

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Generátor signálů DAB v Matlabu  
Jakub Pěcha

Diplomová práce  
2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Pěcha**  
Osobní číslo: **I15169**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**  
Název tématu: **Generátor signálů DAB v Matlabu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhněte a v prostředí Matlab implementujte generátor signálů digitálního terestriálního vysílání normy DAB.

1. Prostudujte příslušné provozní normy a omezení používané pro tvorbu a šíření signálů DAB v České republice (tj. proces používané komprese zvukového signálu, modulace signálu na nosnou, kanálovou spektrální masku, atp.). Identifikujte případné rozdíly ve struktuře signálu v rámci Evropy.
2. Na základě znalostí z ad 1 vytvořte generátor uvedených signálů v základním pásmu (komplexní obálka) v Matlabu s možností volby alespoň (výčet nemusí být konečný, přesněji bude znám po kompletaci ad 1):
  - a. Zvukového obsahu
  - b. Parametrů modulátoru
  - c. Parametrů výstupního/výstupních filtru/filtrů vysílače
  - d. Vzorkovací frekvence vytvořeného signálu
3. Verifikujte vytvořený signál porovnáním s reálným zaznamenaným DAB signálem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Radio Broadcasting Systems: Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. 2006. EU: ETSI, 2006.

2. Digital Audio Broadcasting (DAB). ETSI [online]. 2016 [cit. 2016-10-26].

Dostupné z:

<http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/broadcast/dab>

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

**31. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce:

**12. května 2017**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
děkan



L.S.



Ing. Jan Pidanič, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 29. 8. 2018

Bc. Jakub Pěcha

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Pidaničovi Ph.D. za vedení této diplomové práce a za cenné rady při jejím zpracování.

**Anotace**

Diplomová práce se zabývá problematikou Digitálního rozhlasového vysílání. Práce podrobně popisuje princip vytvoření DAB signálu podle příslušné normy. Na základě získaných informací o DAB vysílání byl vytvořen v programu Matlab generátor DAB signálů.

**Klíčová slova**

digitální rozhlasové vysílání, OFDM, DQPSK

**Title**

Generator of DAB signals in Matlab

**Annotation**

The diploma thesis deals with the issue of Digital Audio Broadcasting. The diploma thesis describes in detail the principle of creating a DAB signal according to the relevant standard. Based on the received information about DAB, a DAB signal generator was created in the Matlab program.

**Keywords**

digital audio broadcasting, OFDM, DQPSK

# Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>10</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Digitální rozhlasové vysílání</b> .....	<b>12</b>
1.1 Základní informace o DAB vysílání .....	12
1.1.1 DAB ve světě .....	12
1.1.2 DAB v České republice .....	14
1.1.3 DAB+ .....	15
1.2 Blokové schéma DAB .....	15
1.3 Zdrojové kódování .....	16
1.3.1 MPEG-1 Audio Layer II .....	16
1.3.2 MPEG-4 HEAACv2 .....	17
1.4 Kanálové kódování .....	17
1.5 Časové prokládání .....	19
1.6 Modulace COFDM .....	20
1.6.1 OFDM .....	20
1.6.2 D-QPSK .....	22
1.6.3 Ochranný interval .....	23
1.6.4 Výsledný DAB signál .....	24
1.7 Vysílací módy .....	25
1.8 Struktura rámce .....	25
1.9 Frekvenční prokládání .....	27
1.10 Vysílací pásma pro DAB .....	29
1.11 Rozdíly ve vysílání v České republice a jiných zemích Evropy .....	29
1.12 Další systémy digitálního rozhlasového vysílání .....	30
<b>2 Vytvoření generátoru DAB signálu v Matlabu</b> .....	<b>32</b>
2.1 Architektura generátoru DAB .....	32
2.2 Možnosti nastavení parametrů .....	33
2.3 Nastavení vstupních dat .....	35
2.4 Konvoluční kodér .....	37

2.5 Časové prokládání.....	38
2.6 Mapování DQPSK .....	39
2.7 S/P převod a multiplexování .....	40
2.8 Vytvoření rámce pro OFDM.....	41
2.9 Modulace OFDM .....	42
2.10 Úprava výstupního signálu .....	44
2.11 Přidání šumu/Simulace přenosového kanálu .....	48
2.12 Uživatelské rozhraní .....	49
<b>3 Zjištění správnosti simulace za pomoci dekódování.....</b>	<b>51</b>
3.1 Kvadrurní demodulátor a decimace signálu .....	51
3.2 OFDM demodulátor.....	52
3.3 DQPSK demodulace .....	53
3.4 Zpětné časové prokládání .....	54
3.5 Konvoluční dekodér.....	54
<b>Závěr .....</b>	<b>56</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>57</b>
<b>Příloha A – Tabulka pilotních kmitočtů .....</b>	<b>59</b>
<b>Příloha B – Tabulky vysílacích pásem pro DAB.....</b>	<b>60</b>



## Seznam zkratek

DAB	Digital audio broadcasting
AM	Amplitude modulation
FM	Frequency modulation
CD	Compact disc
MPEG	Moving pictures Experts group
OFDM	Orthogonally frequency division multiplex
DQPSK	Diferential quadrature phase-shift keying
ETSI	European telecommunication standards institute
HE AAC	High efficiency advanced audio coding
MSC	Main service channel
FIC	Fast information channel
SC	Synchronization channel
PAD	Programme associated data
CRC	Cyclic redundancy check
RCPC	Rate compatible punctured convolutional
COFDM	Coded orthogonally frequency division multiplex
ISI	Inter symbol interference
ICI	Inter carrier interference
SFN	Single frequency network
IDFT	Inverse discrete Fourier transform
IFFT	Inverse fast Fourier transform
SPC	Serial – parallel convertor
TM	Transmission mode
TFPR	Time-Frequency-Phase Reference

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Aktuální pokrytí DAB signálu ve světě [4] .....	13
Obrázek 2 - Pokrytí ČR digitálním vysíláním [6].....	14
Obrázek 3 - Blokové schéma DAB vysílače .....	15
Obrázek 4 - Blokové schéma MPEG Audio Layer II.....	16
Obrázek 5 - Blokové schéma MPEG - 4 HE-AACv2 .....	17
Obrázek 6 - Princip konvolučního kodéru [1] .....	18
Obrázek 7 - Princip konvolučního prokládače .....	19
Obrázek 8 - Prokládání subnosných [10].....	21
Obrázek 9 - Blokové schéma OFDM .....	22
Obrázek 10 - Konstelační diagram DQPSK .....	22
Obrázek 11 - Ochranný interval [11].....	24
Obrázek 12 - přenosový rámeček .....	26
Obrázek 13 - Architektura generátoru DAB.....	33
Obrázek 14 - Blokové schéma přípravy vstupních dat .....	35
Obrázek 15 - Navzorkované zvukové signály .....	36
Obrázek 16 - Funkce časového prokládání.....	39
Obrázek 17 - DQPSK s přidáním šumu 20 dB .....	40
Obrázek 18 - Princip zero padding .....	42
Obrázek 19 - Data po OFDM modulaci (TM1).....	44
Obrázek 20 - Interpolace.....	45
Obrázek 21 - Kvadratický modulátor [17] .....	45
Obrázek 22 - Charakteristika navrženého filtru.....	46
Obrázek 23 - Výsledný signál DAB .....	47
Obrázek 24 - Spektrum výstupního signálu.....	48
Obrázek 25 - Signál se šumem 2 dB.....	49
Obrázek 26 - Signál se šumem 5 dB.....	49
Obrázek 27 - Uživatelské rozhraní .....	50
Obrázek 28 - Blokové schéma demodulátoru.....	51
Obrázek 29 - Interpolace.....	52
Obrázek 30 - DQPSK modulace/demodulace .....	54
Obrázek 31 - Konvoluční dekodér.....	55
Obrázek 32 - Konvoluční dekodér - výřez.....	55

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Kódové poměry kanálového kódování.....	19
Tabulka 2 - Skládání bitů při časovém prokládání .....	20
Tabulka 3 - Hodnoty změn fáze D-QPSK .....	23
Tabulka 4 - tabulka OFDM symbolů pro jednotlivé módy.....	25
Tabulka 5 - Tabulka pro frekvenční prokládání Mód I .....	28
Tabulka 6 - Volitelné parametry .....	34
Tabulka 7 - Kódové poměry s vektory puncturingu .....	37
Tabulka 8 - Parametry přenosových módů .....	40
Tabulka 9 - Tabulka pilotních kmitočtů .....	59
Tabulka 10 - Tabulka vysílacích pásem (III. TV pásmo).....	60
Tabulka 11 - Tabulka vysílacích pásem (L-pásmo).....	61

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá digitálním rozhlasovým vysíláním. Jedná se o aktuální téma vzhledem k zaplněnosti kapacity frekvenčního spektra klasického FM vysílání, což lze řešit právě pomocí digitálního vysílání, při kterém se využívá modulace s více nosnými vlnami.

Toto téma jsem si zvolil právě pro aktuálnost tématu a také kvůli vlastnímu zájmu o tuto problematiku. Je důležitá zejména proto, že se velmi rychlým způsobem rozvíjí bezdrátový přenos většiny přístrojů a je potřeba s tímto obrovským rozvojem pracovat a do budoucna se na něj připravit.

Cílem práce je vytvoření generátoru digitálního rozhlasového vysílání na základě prostudování příslušné normy ETSI EN 300 401, která toto vysílání definuje. Vytvořený generátor by měl mít možnost nastavení vstupních parametrů, které může uživatel měnit (např. přenosový mód, nosnou frekvenci). Výsledný signál je následně pomocí vytvořeného demodulátoru demodulován, a to kvůli ověření správnosti funkce jednotlivých částí. Dalším cílem je zjištění stavu digitálního vysílání v jiných zemích Evropy.

V teoretické části diplomové práce je popsáno vnitřní složení vysílače digitálního rozhlasového vysílání a podrobně rozebrána funkčnost jeho jednotlivých bloků, které jako celek tvoří požadovaný signál. Dále je v teoretické části popsáno digitální rozhlasové vysílání v jiných zemích Evropy, jeho případné úpravy a aktuální stav.

V praktické části diplomové práce je popsána tvorba generátoru signálů digitálního rozhlasového vysílání. K vytvoření generátoru byl použit výpočetní software Matlab. Je zde popsáno, jak byly vytvořeny jednotlivé bloky, které ve finále vytvoří požadovaný signál digitálního rozhlasového vysílání.

Pro kontrolu jednotlivých funkčních bloků, které tvoří požadovaný generátor je vytvořen demodulátor (dekodér). Bloky tvořící demodulátor (dekodér) pro zjištění správnosti vytvořeného generátoru jsou rovněž popsány. Výstupy jednotlivých funkčních bloků jsou porovnávány s odpovídajícími bloky ve vytvořeném generátoru.

Na závěr je popsáno uživatelské rozhraní, které bylo vytvořeno pro usnadnění práce s vytvořeným generátorem.

# 1 Digitální rozhlasové vysílání

Digital audio Broadcasting (dále jen DAB) je digitální technologie plošného rozhlasového vysílání, která byla vyvinuta v rámci projektu EUREKA 147, aby nahradila dosavadní AM a FM vysílání. Hlavní předností DAB je, že v rámci jednoho datového multiplexu může najednou vysílat několik stanic s různým datovým tokem.

Mezi další přednosti můžeme zařadit:

- kvalitní zvuk srovnatelný s kvalitou CD,
- účinné využití spektra,
- výborný mobilní příjem,
- možnost přenášení doprovodných dat,
- vysokou odolnost proti rušení,
- energetickou úsporu oproti FM vysílání,
- odolnost proti vícecestnému šíření. [1], [2]

System DAB lze používat v pásmu od 3 MHz do 3 GHz. V České republice se k vysílání DAB využívá III. televizní pásmo (174 – 230 MHz) nebo L-pásmo (1452 – 1492 MHz). Šířka pásma DAB signálu je 1,536 MHz a přenosová rychlost je 1,8 Mbit/s. Vzhledem k tomu, že se jedná o technologii navrženou zejména pro přenos zvuku, využívá zvukový kodek MPEG1 – Audio Layer 2. Využívá modulací OFDM a DQPSK, čímž dosahuje vysoké odolnosti proti chybám způsobeným vícecestným šířením. [1], [3]

## 1.1 Základní informace o DAB vysílání

V této podkapitole je shrnuta historie DAB v České republice i ve světě. Dále jsou zde popsány rozdíly mezi DAB a novější verzí DAB+.

### 1.1.1 DAB ve světě

První systémy digitálního rozhlasového vysílání byly navrženy již v osmdesátých letech dvacátého století. Měly však mnoho nedostatků, jako například nemožnost příjmu v mobilním zařízení. Kvůli tomu je nebylo možné využít pro většinu posluchačů, například pro cestující v autě.

Vývoj následně převzal institut IRT a v roce 1985 představil DAB na konferenci v Ženevě. Poté vznikl ve spolupráci devatenácti organizací z Francie, Německa, Nizozemí a Anglie (postupně se připojovaly další organizace) projekt EUREKA 147. [4]

Projekt EUREKA 147 si stanovil několik cílů, kterých chtěl vytvořením digitálního rozhlasového vysílání dosáhnout. Mezi ně patří kvalitní zvuk, který by byl srovnatelný s kvalitou zvuku na CD, zlepšení mobilního příjmu i při pohybu vysokou rychlostí (například v autě). Dalšími cíli bylo zlepšení efektivity využívání kmitočtového spektra, snížení vysílacího výkonu, možnosti přenášet doprovodná data, a celosvětová či evropská standardizace. [1]

V roce 1992 proběhlo celosvětové rozdělení kmitočtů pro DAB vysílání a o rok později byla vydána první DAB norma ETSI EN 300 401. První vysílání bylo spuštěno 1. června 1995 v Norsku. [1]

Následně pak byla organizace sloučena s organizací WorldDAB forum (dnes známá jako WorldDMB forum), která pokračovala ve vývoji, a roku 2007 vydala vylepšenou verzi DAB+. [4]

Rozšíření DAB/DAB+ ve světě je uvedeno na následujícím obrázku. Nejtmavěji vyznačené státy jsou ty, kde již bylo zahájeno digitální vysílání. Světlejší modrou jsou ty, kde probíhá testovací vysílání a nejsvětlejší modrou jsou vyznačeny ty státy, které o digitálním vysílání uvažují. Ostatní země DAB odmítly, případně ještě svůj zájem neprojevíly. [4]



Obrázek 1 - Aktuální pokrytí DAB signálu ve světě [4]

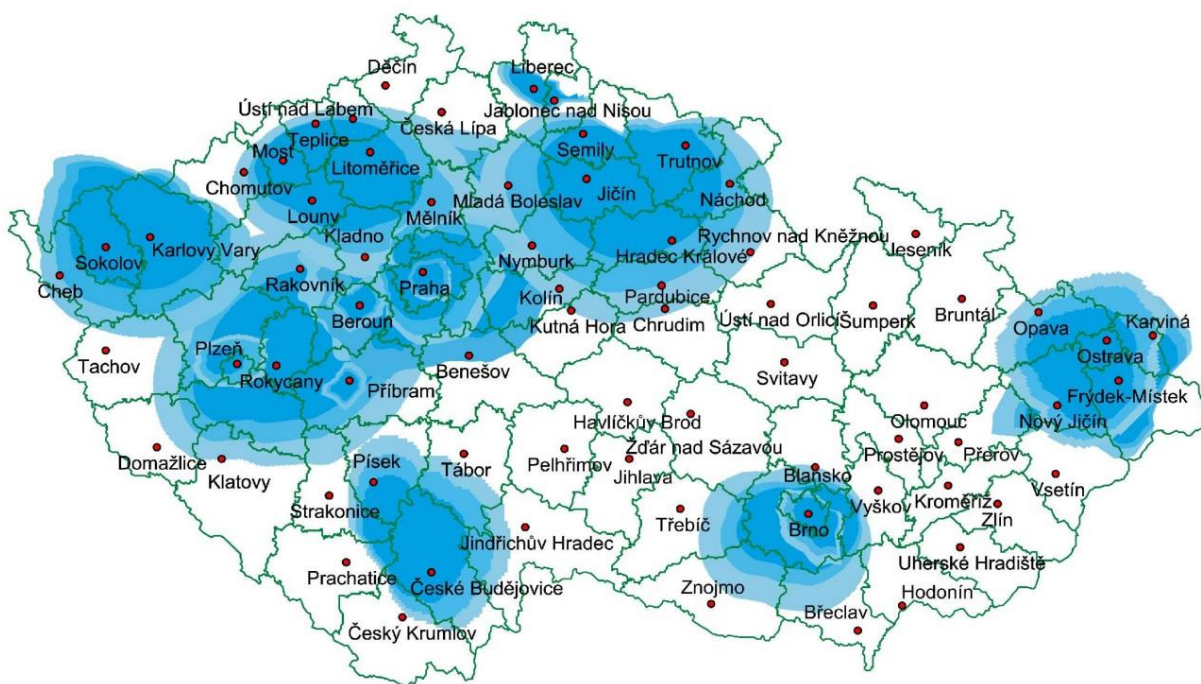
### 1.1.2 DAB v České republice

V České republice začalo první zkušební vysílání v roce 1999 v Praze. Od roku 2005 do roku 2011 probíhala zkušební vysílání v Praze, Plzni, Brně a na Klínovci v Karlovarském kraji. [5]

V roce 2011 bylo zahájeno řádné vysílání systémů DAB a DAB+ v Praze a Příbrami. Od roku 2012 přibývala další velká města a v roce 2013 bylo pokryto signálem 52 procent obyvatelstva. Všechny vysílače pracovaly v L-pásmu. Ve stejném roce bylo založeno České DAB fórum, také byly spuštěny první vysílače v pásmu III. [5]

Český rozhlas v roce 2015 představil koncepci rozvoje digitálního vysílání a spustil v Praze vysílač o výkonu 20 kW se svým multiplexem (kanál 12C, který obsahuje všechny programy Českého rozhlasu). Koncept Českého rozhlasu vláda schválila v roce 2016 a v roce 2017 bylo spuštěno řádné vysílání. Postupně se přidávají další vysílače. [5]

Aktuálně v České republice vysílají DAB/DAB+ čtyři provozovatelé: RTI cz, České Radiokomunikace, Teleko, Český rozhlas. Je pokryto celkem 62 procent obyvatelstva. Aktuální pokrytí můžeme vidět na obrázku 2. [6]



Obrázek 2 - Pokrytí ČR digitálním vysíláním [6]

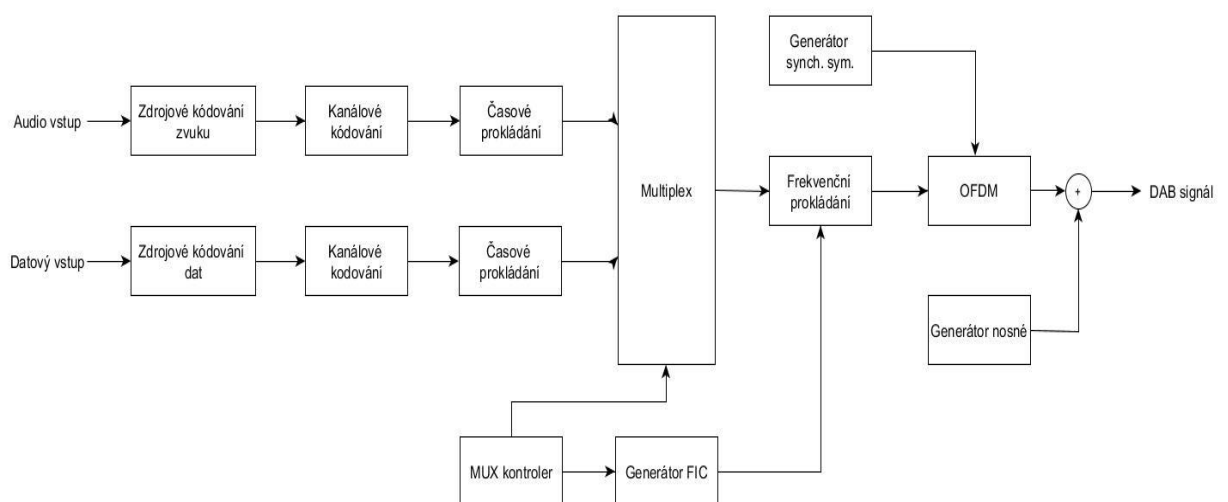
### 1.1.3 DAB+

DAB+ je systém který vyvinulo WorldDMB, pro zvýšení počtu přenášených kanálů v jednom multiplexu. Je toho dosaženo tak, že je použit kodek MPEG-4 HE-AAC v2 místo stávajícího zvukového kódování pomocí kodeku MPEG-2. Ten má srovnatelnou kvalitu zvuku s MPEG-2, ovšem díky sníženému datovému toku je možné v jednom multiplexu přenášet 15 – 20 kanálů. DAB+ není zpětně kompatibilní s DAB. [1]

## 1.2 Blokové schéma DAB

V této části práce je vysvětlen princip vytvoření DAB signálu.

Na následujícím obrázku je znázorněno zjednodušené blokové schéma systému DAB, ve kterém jsou nejprve jednotlivé signály individuálně zakódovány na úrovni zdroje, kanálu a poté jsou časově prokládány. Následně signály prochází multiplexerem hlavního kanálu MSC. Zde probíhá zpracování dle předem určené konfigurace, která je dána přenosovým módem. Zpracovávaný signál je následně frekvenčně prokládán, poté se k němu přidávají informace o multiplexu a další služby. Tyto informace přicházejí z Rychlého informačního kanálu FIC. Tento kanál není časově prokládán a má rovnoměrnou ochranu proti chybám. Tím se vytvoří tzv. přenosový multiplex. Poslední částí je OFDM modulace, po které je již signál pomocí kvadraturního modulátoru namodulován na nosnou frekvenci, čímž je připraven k vysílání. [1], [2]



Obrázek 3 - Blokové schéma DAB vysílače



### 1.3 Zdrojové kódování

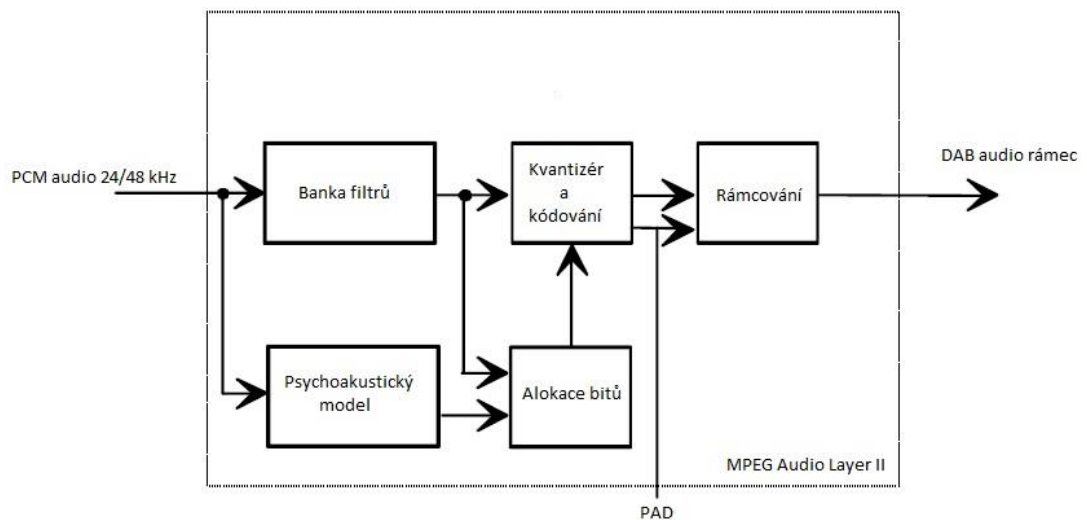
Systém DAB slouží primárně k distribuci rádiových služeb. K tomu je potřeba snížení přenosové rychlosti zvukových signálů. V případě DAB k tomu slouží dvě metody.

Původně byl ke snížení přenosové rychlosti vybrán systém MPEG-1 Audio Layer II. Ten je používán u systému DAB a již je z větší části nahrazen zvukovým kódováním MPEG-4 HE-AACv2 v novějším systému DAB+. V každém zvukovém rámci pak mohou být navíc přidána tzv. přidružená data (PAD), která nesou informaci o obsahu nebo synchronizaci daného rámce. [2]

V následujících podkapitolách budou systémy MPEG-1 a MPEG-4 popsány.

#### 1.3.1 MPEG-1 Audio Layer II

Systém MPEG-1 byl vyvinut při výzkumu zvukových kompresních standardů ASPEC a MUSICAM. Vyvinuty byly tři různé vrstvy. U systémů DAB se využívá druhé vrstvy, tedy standard MPEG-1 Audio Layer II jehož blokové schéma je na následujícím obrázku. [7]



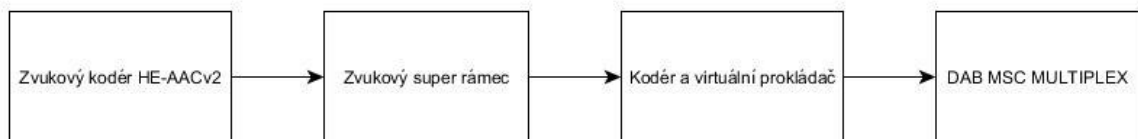
Obrázek 4 - Blokové schéma MPEG Audio Layer II

Systém MPEG-1 funguje na principu lidského vnímání zvuku. Vstupní zvukový signál je přiváděn do kodéru zvuku. Ve filtrační bance se z něj vytvoří 32 tzv. dílčích subpásem. Paralelně k tomuto procesu prochází přes psychoakustický model lidského ucha, tam nejprve proběhne Fourierova transformace. Ta je aplikována na vstupní širokopásmový signál

a používá se k odhadu skutečné časové závislosti pro maskovací práh, dále se v psychoakustickém modelu vytvoří soubor dat pro řízení kvantování a kódování. Blok určený ke kvantování a kódování vytváří z dílčích subpásem sadu kódovacích symbolů. V rámcovém bloku se vytvoří výsledný tok zvukových bitů, a následně mohou být přidávány další informace, jako například informace o hlavičce, CRC (slova pro detekci chyb) nebo PAD. Pro kódování zvuku v DAB jsou povoleny vzorkovací frekvence 48 kHz a 24 kHz. Pro vzorkovací kmitočet 48 kHz má výsledný zvukový rámec délku 24 ms a pro kmitočet 24kHz má délku 48 ms. [1], [8]

### 1.3.2 MPEG-4 HEAACv2

Původní systém DAB založený na MPEG-1 Audio Layer II měl omezení v podobě bitové rychlosti a kvality. Proto byl vyvinut nový systém DAB+, který tyto nedostatky napravil. Speciálně pro DAB+ byl vyvinut nový systém kódování zvuku MPEG-4 HE-AAC v2, jehož zjednodušené blokové schéma je na následujícím obrázku. [1]



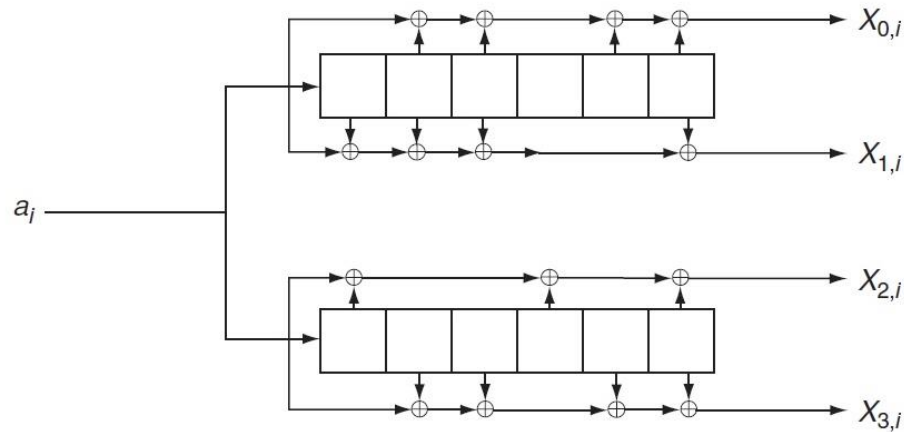
Obrázek 5 - Blokové schéma MPEG - 4 HE-AACv2

Pro kódování zvuku u DAB+ jsou základní vzorkovací frekvence 48 kHz, 32 kHz, 24 kHz a 16 kHz. Je používán zvukový kodér, který nejlépe vyhovuje prostředí digitálního rozhlasového vysílání MPEG-4 HE-AAC v2. U tohoto systému je počet vzorků na jeden zvukový rámec omezen na 960. To je zapotřebí pro vybudování zvukového super rámce o délce 120 ms. Zvukové rámce jsou v super rámcích kódovány dohromady, každý super rámec má konstantní délku, a tím je zajištěno, že prohození bitů zvukového rámce je možné pouze v rámci jednoho super rámce. Každý super rámec je pak veden v pěti po sobě jdoucích logických rámcích DAB, což umožňuje jednoduchou synchronizaci přijímačů. [9]

## 1.4 Kanálové kódování

Systém DAB umožňuje velkou flexibilitu ve výběru správné ochrany proti chybám pro různé přenosové kanály, případně pro různé aplikace. Využívá k tomu RCPC (Rate Compatible

Punctured Convolutional) kodér. Na obrázku je graficky znázorněn princip konvolučního kódování. [1]



Obrázek 6 - Princip konvolučního kodéru [1]

RCPC kodér pracuje tak, že má jeden tzv. mateřský kodér s kódovým poměrem  $\frac{1}{4}$ , tedy z jednoho vstupního bitu  $a_i$  vytvoří čtyři kódované bity  $x_{0,i}, x_{1,i}, x_{2,i}, x_{3,i}$ . Z mateřského kódu je pak vytvořena matice mateřského kódu (výpočet matice mateřského kódu je znázorněn soustavou rovnic) a z ní se vytváří tzv. dceřiné kódy pomocí procesu nazvaného jako puncturing. [1]

$$x_{0,i} = a_i \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-6}$$

$$x_{1,i} = a_{i-1} \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-6}$$

$$x_{2,i} = a_i \oplus a_{i-1} \oplus a_{i-4} \oplus a_{i-6}$$

$$x_{3,i} = a_i \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-5} \oplus a_{i-6},$$

kde  $i$  index symbolu,

$x$  výstupní symboly,

$a$  vstupní symboly.

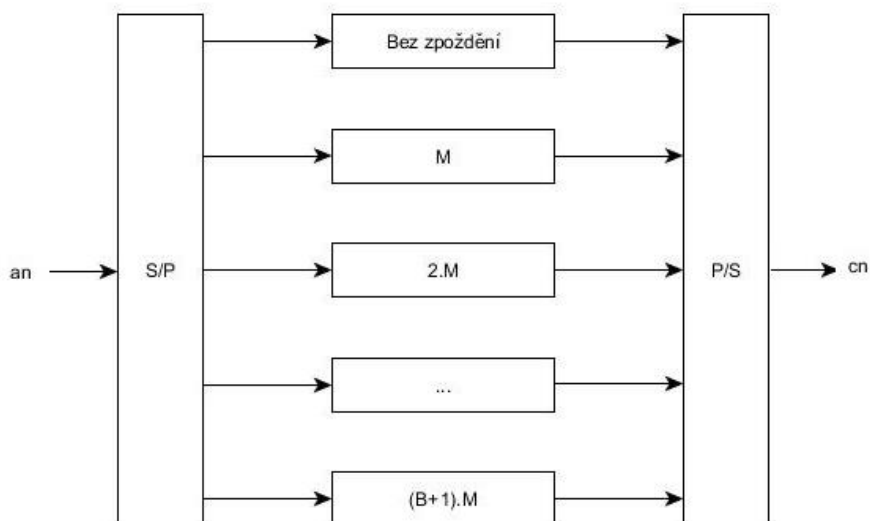
V systému DAB jsou definovány kódové poměry od  $\frac{8}{9}$  až po  $\frac{8}{32}$  ( $\frac{1}{4}$ ), ten má nejlepší zabezpečení, ale zároveň vytváří největší datový tok. V praxi se proto používá kombinace kódových poměrů, které jsou používány podle potřeby. Používané kombinace v DAB jsou uvedeny následující v tabulce. [1]

**Tabulka 1 - Kódové poměry kanálového kódování**

Úroveň ochrany	Kódový poměr
1A	1/4
2A	3/8
3A	1/2
4A	3/4
1B	4/9
2B	4/7
3B	2/3
4B	4/5

## 1.5 Časové prokládání

Pro zamezení vzniku shlukových chyb, které mohou vznikat například při průchodu přenosovým kanálem a znemožnit tak správnou demodulaci signálu, se u DAB používá časové prokládání. K tomu slouží konvoluční prokládač, taktéž nazývaný Forneyho prokládač. Princip konvolučního prokládače je zobrazen na obrázku 7. [1]



**Obrázek 7 - Princip konvolučního prokládače**

Princip konvolučního prokládání je, že se nejprve datový rámec rozdělí na několik menších skupin po 16-ti bitech. Tyto bity se následně poskládají dle předem daného pořadí (viz tabulka 2) a každý bit je jinak časově zpožděný. [2]

**Tabulka 2 - Skládání bitů při časovém prokládání**

<b>a<sub>n</sub></b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>c<sub>n</sub></b>	0	8	4	12	2	10	6	14	1	9	5	13	3	11	7	15

Výsledkem časového prokládání je signál, který je sice zpožděn o 360 ms (počítáno jen zpoždění vlivem časového prokládání), ale za tu cenu je eliminována možnost vzniku shlukových chyb, které by znemožnily správnou demodulaci signálu. [1]

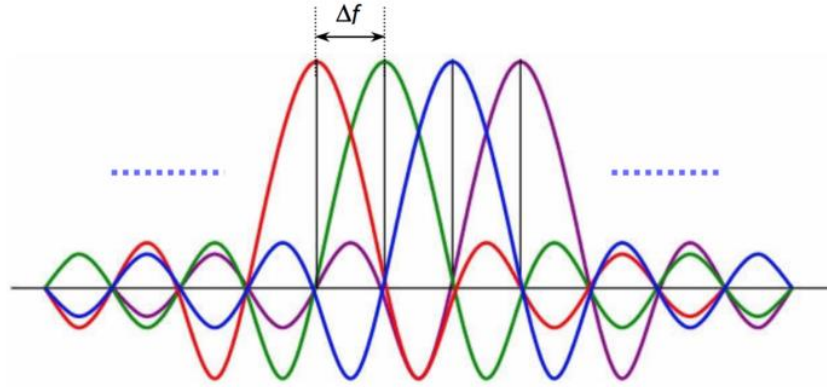
Časové prokládání je použito pouze na MSC, FIC je prokládáno pouze frekvenčně. [1]

## 1.6 Modulační COFDM

Tato podkapitola se zabývá modulací COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex), která se používá u systémů DAB. COFDM se řadí mezi modulační s více nosnými vlnami, které jsou následně samostatně kódovány pomocí modulační D-QPSK. Velkou výhodou COFDM je možnost vkládání ochranného intervalu k potlačení mezisymbolového rušení (ISI). Další výhodou je možnost přenosu po jednofrekvenční síti (SFN). Nevýhodou je ovšem složitá konstrukce a synchronizace přijímačů. [1]

### 1.6.1 OFDM

Princip OFDM spočívá v rozdělení vstupního datového toku do  $K$  pomalejších datových toků, které jsou modulovány na  $K$  vzájemně ortogonálních subnosných vln s vhodným frekvenčním rozestupem. Pro dostatečně velké  $K$  je pak možné, aby délka symbolu  $T_s$  byla větší, než je délka odrazu v přenosovém kanálu. Tím je dosaženo vysoké spektrální účinnosti a také větší odolnosti proti ISI. Na následujícím obrázku je znázorněn příklad prokládání subnosných vln. [1]



**Obrázek 8 - Prokládání subnosných [10]**

V praxi se signál OFDM generuje digitálně s využitím inverzní transformace IDFT nebo IFFT, na obrázku 9 je znázorněn postup OFDM modulace. Nejprve jsou data převedena v převodníku SPC do paralelní podoby. Dále se skládají do skupin po  $N$  bitech. Každá skupina se kóduje do komplexního datového symbolu, který odpovídá zvolenému modulačnímu formátu subnosných vln, v případě DAB signálů jde o modulaci D-QPSK. Zakódovaná data následně putují do bloku IFFF, kde se realizuje samotná modulace subnosných vln. [11]

Na následující rovnici je popsán výpočet kmitočtů nosných vln  $f_K$ .

$$f_K = f_0 + K/Ts ,$$

kde  $K$  index subnosné,

$f_K$  frekvence subnosných,

$f_0$  nosná frekvence.

Tyto symboly se následně doplní ochranným intervalem a převádějí se do sériové podoby. Poté se pomocí DAC převodníku převádějí na komplexní signál. Komplexní signál prezentují složky I a Q, které jsou pak pomocí kvadraturního modulátoru modulovány do požadovaného rádiového pásma. Následuje zesílení a vysílání vytvořeného DAB signálu. [11], [12]

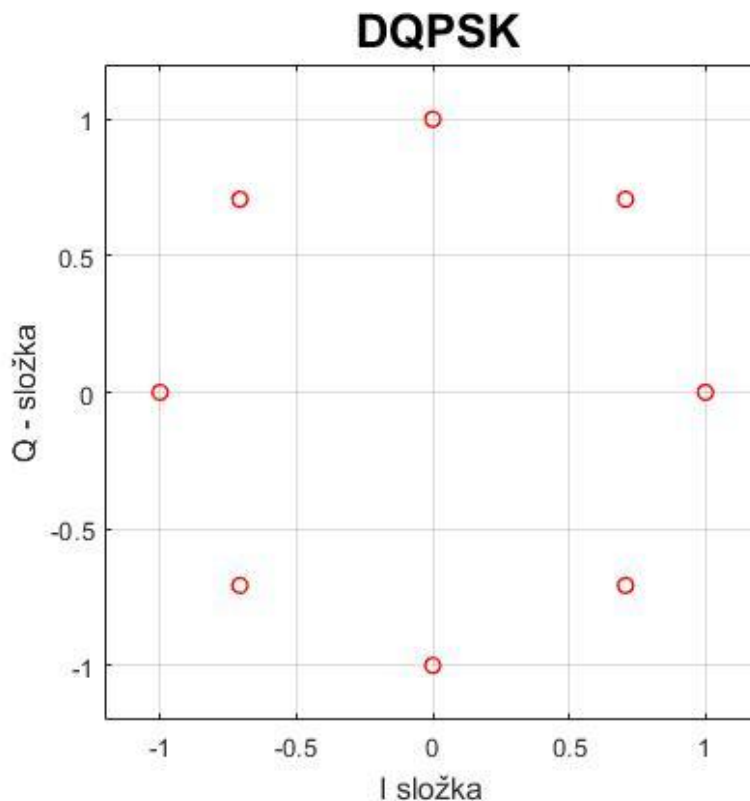


Obrázek 9 - Blokové schéma OFDM

Parametry OFDM a struktury používaných rámců se určují pomocí zvolených vysílacích módů, které jsou popsány v kapitolách 1.7 a 1.8.

### 1.6.2 D-QPSK

Vzhledem k tomu, že jsou amplitudy sousedních subnosných vln vysoce korelovány, jsou jednotlivé komplexní subnosné vlny kmitočtově prokládané pomocí modulace D-QPSK, kterou také nazýváme jako  $\pi/4$ -DQPSK. Na následujícím obrázku je vyobrazen konstelační diagram D-QPSK, kde si můžeme všimnout, že se jedná o dva vzájemně pootočené diagramy QPSK o  $45^\circ$ . [13]



Obrázek 10 - Konstelační diagram DQPSK

Matematicky můžeme každý symbol vyjádřit pomocí rovnice:

$$\phi(n) = \phi(n - 1) + \Delta\phi(n) ,$$

kde  $n$  pořadí symbolu,

$\phi$  fáze,

$\Delta\phi$  změna fáze (hodnoty uvedeny v tabulce 3).

**Tabulka 3 - Hodnoty změn fáze D-QPSK**

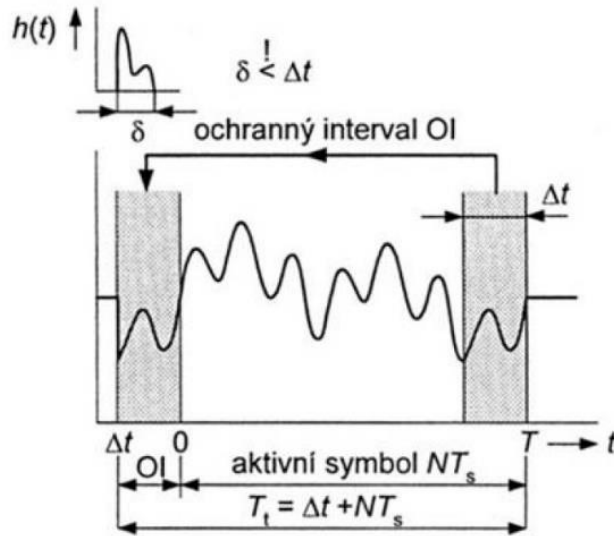
I	Q	$\Delta\phi_k$
0	0	$\pi/4$ ( $45^\circ$ )
0	1	$3\pi/4$ ( $135^\circ$ )
1	0	$-\pi/4$ ( $-45^\circ$ )
1	1	$-3\pi/4$ ( $-135^\circ$ )

### 1.6.3 Ochranný interval

Mnohocestné šíření vln může mít za následek mnoho rušivých efektů. Jedním z hlavních problémů je rozptýlení okamžiků příchodu vln po různých drahách. Při tom dochází ke dvěma rušivým efektům ISI (mezisymbolová interference) a ICI (interference mezi subnosnými vlnami). [11]

OFDM je díky delším symbolovým periodám v subkanálech podstatně odolnější vůči ISI než systémy s jednou nosnou vlnou. Tuto odolnost lze u systému OFDM zlepšovat zvyšováním počtu subnosných vln a tím i délky symbolů v jednotlivých subkanálech. Při větším počtu subnosných vln se ovšem začínají projevovat problémy s jejich stabilitou, Dopplerovským posuvem atd. Z tohoto důvodu je u DAB signálů zavedeno velmi účinné potlačování nežádoucích interferencí a to pomocí ochranného intervalu. Ten je odebrán z koncové části symbolu OFDM, který nese důležité informace, a vkládán do přenášeného signálu za modulátorem OFDM. Na obrázku je znázorněn princip ochranného intervalu. [11]





Obrázek 11 - Ochranný interval [11]

#### 1.6.4 Výsledný DAB signál

Výsledný signál DAB po OFDM modulaci můžeme matematicky popsat pomocí následující rovnice. Vysílána je pouze reálná část signálů.

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{2j\pi f_c t} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{l=0}^L \sum_{-K/2}^{K/2} z_{m,l,k} \times g_{k,l}(t - mT_F - T_{NULL} - (l-1)T_S) \right\},$$

$$\text{kde } g_{k,l}(t) = \begin{cases} 0 & \text{pro } l = 0 \\ e^{\frac{j\pi k(t-\Delta)}{T_U}} \text{Rect}\left(\frac{t}{T_S}\right) & \text{pro } l = 1, 2 \dots L \end{cases}$$

kde  $L$  počet OFDM symbolů na přenosový rámeček,

$K$  počet vysílaných nosných,

$T_F$  trvání přenosového rámce,

$T_{NULL}$  trvání nulového symbolu,

$T_S$  trvání OFDM symbolů

$T_U$  inverzní (převrácená) hodnota odstupů mezi nosnými,

$\Delta$  trvání ochranného intervalu,

$z_{m,l,k}$  komplexní symbol D-QPSK,

$f_c$  centrální frekvence signálu.

## 1.7 Vysílací módy

Pro DAB jsou definovány čtyři vysílací módy, podle kterých je definován rámeček OFDM a rádiová pásma. V následující tabulce jsou definovány parametry jednotlivých módů. Mód TM I je primárně určen pro rovinné a mimoměstské oblasti, TM II pro hustější síť a TM IV je kompromisem mezi módem I a módem II. Vysílací Múd III byl vytvořen pro satelitní přenosy. [1], [2]

Tabulka 4 - tabulka OFDM symbolů pro jednotlivé módy

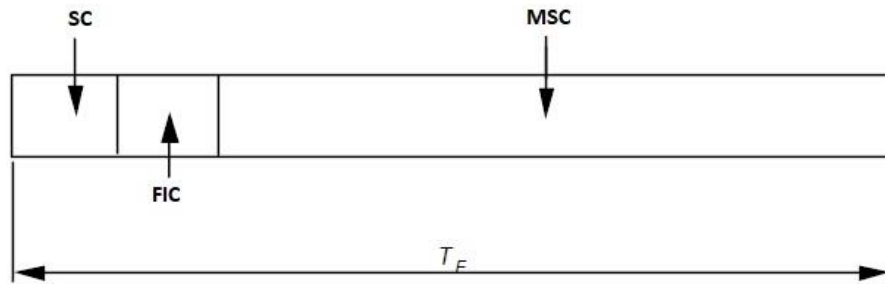
Mód	K	L	$\Delta f$ [kHz]	$T_s$ [us]	max. f [MHz]	$T_{NULL}$ [us]	$\Delta$ [us]
<b>TM I</b>	1536	76	1	1246	375	1297	246
<b>TM II</b>	384	76	4	312	1560	324	62
<b>TM III</b>	192	153	8	156	3000	168	31
<b>TM IV</b>	768	76	2	623	750	648	123

V tabulce 4 jsou definovány jednotlivé parametry OFDM modulace pro jednotlivé módy. Je zde uvedeno:

- $K$  – počet vysílaných nosných,
- $L$  – počet OFDM symbolů na jeden přenosový rámeček,
- $\Delta f$  – vzdálenost mezi subnosnými,
- $T_s$  – délka symbolového intervalu,
- $max. f$  – maximální frekvence,
- $T_{NULL}$  – délka nulového intervalu,
- $\Delta$  - délka ochranného intervalu.

## 1.8 Struktura rámce

Pro každý režim přenosu je definován přenosový rámeček, jako periodicky se opakující struktura OFDM symbolů. Délka jednoho přenosového rámce je buď stejná jako délka rámce MPEG (tj. 24 ms), nebo se jedná o jeho celočíselný násobek. V důsledku toho nepotřebuje audio datový tok vlastní synchronizaci. čímž je zajištěna lepší stabilita synchronizace pro mobilní příjem. [1], [2]



Obrázek 12 - přenosový rámeček

Na předchozím obrázku je obecně znázorněn přenosový rámeček, který je pro všechny módy sestaven stejně a kde:

SC – synchronizační kanál,

FIC – rychlý informační kanál

MSC – hlavní kanál (obsahuje užitečné informace jako zvuk, data a další)

V následující části jsou popsány přenosové rámce pro jednotlivé módy.

## TM II

Všechny OFDM symboly mají stejnou délku 312 ms, kromě prvního, který má délku 324 ms a nazývá se nulovým symbolem ( $T_{NULL}$ ). Ten slouží k hrubé synchronizaci a ukazuje začátek rámce.

Dalším symbolem v SC je TFPR (Time-Frequency-Phase Reference) symbol. Ten slouží jako referenční kmitočet, pro odhad kanálu, jemné ladění synchronizace a také nese informaci o počáteční fázi DQPSK modulaci. Každý další OFDM symbol nese 384 DQPSK symbolů odpovídajících 768 bitům.

Tři OFDM symboly FIC mají dohromady 2304 bitů. Jsou vysoce chráněny kódem rychlosti 1/3, takže zbývá pouze 768 datových bitů. Tyto symboly mohou být dekodovány ihned bez ohledu na ostatní.

Zbýlých 72 symbolů jsou symboly MSC. Celkem 55296 bitů je uspořádáno v tzv. kapacitních jednotkách ( $CU_s$ ) po 64 bitech. V MSC je přenášeno mnoho služeb, které jsou multiplexovány dohromady a každá má vlastní ochranu proti chybám.

## TM I a TM IV

Přenosové rámce I a IV mají stejnou strukturu jako TM II, ale OFDM symboly jsou 2x, případně 4x delší (48 ms nebo 96 ms). Počet bitů FIC a MSC je taktéž vyšší o stejný násobek.

## TM III

Délka přenosového rámce TM III je  $\frac{1}{4}$  z 24 ms. Obsahuje 8 symbolů FIC a 144 symbolů MSC. Ve srovnání s ostatními režimy je datová rychlost FIC vyšší, MSC má vždy stejnou rychlost.

### 1.9 Frekvenční prokládání

Následující kapitola se zabývá frekvenčním prokládáním. To u DAB signálů probíhá podle předem definované posloupnosti. Ta je dána rovnicí:

$$y_{l,k} = q_{l,n} ,$$

kde  $l = 2,3,4 \dots L$  ,

$n$  index nosné vstupních symbolů,

$q$  vstupní symboly,

$k$  index nosné výstupních symbolů,

$y$  výstupní symboly.

Vztah mezi vstupními a výstupními symboly frekvenčního prokládání je pro každý mód rozdílný. Kromě tabulek s hodnotami existuje i matematický postup, který lze aplikovat pro všechny módy:

Permutace  $\Pi(i)$  pro  $i = 0,1,2 \dots K - 1$  získáme podle následujícího vztahu:

$$\Pi(i) = 13 \Pi(i - 1) + S(\text{mod } D) ,$$

kde  $S = \frac{D}{4} - 1$

$D$  nejbližší vyšší mocnina dvou k počtu nosných

$K$  počet nosných

Výsledkem je soubor permutací  $A$ . Následně se vytvoří množina  $D = \{d_0, d_1 \dots d_{K-1}\}$ , která je definována jako podmnožina  $A$  zahrnující prostřední prvky množiny  $A$ . Poté  $d_n = \Pi(i)$ , a můžeme napsat, že platí:

$$k = F(n) = d_n - K/2$$

A takto lze získat výslednou tabulku pro všechny módy, pro příklad je na následujícím obrázku uvedena tabulka pro mód 1. [2]

**Tabulka 5 - Tabulka pro frekvenční prokládání Mód I**

<b>i</b>	<b><math>\Pi(i)</math></b>	<b><math>d_n</math></b>	<b>n</b>	<b>k</b>
0	0			-513
1	511	511	0	-14
2	1010	1010	1	329
3	1353	1353	2	692
4	1716	1716	3	-733
5	291	291	4	
6	198	198		13
7	1037	1037	5	680
8	1704	1704	6	
9	135	135		
10	218	218	7	273
11	1297	1297	8	-36
12	988	988	9	43
:	:	:		
2044	1676	1676	1533	652
2045	1819	1819		
2046	1630	1630	1534	606
2047	1221	1221	1535	197

## **1.10 Vysílací pásma pro DAB**

K vysílání DAB se v Evropských zemích používá zejména III. televizní pásmo, ale například v Itálii a Holandsku se využívá i L-pásmo. V tabulkách v příloze B jsou uvedeny používané kanály k vysílání DAB signálu. [14]

## **1.11 Rozdíly ve vysílání v České republice a jiných zemích Evropy**

Tato kapitola se zabývá stavem DAB vysílání ve vybraných zemích Evropy. Všechny země se řídí normou ETSI EN 300 401. Jediné rozdíly jsou v povolených vysílacích pásmech u jednotlivých zemí. V této kapitole bude uveden stav ve vybraných zemích Evropy.

### **Velká Británie**

Ve Velké Británii je aktuálně (listopad 2017) DAB signálem pokryto 97,3 % obyvatelstva. Vysílání ve Velké Británii probíhá výhradně ve III. TV pásmu. Vysílání nabízí 487 služeb ve formátu DAB a 8 služeb ve formátu DAB+. Vypnutí analogového vysílání zatím ve Velké Británii není plánováno.

Všechny společnosti provozující ve Velké Británii DAB vysílání spadají pod vládu a organizaci Ofcom. Tyto dva subjekty udělují multiplexní licence a mají možnost korigovat například přenosovou rychlost nebo velikost datového toku. [5]4

### **Francie**

Ve Francii se stejně jako ve Velké Británii používá k vysílání DAB signálů výhradně III. TV pásmo. Pokrytí DAB signálu je v této zemi velmi nízké, pouze 19 % obyvatelstva (listopad 2017). Nabízeno je 166 služeb ve formátu DAB+. I přes skutečnost, že ve Francii již nejsou volné FM stanice, neprobíhá v této zemi žádný masivní rozvoj DAB a o vypnutí analogového vysílání není rozhodnuto. [5]

### **Norsko**

Norsko je první zemí, která úplně vypnula analogové vysílání, došlo k tomu v prosinci 2017. Vysílání v Norsku je upraveno zákonem, který dává společnosti NRK právo vysílat na nadnárodní úrovni. Tato společnost má také na starosti regionální vysílání.

Pokrytí v Norsku je 99,7 % obyvatel (listopad 2017). Vysílání v Norsku probíhá ve III. TV pásmu a nabízí 2 služby DAB a 213 služeb DAB+. [5]

## **Polsko**

V Polsku jsou dvě úzce spolupracující organizace, které mají pod kontrolou regulaci digitálního rozhlasového vysílání. První z nich je Národní rada pro vysílání, ta vydává a spravuje licence. Druhou je pak Úřad elektronických komunikací, který upravuje frekvenční spektrum.

Vysílání probíhá ve III. TV pásmu a pokryto je 56 % obyvatelstva (listopad 2017). V Polsku je nabízeno 28 služeb DAB a pouze jedna služba ve formátu DAB+. Plánované ukončení analogového vysílání není stanoveno. [5]

### **1.12 Další systémy digitálního rozhlasového vysílání**

Metoda DAB, která se začala využívat v roce 1996 a využívá se převážně v zemích Evropy, byla prvním pokusem o digitalizaci rozhlasového vysílání. Následovalo zavádění dalších systémů digitálního rozhlasového vysílání. V Severní Americe začaly pokusy o digitalizaci rozhlasového vysílání metodou IBOC v roce 2001. S dalším experimentálním vysíláním začalo v roce 2003 Japonsko, kde je využívána metoda ISDB-T. V této části práce jsou jednotlivé metody blíže popsány.

#### **IBOC**

IBOC (in-band on-channel) je severoamerická metoda pozemního digitálního rozhlasového vysílání. Tato metoda využívá AM a FM frekvence k vysílání analogového i digitálního vysílání, od této skutečnosti je odvozen její název In-Band On-Channel.

Hlavními parametry této metody jsou:

- využívané modulace: DQPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM (BST-OFDM),
- zvukový kódér: HDC,
- frekvenční pásma: AM, FM. [15]

#### **ISDB/ISDB-T**

ISDB je japonský standard pro digitální televizi a digitální rádio. Z něj byla vyvinuta metoda ISDB-T, která vznikla v roce 2007 a využívá se zejména v Jižní Americe.

Hlavními parametry této metody jsou:

- využívané modulace: QPSK, 16 QAM, 64 QAM (COFDM),
- zvukový kódér: PAC,

- frekvenční pásma: 2328,5 – 2332,5 MHz. [15]



## 2 Vytvoření generátoru DAB signálu v Matlabu

V této kapitole je popsáno vytvoření generátoru signálu DAB v programu Matlab. V první části je popsán vytvořený generátor jako celek. V další části této kapitoly jsou na základě blokového diagramu popsány všechny vytvořené skripty, ze kterých je generátor vytvořený.

### 2.1 Architektura generátoru DAB

Vytvořený generátor signálů DAB je naprogramován v softwaru Matlab podle normy ETSI EN 300 401, V2.1.1, 2016. Tato norma specifikuje vytváření digitálního rozhlasového vysílání. Generátor je navržen jako offline generátor a vzhledem k budoucímu využití není jeho součástí rychlý informační kanál.

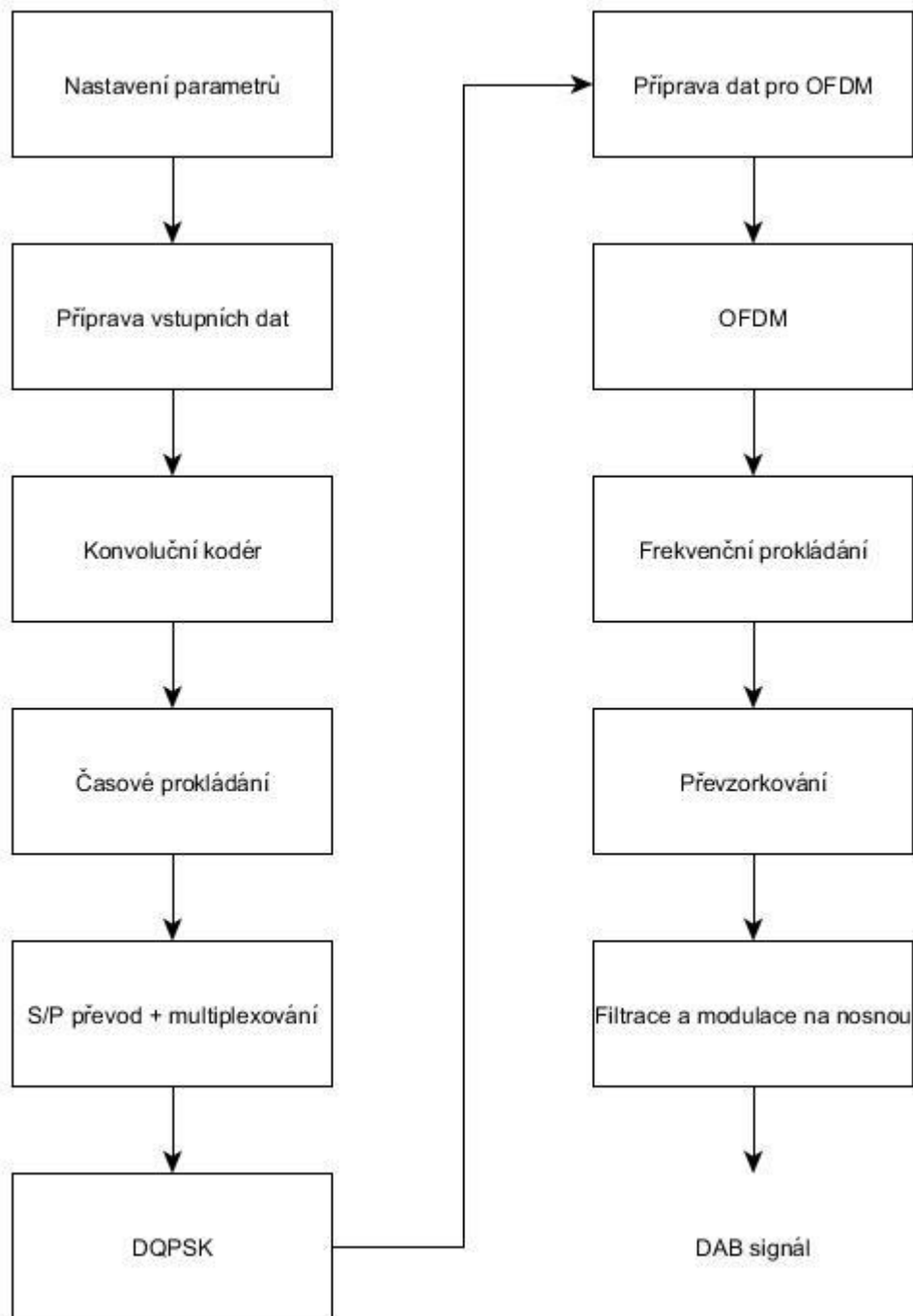
Pro pochopení funkce generátoru je na následujícím obrázku (obrázek 13) vyobrazeno blokové schéma celého procesu, který je potřeba k vytvoření signálu pro digitální rozhlasové vysílání.

Před spuštěním má uživatel možnost zvolit vybrané parametry, podle kterých se následně signál generuje. Po zvolení parametru probíhá, podle výběru, buď generování náhodných dat, nebo navzorkování a kvantování vybraného zvukového souboru.

Poté již probíhá úprava signálu dle normy ETSI EN 300 401. Nejprve je signál zakódován pomocí konvolučního kodéru, poté je časově proložen. Následuje sérioparalelní převod, který funguje jako tzv. multiplexer. Slouží k tomu, aby data měla požadovaný formát podle vybraného přenosového módu.

Následuje COFDM modulace signálu. Zde je signál upraven, mapován pomocí D-QPSK modulace, modulován OFDM a frekvenčně proložen.

Posledním krokem celého systému je výsledná úprava signálu, která zahrnuje změnu vzorkování signálu pomocí interpolace, dále filtraci a modulaci na nosnou vlnu. Všechny vytvořené bloky budou dále podrobněji popsány.



Obrázek 13 - Architektura generátoru DAB

## 2.2 Možnosti nastavení parametrů

Vytvořený generátor digitálního rozhlasového vysílání se spouští pomocí skriptu GeneratorDAB.m, ze kterého se pak samostatně spouští ostatní skripty, které postupně provádí jednotlivé kroky potřebné k vytvoření výsledného signálu.

Ve spouštěcím skriptu je možné nastavit několik následujících parametrů:

- vstupní formát dat,
- počet dat/počet dat ze zvukového souboru,
- vzorkovací frekvence,
- přenosový mód,
- kódový poměr,
- nosná frekvence,
- odstup signálu od šumu,
- míra interpolace,
- řád výstupního filtru.

V následující tabulce jsou uvedeny možné volby jednotlivých parametrů.

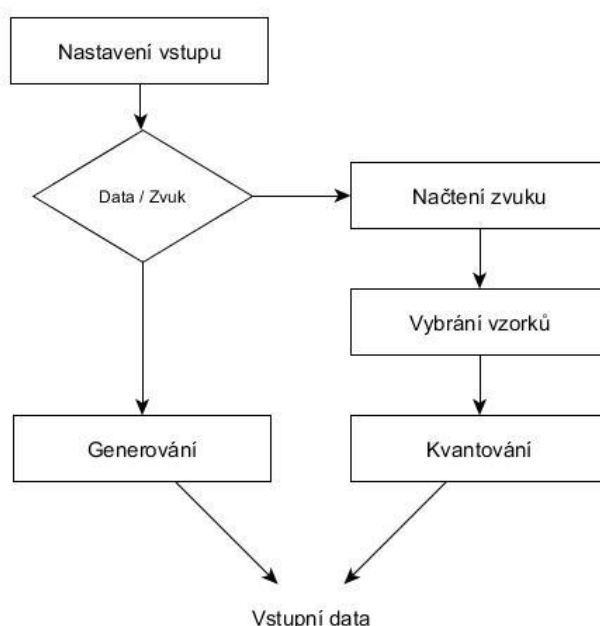
**Tabulka 6 - Volitelné parametry**

<b>Parametr</b>	<b>Možné volby</b>
vstupní formát dat	1 – generátor 2 – libovolný zvukový soubor
počet dat / počet dat ze zvuku	libovolná hodnota (určí, kolik dat se bude zpracovávat)
vzorkovací frekvence	nastavena na 2 048 kHz (základní pásmo podle OFDM), tento parametr ji může změnit.
přenosový mód	1, 2, 3 nebo 4
kódový poměr	1A, 2A, 3A, 4A, 1B, 2B, 3B nebo 4B
nosná frekvence	libovolná hodnota v Hz
odstup signálu od šumu (SNR)	libovolná hodnota v dB
míra interpolace	využití zejména při použití zvukového signálu, aby bylo možné předejít aliasingu.
řád výstupního filtru	libovolná hodnota

Parametr vstupní formát dat a s ním související počet dat a počet dat ze zvuku, jsou popsány v následující podkapitole.

### 2.3 Nastavení vstupních dat

Jako vstupní data je možné použít generátor vstupních dat nebo libovolný zvukový soubor. Vstupní parametr VstupníFormat nastavuje uživatel. Může vybrat z hodnot 1 nebo 0, přičemž 1 je generátor náhodných dat a 0 je zvukový soubor. Tyto možnosti budou dále rozepsány a princip je vyobrazen na následujícím blokovém diagramu.



Obrázek 14 - Blokové schéma přípravy vstupních dat

#### Generování náhodných dat

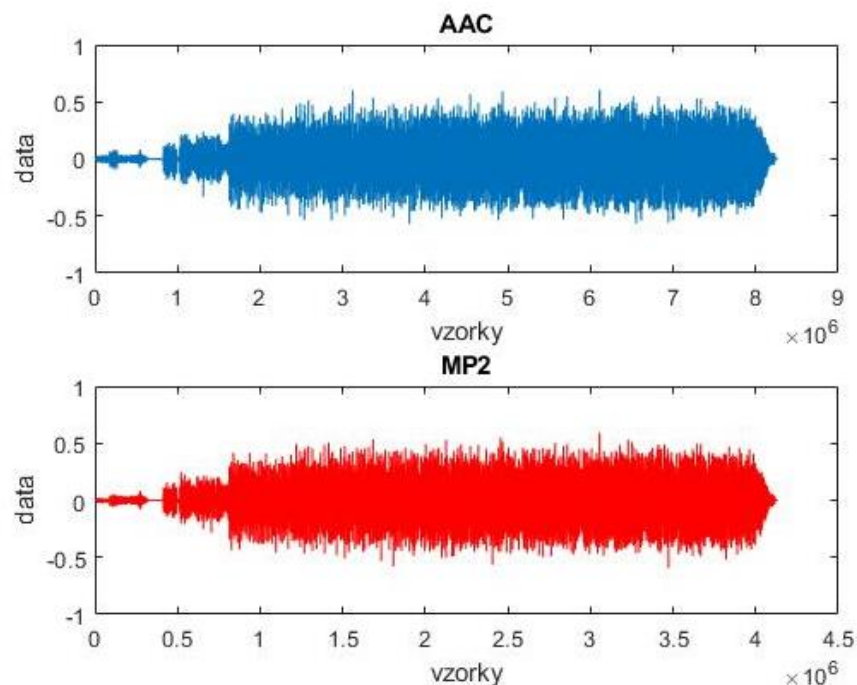
Generátor náhodných dat generuje na základě zvolené délky vstupních dat binární datovou posloupnost. Zvolená délka přitom může mít libovolnou hodnotu. V dalších procesech je ošetřeno, aby nenastala chyba vzniklá nevhodnou délkou dat, a tím nenarušila chod generátoru.

Vzorkování je v tomto případě nastaveno na hodnotu 2 048 kHz, ale volitelným parametrem PocerVstupnichDat můžeme tuto hodnotu libovolně změnit.

## Zvukový soubor

Jako zvukový soubor může být vložen soubor v libovolném formátu, ovšem u systému DAB se využívá výhradně formátu MP2 a AAC. Tyto dva formáty jsou k dispozici jako testovací zvukové nahrávky.

Formát MP2 je vzorkován frekvencí 22 kHz a formát AAC je vzorkován frekvencí 44 kHz. Pro příklad jsou na následujícím obrázku vykresleny oba navzorkované signály, které se liší pouze v typu zvukového kódování. U formátu MP2 je využita vzorkovací frekvence 22 kHz, u AAC je vzorkovací frekvence 44 kHz.



Obrázek 15 - Navzorkované zvukové signály

Zvukový soubor je načítán funkcí audioread, která signál načte a uloží jeho vzorkovací frekvenci. Následně je signál ve vytvořeném skriptu s názvem KvantovaniVstupnihoSignalu.m převeden do binární podoby.

Funkce KvantovaniVstupnihoSignalu.m funguje tak, že vypočítá rozsah z maximální a minimální hodnoty v signálu. Tuto hodnotu dále rozdělí podle počtu kvantovacích hodnot. Tento počet je vzhledem k výpočetním úkonům počítače a prodloužené době výpočtu nastaven

na čtyřbitové číslo, to znamená 16 kvantovacích úrovní. Následně se každé hodnotě přiřadí nejbližší kvantovací hladina a podle té se diskretní signál převede na binární číslo. Toto čtyřbitové číslo je následně pomocí funkce reshape převedeno na posloupnost vstupních dat.

U DAB se používá kvantování o délce 16 bitů na jeden vzorek. Tato hodnota však velmi prodlužuje výpočet, proto je použita hodnota 4 bitů. Vzhledem k tomuto problému je ještě umožněno vybrání délky části zvuku, která se bude zpracovávat. Tato část zvuku je pak vybrána od poloviny zvukového záznamu, jelikož u většiny zvukových souborů je na začátku série nulových navzorkovaných hodnot.

## 2.4 Konvoluční kodér

Po připravení vstupních dat následuje jejich zpracování v konvolučním kodéru. Konvoluční kodér má za úkol vytvořit základní (mateřskou) matici a následně pomocí „puncturingu“ a vybraného kódovacího profilu vhodně data zakódovat, jak je uvedeno v kapitole 1.4, kde se nachází celý teoretický popis konvolučního kódování.

Celý tento proces je tvořen skriptem KonvolucniKoder.m. Vstupem tohoto skriptu je datová posloupnost (v případě generátoru DAB to jsou vstupní data) a zvolený kódový poměr. Možné zvolení kódového poměru s vektory tzv. „puncturingu“ je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 7 - Kódové poměry s vektory puncturingu

Úroveň ochrany	Puncturing vektor
1A	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2A	1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0
3A	1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0
4A	1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0
1B	1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0
2B	1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0
3B	1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0
4B	1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0

Po načtení potřebných hodnot probíhá doplnění dat nulami. Vzhledem k použitému konvolučnímu kodéru je nezbytné, aby počet vstupních dat odpovídal násobku 32. Ve skriptu je poté použita vnořená funkce Matlabu `comm.ConvolutionalEncoder`, která provádí samotné konvoluční kódování vstupující datové posloupnosti a „puncturing“ podle zvoleného kódovacího profilu.

Další hodnota, která byla použita ve funkci `comm.ConvolutionalEncoder`, byla upravena podle normy ETSI EN 300 401 V2.1.1, 2016 a jedná se o strukturu polynomu:

$$p = [133 \ 171 \ 145 \ 133] ,$$

kde:

$p$  polynom pro „puncturing“

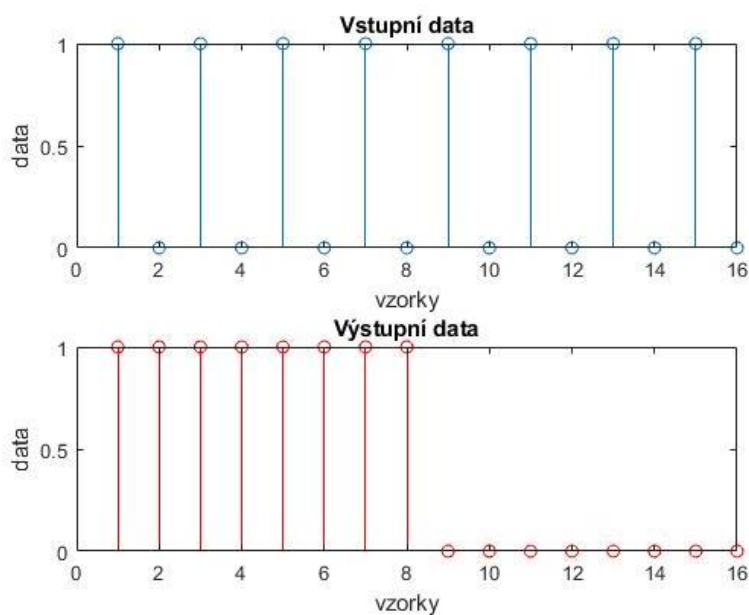
Takto upravený signál je konvolučně zakódovaný a připravený pro časové prokládání.

## 2.5 Časové prokládání

Tento blok v generátoru DAB má za úkol přeskládat vstupní data dle předem dané posloupnosti. Tato posloupnost je uvedena v tabulce (tabulka 2).

V programu je časové prokládání prováděno vytvořeným skriptem `CasoveProkladani.m`. Do něj v případě DAB generátoru vstupují konvolučně zakódovaná data, která již mají příslušný rozměr díky konvolučnímu kodéru. Vzhledem k možnosti jiného použití jsou vstupní data upravena na násobek šestnácti doplněna nulami na požadovanou délku.

Poté je vytvořen cyklus `for`, který podle vektoru, vytvořeného podle již zmíněné tabulky posloupnosti dat po časovém prokládání, přeskládá vstupní data do požadované posloupnosti. Na následujícím obrázku jsou zobrazena vstupní data a výstupní data, která jsou upravená dle dané posloupnosti. Takto přeskládaná data jsou připravena pro další zpracování v systému DAB.



**Obrázek 16 - Funkce časového prokládání**

## 2.6 Mapování DQPSK

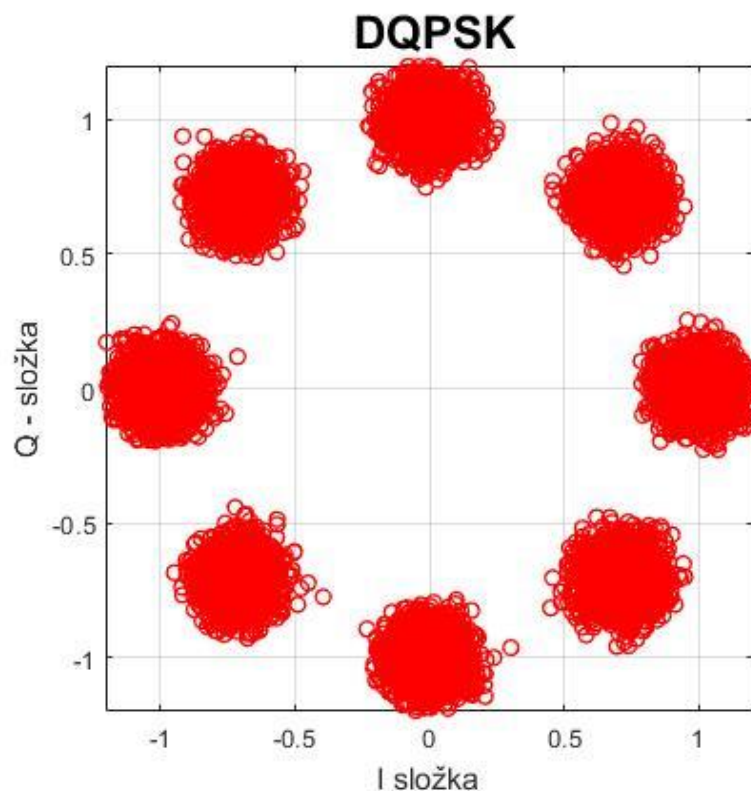
V systému digitálního rozhlasového vysílání je používaná symbolová modulace D-QPSK. Tato modulace je blíže popsána v podkapitole 1.6.2.

Pro simulaci této modulace byl vytvořen skript DQPSKModulator.m. Do tohoto skriptu vstupuje signál, který je již konvolučně kódovaný a časově proložený.

Vytvořený skript využívá vnořené funkce Matlabu comm.DQPSKmodulator. Tato funkce přijímá vstupní data a jejím výstupem jsou komplexní data zakódována podle vzorce uvedeného v kapitole 1.6.2.

Na následujícím obrázku je zobrazen konstelační diagram DQPSK modulace s přidáním bílým Gaussovským šumem (o hodnotě odstupu signálu od šumu 20 dB), aby bylo možné vidět v každé hodnotě symbolu DQPSK více hodnot než jen jedna, která překrývá ostatní.





Obrázek 17 - DQPSK s přidaným šumem 20 dB

## 2.7 S/P převod a multiplexování

Tento blok provádí rozdělení sériových vstupních dat do paralelního toku dat podle počtu symbolů, které jsou přenášeny na jedné subnosné. Tato hodnota je dána zvoleným přenosovým módem. Hodnoty pro jednotlivé módy jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8 - Parametry přenosových módů

Přenosový mód	Počet subnosných	Počet symbolů na jedné subnosné
1	1536	76
2	384	76
3	192	153
4	768	76

Jako vstupní hodnoty pro vytvořenou funkci, která provádí multiplexování, jsou vstupní data, která již jsou po modulaci DQPSK, a přenosový mód, který slouží ke zjištění potřebných parametrů.

Skript pracuje tak, že doplní vstupní data nulami na hodnotu, která odpovídá přesnému počtu symbolů na všech použitých subnosných. Tyto hodnoty jsou na začátku skriptu vyčteny pomocí funkce switch. Poté jsou hodnoty zapsány do matice, která má rozměry podle použitého módu.

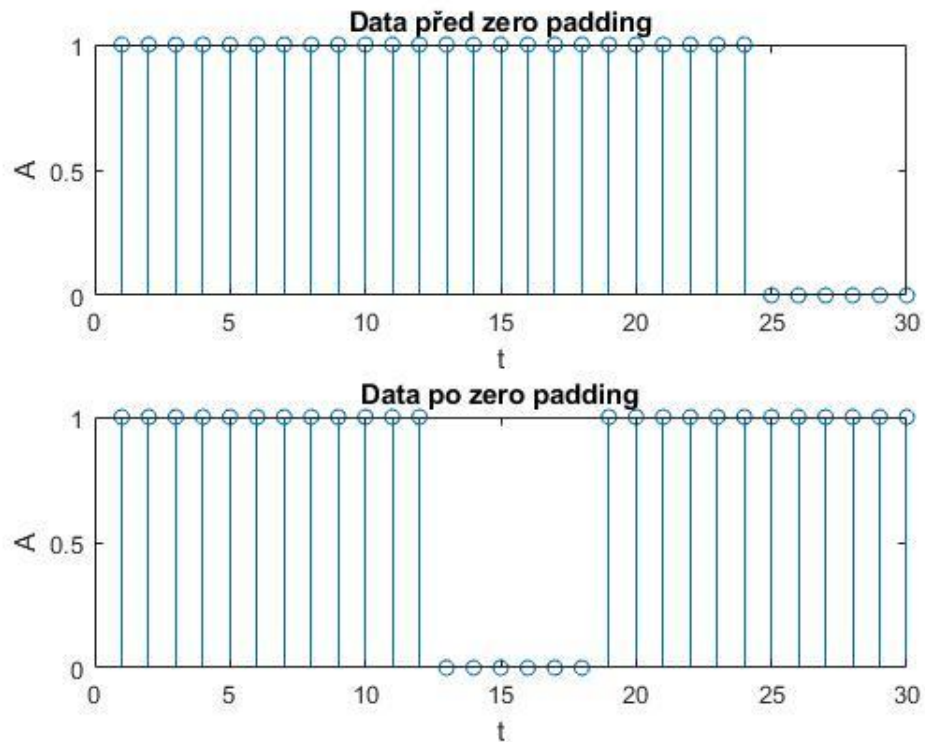
Druhou hodnotou, která z této funkce vystupuje, je počet použitých nosných. Tato hodnota je pak dále používána zejména k přípravě dat pro modulaci OFDM.

## **2.8 Vytvoření rámce pro OFDM**

Tento blok vytvořeného generátoru DAB signálů je velmi důležitý pro správnou funkci OFDM modulátoru. Modulace OFDM potřebuje jako vstup matice, které mají přesně dané rozměry.

Z tohoto důvodu jsou nejprve ve skriptu, který provádí přípravu dat pro OFDM modulaci, `PripravaDatProOFDM.m` vypočteny potřebné hodnoty. Jednou z nich je délka FFT u OFDM. Ta je dána nejbližší vyšší druhou mocninou čísla dvě. Dále počtem OFDM, který je důležitý pro vytvoření trojrozměrné matice pro jednotlivé OFDM rámce.

Následně jsou komplexní vstupní data, která jsou již namodulovaná pomocí DQPSK, do vytvořené matice vložena a doplněna nulami do počtu subnosných již zmiňované délky FFT. Na následujícím obrázku je vyobrazen způsob, jakým jsou nulové hodnoty vkládány do matice pro OFDM (kdyby bylo pro OFDM potřeba 30 hodnot). Tento postup se označuje jako „zero padding“.



Obrázek 18 - Princip zero padding

## 2.9 Modulace OFDM

Tento blok slouží k provedení vlastní modulace OFDM. K tomu je použita vnořená funkce Matlabu `comm.OFDMModulator.m`. Tato funkce musela být upravena tak, aby odpovídala normě ETSI EN 300 401 V2.1.1, 2016, která specifikuje celý systém DAB.

Ve funkci byly upraveny následující parametry:

- specifikace délky FFT,
- uvedení počtu symbolů na jednotlivých subnosných,
- povolení pilotních subnosných,
- vložení všech hodnot pilotních subnosných,
- specifikace délky cyklického prefixu.

Hodnoty jsou načítány pomocí funkce `Switch`, která vybírá hodnoty podle zvoleného přenosového módu. Vektory, ve kterých jsou hodnoty pořadí jednotlivých pilotních kmitočtů, jsou načítány ze souborů `TM1`, `TM2`, `TM3` nebo `TM4` podle zvoleného přenosového módu.

Následně jsou upraveny tak, aby nebyly v záporných hodnotách, jelikož to použítá funkce `comm.OFDMModulátor.m` nepodporuje.

Poté jsou kontrolně zjištěny parametry vytvořeného modulátoru a na jejich základě jsou vygenerovány pilotní subnosné, které jsou ve funkci vloženy do systému na předem definovaných pozicích. Pilotní kmitočty mají dle specifikace DAB nulové hodnoty. Tabulka pilotních kmitočtů je uvedena v příloze A.

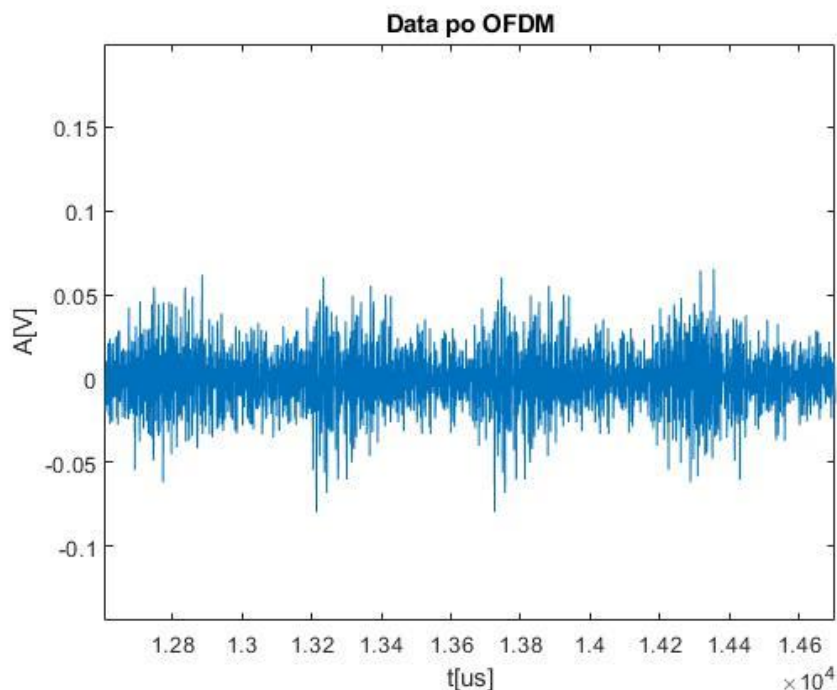
Takto máme připraveny všechny potřebné údaje pro OFDM modulaci. Jejimi vstupními hodnotami jsou:

- vstupní data (upravena do požadované matice),
- přesný počet vygenerovaných pilotních kmitočtů.

Ta probíhá postupně podle toho, kolik máme OFDM rámců. Následně jsou hodnoty zapisovány do matice, kde každý vytvořený OFDM rámec odpovídá jednomu sloupci.

Na následujícím obrázku (obrázek 19) je vyobrazen výřez výstupního signálu z OFDM modulátoru se vstupními parametry, které na něj mají vliv. Jde o:

- vstupní data: generátor,
- délku vstupních dat: 20 000,
- přenosový mód: 2,
- kódový poměr: 3A.

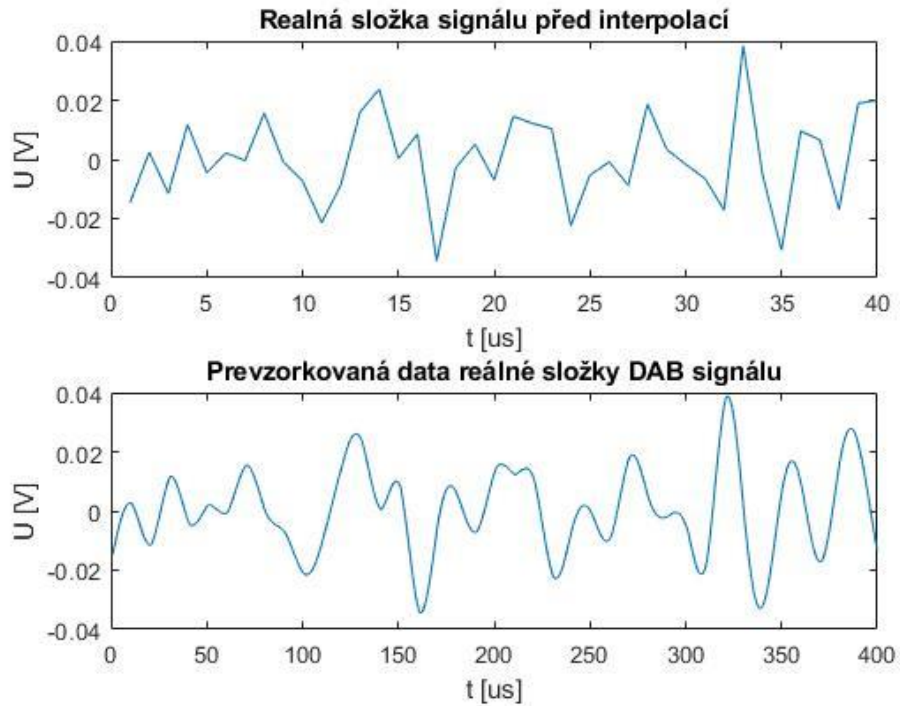


Obrázek 19 - Data po OFDM modulaci (TM1)

## 2.10 Úprava výstupního signálu

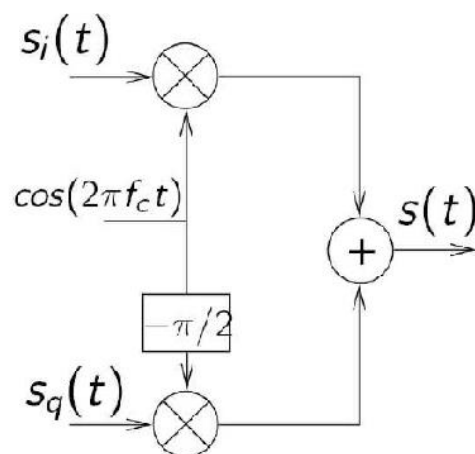
Poslední fází generátoru DAB signálu jsou finální úpravy signálu. Nejprve je signál rozdělen do složek, které odpovídají reálné a imaginární části signálu. Následně jsou pak obě složky převzorkovány (interpolovány). K tomu je použita funkce Matlabu `interp`, která podle zadané míry interpolace převzorkuje výstupní signál.

Při použití generovaných dat je potřeba dát pozor na hodnotu míry interpolace. Jelikož je základní vzorkovací frekvence 2 048 kHz, je potřeba pro splnění Nyquistova teorému u frekvencí používaných u DAB velmi vysoká míra interpolace. Na následujícím obrázku je ukázán signál, na kterém je použita interpolace s mírou 10.



Obrázek 20 - Interpolace

Modulace na nosnou je prováděna u systému DAB pomocí kvadraturního modulátoru. Nejprve jsou jednotlivé složky vynásobeny funkcí sinus či kosinus o nosné frekvenci a následně jejich součtem vznikne výstupní signál, namodulovaný na nosnou vlnu. Princip kvadraturní modulace je vyobrazen na následujícím obrázku a popsán následující rovnicí.



Obrázek 21 - Kvadraturní modulátor [17]

$$s(t) = s_i(t) \cos(2\pi f_c t) + s_q(t) \sin(2\pi f_c t),$$

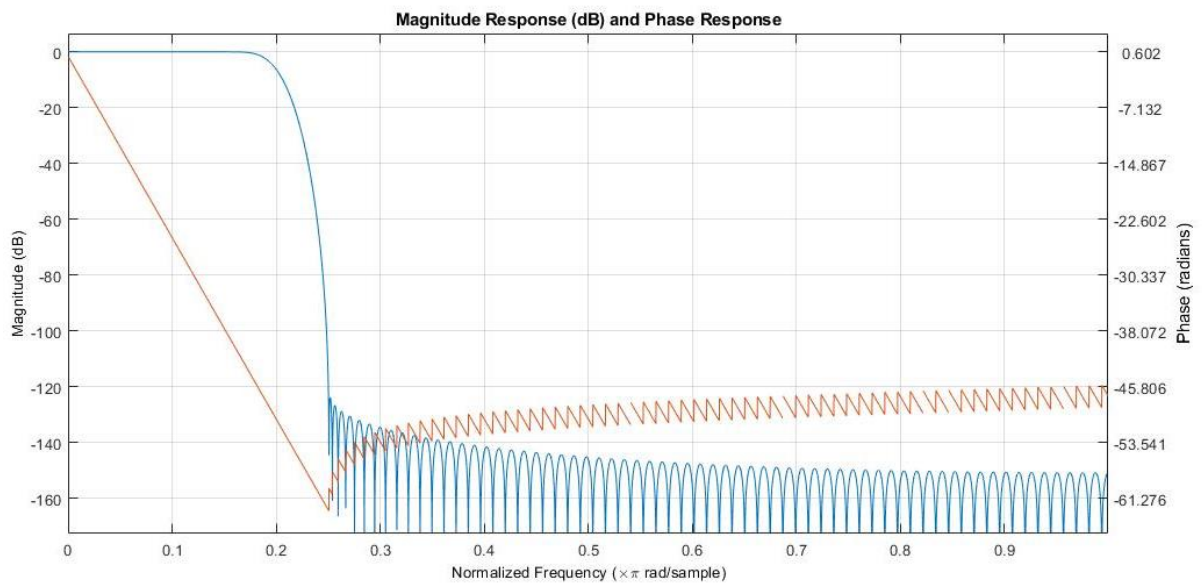
kde  $s(t)$  výstupní signál

$s_i(t)$  imaginární složka signálu

$s_q(t)$  reálná složka signálu

$f_c$  frekvence nosné vlny

Prvním krokem modulace na nosnou vlnu je filtrace jednotlivých složek. Ta probíhá pomocí navrženého filtru, jehož amplitudové a fázové charakteristiky jsou vyobrazeny na následujícím obrázku. Ve vytvořeném generátoru digitálního rozhlasového vysílání je možné u filtrů měnit jeho výstupní řád. Standardně je nastaven na hodnotu 100.

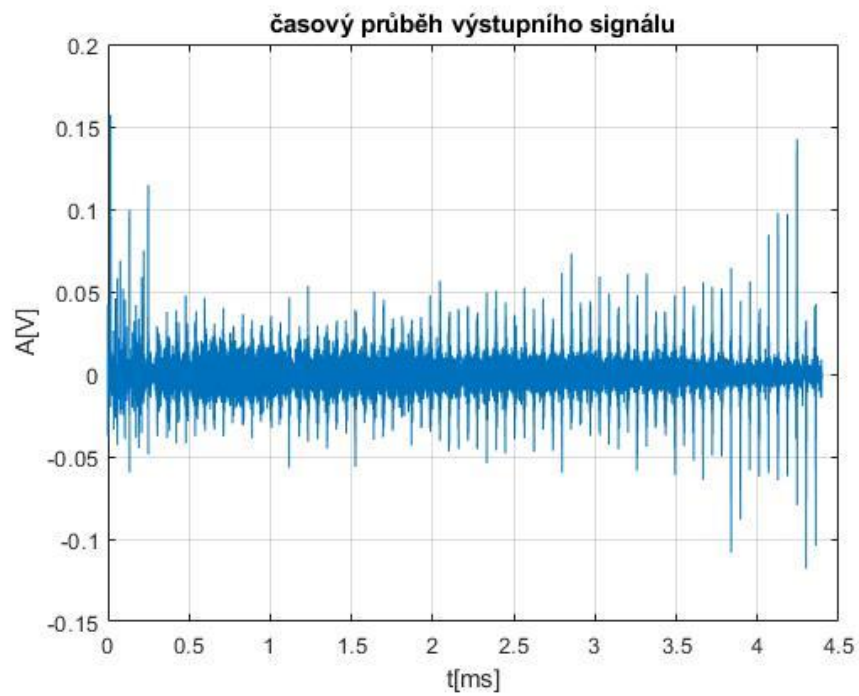


**Obrázek 22 - Charakteristika navrženého filtru**

Posledním krokem je samotné vynásobení na nosnou vlnu. To probíhá vynásobením signálu funkcí sinus, případně kosinus o zadané nosné frekvenci signálu. Na následujících obrázcích je vyobrazen výsledný signál v časové oblasti a jeho přenosové spektrum se zvolenými parametry.

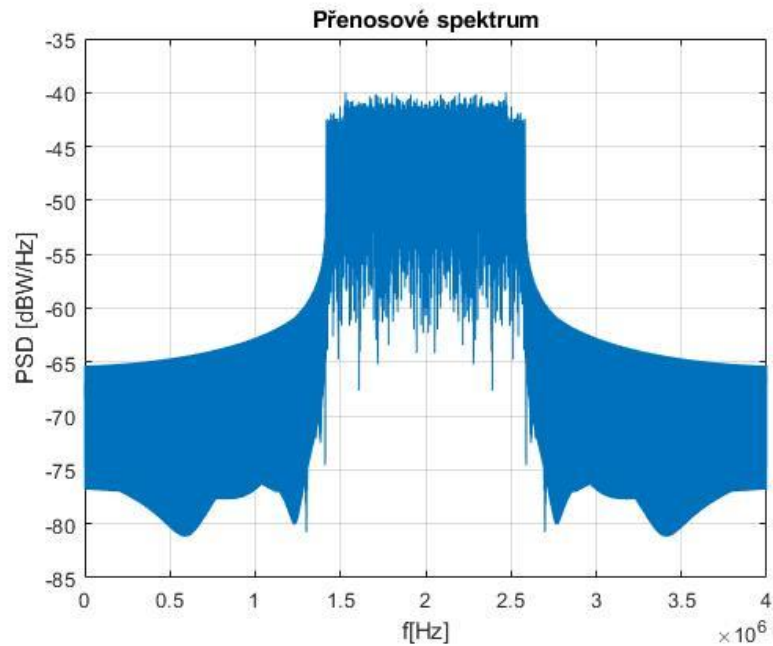
Jde o tyto parametry:

- vstup: zvukový soubor testAAC.aac,
- počet vstupních dat: 20 000,
- nosná frekvence: 200 kHz,
- interpolace: 1,
- přenosový mód: 1,
- kódový poměr: 1A,
- řád výstupního filtru: 100,
- bez šumu.



**Obrázek 23 - Výsledný signál DAB**

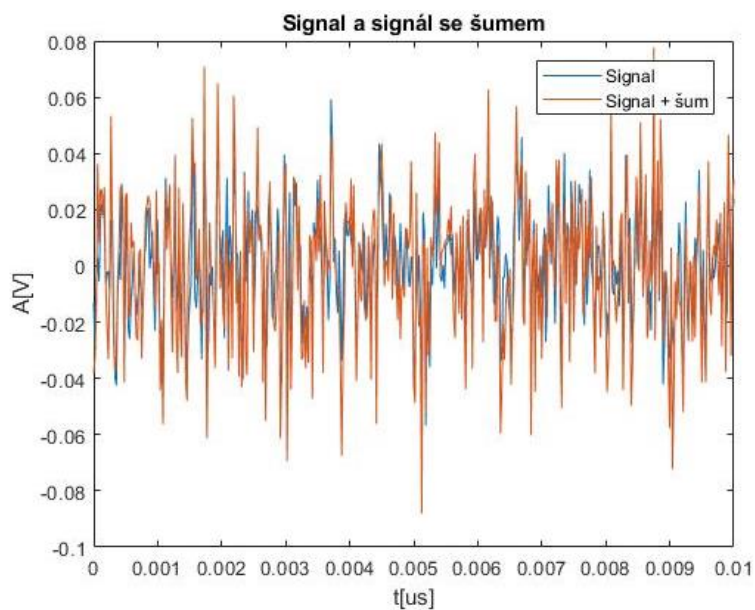




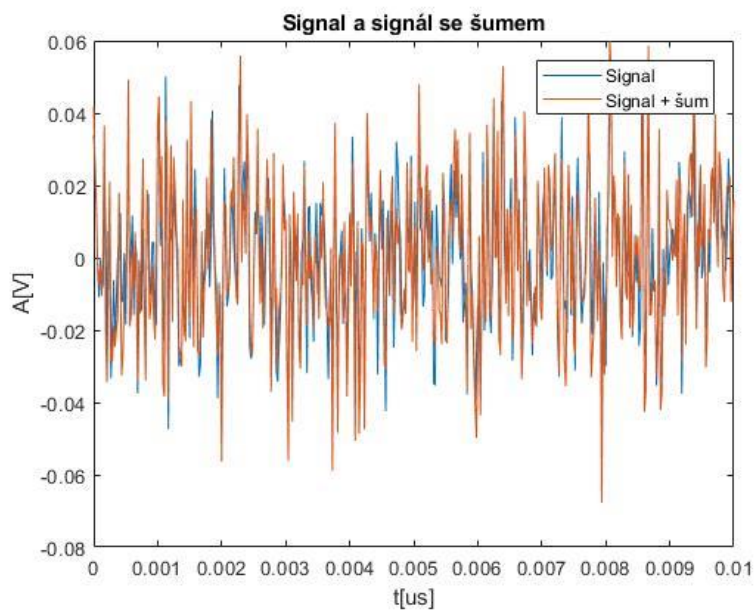
Obrázek 24 - Spektrum výstupního signálu

## 2.11 Přidání šumu/Simulace přenosového kanálu

Po vygenerování signálu je dalším krokem přidání šumu, které simuluje průchod signálu přenosovým kanálem. Hodnotu odstupů signálu od šumu zadává uživatel. Přidává se k signálu šum pomocí funkce `awgn`, tudíž se jedná o bílý Gaussovský šum. Na následujícím obrázku jsou vyobrazeny výřezy dvou signálů v časové oblasti, ke kterým je přidán druhý signál, který je zašuměný. Na první obrázku je přidán šum s odstupem 2 dB a na druhém s odstupem 5 dB.



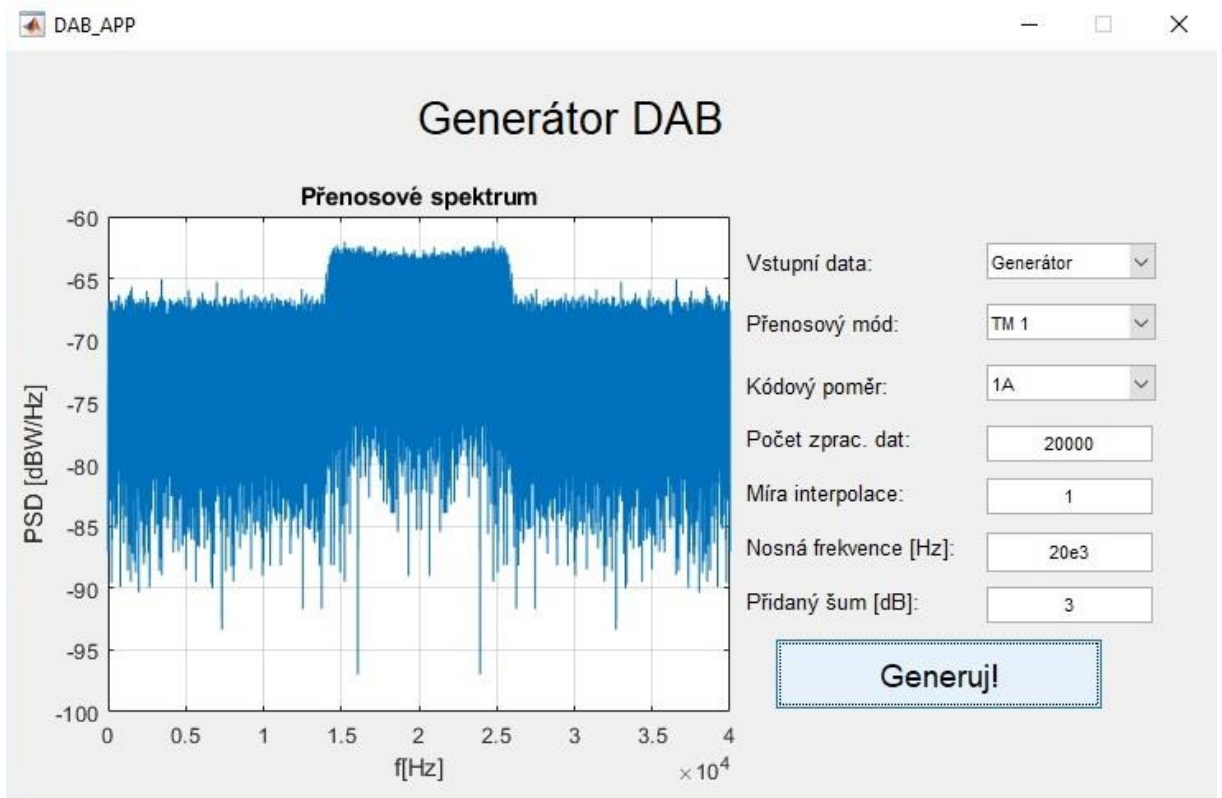
Obrázek 25 - Signál se šumem 2 dB



Obrázek 26 - Signál se šumem 5 dB

## 2.12 Uživatelské rozhraní

Pro snadnější práci s vytvořeným generátorem digitálního rozhlasového vysílání bylo v programu Matlab vytvořeno jednoduché uživatelské rozhraní. Zapnuté rozhraní je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 27 - Uživatelské rozhraní

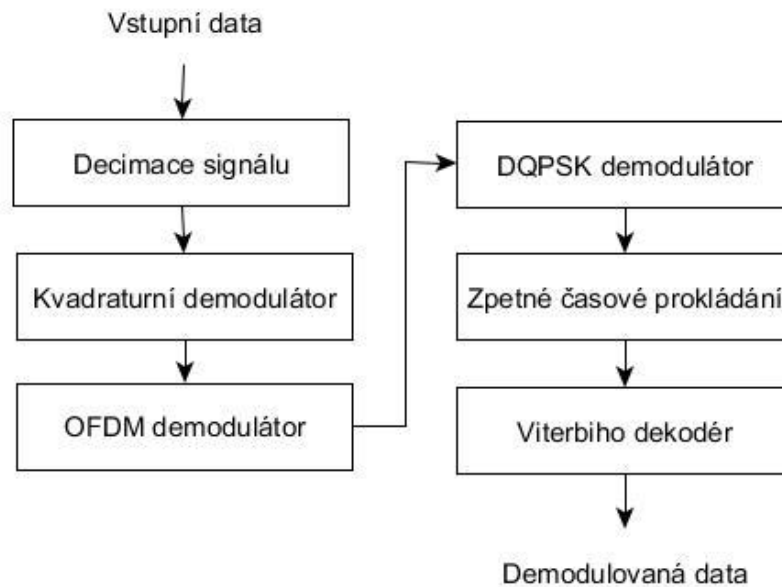
Uživatelské rozhraní umožňuje zadání několika základních parametrů, ze kterých se generuje výsledný signál. Následně po zadání parametrů a zmáčknutí tlačítka Generuj! se vygeneruje DAB signál a vykreslí se jeho přenosové spektrum.

Parametry, které je možné měnit:

- vstupní data,
- přenosový mód,
- kódový poměr,
- počet zpracovaných dat,
- míra interpolace,
- nosná frekvence,
- přidaný šum.

### 3 Zjištění správnosti simulace za pomoci dekódování

Pro zjištění správnosti jednotlivých funkčních bloků je po generátoru vytvořen i demodulátor (dekodér). Jedná se o zpětnou posloupnost všech úkonů, které jsou prováděny při generování DAB signálu.



Obrázek 28 - Blokové schéma demodulátoru

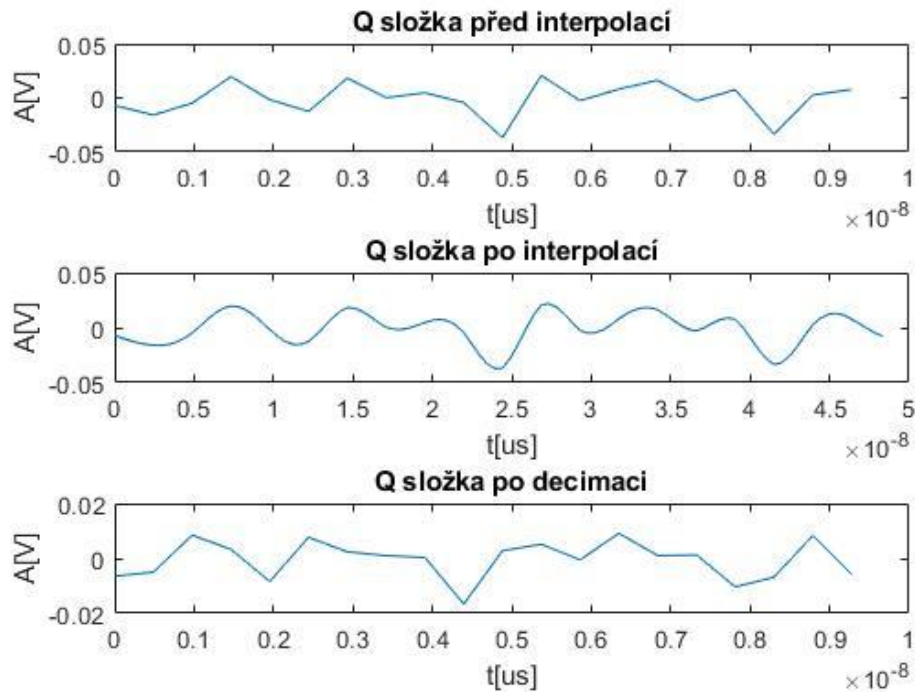
Nejprve je potřeba při zpětném převodu dat signál kvadraturně demodulovat a provést decimaci, a to shodně podle použité hodnoty míry interpolace, abychom měli data v původním formátu. Druhým procesem je OFDM demodulace ze které získáme zpátky komplexní hodnoty signálu, které pomocí DQPSK demodulátoru převedeme na bitovou posloupnost. Tu je třeba ještě zpětně časově proložit a konvolučně dekodovat. Takto získaný signál by měl odpovídat vstupnímu signálu do generátoru DAB signálu.

#### 3.1 Kvadraturní demodulátor a decimace signálu

Tato část slouží ke zpětnému získání kvadraturních složek signálu a následnému snížení vzorkovací frekvence, která byla pomocí interpolace zvýšena na výstupu generátoru DAB signálu.

Nejprve jsou tedy získávány I a Q složky. Ty byly získány vynásobením funkcemi sinus, případně kosinus o nosné frekvenci, na kterou byly data modulovány při výstupu. Tyto získané

složky jsou na následujícím obrázku porovnávány se složkami, které byly vytvořeny pomocí generátoru. Jedná se o prvních 20 vzorků I a Q složek, u kterých nebyl použit šum, aby bylo zřejmé, že jsou data stejná. Pro převzorkování byla použita míra interpolace o hodnotě 8.



Obrázek 29 - Interpolace

### 3.2 OFDM demodulátor

Další částí při demodulaci DAB signálu je OFDM demodulátor. Předtím je ovšem ještě potřeba signál upravit, aby měl požadované parametry. To probíhá tak, že nejprve jsou I a Q složky opět spojeny do komplexního čísla a následně pomocí funkce reshape převedeny zpět do formátu výstupu z OFDM generátoru, což je matice, která má sloupce podle počtu vytvořených OFDM symbolů. Tento signál je možné dále zpracovávat pomocí OFDM demodulátoru.

K samotné demodulaci OFDM slouží vytvořený skript DemodOFDM.m, který obsahuje vnořenou funkci comm.OFDMDemodulator, což je opačná funkce k comm.OFDMmodulator, která je využita v generátoru. Do zmíněné funkce, jsou jako u modulátoru vloženy potřebné parametry.

Jedná se o následující parametry:

- specifikace délky FFT,
- uvedení počtu symbolů na jednotlivých subnosných,
- povolení pilotních subnosných,
- vložení všech hodnot pilotních subnosných,
- specifikace délky cyklického prefixu.

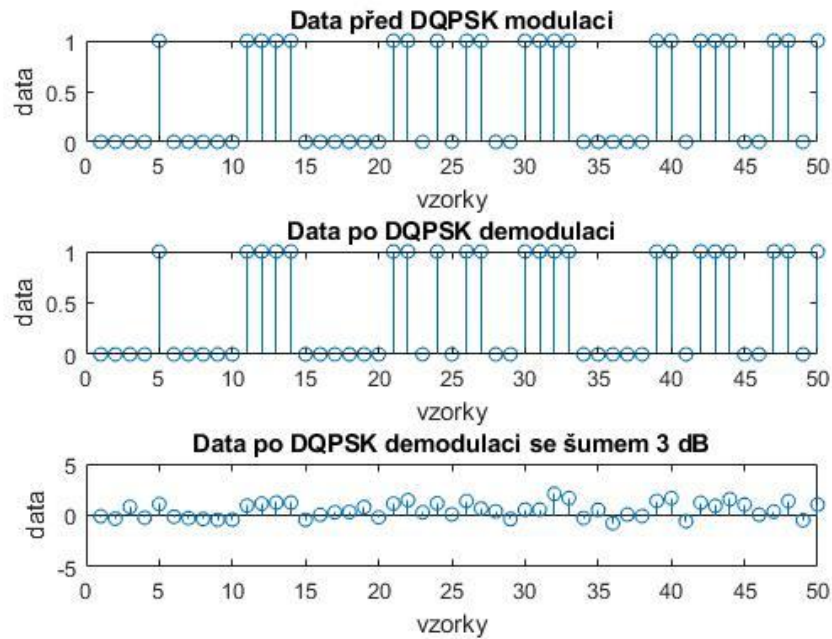
### 3.3 DQPSK demodulace

DQPSK demodulace je část, která nám z komplexních dat, která byla pomocí OFDM demodulátoru demodulována, vytvoří posloupnost bitů. Tento blok je tvořen skriptem DQPSKDemodulator.m.

Do tohoto skriptu vstupuje jen vektor, který byl vytvořen z dat po OFDM demodulaci za pomoci vytvořeného skriptu OpravaDatPoOFDM.m. Tam se převádí pomocí znalosti počtu OFDM a počtu jednotlivých subnosných a cyklů for na datový vektor, ze kterého se navíc odstraňují přidané nuly do počtu dat pomocí zero padding, který byl potřeba pro doplnění do počtu odpovídajícímu dané Fourierově transformaci.

Takto upravená data vstupují do skriptu DQPSKDemod, ve kterém se za pomoci vnořené funkce Matlabu comm.DQPSKDemodulator převádí komplexní hodnoty zpátky na hodnoty binární.

Na následujícím obrázku je uveden proces DQPSK modulace, demodulace a demodulace při přidaném šumu o hodnotě 3 dB.



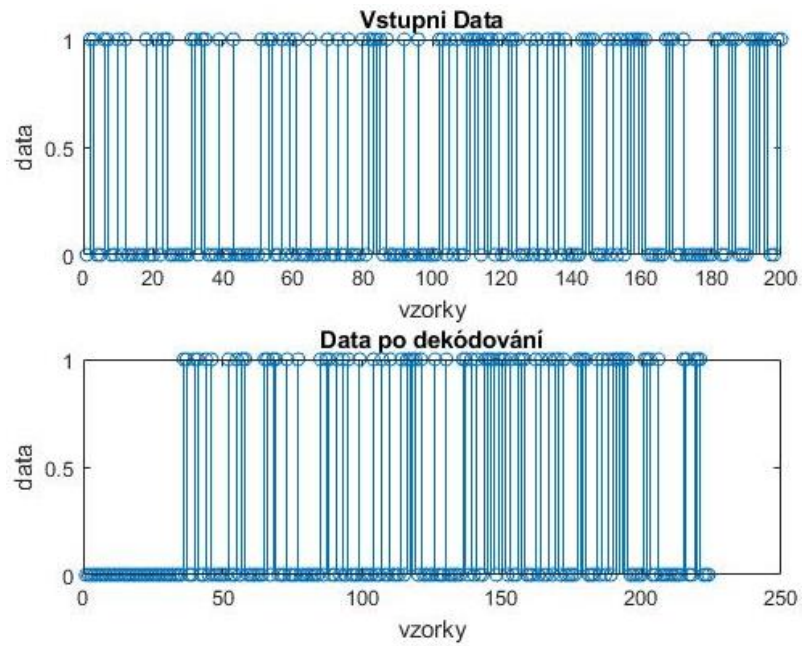
Obrázek 30 - DQPSK modulace/demodulace

### 3.4 Zpětné časové prokládání

Pro zpětné časové prokládání je vytvořen skript `ZpetneCasoveProkladani.m`. Tento skript převádí data přesně opačně než jeho inverzní skript `casoveProkladani.m`.

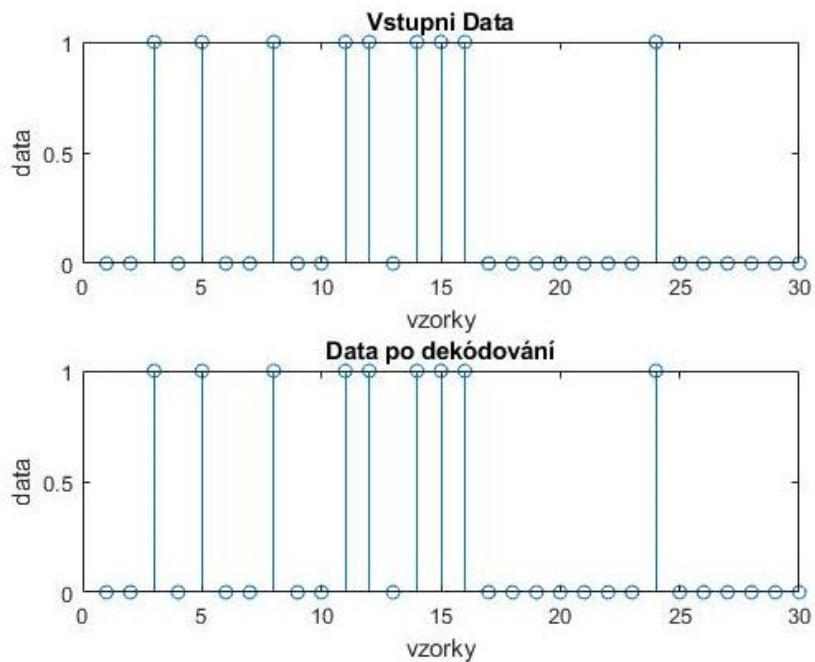
### 3.5 Konvoluční dekodér

Jako konvoluční dekodér se v případě digitálních modulací využívá Viterbiho dekodér. Pro proces dekódování za pomoci Viterbiho dekodéru byl vytvořen skript `KonvolucniDekoder.m`, který využívá vnořenou funkci Matlabu `comm.VitterbihoDekoder`, který je upraven stejně jako konvoluční kodér, který byl využit v generátoru. Na následujícím obrázku jsou vyobrazena vstupní data do konvolučního kodéru a výstupní data z konvolučního dekodéru. Takto získaná data jsou data, která vstupovala do generátoru.



Obrázek 31 - Konvoluční dekodér

Na obrázku je patrné, že jsou data po dekódování na začátku posunutá. Pro zjištění správné funkce konvolučního kodéru a Viterbiho dekodéru je na následujícím obrázku výřez vstupních dat a výřez dekódovaných dat posunutých o počáteční nuly.



Obrázek 32 - Konvoluční dekodér - výřez



## Závěr

Diplomová práce se věnuje problematice digitálního rozhlasového vysílání a vytvoření generátoru tohoto signálu.

V teoretické části je popsáno vytváření digitálního rozhlasového vysílání na základě prostudování normy ETSI EN 300 401, která vytváření daného signálu definuje. Dále jsou popsány jednotlivé části, ze kterých je generátor sestaven. V další části je popsán stav digitálního vysílání v Evropě. V Evropě se státy využívající digitálního vysílání řídí striktně normou ETSI EN 300 401, rozdíly jsou v povolených pásmech pro vysílání a systému povolování frekvenčních pásem.

Praktická část diplomové práce se v první části věnuje vytváření generátoru digitálního rozhlasového vysílání na základě poznatků získaných z teoretické části práce. Generátor je vytvářen v softwaru Matlab a v práci je popsán celý postup při jeho vytváření a jeho funkce. Simulace může být provedena na základě generovaných vstupních dat, případně z načteného zvukového souboru. Některé parametry generátoru lze měnit dle potřeby a na jejich základě je pak provedena simulace.

Pro zjednodušení práce s vytvořeným generátorem bylo vytvořeno uživatelské prostředí, díky kterému se snadno vygeneruje signál podle zadaných volitelných parametrů a vykreslí se spektrum vygenerovaného signálu.

Ve druhé části se praktická část této práce věnuje ověření správnosti výsledku simulace. Původním záměrem bylo porovnat vygenerovaný signál s reálným naměřeným signálem, tento záměr však nebylo možné naplnit. Správnost zjištěných výsledků tak byla ověřena pomocí k tomuto účelu vytvořeného demodulátoru (dekodéru) Tento dekodér byl vytvořen také v programu Matlab z několika skriptů, které jsou tvořeny inverzně ke generátoru a jsou v závěrečné části práce popsány. Výsledky jednotlivých procesů byly porovnávány se signálem, který byl odečítán z generátoru v místě, kde by měly tyto signály být identické. Na základě porovnávání jednotlivých bloků byla ověřena správnost funkce generátoru digitálního rozhlasového vysílání.

Vytvořený generátor je možné dále využít například k simulaci průchodu různými přenosovými kanály.

## Literatura

- [1] *Digital audio broadcasting: principles and applications of DAB, DAB and DMB*. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-51037-7.
- [2] *ETSI EN 300 401 V2.1.1: Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers*. France, 2016.
- [3] KOZAMERNIK, F. Digital Audio Broadcasting - radio now and for the future. *EBU Operating Eurovision And Euroradio* [online]. b.r. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: [https://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev\\_265-kozamernik.pdf](https://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev_265-kozamernik.pdf)
- [4] *WorldDAB: Defining the future of digital audio* [online]. London, 2018 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.worlddab.org>
- [5] *Digital radio DAB: informační portál o digitálním rozhlasovém vysílání* [online]. b.r. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.digitalradiodab.cz>
- [6] *Český telekomunikační úřad: Zemské digitální televizní a rozhlasové vysílání* [online]. 2018 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://dtv.ctu.cz/>
- [7] PRCHAL, Josef a Boris ŠIMÁK. *Digitální zpracování signálů v telekomunikacích*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2149-1.
- [8] *ETSI TS 103 466 V1.1.1: Digital Audio Broadcasting (DAB); DAB audio coding (MPEG Layer II)*. France, 2016.
- [9] *ETSI TS 102 563 V2.1.1: Digital Audio Broadcasting (DAB); DAB+ audio coding (MPEG HE-AACv2)*. France, 2017.
- [10] PHY Basics: How OFDM Subcarriers Work. *Revolution Wi-Fi* [online]. Minneapolis: Squarespace, 2015 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work>
- [11] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0132-2.
- [12] POUILLIN, D. Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*. 2005, **152**(3), 143-. DOI: 10.1049/ip-rsn:20045017. ISSN 13502395. Dostupné také z: [http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-rsn\\_20045017](http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-rsn_20045017)
- [13] SÝKORA, Jan. *Teorie digitální komunikace*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2478-4.

- [14] *Anténa* [online]. Brno: Anténa, 2016 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z:  
<https://www.antena.cz/>
- [15] Development of North America Terrestrial Digital Audio Broadcasting Receiver (HD Radio). *FUJITSU TEN TECHNICAL JOURNAL* [online]. 2005, **2005**(25), 42-53 [cit. 2018-08-25].
- [16] KRESTA, Daniel. *Analýza přenosu mobilního digitálního rozhlasového vysílání*. Brno, 2016. Diplomová práce. VUT Brno.
- [17] *TRK: Učebnice rádiové komunikace* [online]. Brno: TRK, 2013 [cit. 2018-07-01].  
Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz>
- [18] *MathWorks* [online]. United States: The MathWorks, Inc., 1994-2018 [cit. 2018-08-08].  
Dostupné z: <https://www.mathworks.com>

## Příloha A – Tabulka pilotních kmitočtů

Tabulka 9 - Tabulka pilotních kmitočtů

TM 1	TM2	TM3	TM4
-768	-192	-96	-384
-736	-160	-64	-352
-704	-128	-32	-320
-672	-96	1	-288
-640	-64	33	-256
-608	-32	65	-224
-576	1		-192
-544	33		-160
-512	65		-128
-480	97		-96
-448	129		-64
-416	161		-32
-384			1
-352			33
-320			65
-288			97
-256			129
-224			161
-192			193
-160			225
-128			257
-96			289
-64			321
-32			353
1			
33			
65			
97			
129			
161			
193			
225			
257			
289			
321			
353			
385			
417			
449			
481			
513			
545			
577			
609			
641			
673			
705			
737			

## Příloha B – Tabulky vysílacích pásem pro DAB

Tabulka 10 - Tabulka vysílacích pásem (III. TV pásmo)

T-DAB kanál	Střední frekvence [MHz]	T-DAB kanál	Střední frekvence [MHz]
5A	174,928	9D	208,064
5B	176,64	10A	209,936
5C	178,352	10B	211,648
5D	180,064	10C	213,36
6A	181,936	10D	215,64
6B	186,648	11A	216,928
6C	185,36	11B	218,64
6D	187,072	11C	220,352
7A	188,928	11D	222,064
7B	192,64	12A	223,936
7C	192,352	12B	225,648
7D	194,064	12C	227,36
8A	195,936	12D	229,072
8B	197,648	13A	230,784
8C	199,36	13B	232,496
8D	201,72	13C	234,208
9A	202,928	13D	235,776
9B	204,64	13E	237,488
9C	206,352	13F	239,2

**Tabulka 11 - Tabulka vysílacích pásem (L-pásmo)**

<b>T-DAB kanál</b>	<b>Střední frekvence [MHz]</b>
LA	1452,96
LB	1454,672
LC	1456,384
LD	1458,096
LE	1459,808
LF	1461,52
LG	1463,232
LH	1464,944
LI	1466,656
LJ	1468,368
LK	1470,08
LL	1471,792
LM	1473,504
LN	1475,216
LO	1476,928
LP	1478,64
LQ	1480,352
LR	1482,046
LS	1483,776
LT	1485,448
LU	1487,2
LV	1488,912
LW	1490,624