británii [4].

Ke komprimaci obrazového signálu je použit videokodek High Efficiency Video Coding (HEVC/H.265). Oproti jeho předchůdci MPEG-4 AVC/H.264, HEVC/H.265 umožňuje přenášet obraz ve stejné kvalitě při zhruba polovičním datovém toku [5]. Zjednodušený blokový diagram vysílacího systému DVB-T2 je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1 Zjednodušený blokový diagram systému DVB-T2 (na základě [6])

1.1 Vstupní předzpracování a vstupní zpracování

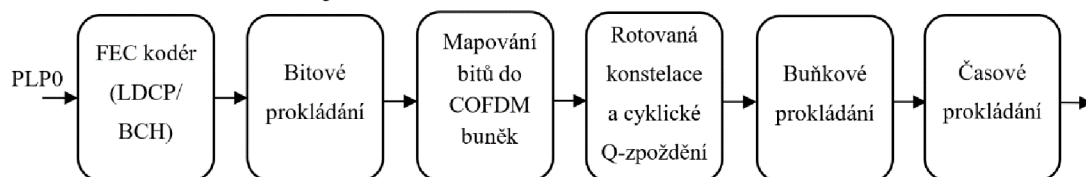
Vstupní předzpracovací jednotka mapuje transportní toky (Transport Stream – TS) a jeden nebo více obecných toků (Generic Stream – GS) do základních vstupních datových toků systému, do tzv. Physical Layer Pipes (PLPs). Transportní toky mají fixní velikost, ale obecné toky nemají pevně danou velikost [6], [7].

Teoreticky, systém DVB-T2 dovoluje přenos až 256 PLP, které mohou být přenášeny současně a nezávisle na sobě. Jednotlivé vrstvy mohou nést odlišný typ dat s různým kódováním, mohou být přenášeny různou bitovou rychlostí a modulovány rozdílnou metodou.

Rozdělení vstupní předzpracovací jednotky a detailní popis vstupního zpracování signálu lze najít v [4], [7].

1.2 Bitově prokládané kódování a modulace

Blokový diagram bitově prokládaného kódování a modulace – Bit Interleaved Coding and Modulation (BICM) je zobrazen na Obr. 2.



Obr. 2 Blokový diagram BICM (na základě [8])

1.2.1 FEC kodér

V rámci systému DVB-T2 se používá dopředná chybová korekce (Forward Error Correction – FEC), která má za cíl zabezpečit data proti chybám, které mohou vzniknout během přenosu. Využívá se zřetězení dvou kódů. Pro vnitřní kódování se používá Low-Density Parity-Check (LDPC) a pro vnější kódování je užíván Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH). FEC rámec se skládá z BB rámce, BCH rámce a LDPC rámce [6], [7]. Detailnější popis je možné nalézt v [4].

FEC rámec může mít velikost 64 800 bitů (dlouhý rámec) nebo 16 200 bitů (krátký rámec, používá se pro „odlehčenou verzi DVB-T2, jmenovitě DVB-T2-Lite [9]). Na základě zvoleného LDPC kódového poměru je zvolena velikost přenášených redundantních dat. Kódové poměry, které se využívají pro dlouhý rámec, jsou 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5 a 5/6. Na úrovni BCH lze opravit 8, 10 nebo 12 symbolů [4]. Velikosti dat pro FEC rámce je možné nalézt v [4].

1.2.2 Bitové prokládání

Pro zamezení možného výskytu shlukových chyb musí být na výstupu kodéru LDPC provedeno bitové prokládání. Bitové prokládání sestává ze dvou nezávislých prokládání. Nejprve je provedeno prokládání paritních bitů FEC rámce. Poté následuje prokládání celého FEC rámce [8].

Výstupní data jsou zapisována do jednotlivých sloupců a následné čtení poté probíhá po řádcích. Prokládání se využívá u všech modulací, pouze u modulace Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) se prokládání nepoužívá. Je to z toho důvodu, že jednotlivé symboly jsou od sebe dostatečně vzdálené a tím bitové prokládání pozbývá smysl. Podrobný popis bitového prokládání je možné nalézt v [8].

1.2.3 Mapování bitů do COFDM buněk

Každý FEC rámec je po bitovém prokládání mapován do tzv. COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) buněk. Vstupní posloupnost bitů je nejprve v demultiplexeru namapována do N_{sub} paralelních větví, tzv. buňkových slov. Počet N_{sub} větví závisí na délce LDPC bloku N_{ldpc} , zvolené modulaci a kódovém poměru [6], [7].

Takto namapované buňky, které představují body konstelačního diagramu, se nazývají COFDM buňky [4]. Podrobnější popis mapování bitů do COFDM buněk je možné nalézt v [4].

1.2.4 Rotovaná konstelace a cyklické Q-zpoždění

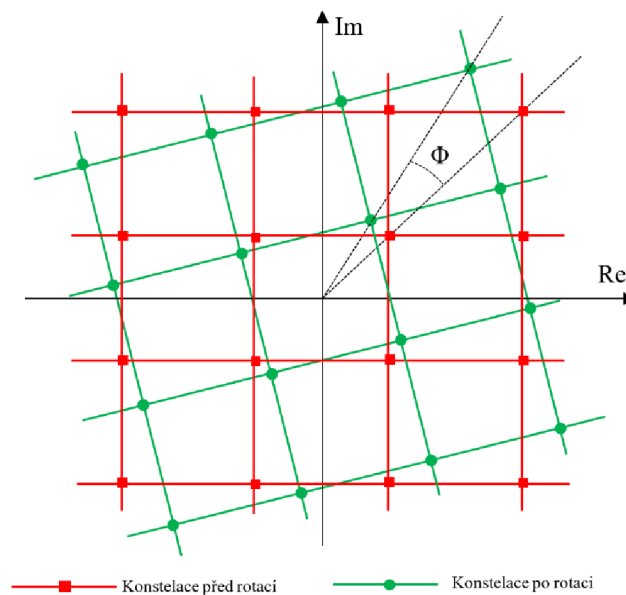
Technika rotované konstelace je jednou z hlavních inovací v DVB-T2.

V klasické nerotované konstelaci je pro popis jedné COFDM buňky nutná jak soufázová složka I (In-phase), tak kvadrurní složka (Quadrature) [10].

U rotované konstelace stačí pouze jedna z těchto hodnot. V komplexní rovině dojde k natočení konstelačního diagramu tak, že každý z bodu konstelačního diagramu bude mít své jedinečné souřadnice, tudíž složka I a složka Q má dostatek informací o tom, který ze symbolů byl přenesen [7]. Na Obr. 3 je znázorněn rotovaný konstelační diagram modulace 16-QAM.

Cyklickým zpožděním složky Q je způsobeno, že složky I a Q jsou oddělené prokládáním, díky čemuž dojde k samostatnému přenosu I a Q složky na různých frekvencích a v různém čase. Rotují se pouze data, pilotní a signalizační signály nejsou rotovány [7], [11].

V případě, kdy je I nebo Q složka poškozena nebo ovlivněna hlubokým selektivním únikem, tak druhá složka, která nebyla poškozena nebo ovlivněna, může být použita k obnovení informací. Použitím techniky rotované konstelace může být dosaženo zlepšení odolnosti signálu pro přenos informací v kanále s úniky. Nevýhodou rotované konstelace je komplexnost použitých algoritmů na straně přijímače, což zvyšuje časovou náročnost na zpracování [11].



Obr. 3 Rotovaný konstelační diagram modulace 16-QAM (na základě [11])

1.2.5 Buňkové prokládání

K zajištění rovnoměrného šíření COFDM buněk v bloku FEC je použit pseudo náhodný buňkový prokladač (Cell Interleaver – CI). Tím je zaručeno nekorelované rozdělení zkreslení kanálu v přijímači, vylepšení spektra signálu a zabezpečení proti shlukovým chybám [6].

1.2.6 Časové prokládání

Jednotlivé FEC bloky z buňkového prokládání se shromažďují do tzv. prokládacích rámců (Interleaving Frame – IF). Poté jsou prokládací rámce mapovány do jednoho nebo

více T2 rámců. V každém rámci může být různý počet FEC bloků. Maximální počet FEC bloků na jeden IF rámec je 1 024 [8]. Existují 3 způsoby časového prokládání, více informací lze najít v [6].

1.3 Sestavení rámce T2

Rámec DVB-T2 má za úkol sestavit časově proložené COFDM buňky z jednotlivých vrstev PLP a buněk, které přenášejí data L1 signalizace (informace o konfiguraci systému DVB-T2). Sestaví je do aktivních polí buněk každého COFDM symbolu, čímž dochází k vytvoření celkové struktury rámce. Nejvyšší jednotkou struktury rámce je Super rámec, ten je dále dělen na T2 rámce. Maximální délka trvání T2 rámce je 250 ms. T2 rámce se poté dělí na jednotlivé COFDM symboly [8].

Součástí super rámce může být také blok Future Extension Frame (FEF), který má sloužit pro budoucí rozšíření systému. Maximální délka trvání Super rámce bez FEF je 64 s a může obsahovat až 255 T2 rámců [7], [8].

T2 rámec se skládá z P1 symbolu (označení začátku T2 rámce, časová a frekvenční synchronizace), jednoho či více P2 symbolů (přenáší data L1 signalizace) a z datových symbolů COFDM [4]. Více informací lze nalézt v [4], [7].

1.4 Frekvenční prokládání

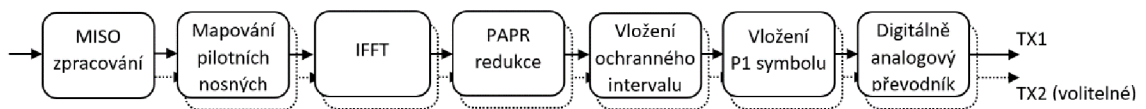
Frekvenční prokladač má za cíl proložit COFDM buňky uvnitř každého COFDM symbolu a mapování těchto buněk do datových nosných každého COFDM symbolu [4]. Definice prokládacích vektorů lze najít v [8].

1.5 Vytvoření COFDM symbolů

Úkolem části systému „generování COFDM symbolů“ je vzít data z bloku sestavení T2 rámce, vložit do nich příslušné referenční informace, známé jako nosné, které umožňují přijímači kompenzovat zkreslení způsobená přenosovým kanálem a vytvořit z nich základ pro signál v časové oblasti určený k přenosu [12], [13].

Poté se vloží ochranný interval a případně dle potřeby se použije zpracování pro snížení poměru špičkového a středního výkonu (Peak-to-Average-Power-Ratio – PAPR).

Při vysílání v módu Single-Input Single-Output (SISO) v DVB-T2 je možné využít i vysílací mód Multiple-Input Single-Output (MISO) [14]. MISO umožňuje zpracovat počáteční koeficienty frekvenční oblasti modifikovaným Alamoutiho kódováním, které umožňuje rozdělit signál T2 mezi dvě skupiny vysílačů na stejné frekvenci tak, aby se obě skupiny navzájem nerušily [13]. Blokové schéma vytvoření COFDM symbolu je znázorněno na Obr. 4. MISO zpracování je volitelný blok a v případě, že není aplikováno, je signál zpracováván v módu SISO.



Obr. 4 Vytvoření COFDM symbolu
(tečkovaná část platí pro vysílací mód MISO) (na základě [13])

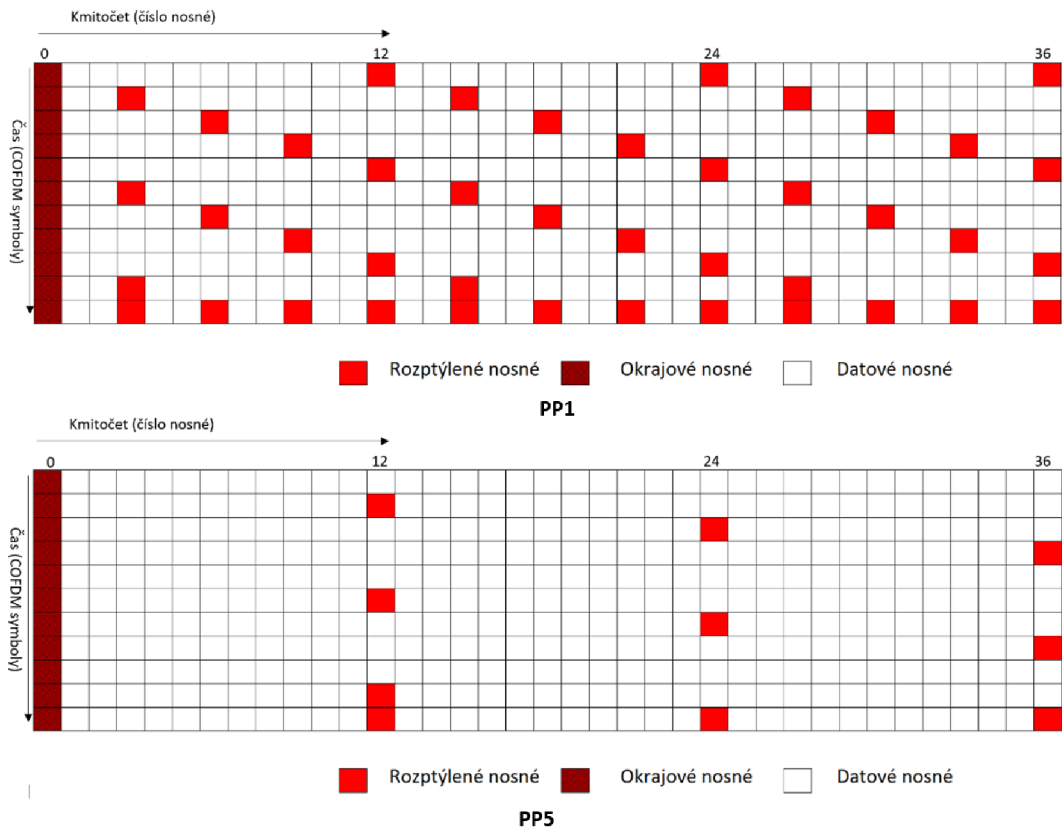
1.5.1 Mapování pilotních nosných

Aktivní nosné zahrnují datové nosné, na které jsou modulována užitečná data a také pilotní nosné. Pilotní nosné jsou dále děleny na rozptýlené nosné (Scattered Pilots – SP), spojitě nosné (Continual Pilots – CP), okrajové nosné (Edge Pilots – EP), P2 nosné a nosné ukončující rámec (Frame-Closing Pilots – FCP) [13]. Dále bude následovat popis jednotlivých nosných:

Rozptýlené nosné jsou využívány pro odhad kmitočtové charakteristiky přenosového kanálu. Ve standardu DVB-T2 je možné vybírat mezi osmi variantami rozložení nosných do tzv. Pilot Pattern (PP). Při vysílání DVB-T2 není možné vybrat jakýkoli PP vzor. Výběr závisí na velikosti OFDM módu a ochranného intervalu (Guard Interval – GI), viz Tab. 1. Na Obr. 5 je znázorněn vzor rozptýlených nosných PP1 a PP5 [4].

Tab. 1 Používané vzory PP v závislosti na OFDM a GI – SISO, N/A → není povoleno (na základě [13])

Velikost OFDM módu	Ochranný interval						
	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32K	PP7	PP4 PP6	PP2 PP8 PP4	PP2 PP8 PP4	PP2 PP8	PP2 PP8	N/A
16K	PP7	PP7 PP4 PP6	PP2 PP8 PP4 PP5	PP2 PP8 PP4 PP5	PP2 PP3 PP8	PP2 PP3 PP8	PP1 PP8
8K	PP7	PP7 PP4	PP8 PP4 PP5	PP8 PP4 PP5	PP2 PP3 PP8	PP2 PP3 PP8	PP1 PP8
4K, 2K	N/A	PP7 PP4	PP4 PP5	N/A	PP2 PP3	N/A	PP1
1K	N/A	N/A	PP4 PP5	N/A	PP2 PP3	N/A	PP1

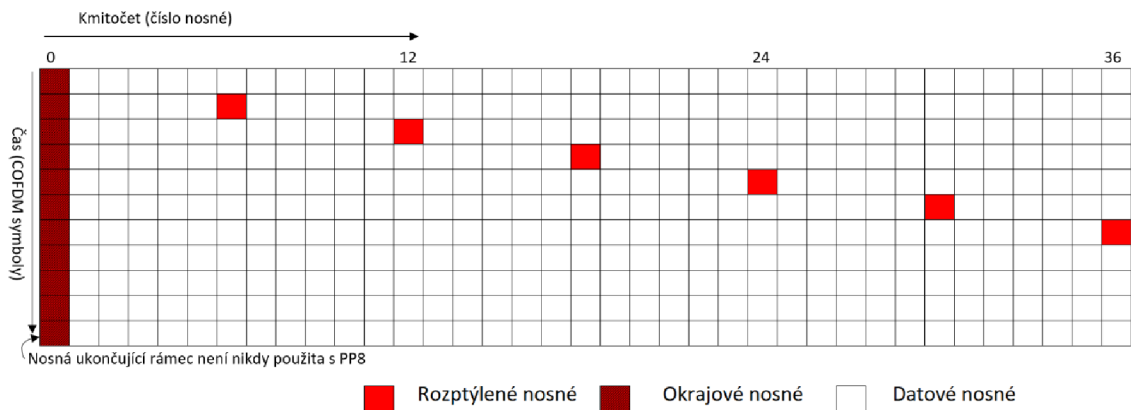


Obr. 5 Vzor rozptýlených nosných PP1 a PP5 – SISO (na základě [13])

Spojitě nosné jsou používány pro časovou a frekvenční synchronizaci, korekci fázové chyby a také v některých případech pro odhad přenosového kanálu [7].

Okrajové nosné mají za úkol doplňovat rozptýlené nosné pro odhad kmitočtové charakteristiky přenosového kanálu až po okraj spektra [7].

P2 nosné a nosné ukončující rámec mohou být využívány při odhadu přenosového kanálu a korekci fázové chyby. Nosné FCP nejsou používány pouze u vzoru PP8, viz Obr. 6 [13].



Obr. 6 Vzor rozptýlených nosných PP8 – SISO (na základě [13])

1.5.2 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)

COFDM symboly jsou zkompletovány po přidání pilotních nosných. Tyto procesy jsou realizovány ve frekvenční oblasti, pro konečné zpracování signálu je vše převedeno do časové oblasti pomocí rychlé inverzní Fourierově transformaci (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT), která je použita na každý symbol COFDM [15].

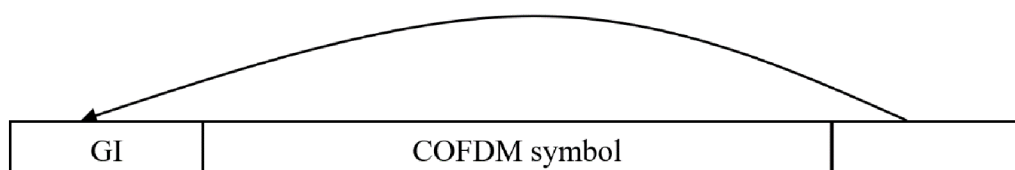
Ve standardu DVB-T2 je k dispozici 8 výchozích OFDM módů, od 1K do 32K. Z důvodu poklesu okrajové části spektra u vyšších OFDM módů (8K, 16K a 32K) je možné oba kraje spektra rozšířit o další nosné kmitočty, o tzv. Extended Carriers. To má za následek (v závislosti na dalších systémových parametrech DVB-T2) zvýšení přenosové kapacity systému o cca 2,1 % (pro 32K Extended) [13]. Celkový přehled jednotlivých OFDM módů je uveden v Tab. 2.

Tab. 2 Parametry COFDM pro šířku pásma 8 MHz (na základě [13])

Parametr		1K mód	2K mód	4K mód	8K mód	16K mód	32K mód
Počet aktivních nosných	Normální mód	853	1 705	3 409	6 817	13 633	27 265
	Rozšířený mód	N/A	N/A	N/A	6 913	13 921	27 841
Doplňkové nosné v rozšířeném módu		0	0	0	96	288	596
IFFT		1 024	2 048	4 096	8 192	16 384	32 768
Doba symbolu [μ s]		112	224	448	896	1 792	3 584
Rozestup nosných [kHz]		8,929	4,464	2,232	1,116	0,558	0,279
Šířka pásma [MHz]	Normální mód	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61
	Rozšířený mód	N/A	N/A	N/A	7,71	7,77	7,77

1.5.3 Ochranný interval

Ochranný interval (Guard Interval – GI) slouží k zamezení vzájemného ovlivňování jednotlivých COFDM symbolů. GI se přidává mezi každý vysílaný symbol. Smyslem vložení GI je zavedení odolnosti proti šíření zpožděním, souvisejícím odrazům a ozvěnám. Koncová část každého symbolu se zkopíruje na začátek symbolu [15].



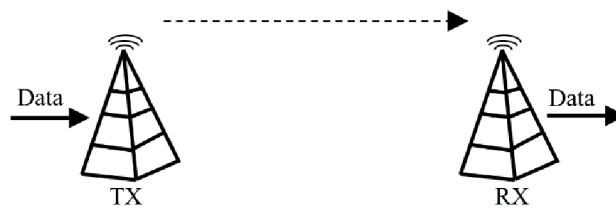
Obr. 7 Ochranný interval (na základě [15])

1.5.4 Vložení P1 symbolu

Přidává se na začátek každého T2 rámce. Využívá OFDM mód 1K s vhodným umístěním aktivních nosných, které umožňují rychlou frekvenční kompenzaci, což má za následek snížení časové náročnosti frekvenční a časové synchronizace v přijímači [4].

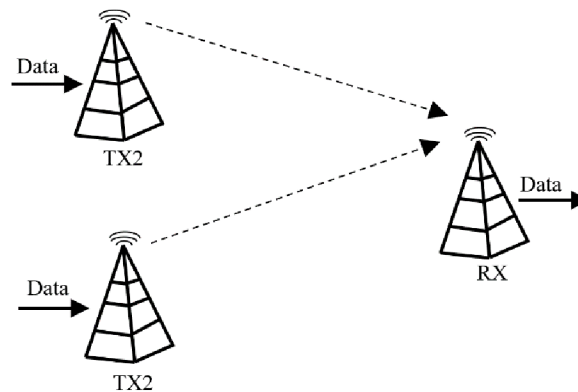
1.6 Konfigurace systému

V systému DVB-T2 je základní přenosovou technikou SISO. V této konfiguraci je RF signál vysílán jedním vysílačem a přijímán jedním přijímačem [2]. V této práci bude uvažována pouze SISO konfigurace (viz Obr. 8).



Obr. 8 SISO konfigurace (na základě [1])

MISO konfigurace [14] je další možností. Data jsou vysílána minimálně ze dvou vysílačů, první vysílač vysílá stejná data jako u SISO konfigurace. Druhý vysílač, který pracuje na stejném kmitočtu, vysílá komplexně sdružená data s upravenými rozptýlenými nosnými pomocí modifikovaného Alamoutiho kódování [14]. Na Obr. 9 je znázorněna přenosová technika MISO [2].



Obr. 9 MISO konfigurace (na základě [1])

1.7 Měřené parametry v DVB-T2

Parametry, které se především analyzují u digitálního vysílání DVB-T2 jsou objektivní parametry jako bitová chybovost (Bit Error Ratio – BER) a modulační chybovost (Modulation Error Ratio – MER). Tyto parametry závisí na hodnotě odstupe signálu od šumu (Carrier-to-Noise Ratio – C/N).

Bitová chybovost BER je definována jako poměr počtu chybně přijatých bitů k celkovému počtu přenesených bitů za určitý časový interval [16]:

$$BER = \frac{n_e}{N_B}, \quad (1)$$

kde N_B je počet přijatých bitů a n_e udává počet chybně přijatých bitů ve stejném časovém intervalu.

BER se u DVB-T2 měří před a za dekodérem LDPC. Pokud hodnota BER po LDPC dekodování splňuje podmínku:

$$BER \text{ po LDPC dekodování} \leq 1 \cdot 10^{-7}, \quad (2)$$

znamená to, že při příjmu TV signálu, se v průběhu jedné hodiny, objeví maximálně jedna chyba v daném signálu, tzv. Quasi-Error Free (QEF) [1].

Modulační chybovost (MER) udává informaci o úrovni šumu v signálu, který způsobuje zkreslení hodnoty amplitudy a fáze jednotlivých nosných, čímž dochází k jejímu znehodnocení. V případě, kdy dojde k překročení určité meze, tuner TV přijímače vyhodnotí úroveň signálu chybně a ke zpracování dodá zkreslené hodnoty, tzn. špatné vyhodnocení přenášeného signálu. Modulační chybovost se měří v jednotkách dB, čím vyšší je její hodnota, tím menší je vliv rušení [17].

Odstup nosné od šumu (C/N) je popsán jako poměr přijatého modulovaného výkonu nosné vlny k přijatému šumovému výkonu. Je ukazatelem toho, o kolik je úroveň užitečného signálu větší, než úroveň šumu, který je přenášen společně s užitečnou informací. Čím vyšší hodnota poměru C/N, tím je lepší kvalita příjmu a vyšší spolehlivost funkčnosti komunikačního spoje. Hodnota parametru C/N se udává v jednotkách dB. Požadavky na hodnotu C/N závisí na použité modulaci, kódovém poměru a na podmínkách pro přenos [17].

2. SFN V DIGITÁLNÍM POZEMNÍM TV VYSÍLÁNÍ

Přenosový kanál pro pozemní TV vysílání je právem považován za nejkompexnější a nejnáročnější kanál, protože podléhá mnoha vlivům – aditivnímu šumu a dalším rušivým signálům (zejména v komunálních a průmyslových aglomeracích), odrazům signálu od budov, překážkám v cestě (echo), vznikajících v důsledku vícecestného šíření [1], [3].

U vícecestného šíření se objevuje mnoho ozvěn, které většinou ovlivní kvalitu přijímaného signálu, což vede k polohově a frekvenčně selektivnímu úniku. Po odrazu od přírodních a jiných objektů (např. budovy, kopce) přichází k přijímací anténě jeden nebo více různě zpožděných signálů, tzv. echo. Tyto časově zpožděné signály způsobují závažnou degradaci přijímaného televizního signálu a odpovídajícího obrazu, zejména ještě v případě analogové televize, tzv. „duchy“ v obraze [3].

Ve standardu DVB-T2 je pro potlačení vícecestného šíření použita digitální modulační metoda COFDM. Písmeno „C“ ve zkratce znamená, že datový tok prošel dopřednou chybovou korekcí (FEC) [3]. Modulace COFDM se vyznačuje vysokou odolností proti mezisymbolovému rušení (Inter Symbol Interference – ISI), které by ohrožovalo kvalitu přijímaného signálu a zvyšovalo chybovost přijímaného signálu kvůli vícecestnému šíření [12]. Možnost využití COFDM modulace je velmi efektivní, ale ne jediná možnost pro odstranění dopadů vícecestného šíření. Jinou možností je například příjem z více senzorů s úhlově orientovaným systémem přijímacích antén a následné komplexní zpracování signálu, včetně filtrace, vzorkování, konverze základního pásma s následným umístěním a oddělením různých zdrojů signálu, tzv. zpracování pole (Array Processing). Podrobnější popis je možné nalézt v [18].

Vysílání ve standardu DVB-T2 je provozováno v jednofrekvenčních sítích SFN. Příjem více zpožděných signálů z několika vysílačů pracujících v SFN síti lze využít i pro zlepšení energetické účinnosti vysílačů [3].

Mezi výhody SFN sítí lze řadit to, že je s kmitočtovým pásmem nakládáno efektivněji, což znamená, že na jednom kmitočtu se vysílá více programů a je zároveň pokryto poměrně velké území. Dále je efektivněji využívána energie potřebná na vysílání a v případě výskytu úniku signálu, lze tento únik pokrýt dalším vysílačem [2].

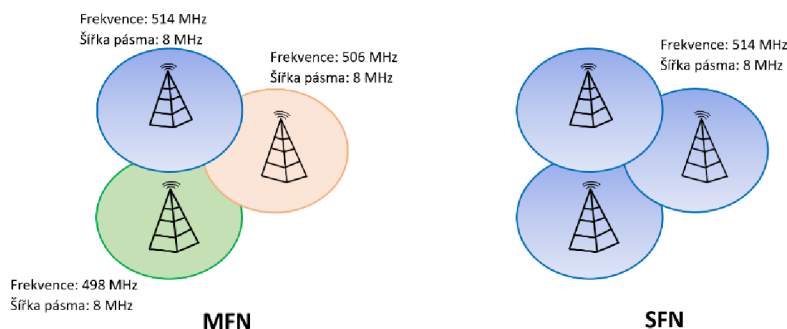
Nevýhodou SFN sítě je nezbytná synchronizace v čase, frekvenci a v přenášených datech. Další nevýhodou je, že pokud některý vysílač porušuje pravidla SFN sítě, tak se stává rušícím. SFN sítě vyžadují nepřetržité monitorování jejich vlastností [2].

2.1 Princip SFN

Pokrytí určité oblasti signálem lze zajistit několika vysílači, přenášejících multiplex televizních nebo rádiových signálů na stejném frekvenčním kanálu. Jejich dílčí příspěvky signálu v přijímacím bodě nejen že neruší, ale za určitých okolností dokonce příjem

zlepšují. Je tedy zřejmé, že SFN sítě digitálních vysílačů mohou výrazně zlepšit využití frekvenčních pásem a kanálů i energetickou bilanci digitálních vysílačů. Digitální vysílače v SFN sítích mohou mít podstatně menší výkon pro dostatečné pokrytí dané oblasti. SFN sítě lze budovat pouze na omezeném území, nikoli na území celé země [3].

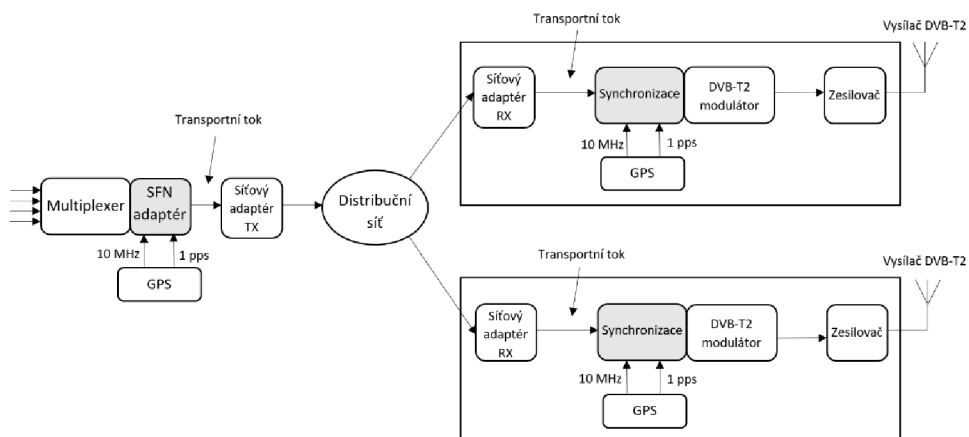
Obr. 10 ilustruje problematiku využití určitého RF pásma pro pokrytí území TV signálem. Ve vícefrekvenční síti (Multi Frequency Network – MFN) se používají tři různé vysílací frekvence, přičemž obsazená šířka pásma je 24 MHz. V SFN je pouze jedna frekvence s optimalizací šířky pásma – pouze 8 MHz, nehledě na počet vysílačů [19].



Obr. 10 Srovnání topologie MFN a SFN (na základě [19])

2.1.1 Architektura sítě SFN

Blokové schéma architektury sítě SFN je na Obr. 11. Funkce SFN je rozšířením systému DVB-T2. Bloky spojené s funkcí SFN jsou na Obr. 11 vyznačené pomocí šedých rámečků. Tyto bloky mohou být implementovány buď jako samostatné zařízení nebo mohou být integrované v multiplexeru a/nebo DVB-T2 modulátoru [20]. Dále následuje stručný popis jednotlivých částí systému SFN.



Obr. 11 Architektura sítě SFN (na základě [20])

Blok **multiplexer** má za úkol multiplexovat programy z různých vstupních kanálů. Dále aktualizuje servisní informaci a poskytuje transportní tok, který je po adaptaci SFN přenášen přes DVB-T2 modulátory v SFN [20].

SFN adaptér je tvořen Mega-rámcem, který se skládá z n TS paketů a vkládá paket MIP (Mega-frame Initialization Packet) s vyhrazeným identifikátorem. Výstup adaptéru SFN musí být plně kompatibilní s transportním tokem DVB-T2 [20].

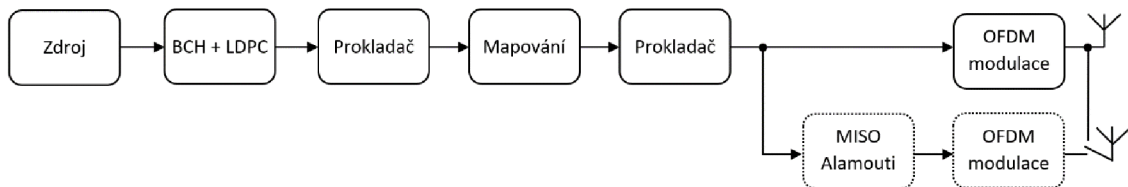
Síťový adaptér vysílače/přijímače zajišťuje transparentní spojení pro transportní tok z centrální jednotky do lokálních jednotek. Maximální zpoždění sítě, způsobené různými cestami přenosové sítě, které synchronizační systém zvládne, je 1 s [20].

Blok **synchronizace** zajišťuje kompenzaci doby šíření porovnáním vloženého časového razítka s místní časovou referencí a vypočítá dodatečné zpoždění potřebné pro synchronizaci SFN [20].

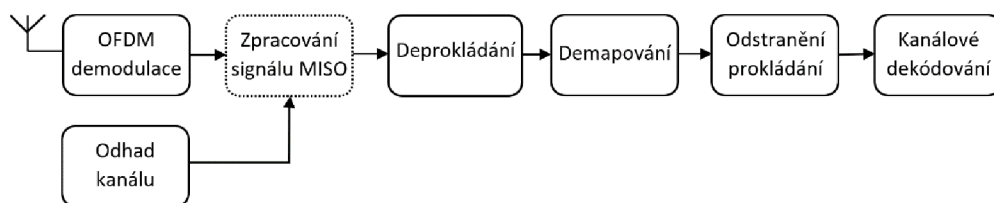
Modulátor DVB-T2 by měl poskytovat pevné zpoždění od vstupu do vzduchového rozhraní. Hodiny modulátoru na různých místech musí být synchronizovány a vstupy transportního toku do různých modulátorů DVB-T2 musí být bitově shodné [20].

GPS (Global Positioning System) je jednou z mnoha možných časových referencí, ale je jedinou celosvětově dostupnou. K dispozici jsou přijímače GPS, které poskytují jak frekvenční referenci 10 MHz, tak časovou referenci 1 pps (puls za sekundu). Časová reference 1 pps, používaná při synchronizaci SFN, je rozdělena na 100 ns kroků 10 MHz hodin. Předpokládá se, že systémové hodiny 10 MHz jsou dostupné ve všech uzlech sítě [20].

Zjednodušené blokové schéma vysílače DVB-T2 v síti SFN je znázorněno na Obr. 12 a na Obr. 13 je znázorněno zjednodušené blokové schéma přijímače DVB-T2 v síti SFN.



Obr. 12 Blokové schéma vysílače DVB-T2 (tečkovaná část je volitelná)
(na základě [21])



Obr. 13 Blokové schéma přijímače DVB-T2 (tečkovaná část je volitelná)
(na základě [21])

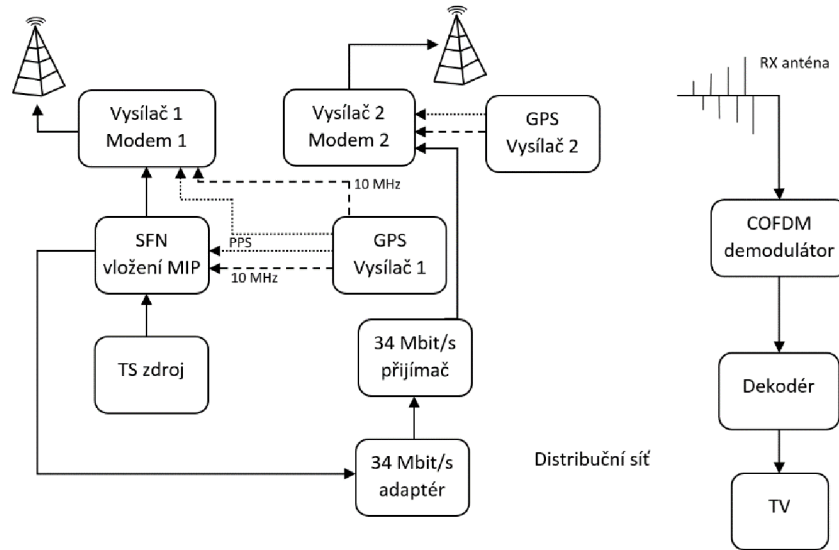
2.1.2 Časová synchronizace vysílačů v SFN

V SFN síti musí být všechny jednotlivé vysílače přesně časově synchronizovány. Každý vysílač musí vysílat naprosto identický symbol OFDM. Systém DVB-T2 je strukturován do rámců. S ohledem na dobu trvání symbolu OFDM, která závisí na zvolených

2.1.4 Omezení synchronizace a MIP

Jak již bylo zmíněno výše, aby SFN síť fungovala správně, každý vysílač musí vysílat stejný datový tok, ve stejnou dobu a na stejném kanálu. To vede k tomu, že na síť SFN jsou kladena tři synchronizační omezení a je třeba pečlivého návrhu, aby bylo zajištěno, že všechna tři budou splněna současně.

Příklad distribučního schématu SFN se dvěma vysílači včetně synchronizace s časovými a frekvenčními signály a vložení transportního toku MIP podle specifikací ETS TS 101 191 pro synchronizaci SFN [20], [22] je znázorněn na Obr. 15.



Obr. 15 Příklad synchronizace dvou vysílačů SFN (na základě [22])

2.1.5 Princip modulace OFDM

Velká odolnost modulační metody OFDM proti mezisymbolovému rušení jako důsledku vícecestného šíření (vliv časově zpožděných signálů) spočívá v tom, že ve velké míře prodlužuje velmi krátký časový interval bitů v původním sériovém datovém toku. Prodloužení doby symbolu se provádí nejprve mapováním původního datového toku $S_b(t)$ do n paralelních datových (symbolových) toků S_0 až S_{n-1} . Paralelní toky jsou pak modulovány pomocí diskretní digitální metody (např. M-QAM nebo QPSK) na několik n současně vysílaných ortogonálních subnosných signálů. Ortogonalita tohoto systému je zajištěna dodržением maximálního (minimálního) rozestupu příslušných dílčích nosných vln o celočíselný násobek převrácené hodnoty délky symbolu [1], [3].

Pro modulace 256-QAM je počet stavů v binárním vyjádření $m = 8$ ($2^m = 2^8 = 256$). Jednou z možností, jak jednoduše vytvořit OFDM signál požadované ortogonální spektrální struktury, je použít IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) [3].

2.1.6 Distribuční zpoždění

Při vytváření SFN sítí je důležité kompenzovat případné časové rozdíly mezi vysíláním různých vysílačů v důsledku nevyhnutelného zpoždění při vysílání (vícecestné šíření) a zpracování v síti. Toto vyrovnání je nezbytné k zajištění toho, aby všechna vysílání měla ve stejném okamžiku stejný datový tok [22].

Všechny distribuční sítě přidávají k signálu proměnlivé zpoždění, protože signál je elektronicky zpracováván a předáván po síti ze vzdálených míst na určené místo. Tato zpoždění lze předem vypočítat a kompenzovat přidáním hodnoty maximálního zpoždění k časovému razítku MIP. Toto maximální zpoždění je časový údaj, který je zvolen tak, aby překročil maximální zpoždění, které lze očekávat při distribuci signálu k nejvzdálenějšímu vysílači v síti. Zatímco signál putuje k tomuto vzdálenému místu, všechny ostatní vysílače jsou nuceny čekat na tuto maximální dobu zpoždění, aby bylo zajištěno, že všechny vysílače budou moci vysílat stejný datový tok ve stejnou dobu. To umožňuje plánovači sítě kompenzovat a vyrovnávat distribuční zpoždění v síti. Tato funkce zajišťuje, že všechna vysílání v síti mohou být časově a bitově synchronizována. Modulátory ve vysílačích ukládají transportní tok do vyrovnávací paměti až do předem definovaného okamžiku, kdy jsou všechny vysílače připraveny vysílat stejný datový tok [22].

2.1.7 Zisk SFN

Výkony jednotlivých vysílačů pracujících v SFN síti se sčítají. Jednofrekvenční síť proto vykazuje tzv. zisk SFN. Tento zisk lze jednoduše formulovat následovně. Dva DVB-T2 vysílače s vysílacím výkonem P_v zajišťují za stejných podmínek (stejná směrovost a zisk antény) lepší pokrytí signálem (větší hodnoty intenzity pole) v místě přijímače než jediný vysílač s dvojnásobným vysílacím výkonem $2P_v$ [3].

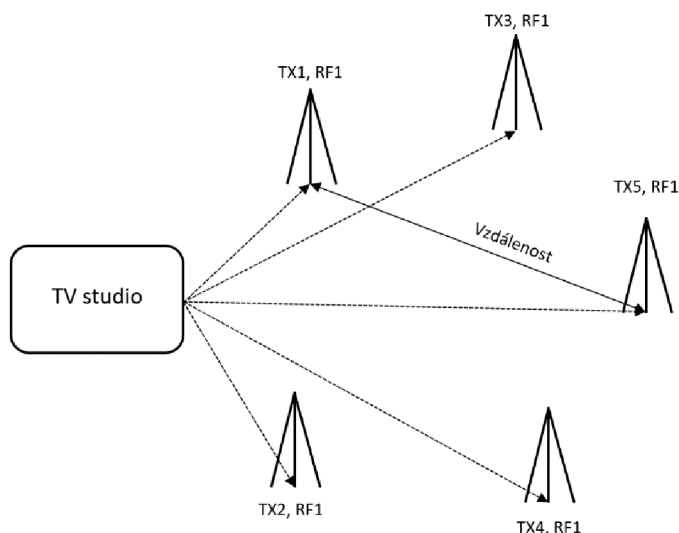
Za účelem zlepšení výkonu provozu SFN obsahuje norma vysílacího systému DVB-T2 mechanismy diverzity antén s více vstupy a jedním výstupem (MISO). Praktický výkon distribuovaného MISO v reálných sítích SFN je však třeba teprve vždy prozkoumat [23].

Zisk SFN sítě mohou ovlivnit různé faktory. Klíčovými faktory, které mají vliv, jsou: nevyváženost výkonu vysílačů (Power Imbalance – PI), relativní zpoždění, použitý pilotní vzor (Pilot Pattern – PP), modulace a použitý kódový poměr (FEC), OFDM mód a ochranný interval. Tyto parametry jsou relevantními faktory v konfiguracích SISO i MISO. Mohou však existovat rozdíly v tom, jak jednotlivé faktory ovlivňují konečné chování sítě [23].

2.2 Ochranný interval v sítích SFN

Při plánování SFN sítí je kladen přísný požadavek na maximální vzdálenost mezi jednotlivými vysílači (viz Obr. 16). Tato vzdálenost souvisí s délkou ochranného intervalu. Mezisymbolovému rušení se lze vyhnout pouze tehdy, pokud v případě

vícecestného šíření není zpoždění na žádné cestě delší než délka ochranného intervalu. Pokud by signál přijímaný ze vzdálenějšího vysílače měl větší zpoždění, než je délka GI, tak by vznikla mezisymbolová interference, která se v přijímači projeví jako případné rušení [1].



Obr. 16 Základní architektura sítě SFN pro digitální televizi DVB-T2 (na základě [1])

Dlouhé ochranné intervaly jsou určeny pro SFN sítě. Středně dlouhé ochranné intervaly jsou vhodné pro regionální sítě a krátké ochranné intervaly jsou poskytovány pro místní sítě nebo se používají mimo SFN sítě [1]. Doba trvání ochranného intervalu je dána vztahem [1]:

$$t_{GI} = t_{symb} \cdot GI, \quad (3)$$

kde t_{GI} je doba trvání ochranného intervalu, t_{symb} je doba trvání jednoho symbolu a GI je ochranný interval.

Vzdálenost mezi jednotlivými vysílači DVB-T2 v SFN síti je možné určit jako [1]:

$$d_{SFN} = t_{GI} \cdot c, \quad (4)$$

kde d_{SFN} je vzdálenost vysílačů DVB-T2 v SFN síti, t_{GI} je doba trvání ochranného intervalu a c je rychlost světla (299792458 m/s) [1].

V Tab. 3 jsou uvedeny vypočtené hodnoty vzdáleností vysílačů v závislosti na použitém OFDM módu a ochranném intervalu.

Vysílané RF signály z vysílačů, které jsou ve větších vzdálenostech, musí být dostatečně utlumeny. Proto je zvláště důležité, aby byly úrovně signálu v jednofrekvenční síti správně kalibrovány. Není požadován maximální vysílací výkon v každém vysílacím místě, ale správný výkon vysílačů. Plánování sítě taky vyžaduje topografické informace o daném území [1].

Tab. 3 Vzdálenosti vysílačů v závislosti na systémových parametrech systému DVB-T2 pro šířku pásma 8 MHz (na základě [1])

OFDM mód	Trvání symbolu [ms]	Ochranný interval	Doba trvání ochranného intervalu [ms]	Vzdálenost vysílačů [km]
32K	3,584	1/128	0,028	8,4
		1/32	0,112	33,6
		1/16	0,224	67,2
		19/256	0,266	79,7
		1/8	0,448	134,4
		19/128	0,532	159,5
16K	1,792	1/128	0,014	4,2
		1/32	0,056	16,8
		1/16	0,112	33,6
		19/256	0,133	39,9
		1/8	0,224	67,2
		19/128	0,266	79,75
		1/4	0,448	134,4
8K	0,896	1/128	0,007	2,1
		1/32	0,028	8,4
		1/16	0,056	16,8
		19/256	0,067	19,8
		1/8	0,112	33,6
		19/128	0,133	39,89
		1/4	0,224	67,2
4K	0,448	1/32	0,014	4,2
		1/16	0,028	8,4
		1/8	0,056	16,8
		1/4	0,112	33,6
2K	0,224	1/32	0,007	2,1
		1/16	0,014	4,2
		1/8	0,028	8,4
		1/4	0,056	16,8
1K	0,112	1/8	0,014	4,2
		1/4	0,028	8,4

2.3 Pre-echo

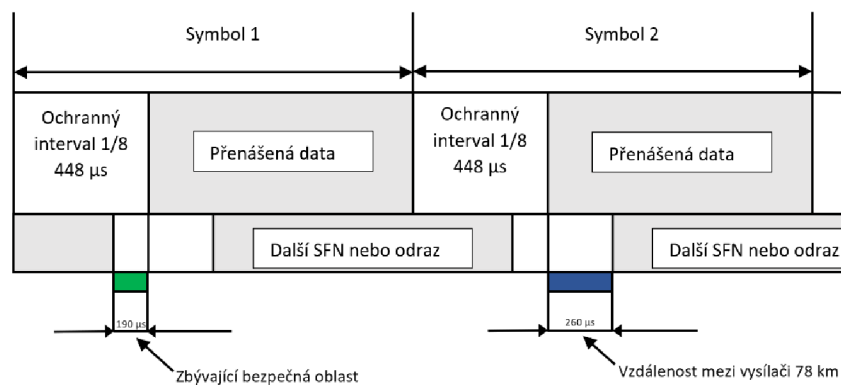
V případě příjmu několika signálů DVB-T2 sítě SFN může docházet k jevu pre-echo. Tento jev je typickým pro SFN sítě.

Jedná se o přímé signály od jednotlivých vysílačů nebo o signály, které vznikly odrazem od překážek. Pre-echo nastává v případě, kdy místní signál přichází do přijímače jako první, ale je zarušen signálem ze vzdálenějšího vysílače, který má vyšší výkon. To může vést k tomu, že přijímač přeskakuje z jednoho signálu na druhý, což má za následek degradaci výsledného obrazu. Kvalitní set-top box si s tímto dokáže poradit tím, že se zavěsí na silnější signál a ten dále zpracovává [24], [25].

Ve standardu DVB-T2 jsou data vysílána v symbolech. Jeden symbol se skládá z přenášených užitečných dat a z ochranného intervalu, kdy není vysílán žádný obsah. Ochranný interval se zavádí z toho důvodu, aby DVB-T2 přijímač měl čas pro zpracování celého datového úseku vysílaného v jednom symbolu a nebyl rušen dalšími přicházejícími signály. Během trvání ochranného intervalu přijdou všechny ostatní symboly z dalších vysílačů v SFN, což má za následek, že nový datový úsek začíná z tzv. datového ticha [24], [26].

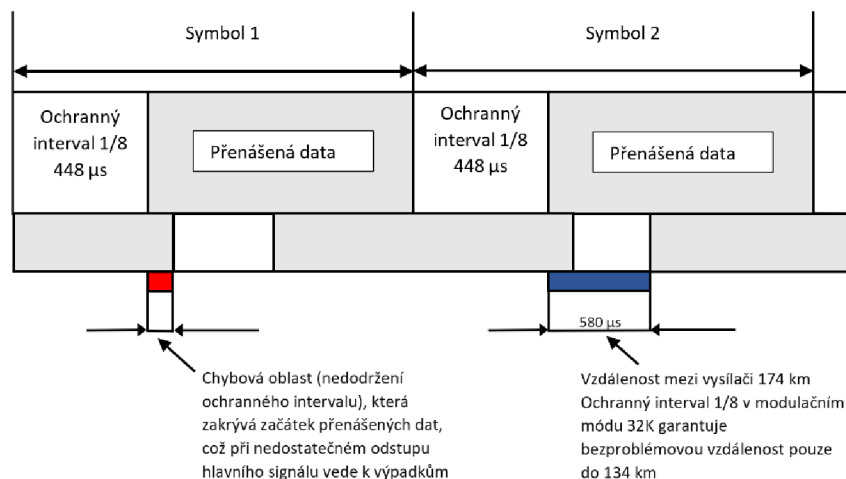
Při současném DVB-T2 vysílání v České republice s OFDM módem 32K je nastaven ochranný interval $1/8$ z celkové délky symbolu, což podle vztahu (3) znamená, že délka trvání ochranného intervalu je $448 \mu\text{s}$. Všechny další signály SFN, nebo odražené signály, které přijímač přijme se zpožděním do $448 \mu\text{s}$, by neměly způsobit problém při detekci přijímaného signálu [24].

Na Obr. 17 je znázorněno, jak je zpracováván signál při příjmu datových symbolů při dodržení ochranného intervalu v SFN.



Obr. 17 Příjem datových symbolů při dodržení ochranného intervalu (na základě [24])

Na Obr. 18 je znázorněn scénář, kdy dojde k nedodržení ochranného intervalu. Vzdálenost mezi vysílači je větší než kterou garantuje zvolený ochranný interval, viz Tab. 3. To má za následek, že chybová oblast zakrývá začátek přenášených dat, což může vést k rušení signálu, a to může vést k výpadku signálu.



Obr. 18 Příjem datových symbolů při nedodržení ochranného intervalu (na základě [24])

2.4 0-dB Echo

O jevu 0-dB Echo se mluví v případech, když se v přijímači objeví 2 nebo více signálových cest se stejnou úrovní, ale různým zpožděním. To také může vést k problémům se synchronizací přijímače, zejména v případě delších rozdílů zpoždění větších jak polovina ochranného intervalu. Teoreticky by měl být přijímač schopen bez problémů zvládnout i tuto situaci [1].

2.5 Výběr přenosového módu DVB-T2 pro SFN

Při výběru přenosového módu pro DVB-T2 závisí skutečná volba na požadavcích sítě. Jako vždy je třeba učinit kompromis mezi kapacitou a robustností [27].

Jedním z přístupů k volbě režimu pro provoz SFN by byla volba délky ochranného intervalu podle fyzické velikosti SFN nebo vzdáleností mezi vysílači SFN. Samozřejmě s tím, že je možné mít větší vzdálenosti mezi vysílači, než je ochranný interval, v závislosti na praktických úvahách, jako je terén, šíření a odolnost systému atd. Kromě toho je potřeba optimalizovat pokrytí úpravou anténních schémat, výkonů vysílačů, výšek antén, časování vysílačů atd. To může umožnit větší vzdálenosti vysílačů v SFN než je ochranný interval. V takových případech je však třeba provést podrobné simulace pokrytí [28].

Spolu s výběrem délky ochranného intervalu je třeba také určit podíl ochranného intervalu v přenášeném symbolu. Podíl GI zahrnuje zohlednění velikosti OFDM módu, který souvisí se scénářem příjmu: pevný, přenosný nebo mobilní příjem. V případě pevného příjmu je žádoucí použít OFDM mód 32K nebo 16K, protože větší velikost OFDM módu sníží podíl GI a zvýší dostupnou kapacitu. V případě přenosného a mobilního příjmu je doporučeno použít menší velikost OFDM módu, např. 16K, 8K nebo dokonce 4K, zejména v případě mobilního příjmu, kdy je omezením Dopplerův posun [28].

Volba modulace určuje přenosovou rychlost (kapacitu), ale má také vliv na robustnost systému. Modulační schémata vyššího řádu, která nabízejí větší kapacitu, mají menší robustnost. Je však třeba poznamenat, že vzhledem k účinnějšímu kódování kanálu, rotované konstelaci používaných v DVB-T2 bude 256-QAM vyžadovat hodnoty odstupu nosné od šumu (C/N) ve stejném řádu, jako dříve požadované pro 64-QAM ve standardu DVB-T [28].

Zvýšená odolnost systému bude mít rovněž velký vliv na výkonnost SFN, protože nižší požadovaný C/N sníží náchylnost k samovolnému rušení SFN [28].

3. CRC DATA SOFTWARE

Praktická část této práce byla zpracována v softwaru české společnosti CRC data. Byly používány tři programy: *RadioLab 4.6*, *RadioBase 3.4* a *Sítě SFN 8.2*. *RadioLab* [29] je výpočetní systém pro analýzu a vizualizaci šíření rádiových signálů nad zemským povrchem. *RadioBase* [30] je datový subsystém pro ukládání a správu dat vysílačů plošného pokrytí zejména pro služby digitální televize a rozhlasu. *Sítě SFN* [31] je výpočetní systém pro analýzu pokrytí a rušení vysílacích sítí pro služby FM, TV, DVB-T, DVB-T2 a T-DAB a analýzu a návrh SFN sítí DVB-T, DVB-T2 a T-DAB.

3.1 RadioLab 4.6

RadioLab je výpočetní systém pro analýzu a vizualizaci šíření rádiových signálů nad zemským povrchem (ve volném prostoru). Jde o systém pro řešení úloh při analýze a návrhu radiokomunikačních systémů (analýza terénního profilu, výpočet útlumů šíření signálu, výpočet rádiové viditelnosti a výpočet plošného rozložení intenzity elektromagnetického pole). Dále obsahuje databázové aplikace pro organizaci dat vysílačů, mikrovlákných spojů a geografických objektů a mapový Geografický informační systém (Geographic information system – GIS) pro zobrazení výsledků výpočtu.

RadioLab lze také využít při řešení úloh plošného pokrytí, spojů point-point, systémů point-multipoint i mobilních systémů [29]. RadioLab obsahuje následující aplikace a sdílené subsystémy:

Aplikace a sdílené subsystémy RadioLab:

- **Profil** – slouží k vizualizaci šíření rádiových signálů nad terénním profilem, zobrazení profilu, příčného profilu, Fresnelovy zóny, úhlu hlavního laloku antén. Lze manuálně zadat překážky pro reprezentaci objektů, které nejsou v datech modelu terénu ani morfologie, lze také vypočítat útlumy nad těmito překážkami. Dále je možná analýza a zobrazení odrazů a vícestředného šíření a výpočet hodnot intenzity signálu pro všechny implementované modely šíření [32].
- **Mapa 2D** – umožňuje zobrazení rádiových objektů (stanoviště, vysílače, ...) a výsledky výpočtů (diagram viditelnosti a pokrytí, ...) na podkladu digitálních rastrových nebo vektorových map, možnost zobrazení výškopisu a morfologie jako podkladové vrstvy. Lze definovat a změnit měřítko, zobrazit výřez a detail, měřit vzdálenost a azimut.
- **Databáze vysílačů** – slouží pro správu dat stanovišť a vysílačů. Datový záznam může obsahovat data vysílače s definovaným kmitočtem, výkonem a horizontálním a vertikálním vyzářovacím diagramem. Je také možné rozšiřování záznamu o uživatelem definované parametry.

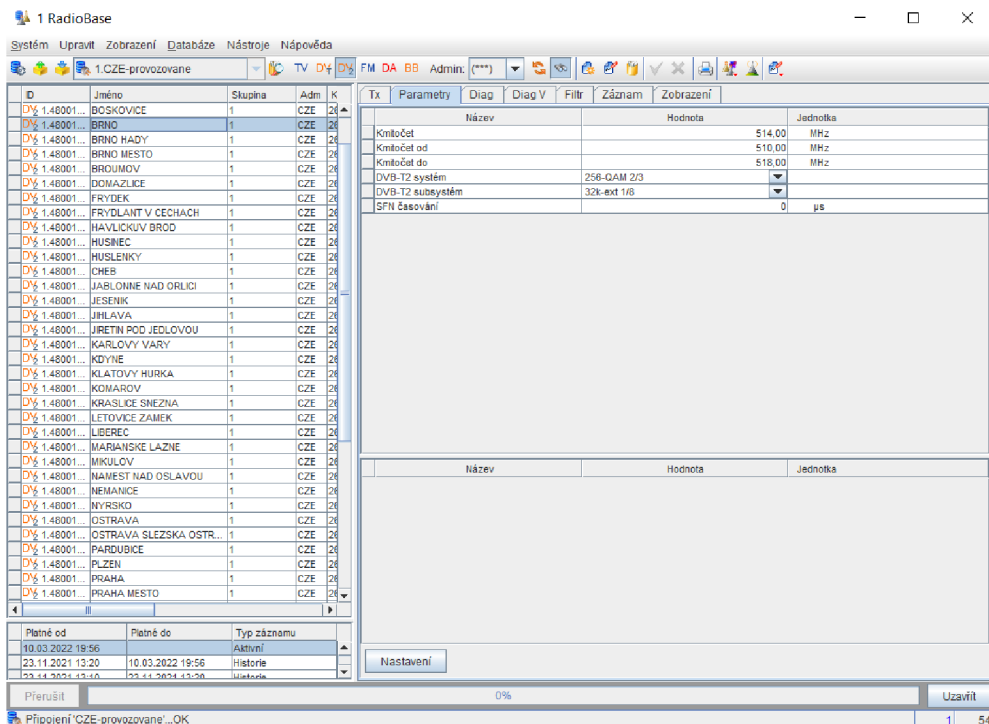
- **Databáze skoků** – správa dat mikrovlnných skoků s možností výpočtu základní úrovně rozvahy. Obsahuje databáze antén a zařízení s potřebnými parametry pro výpočet signálové bilance skoku.
- **GeoBase** – databáze geografických elementů. Slouží pro ukládání a správu dat geografického charakteru pro reprezentaci prostorových dat. Mohou obsahovat uživatelem definovanou hodnotu, která reprezentuje hodnotu signálu, hodnotu naměřenou, prahovou nebo referenční.
- **Pokrytí** – pro plošné výpočty kritérií šíření signálu zadaného vysílače. Výstupem jednotlivých úloh aplikace pokrytí je rádiová viditelnost, hodnoty intenzity elektromagnetického pole, plocha ohraničená obzorovou křivkou a radarová dohlednost. Dále následuje popis jednotlivých úloh aplikace Pokrytí:
 - Výpočet viditelnosti – pro zadané místo a výšky vysílací a přijímací antény je vypočten kruhový, popř. sektorový diagram rádiové viditelnosti. Výpočet lze provést v okolí vysílače nebo libovolného bodu. Skládáním více diagramů lze řešit úlohy typu nalezení míst, která jsou nebo nejsou současně viditelná z více stanovišť.
 - Výpočet křivky horizontu – pro zadané místo a výšky vysílací a přijímací antény je vypočtena křivka horizontu v rámci zadané maximální vzdálenosti.
 - Výpočet plošného pokrytí – pro zadané parametry, tj. místo a výška vysílací antény, vyzařovací diagramy, kmitočet a výkon, je vypočten diagram plošného rozložení intenzity elektromagnetického pole. Výsledný diagram lze uložit do souboru, zobrazit na mapě 2D nebo převést do jiné aplikace RadioLab. Výpočet lze provést v okolí vysílače nebo libovolného jiného bodu.
 - Radarová dohlednost – výsledkem výpočtu je sada křivek pro jednotlivé zadané letové hladiny, představující maximální radarovou dohlednost pro tyto hladiny. Výpočet se provádí se zadanou tolerancí koeficientu zakřivení Země pro zohlednění fluktuací šíření radarového signálu. Výsledky lze zobrazit na Mapě 2D jako sada křivek nebo pásma tolerance.
- **Sítě** – tato aplikace umožňuje provádět výpočty plošného rozložení intenzity elektromagnetického pole pro zadanou síť vysílačů. Na rozdíl od aplikace Pokrytí, aplikace Sítě umožňují hromadný výpočet nad sadou vysílačů načtenou z aplikace TxBase, popř. nad sadou načtenou ze souborů *.trd [29].

3.2 RadioBase 3.4

RadioBase je datový subsystém pro ukládání a správu dat vysílačů plošného pokrytí. Jde o serverový systém, který poskytuje služby pro správu dat vysílačů. Dále také poskytuje služby funkční pro nadřazené systémy realizující výpočty pokrytí, rušení a kritérií vysílacích sítí nad těmito daty, např. síť SFN [33].

Tento systém umožňuje práci nad více datovými zdroji, tzv. datovými kontejnery a podporuje nezbytné operace pro organizaci dat, sdílení dat a vzájemnou výměnu dat na různých úrovních. Díky této technologii je možné, aby *RadioBase* i další navazující výpočetní systémy pracovaly nad virtuální databází složenou z více datových zdrojů. Datové komponenty mají svá samostatná fyzická úložiště a mohou existovat nezávisle v odlišných životních cyklech [30]. Systém pracuje s databázemi formátu MS Access 2000 (*.MDB), dále pak s vlastním databázovým enginem Derby v režimu Embedded (databázový server běží ve virtuálním stroji *RadioLab*) nebo v klasické klient-server architektuře, kde je Derby databázový server nainstalován na serverovém počítači.

RadioLab je kompatibilní s ostatními aplikacemi platformy *RadioLab 4*. Komponenty systému *RadioLab 4* jsou využívány pro vizualizaci vysílačů na mapách a pro výpočty pokrytí. *RadioBase* je rozšiřitelný nástroj typu *RadioBase AddIn*, pracují nad daty zvolených vysílačů z uživatelského rozhraní *RadioBase*. Typickým nástrojem je např. výpočet koordinační vzdálenosti nebo exporty dat do různých formátů [33]. Hlavní okno *RadioBase* (viz Obr. 19) [30] umožňuje všechny editační a vyhledávací funkce, třídění nebo administrace. Obsahuje seznam vysílačů jako výsledek dotazů nebo filtrace a detail dat zvoleného vysílače rozprostřený do několika záložek.



Obr. 19 RadioBase – hlavní data vysílače

3.3 Sítě SFN 8.2

Sítě SFN 8.2 je výpočetní systém pro analýzu pokrytí a rušení služby FM, TV, DVB-T, DVB-T2 a DAB. Systém je schopen vyhodnocovat rušení od jiných vysílacích systémů, a i rušení typu zahlcení vstupních dílů přijímače [31].

Tento systém řeší obecně formulovanou úlohu výpočtu zvoleného kritéria pokrytí nad množinou vysílačů užitečného signálu a rušícího signálu. Pro tento výpočet je vstupem sada vysílačů užitečného signálu nebo sada rušících vysílačů. Výstupem je plošné vyhodnocení úrovně signálu, rušení, popř. dalších kritérií pokrytí sítě. Dále lze vyhodnotit celkové rušící pozadí pro daný referenční vysílač [34].

Standarty konference RRC06 a další technické dokumenty, obzvláště doporučení ITU [35], jsou základem, ze kterých vycházejí výpočetní algoritmy a parametry. Kromě výpočetních postupů zaměřených na SFN sítě, realizuje tento systém výpočty pokrytí a rušení analogových vysílačů TV a FM. Systém *Sítě SFN* využívá aplikace systému *RadioLab 4* (Profil, Mapa, 2D, atp.) pro zobrazení výsledků výpočtu v mapě a pro zobrazení terénního profilu [34]. Dále pracuje s datovým subsystémem *RadioBase 3*, kontejnerově orientovaným databázovým systémem pro správu dat vysílačů.

Výsledky výpočtů (diagramy signálu, SFN rastry, finální rastr) je možné přenést pomocí mechanismů přenášení dat mezi jednotlivými aplikacemi platformy *RadioLab 4* přímo do dalších navazujících aplikací, např. Vyhodnocení pokrytí nebo Vyhodnocení rozdílů sítí [31], [34]. Koncepte systému je nastavená tak, že jednotlivé navazující kroky výpočtu může uživatel libovolně kombinovat, opakovat s jiným nastavením, zobrazovat různé kombinace výsledků a mezivýsledků.

Pro výpočty jsou vstupem dvě množiny vysílačů – vysílače užitečného signálu a rušící vysílače a dále sada parametrů určující metody výpočtů a jejich parametry. Celý průběh výpočtu lze rozdělit do několika základních kroků, se kterými souvisejí hlavní funkční bloky i jednotlivé části uživatelského rozhraní. Kroky lze aktivovat jednotlivě v sekvenci při manuálním výpočtu nebo dávkově při výpočtu celé úlohy [34]. Popis jednotlivých bloků výpočtu typické úlohy jsou popsány dále:

1. **Definice množiny vysílačů užitečného signálu** – vysílače lze jednotlivě přidávat nebo odebrat pomocí služeb příslušného datového serveru. Sadu vysílačů užitečného signálu (i další nastavení výpočtů popř. i výsledky) lze uložit do souboru úlohy a později znovu načíst.
2. **Nalezení rušících vysílačů** – rušící vysílače lze zadávat manuálně nebo je lze nechat vyhledat automaticky. Při automatickém vyhledávání je proveden výběr potenciálních zdrojů rušení (na základě kmitočtové podmínky) a následný výpočet hraničních křivek a eliminace vysílačů, jejichž příspěvek rušení je podprahový. Seznam rušících vysílačů je možné také uložit do souboru úlohy.
3. **Výpočet diagramu intenzity signálu** – dle zvolených parametrů jsou vypočítány plošné diagramy intenzity signálu pro vysílače užitečného i rušícího signálu.

Výsledné diagramy lze zobrazit v náhledovém panelu aplikace *Sítě SFN* nebo detailně v mapovém systému *RadioLab 4*.

4. **Výpočet diagramu s rušením** – pro každý bod diagramu signálu vysílače užitečného signálu (s nadprahovou intenzitou) je vyhodnoceno celkové rušení. Při nesplnění kritéria nerušeného příjmu je přiřazen atribut rušený příjem. Tyto diagramy s rušením mohou být opět zobrazeny v náhledovém panelu aplikace *Sítě SFN* nebo detailně v mapovém systému *RadioLab 4*.
5. **Výpočet pokrytí SFN sítě** – pro digitální úlohu je pro každý bod v oblasti pokrytí vyhodnocena celková hodnota signálu od všech vysílačů SFN sítě. Je uvažována aktuální vzdálenost a relativní časování jednotlivých vysílačů v rámci sítě. Výpočet lze provést bez rušení, za rušící vysílače se považují pouze vysílače v rámci sítě SFN, jejichž zpoždění signálu překročí velikost ochranného intervalu. Dále lze výpočet provést s rušením, kdy je zahrnováno i rušení z nekorelovaných zdrojů (ostatní SFN a rušení jiných systémů).
6. **Výpočet rastrového kritéria** – na základě vypočtených diagramů s rušením nebo SFN rastrů je pro každý bod oblasti s výskytem užitečného signálu vyhodnoceno zadané rastrové kritérium: absolutní maximální úroveň pokrytí, maximální úroveň pokrytí nad minimální úrovní nebo násobnost pokrytí [31], [34].

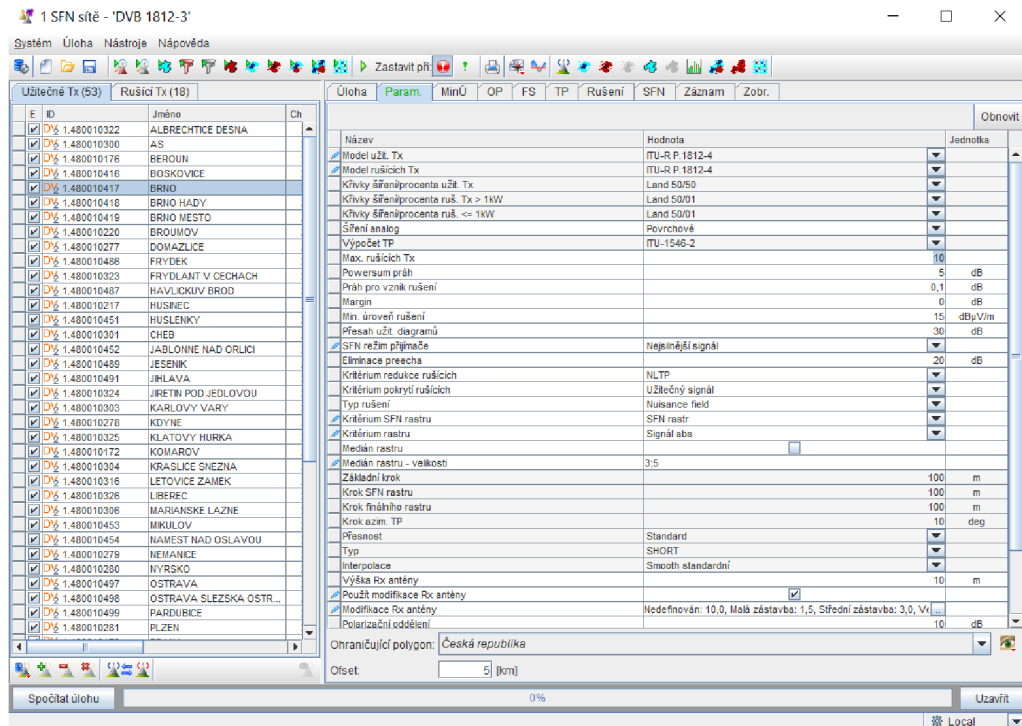
3.3.1 Organizace uživatelského rozhraní

Hlavní okno programu Sítě SFN je rozděleno na následující části:

1. Menu a ovládací lišta – aktivace jednotlivých funkcí systému v horní části okna, pomocí tlačítek toolbar lze aktivovat jednotlivé kroky výpočtu, zobrazení a pracovat s úlohami.
2. Stavový řádek s informacemi o činnosti systému a panel s indikací postupu ve spodní části.
3. Dvě záložky v levé části hlavního prostoru – umožňují zadat sadu užitečných a rušících vysílačů pomocí systému RadioBase3.
4. Sada záložek v pravé části pro nastavení a zobrazení:
 - Záložka **Úloha** – definice a popis úlohy (definice jednotlivých výpočetních kroků)
 - Záložka **Parametry** – nastavení jednotlivých parametrů výpočtů.
 - Záložka **MinUr.** – obsahuje tabulku minimálních úrovní pro jednotlivé typy vysílačů a jednotlivá kmitočtová pásma.
 - Záložka **OP** – obsahuje tabulku a parametry výpočtu ochranných poměrů.
 - Záložka **FS** – obsahuje tabulku kmitočtových podmínek pro vyhledávání rušících vysílačů.
 - Záložka **TP** – obsahuje data a náhled vypočtených hraničních křivek bez rušení a s rušením.

- Záložka **Rušení** – obsahuje seznam rušících vysílačů k vybranému užitečnému vysílači spolu s důležitými parametry a náhledem. V případě, že je vybrán rušící vysílač, tabulka obsahuje vysílače rušené tímto vysílačem.
- Záložka **SFN** – obsahuje seznam SFN sítí s důležitými parametry a pro zvolenou SFN seznam vysílačů této sítě, seznam rušících vysílačů a náhled pokrytí se všemi režimy zobrazení. Z této záložky lze aktivovat nástroje pro vizualizaci časování SFN a pro optimalizaci časování SFN.
- Záložka **Záznam** – obsahuje informace o postupu výpočtu, rozhodování systému, upozornění na nestandardní situace nebo chyby apod.
- Záložka **Zobrazení** – obsahuje dva panely pro nastavení atributů zobrazení → barevné stupnice pro zobrazení jednotlivých entit a výstupů výpočtu a panel s atributy zobrazení vysílačů [31], [34].

Uspořádání uživatelského rozhraní je zobrazeno na Obr. 20.



Obr. 20 Uživatelské rozhraní *Sítě SFN* – záložka Parametry

4. ANALÝZA SFN SÍTÍ

Pro seznámení s funkcemi aplikací od společnosti CRC data byly používány DVB-T2 parametry, které se používají v ČR a byla provedena jednoduchá analýza pokrytí ČR signálem DVB-T2.

Pozornost byla zaměřena na vysílací veřejnoprávní Multiplex 21, kanál 26 (CH26). Obsahem multiplexu jsou všechny stanice České televize v HD rozlišení, (použitý kodek je H.265 – HEVC). Jedná se o nejrozsáhlejší SFN síť v ČR (vysílá se na většině území), tudíž je nejnáchylnější ke vzniku problémům souvisejícími se sítěmi SFN (pre-echo, echo, překročení ochranného intervalu, rušení vysílačů navzájem atd.).

V Tab. 4 lze vidět systémové parametry, které se v současné době používají v ČR pro Multiplex 21.

Tab. 4 Systémové parametry používané pro vysílání v ČR pro Multiplex 21 (CH26)

OFDM mód	32K
Přenosový mód	Extended
Pilotní vzor	PP8
Ochranný interval	1/8
Modulace	256-QAM
Kódový poměr	2/3
Rotovaná konstelace	ANO
Šířka pásma	8 MHz
Frekvence	514 MHz

Seznam vysílačů, které byly zahrnuty do simulací, a jejich parametry jsou zaznamenány v Tab. 5 a Tab. 6. U vysílače Zlaté hory byl zjištěn softwarový problém, který způsoboval nekorektní běh výpočtu, a nešlo dokončit výpočet. Pro korektní výpočet musel být vysílač Zlaté hory odstraněn ze zahrnutých vysílačů. Poté proběhl výpočet simulace korektně až do konce.

Mapa se skutečnými pozicemi vysílačů Multiplexu 21 (CH26) je zobrazena na Obr. 21. Celkový počet vysílačů používaných v Multiplexu 21 (CH26) je 54.

Postup při simulacích v programu *Sítě SFN*

Jako první byly do programu *RadioBase* nahrány jednotlivé vysílače spolu s jejich reálnými parametry z databáze ČTÚ a poté odeslány do programu *Sítě SFN*.

Veškeré další nastavení bylo prováděno v záložce **Parametry** (viz Obr. 20) a v záložce **Zobrazení**.

V záložce **Parametry** byl vybrán **model užitečných TX** a **model rušících TX** ITU-R P.1812-4. Dále byly nastaveny **křivky šíření/procenta užitečných TX** na Land 50/50 a **křivky šíření/procenta rušících TX** byly nastaveny na Land 50/01.

Dalším parametrem, který byl měněn, byl **SFN režim přijímače**. Zde bylo vybíráno z nabídky pro jednotlivé simulace. Nejvíce byl užívaný režim Nejsilnější signál. Jako **kritérium rastru** bylo nastaveno SFN rastr bez rušení. **Základní krok** byl nastaven na 100 m, stejně tak **krok SFN rastru** a **krok finálního rastru**.

Poté byla nastavena základní **výška RX antény** na 10 m a následně byly definované **modifikace RX antény**. U všech typů byla vybrána volba RxAGL, tzn. že se použije parametr výšky přijímací antény a k té se přičte hodnota ofsetu. Jednotlivé typy a jejich ofsety byly definovány následovně: Nedefinován: 10 m; malá zástavba: 1,5 m; střední zástavba: 3 m; velká zástavba: 5 m; voda: 10 m; slaná voda: 10 m; volný terén: 10 m; les: 5 m; stromy: 5 m.

Následně bylo zvoleno, že bude uvažována **směrnost RX antény** a **model RX antény** byl zvolen typ ITU. Pro některé simulace byla vybrána možnost **rozšířeného výpočtu samorušení**.

Na závěr bylo v záložce **Zobrazení** nastaveno finální zobrazení výsledků na mapě. Lze nastavit rozsah stupnice a její krok a barevné zobrazení jednotlivých diagramů.

Poté byl spuštěn výpočet úlohy a po dokončení výpočtu byly výsledky zobrazeny v aplikaci *Mapa 2D*. Časová náročnost výpočtu simulací se odvíjela od nastaveného základního kroku, kroku SFN rastru a kroku finálního rastru. Dalším parametrem, který výrazně prodloužil dobu trvání výpočtu, byl rozšířený výpočet samorušení. Při nastavení všech kroků na 100 m a bez výběru rozšířeného výpočtu samorušení trval výpočet na běžném osobním počítači (8 GB RAM, procesor i7-6500U CPU 2,50 GHz) více než hodinu. Při zahrnutí rozšířeného výpočtu samorušení se doba trvání výpočtu úlohy zhruba ztrojnásobila.

Tab. 5 Seznam použitých vysílačů pro simulaci v softwaru RadioLab pro Multiplex 21 (CH26) (1. část) [36]

Město	Vysílač	Kanál	Výkon	Polarizace
Albrechtice – Desná	Desná	26	100 W	H
Aš	vrch Háj	26	50 W	V
Beroun	vrch Děd	26	10 W	H
Boskovice	Čížovky	26	10 W	H
Brno	Kojál	26	100 kW	H
Brno – město	Barvičova ulice	26	10 kW	V
Brno – Hády	Hády	26	10 kW	H
Broumov	Broumov	26	25 W	H
Domažlice	Vraní vrch	26	10 kW	H
Frýdek-Místek – Lysá hora	Lysá hora	26	25 kW	H
Frýdlant v Čechách	U rozhledny	26	25 W	H
Havlíčkův Brod	Havlíčkův Brod	26	10 W	H
Husinec	Na Vrážích	26	10 W	H
Huslenky	Huslenky	26	25 W	H
Cheb	Zelená hora	26	20 kW	H
Jablunné nad Orlicí	Strážnice	26	10 W	H
Jeseník – Praděd	Praděd	26	100 kW	H
Jihlava – Javořice	Javořice	26	100 kW	H
Jičetín pod Jedlovou	Jedlová	26	100 W	V
Karlovy Vary	Tři Kříže	26	25 W	H
Kdyně	Kdyně	26	25 W	H
Klatovy	Hůrka	26	10 W	H
Komárov	Komárov	26	10 W	H
Kraslice	Sněžná	26	10 W	H
Letovice zámek	zámek Letovice	26	10 W	H
Liberec	Ještěd	26	25 kW	H
Mariánské Lázně	hotel Monty	26	10 W	H
Mikulov – Děvín	Děvín	26	25 kW	H
Náměšť nad Oslavou	Zborovská ulice	26	10 W	H

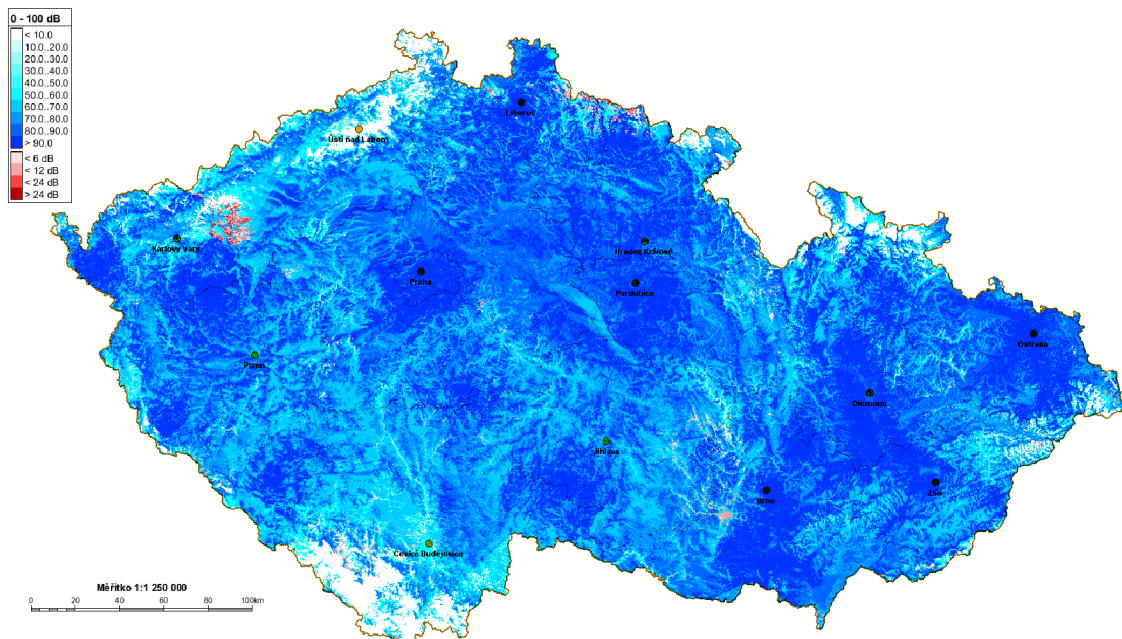
Tab. 6 Seznam použitých vysílačů pro simulaci v softwaru RadioLab pro Multiplex 21 (CH26) (2. část) [36]

Město	Vysílač	Kanál	Výkon	Polarizace
Nemanice	Nemanice	26	10 W	H
Nýrsko	Nýrsko	26	15 W	H
Ostrava – Hošťálkovice	Hošťálkovice	26	100 kW	H
Ostrava Hladnov	vodojem Hladnov	26	3 kW	H
Plzeň	Krašov	26	100 kW	H
Pradubice – vrch Krásný	vrch Krásný	26	100 kW	H
Praha	Cukrák	26	100 kW	H
Praha – město	Žižkov	26	32 kW	V
Rakovník – Okružní	ul. Okružní	26	10 W	H
Raspenava	Raspenava	26	5 kW	V
Rokycany	Základní škola TGM	26	2 W	V
Sázava nad Sázavou	na Vlkaňáku	26	10 W	H
Sušice	Svatobor	26	100 kW	H
Svitavy – Kamenná horka	Kamenná horka	26	100 W	H
Tábor – Čelkovice	Čelkovice	26	5 W	H
Trutnov	Černá hora	26	100 kW	H
Třinec – Lidická	Lidická	26	126 W	H
Valašské Klobouky	Ploštiny	26	25 kW	H
Valašské Meziříčí	Radhošť	26	100 W	H
Votice	Mezivrata	26	32 kW	H
Zbiroh	základní škola	26	10 W	H
! Zlaté Hory	Biskupská kupa	26	20 W	H
Zlín	Tlustá Hora	26	100 kW	H
Žamberk	Na Rozálce	26	16 W	H
Žďár nad Sázavou	Harusův Vrch	26	100 W	H

4.1 Výstupy z programu RadioLab

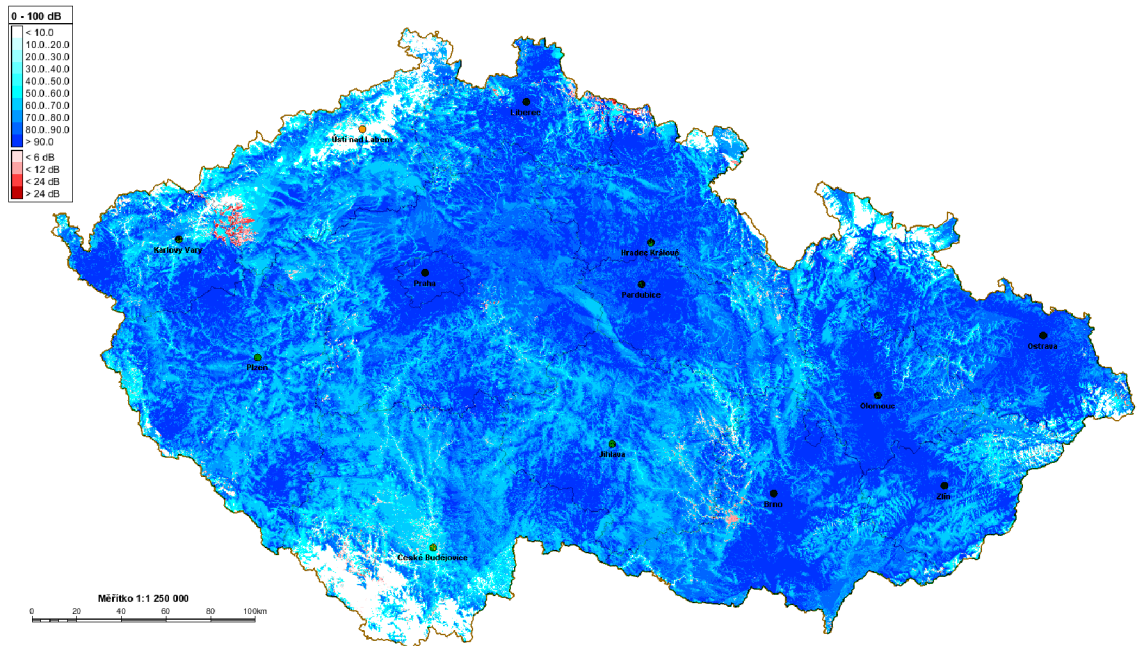
Jako první byla provedena simulace pokrytí SFN sítě s parametry, které se používají v reálném vysílání v ČR v Multiplexu 21 (CH26), viz Tab. 4. K výpočtu signálových diagramů užitečných a rušivých signálů z vysílačů byl použit model šíření ITU-R P.1812-4 [37]. Jedná se o deterministický model zohledňující útlum difrakcí, vliv morfologie, vliv podmínek v okolí místa příjmu aj. Způsob, jakým přijímač vyhodnocuje jednotlivé signály vůči GI, byl zvolen, že se přijímač „zavěsí“ na první nadprahový signál, tj. signál s intenzitou větší než minimální úroveň pro danou SFN. Zisk antény byl pro všechny simulace v programu nastaven na 12,5 dBi a směrovost na 60°. Tyto parametry jsou nastaveny defaultně a nelze je měnit.

Výsledná mapa pokrytí je zobrazena na Obr. 22. Lze vidět, že skoro celé území je pokryté nerušeným a dostatečně silným signálem (modrá barva), vyskytuje se pouze několik míst, kde dochází k rušení (červená barva). To může být způsobeno rušením mezi vysílači, nebo odrazy signálů od překážek, což vede k překročení doby trvání GI. Bílá místa na mapě, která se objevují hlavně v pohraničí, jsou nepokrytá signálem DVB-T2.



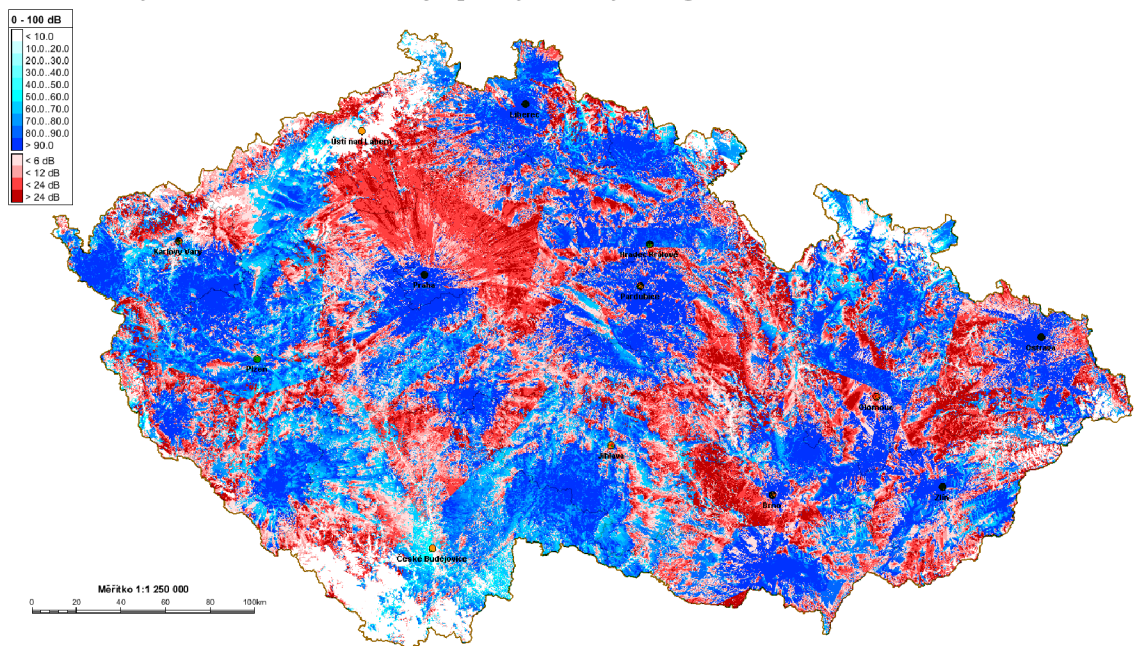
Obr. 22 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/8, OFDM mód 32K Extended, modulace 256-QAM, kódový poměr 2/3

V další simulaci byl změněn OFDM mód na 16K a GI byl nastaven na 1/4. Ostatní parametry zůstaly stejné. Výsledná mapa pokrytí je zobrazena na Obr. 23. Lze konstatovat, že pouhým lidským okem nelze rozeznat, jestli došlo ke změně v kvalitě pokrytí území oproti předchozí simulaci (Obr. 22). To, že se výsledné mapy pokrytí téměř shodují, je způsobeno tím, že i když se změnil GI, tak se zároveň změnil i OFDM mód, takže doba trvání GI se nezměnila. V obou případech to bylo 448 μs , viz Tab. 3.



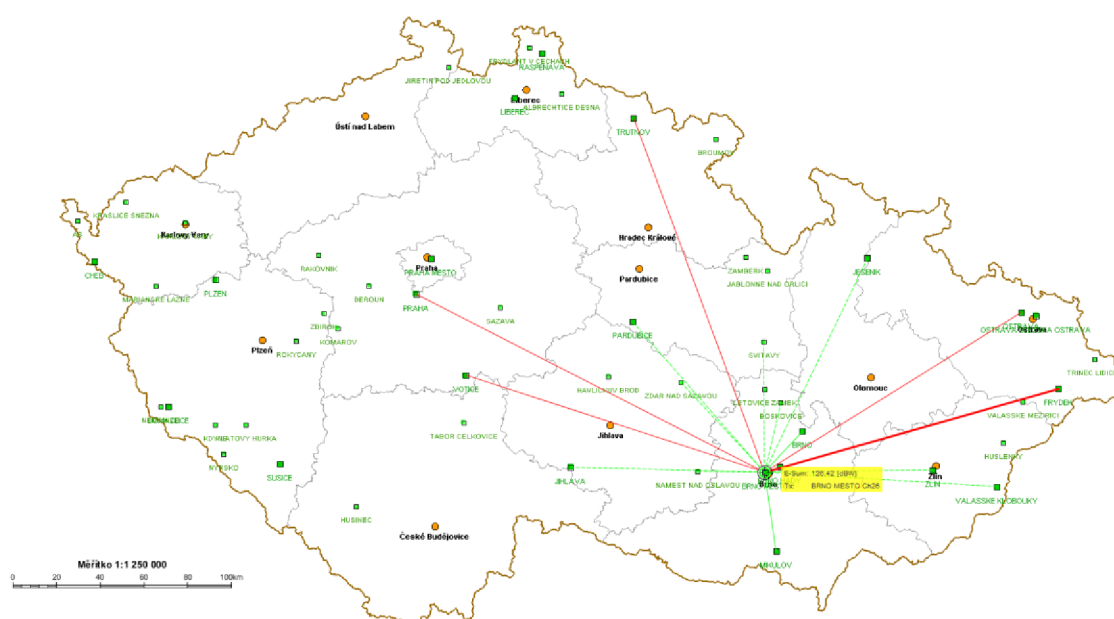
Obr. 23 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/4, OFDM mód 16K, modulace 256-QAM, kódový poměr 2/3

Poté byla provedena simulace, kdy byly nastaveny totožné parametry jako v první simulaci, viz Tab. 4, pouze GI byl změněn na nejnižší možnou hodnotu, tj. 1/128. Takže GI trval pouze 28 μs oproti 448 μs (první simulace). Výsledná mapa pokrytí je zobrazena na Obr. 24. Lze vidět, že kvůli krátké době trvání ochranného intervalu dochází k silnému rušení mezi vysíláči v síti SFN téměř na celém území a příjem nerušeného signálu je téměř nemožný. Pouze několik míst je pokryto silným signálem (modrá barva).



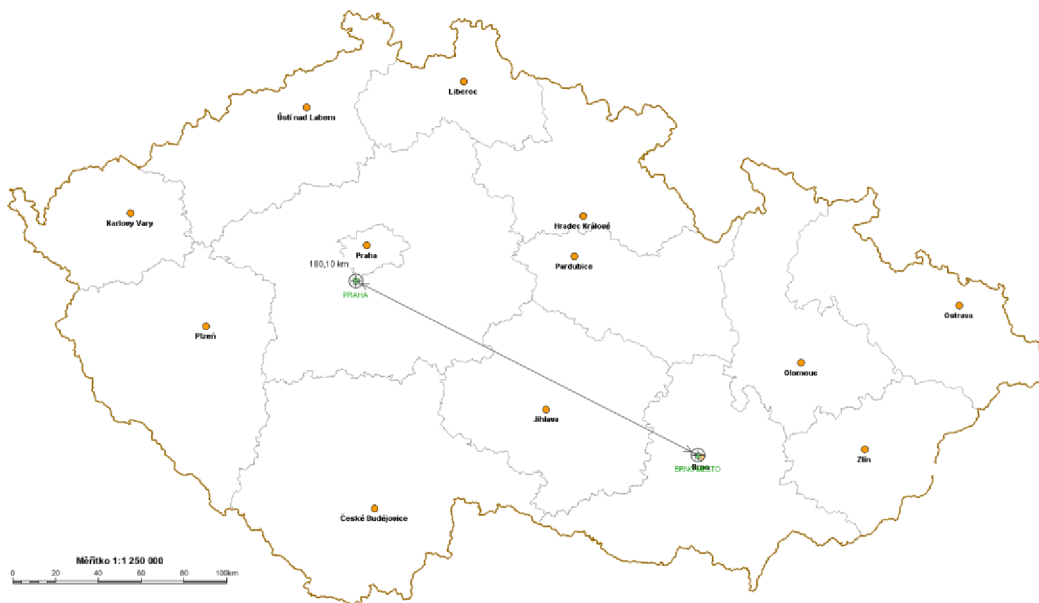
Obr. 24 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/128, OFDM mód 32K Extended, modulace 256-QAM, kódový poměr 2/3

Pro další simulaci byly opět nastaveny parametry, které se používají při vysílání v ČR v Multiplexu 21 (CH26). V tomto případě byl vybrán vysílač Brno – město a pomocí funkce programu *Sítě SFN* a *Mapa 2D* byly vykresleny spojnice k jednotlivým vysílačům SFN, které vybraný vysílač ovlivňují, viz Obr. 25. V programu *Sítě SFN* byly vybrány všechny vysílače SFN sítě a přeneseny do *Mapy 2D* pomocí funkce *Zobrazit vybrané „SFN síť“ na mapě*. Poté už stačí vybrat pozici zvoleného vysílače. Zelená silná spojnice představuje nejsilnější signál uvnitř ochranného intervalu, určuje nasměrování antény. Zelená slabá spojnice představuje další nadprahové signály uvnitř ochranného intervalu, zelená slabá čárkovaná představuje podprahový signál uvnitř ochranného intervalu. Červená silná spojnice prezentuje nejsilnější rušící signál, vzniklý překročením ochranného intervalu, červená slabá představuje další nadprahové rušící signály.



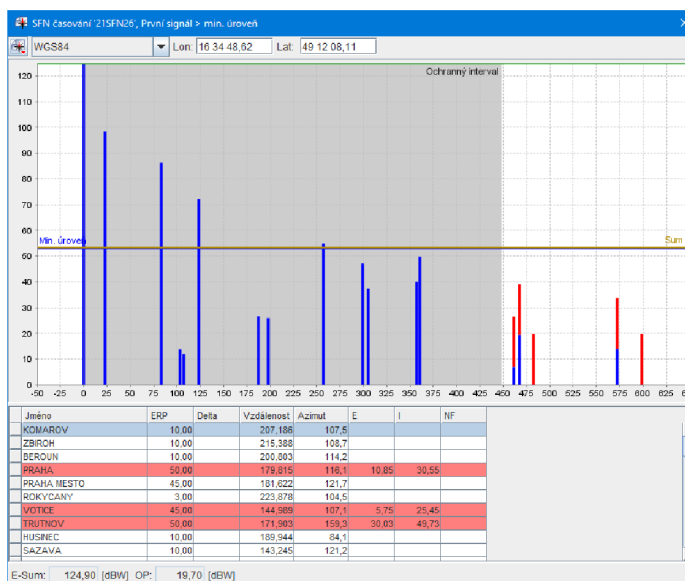
Obr. 25 Vysílač Brno – město a spojnice k jednotlivým vysílačům SFN, které ho ovlivňují

Pomocí funkce *Měření vzdálenosti* byla změřena v aplikaci *Mapa 2D* vzdálenost mezi vybraným vysílačem Brno – město a vysílačem Praha, který se projevuje vůči vysílači Brno – město jako rušící, viz Obr. 26. Bylo změřeno, že vzdálenost mezi vysílači je 180,1 km. Přičemž pro OFDM mód 32K a GI 1/8 je maximální vzdálenost mezi vysílači, kdy je garantováno, že se vysílače navzájem nebudou rušit, 134,4 km, viz Tab. 3. Z toho vyplývá, že byla překročena maximální garantovaná vzdálenost o 46 km a vysílač Praha působí rušivě na vysílač Brno – město. Ovlivňování mezi vysílači navzájem je dáno členitostí terénu a viditelností mezi vysílači.



Obr. 26 Vzdálenost mezi vysílačem Brno – město a vysílačem Praha (180,1 km)

Pro vysílač Brno – město bylo pomocí funkce *SFN časování* zobrazeno okno, na kterém jsou vidět časové poměry signálů od jednotlivých vysílačů (viz Obr. 27). V grafu v horní části je na ose x čas v μs a na ose Y je úroveň signálu v $\text{dB}\mu\text{V/m}$. Blok se šedivým pozadím vymezuje GI. V grafu jsou zobrazeny sloupce jednotlivých nadprahových signálů. V případě signálu vně ochranného intervalu je nad modrým sloupcem vykreslen červený blok. V grafu je dále vyznačena minimální úroveň pro daný kanál, sumární úroveň celé SFN sítě v daném bodě a sumární úroveň rušení. Lze vidět, že se přijímač „zavěsí“ na první nadprahový signál a od tohoto signálu dále je nastaven ochranný interval. Signály, které spadají do ochranného intervalu by neměly způsobovat problém při detekci přijímaného signálu.



Obr. 27 Časování SFN – vysílač Brno – město

4.2 Terénní měření

Měření v terénu bylo realizováno ve spolupráci s Českým telekomunikačním úřadem (ČTÚ) za účelem potvrzení správnosti simulací a provedení komplexní analýzy SFN sítě Multiplexu 21 (CH26).

V jednotlivých podkapitolách jsou prezentována jednotlivá terénní měření v různých lokalitách. Tyto lokality byly vybrány na základě simulací softwaru CRC data a na základě interaktivních map pokrytí DVB-T2 vysílačů [38].

Pro měření v terénu byl využíván specializovaný měřicí vůz ČTÚ (viz Obr. 28). Měřicí vůz je vybaven výsuvným anténním stožárem do 10 metrů a směrovou anténou. Anténa dosahuje zesílení 13 dB na kmitočtu 514 MHz a předozadní poměr má 28 dB. Technické vybavení měřicího vozu je ukázáno na Obr. 29. Pro analýzu přijímaného DVB-T2 signálu byl použit ETL TV analyzátor od firmy Rhode & Schwarz (R&S) [39] a měřicí přístroj RANGER Neo 4 od firmy PROMAX [40]. Dále byl přijímaný signál analyzován pomocí set-top boxů Sencor SDB 5002T a EMOS EM 180 HD. Pomocí nich byla sledována intenzita signálu a kvalita signálu.

V jednotlivých měřeních jsou uvedeny naměřené hodnoty objektivních parametrů signálu DVB-T2, a to úroveň signálu v dB μ V, MER před dekódováním, MER po dekódování, BER před LDPC dekódováním a počet LDPC iterací (počet nutných opakování dekódování pro opravu jednoho FEC rámce). Dále budou prezentovány RF spektra, konstelační diagramy a echo jednotlivých míst.



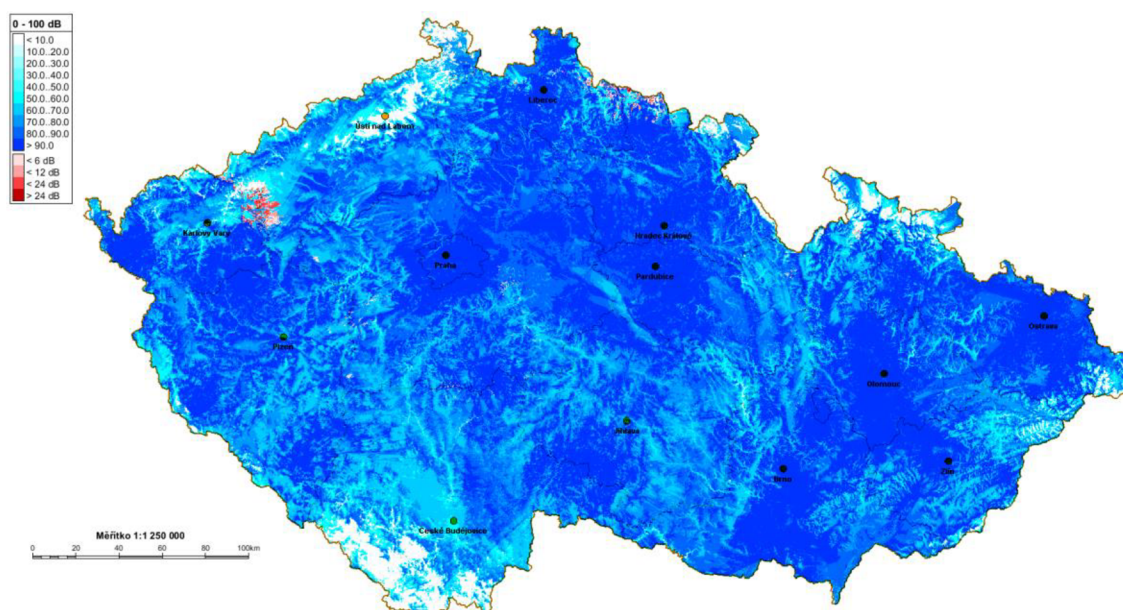
Obr. 28 Specializovaný měřicí vůz ČTÚ s výsuvným anténním stožárem



Obr. 29 Technické vybavení měřicího vozu

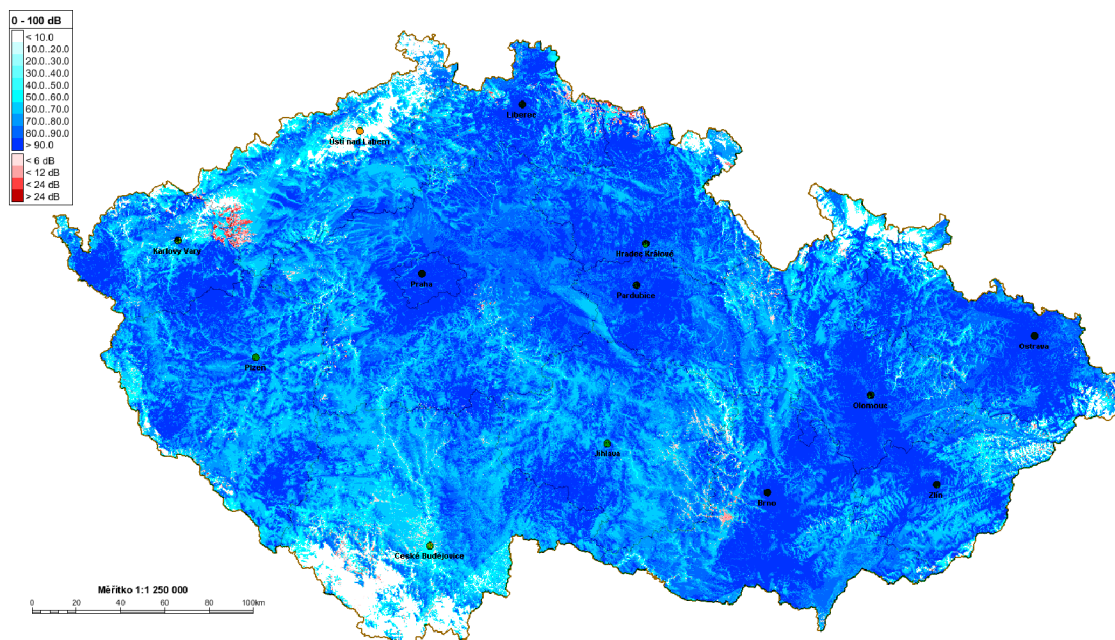
Hlavním parametrem, který v programu *Sítě SFN* ovlivňuje konečný výsledek simulace pokrytí ČR signálem DVB-T2, je tzv. SFN režim přijímače, tj. vybrání způsobu, jakým přijímač vyhodnocuje přichodzí signály vůči ochrannému intervalu.

Prvním režimem je, že se přijímač „zavěsí“ na první signál bez ohledu na jeho intenzitu [34]. Výsledná simulace pokrytí ČR signálem DVB-T2 je na Obr. 30. Lze vidět, že prakticky celé území ČR je pokryté dostatečně silným signálem DVB-T2. Vyskytuje se pouze jedna lokalita poblíž Karlových Varů, kde dochází k rušení.



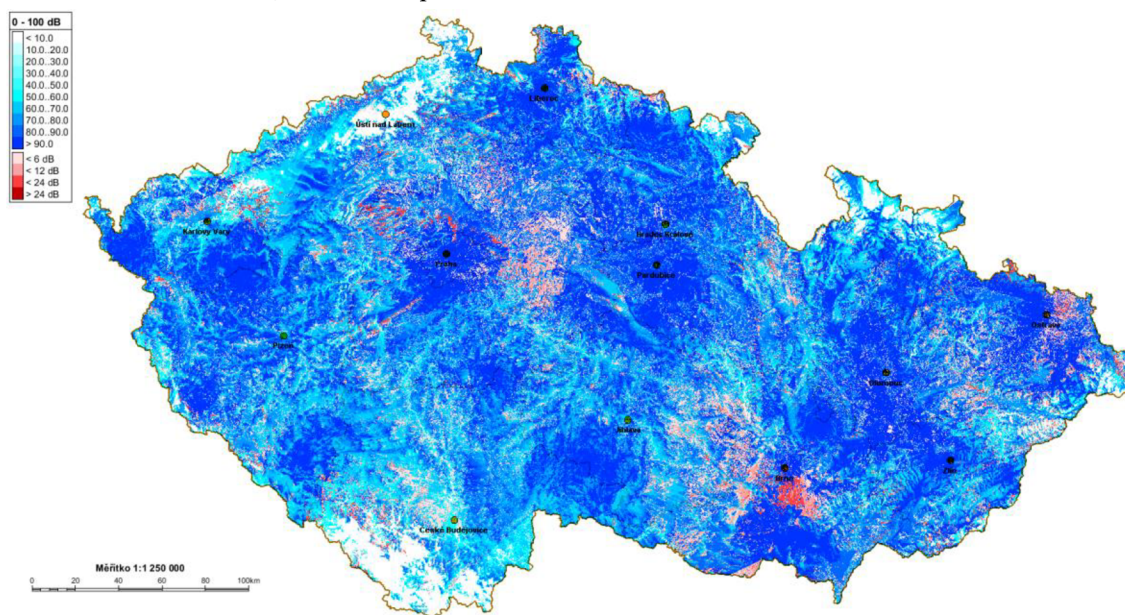
Obr. 30 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: první signál

Dalším režimem z nabídky je, že se přijímač „zavěsí“ na první signál s intenzitou větší než minimální úroveň pro danou SFN [34]. Mapa pokrytí ČR je zobrazena na Obr. 31. Oproti předchozí simulaci přibyla lokalita pod Brnem, kde dochází k rušení.



Obr. 31 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: první signál větší než minimální úroveň

Třetím způsobem vyhodnocení jednotlivých signálů vůči ochrannému intervalu je, že se přijímač „zavěsí“ na nejsilnější signál [34]. Výsledná mapa pokrytí je zobrazena na Obr. 32. Lze vidět, že lokality, kde dochází k rušení, se v tomto případě vyskytují, v menší či větší míře, víceméně po celém území ČR.



Obr. 32 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: nejsilnější signál

Za účelem vybrání lokalit pro analýzu SFN sítě Multiplexu 21 (CH26), byl zvolen SFN režim přijímače, kdy se přijímač „zavěsí“ na nejsilnější signál, viz Obr. 32. Bylo tak učiněno na základě konzultace s ČTÚ, protože v tomto režimu by měly pracovat měřicí přístroje a kvalitnější set-top boxy.

Při výběru míst pro první terénní měření bylo tedy vycházeno z výsledné mapy pokrytí ČR DVB-T2 signálem, kdy se přijímač „zavěsí“ na nejsilnější signál (Obr. 32), a zároveň z map pokrytí DVB-T2 vysílačů, které vizualizují teoretické pokrytí území signálem daného vysílače a Multiplexu 21 [38]. Bylo to z toho důvodu, aby bylo zajištěno, že je na vybraných lokalitách podobná úroveň signálu z daného vysílače a nedošlo tak ke zkreslení výsledků měření.

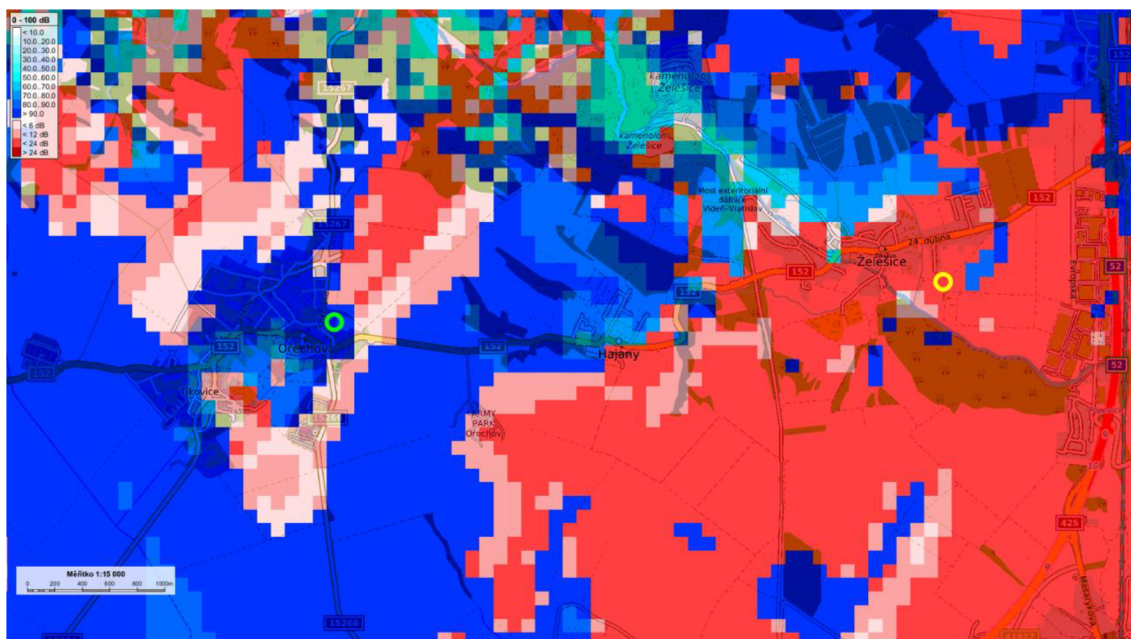
Pro každé měření byla vybrána vždy dvě místa. Jedno místo, které podle simulační analýzy (viz Obr. 32) vykazuje zhoršený příjem signálu DVB-T2 (červená barva) a druhé místo, které má být pokryto dostatečně silným signálem (modrá barva).

4.2.1 1. měření v terénu

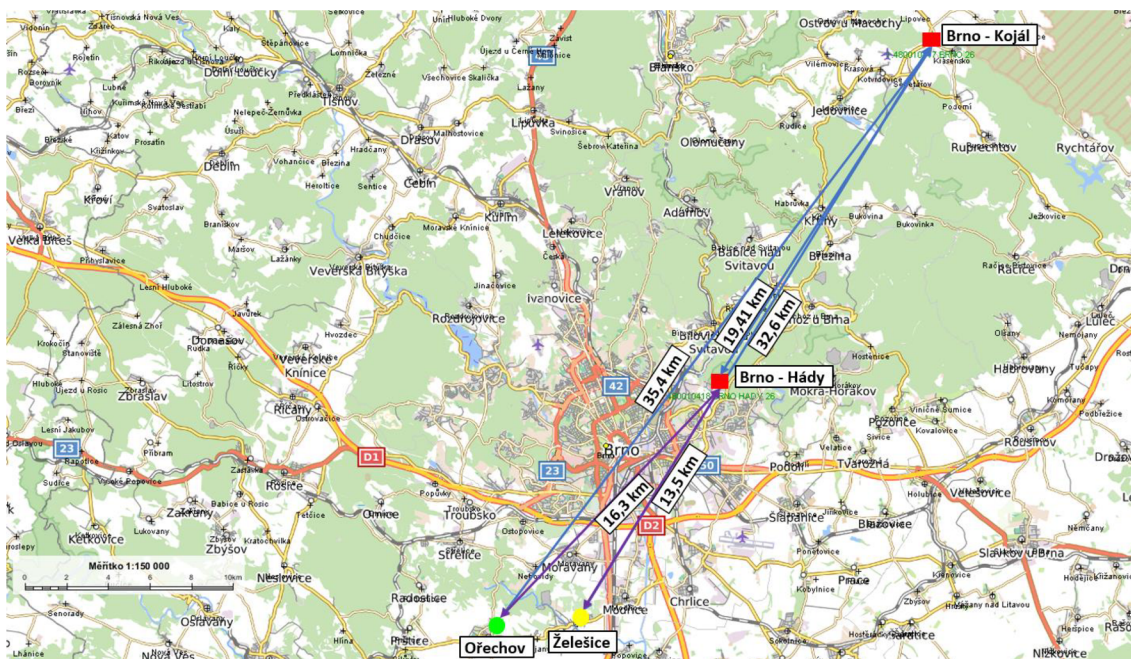
Jako první byla pozornost zaměřena na oblast pod Brnem, kde podle výsledků simulací (Obr. 32) se vyskytují místa, kde dochází k rušení v SFN síti Multiplexu 21 (CH26).

Místo s nerušeným a dostatečně silným signálem DVB-T2 bylo vybráno v obci Ořechov (zelený kroužek) a místo, kde dochází k rušení, bylo vybráno v obci Želešice (žlutý kroužek). Místa, kde byla provedena měření, jsou znázorněna na Obr. 33.

Poloha vysílače Brno – Kojál a jeho vzdálenost vůči vybraným bodům je zobrazena na Obr. 34. Obě měřicí místa byla porovnávána vzhledem k vysílači Brno – Kojál při stejné úrovni signálu.



Obr. 33 Zvolené měřicí body pro první terénní měření



Obr. 34 Pozice vysílačů a měřících bodů a vzdálenosti mezi nimi – první terénní měření

Tab. 7 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru – první terénní měření

	Ořechov	Želešice
Level [dBμV]	68,8	68,4
MER před dekódováním [dB]	30,9	25,1
MER po dekódování [dB]	32,3	29,7
BER před LDPC dekódováním [-]	4,9E-4	7,2E-3
LDPC iterace [-]	2,84	4,84

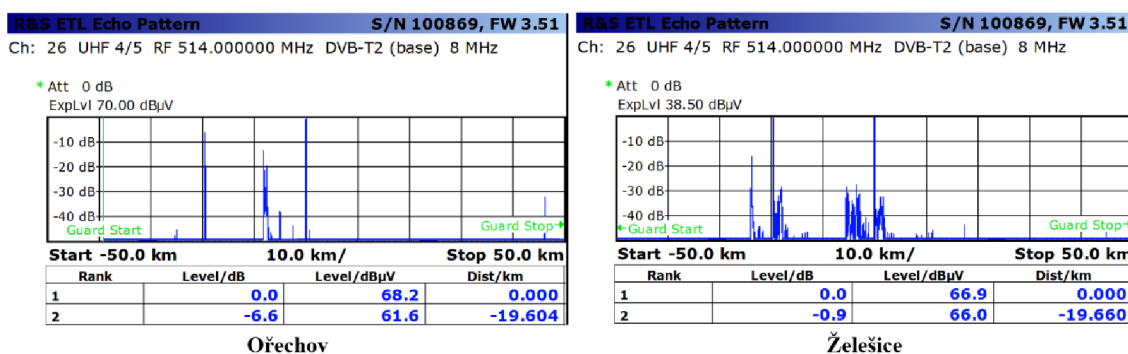
Tab. 8 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů – první terénní měření

	Ořechov		Želešice	
	Sencor	EMOS	Sencor	EMOS
Síla signálu [%]	100	99	93	86
Kvalita signálu [%]	100	100	100	100

Při analýze DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru byla v Ořechově naměřena hodnota MER před dekódováním 30,9 dB a v Želešicích byla naměřena hodnota 25,1 dB, což je o 5,8 dB méně než v místě, které má být podle simulace pokryto dostatečně silným signálem. Stejný trend potvrdila i hodnota BER před LDPC dekódováním, viz Tab. 7. Při analýze signálu pomocí přístroje RANGER NEO 4 bylo dosaženo velmi podobných výsledků. Největší rozdíl byl zaznamenán v hodnotě MER před dekódováním v Želešicích, kdy bylo dosaženo pouze hodnoty 21,3 dB.

V Tab. 8 jsou zaznamenány hodnoty síly a kvality signálu, které byly měřeny pomocí set-top boxu Sencor a EMOS po dobu 10 minut. U obou set-top boxů se hodnoty blížily ke 100 %, pouze v Želešicích u set-top boxu EMOS klesla síla signálu na 86 %, ale vliv na kvalitu obrazu byl nepozorovatelný. I v místě, kde se má podle simulační analýzy vyskytovat rušení, byl přijímaný obraz v pořádku, nesekal se, ani nevypádal.

Echo pro obě měřicí místa je zobrazeno na Obr. 35. Lze vidět, že v Želešicích bylo kromě referenčního signálu přijímáno i několik odrazů. V obou případech se v pre-echu vyskytuje vysílač Brno – Hády. Je to z toho důvodu, že jsou oba vysílače stejným směrem od zvolených měřicích míst. Vzdálenost 19,6 km (Obr. 35) odpovídá vzdálenosti mezi vysílačem Brno – Kojál a vysílačem Brno – Hády, viz Obr. 34. Ačkoli je vysílač Brno – Hády mnohem blíže k vybraným místům, tak přijímače se „zavěsí“ na signál z vysílače Brno – Kojál. To lze vysvětlit tím, že vysílač Brno – Kojál má desetkrát větší výkon než vysílač Hády, viz Tab. 5. Dále lze vidět, že v Želešicích je rozdíl mezi nejsilnějším a druhým nejsilnějším signálem pouze 0,9 dB, což vede k tomu, že se vysílače mezi sebou ovlivňují, a to má za následek zvýšenou hodnotu MER.



Obr. 35 Echo vybraných míst – první terénní měření

Při analýze Echa pomocí měřicího přístroje RANGER NEO 4 bylo zaznamenáno přeskakování přijímače mezi vysílačem Brno – Kojál a vysílačem Brno – Hády. „Zavěšení“ přijímače na vysílač Brno – Kojál je na Obr. 36 a) a „zavěšení“ přijímače na vysílač Brno – Hády je na Obr. 36 b). Tento jev může být problémem pro méně kvalitní set-top boxy, které takto přeskakují z jednoho vysílače na druhý a dochází k degradaci výsledného obrazu.

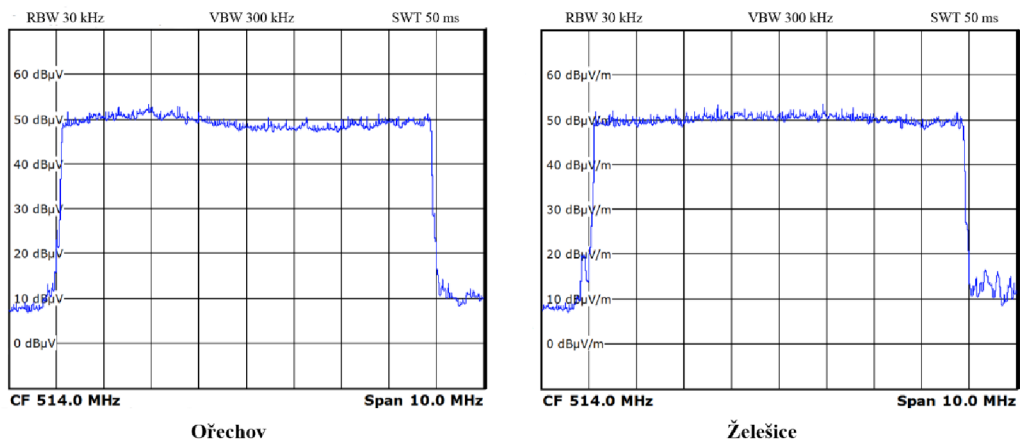


a) „Zavěšení“ přijímače na vysílač Brno – Kojál

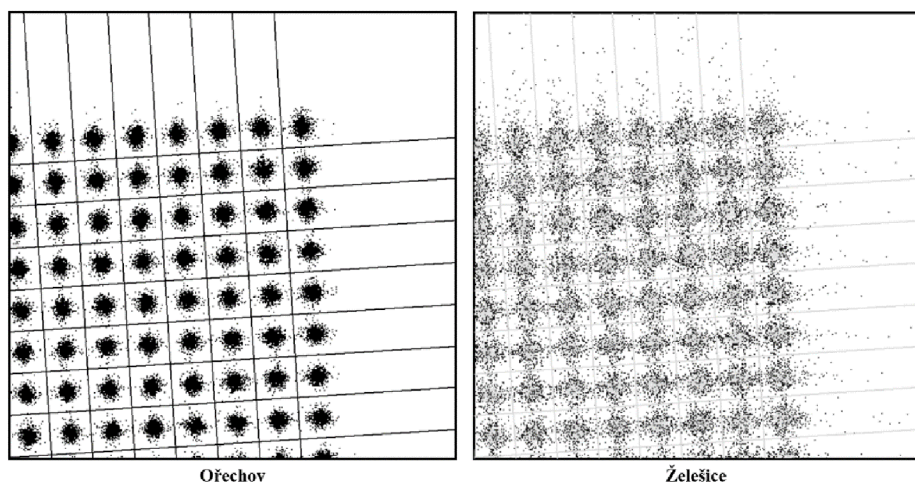
b) „Zavěšení“ přijímače na vysílač Brno – Hády

Obr. 36 Přeskakování přijímače mezi vysílači s blízkou úrovní signálu – RANGER NEO 4

Tvary RF spektra v Ořechově a Želešicích jsou zobrazeny na Obr. 37 a konstelační diagramy 256-QAM pro první kvadrant jsou zaznamenány na Obr. 38. Lze vidět, že konstelační diagram v Želešicích je značně zašuměný.



Obr. 37 RF spektra vybraných míst – první terénní měření

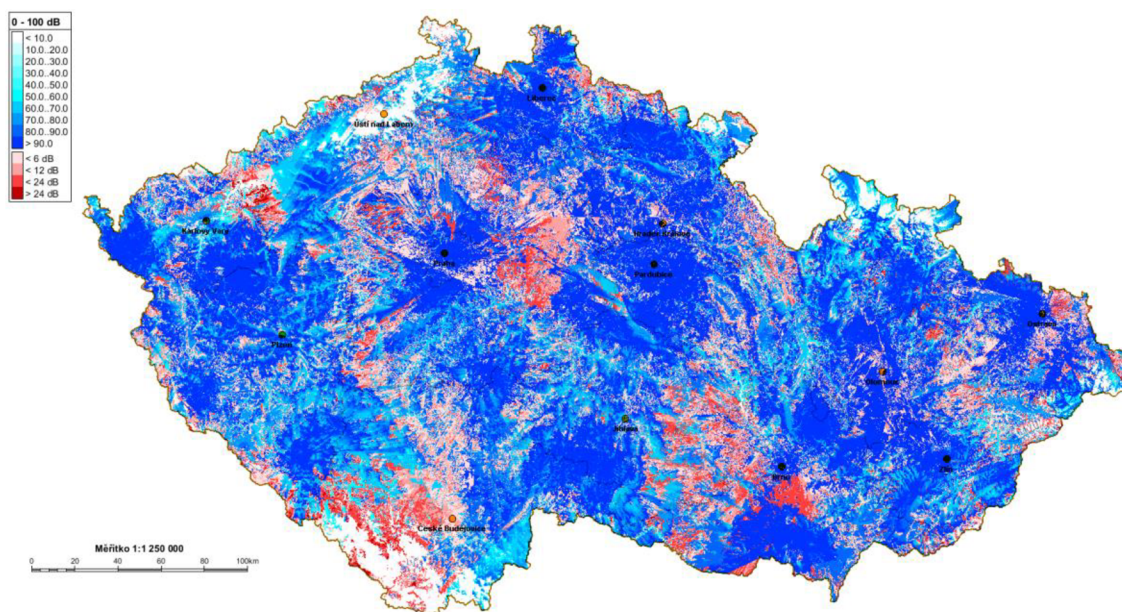


Obr. 38 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant – první terénní měření

4.2.2 2. měření v terénu

V dalším měření byla pozornost opět zaměřena na oblast pod Brnem. Byla provedena nová simulační analýza, s tím rozdílem, že byla použita nově implementovaná funkce v programu *Sítě SFN*. Tou funkcí je rozšířený výpočet samorušení. Tato funkce je zaměřena na zahrnutí samorušení u rozsáhlých SFN, kde může dojít k rušení na velkou vzdálenost. Podmínkami pro rušení na velkou vzdálenost jsou přímá viditelnost a dostatečný výkon. SFN síť Multiplexu 21 (CH26) tyto podmínky splňuje, a proto byla pro další měření využita simulační analýza, která zahrnuje rozšířený výpočet samorušení.

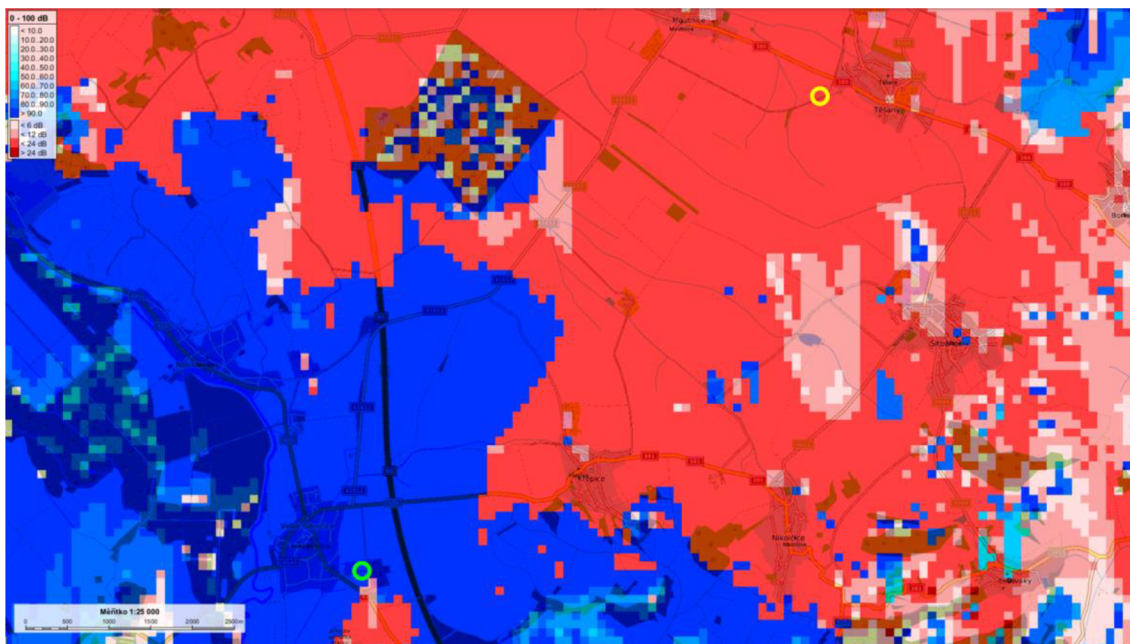
Výsledná mapa pokrytí ČR DVB-T2 signálem s rozšířeným výpočet samorušení je znázorněna na Obr. 39. Je zřejmé, že oproti mapě pokrytí bez rozšířeného výpočtu samorušení (viz Obr. 32) došlo k zřetelnému zhoršení pokrytí v rámci celého území.



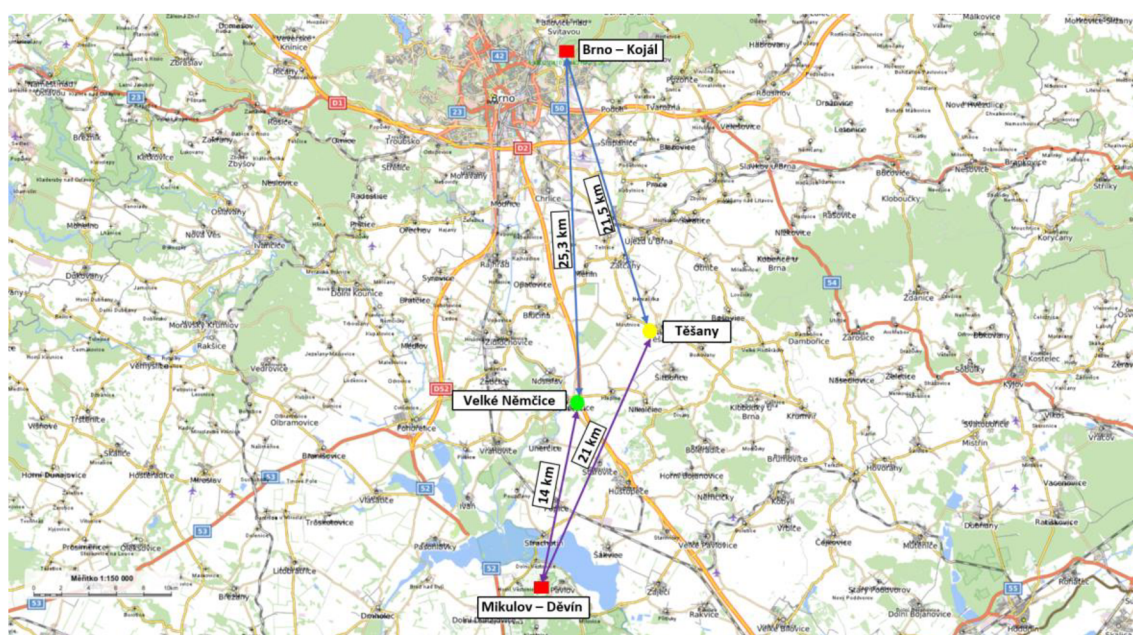
Obr. 39 Pokrytí ČR DVB-T2 signálem, SFN režim přijímače: nejsilnější signál, rozšířený výpočet samorušení

Na základě nové mapy pokrytí (Obr. 39) byla opět vybrána dvě místa. Místo s rušením bylo vybíráno z možných lokalit tak, aby se neshodovalo s lokalitami v předchozí simulaci (Obr. 32) a aby bylo možné ověřit výstupy simulační analýzy s rozšířeným výpočet samorušení SFN sítě. Místo s nerušeným a dostatečně silným signálem bylo vybráno ve Velkých Němčicích (zelený kroužek) a místo, kde má docházet k rušení bylo vybráno v obci Těšany (žlutý kroužek). Přesné polohy, kde probíhala měření, jsou zaznamenány na Obr. 40.

Poloha vysílače Brno – Kojál a vysílače Mikulov – Děvín a jejich vzdálenosti vůči měřícím bodům jsou znázorněny na Obr. 41. Obě zvolená místa byla postupně porovnávána vzhledem k vysílači Brno – Kojál a poté vzhledem k vysílači Mikulov – Děvín při stejné úrovni signálu.



Obr. 40 Zvolené měřicí body pro druhé terénní měření



Obr. 41 Pozice vysílačů a měřících bodů a vzdálenosti mezi nimi – druhé terénní měření

Vysílač Brno – Kojál

Tab. 9 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření

	Velké Němčice	Těšany
Level [dBμV]	60,4	61
MER před dekódováním [dB]	27,6	27,4
MER po dekódování [dB]	28,6	28,3
BER před LDPC dekódováním [-]	3,9E-3	2,5E-3
LDPC iterace [-]	3,29	3,02

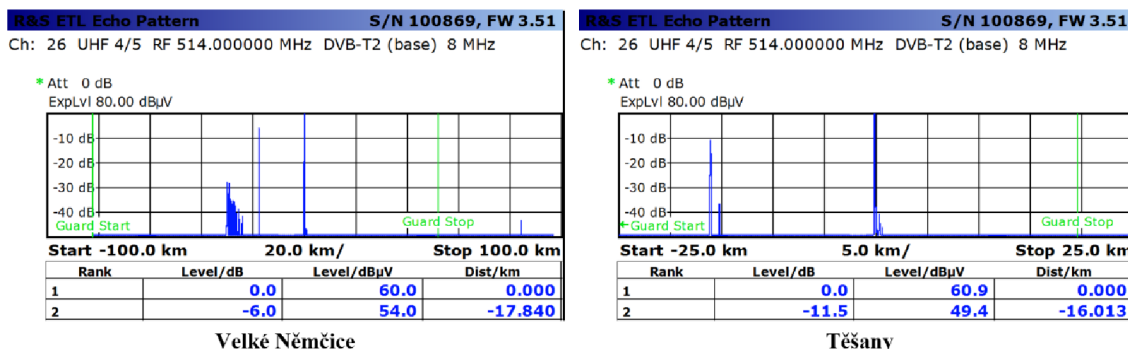
Tab. 10 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření

	Velké Němčice		Těšany	
	Sencor	EMOS	Sencor	EMOS
Síla signálu [%]	100	97	95	92
Kvalita signálu [%]	100	100	100	100

První měření bylo provedeno při nasměrování antény směrem k vysílači Brno – Kojál, viz Obr. 41. Opět, jako první, byly změřeny parametry DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru. Hodnota MER před dekódováním byla naměřena ve Velkých Němčicích 27,6 dB a Těšanech 27,4 dB, rozdíl hodnoty MER mezi jednotlivými místy je minimální. Stejně tak hodnota BER před LDPC dekódováním byla naměřena na obou místech podobná, viz Tab. 9. I přesto, že podle simulační analýzy (Obr. 39) nemá být měřící místo v Těšanech pokryto nerušeným signálem, byly zde naměřeny velmi podobné hodnoty MER i BER jako na měřícím místě ve Velkých Němčicích, které má být pokryto dostatečně silným, nerušeným signálem DVB-T2.

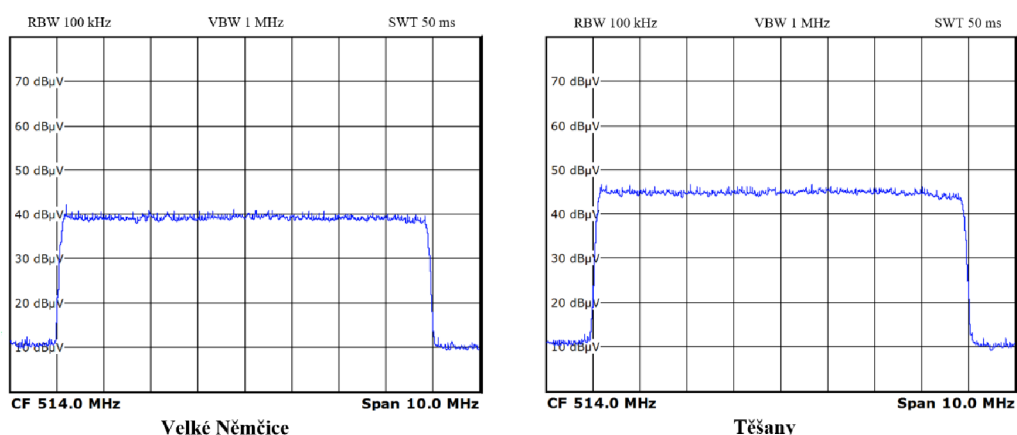
Výsledky z měření pomocí jednotlivých set-top boxů jsou zaznamenány v Tab. 10. Na obou místech set-top boxy vykazovaly hodnoty síly a kvality signálu blížící se 100 %. Tudíž i v Těšanech, kde se mělo objevovat rušení byl možný kvalitní příjem DVB-T2 signálu.

Na Obr. 42 je zaznamenáno Echo pro obě měřící místa. Můžeme pozorovat, že u obou míst se v pre-echu vyskytují další signály, ale odstup od nejsilnějšího signálu je dostatečně velký a nedochází k vzájemnému ovlivňování.

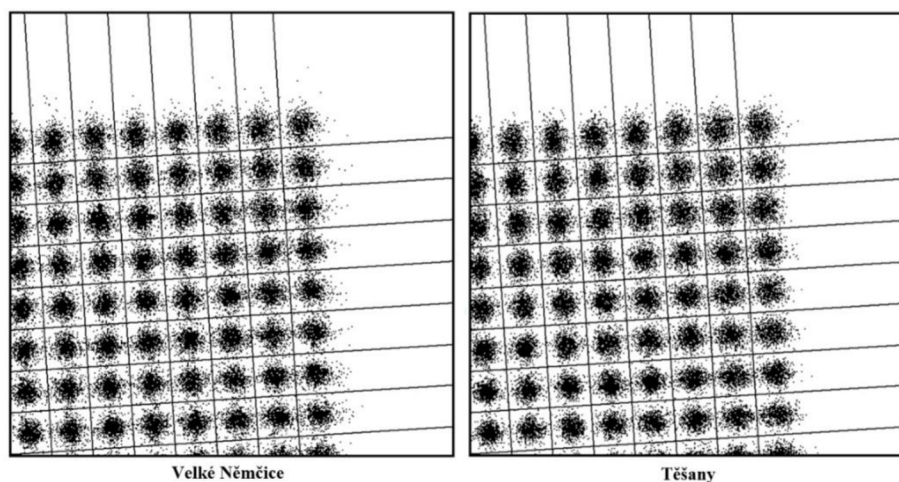


Obr. 42 Echo vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření

Na Obr. 43 jsou zaznamenány tvary RF spektra ve Velkých Němčicích a v Těšanech a na Obr. 44 je změřený první kvadrant konstelačních diagramů 256-QAM. V obou případech lze vidět, že odstup signálu od šumu je dostatečně velký. Dokonce v Těšanech, kde by měl být horší příjem signálu DVB-T2, je odstup signálu od šumu větší než v místě, kde má být nerušený příjem signálu podle simulační analýzy.



Obr. 43 RF spektra vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření



Obr. 44 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Brno-Kojál – druhé terénní měření

Vysílač Mikulov – Děvín

Tab. 11 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření

	Velké Němčice	Těšany
Level [dBμV]	60,4	60,2
MER před dekódováním [dB]	29	28,5
MER po dekódování [dB]	30,3	29,5
BER před LDPC dekódováním [-]	1,9E-4	1,1E-3
LDPC iterace [-]	2,07	2,68

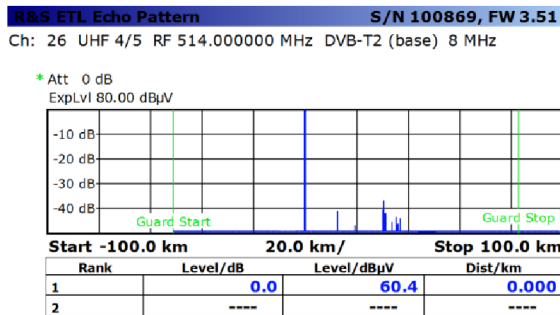
Tab. 12 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření

	Velké Němčice		Těšany	
	Sencor	EMOS	Sencor	EMOS
Síla signálu [%]	100	98	97	95
Kvalita signálu [%]	100	100	100	100

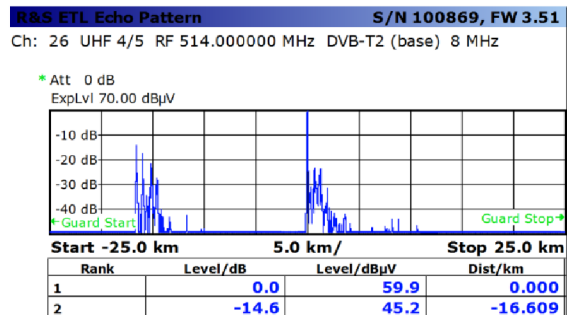
Pro další měření byla anténa nasměrována směrem na vysílač Mikulov – Děvín (Obr. 41). Hodnoty MER na obou místech vycházely velmi podobně, hodnota BER byla v Těšanech změřena o řád vyšší než ve Velkých Němčicích, viz Tab. 11. Opět nebyly zjištěny nějaké velké rozdíly mezi jednotlivými místy. Ačkoli měřící místo v Těšanech je přibližně stejně vzdálené jak od vysílače Brno – Kojál, tak od vysílače Mikulov – Děvín, a přesto, že vysílač Brno – Kojál má čtyřikrát vyšší výkon než vysílač Mikulov – Děvín, tak bylo dosaženo mírně lepších výsledků při přijímání signálu DVB-T2 z vysílače Mikulov – Děvín.

V Tab. 12 jsou naměřené hodnoty pomocí set-top boxů. Opět se potvrzuje trend z předchozích měření.

Echo vybraných míst je na Obr. 45. Lze vidět, že v Těšanech se objevuje i několik odražených signálů. Je to pravděpodobně způsobeno překážkami v cestě signálu (např. kopce). RF spektra a první kvadrant konstelačních diagramů 256-QAM jsou zobrazeny na Obr. 46 a Obr. 47.

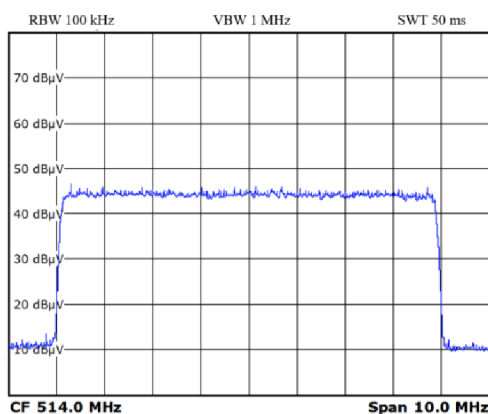


Velké Němčice

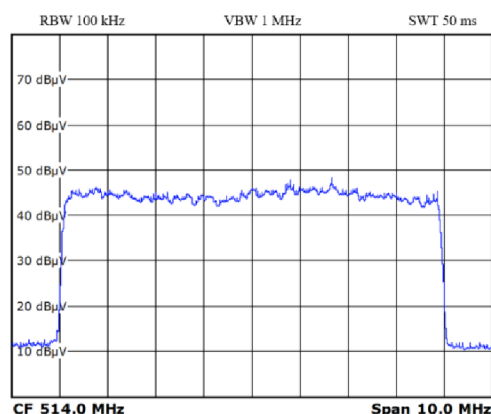


Těšany

Obr. 45 Echo vybraných míst, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření

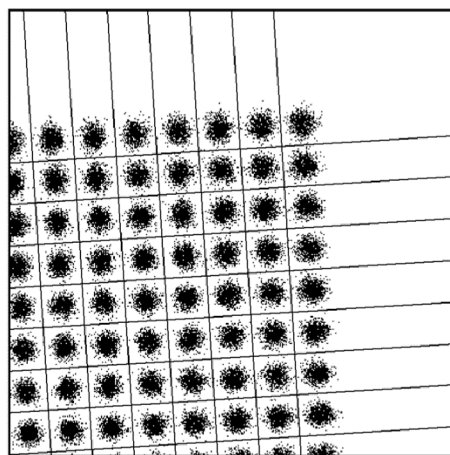


Velké Němčice

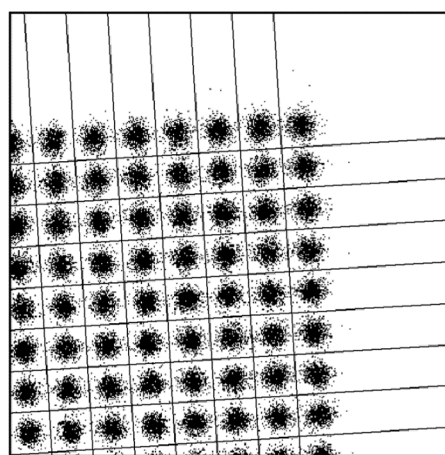


Těšany

Obr. 46 RF spektra vybraných míst, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření



Velké Němčice



Těšany

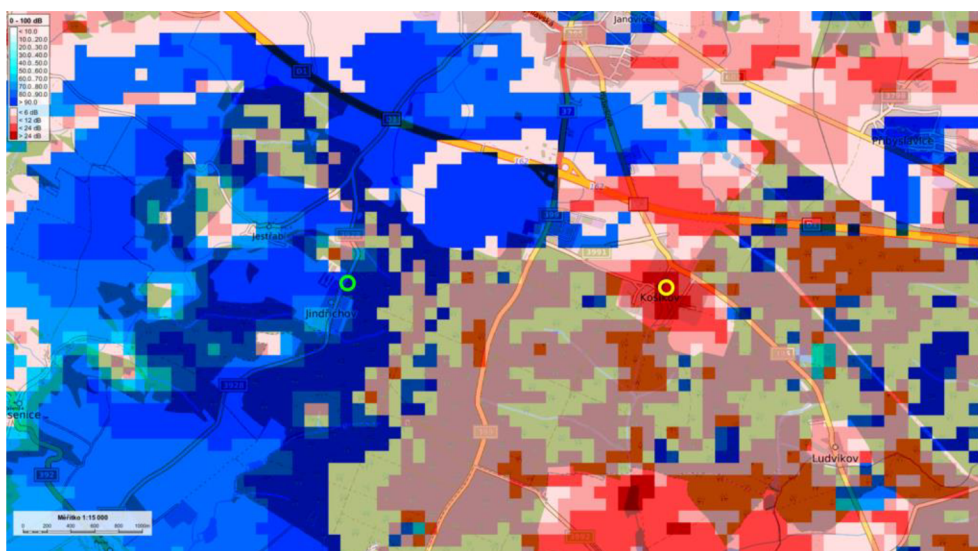
Obr. 47 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Mikulov-Děvín – druhé terénní měření

4.2.3 3. měření v terénu

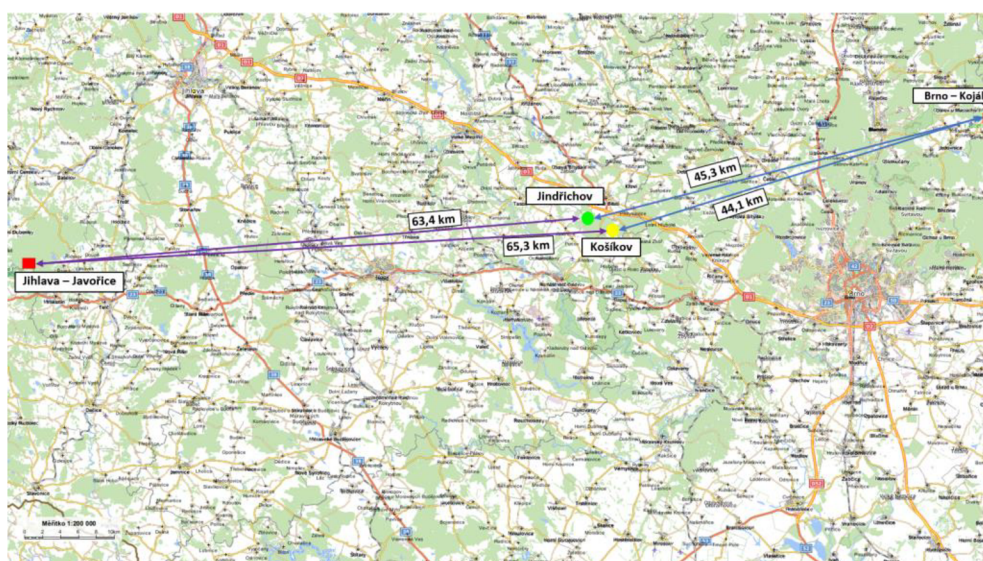
V posledním měření byla pozornost zaměřena na oblast mezi vysílačem Brno – Kojál a vysílačem Jihlava – Javořice. V tomto měření bylo opět vycházeno ze simulační analýzy s implementovanou funkcí rozšířeného výpočtu samorušení, viz Obr. 39.

Opět byla vybrána dvě místa, jedno s dostatečně silným signálem DVB-T2 a druhé s rušením signálu DVB-T2. Místo v Jindřichově bylo vybráno jako místo s dostatečně silným signálem (zelený kroužek) a místo v Košíkově jako místo, kde se vyskytuje rušení (žlutý kroužek), viz Obr. 48.

V tomto měření byla obě měřící místa porovnávána vzhledem k vysílači Brno – Kojál a poté vzhledem k vysílači Jihlava – Javořice při stejné úrovni signálu. Pozice vysílačů a jejich vzdálenosti od jednotlivých měřících míst jsou na Obr. 49.



Obr. 48 Zvolené měřící body pro třetí terénní měření



Obr. 49 Pozice vysílačů a měřících bodů a vzdálenosti mezi nimi – třetí terénní měření

Vysílač Brno – Kojál

Tab. 13 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření

	Jindřichov	Košíkov
Level [dBμV]	60,5	59,8
MER před dekódováním [dB]	25,6	27,5
MER po dekódování [dB]	28,8	28,9
BER před LDPC dekódováním [-]	5,1E-3	2,4E-3
LDPC iterace [-]	3,73	3,15

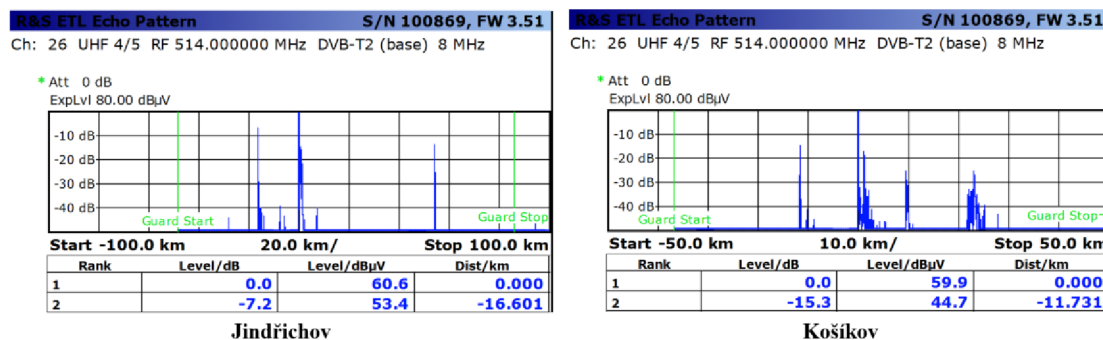
Tab. 14 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření

	Jindřichov		Košíkov	
	Sencor	EMOS	Sencor	EMOS
Síla signálu [%]	90	88	98	96
Kvalita signálu [%]	100	100	100	100

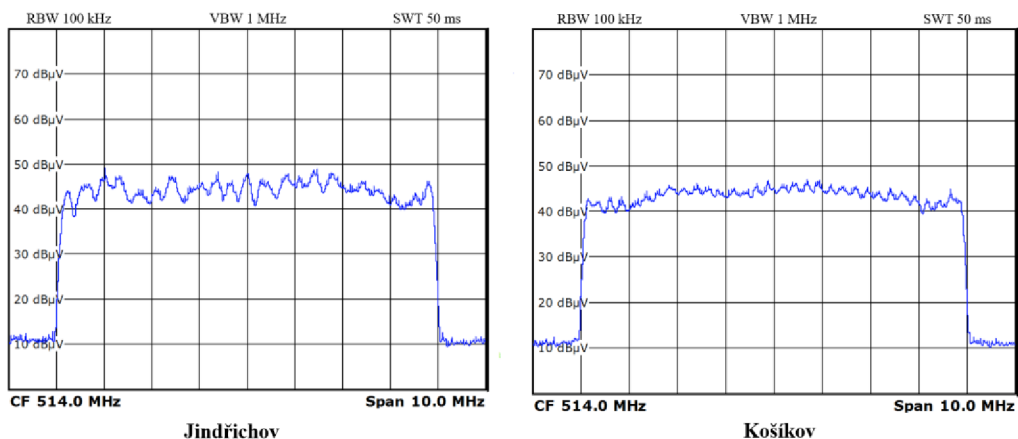
Jako první byl opět měřen signál DVB-T2 z vysílače Brno – Kojál. Hodnota MER před dekódováním byla v Jindřichově naměřena 25,6 dB a v Košíkově 27,5 dB. Hodnoty MER vyšly obráceně, než by se dalo předpokládat na základě simulační analýzy. Stejně tak hodnoty BER před LDPC dekódováním lépe v Košíkově, viz Tab. 13.

Vyhodnocení na základě příjmu signálu DVB-T2 pomocí set-top boxů je zaznamenáno v Tab. 14 V Jindřichově klesla síla signálu u set-top boxu Sencor na hodnotu 90 % a set-top boxu EMOS na 88 %.

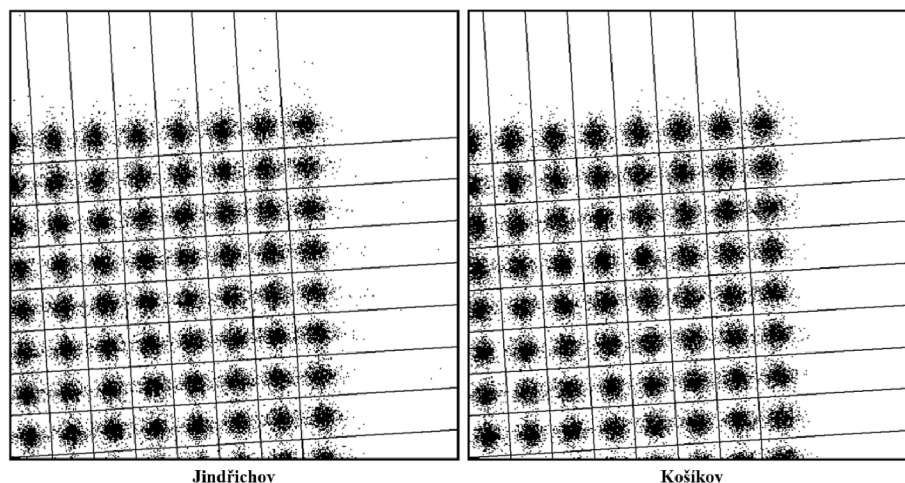
Echo obou míst je na Obr. 50. Lze vidět, že u obou míst se v ochranném intervalu objevují další signály, odrazy. S tím souvisí i výsledné tvary RF spektra (Obr. 51), kdy zejména v Jindřichově jsou vidět úniky ve spektru. První kvadranty konstelačních diagramů 256-QAM jsou zobrazeny na Obr. 52.



Obr. 50 Echo vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření



Obr. 51 RF spektra vybraných míst, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření



Obr. 52 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Brno-Kojál – třetí terénní měření

Vysílač Jihlava – Javořice

Tab. 15 Naměřené hodnoty parametrů DVB-T2 signálu pomocí ETL TV analyzátoru, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření

	Jindřichov	Košíkov
Level [dBμV]	61,5	61,4
MER před dekódováním [dB]	30,4	26,4
MER po dekódování [dB]	31,3	28,9
BER před LDPC dekódováním [-]	4E-5	5,5E-3
LDPC iterace [-]	1,93	3,73

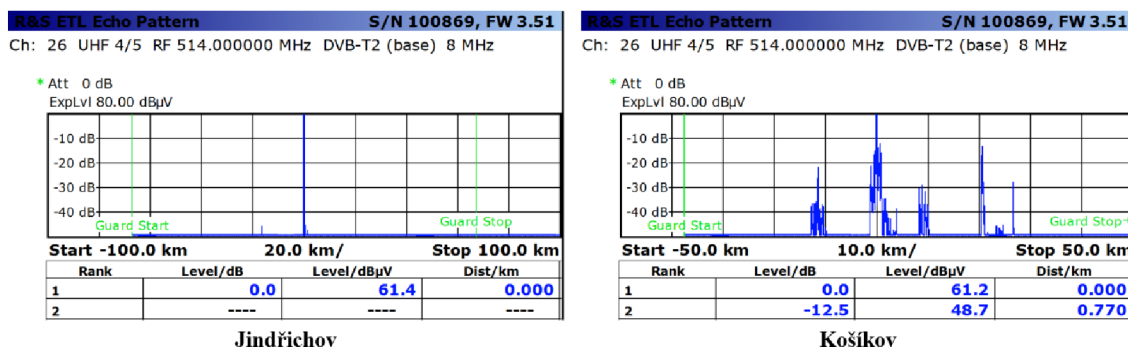
Tab. 16 Naměřené hodnoty pomocí set-top boxů, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření

	Jindřichov		Košíkov	
	Sencor	EMOS	Sencor	EMOS
Síla signálu [%]	99	96	94	90
Kvalita signálu [%]	100	100	100	100

Pro další měření byla anténa nasměrována směrem na vysílač Jihlava – Javořice (Obr. 49). V Jindřichově byla naměřena hodnota MER před dekódováním 30,4 dB a v Košíkově 26,4 dB. BER před LDPC dekódováním vyšla v Jindřichově o dva řády nižší než v Košíkově, viz Tab. 15. Na základě těchto parametrů lze říct, že při příjmu signálu z vysílače Jihlava – Javořice se místo v Jindřichově jeví jako místo s lepším příjmem DVB-T2 signálu než místo v Košíkově.

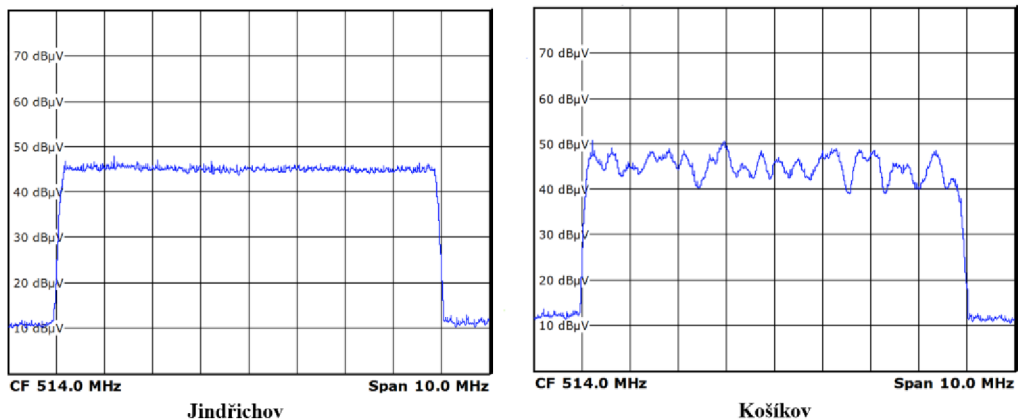
Zjištěné parametry signálu pomocí set-top boxů jsou zaznamenány v Tab. 16. Oba set-top boxy na obou místech dosahují téměř 100 % jak u síly signálu, tak u kvality signálu.

Echo z Jindřichova a z Košíkova je znázorněno na Obr. 53. Lze vidět, že v Jindřichově je přijímán prakticky pouze jeden signál z vysílače Jihlava – Javořice, zatímco v Košíkově je Echo plné různých signálů. To, co lze vidět v echu potvrzuje tvar RF spektra jednotlivých míst, viz Obr. 54. Zatímco v Jindřichově jsou úniky minimální, téměř žádné, tak v Košíkově lze vidět velké úniky ve spektru.

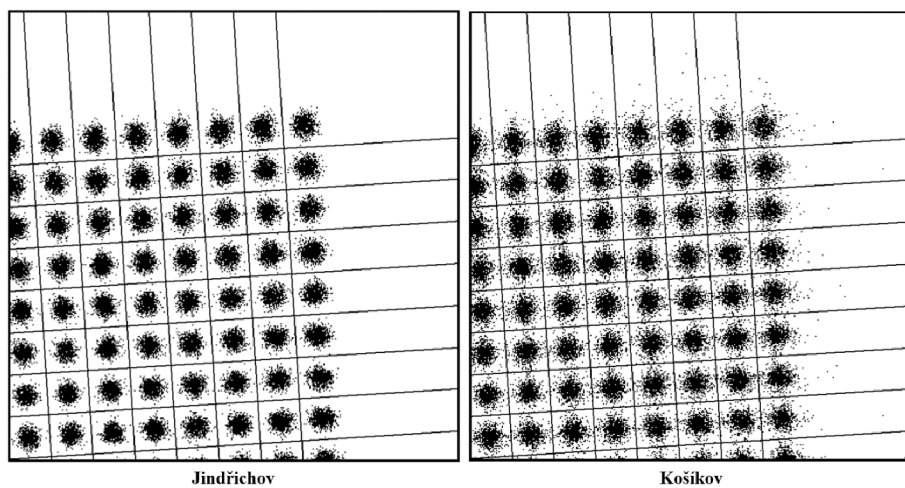


Obr. 53 Echo vybraných míst, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření

První kvadranty změřených konstelačních diagramů 256-QAM jsou znázorněny na Obr. 55. Lze vidět, že konstelační diagram pro Košíkov je více zašuměný než konstelační diagram pro Jindřichov.



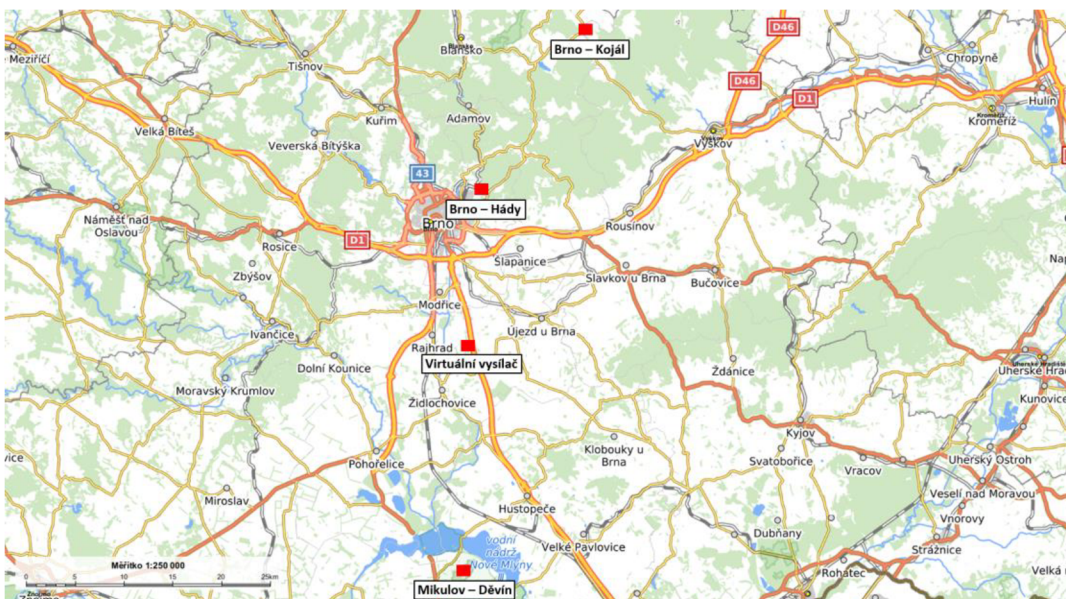
Obr. 54 RF spektra vybraných míst, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření



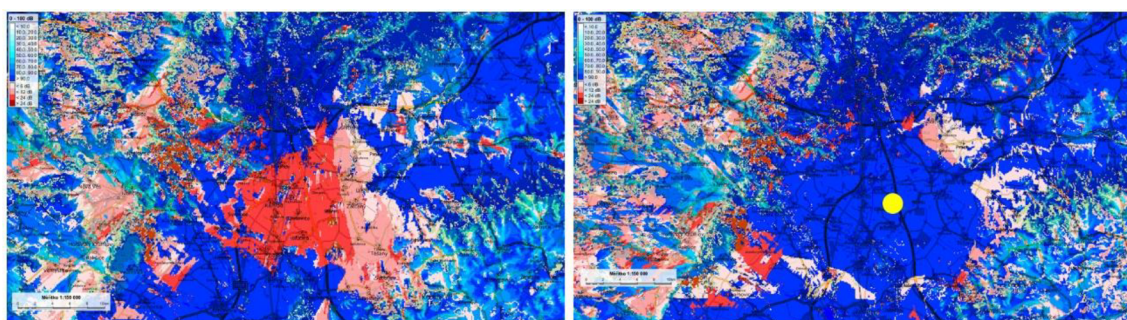
Obr. 55 Konstelační diagramy 256-QAM, první kvadrant, vysílač Jihlava-Javořice – třetí terénní měření

4.3 Potenciální zlepšení výkonnosti SFN sítě Multiplexu 21

Jednou z možností, jak dosáhnout lepšího pokrytí DVB-T2 signálem, je přidání dokrývacích vysílačů do problémových míst. Program *Sítě SFN* umožňuje vytvořit virtuální vysílač a zadat mu jakoukoli pozici a parametry. Pozornost byla zaměřena na oblast pod Brnem. Umístění virtuálního vysílače je zobrazeno na Obr. 56. Pro vysílač byla zvolena výška 40 m, výkon 10 kW a pracovní frekvence 514 MHz. Nižší výkon nedokázal zaručit pokrytí téměř celého problematického místa. Porovnání pokrytí bez virtuálního vysílače a s ním je na Obr. 57. Je patrné, že přidáním nového vysílače dojde ke zlepšení pokrytí signálem DVB-T2, ale výstavba nového vysílače je ekonomicky náročná a bylo by třeba zkoordinovat kmitočty s dalšími vysílači v okolí.



Obr. 56 Umístění vytvořeného vysílače



Bez virtuálního vysílače

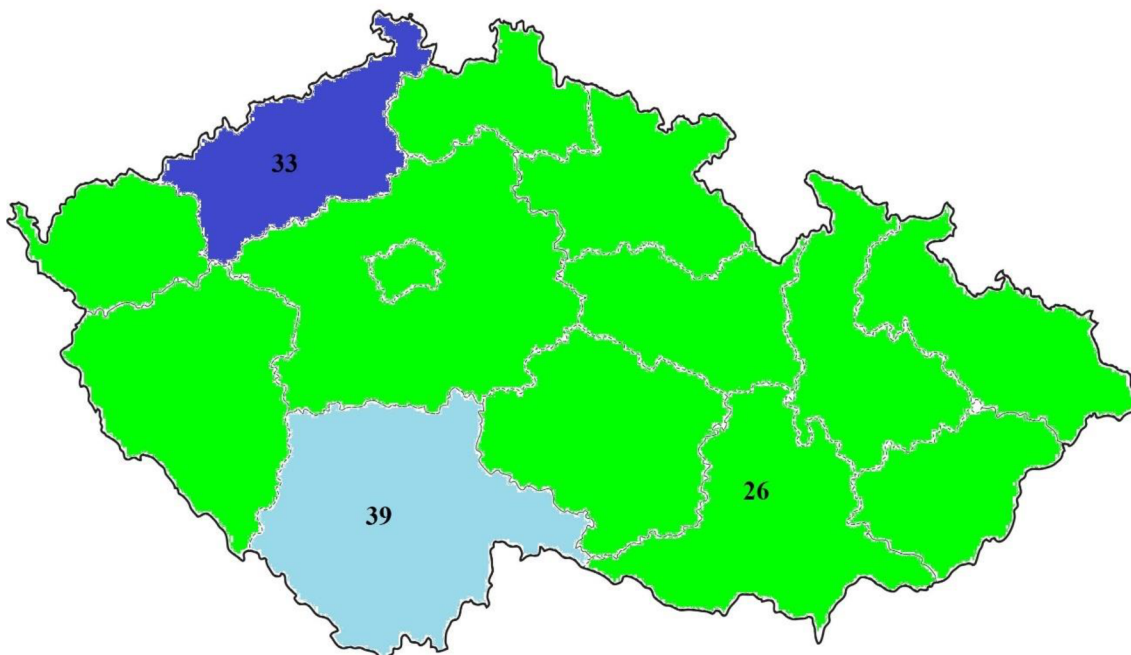
S virtuálním vysílačem

Obr. 57 Rozdíl v pokrytí při použití vytvořeného vysílače

Informace, kde se nacházejí jednotlivé vysílače v rámci kraje a kde jsou dokrývací vysílače se dá najít v [41]. Je zajímavé, že některé dokrývací vysílače nejsou provozované

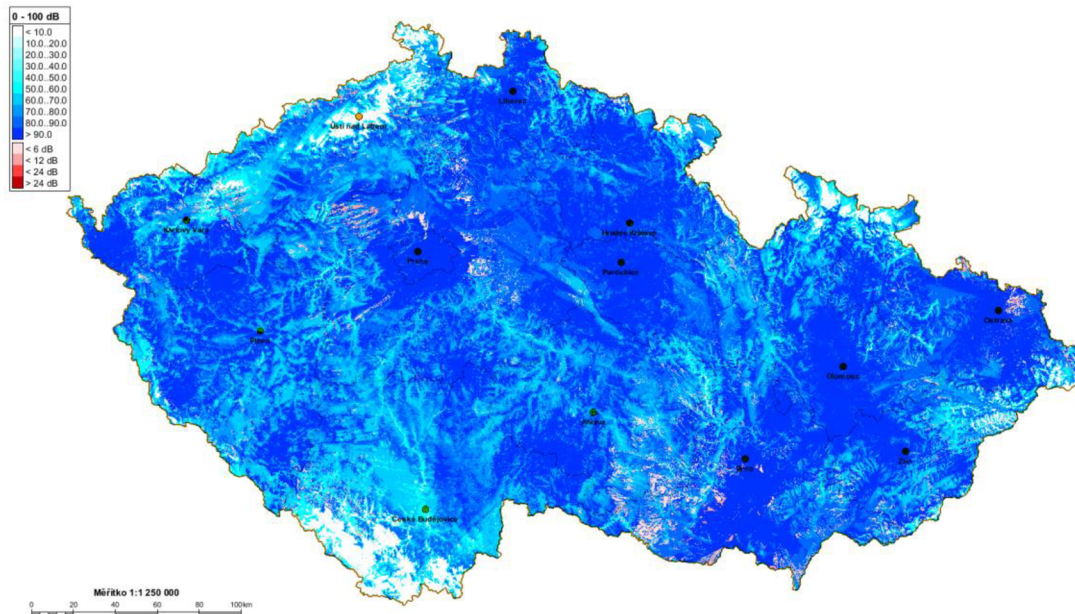
na stejné frekvenci jako zbytek SFN sítě, ale jsou provozovány na jiných kmitočtech zkoordinovaných pro danou lokalitu.

Dalším možným způsobem by mohlo být přidělení dalších kmitočtů Multiplexu 21. Jak je vidět na Obr. 58, tak jsou Multiplexu 21 přiřazeny pouze 3 kmitočty, přičemž kmitočet 514 MHz (CH26) se rozprostírá prakticky přes celé území České republiky. Řešením by tedy mohlo být rozdělení rozsáhlé SFN sítě do menších SFN sítí. Ale opět se pohybujeme pouze v teoretické rovině, takovéto rozdělení by vyžadovalo koordinaci frekvencí nejen s dalšími multiplexy, ale také se sousedními státy.



Obr. 58 Rozdělení Multiplexu 21 podle kanálů

Dále by bylo možné zlepšit pokrytí ČR DVB-T2 signálem například zvolením robustnější modulace, než je 256-QAM, ale tím by došlo k omezení datové propustnosti, což znamená méně televizních programů, což není ekonomicky výhodné. Výsledné pokrytí ČR signálem DVB-T2 při změně modulace z 256-QAM na 64-QAM je zobrazena na Obr. 59. Ostatní parametry zůstaly nezměněné, viz Tab. 4. Lze vidět, že oproti pokrytí s použitím modulace 256-QAM (viz Obr. 32) došlo s robustnější modulací k velkému snížení výskytu rušení signálu DVB-T2 v rámci celé ČR.



Obr. 59 Pokrytí ČR signálem DVB-T2, Multiplex 21 (CH26), GI 1/8, OFDM mód 32K Extended, modulace 64-QAM, kódový poměr 2/3

Dalšími problémy, které se mohou vyskytnout v souvislosti s příjmem signálu DVB-T2 nemusí být na straně konfigurace SFN sítě, ale na straně uživatele. Nekvalitní přijímače si nedokáží poradit se signály, které mají podobnou úroveň a přeskakují z jednoho na druhý. Kvalitní přijímač si vybere silnější signál, na ten se „zavěsí“ a ten dále zpracovává.

Další problém může nastat na panelových domech a jejich televizních rozvodech, kde může dojít k utlumení signálu a ten pak přijímač nedokáže zpracovat.

5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prostudovat problematiku návrhu jednofrekvenčních sítí SFN vysílačů pro zemské digitální vysílání druhé generace DVB-T2. Pozornost byla zaměřena na seznámení se základní problematikou, příslušným softwarem a následně vyzkoušení softwaru na ověření už existující SFN sítě. Dále byla provedena komplexní analýza SFN sítě Multiplexu 21 (CH26) ve spolupráci s ČTÚ.

V úvodních kapitolách je popsán standard pro digitální pozemní vysílání druhé generace DVB-T2. Dále je detailně popsána problematika SFN sítí. Následně jsou popsány jednotlivé programy firmy CRC data pro návrh vysílacích sítí, jmenovitě RadioLab, RadioBase a Sítě SFN.

V praktické části této práce, pro seznámení se softwarem pro návrh SFN sítí, byla provedena jednoduchá analýza pokrytí ČR signálem DVB-T2 již existující SFN sítě. Pozornost byla zaměřena na veřejnoprávní Multiplex 21 (CH26). Jedná se o nejrozsáhlejší SFN síť v ČR. Byla provedena základní analýza této SFN sítě s parametry, které se používají ve vysílání DVB-T2. Poté byly provedeny další simulace, kdy byl měněn ochranný interval. Výstupy z těchto analýz byly mapy pokrytí signálem DVB-T2 v České republice, mapy vysílačů, které se vzájemně ovlivňují a časování SFN. V jednotlivých simulacích byl primárně měněn ochranný interval. Při změně délky trvání ochranného intervalu ze 448 μ s na 28 μ s došlo k rapidnímu zhoršení pokrytí ČR signálem DVB-T2. Je to z toho důvodu, že GI, který má zamezit ovlivňování signálů z jednotlivých vysílačů, trval krátkou dobu a signály přicházely s větším zpožděním než je GI. Poté byla provedena komplexní analýza SFN sítě Multiplexu 21 (CH26) ve spolupráci s ČTÚ. Byla provedena tři měření v terénu. Byly zaznamenány hodnoty objektivních měřených parametrů u DVB-T2, echo, RF spektra a konstelační diagramy. Na závěr každého měření bylo provedeno krátké vyhodnocení naměřených hodnot. Na základě toho, že výsledky nevyšly úplně přesně podle teoretických předpokladů, hledalo se, čím by to mohlo být. První věcí je, že podle teorie, když se přijímač „zavěsí“ na nejsilnější signál, tak by výsledné pokrytí mělo být lepší, než když se přijímač „zavěsí“ například hned na první signál bez ohledu na jeho intenzitu. Což simulace z programu *Sítě SFN* vypadají tak, že pokrytí v případě, že se přijímač „zavěsí“ na první signál bez ohledu na jeho intenzitu (Obr. 30) vychází mnohem lépe než v případě, kdy se přijímač „zavěsí“ na nejsilnější signál (Obr. 32). S tím souvisí i způsob časování SFN (viz Obr. 27) v programu *Sítě SFN*. Referenční vysílač je položen na začátek ochranného intervalu, tudíž cokoli v pre-echu je považováno za rušící. Přitom měřící přístroje dávají okénko ochranného intervalu okolo nejsilnějšího signálu a k jeho posunům dochází na základě toho, kolik signálů se objeví před nebo po nejsilnějším signálu.

Na závěr bylo diskutováno, jak by bylo možné zlepšit efektivitu SFN vysílačů pro zemské digitální vysílání druhé generace.

Část této diplomové práce byla prezentována na soutěži Student EEICT 2022 [42].

LITERATURA

- [1] FISCHER, Walter a Horst von RENOARD, 2008. *Digital video and audio broadcasting technology: a practical engineering guide* ; 2. ed. Berlin: Springer. Springer series on signals and communication technology. ISBN 978-3-540-76357-4.
- [2] LEGÍŇ, Martin, 2006. *Televizní technika DVB-T*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-204-6.
- [3] RICNY, V. *Single Frequency Networks (SFN) in Digital Terrestrial Broadcasting*. Radioengineering, vol. 16, no. 4, Dec. 2007, pp. 2-6. ISSN: 1210- 2512.
- [4] STROUHAL, A. *Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T2*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 70s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák.
- [5] UDATNÝ, V. *Od videokonferenci k Ultra HD: vývoj evropského digitálního televizního vysílání a standardů*. [online]. 10. 10. 2019 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.televizniweb.cz/2019/10/od-videokonferenci-k-ultra-hd-vyvoj-evropskeho-digitalniho-televizniho-vysilani-a-standardu/>
- [6] ETSI EN 302 755 V1.1.1. (2009-09) *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)* September 2009.
- [7] POLÁK, L. *Standard DVB-T2/T2-Lite pro přenos digitální televize*. Elektronické texty. Brno: FEKT VUT v Brně, 2020.
- [8] ETSI EN 302 755 V1.3.1. (2011-11) *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*.
- [9] KREJČÍ, D. *Laboratorní pracoviště pro měření vlastností DVB-T2/T2-Lite*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 82s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.
- [10] POLÁK, L., KRATOCHVÍL, T., *Performance of the Rotated Constellation in DVB-T2*, Department of Radio Electronics, Brno University of Technology, 2012.

- [11] PEREZ-CALDERÓN, D., ORIA, C., GARCÍA, J., LÓPEZ, P., BAENA, V., LACADENA, I. *Rotated Constellations for DVB-T2*. Sevilla: Electronic Engineering Department, University of Seville, 2010.
- [12] Tvfreak.cz: *Zákulisí DVB-teorie a technické informace*. [online]. 13. 7. 2009 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/zakulisi-dvb-teorie-a-technicke-informace/2988-7>
- [13] ETSI EN 302 755 V1.4.1. (2015-02) *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*.
- [14] BÁRTA, Vojtěch. *Laboratorní pracoviště pro měření DVB-T2 MISO vysílání*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126090>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ladislav Polák.
- [15] POLÁK, L. *Analysis and simulation of the signal transmission in the DVB-H/SH standards*. Doctoral Thesis. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Radio Electronics, 2012. 113 p. Supervised by doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [16] KVÍČALA, R. *Chybovost a dostupnost atmosférických optických spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 103 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [17] KŘÍŽ, David. *Na jaké parametry si musíte dát pozor při příjmu digitálního televizního signálu* [online]. 25. 1. 2010 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/na-jake-parametry-si-musite-dat-pozor-u-dvb-t/>
- [18] BUREL, G., MAGNIEZ, P. *Transmitters separation for Single Frequency Networks*. In Proceedings of IEEE Conference - SPAWC. Anapolis (USA), 1999.
- [19] Enensys.com: *Technical Overview of Single Frequency Network* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: http://ftp.enensys.com/documents/whitePapers/ENENSYS%20Technologies%20-%20Single_frequency_network%20Overview.pdf
- [20] ETSI TS 101191 V1.4.1. (2004-06) *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB mega-frame for Single Frequency Network (SFN) synchronization*. June 2004.

- [21] CORNILLET, Nicolas, Matthieu CRUSSIÈRE a Jean-Francois HELARD. *Performance of the DVB-T2 system in a Single Frequency Network: Analysis of the distributed alamouti scheme*. In: 2011 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB) [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1-4 [cit. 2021-11-28]. ISBN 978-1-61284-121-2. Dostupné z: doi:10.1109/BMSB.2011.5954961
- [22] O'LEARY, Seamus. *Understanding digital terrestrial broadcasting*. Boston: Artech House, c2000. ISBN 9781580530637.
- [23] MORGADE, Javier, and et al. *SFN-SISO and SFN-MISO Gain Performance Analysis for DVB-T2 Network Planning*. IEEE Transactions on Broadcasting [online]. 2014, 60(2), 272-286 [cit. 2021-11-1]. ISSN 0018-9316. Dostupné z: doi:10.1109/TBC.2013.2293852
- [24] Parabola.cz: *Jednofrekvenční síť SFN a její příjem v praxi* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.parabola.cz/clanky/4022/jednofrekvencni-sit-sfn-a-jej-prijem-v-praxi/>
- [25] Televizniweb.cz: *Praktický příjem DVB-T2: Jednofrekvenční sítě a vliv na příjem signálu* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.televizniweb.cz/2019/04/prakticky-prijem-dvb-t2-jednofrekvencni-site-a-vliv-na-prijem-signalu/>
- [26] GLÖSSL, P. *Měření parametrů DVB-T vysílání v jednofrekvenční síti SFN a návrh řešení pro STA ve vybraných problémových lokalitách*. Ostrava: Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2011. Diplomová práce Vedoucí práce: Václav Sládeček.
- [27] EBU-TECH 3348, *Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2*, Report, May 2011.
- [28] EBU-TECH 3348, *Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2*, Report, version 4.1.2, May 2011.
- [29] RadioLab 4 [online]. In: [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.crcdata.cz/images/crcdata-doc/RadioLab4-1IS.pdf>
- [30] RadioBase 3 [online]. In: . [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.crcdata.cz/images/crcdata-doc/RadioBase3IS.pdf>

- [31] Síť SFN [online]. In: . [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.crcdata.cz/images/crcdata-doc/SFN7IS.pdf>
- [32] ITU-R, *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*, Recommendation ITU-R P.1812-3, 2013.
- [33] CRC DATA. RadioBase 3.4: *Databázový subsystém pro správu dat vysílačů plošného pokrytí*. Uživatelská dokumentace.
- [34] CRC DATA. Síť SFN 8.2: *Výpočty pokrytí a rušení analogových a digitálních vysílacích sítí*. Uživatelská dokumentace.
- [35] ITU-R, *Frequency and network planning aspects of DVB-T2*, Report ITU-R BT.2254-3 2017
- [36] Dvbt.cz, *Vysílače DVB-T2*. [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.dvbt.cz/vysilace-dvb-t2>
- [37] ITU-R, *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*, Recommendation ITU-R P.1812-4, 2015
- [38] Mapavysilacu.cz, *DVB-T2 mapa pokrytí*. [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.mapavysilacu.cz/mapcoverage.html>
- [39] R&S ETL TV Analyzer Data sheet. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, v05.01, 2011.
- [40] PROMAX Ranger Neo 4 In: . [cit. 2022-5-12]. Dostupné z: <https://www.promax.es/downloads/manuals/English/ranger-neo-4.pdf>
- [41] Mapavysilacu.cz, *Multiplex*. [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.mapavysilacu.cz/mapmux.html>
- [42] Eeict.cz, *Student EEICT, download*. [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.eeict.cz/download>