VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

MĚŘENÍ A ANALÝZA VLASTNOSTÍ SYSTÉMU DAB
MEASUREMENT AND ANALYSIS OF THE DAB SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Petr Kaštánek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Petr Kaštánek ***ID:*** 203532
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Měření a analýza vlastností systému DAB

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce prostudujte standard DAB/DAB+ pro zemské digitální rozhlasové vysílání. Zaměřte se na možnosti příjmů rozhlasu DAB/DAB+ pomocí SDR přijímače s RTL2832U. Na základě získaných teoretických znalostí navrhněte a realizujte laboratorní pracoviště pro měření a analýzu rozhlasového signálu DAB/DAB+. Navrhněte postup pro monitorování a vyhodnocení příjmů signálu DAB/DAB+.

V experimentální části práce proveďte měření a analýzu rozhlasového signálu DAB/DAB+. Navrhněte laboratorní úlohu pro měření vlastností signálu DAB/DAB+ a připravte vzorové vypracování navržené úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HOEG, W., LAUTERBACH, T. Digital Audio Broadcasting. Principles and Applications of DAB, DAB+ and DMB (Third Edition). New York: Willey, 2009.

[2] KRESTA, Daniel. Analýza přenosu mobilního digitálního rozhlasového vysílání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2016. 60 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

[3] DAB PLAYER FOR RTL2832U [Online]. Dostupný z WWW: https://www.rtl-sdr.com/new-dab-player-rtl2832u/

Termín zadání: 3.2.2020 ***Termín odevzdání:*** 4.6.2020

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

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato bakalářská práce se zabývá měřením a analýzou signálu Digital Audio Broadcasting (DAB). V teoretické části práce se nachází stručný popis vysílacího řetězce DAB. Pozornost je věnována zejména fyzické vrstvě systému DAB. V experimentální části práce je navrženo a realizováno laboratorní měřící pracoviště pro příjem, zpracování a vyhodnocení DAB signálu, jehož základem je SDR přijímač RTL2832U. Funkčnost navržené koncepce je ověřena podrobným měřením vlastností systému DAB.

KLÍČOVÁ SLOVA

DAB, DAB+, COFDM, RTL2832U, RF měření, únikové kanály, SNR.

ABSTRACT

This thesis deals with the measurement and analysis the performance of the Digital Audio Broadcasting (DAB) system. Theoretical part of the work contains a brief description of the signal processing chain of DAB. Attention is devoted to physical layer (PHY). In the experimental part of the work is designed and implemented laboratory measuring workplace for reception, processing and evaluation of DAB signal. The RTL2832U software defined radio (SDR) is used as a receiver of the DAB signal. The functionality of the proposed concept is verified by a detailed measurement.

KEYWORDS

DAB, DAB+, COFDM, RTL2832U, RF measurement, fading channels, SNR.

KAŠTÁNEK, Petr. *Měření a analýza vlastností systému DAB* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126091. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ladislav Polák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Měření a analýza vlastností systému DAB jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za předání vzácných zkušeností a vědomostí pro tvorbu této práce a za ochotu při kontrole vypracované práce.

V Brně dne ....

(podpis autora)

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ ..... **IX**

SEZNAM TABULEK ..... **XI**

ÚVOD **1**

1 DIGITÁLNÍ RÁDIOVÉ VYSÍLÁNÍ DAB/DAB+ **2**

2 VYSÍLAČ SIGNÁLU DAB **4**

2.1 ZDROJOVÉ KÓDOVÁNÍ V SYSTÉMU DAB 4
2.1.1 Kódování MPEG-2 ..... *5*
2.1.2 Kódování MPEG-4 ..... *6*
2.1.3 Kompatibilita DAB a DAB+ *6*
2.1.4 COFDM modulátor *7*
2.1.5 Vstupní úprava *7*
2.1.6 Kompenzace zpoždění *7*
2.1.7 Kanálové kódování *7*
2.1.8 OFDM modulace *8*
2.2 I/Q MODULÁTOR 8
2.3 RF KONVERTOR 8

3 MODELY PŘENOSOVÝCH KANÁLŮ **9**

3.1 PŘENOSOVÝ KANÁL 9
3.2 VLIV ODRAZŮ NA PŘIJÍMANÝ SIGNÁL 10
3.3 VLIV POHYBU PŘIJÍMAČE 10
3.4 VYSÍLACÍ PÁSMA 10
3.5 JEDNOFREKVENČNÍ SÍTĚ (SFN) 11

4 PŘIJÍMAČ SIGNÁLU DAB **12**

4.1 FREKVENČNÍ KONVERTOR 12
4.2 I/Q DEMODULÁTOR 12
4.3 COFDM DEMODULÁTOR 13
4.4 DEMULTIPLEXER 13
4.5 DIGITÁLNĚ ANALOGOVÝ KONVERTOR (DAC) 13

5 LABORATORNÍ PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ SIGNÁLU DAB **14**

5.1 VYSÍLAČ TESTOVACÍHO DAB SIGNÁLU R&S SFU 14
5.2 PŘIJÍMAČ RTL2832U 15
5.3 PROGRAM DAB PLAYER 16
5.4 PROPOJOVACÍ ČLÁNKY 17

6 MĚŘENÍ A ANALÝZA SIGNÁLU DAB **18**

6.1 MĚŘENÍ RÁDIOVÉHO VYSÍLÁNÍ 18
6.1.1 Měření reálného signálu DAB *18*
6.1.2 Měření závislosti hodnot SNR na vloženém útlumu *20*
6.2 LABORATORNÍ MĚŘENÍ 21
6.2.1 Měření vlivu vysílacího výkonu na přijímaný signál *21*
6.2.2 Měření vlivu vysílacích módů (TM) na signál DAB *22*
6.2.3 Měření vlivu únikových kanálů na hodnotu SNR *23*
6.2.4 Měření rozdílů dvou možností připojení *25*
6.2.5 Měření závislosti SNR na hodnotě vloženého útlumu *26*

7 ZHODNOCENÍ **28**

7.1 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S JINÝMI PRACEMI 28
7.1.1 Porovnání výsledků měření vysílacích módů (TM) *28*
7.1.2 Porovnání výsledků z měření vlivu modelů únikových kanálů *28*
7.2 DALŠÍ PROGRAMY PRO PŘÍJEM SIGNÁLU DAB 29
7.2.1 SDRSharp *29*
7.2.2 HDSDR *30*
7.2.3 SDR-Radio *31*
7.2.4 Qt – DAB *31*
ZÁVĚR 33
LITERATURA 34
PŘÍLOHA 1 – VZOROVÉ ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY 36
PŘÍLOHA 2 – VYPRACOVANÝ PROTOKOL 41

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Světové pokrytí vysíláním DAB/DAB+ z března 2020, (převzato z [3]) 2
Obr. 1.2: Pokrytí České republiky signálem DAB+ v lednu 2019, (převzato z [3]) 3
Obr. 1.3: Blokové schéma vysílače DAB, (na základě [2]) 4
Obr. 1.4: Schéma kódování MPEG-4, (na základě [5]) 5
Obr. 1.5: Blokový diagram dekodéru MPEG-1 Layer 2, (na základě [2]) 5
Obr. 1.6: Blokové schéma dekodéru HE-AAC v2 (na základě [2]) 6
Obr. 1.7: Blokové schéma COFDM modulátoru (na základě [2]) 7
Obr. 1.8: Blokové schéma I/Q modulátoru, (na základě [6]) 8
Obr. 1.9: Zjednodušené blokové schéma přijímače DAB signálu (na základě [11]) 12
Obr. 1.10: Blokové schéma I/Q demodulátoru, (na základě [12]) 13
Obr. 1.11: Laboratorní pracoviště pro měření a analýzu signálu DAB. 14
Obr. 1.12: Zapojení laboratorního pracoviště pro měření signálu DAB 15
Obr. 1.13: Použitý USB dongle RTL2832U. 16
Obr. 1.14: DAB Player – Okno pro vyhledávání stanic. 17
Obr. 1.15: DAB Player – Okno pro zobrazení hodnot SNR. 17
Obr. 2.1: Zapojení pracoviště pro příjem vysílání DAB. 18
Obr. 2.2: Časový průběh hodnoty SNR pro stanici ČRo – Brno. 19
Obr. 2.3: Průběh bitové rychlosti pro stanici ČRo – Brno. 20
Obr. 2.4: Zapojení pracoviště pro měření útlumu vysílání DAB. 20
Obr. 2.5: Zapojení laboratorního pracoviště pro měření signálu v závislosti na zvolených únikových kanálech a vysílacích módech. 21
Obr. 2.6: Závislost *SNR* na *C/N* při různých vysílacích úrovních. 22
Obr. 2.7: Závislost *SNR* na *C/N* při použití různých vysílacích módů. 23
Obr. 2.8: Závislost *SNR* na *C/N* při AWGN kanálu a různých únikových kanálech. 24
Obr. 2.9: RF spektrum signálu bez únikových kanálů. 24
Obr. 2.10: Spektra signálů bez a se zapnutými různými únikovými kanály. 25
Obr. 2.11: Zapojení měřícího pracoviště pro měření pomocí antén. 26
Obr. 2.12: Závislost *SNR* na *C/N* s různými připojeními. 26
Obr. 2.13: Zapojení měřícího pracoviště pro měření s vloženým útlumem. 27
Obr. 2.14: Závislost *SNR* na hodnotě útlumu. 27

Obr. 2.15: Závislost hodnot BER na hodnotách C/N (převzato z [6]). 28
Obr. 2.16: Program SDRSharp. 30
Obr. 2.17: Program HDSDR. 31
Obr. 2.18: Program SDR – Radio. 31
Obr. 2.19: Program Qt – DAB 32

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Parametry kanálových modelů TU6 a RA6 9

Tabulka 1.2: Vysílací módy a jejich ochranné intervaly s maximální vzdáleností 11

Tabulka 1.3: Seznam naladěných stanic na území VUT, Ústav radioelektroniky, Laboratoř Digitální, televizní a rozhlasové techniky 19

Tabulka 1.4: Parametry signálu pro měření výkonu. 21

Tabulka 1.5: Seznam programů pro příjem DAB vysílání. 29

ÚVOD

Rozhlasové vysílání pomocí standardu digitálního rádiového vysílání, tzv. Digital Audio Broadcasting (DAB) [1], je vyvíjen už od 80. let 20. století. V České republice byl poprvé spuštěn vysílač pro vysílání signálu DAB v Praze v roce 1999, na Žižkovské věži, ovšem k většímu rozsahu vysílání došlo až před pár lety díky firmě Teleko. Nástupcem standardu DAB je efektivnější a výkonnější standard nazývaný DAB+. První rádiová stanice, která začala využívat standard DAB+ byl Český rozhlas v roce 2015. Pro digitální rádiové vysílání se v České republice využívá 3. televizní pásmo (174 – 230 MHz) nebo pásmo L (1,5 – 1,7 GHz), od kterého se však již upouští a vysílat se bude pouze na 3. televizním pásmu. Digitálním audio vysíláním se nahrazuje analogové audio vysílání, a to hlavně kvůli lepší kvalitě přenosu u pohybujících se přijímačů ve městě, kde je hodně rušení z důvodu velkého počtu odrazů, nebo i v otevřeném prostoru při rychlých změnách pohybu [2]. Dalším důvodem nahrazování analogového vysílání za digitální je lepší kvalita zvuku a možnost přenášet text i obrázky. Standard DAB také nabízí možnost přenášet více rádiových stanic na jedné frekvenci, což urychluje přepínání mezi stanicemi [1],[3].

Cílem této práce je měření a analýza signálu DAB/DAB+. Příjem signálu DAB je realizován pomocí přijímače softwarově definovaného rádia (Software Defined Radio – SDR). S tímto SDR je úkolem vytvořit měřící pracoviště a laboratorní úlohu pro měření právě zmíněných standardů s použitím přijímače RTL s čipem RTL2832U.

Tato bakalářská práce je rozdělená do tří částí. První část je zaměřena na základní popis fyzické vrstvy (Physical Layer – PHY) standardů DAB a DAB+. Především se jedná o přenos, vysílání a zpracování signálu. V druhé části práce se nachází návrh zapojení, popis přístrojů a měření vlastností přenosu signálu DAB. V třetí části se nachází laboratorní úloha s ukázkovým vypracováním.

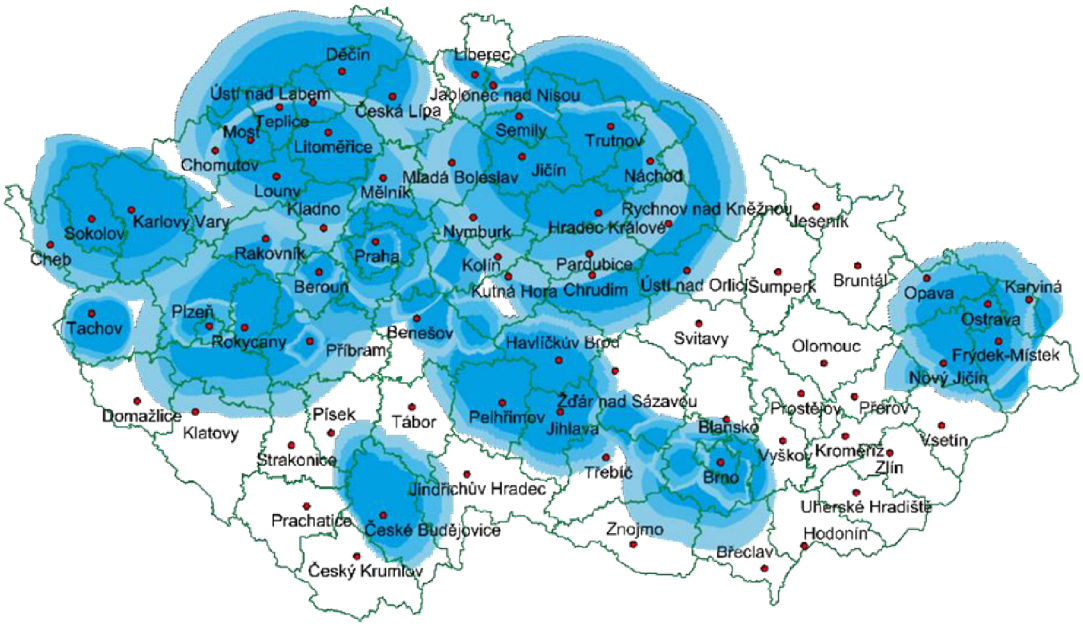
1 DIGITÁLNÍ RÁDIOVÉ VYSÍLÁNÍ DAB/DAB+

Jak již bylo zmíněno v úvodu, první pokusy a začátek vývoje vysílání DAB začaly již v 80. letech 20. století. V roce 1981 převzal vývoj Německý institut „Institut fur Rundfunktechnik“ (IRT), zaměřující se na digitální vysílání jak radiových, tak i televizních služeb. Tento institut vyvíjel také normu digitálního televizního vysílání, tzv. Digital Video Broadcasting (DVB-T) [3]. V roce 1986 byl odhlasován Evropský projekt Eureka 147, skládající se z 19 organizací ze zemí Německa, Francie, Nizozemí a Anglie. Projekt měl za cíl přenášet audio nahrávky srovnatelné s kvalitou hudby hrané z CD, kvalitní příjem i při vysokých rychlostech pohybu přijímače, a hlavně vyvinout celosvětově používaný standard vysílání. Až v roce 1993 byl projekt zakončen normalizací standardu DAB. První vysílání standardu DAB započalo v Norsku v roce 1995 a v ten samý rok i v Británii na stanici BBC. Roku 1996 se DAB rozšířil i do dalších zemí Evropské unie. V roce 2007 poprvé představili vylepšení systému DAB a to právě DAB+ využívající kodek Advanced Audio Coding (AAC+). Dnes je pokryto vysíláním DAB a DAB+ území Evropské unie, Austrálie a část Asie, jak je vidět na Obrázku 1.1 [4].

Obr. 1.1: Světové pokrytí vysíláním DAB/DAB+ z března 2020, (převzato z [3])

První zemí využívající systém DAB naplno je Norsko, které v roce 2017 začalo vypínat vysílače analogového vysílání a pro radiový přenos využívat pouze digitální vysílání. Koncem roku 2018 na celém světě vysílalo již přibližně 2 200 rádiových stanic pomocí systémů DAB nebo DAB+ [4].

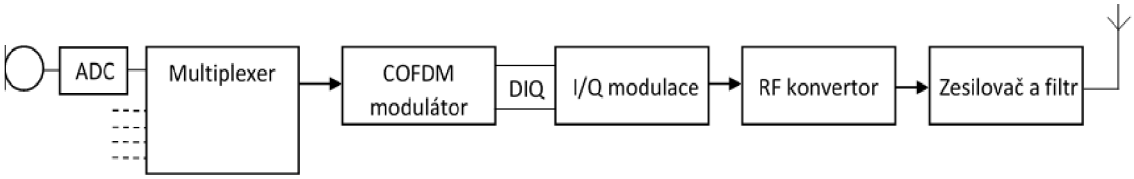
V České republice bylo digitální vysílání poprvé zahájeno v roce 1999 ve zkušebním provozu pomocí vysílače na Žižkovské věži v Praze [3]. Od roku 2005 v České republice proběhlo několik testovacích vysílání, a to v Praze, Příbrami, Plzni a Brně. Testování probíhalo až do roku 2011. V tomto roce bylo poprvé spuštěno řádné vysílání v Praze a Příbrami. V následujících letech bylo spuštěno několik radiových stanic a byly vybudovány další vysílače pro standard DAB a DAB+. Největší pokrytí u nás má Český rozhlas, který pokrývá Středočeský kraj, Brno, Jihlavu a Ostravu [3],[4]. Celkové pokrytí vysíláním DAB+ v České republice je vidět na Obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Pokrytí České republiky signálem DAB+ v lednu 2019, (převzato z [3])

2 VYSÍLAČ SIGNÁLU DAB

Vysílač systému DAB se skládá z několika funkčních bloků a jeho základní zapojení je zobrazeno na Obrázku 1.3. Skládá se ze šesti hlavních funkčních bloků. Tyto bloky jsou určeny pro úpravu signálu před vysíláním. Prvním blokem je analogově digitální konvertor (Analog to Digital Convertor – ADC). Ten z analogového signálu vytváří digitální signál pro další bloky. Po něm následuje multiplexer, který více vstupních audiosignálů skládá do jednoho výstupního signálu. Následuje pak tzv. COFDM modulátor (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex), který provádí nelineární předzkreslení. Poté je prováděna tzv. I/Q modulace. Ta sleduje průběh signálu a upravuje jeho frekvenční průběh dle nakonfigurovaných hodnot. Dalším blokem v zapojení je konvertor radiové frekvence (Radio Frequency – RF), který je využívaný pro změnu vysílací frekvence, a poslední je zesilovací a filtrovací blok [2].



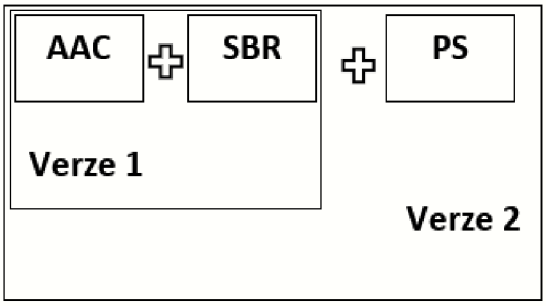
Obr. 1.3: Blokové schéma vysílače DAB, (na základě [2])

2.1 Zdrojové kódování v systému DAB

Systém DAB, stejně jako vysílání DAB+, využívá kódování založené na ztrátové kompresi dat. Rozdíl je převážně v efektivitě a kvalitě vysílaných dat při daném kódování. Pro vysílání DAB je používán kodek Moving Picture Experts Group (MPEG-1 Audio layer 2, označováno též jako MPEG-2 Audio layer 2 nebo MP2). Toto kódování je ale poněkud zastaralé, vyvinuto bylo již v roce 1993 Eurekou 147. Je to jeden z mála kodeků, díky kterým audio vysílání na každý monofonický kanál dosahuje rychlosti přenosu od 63 kbit/s až do 192 kbit/s. Vyvinut byl tak, aby měl co nejmenší zpoždění, komplexnost odolný proti chybám přenosu a s krátkou dobou přepnutí. Jedná se o kodek využívající rozdělení na podpásma, přesně na 32 pásem pro kratší odezvu. Například, když na jedné frekvenci bude zvuk silný a na blízkých přilehlých frekvencích bude slabší, tak se sloučí do jednoho, který bude stejně silný jako ten nejsilnější. Do komprese jsou zahrnuta také zmíněná podpásma. Pokud je nějaké podpásmo vyhodnoceno jako nepotřebné, tak se jednoduše nepřenese [5].

Zatímco standard DAB využívá MP2, tak DAB+ využívá kodek MPEG-4 HE-AAC v2, který je oproti MP2 pokročilejší. HE-AAC značí, že se jedná o vysoce účinné audio kódování (High Efficiency). Má dvě verze. První verze využívá replikace spektrálního pásma (Spectral Band Replication – SBR). Díky tomu dovolí přenést zvuk stejné kvality s poloviční rychlostí, než by potřebovalo samotné AAC. Druhá verze tyto replikace spojuje pomocí parametrického stereo kódování, což je další ztrátová komprese zvuku. Toto zajišťuje mnohem nižší přenosovou rychlost. Druhá verze je více efektivní než první, právě díky této dvojí úpravě.

Aby AAC fungovalo správně a byla dosažena dostatečná kvalita, musí být rychlost přenosu alespoň 128 kbit/s. Na obrázku 1.5 je přibližně znázorněno, jak je spojena druhá verze HE-ACC s tou první [5],[6].

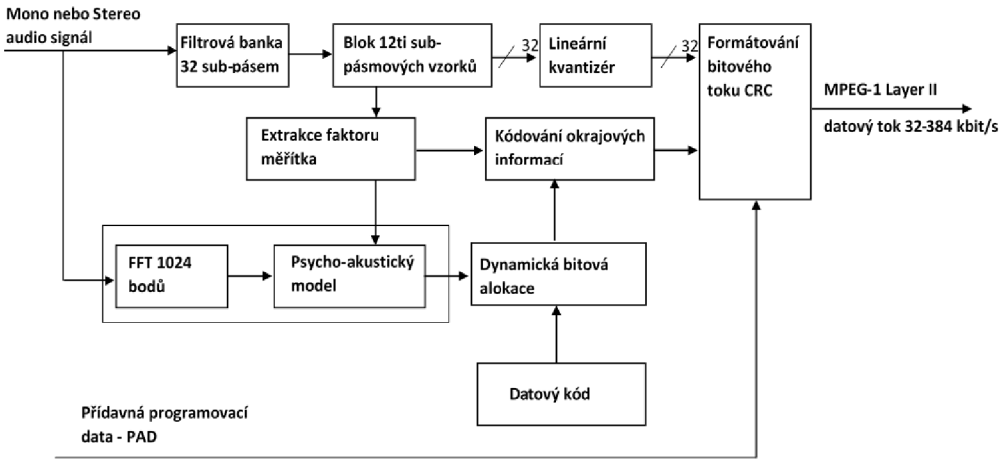


Obr. 1.4: Schéma kódování MPEG-4, (na základě [5])

2.1.1 Kódování MPEG-2

Při vývoji tohoto kódování bylo cílem, aby rádiový přenos byl na stejné šířce pásma jako televizní vysílání, tedy 16 stanic na 8 MHz. Při této frekvenci však bylo vysílání nestálé a nedalo se s ním dobře pracovat. V Kanadě proto začali pracovat se systémem COFDM, u kterého zjistili, že při šířce pásma 1,3 MHz a nižší dochází k většímu zkreslení přenosu, a tak stanovili šířku pásma pro přenos pomocí DAB na 1,5 MHz. Na této šířce lze přenášet 5 až 7 stanic, na jednom televizním vysílání o šířce 8 MHz lze tedy vysílat až 28 stanic. Při šířce pásma 1,5 MHz je omezena převážně rychlost přenosu, která je při tomto pásmu přibližně 1,2 Mbit/s. Dříve byly využity pouze 2/3 pásma, díky kodeku MP2 je využito pásmo celé [7].

U tohoto kódování se audio signál rozdělí na 32 frekvenčních sub-pásem pro lepší zpracování. Každé toto pásmo je poté dynamicky kódováno podle maskovacího prahu a maskovacími složkami audio signálu. Právě toto kódování zapříčiní komprimaci dat, proto se komprimace MP2 označuje jako ztrátová. Informace o této komprimaci je posílána společně s daty pro zpětnou obnovu dat do původní podoby [6],[7]. Uspořádání bloků pro dekodér MPEG-1 Layer 2 je zobrazeno na Obr. 1.5.

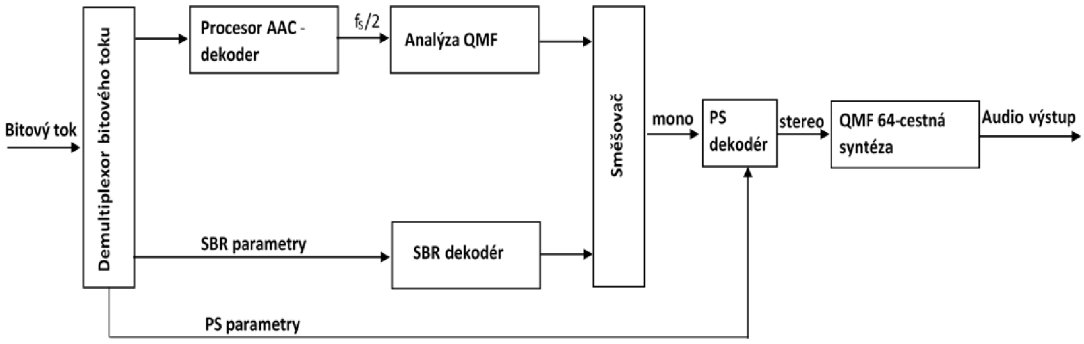


Obr. 1.5: Blokový diagram dekodéru MPEG-1 Layer 2, (na základě [2])

2.1.2 Kódování MPEG-4

Protože kódování MP2, které je využíváno u systémů DAB, je v dnešní době zastaralé, byl pro systémy typu DAB+ vyvinut jeho nástupce, MPEG-4 HE-AAC v2. To má oproti MP2 více verzí. AAC-LC (AAC – Low Complexity), první verze po MP2 s nízkou mírou komplexnosti bez jakékoliv replikace. HE-AAC (High Efficiency – AAC), vylepšená verze AAC-LC, která je efektivnější a již osahuje spektrální pásmovou replikaci (SBR – Spectral Band Replication). Ta pro komprimaci využívá překopírování základního pásma do vyšších frekvencí, kde je toto pásmo upraveno pomocí SBR dat. Poslední a dnes nejvíce využívaná verze je HE-AAC v2, kde v2 značí, že je to vylepšená verze předchozího HE-AAC, ke kterému přibylo parametrické stereo kódování (viz. Obr. 1.5). DAB+ tuto verzi využívá hlavně kvůli pásmové replikaci a stereo kódování (PS – Parametric Stereo). Tyto vlastnosti umožňují přenos na nižší přenosové rychlosti než u kódování MP2. MPEG-4 je možné použít jednak pro přenos zvuku, ale také s ním lze přenášet i obraz a text [5].

Z obr. 1.6 lze vidět, že HE-AAC v2 se skládá z bloků AAC, SBR a PS. Blok AAC zajišťuje obyčejné audio kódování rozdělené na několik oken založených na psychoakustických vlastnostech audiosignálu. Tento blok transformuje časovou základnu na polovinu vzorkovací frekvence $f_s/2$. Blok SBR zajišťuje kódování vyšších frekvencí při nižší přenosové rychlosti pomocí analýzy celého pásma a frekvenčně limitovaného pásma. Díky bloku PS dochází k efektivnějšímu využití přenášeného pásma a k jeho zmenšení. Nemusí se tak přenášet stereo zvuk, ale pouze mono zvuk s informací ohledně stereo verze pro úpravu při příjmu tohoto signálu [5].



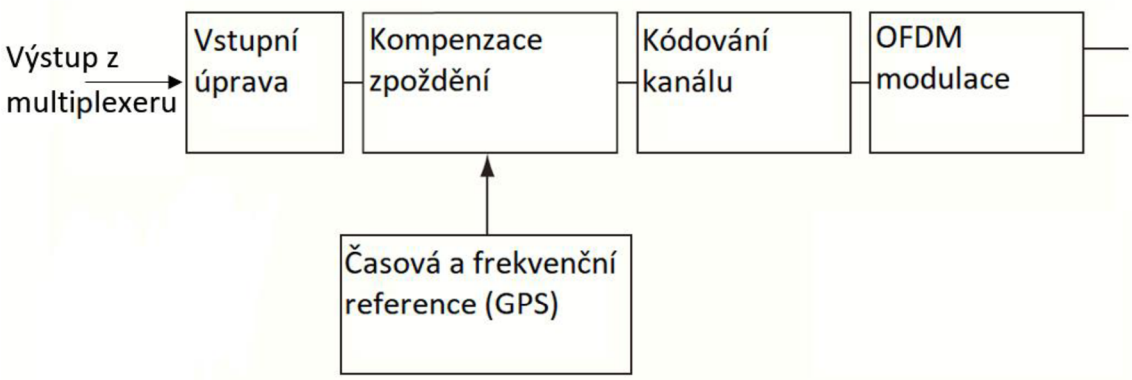
Obr. 1.6: Blokové schéma dekodéru HE-AAC v2 (na základě [2])

2.1.3 Kompatibilita DAB a DAB+

Jak již bylo uvedeno, vysílání DAB využívá kodek MPEG 1 Layer II, a tak je možné přenášet 5 až 10 radiových stanic v jednom multiplexu. U DAB+ je využíván novější kodek HE AAC v2, který umožňuje přenášet až dvakrát více stanic než předchozí kodek MPEG 1. Standard DAB+ je zpětně kompatibilní se starším standardem DAB, ovšem ze staršího na novější tato kompatibilita již nefunguje kvůli nedostatečné šířce pásma u standardu DAB. V dnešní době je možné zakoupit přijímače DAB, které podporují i příjem DAB+. Takové přijímače jsou označeny logem DAB+ compatible. Pro přenos využívají oba standardy stejná pásma, a to 3. televizní pásmo a L pásmo [3].

2.1.4 COFDM modulátor

COFDM modulátor je nejkomplexnější část vysílače DAB. Tento blok do vstupního signálu přidává zadané zpoždění a připravuje ho pro pozdější úpravu v bloku I/Q modulace. Na výstupu tohoto bloku má signál dvě složky, soufázovou a kvadraturní (Digital In-phase and Quadrature – DIQ). Blokové schéma modulátoru je znázorněno na Obrázku 1.7, zde je vidět pět bloků: vstupní úprava jednotky, kompenzace zpoždění, do které se přidávají hodnoty o čase a zpoždění z bloku GPS, poté kódování kanálu a naposledy OFDM modulace [8].



Obr. 1.7: Blokové schéma COFDM modulátoru (na základě [2])

2.1.5 Vstupní úprava

Ve vstupní fázi je signál upraven do podoby TTL (Transistor Transistor Logic). Pokud vstupují dva signály, tento blok sleduje jejich podobu a dál posílá pouze jeden signál s informací o podobnosti [8].

2.1.6 Kompenzace zpoždění

Při kompenzaci zpoždění je přidáváno zpoždění mezi nulou až jednou sekundou. Přidávání zpoždění probíhá po skocích, obvykle se používá skok po 488 ns. Tento skok je určen z periody signálu při rychlosti přenosu 2,048 Mbit/s. Pro dynamické zpoždění používáme časovou známku z GPS (Global Positioning System), většinou v jednotkách pps (pulse per second) [8].

2.1.7 Kanálové kódování

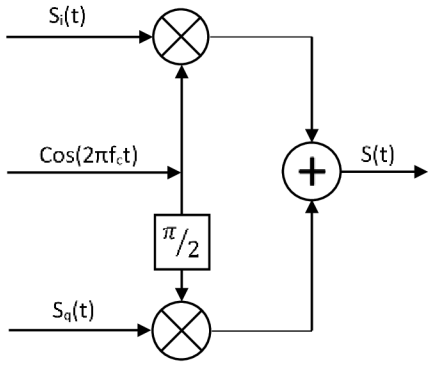
Při kanálovém kódování se vychází ze standardu MPEG-2. Kanálové kódování se provádí pro přenos signálu s velkým datovým tokem, který nelze přenášet bez komprese. Přenášenému kanálu dodává větší odolnost a jednodušší opravu chyb při příjmu. Poté v OFDM bloku dochází k mapování na znaky a přechod z digitálního na analogový signál [8].

2.1.8 OFDM modulace

V případě OFDM modulace jde o paralelní systém přenosu dat. Dochází při tom k dělení signálu do několika větví, v kterých se poté přenáší. Tato modulace urychluje přenos dat tím, že je možno přenášet kratší informace, které se poté v přijímači opět spojí do jednoho toku dat. Aby nedocházelo ke kolizím jednotlivých cest způsobených zpožděním signálu, využívá se ochranného intervalu (Guard Interval – GI), kdy se nevysílá žádná nová informace. Touto modulací také zmenšíme riziko vzniku chyby zeslabením signálu nebo frekvenční interferencí. Je tak možné pokrýt větší plochu i se slabším signálem, dojde však ke zmenšení užitečného datového toku. Při rekonstrukci signálu se na přijímači využívá oprava chyb (Forward Error Correction – FEC) [8].

2.2 I/Q modulátor

Z výstupu COFDM modulátoru vychází signál ve formě DIQ, který dále zpracovává modul I/Q modulace. Tento blok dělí signál na dvě 8-bitové části, soufázovou (s_I – In-phase) a kvadraturní (s_Q – Quadrature) [12]. Každá tato část poté prochází pásmovou filtrací a kmitočtovou úpravou pomocí zesílení či zeslabení. Takto upravené složky se poté zpět spojí do jednoho reálného signálu na určité nosné frekvenci a vstupuje do RF konvertoru. Na Obr. 1.8 je vidět blokové schéma tohoto modulátoru.



Obr. 1.8: Blokové schéma I/Q modulátoru, (na základě [6])

2.3 RF konvertor

RF konvertor se v některých případech využívá pro přenos na 3. televizním pásmu. Pro přenos na pásmu L je využíván vždy. Konvertor slouží hlavně k odstranění průlomových a odrazových produktů předešlých částí vysílače a pro změnu vysílacího kmitočtu signálu [2].

3 MODELY PŘENOSOVÝCH KANÁLŮ

3.1 Přenosový kanál

Pozemní vysílání při jeho přenosu ovlivňuje spousta faktorů, obzvláště u vysílání DAB, při kterém se ve většině případů přijímač pohybuje v prostoru po náhodné trajektorii. Takovým pohybem se neustále mění počet přijímaných vln a dochází ke změně frekvence kvůli Dopplerovu jevu. Vlny se poté od překážek odráží, čímž vzniká vícecestné šíření a další rušení. Toto rušení poté signál tlumí, dává jisté zpoždění a mění fázi [6].

Na přijímači se ve většině případů objevuje zašumění signálu, které je způsobeno průchodem signálu kanálem AWGN (Additive White Gaussian Noise – přídavný bílý Gaussovský šum). Pro případy, kdy mezi vysílačem a přijímačem je přímá viditelnost a signál se tak nikde neodráží, je zde Gaussovský kanál. Který právě takový případ popisuje a signál je pouze utlumen zmíněným AWGN. Jde však o případ spíše ideální. Jako alternativy Gaussovského kanálu lze uvézt další dva kanály. Riceův kanál, který znázorňuje přenos signálu přímou cestou s odrazy a Rayleighův kanál, který označuje přenos signálu bez přímé cesty [6],[9].

Pro více praktické znázornění přenosu jsou zde modely kanálů označené jako PI (Portable Indoor) a PO (Portable Outdoor). Jsou určené pro modelování přijímání signálu u rychlosti přijímače do 3 km/h. Pro rychlosti automobilu, tedy 50 km/h a více jsou dostupné dva modely kanálů. První z nich je označován TU (Typical Urban). Ten je určen pro modelování situace v městské zástavbě při rychlosti přijímače 50 km/h bez přímé viditelnosti na vysílač. Jsou dvě verze, TU6 pro příjem 6 cest typu Rayleighova kanálu a TU12 pro příjem 12 cest typu Rayleighova kanálu. Pro modelování situace v nezastavěném prostoru při rychlosti 100 km/h je kanál RA (Rural Area). Opět má dvě verze, RA4 a RA6 pro příjem 1 cesty typu Riceova kanálu a 3 nebo 5 cest typu Rayleighova kanálu. V Tabulce 1.1 lze vidět přiřazení útlumu kanálu na zpoždění signálu pro TU6 a RA6 [6],[9].

Tabulka 1.1: Parametry kanálových modelů TU6 a RA6

TU6		RA6	
L [dB]	τ [μs]	L [dB]	τ [μs]
3	0,0	0	0,0
0	0,2	4	0,1
2	0,5	8	0,2
6	1,6	12	0,3
8	2,4	16	0,4
10	5,0	20	0,5

3.2 Vliv odrazů na přijímaný signál

U reálného přenosového prostředí je třeba počítat s tím, že přenášený signál budou ovlivňovat také odražené signály a signály vysílané jinými vysílači v síti SFN (Single Frequency Network – jednofrekvenční sítě). Chybovost přijímaných dat závisí na zpoždění signálu a jeho šumu. Pokud je toto zpoždění menší než tzv. ochranný interval, dochází k minimálnímu vlivu zpoždění na výstupní signál. Dojde-li však k překročení ochranného intervalu, objeví se na přijímaném signálu mezisymbolové přeslechy (Intersymbol Interferences – ISI). Délka ochranného intervalu označuje maximální vzdálenost vysílačů vysílajících v synchronní síti. Tato délka se označuje jako T_{GI}. Přestože bude mít signál malou chybovost, bude i nadále docházet v RF spektru signálu k deformacím [6].

3.3 Vliv pohybu přijímače

Při pohybu přijímače dochází k frekvenčnímu posuvu, nazývaným Dopplerův jev. Tuto změnu frekvence popisuje vztah [6]:

$$f_D = \frac{v}{c_0} f_0 \cos(\alpha), \quad (1.3)$$

kde v je rychlost přijímače, c_0 rychlost šíření vlny, f_0 frekvenci přenášeného signálu a α je úhel mezi směrem pohybu přijímače a směrem signálu.

Přijímač by tento posuv dokázal zcela potlačit, pokud by se posuv aplikoval pouze na jeden signál přenosu, např. Gaussův kanál. Ve skutečnosti se však posuv liší kvůli vícecestnému příjmu, který se sčítá a dojde ke zkreslení signálu [6].

3.4 Vysílací pásma

Digitální rádiové vysílání probíhá v určitých módech, které jsou rozdělené podle frekvence a pásma. Tyto módy jsou čtyři, a to TM I, TM II, TM III a TM IV. Mód TM1 je určen pro vysílání signálu DAB na 3. televizním pásmu. Vysílání je uskutečněno na 1536 nosných v každém vysokofrekvenčním pásmu s rozestupem 1 kHz. TM1 má symbolovou periodu 1246 μs a délku ochranného intervalu 246 μs. Tento mód je velice citlivý na změnu fáze. V České republice se dále pro DAB vysílání používá pásmo L, které využívá módů TM II a TM IV. Mód TM2 využívá 384 nosných v každém vf pásmu s rozestupem 4 kHz. Tento mód má oproti TM1 nižší symbolovou periodu 312 μs a ochranný interval je 1/4 ze symbolové periody, stejně jako u TM1. Zbývající mód TM III je využíván pro přenosy pozemních vysílání a satelitních vysílání pod 3 GHz. Nosné frekvence těchto módů jsou stanoveny na násobky 16 kHz [6].

3.5 Jednofrekvenční sítě (SFN)

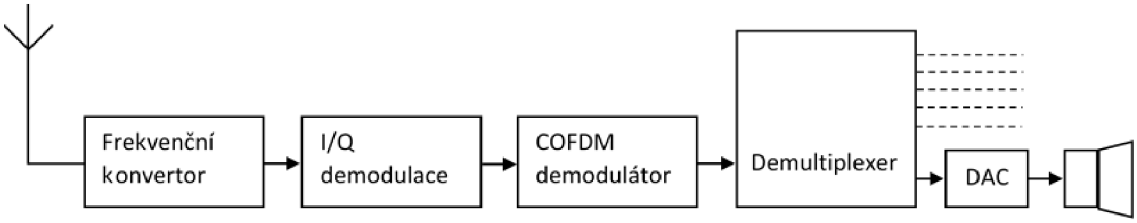
Jedná se o sítě, kde na jedné frekvenci je možné vysílat z několika různých vysílačů. Je však nutné, aby časová základna byla správně synchronizována, protože u každého signálu z různých vysílačů dojde k odlišnému zpoždění. Pro minimalizaci přeslechů v síti SFN je potřeba, aby zpoždění přijímaných signálů bylo menší než délka ochranného intervalu. Porovnání vysílacích pásem a maximálních vzdáleností vysílačů je zobrazeno v Tabulce 1.2 [10].

Tabulka 1.2: Vysílací módy a jejich ochranné intervaly s maximální vzdáleností

Vysílací mód	T_{GI} [μs]	Maximální vzdálenost (km)
TM I	246.09	73.83
TM II	61.52	18.46
TM III	30.76	9.23
TM IV	123.05	36.91

4 PŘIJÍMAČ SIGNÁLU DAB

Základní zapojení přijímače DAB se skládá z frekvenčního konvertoru, I/Q demodulátoru, COFDM demodulátoru, demultiplexeru a nakonec digitálně-analogového konvertoru (Digital-to-Analog – DAC), jak je vidět na Obrázku 1.10. Poté je upravený signál vhodně upravený pro zvukovou reprodukci přes připojený reproduktor [11].



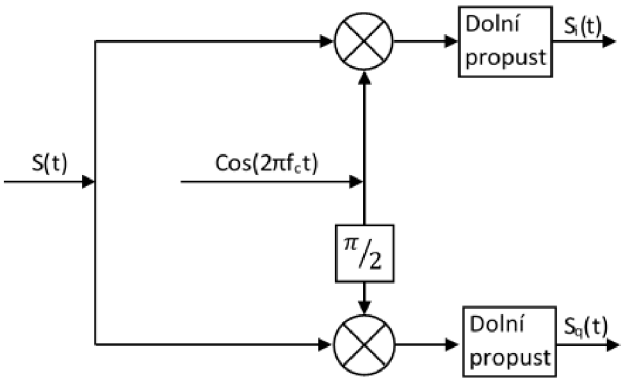
Obr. 1.9: Zjednodušené blokové schéma přijímače DAB signálu (na základě [11])

4.1 Frekvenční konvertor

Frekvenční konvertor slouží k převedení signálu na jedné frekvenci na frekvenci v základním pásmu. Tento konvertor se někdy také nazývá tuner. Pro audio přenosy se také používá označení RF konvertor, jak je použito u popisu vysílače. Obvod je obvykle složen z lokálního oscilátoru a mixéru frekvence (analogový násobič), který generuje součtové a rozdílové frekvence ze vstupního a lokálního oscilátoru, z nichž jeden (střední frekvence) bude vyžadován pro další zesílení, zatímco ostatní jsou odfiltrovány [11].

4.2 I/Q demodulátor

Z výstupu frekvenčního konvertoru signál vstupuje do bloku I/Q demodulace. Přijímaný signál pomocí tohoto bloku demodulujeme do původní podoby, aby opět vznikla soufázová a kvadraturní složka, tedy signál v komplexním vyjádření. K tomuto slouží kvadraturní demodulátor, který vezme signál s(t), rozdělí signál na dvě složky, soufázovou a kvadraturní, a každou zvlášť vrátí do původního formátu jako byly na výstupu OFDM modulátoru. Je ovšem potřeba na obě složky použít filtr typu dolní propust, jak je vidět na Obr. 1.9, protože při výstupu z demodulátoru mají dvojnásobnou nosnou frekvenci. Tyto signály je nutno spojit do jednoho signálu označovaného DIQ. Takto upravený signál se poté posílá do COFDM demodulátoru pro další úpravy [12].



Obr. 1.10: Blokové schéma I/Q demodulátoru, (na základě [12])

4.3 COFDM demodulátor

Tento blok má na starosti zpracovat signály přicházející na určitých nosných (větvích), tak jak je COFDM modulátor rozdělil. V tomto bloku jsou poté opět složeny do jednotlivého signálu integrováním se symbolovou periodou pro obnovu dat do podoby před přenosem [14].

Demodulátor pro obnovu dat používá tzv. Viterbiho algoritmus. Tento algoritmus je založen na dynamickém programování pro hledání nejlepší možné posloupnosti symbolů skrytých v přijímaném signálu. Výsledkem je poté přirozené rekurzivní řešení. Pro implementaci Viterbiho algoritmu je důležitá přímočarost, se kterou lze analyzovat výkon. Klíčovým pojmem v této analýze je chybová událost. Tento pojem označuje jednotlivé možné výsledky při průběhu algoritmu. Chybové události většinou nejsou ohraničeny žádnou délkou, pokud je délka signálu nekonečná. Tato šance je však téměř nulová. Vybírá se poté signál, který bude mít co nejmenší počet chybových událostí, a ten je zvolen pro další zpracování v dalších blocích přijímače [15].

4.4 Demultiplexer

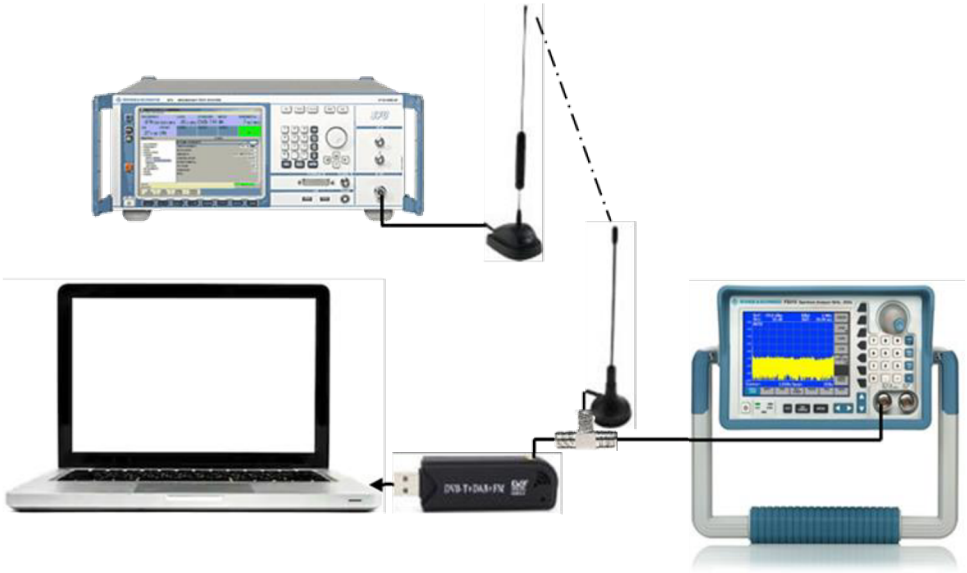
Pomocí tohoto bloku lze vybrat požadovaný rádiový kanál posluchače. Tento blok z přiváděného signálu vytvoří několik signálů, které byly poskládány za sebou. Je to přesný opak multiplexeru, který naopak u vysílače všechny přivedené signály prokládal do jednoho signálu. Díky tomuto bloku lze z různých datových toků zobrazovat obrázky, názvy skladeb a poslouchat hudbu. Signály pro tyto úkony byly přenášeny v jednom signálu, který je právě tímto blokem rozdělen [2],[16].

4.5 Digitálně analogový konvertor (DAC)

Tento blok je určen pro převod signálu z digitální formy na analogový. K této úpravě musí dojít, aby bylo možno interpretovat audio na výstupním zařízení, tedy reproduktoru [2],[17].

5 LABORATORNÍ PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ SIGNÁLU DAB

V této kapitole lze nalézt popis přístrojů použitých pro laboratorní pracoviště a jejich zapojení pro laboratorní úlohu. Všechna testování a měření probíhala na Ústavu radioelektroniky v laboratoři Digitální, televizní a rozhlasové techniky. Jako přijímač DAB signálu je v této práci použit USB dongle RTL2832U, od toho bylo nutné odvíjet celkové zapojení laboratorního pracoviště. Na obrázku 1.11 lze vidět zapojení všech přístrojů určených pro připravovanou laboratorní úlohy. Zapojení je složené z testovacího vysílače signálu DAB, označené jako R&S SFU, a z pasivní antény k němu připojené. Poté signál je přijímán anténou, ta je připojená na rozbočovač. Rozbočovač vede přijímaný signál na spektrální analyzátor R&S FS300 a USB dongle RTL2832U připojený k počítači s programem DAB player.

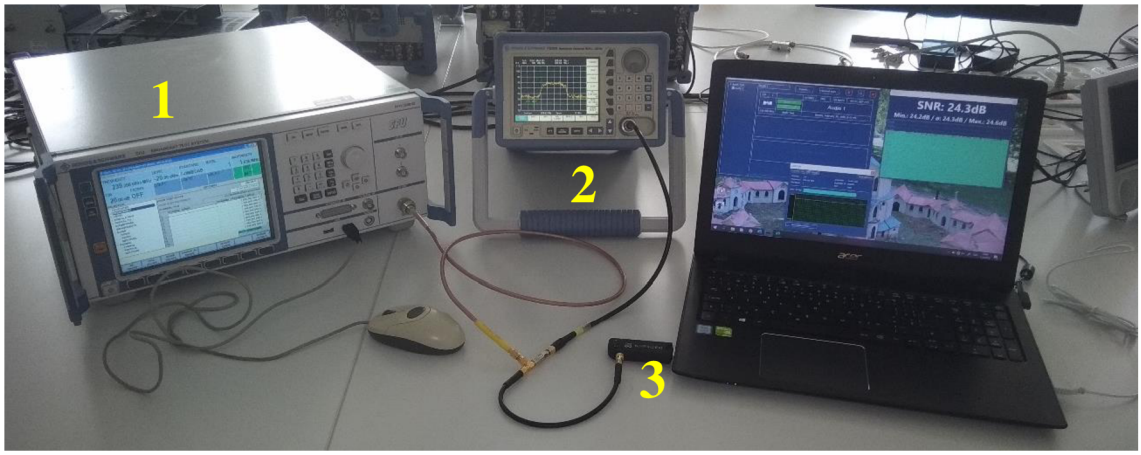


Obr. 1.11: Laboratorní pracoviště pro měření a analýzu signálu DAB.

5.1 Vysílač testovacího DAB signálu R&S SFU

Pro generování testovacího signálu DAB byl použitý vysílač od firmy Rhode & Schwarz (R&S), který podporuje technologie DTMB, DAB a další. Nabízí generování testovacího DAB RF signálu ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 3 GHz. Je tedy možné generovat signály z 3. televizního pásma (174 – 230 MHz) i pásma L (1452 – 1492 MHz). Klíčovou vlastností tohoto vysílače je možnost nastavení hodnoty poměru nosné k šumu (Carrier-to-noise ratio – C/N) a možnost emulace reálného přenosového prostředí pomocí různých modelů přenosových kanálů. U tohoto přístroje jsou k dispozici 4 předdefinované modely kanálů: RA4, RA6, TU6 a TU12. Více informací o těchhle kanálových modelech je možné najít v kapitole 3.1. Díky přesné COFDM modulaci u tohoto vysílače dochází k minimálnímu šumu a k potlačení vysokých harmonických.

Na Obr. 1.12 je vidět názorné zapojení laboratorního pracoviště. Je zde zapojen vysílač testovacího signálu R&S SFU, tento přístroj vysílá signál na zvolené frekvenci. Signál je poté přijat přijímačem RTL2832U, který je pak zpracován programem DAB Player na počítači. Signál jde také na RF spektrální analyzátor R&S FS300 [21].



Obr. 1.12: Zapojení laboratorního pracoviště pro měření signálu DAB (1 – R&S SFU vysílač testovacího signálu, 2 – R&S FS300 RF spektrální analyzátor, 3 – přijímač DAB signálu RTL2832u).

5.2 Přijímač RTL2832U

Přijímač RTL2832U [18] je v podstatě DVB-T COFDM demodulátor, primárně určený pro příjem DVB-T signálu. Podporuje ovšem také příjem FM a DAB/DAB+ signálů. Má vestavěný ADC [18] a tuner FC0012. Tento tuner umožňuje přijímači naladit signál ve frekvenčním rozsahu od 25 MHz do 920 MHz. Z toho plyne, že tento přijímač je určen převážně pro příjem signálu ve 3. televizní pásmu. Pro příjem vysílání v pásmu L není vhodný. Přijímač RTL2832U obsahuje firmware firmy Realtek pro odhad kanálu, odpojení od vzdáleného vysílače, který by způsoboval ozvěny při přesáhnutí ochranného intervalu a potlačení impulzního šumu. Poskytuje dobré řešení pro příjem signálu DAB, a to díky možnosti připojení k počítači pomocí USB 2.0 rozhraní. Signál z přijímače je nutné zpracovávat v programu na počítači. Pro tento účel byl využitý program DAB player, který umožní následovné přehrání přenášené hudební stopy, zobrazení obrázků, textu a informací o přenášeném signálu [18].

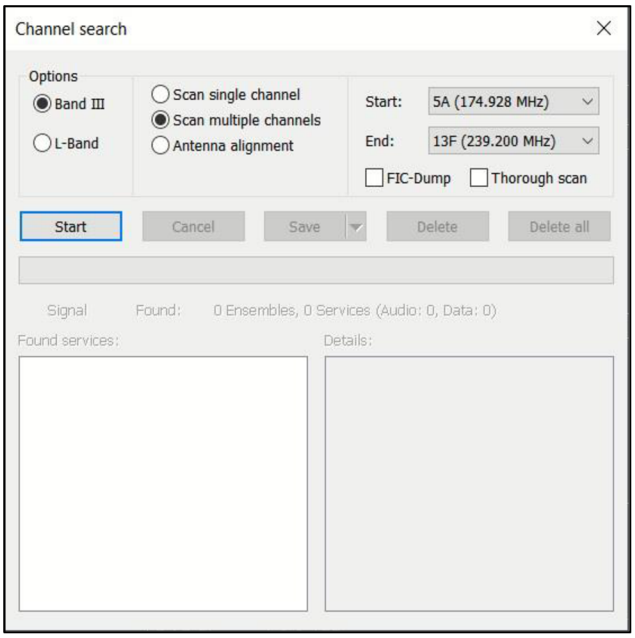
Obr. 1.13: Použitý USB dongle RTL2832U.

5.3 Program DAB player

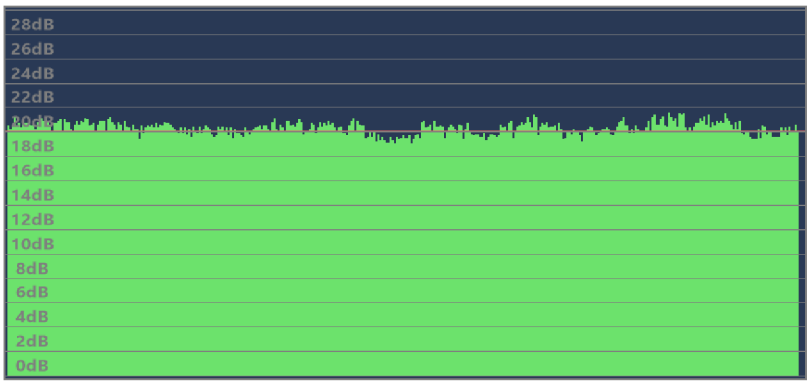
Program DAB Player je určený k přehrávání a vyhodnocení přijímaného signálu DAB. Autorem programu je Andreas Gsinn a lze jej stáhnout ze stránek ukwtv.de[1]. Kromě naladění a přehrávání DAB signálu tento program nabízí také celou řadu dalších informací o přijímaném signálu (např. síla signálu, hodnota parametru Signal-to-Noise Ratio – SNR). V programu si lze zvolit frekvenční pásmo ze zadaného seznamu, na těchto frekvencích lze přijímat požadovaný signál. Dále je možné zobrazovat přenášený obraz danou radiovou stanicí. Většinou jde o obaly alb nebo fotky daných umělců. Nabízí také funkci pro nejlepší nasměrování přijímací antény tak, aby byl přijímaný signál co nejsilnější. Na Obr. 1.14 lze vidět úvodní okno pro vyhledávání stanic a na Obr. 1.15 okno pro zobrazení měřených hodnot SNR po určitý časový úsek [19], [20].

Ovládání programu je velmi jednoduché. Při připojeném USB donglu pro příjem signálu DAB se spustí program DAB Player a ihned otevře okno pro naladění požadovaného frekvenčního pásma. Toto okno je vidět na Obr. 1.14. Po naladění stanic program přejde do okna pro přehrávání radiového vysílání. Zde je možné otevřít okno informací ohledně přijímaného signálu po kliknutí na tzv. „ozubené kolečko“ v pravém horním rohu a výběru záložky s názvem DAB info. Poté se zobrazí okno se složkami, kde lze pozorovat parametry přijímaného signálu. V záložce *Ensemble* je malé okénko pro zobrazení hodnoty SNR. Po kliknutí pravým tlačítkem na toto okénko se zobrazí okno s rozšířenými informacemi SNR, které lze vidět na Obr. 1.15.

[1] https://www.ukwtv.de/cms/downloads-aside/281-dab-player-von-andreas-gsinn.html



Obr. 1.14: DAB Player – Okno pro vyhledávání stanic.



Obr. 1.15: DAB Player – Okno pro zobrazení hodnot SNR.

5.4 Propojovací články

Dříve uvedeny přístroje je potřeba společně propojit. K tomu jsou zde použity koaxiální kabely zakončeny F konektory, pro připojení k atenuátoru je použit konektor BNC. Připojení k vysílači testovacího signálu a spektrálního analyzátoru je zajištěno konektorem N. Pro rozdělení signálu je použit rozbočovač ve formě T článku s konektory F. S anténními propojeními jsou použity dvě pasivní antény s frekvenčním rozsahem 174 – 230 MHz a 470 – 862 MHz. Pro příjem vysílání z éteru je využita pasivní anténa dodávaná společně s USB donglem RTL2832U.

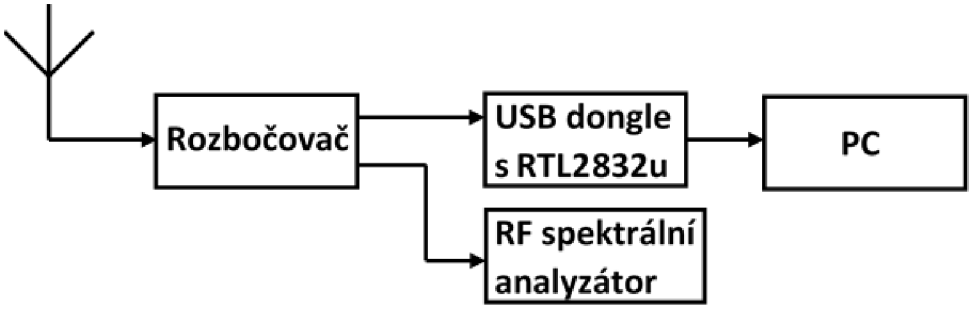
6 MĚŘENÍ A ANALÝZA SIGNÁLU DAB

Měření signálu DAB je rozděleno na dvě části. V první části je přijímáno a měřeno signál DAB z reálného vysílání. Reálné vysílání bylo proměřeno jako test funkčnosti celého navrženého zapojení. V druhé části je vysílán, přijímán a měřen signál DAB pomocí vysílače testovacího signálu R&S SFU v laboratorních podmínkách. Byly měřené a analyzované vlivy přenosových podmínek emulovaných pomocí různých modelů únikových kanálů (RA4, RA6, TU6, TU12), přenosových módů (TM1, TM2, TM3, TM4) a výkonu vysílaného signálu na přijímaný signál. Poté byl do zapojení přidán atenuátor a byla změřena závislost hodnoty *SNR* na útlumu.

6.1 Měření rádiového vysílání

6.1.1 Měření reálného signálu DAB

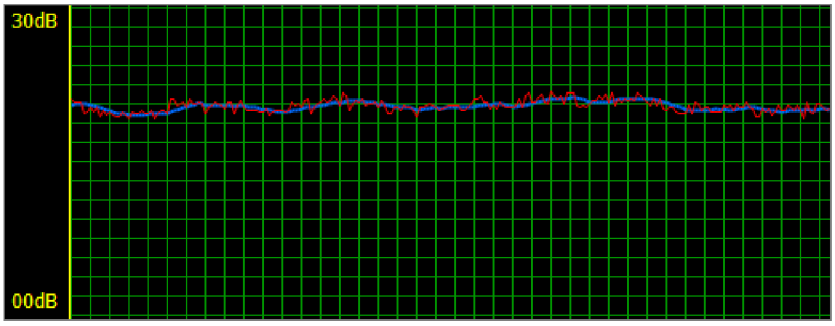
Při testovacím měření byla proměřena síla a bitová rychlost přijímaného DAB signálu z vysílače Hády v Brně s použitím zapojení znázorněném na Obr. 2.1. V blokovém schématu zapojení je znázorněn RF spektrální analyzátor a USB dongle, oba přístroje jsou připojeny na anténu, přes kterou se DAB signál přijímá. USB dongle je připojen k počítači s nainstalovaným programem DAB player pro vyhodnocení přijímaných dat. Vysílač Hády používá kanál 12D, který k vysílání využívá frekvenci 229,072 MHz. Na tomto kanálu bylo přijato 15 rádiových stanic, všechny od Českého Rozhlasu (Radiožurnál, Jazz, Retro, …), celý seznam je uveden v Tabulce 1.3. V tabulce jsou pro každou radiovou stanici uvedeny hodnoty udávané a změřené bitové rychlosti a také jejich identifikační označení (Service ID – S-ID). Pro tyto stanice byla hodnota *SNR* stálých 20 dB, jak je vidět na Obr. 2.2, který zobrazuje časový průběh měření *SNR* při příjmu signálu stanici Českého Rozhlasu Brno.



Obr. 2.1: Zapojení pracoviště pro příjem vysílání DAB.

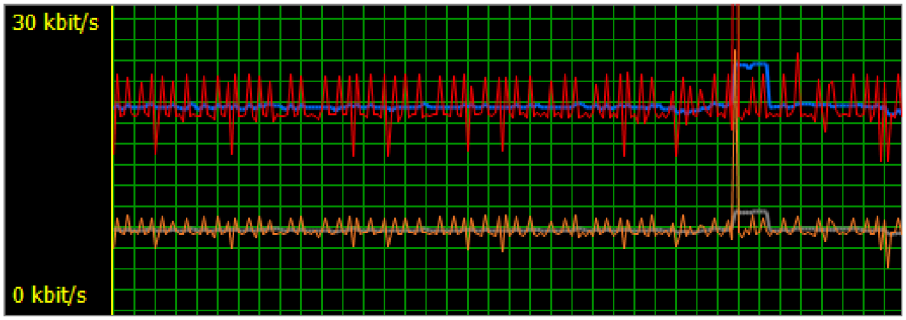
Tabulka 1.3: Seznam naladěných stanic na území VUT, Ústav radioelektroniky, Laboratoř Digitální, televizní a rozhlasové techniky

Stanice	S-ID	Udávaná bitová rychlost [kbit/s]	Změřená bitová rychlost [kbit/s]
CRo – Radiozurnal	232F	64	41
CRo – Dvojka	232E	64	39
CRo – Vltava	232D	80	66
CRo – Plus	2424	48	23
CRo – Wave	2F23	64	40
CRo – Junior	2F25	48	24
CRo – Ddur	2F26	80	63
CRo – Jazz	2F27	80	65
CRo – DAB Praha	2F1A	48	23
CRo – Retro	2F1B	48	22
CRo – Brno	2A0F	48	23
CRo – Ostrava	290D	48	22
CRo – Vysocina	2D09	48	21
CRo – Olomouc	2B07	48	23
CRo – Zlin	2E02	48	22



Obr. 2.2: Časový průběh hodnoty SNR pro stanici ČRo – Brno.

Pomocí programu lze také zjistit bitovou rychlost, která pro stanici ČRo – Brno měla průběh znázorněný na Obr. 2.3. Udávaná bitová rychlost pro tuto stanici je 48 kbit/s, které, jak je vidět z grafu, dosažené nebylo. Změřená bitová rychlost byla v rozmezí od 15 do 23 kbit/s.



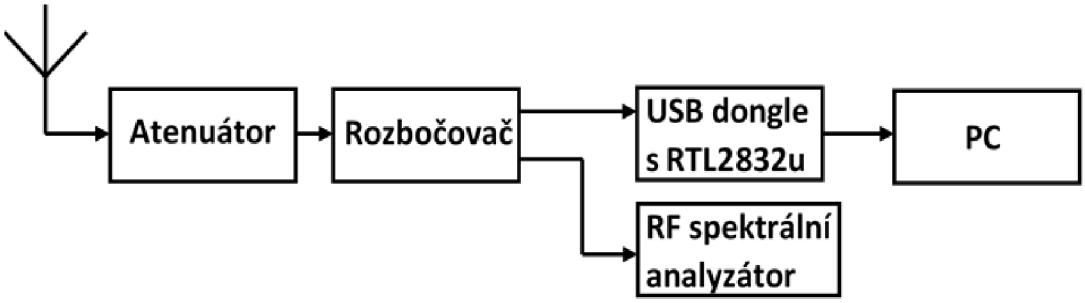
Obr. 2.3: Průběh bitové rychlosti pro stanici ČRo – Brno.

Program DAB Player bez problémů zobrazoval přenášené obrázky, názvy skladeb nebo aktuální zprávy pro danou stanici.

Dosah DAB vysílání v České republice podle experimentálního měření není pro použitý přijímač dostatečně silné, přestože je Česká republika, podle informací z webu digitalradiodab.cz[2], téměř celá pokryta signálem DAB. Svědčí o tom testování příjmu v obcích Radešínská Svratka, Velká Losenice a Nové Město na Moravě. V těchto obcích nebylo možné s použitým přijímačem a programem zachytit ani jednu radiovou stanici.

6.1.2 Měření závislosti hodnot SNR na vloženém útlumu

Toto měření je navrženo pro určení krajních hodnot útlumu, při kterých budou zaznamenány výpadky signálu a úplná ztráta spojení. Měření probíhalo na frekvenci 229,072 MHz, tedy na kanálu 12D. Blokové schéma měřícího pracoviště pro měření krajních hodnot vysílání je znázorněno na Obr. 2.4. Oproti předchozímu měření, zapojení měřícího pracoviště je rozšířeno o atenuátor zapojený mezi anténu přijímače a spektrálním analyzátorem s USB donglem.



Obr. 2.4: Zapojení pracoviště pro měření útlumu vysílání DAB.

Při měření bylo zjištěno, že k výpadkům dojde při hodnotě útlumového článku ATT = 33 dB. Tyto výpadky byly krátké, jejich délka se pohybovala kolem jedné sekundy. K úplné ztrátě signálu došlo při hodnotě útlumu 48 dB. Při zvyšování útlumu

[2] http://www.digitalradiodab.cz/mapy-pokryti.html

do určité míry nebylo znatelné žádné šumění. Od hodnoty útlumu 25 dB došlo při zvýšení útlumu k zašumění příjmu. Po chvíli byl však příjem zbaven šumu díky samoopravným kódům až po již zmíněnou hodnotu 33 dB, kdy už k obnově nedošlo.

6.2 Laboratorní měření

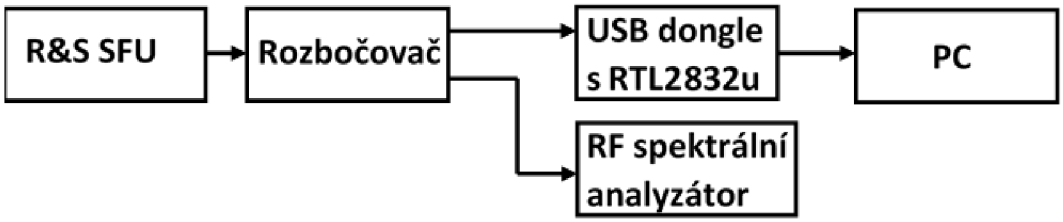
V této kapitole jsou prezentovány výsledky z měření vlivu modelů útlumových kanálů, přenosových módů, vysílacímu výkonu a vloženému útlumu na přijímaný signál. K proměření vlastností signálu DAB je použit vysílač testovacího signálu R&S SFU. S použitím tohoto přístroje je proměřena závislost hodnot *SNR* na hodnotách *C/N* při různých přenosových scénářích. Pro přenos se mění zejména modely únikových kanálů RA4, RA6, TU6 a TU12 a také vysílací módy TM1, TM2, TM3 a TM4. Dále je proměřena závislost přijímaného signálu na útlumu. V následujících kapitolách lze nalézt výsledky laboratorních měření pro různé modifikace zapojení a nastavení signálu.

6.2.1 Měření vlivu vysílacího výkonu na přijímaný signál

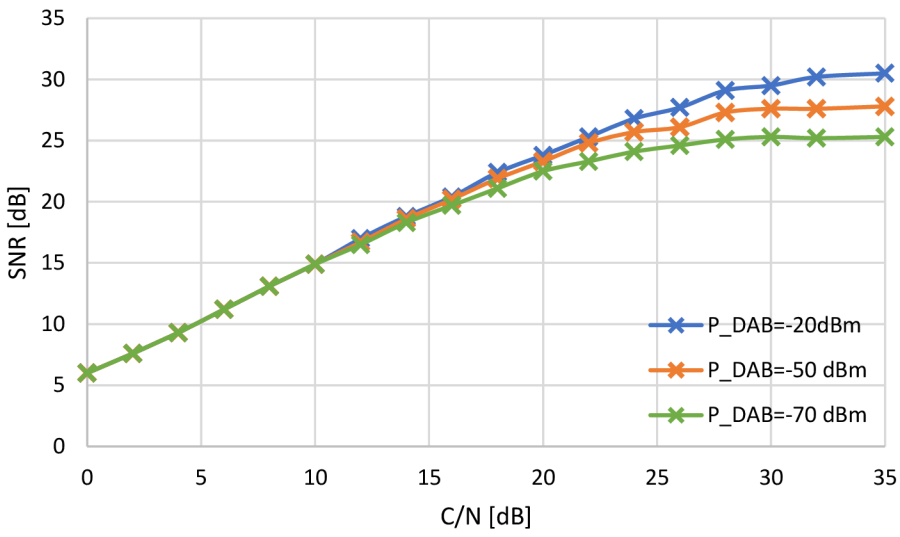
Pro testovací měření DAB signálu bylo použito laboratorní pracoviště zapojeno podle blokového zapojení znázorněného na Obr. 2.5. Vysílač R&S SFU byl nastaven pro vysílání signálu na kanálu 13F, tedy na frekvenci 239,2 MHz. Další nastavené parametry na vysílači lze vidět v Tabulce 1.4.

Tabulka 1.4: Parametry signálu pro měření výkonu.

Šířka pásma	MHz	1,536
Frekvence	MHz	239,2
AWGN		ON
Mód		TM1
Zdroj zvukové stopy		ETI GEN



Obr. 2.5: Zapojení laboratorního pracoviště pro měření signálu v závislosti na zvolených únikových kanálech a vysílacích módech.



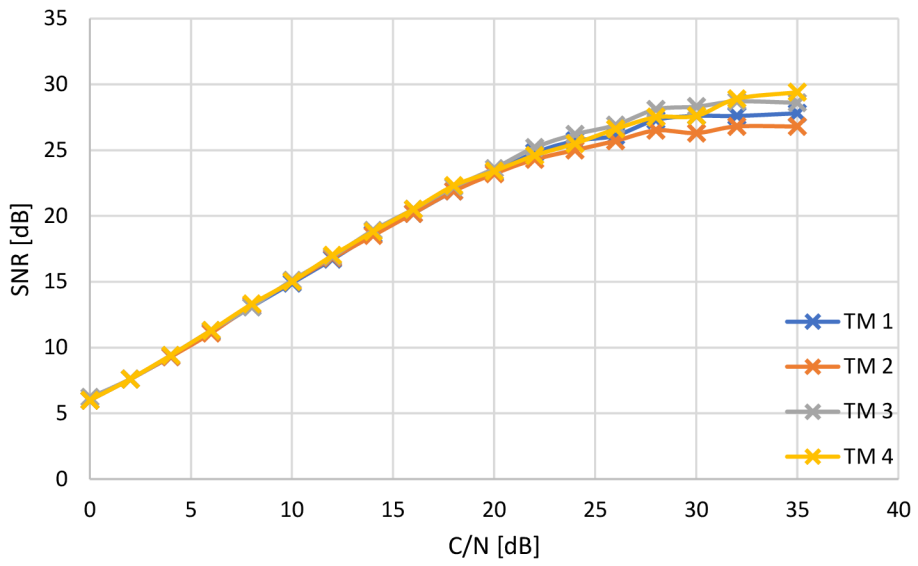
Obr. 2.6: Závislost *SNR* na *C/N* při různých vysílacích úrovních.

Výkon vysílaného signálu byl nastaven na tři různé hodnoty, -20, -50 a -70 dBm. Změřené byly závislosti hodnot *SNR* přijímače na hodnotě *C/N* vysílacího signálu. Tyto závislosti lze vidět vynesené do grafů na Obr. 2.6. Podle testování je těžší připojit se k vysílání s nižším výkonem a na druhou stranu vysoký výkon může zničit přijímač. Ze závislostí lze usoudit, že výkon vysílaného signálu nemá na měření zdánlivě velký vliv. Zvláště je tomu tak u hodnot *C/N* do 15 dB, kde se průběhy téměř překrývají. Po této hodnotě se průběhy začaly oddělovat, nejníže je položen výkon -70 dBm ustálený na maximální hodnotě *SNR* = 25,2 dB. Při výkon P_DAB = -50 dBm se signál ustálil na přibližné hodnotě *SNR* = 27,6 dB a u signálu s výkonem P_DAB = -20 dBm na hodnotě 30,2 dB. Tyto hodnoty *SNR* jsou určeny při hodnotě *C/N* = 32 dB.

Při výkonu P_DAB = -70 dBm byly problémy s vyhledáním stanice, bylo nutné výkon zvýšit a až po naladění stanice na přijímači bylo možné výkon snížit na danou úroveň. Kvůli tomuto byl jako první proměřen výkon P_DAB = -20 dBm, poté P_DAB = -50 dBm a až naposledy P_DAB = -70 dBm. Při nižších hodnotách výkonu docházelo k občasným výpadkům měřeného signálu.

6.2.2 Měření vlivu vysílacích módů (TM) na signál DAB

Pro toto měření bylo použito zapojení, které je uvedeno na Obr. 2.5, a parametry vysílaného signálu, které jsou uvedeny v Tabulce 1.4. Závislosti *SNR* přijímaného signálu na *C/N* vysílaného signálu pro různé TM módy jsou znázorněny na Obr. 2.7. Z nich lze vidět, že každý TM mód ovlivní přenášený signál přibližně stejně. Nejvyšší hodnoty *SNR* dosáhl mód TM 4, nejnižší potom TM 2. Rozdíl mezi maximálními hodnotami *SNR* jsou přibližně 2,5 dB.



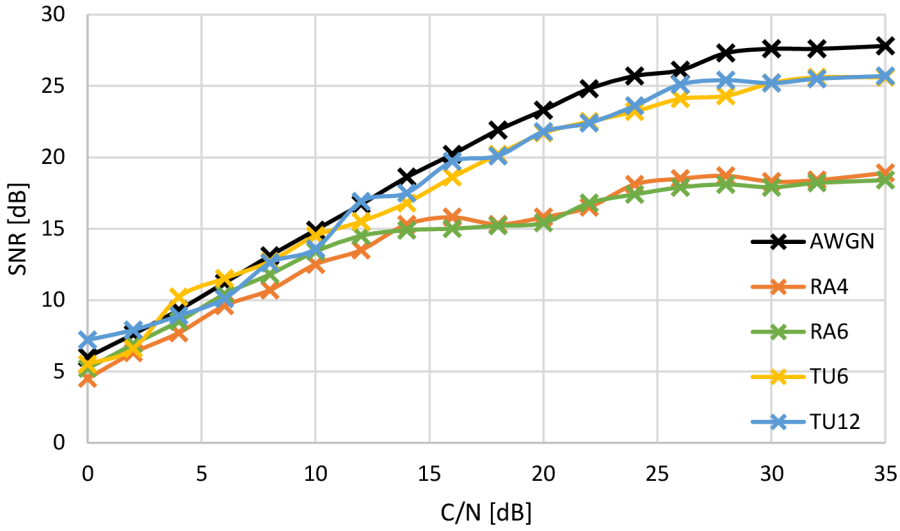
Obr. 2.7: Závislost *SNR* na *C/N* při použití různých vysílacích módů.

6.2.3 Měření vlivu únikových kanálů na hodnotu SNR

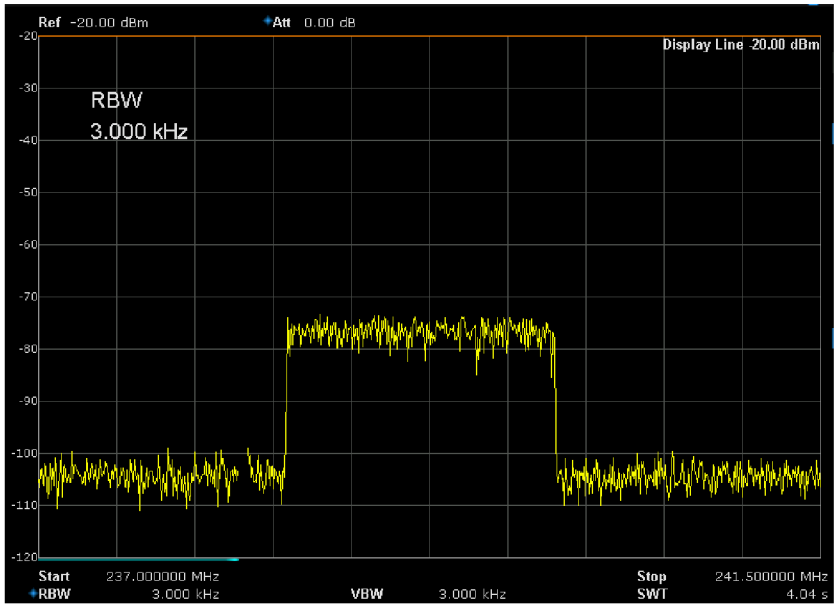
Měření modelů únikových kanálů bylo provedeno na zapojení uvedeném na Obr. 2.5 v kapitole 6.2.1. Pro toto měření byl nastaven výkon vysílače na -30 dBm, frekvence ponechána na hodnotě 239,2 MHz, za mód přenosu byl zvolen TM 1.

Jako první byl změřen signál v kanále AWGN. Ten je považovaný za referenční. Následně bylo měření zopakované i pro modely únikových kanálů. Z výsledků měření lze vidět, že TU6 a TU12 mají podobný průběh díky emulaci stejných přenosových podmínek. Rozdíl je pouze v počtu cest Rayleighova kanálu. Stejně tak jako RA4 s RA6 mají emulovat to stejné prostředí, jen je rozdíl v počtu cest Rayleighova kanálu. Z výsledných grafů lze pozorovat, že únikové kanály RA4 a RA6 nemají tak dobré přenosové vlastnosti jako TU6 a TU12. Únikové kanály TU6 a TU12 mají daleko blíž k referenčnímu měření než kanály RA. Rozdíl hodnot *SNR* u únikových kanálů TU6 a TU12 vůči referenčnímu měření je maximálně 2,5 dB. U kanálů RA4 a RA6 je maximální rozdíl hodnot *SNR* oproti referenčnímu měření téměř 10 dB. Do hodnoty C/N = 10 dB mají závislosti hodnot *SNR* na *C/N* pro všechny kanály stejnou strmost, po této hodnotě se však kanály RA4 a RA6 oddělují a jejich strmost klesá. Maximální dosažené hodnoty *SNR* jsou pro samotné AWGN 27,6 dB, pro RA4 18,9 dB, pro RA6 18,4 dB, pro TU6 25,6 dB a pro TU12 25,7 dB. Při těchto hodnotách již k nárůstu hodnot *SNR* nedochází, dochází jen k jejím mírnému kolísání.

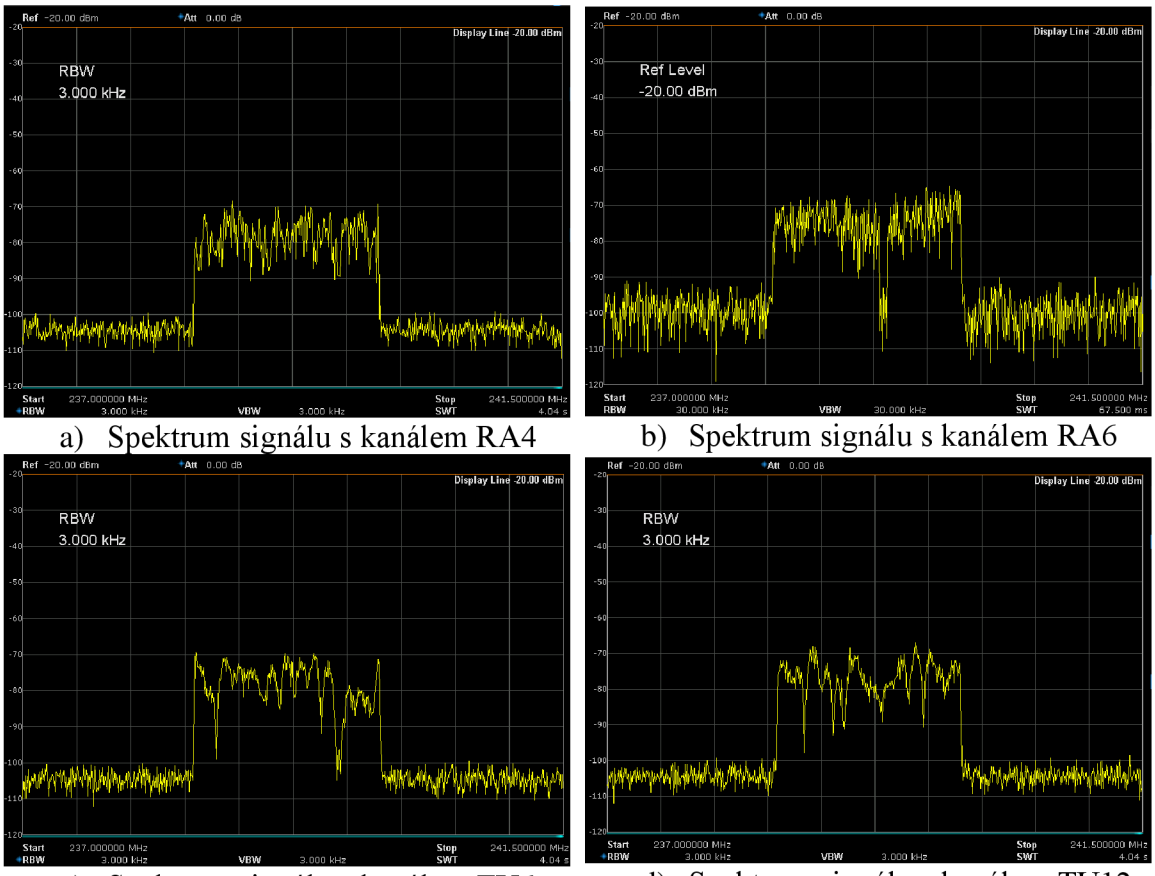
Pro toto měření byly také zaznamenány vlivy AWGN kanálu a únikových kanálů na vysílaný signál z RF spektrálního analyzátoru, které je možno vidět na Obr. 2.9 a 2.10. Na RF spektru pro signál bez únikových kanálů je vidět rovnoměrnost vysílaní. Při použití únikových kanálů lze pozorovat úniky v RF signálu. RF spektra signálu s únikovými kanály RA4 a RA6 mají ve frekvenčním pásmu více úniků, než mají signály s kanály TU6 a TU12. Lze tedy podle těchto RF spekter říct, že modely únikových kanálů TU6 a TU12 představují lepší přenosové vlastnosti než modely únikových kanálů RA4 a RA6.



Obr. 2.8: Závislost *SNR* na *C/N* při AWGN kanálu a různých únikových kanálech.



Obr. 2.9: RF spektrum signálu bez únikových kanálů.



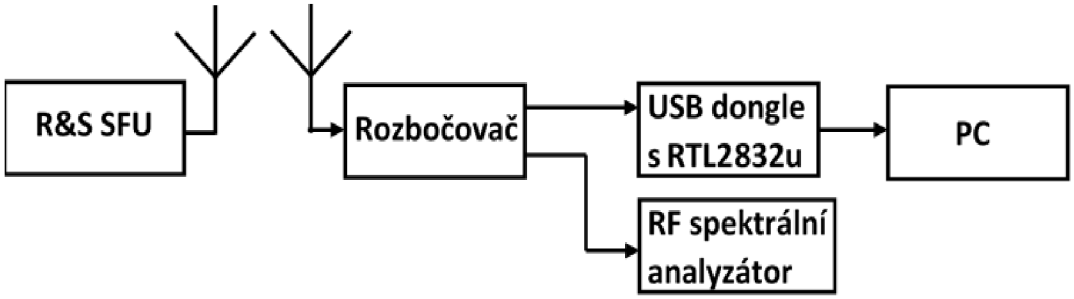
a) Spektrum signálu s kanálem RA4 b) Spektrum signálu s kanálem RA6

c) Spektrum signálu s kanálem TU6 d) Spektrum signálu s kanálem TU12

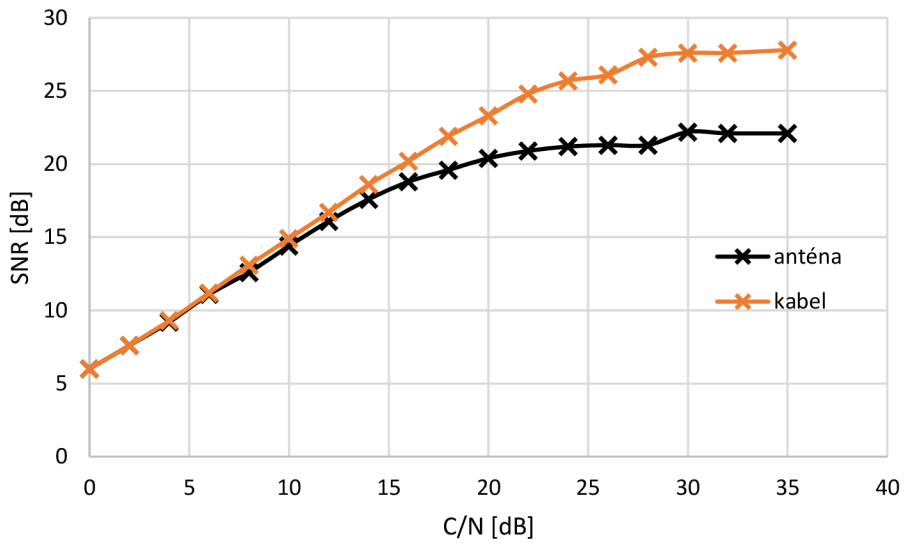
Obr. 2.10: Spektra signálů bez a se zapnutými různými únikovými kanály.

6.2.4 Měření rozdílů dvou možností připojení

Laboratorní pracoviště na Obr. 2.5 bylo modifikováno pro měření pomocí antén. Toto zapojení je zobrazeno na Obr. 2.11. Jedná se o měření pro znázornění rozdílu mezi měřením v laboratoři pomocí kabelu a měřením pomocí antén. Ze změřené závislosti *SNR* přijímaného signálu na *C/N* vysílaného signálu uvedené na Obr. 2.12 lze pozorovat několik rozdílů oproti kabelovému spoji. Strmost grafu do hodnot C/N=15 dB je totožná pro oba druhy spojení, poté však pro anténní spojení dochází k rychlému ustálení na jedné hodnotě a stoupání je minimální. Za ustálený stav lze označit úroveň SNR=22 dB pro anténní spojení a pro kabelové spojení SNR=28 dB.



Obr. 2.11: Zapojení měřícího pracoviště pro měření pomocí antén.



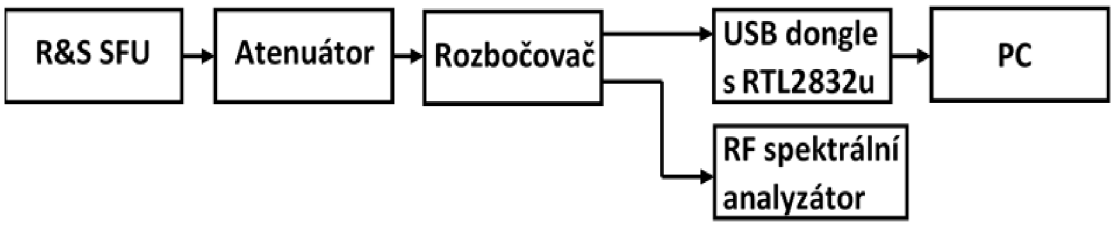
Obr. 2.12: Závislost *SNR* na *C/N* s různými připojeními.

6.2.5 Měření závislosti SNR na hodnotě vloženého útlumu

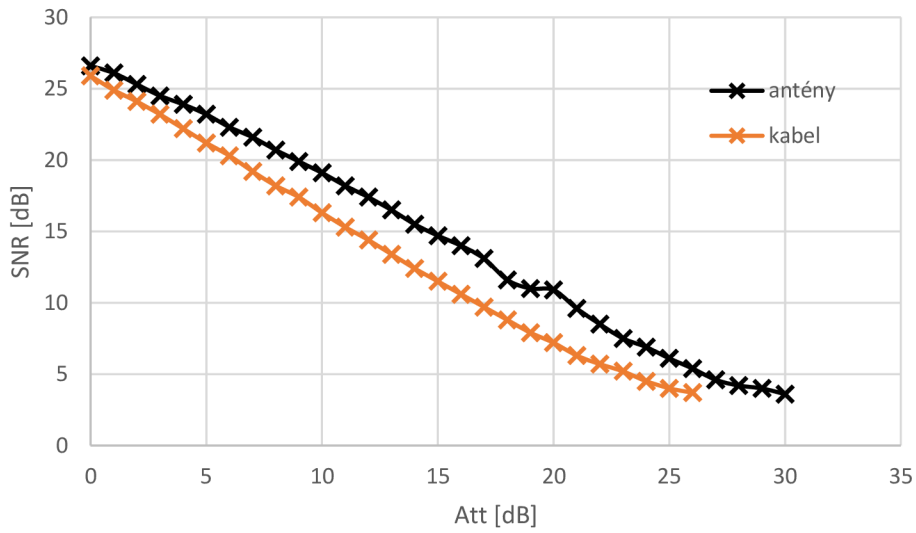
Měření bylo provedeno se zapojením pracoviště znázorněném na Obr. 2.13. Pro měření pomocí antén bylo měření modifikováno připojení dvou antén na výstup atenuátoru a vstup rozbočovače. Na tomto zapojení lze vidět, že zapojení z kapitoly 6.2.1 bylo modifikováno vložením atenuátoru mezi TX a RX. Toto zapojení bylo proměřeno na frekvenci 239,2 MHz, výkonu -30 dBm, módu TM1 a hodnotě *C/N* vysílače 40 dB.

Změřené závislosti lze vidět na Obr. 2.14, kde se nachází graf změřených hodnot s propojením pomocí kabelu a následně pomocí přenosu přes antény. Je vidět, že na přenosu signálu pomocí kabelu má útlum větší vliv, díky přesnějšímu měření. Přesnost příjmu pomocí antén, které jsou v přímé viditelnosti, není tak dobrá jako u kabelu, protože je průběh ovlivněn odrazy a šířením jinými cestami, než je ta přímá, také i vysíláním z éteru může dojít k určitému rušení. Měřené hodnoty mohou být dále ovlivněny okolními bezdrátovými přenosy. Závislost pro propojení kabelem má lineárnější průběh než přenos zrealizovaný pomocí antén. Lineární průběh u kabelového spoje dostáváme kvůli tomu, že útlum je přidáván k pevně dané hodnotě *SNR,* kdežto u anténního přenosu dochází k mírným změnám *SNR,* daných odrazy a vícecestným

šířením. U zapojení s kabelem začal signál vypadávat u hodnoty útlumu 25 dB, hodnota *SNR* byla 4 dB a k úplné ztrátě došlo při útlumu 27 dB. Přibližná hranice úplného vypadnutí signálu byla stanovena na hodnotu *SNR* přijímače 3 dB.



Obr. 2.13: Zapojení měřícího pracoviště pro měření s vloženým útlumem.



Obr. 2.14: Závislost *SNR* na hodnotě útlumu.

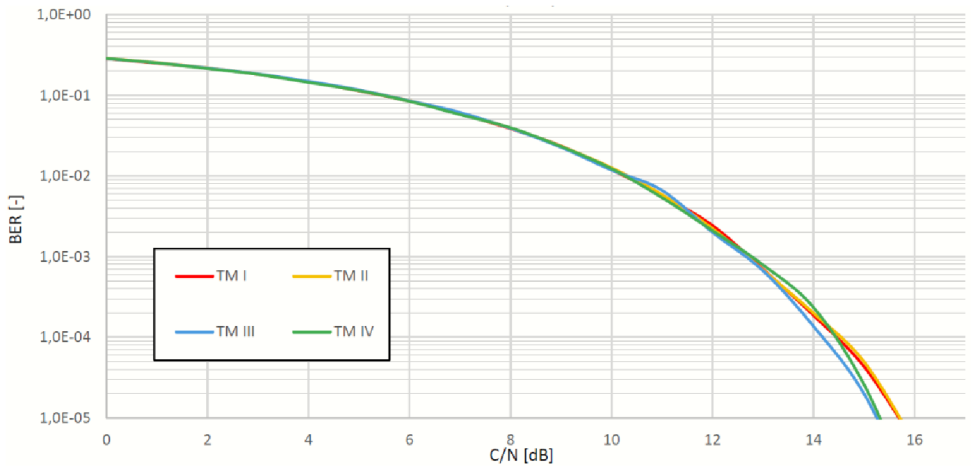
7 ZHODNOCENÍ

V následující kapitole se nachází diskuze výsledků této práce s výsledky jiných studií, které byly vypracovány na podobné téma, nicméně dostatečné množství vhodné literatury nebylo dostupné. Dále jsou zmíněny další alternativy k programu DAB Player, které mohou být použity k přijmu DAB rádiových stanic. Pro porovnání jsou k dispozici náhledy jejich vzhledu, stručný popis a zhodnocení samotné manipulace s nimi.

7.1 Porovnání výsledků s jinými pracemi

7.1.1 Porovnání výsledků měření vysílacích módů (TM)

Pro toto porovnání poslouží diplomová práce Ing. Kresty na téma Analýza přenosu mobilního digitálního rozhlasového vysílání [6]. Ten ve svojí práci využívá simulací v programu MATLAB. Z jeho výsledků pro měření přenosových módů, zobrazených na Obr. 2.15, lze vidět, že se tyto módy od sebe téměř neliší, stejně jako u měření v této práci. Závislosti lze nalézt v kapitole 6.2.2 v Obr. 2.7. Nelze tvrdit, že by výsledky byly totožné, protože v práci [6] je znázorněna závislost hodnot *BER* na hodnotách *C/N*, zatímco v této práci je zobrazena závislost hodnot *SNR* přijímače na hodnotách *C/N*. I když toto porovnání není úplně vhodné, tak lze rozeznat několik podobností. Je vidět, že závislosti z Obr. 2.15 se kryjí po určitou hodnotu *C/N*, kdy se jednotlivé přenosové módy začínají nepatrně oddělovat. Stejného výsledku je dosaženo i při měření v této práci, kde se taktéž po dosažení určité hodnoty *C/N* začaly jednotlivé křivky oddělovat. Rozdíl u konečných hodnot je však v obou případech velmi malý.



Obr. 2.15: Závislost hodnot BER na hodnotách C/N (převzato z [6]).

7.1.2 Porovnání výsledků z měření vlivu modelů únikových kanálů

Pro toto porovnání byla zvolena práce s názvem Field measurement based performance analysis of Digital Audio Broadcasting (DAB) reception in mobile channels [22]. V této práci je pro měření využito vysílací pásmo L a měření probíhá

v pohybujícím se automobilu různými rychlostmi ve Španělsku ve městě Madrid a jeho blízkém okolí. Toto měření by se tak dalo považovat za částečný ekvivalent měření modelů únikových kanálů, které znázorňují příjem pro oblasti městské zástavby a otevřené krajiny v rychlostech od 0 km/h do 90 km/h. V této práci lze nalézt měřené závislosti hodnot *BER* na hodnotách *C/N*, opět tedy nelze srovnat přímo, ale lze z těchto závislostí vyvodit jisté podobnosti. Z výsledků měření lze pozorovat, že v městské zástavbě má signál vyšší hodnoty *BER,* než je tomu tak u otevřené krajiny. To tedy naznačuje, že v městské zástavbě byla naměřena horší kvalita přenosu, než je tomu v otevřené krajině. Stejně tak dojde i k dřívějšímu snížení hodnoty *BER* přenosu v případě otevřené krajiny než v případě městské zástavby. V této práci je to prezentováno pomocí závislostí na Obr. 2.8 v kapitole 6.2.3. Na těchto závislostech lze vidět, že pokles hodnot *SNR* začne dříve pro RA modely než pro TU modely. To tedy značí, že při použití modelů únikových kanálů dojde k tomu, že příjem v městské zástavbě se zdá být kvalitnější než v otevřené krajině. To tedy podle reálných měření z práce [22] není pravda.

7.2 Další programy pro příjem signálu DAB

V rámci příjmu signálu DAB pomocí USB donglu RTL2832U byly testovány i další programy pro zpracování tohoto signálu. Každý program je vytvořen pro specifické přijímače, ne všechny dostupné programy na internetu lze s přijímačem RTL2832U používat. Všechny níže vyjmenované programy jsou však s použitým přijímačem RTL2832U schopny plně pracovat. Všechny programy jsou zdarma ke stažení. Některé jsou pro běžné používání poněkud složité, proto by nebyly vhodné pro laboratorní výuku, kde je třeba intuitivnější ovládání. V následujících kapitolách budou některé programy uvedeny a popsány. Všechny programy a jejich hlavní funkce jsou shrnuté v Tabulce 1.5.

Tabulka 1.5: Seznam programů pro příjem DAB vysílání.

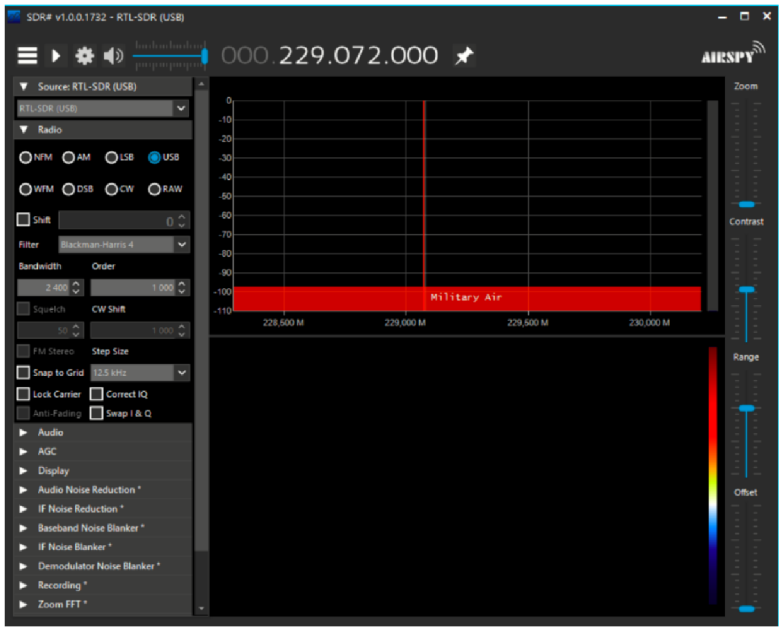
Název programu	Měření SNR	Měření bitové rychlosti	Zobrazení RF spektra	Konstelační diagram
DAB Player	Ano	Ano	Ne	Ne
SDRSharp	Ano	Ne	Ano	Ne
HDSDR	Ne	Ne	Ano	Ne
SDR – Radio	Ne	Ne	Ano	Ne
Qt – DAB	Ano	Ne	Ano	Ano

7.2.1 SDRSharp

Jedná se o software primárně určený pro produkty firmy Airspy, která jej také vyvinula. Lze jej stáhnout zdarma ze stránky airspy.com[3]. S přijímačem RTL2832U je

[3] https://airspy.com/download

však také kompatibilní. V rámci testování byla zvolena frekvence 229,072 MHz, podle kmitočtu vysílání nejbližšího vysílače. Na této frekvenci nebyl program schopný vysílání přijmout. V oblasti FM vysílání (87,6 – 107,9 MHz) byl program schopný několik stanic přijmout. Navíc jeho ovládání je celkově dost obtížné a samotné nastavení před příjmem je poměrně zdlouhavé. Program zobrazuje podobné informace jako program DAB Player, dokonce i RF spektrum signálu. Vzhled programu je zobrazen na Obr. 2.16.

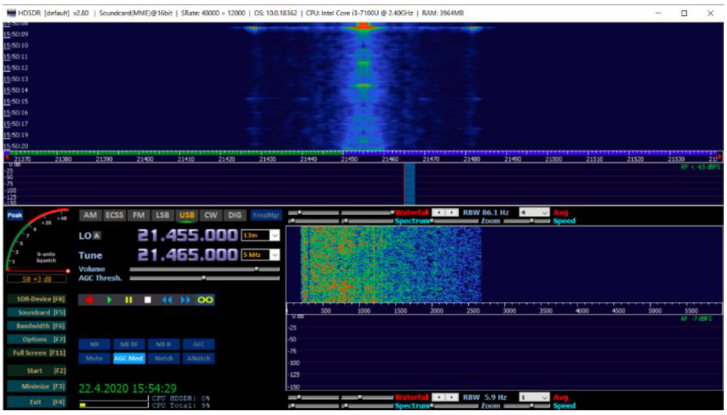


Obr. 2.16: Program SDRSharp.

7.2.2 HDSDR

Dalším testovaným programem byl program HDSDR (viz Obr. 2.17) od vývojáře Bjarne Mjelde. Lze jej stáhnout zdarma ze stránky hdsdr.de[4], kde je pro správnou funkčnost programu potřeba stáhnout také program Zadig. Tento program je schopný pracovat s přijímačem RTL2832U po nainstalování dodatečných rozšíření a programu Zadig, pro práci se zařízeními připojenými přes USB. Program zobrazuje frekvenční pásmo, akustickou stopu a také spektrum signálu. U tohoto programu se nepodařilo naladit signál DAB i přesto, že je udávaná jeho plná podpora. Ovládání je jednoduché a intuitivní. Pokud se něco nedaří, program sám nabídne automatickou opravu nebo dá radu, co udělat jinak.

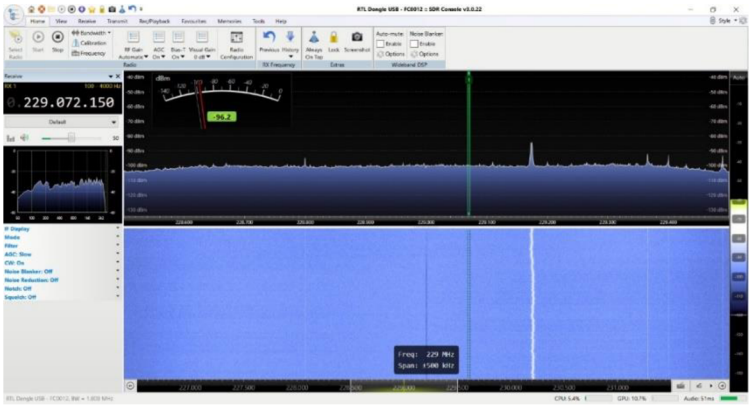
[4] http://hdsdr.de/RTLSDR_with_HDSDR.pdf



Obr. 2.17: Program HDSDR.

7.2.3 SDR-Radio

Dalším z programů je software s názvem SDR – Radio vyvinutý Simonem Brownem. Je zdarma a lze jej stáhnout na stránce aa5sh.com[5]. Program je schopný přehrát zvuk přenášený signálem DAB, zobrazit frekvenční rozsah a spektrum přeneseného signálu. Program neměří žádné hodnoty SNR nebo bitové rychlosti jako program DAB Player. Vzhled programu lze vidět na Obr. 2.18.



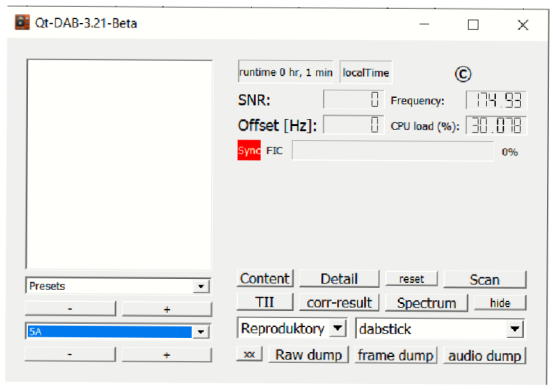
Obr. 2.18: Program SDR – Radio.

7.2.4 Qt – DAB

Posledním testovaným programem je program Qt – DAB vyvinutý programátorem Jvanem Katwijkem. Program je zdarma k dostání na stránkách github.com[6]. U tohoto programu je uváděno, že zvládá zobrazení spektra, konstelační diagramy a přesné měření signálu DAB. Pro samotné propojení programu s přijímačem RTL2832U je potřebné doinstalovat spoustu dalších ovladačů pro samotný přijímač a program. Ovládání programu je snadné, ale měření není tak přesné, jak je uváděno, dochází k občasnému vypadávání příjmu, a častým zpožděním z vysílačů dochází ke zdvojení zvuku. Pro měření tak není ideální. Okno programu lze vidět na Obr. 2.19.

---

[5] https://www.aa5sh.com/?page_id=65
[6] https://github.com/JvanKatwijk/qt-dab



Obr. 2.19: Program Qt – DAB

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo prostudovat standard pro zemské digitální rozhlasové vysílání DAB/DAB+ se zaměřením na příjem rozhlasu pomocí SDR přijímače s čipem RTL2832U. Dále navrhnout a realizovat laboratorní pracoviště pro měření a analýzu DAB/DAB+ rozhlasového signálu.

V teoretické části této práce je popsán standard pro zemské digitální rozhlasové vysílání DAB/DAB+. Především bylo zaměřeno na přenosový řetězec TX a RX na úrovni fyzické vrstvy. Byly popsány také modely ztrátových kanálů, které byly použity u laboratorního měření, přenos signálu reálným prostředím a jeho ovlivňování okolními jevy.

Praktická část je složena z měřícího pracoviště pro proměření standardu pro zemské digitální rozhlasové vysílání DAB/DAB+. Byly zde popsány použité měřící přístroje a zvolený program pro zpracování přijímaného signálu. Nejprve bylo provedeno měření volně dostupného radiovysílání pomocí přijímače s čipem RTL2832U a programu DAB player. Z tohoto měření bylo zjištěno, že v laboratoři digitální, televizní a rozhlasové techniky je možné přijmout z vysílače Hády 15 radiových stanic. Tyto stanice měly hodnotu *SNR* okolo 20 dB a sílu signálu na výborné úrovni díky přímé viditelnosti na vysílač.

Dále byl pro laboratorní měření využit vysílač testovacího DAB signálu R&S SFU. Na tomto přístroji byly nastavovány různé konfigurace vysílaného DAB signálu. Byly proměřeny vlivy modelů únikových kanálů RA4, RA6, TU6 a TU12 nebo vysílacích módů TM1, TM2, TM3 a TM4 na přijímaný signál. Proměřeny byly také závislosti hodnoty *SNR* přijímaného signálu na hodnotách *C/N* vysílaného signálu při různých nastaveních. Z těchto měření bylo zjištěno, za jakých podmínek má přenos nejlepší vlastnosti.

V této práci by bylo možné provést detailnější proměření parametrů DAB signálu, případně použít nějaký jiný program vhodnější pro laboratorní měření. To bylo znemožněno kvůli situaci ohledně nemoci Covid-19 a následné karanténě. S použitým přijímačem s čipem RTL2832U nebylo možné přijímat pásmo L. Bylo by proto dobré vyzkoušet i jiný přijímač podporující frekvence L pásma, aby byla možnost proměřit i toto pásmo. V této práci bylo měřeno pouze na frekvencích 3. televizního pásma.

Navržená laboratorní úloha zobrazená v Příloze 1 bude sloužit pro výuku v předmětu Digitální televizní a rozhlasové systémy. V Příloze 2 lze nalézt vzorové vypracování dané laboratorní úlohy Část bakalářské práce byla prezentována na soutěži EEICT 2020 pod názvem Laboratory workplace for performance measurement of the DAB/DAB+ system [23].

LITERATURA

[1] ETSI EN 300 401 V1.4.1 (2006-06). Radio Broadcasting Systems. Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. Sophia Antipolis: European Standard ETSI, 2006.

[2] *Digital audio broadcasting: principles and applications of DAB, DAB+ and DMB*. 3rd ed. Editor Wolfgang HOEG, editor Thomas LAUTERBACH. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 04-705-1037-4.

[3] Portál digitalradiodab.cz [online]. Dostupné z: www.digitalradiodab.cz

[4] EUREKA 147, *Digital Audio Broadcasting*, August 1997, 24 stran.

[5] MELTZER, Stefan; MOSER, Gerald. *MPEG-4 HE-AAC v2–audio coding for today's digital media world*, EBU technical Review, 2006, 12 stran

[6] KRESTA, Daniel. *ANALÝZA PŘENOSU MOBILNÍHO DIGITÁLNÍHO ROZHLASOVÉHO VYSÍLÁNÍ*, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2016, 60 stran

[7] BOSI, M., BRANDENBURG, K., QAUCKENBUSH, S., FIELDER, L., AKAGIRI, K., FUCHS, H., & DIETZ, M. *ISO/IEC MPEG-2 advanced audio coding*. Journal of the Audio engineering society, 1997, 25 stran

[8] AGARWAL, Ashish. *DAB SYSTEM: TRANSMITTER, RECEIVER AND SVM CLASSIFIER.* Department of Electronics and Communication Engineering National Institute of Technology Rourkela-769008, 2011, 59 stran

[9] LEE, Gwangsoon, et al. *Development of terrestrial DMB transmission system based on Eureka-147 DAB system.* IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51.1: 63-68.

[10] PARK, Sung-Ik, et al. *System and method for providing terrestrial digital broadcasting service using single frequency network.* U.S. Patent No 7,564,905, 2009.

[11] GANDY, Chris. *DAB: an introduction to the Eureka DAB System and a guide to how it works*. BBC R&D White Paper, 2003, 109 stran

[12] BĚLOHLÁVEK, J. *Návrh typu modulace pro prostředí s rušením.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 55 stran

[13] CLARK, Thomas R.; O'CONNOR, Sean R.; DENNIS, Michael L. *A phase-modulation I/Q-demodulation microwave-to-digital photonic link*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58.11: 3039-3058.

[14] SHELSWELL, Peter. *The COFDM modulation system: the heart of digital audio broadcasting*. Electronics & communication engineering journal, 1995, 7.3: 127-136.

[15] FORNEY, G. David. *The viterbi algorithm*. Proceedings of the IEEE, 1973, 61.3: 268-278.

[16] FUJINAMI, Yasushi; VELTMAN, Markus H. *Data demultiplexer*. U.S. Patent No 5,521,922, 1996.

[17] DEVICES, Analog. *Analog-digital conversion handbook*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.

[18] Portál realtek.com [online]. Dostupné z: https://www.realtek.com/en/products/communications-network-ics/item/rtl2832u

[19] Portál rtl-sdr.com [online]. 2014-5-2. Dostupné z: https://www.rtl-sdr.com/new-dab-player-rtl2832u/

[20] Portál ukwtv.de [online]. Dostupné z: https://www.ukwtv.de/cms/downloads-aside/281-dab-player-von-andreas-gsinn.html

[21] R&S SFU Broadcast Test System Data sheet. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, v06.00, 2007.

[22] VELEZ, M., et al. *Field measurement based performance analysis of digital audio broadcasting (DAB) reception in mobile channels*. In: 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference. IEEE, 2005. p. 247-251.

[23] KAŠTÁNEK, Petr. *LABORATORY WORKPLACE FOR PERFORMANCE MEASUREMENT OF THE DAB/DAB+ SYSTEM,* Student EEICT 2020.

PŘÍLOHA 1 – VZOROVÉ ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Digitální televizní a rozhlasové vysílání (MDTV, LDTV)

Laboratorní úloha č. X

Měření a analýza vlastností systému DAB

Cílem úlohy je měření a analyzování signálu DAB vysílání pomocí přijímače SDR RTL2832U a vysílače testovacího signálu R&S SFU. Díky těmto přístrojům a programu DAB Player studenti mohou změřit parametry systému DAB. Měření je rozděleno na dvě části. První částí je měření reálného vysílání DAB signálu a určení největšího možného útlumu pro příjem. Druhá část se zabývá měřením vysílání pomocí vysílače testovacího signálu R&S SFU. Pomocí něj je možné proměřit vliv únikových kanálů RA4, RA6, TU6 a TU12 na signál, také vliv výkonu na přenos, vliv zvoleného přenosového módu TM1, TM2, TM3 a TM4 a také rozdíl mezi anténním přenosem a přenosem přes kabel.

Teoretický úvod

Přenos audia pomocí standardu digitálního rádiového vysílání, tzv. Digital Audio Broadcasting (DAB), je vyvíjeno už od 80. let 20. století. V České republice byl poprvé spuštěn vysílač pro vysílání signálu DAB v roce 1999 v Praze na Žižkovské věži, ovšem k většímu rozsahu vysílání došlo až před pár lety díky firmě Teleko. Nástupcem standardu DAB je efektivnější a výkonnější standard nazývaný DAB+. První rádiová stanice, která začala využívat standard DAB+ byl Český rozhlas v roce 2015. Pro digitální rádiové vysílání se v České republice využívá 3. televizní pásmo (174 – 230 MHz) nebo pásmo L (1,5 – 1,7 GHz), od kterého se však již upouští a vysílat se bude pouze na 3. televizním pásmu. Digitálním audio vysíláním se nahrazuje analogové audio vysílání, hlavně kvůli lepší kvalitě přenosu u pohybujících se přijímačů ve městě, kde je hodně rušení z důvodu velkého počtu odrazů, nebo i v otevřeném prostoru při rychlých změnách pohybu. Dalším důvodem nahrazování analogového vysílání za digitální je lepší kvalita zvuku a možnost přenášet text i obrázky. Tento standard také nabízí možnost přenášet více rádiových stanic na jedné frekvenci, což urychluje přepínání mezi stanicemi.

Systém DAB využívá kódování založené na ztrátové kompresi dat. Stejně tak i vysílání DAB+, rozdíl je převážně v efektivitě a kvalitě vysílaných dat při daném kódování. Pro vysílání DAB je používán kodek MPEG-1 Audio layer 2 (označováno též jako MPEG-2 Audio layer 2 nebo MP2). Je to jeden z mála kodeků, které pro audio vysílání na každý monofonický kanál dosahují rychlosti přenosu od 63 až do 192 kbit/s. Vyvinut byl tak, aby měl co nejmenší zpoždění, komplexnost, odolný proti chybám přenosu a s krátkou dobou přepnutí. Jedná se o kodek využívající rozdělení na

podpásma, přesně na 32 pásem pro kratší odezvu. DAB+ využívá kodek MPEG-4 HE-AAC v2. HE-AAC značí, že se jedná o vysoce účinné audio kódování (High Efficiency). Má dvě verze. První verze využívá replikace spektrálního pásma (Spectral Band Replication – SBR). Druhá verze tyto replikace spojuje pomocí parametrického stereo kódování, což je další ztrátová komprese zvuku. Toto zajišťuje mnohem nižší přenosovou rychlost. Aby AAC fungovalo správně a byla dosažena dostatečná kvalita, tak musí být rychlost přenosu alespoň 128 kbit/s.

Pozemní vysílání při jeho přenosu ovlivňuje spousta faktorů, obzvláště u vysílání DAB, při kterém se ve většině případů přijímač pohybuje v prostoru po náhodné trajektorii. Takovým pohybem se neustále mění počet přijímaných vln a dochází ke změně frekvence kvůli Dopplerovu jevu. Vlny se poté od překážek odráží, čímž vzniká vícecestné šíření a další rušení. Toto rušení poté signál tlumí, dává jisté zpoždění a mění fázi. Na přijímači se ve většině případů objevuje zašumění signálu, které je způsobeno průchodem signálu kanálem AWGN (Additive White Gaussian Noise – přídavný bílý Gaussovský šum). Pro případy, kdy mezi vysílačem a přijímačem je přímá viditelnost a signál se tak nikde neodráží, je zde Gaussovský kanál. Který právě takový případ popisuje a signál je pouze utlumen zmíněným AWGN. Jde však o případ spíše ideální. Jako alternativy Gaussovského kanálu lze uvézt další dva kanály. Riceův kanál, který znázorňuje přenos signálu přímou cestou s odrazy a Rayleighův kanál, který označuje přenos signálu bez přímé cesty.

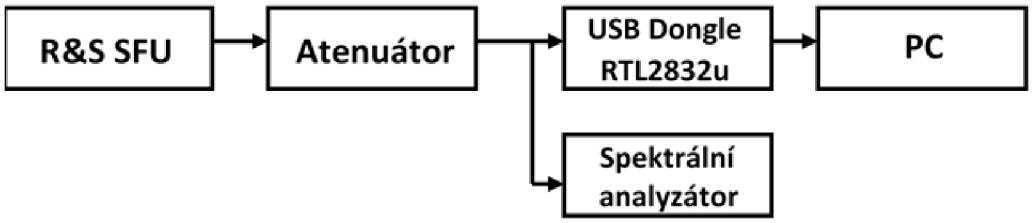
Pro více praktické znázornění přenosu v laboratorních podmínkách jsou zde modely kanálů. První z nich je označován TU (Typical Urban). Ten je určen pro modelování situace v městské zástavbě při rychlosti přijímače 50 km/h bez přímé viditelnosti na vysílač. Jsou dvě verze, TU6 pro příjem 6 cest typu Rayleighova kanálu a TU12 pro příjem 12 cest typu Rayleighova kanálu. Pro modelování situace v nezastavěném prostoru při rychlosti 100 km/h je kanál RA (Rural Area). Opět má dvě verze, RA4 a RA6 pro příjem 1 cesty typu Riceova kanálu a 3 nebo 5 cest typu Rayleighova kanálu.

Digitální rádiové vysílání probíhá v určitých módech, které jsou rozdělené podle frekvence a pásma. Tyto módy jsou čtyři, a to TM I, TM II, TM III a TM IV. Mód TM1 je určen pro vysílání signálu DAB na 3. televizním pásmu. Vysílání je uskutečněno na 1536 nosných v každém vysokofrekvenčním pásmu s rozestupem 1 kHz. TM1 má symbolovou periodu 1246 μs a délku ochranného intervalu 246 μs. Tento mód je velice citlivý na změnu fáze. V České republice se dále pro DAB vysílání používá pásmo L, které využívá módů TM II a TM IV. Mód TM2 využívá 384 nosných v každém vf pásmu s rozestupem 4 kHz. Tento mód má oproti TM1 nižší symbolovou periodu 312 μs a ochranný interval je 1/4 ze symbolové periody, stejně jako u TM1. Zbývající mód TM III je využíván pro přenosy pozemních vysílání a satelitních vysílání pod 3 GHz. Nosné frekvence těchto módů jsou stanoveny na násobky 16 kHz.

Pro generování DAB signálu je k dispozici vysílač testovacího signálu R&S SFU, který podporuje vysílání signálu DAB a má integrované modely únikových kanálů. Pro příjem je určen USB dongle RTL2832U s vestavěným tunerem FC0012 podporující příjem vysílání s frekvencí od 25 do 920 MHz. Přijímaný signál je zpracován na počítači v programu DAB player.

Tab. X.1: Srovnání stanic a jejich bitové rychlosti

Stanice	S-ID/PI	Bitová rychlost [kbit/s]
CRo – Radiozurnal	232F	64
CRo – Dvojka	232E	64
CRo – Vltava	232D	80
CRo – Plus	2424	48
CRo – Wave	2F23	64
CRo – Junior	2F25	48
CRo – Ddur	2F26	80
CRo – Jazz	2F27	80
CRo – DAB Praha	2F1A	48
CRo – Retro	2F1B	48
CRo – Brno	2A0F	48
CRo – Ostrava	290D	48
CRo – Vysocina	2D09	48
CRo – Olomouc	2B07	48
CRo – Zlin	2E02	48



Obr. X.1: Blokové schéma zapojení laboratorního pracoviště

Zadání a postup měření

1. Seznamte se s pracovištěm a obsluhou vysílače testovacího signálu R&S SFU a programu DAB player.
2. Nejprve místo R&S SFU napojte na vstup atenuátoru anténu pro příjem vysílání z éteru. V programu DAB Player nalaďte kanál 12D, odpovídající frekvenci 229,072 MHz. Vyberte si jednu rádiovou stanici a pro ni zjistěte, při jakých hodnotách útlumu dochází k částečným výpadkům signálu a k úplné ztrátě signálu. Zjistěte pro ni také její reálnou bitovou rychlost.

Postup: *Při zapnutí programu DAB Player se otevře okno pro vyhledávání stanic automaticky. Pokud se zobrazí již hlavní okno programu stiskněte tlačítko Channel scan… . poté zvolte BAND III, Scan single channel a Channel 12D. Stiskněte tlačítko Start, mělo by se naladit 15 rádiových stanic, dejte Save a okno zavřete. Poté by měly být stanice v levém horním rohu v pop-up menu. Bližší informace k hodnotě SNR naleznete následovně: po stisknutí pravého tlačítka myši vybrat kartu DAB-Info…, zde v kartě Ensemble stisknout pravým tlačítkem myši na lištu s hodnotami SNR a z nabídky vybrat Show SNR-Info enlarged… . Pro zobrazení hodnot bitové rychlosti se z karty Ensemble přepněte do karty FIC, zde je v dolní části časový průběh bitové rychlosti.*

3. Místo antény ke vstupu atenuátoru připojte vysílač testovacího signálu R&S SFU a proměřte závislost *SNR* přijímaného signálu na *C/N* vysílaného signálu v závislosti na úrovni výkonu, zvolte tři hodnoty v rozmezí od -20 do -80 dBm (např. -20 dBm, -50 dBm, -70 dBm). Pro měření použijte přenosový mód TM1. Změřené hodnoty vložte do tabulky a sestrojte grafy.

   Postup: *Frekvenci vysílání nastavte v menu FREQUENCY – záložka FREQUENCY – FREQUENCY, doporučené je vyhnout se frekvencím vysílání v éteru pro minimalizaci rušení okolním vysíláním a je nutné vybírat z předdefinovaných kanálů v programu (např. 239,2 MHz). Výkon nastavit v menu LEVEL – záložka LEVEL – LEVEL. Hodnotu C/N měňte v menu NOISE – záložka AWGN – C/N. Zvolenou frekvenci nalaďte v programu DAB player podle pokynů v předchozím úkolu.*

4. Dále proměřte závislost *SNR* přijímaného signálu na *C/N* vysílaného signálu v závislosti na zvoleném únikovém kanálu (RA4, RA6, TU6, TU12). Pro měření použijte přenosový mód TM1. Sestrojte grafy a zaznamenejte jedno RF spektrum signálu při kanále AWGN a při jakémkoli únikovém kanálu.

   Postup: *Výkon nastavit v menu LEVEL – záložka LEVEL – LEVEL na úroveň -30 dB, při nižších hodnotách je problém s naladěním na přijímači. Únikové kanály volte v menu FADING – záložka PROFILE – PARAMETER SET. Je potřeba stisknout tlačítko na úvodní obrazovce FADING ON/OFF pro povolení únikových kanálů.*

5. Proměřte závislost *SNR* přijímacího signálu na *C/N* vysílaného signálu při použití různých přenosových módů (TM1, TM2, TM3, TM4). Změřené hodnoty sestrojte grafy.

   Postup: *Nastavení ponechejte stejné jako pro únikové kanály, únikové kanály vypněte pomocí tlačítka FADING ON/OFF. Přenosové módy nastavujte v menu DIGITAL TV – záložka SPECIAL – TM MANUAL, SELECT TM.*

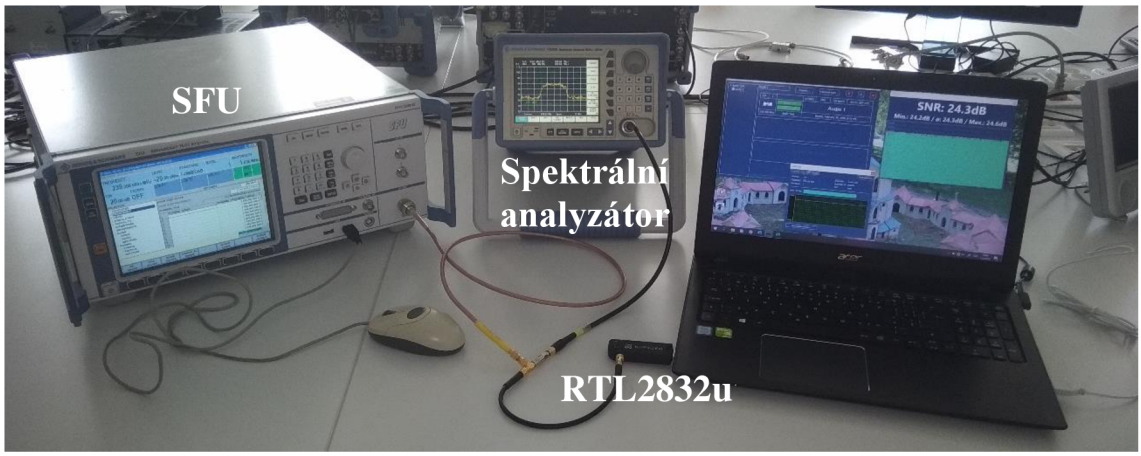
Nepovinná část

6. Proměřte závislost *SNR* přijímacího signálu na hodnotě útlumového článku. Použijte propojení kabelem a propojení pomocí antén. Na vstup atenuátoru a výstup vysílače testovacího signálu R&S SFU připojte antény. Změřené hodnoty vložte do tabulky, sestrojte grafy a porovnejte výsledky obou metod v závěru.

Použité měřící přístroje

SFU	laboratorní vysílač DVB-T/T2 R&S SFU Broadcast Test Systém
ATT	atenuátor
SA	spektrální analyzátor R&S FS300
RTL2832u	přijímač DAB signálu RTL2832u
Počítač	

propojovací vodiče 3 x koaxiální kabel s F konektory, 2 x kabel s BNC konektory, 1 x T člen F konektory, 2 x anténa



Obr. X.2: Rozmístění přístrojů pro úlohu Měření a analýza vlastností systému DAB.

Závěr

Do závěru student uvede své individuální hodnocení měření. Každý bod měření podrobně komentuje, všechny změřené výsledky, charakteristiky a spektra. V závěru by se měli nacházet technické a odborné poznatky z proběhlého měření.

Použitá literatura

[1] HOEG, Wolfgang a LAUTERBACH, Thomas. Digital audio broadcasting: principles and applications of DAB, DAB+ and DMB. 3rd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2009, xxxii, 420 stran. ISBN 04-705-1037-4.

[2] Portál digitalradiodab.cz [online]. Dostupné z: www.digitalradiodab.cz

[3] KRESTA, Daniel. *ANALÝZA PŘENOSU MOBILNÍHO DIGITÁLNÍHO ROZHLASOVÉHO VYSÍLÁNÍ*, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2016, 60 stran.

PŘÍLOHA 2 – VYPRACOVANÝ PROTOKOL

FEKT	Předmět	**Digitální televizní a rozhlasové vysílání**	
	Jméno	**Kaštánek Petr**	
	Ročník	**3**	Studijní skupina **BPC3-EKT**
	Spolupracoval		Měřeno dne
Kontroloval	Hodnocení		Dne
Číslo úlohy **X**	Název úlohy **MĚŘENÍ A ANALÝZA VLASTNOSTÍ SYSTÉMU DAB**		

Vypracování

Bod zadání 2: Měření reálného vysílání

Bez útlumu byla naměřena hodnota *SNR* přijímaného signálu 20 dB.
K výpadkům začalo docházet při vloženém útlumu SNR = 33 dB.
K úplnému vypadnutí došlo při SNR = 48 dB.

Stanice	S-ID/PI	Udávaná bitová rychlost [kbit/s]	Změřená bitová rychlost [kbit/s]
CRo – Radiozurnal	232F	64	41
CRo – Dvojka	232E	64	39
CRo – Vltava	232D	80	66
CRo – Plus	2424	48	23
CRo – Wave	2F23	64	40
CRo – Junior	2F25	48	24
CRo – Ddur	2F26	80	63
CRo – Jazz	2F27	80	65
CRo – DAB Praha	2F1A	48	23
CRo – Retro	2F1B	48	22
CRo – Brno	2A0F	48	23
CRo – Ostrava	290D	48	22
CRo – Vysocina	2D09	48	21
CRo – Olomouc	2B07	48	23
CRo – Zlin	2E02	48	22

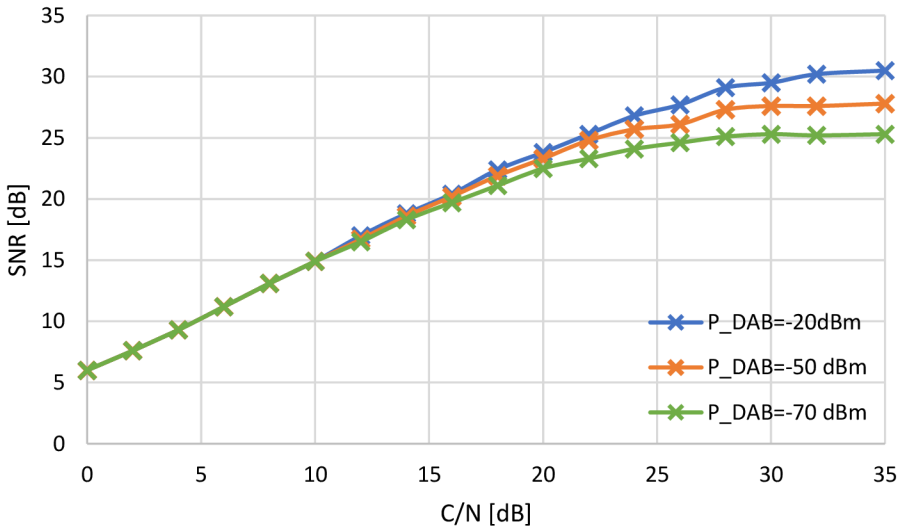
Bod zadání 3: Měření vlivu vysílacího výkonu na přijímaný signál

Tab. 1: Naměřené hodnoty *SNR* přijímací strany v závislosti na *C/N* vysílací strany při různých výkonech.

P_DAB [dBm]	-20	-50	-70
C/N [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]
0	6	6	6
2	7,6	7,6	7,6
4	9,3	9,3	9,3
6	11,2	11,2	11,2
8	13,1	13,1	13,1
10	14,9	14,9	14,9
12	17	16,7	16,5
14	18,8	18,6	18,3
16	20,4	20,2	19,7
18	22,4	21,9	21,1
20	23,8	23,3	22,5
22	25,3	24,8	23,3
24	26,8	25,7	24,1
26	27,7	26,1	24,6
28	29,1	27,3	25,1
30	29,5	27,6	25,3
32	30,2	27,6	25,2
35	30,5	27,8	25,3

Frekvence: 239,2 MHz

Mód: TM1



Obr. 1: Závislost *SNR* na *C/N* při různých vysílacích úrovních.

Bod zadání 4: Měření vlivu únikového kanálu na přijímaný signál

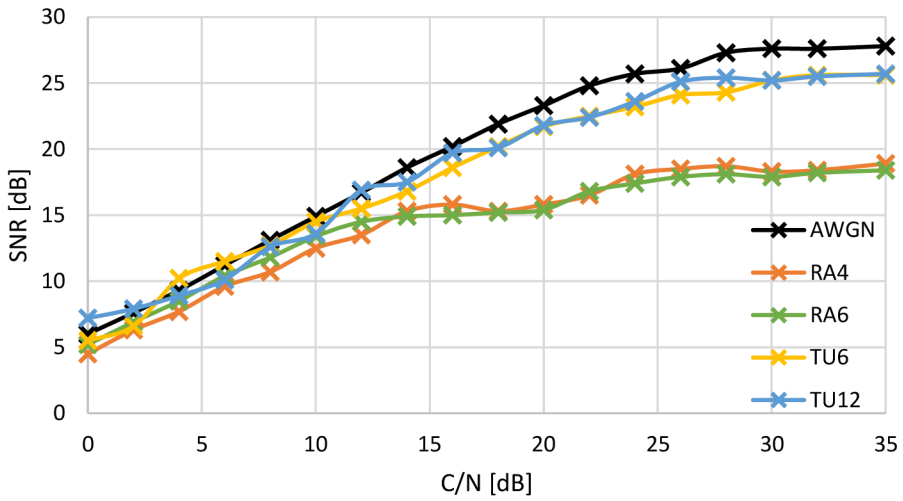
Tab. 2: Naměřené hodnoty *SNR* přijímací strany v závislosti na *C/N* vysílací strany při různých únikových kanálech.

Profil	AWGN	RA4	RA6	TU6	TU12
C/N [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]
0	6	4,5	5,2	5,5	7,2
2	7,6	6,3	6,9	6,6	7,9
4	9,3	7,7	8,5	10,2	8,9
6	11,2	9,6	10,4	11,5	10,1
8	13,1	10,7	11,8	12,7	12,6
10	14,9	12,5	13,4	14,5	13,6
12	16,7	13,5	14,5	15,5	16,9
14	18,6	15,3	14,9	16,8	17,5
16	20,2	15,8	15	18,6	19,7
18	21,9	15,3	15,2	20,2	20,1
20	23,3	15,8	15,4	21,7	21,8
22	24,8	16,5	16,8	22,5	22,4
24	25,7	18,1	17,4	23,2	23,6
26	26,1	18,5	17,9	24,1	25,1
28	27,3	18,7	18,1	24,3	25,4
30	27,6	18,3	17,9	25,2	25,2
32	27,6	18,4	18,2	25,6	25,5
35	27,8	18,9	18,4	25,6	25,7

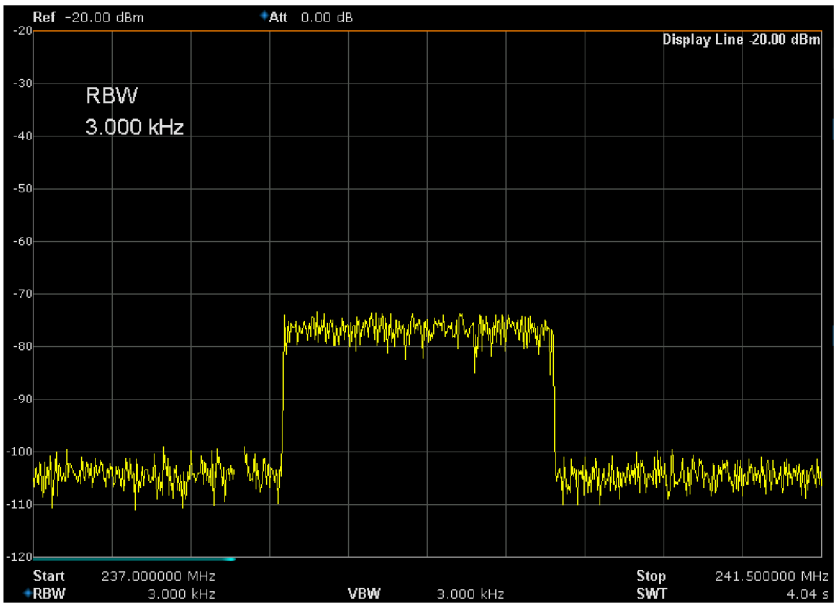
Frekvence: 239,2 MHz

Mód: TM1

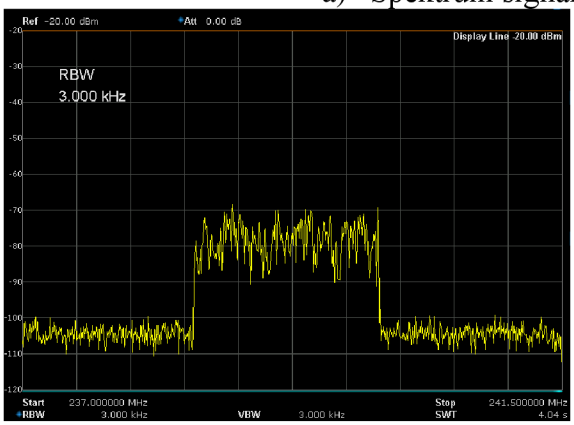
Výkon: -30 dBm



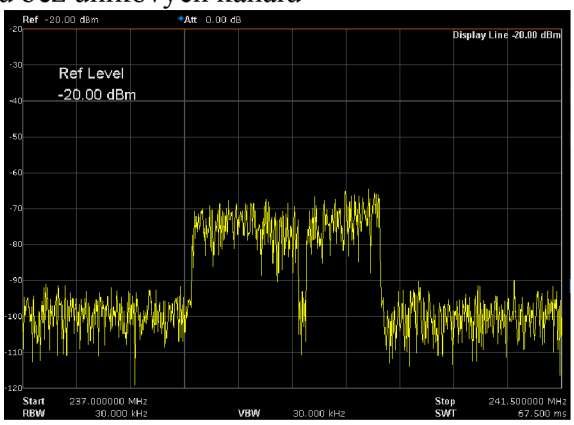
Obr. 2.1: Závislost *SNR* přijímací strany na *C/N* vysílací strany s různými únikovými kanály.



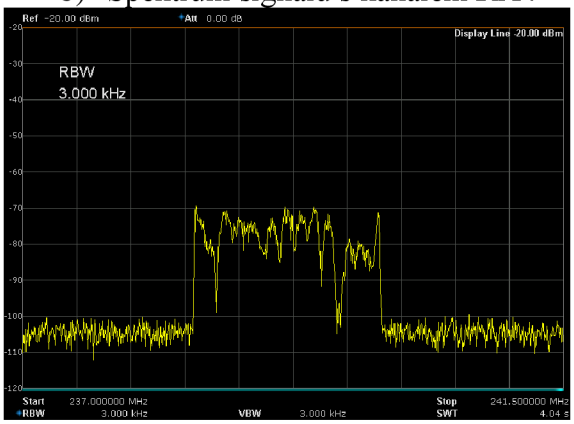
a) Spektrum signálu bez únikových kanálů



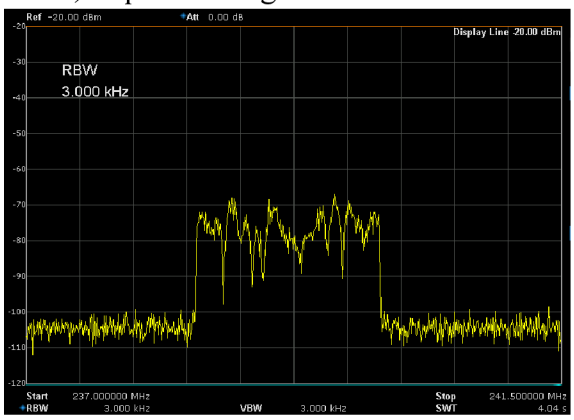
b) Spektrum signálu s kanálem RA4



c) Spektrum signálu s kanálem RA6



d) Spektrum signálu s kanálem TU6



e) Spektrum signálu s kanálem TU12

Obr. 2.2: Spektra signálů bez a se zapnutými různými únikovými kanály.

Bod zadání 5: Měření vlivu přenosového módu na přijímaný signál

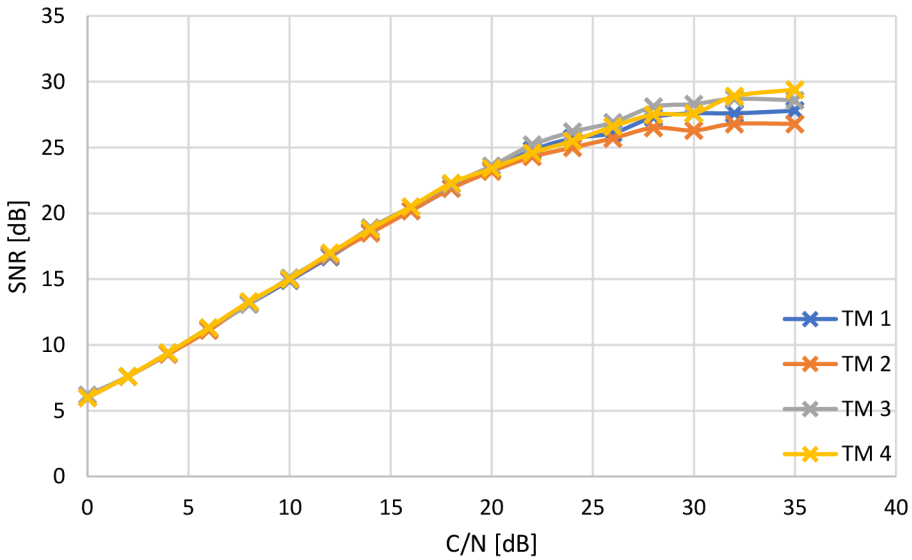
Tab. 3: Naměřené hodnoty *SNR* přijímací strany v závislosti na *C/N* vysílací strany při různých přenosových módech.

TM	1	2	3	4
C/N [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]
0	6	6	6,2	6
2	7,6	7,6	7,6	7,6
4	9,3	9,3	9,4	9,4
6	11,2	11,1	11,3	11,3
8	13,1	13,2	13,1	13,3
10	14,9	15	15,1	15
12	16,7	16,8	16,9	17
14	18,6	18,5	18,9	18,8
16	20,2	20,2	20,5	20,5
18	21,9	21,9	22,2	22,3
20	23,3	23,2	23,6	23,4
22	24,8	24,3	25,2	24,6
24	25,7	25	26,2	25,5
26	26,1	25,7	26,9	26,6
28	27,3	26,5	28,1	27,5
30	27,6	26,3	28,3	27,6
32	27,6	26,8	28,7	28,9
35	27,8	26,8	28,6	29,4

Frekvence: 239,2 MHz

Mód: TM1

Výkon: -30 dBm



Obr. 3: Závislost *SNR* přijímací strany na *C/N* vysílací strany s různými přenosovými módy.

Bod zadání 6: Měření vlivu vloženého útlumu na přijímaný signál

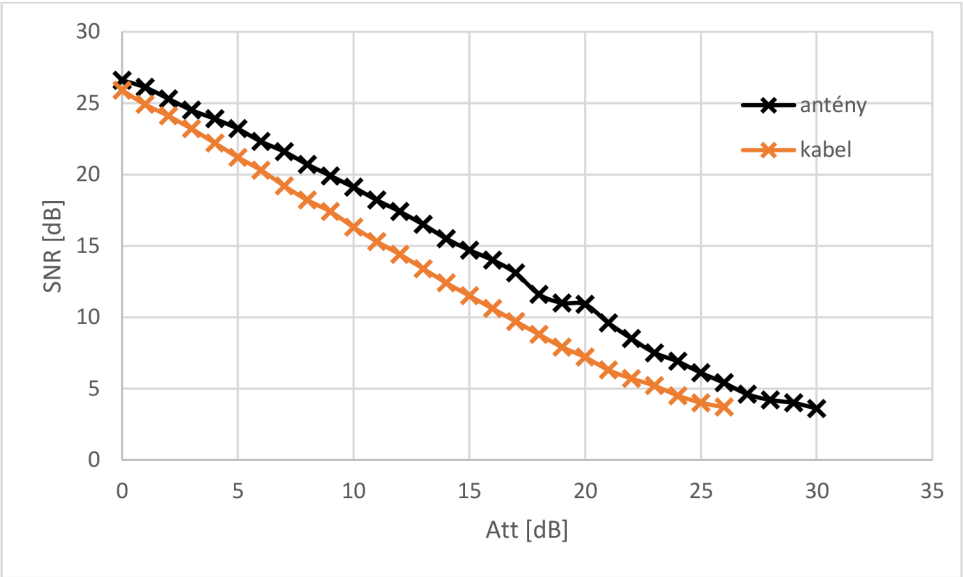
Tab. 4: Naměřené hodnoty *SNR* přijímací strany v závislosti na vloženém útlumu.

spojení	antény	kabel
Att [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]
0	26,6	25,9
2	25,3	24,1
4	23,9	22,2
6	22,3	20,3
8	20,7	18,2
10	19,1	16,3
12	17,4	14,4
14	15,5	12,4
16	14	10,6
18	11,6	8,8
20	10,9	7,2
22	8,5	5,7
24	6,9	4,5
26	5,4	3,7
28	4,2	0
30	3,6	0

Frekvence: 239,2 MHz

Mód: TM1

Výkon: -30 dBm



Obr. 4: Závislost *SNR* na hodnotě útlumu.

Použité měřící přístroje

SFU laboratorní vysílač DVB-T/T2 R&S SFU Broadcast Test Systém
ATT atenuátor
SA spektrální analyzátor R&S FS300
RTL2832u přijímač DAB signálu RTL2832u
Počítač

propojovací vodiče 3 x koaxiální kabel s F konektory, 2 x kabel s BNC konektory, 1 x T člen F konektory, 2 x anténa

Závěr

U reálného rádiového vysílání byla naměřena přenosová úroveň SNR = 20 dB. Výpadky byly zaznamenány při hodnotě útlumu 33 dB a k úplné ztrátě signálu došlo při útlumu 48 dB. Velkou roli zde hraje přímá viditelnost na vysílač a poměrně malá vzdálenost od něj, to vylepšuje celkovou kvalitu přijímaného signálu.

Při použití vysílače testovacího signálu R&S SFU byl jako první změřen vliv úrovně výkonu na přijímaný signál. Závislost hodnoty *SNR* přijímací strany na hodnotě *C/N* vysílací strany byla změřena celkem pro tři úrovně výkonu -20, -50 a -70 dBm. U hodnot C/N do 15 dB se průběhy téměř překrývají, jak lze vidět na Obr. 2. Po této hodnotě se průběhy začaly oddělovat, nejníže je položen výkon -70 dBm ustálený na maximální hodnotě SNR 25,3 dB. Výkon P_DAB = -50 dBm se ustálil na hodnotě SNR 27,7 dB a výkon P_DAB = -20 dBm na hodnotě SNR 30,5 dB.

Dále byla změřena závislost hodnoty *SNR* přijímací strany na hodnotě *C/N* vysílací strany při měnících únikových kanálech. Nejprve bylo změřeno vysílání pouze s kanálem AWGN, které je tak označeno na Obr. 2.1. Byly změřeny čtyři únikové kanály RA4, RA6, TU6 a TU12. Ze závislostí lze vidět, že TU6 a TU12 mají podobný průběh díky emulaci stejného prostředí. Stejně tak jako RA4 s RA6 mají emulovat to stejné prostředí. Z výsledných grafů lze pozorovat, že únikové kanály RA nemají tak dobré přenosové vlastnosti jako TU. Maximální rozdíl hodnot SNR únikových kanálů TU6 a TU12 vůči referenčnímu měření je zhruba 2 dB. Takže tyto kanály mají lepší vlastnosti pro kvalitnější přenos vysílaného signálu. U kanálů RA4 a RA6 je maximální rozdíl oproti referenčnímu měření téměř 10 dB. Maximální dosažené hodnoty SNR jsou pro samotné AWGN 27,6 dBm, pro RA4 18,9 dBm, pro RA6 18,4 dBm, pro TU6 25,6 dBm a pro TU12 25,7 dBm. Při těchto hodnotách již k nárůstu nedochází, dochází jen k mírnému kolísání hodnoty SNR.

Pro toto měření byly také zaznamenány průběhy z RF spektrálního analyzátoru, které je možno vidět na Obr. 2.2. Na těchto RF spektrech je vidět rovnoměrnost vysílaní bez únikových kanálů. Při použití únikových kanálů lze pozorovat mírné zákmity a občasné vypadnutí signálu.

V dalším úkolu byla změřena závislost zvoleného přenosového módu na přenášený signál. Měření bylo provedeno pro čtyři módy TM1, TM2, TM3 a TM4. Ze závislostí na Obr. 3 lze vidět, že každý vysílací mód ovlivní přenášený signál přibližně stejně. Nejvyšší hodnoty SNR dosáhl mód TM 4, nejnižší potom TM 2.