

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## PŘENOSOVÁ TECHNOLOGIE G.FAST

G.FAST TRANSMISSION TECHNOLOGY

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Zvařič

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Filip Zvaříč

**ID:** 162948

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Přenosová technologie G.fast

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte modulační metody využívané v přenosových systémech VDSL2 a G.fast. Proveďte podrobné porovnání řešení dílčích problematik využívané modulace DMT, tj. kódování, využití pásma, alokace nosných, řešení duplexního schématu, vyrovnávání přenosového kanálu, vectoring, atd. Na základě získaných znalostí realizujte v programovém prostředí Matlab tool umožňující porovnání všech profilů VDSL2 a G.fast. Program bude rovněž zahrnovat analýzu přínosu vektoringu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Bingham, John A. C.. ADSL, VDSL, and multicarrier modulation, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000. ISBN 0-471-29099-8.

[2] International Telecommunication Union (ITU-T). Recommendation ITU-T G.9701: Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification. ITU-T, 2014.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje technologiím G.fast a VDSL2 a jejich porovnání. G.fast disponuje předpoklady pro nahrazení VDSL2 přípojek krátké vzdálenosti. Práce podrobně popisuje modulační techniky obou DSL technologií – modulace DMT, kterou využívají obě technologie. Cílem této práce je vytvořit program pro porovnání přenosových rychlostí všech profilů obou technologií, včetně vlivu rušení na vzdáleném konci. To je realizováno v prostředí Matlab. V práci je popsán návod jak program funguje a jak spustit simulace. Výsledky vybraných simulací a jejich grafy jsou v práci prezentovány.

## KLÍČOVÁ SLOVA

G.fast, VDSL2, MCM, DMT, Matlab, simulace, vektorizace, FEXT.

## ABSTRACT

This diploma thesis focuses on G.fast and VDSL2 technologies and their comparison. G.fast has the prerequisites for replacing VDSL2 for short distances. This work describes in detail the modulation techniques of both DSL technologies - DMT modulation used by both technologies. The aim of this work is to create a software for comparing the transfer rates of all profiles of both technologies, including the effects of far-end crosstalk. This is performed in the Matlab environment. This work describes how the program works and how to run the simulations. The results of selected simulations and their charts are enclosed in this work.

## KEYWORDS

G.fast, VDSL2, MCM, DMT, Matlab, simulation, vectoring, FEXT.

ZVAŘIČ, Filip. *Přenosová technologie G.fast*. Brno, 2017, 69 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Přenosová technologie G.fast“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlovi Šilhavému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Technologie xDSL</b>	<b>13</b>
1.1 Duplexní přenos . . . . .	14
1.2 Modulace DMT . . . . .	15
1.2.1 Bitová alokace . . . . .	17
1.2.2 Bit Swap . . . . .	19
1.2.3 QAM/TCM . . . . .	20
1.2.4 Inverzní rychlá Fourierova Transformace . . . . .	20
1.2.5 Cyklická předpona a přípona . . . . .	21
1.2.6 Windowing . . . . .	22
1.2.7 Ekvalizér v časové oblasti . . . . .	23
1.2.8 Redukce PAR . . . . .	23
1.2.9 Ekvalizér ve frekvenční oblasti . . . . .	24
1.2.10 Vektorová modulace DMT . . . . .	24
1.3 Přeslechy . . . . .	24
<b>2 VDSL2</b>	<b>28</b>
2.1 Profily VDSL2 . . . . .	29
2.2 PSD masky . . . . .	31
<b>3 Technologie G.fast</b>	<b>33</b>
3.1 Synchronní časový duplex . . . . .	33
3.1.1 Délky rámců . . . . .	34
3.1.2 TDD rámeček . . . . .	35
3.1.3 Řízení toku dat . . . . .	36
3.2 Inicializace . . . . .	36
3.3 Profily G.fast . . . . .	37
3.4 PSD masky . . . . .	38
<b>4 Výsledky studentské práce</b>	<b>39</b>
4.1 Ovládání programu . . . . .	39
4.1.1 Hlavní menu . . . . .	39
4.1.2 Přidání profilů . . . . .	40
4.1.3 Zobrazení a mazání profilů . . . . .	41
4.2 Algoritmus programu . . . . .	42
4.2.1 PSD masky . . . . .	43
4.2.2 Model vedení . . . . .	44

4.2.3	Výpočet SNR a alokace bitů . . . . .	46
4.2.4	Vykreslení grafů . . . . .	47
4.3	Simulace . . . . .	48
4.3.1	VDSL2 simulace . . . . .	48
4.3.2	G.fast simulace . . . . .	53
4.3.3	VDSL2 a G.fast simulace . . . . .	57
4.4	Zhodnocení výsledků . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>63</b>
	<b>Literatura</b>	<b>64</b>
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>66</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>68</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>69</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Blokové schéma VDSL2 . . . . .	13
1.2	Annex B, profil 998ADE17 - Evropský standard . . . . .	13
1.3	Obousměrný přenos řešený pomocí FDD . . . . .	15
1.4	Ilustrační obrázek rozdělení frekvenčního pásma modulací DMT . . . . .	15
1.5	Blokové schéma DMT modulace pro VDSL2 . . . . .	16
1.6	Ilustrační obrázek adaptivní bitové alokace . . . . .	17
1.7	Alokace bitů pro nosné frekvence VDSL2 technologie . . . . .	19
1.8	Blokové schéma TCM . . . . .	20
1.9	Blokové schéma IFFT . . . . .	21
1.10	Přidání cyklického prefixu a suffixu . . . . .	21
1.11	Grafické znázornění funkcí Hanning a Hamming . . . . .	22
1.12	Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení . . . . .	25
1.13	Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení . . . . .	26
1.14	Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení . . . . .	27
1.15	Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení . . . . .	27
2.1	Maska Annex B 998 ADE17-M2x-B pro DS . . . . .	31
2.2	Maska Annex B 998 ADE17-M2x-B pro US . . . . .	32
3.1	Znázornění STDD . . . . .	34
3.2	Struktura TDD rámce . . . . .	35
3.3	Maska profilu 106b . . . . .	38
4.1	Hlavní menu programu . . . . .	39
4.2	Menu pro přidání VDSL2 profilů . . . . .	40
4.3	Menu pro přidání G.fast profilů . . . . .	41
4.4	Seznam vybraných profilů . . . . .	41
4.5	Vývojový diagram výpočetní funkce . . . . .	42
4.6	PSD maska profilu 997 E30-M2x-NUS0 pro DS . . . . .	43
4.7	PSD maska profilu 997 E30-M2x-NUS0 pro US . . . . .	44
4.8	Vložný útlum BT_dwug na 100 m . . . . .	46
4.9	Vložný útlum 24 AWG na 100 m . . . . .	46
4.10	Vliv pásma US0 na downstream . . . . .	49
4.11	Vliv pásma US0 na upstream . . . . .	49
4.12	Vliv vektorizace na přenosové rychlosti VDSL2 pro DS . . . . .	50
4.13	Rušení FEXT ve VDSL2 systémech pro DS . . . . .	51
4.14	Celkový šum ve VDSL2 systémech pro DS . . . . .	51
4.15	Vliv vektorizace na přenosové rychlosti VDSL2 pro US . . . . .	52
4.16	Rušení FEXT ve VDSL2 systémech pro US . . . . .	52
4.17	Celkový šum ve VDSL2 systémech pro US . . . . .	53

4.18	Rozdíl v přenosové rychlosti profilů 106a a 106b pro DS . . . . .	54
4.19	Vliv vektorizace na přenosové rychlosti G.fast pro DS . . . . .	54
4.20	Rušení FEXT v G.fast systémech pro DS . . . . .	55
4.21	Celkový šum v G.fast systémech pro DS . . . . .	55
4.22	Vliv změn $M_{ds}$ rámců pro DS . . . . .	56
4.23	Porovnání obou technologií pro vedení BT_dwug pro DS . . . . .	57
4.24	Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro DS . . . . .	58
4.25	Porovnání obou technologií pro vedení BT_dwug pro US . . . . .	58
4.26	Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro US . . . . .	59
4.27	Porovnání obou technologií pro vedení BT_dwug pro DS . . . . .	60
4.28	Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro DS . . . . .	60
4.29	Porovnání obou technologií pro vedení BT_dwug pro US . . . . .	61
4.30	Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro US . . . . .	61

# SEZNAM TABULEK

2.1	Profily VDSL2 . . . . .	28
3.1	Délky prvků STDD . . . . .	35
3.2	ITU-T G.9701 profily . . . . .	37
4.1	Parametry kabelu BT_dwug . . . . .	44
4.2	Parametry testovaných profilů . . . . .	48
4.3	Testované hodnoty $M_{ds}$ rámců . . . . .	56



# ÚVOD

Tato diplomová práce se věnuje technologiím G.fast a VDSL2 a jejich porovnání. Tyto technologie poskytují vysokorychlostní internet mnoha domácnostem. Pro připojení vysokorychlostního internetu přes metalická vedení se převážně využívá technologie VDSL2. G.fast technologie disponuje předpoklady pro nahrazení těchto přípojek na krátké vzdálenosti a může docílit mnohem vyšších rychlostí.

Nejprve se tato práce věnuje DSL technologiím, jejich principu transportu dat a jakým způsobem je vytvořeno jejich spojení s tradičním telefonním systémem.

Popsány jsou také typy oddělení směrů – EC, FDD, TDD – které zajišťují tok obousměrné komunikace.

Teoretická část této práce se věnuje zejména principu modulace DMT (Discrete Multitone - diskrétní vícetónová modulace), kterou využívají technologie VDSL2 a G.fast. Jednotlivé kroky této modulace jsou podrobně popsány s ilustračními obrázky, blokovými schématy a jsou doplněny o grafy realizované v prostředí Matlab.

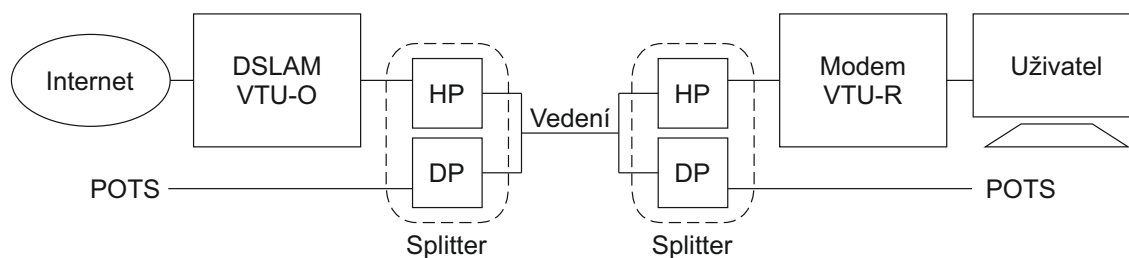
Práce také zahrnuje seznamy všech dostupných profilů obou technologií, včetně jejich technických parametrů – vysílací výkon, šířka pásma, počet a rozložení nosných frekvencí, atd.

Cílem této práce je vytvořit program v prostředí Matlab pro porovnání přenosových rychlostí obou technologií v závislosti na vzdálenosti účastníka od distribučního bodu. Hlavní část práce popisuje ovládání a algoritmus programu a provedené kroky pro úspěšnou simulaci DSL technologií. K výsledkům této práce jsou přiloženy grafy simulací vybraných profilů VDSL2 a G.fast.

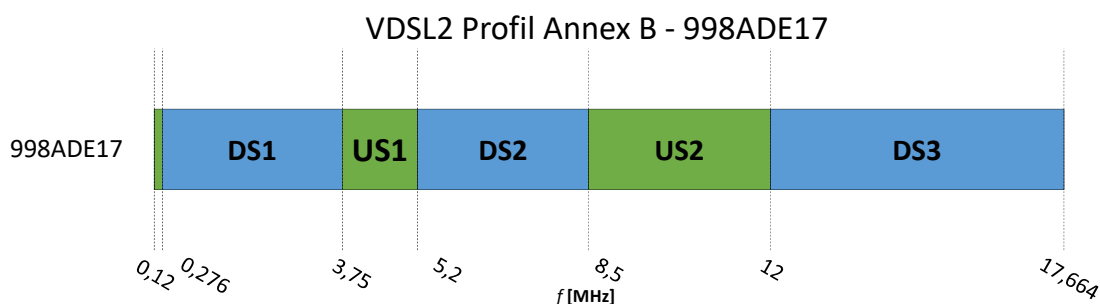
# 1 TECHNOLOGIE xDSL

DSL (Digital Subscriber Line – digitální účastnická přípojka) je přenosová technologie, díky které má mnoho domácností vysokorychlostní internet. Technologie používá k přenosu metalické dvoudrátové vedení, a velkou výhodou je, že ji lze aplikovat na již umístěné telefonní vedení (POTS) a nemusí se pokládat nové kabely až ke koncovému účastníkovi.<sup>1</sup> [1]

Princip této technologie spočívá ve využití vyššího kmitočtového spektra, než je pásmo telefonních služeb (od 300 Hz do 3,4 kHz) – ADSL (Asymetrická DSL) využívá pásmo až do 1,1 MHz a dosahuje rychlosti až 24 Mb/s. Spektra POTS a xDSL služeb jsou odděleny kmitočtovým filtrem (Splitter), takže se sebou vzájemně nekolidují a obě služby jsou účastníkům dostupny najednou. Spektrum je rozděleno do frekvenčních „bloků“ (viz kapitola 1.1) určených pro downstream (DS – směr k uživateli) a upstream (US – směr od uživatele). Počet, velikost těchto bloků a poměr mezi nimi popisují profily těchto technologií.



Obr. 1.1: Blokové schéma VDSL2



Obr. 1.2: Annex B, profil 998ADE17 - Evropský standard

Na obr. 1.2 je příklad frekvenčního rozdělení těchto DS/UP bloků na profilu 998ADE17 (Annex B). Blok od 120kHz do 276kHz je určen pro Upstream (přesněji

<sup>1</sup>Poslední kus cesty až do domácnosti je ten nejdražší

US0) a jeho šířka pásma se lehce liší podle lokace (Annex A, B a C). Tento profil je znázorněn dle doporučení ITU-T G.993.2 [5].

xDSL technologie podporuje 3 typy přenosu:

1. STM (Synchronous Transfer Mode – synchronní přenosový mód)
2. ATM (Asynchronous Transfer Mode – asynchronní přenosový mód)
3. PTM (Packet Transfer Mode – paketový přenosový mód)

Kvůli internetovým technologiím se nejčastěji využívá PTM [1].

## 1.1 Duplexní přenos

Aby mohl xDSL systém posílat data oběma směry současně, má k dispozici 3 techniky, kterými realizuje duplexní přenos:

1. Potlačení ozvěny
2. Rozdělení frekvenčního pásma
3. Rozdělení časové domény

### Potlačení ozvěny

Nejefektivnějším způsobem jak posílat data oběma směry naráz se zdá být potlačení ozvěny [1]. Posílají se data plnou šířkou pásma a od přijatého signálu se odečte odeslaný signál. Tato technika se využívala při samotné telefonní technologii POTS.

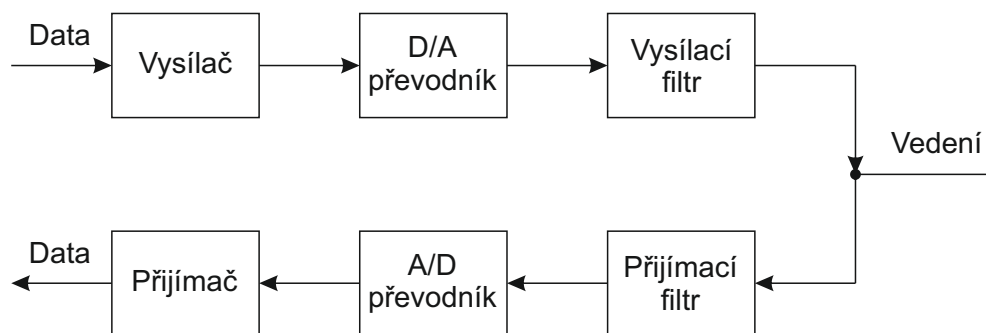
V xDSL systémech způsobuje obousměrná komunikace přeslechy (viz. kapitola 1.3) NEXT, takže bude potřebná optimalizace duplexního přenosu. Volba správné techniky závisí na použité modulační metodě, kmitočtu a poměru signál/šum.

### FDD

FDD (Frequency Division Duplex – kmitočtové oddělení) je technika vyskytující se v ADSL a VDSL. Spektrum je rozděleno do několika částí/bloků (vhodně nastavenými kmitočtovými filtry – obr. 1.3), kde jsou frekvenční rozsahy určeny buď k DS nebo US. Poměr DS/US je tedy kontrolován kmitočtovými pásy filtrů. Konkrétní rozložení těchto pásem specifikují profily těchto technologií [11].

ADSL technologie využívá kombinaci potlačení ozvěny (pro nízké frekvence) a kmitočtového oddělení (pro vyšší frekvence).

Kvůli mnohonásobně vyšším frekvencím se ve VDSL uplatní jen kmitočtové oddělení DS/US směrů.

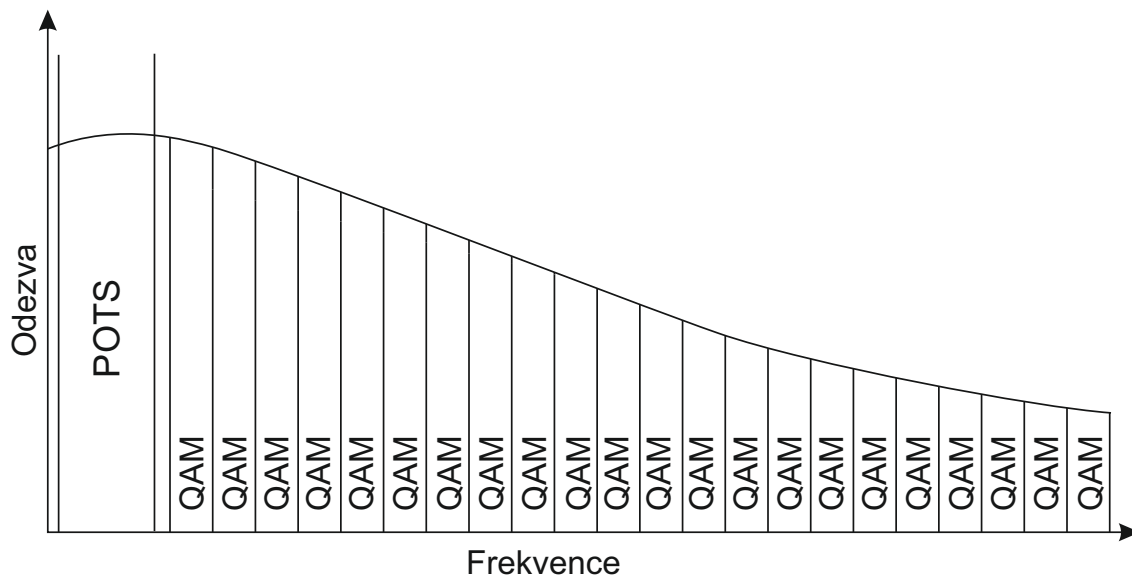


Obr. 1.3: Obousměrný přenos řešený pomocí FDD

## TDD

TDD (Time Division Duplex – časové oddělení) nepotřebuje kmitočtové filtry, ale synchronizaci superrámce. Signály jsou odděleny pevně definovanými krátkými časovými intervaly (TS – timeslot, symbol). Posílání dat užitím TDD se provádí v následující sekvenci: DS přenos, tichá perioda (TS, kde je nulový přenos), US přenos, tichá perioda. Poměr mezi časovými intervaly DS/US lze volit dle požadavků koncového uživatele, aby se dosáhla cílová přenosová rychlost v daném směrech. Tichá perioda musí být delší než zpoždění šíření signálu [8].

## 1.2 Modulace DMT

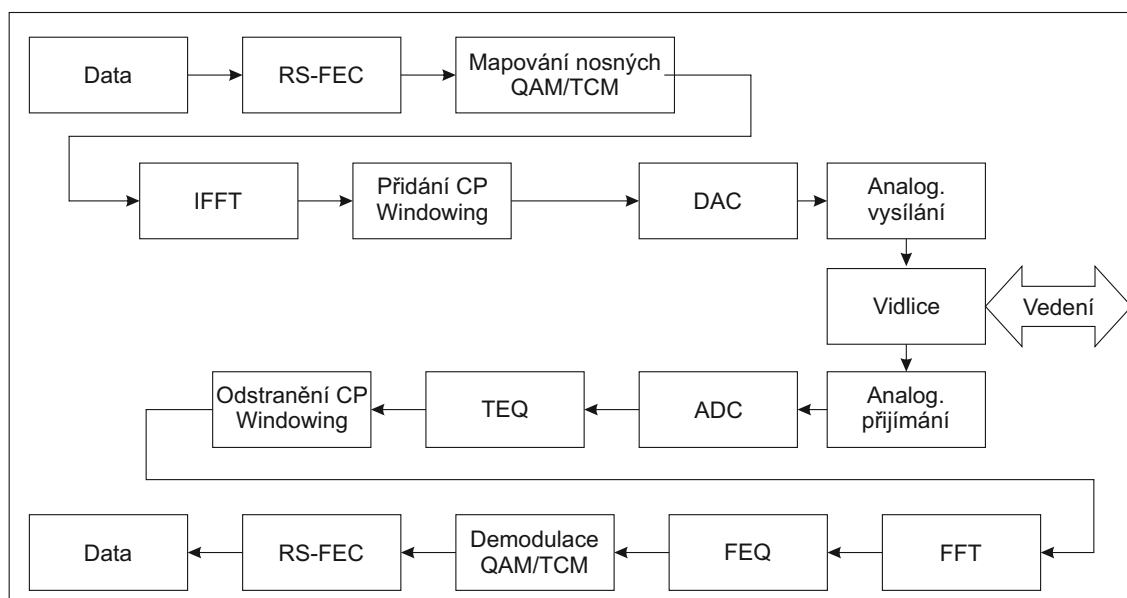


Obr. 1.4: Ilustrační obrázek rozdělení frekvenčního pásma modulací DMT

Pro modulaci VDSL2 (Very High Speed DSL – vysokorychlostní DSL) a G.fast se používá dle doporučení ITU-T G.993.2 modulace s více nosnými (MCM). A to přesněji DMT (Discrete Multitone - diskretní vícetónová modulace), která namapuje kmitočtové pásmo až na 8192 nosných neboli sub-kanálů. Jejich počet, rozteč mezi jednotlivými sub-kanály a vysílací výkon určují profily VDSL2 a G.fast. Kmitočty sub-kanálů jsou vzájemně ortogonální. Na ilustračním obrázku 1.4 lze vidět princip nosných frekvencí separátně modulovaných QAM (Quadrature Amplitude Modulation – kvadraturní amplitudová modulace).

Blokové schéma xDSL modemu DMT lze vidět na obr. 1.5 [11]. DMT modulace se skládá z několika kroků, které budou v této práci popsány:

1. Bitová alokace
2. QAM/TCM
3. (I)FFT
4. Přidání cyklické předpony
5. Windowing
6. Redukce PAR
7. Ekvalizace – TEQ & FEQ



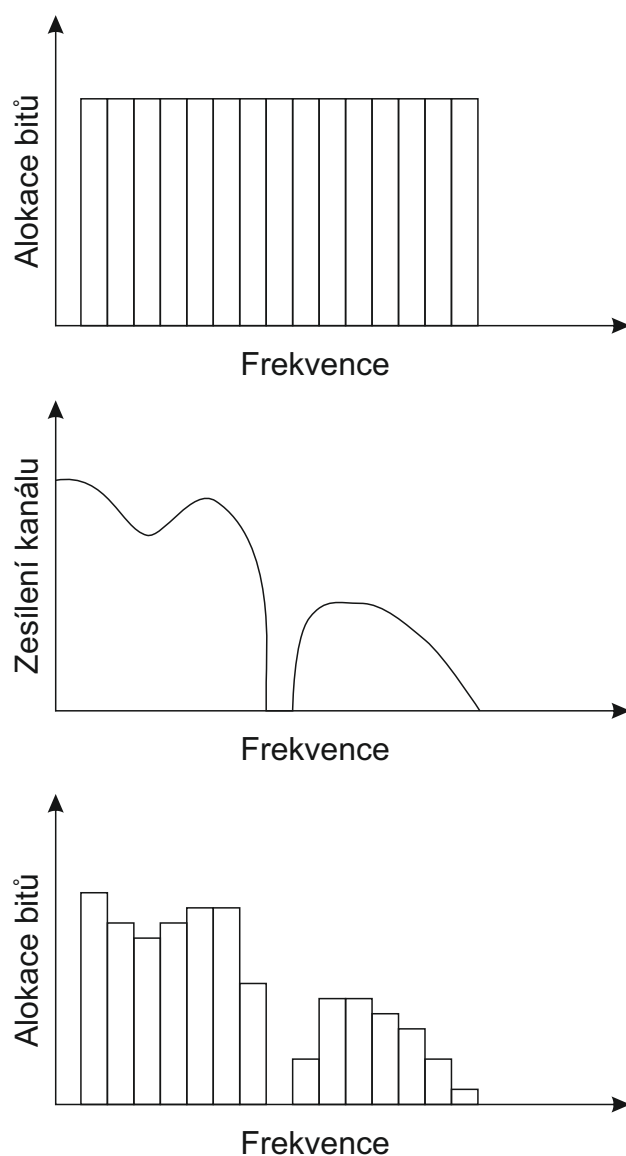
Obr. 1.5: Blokové schéma DMT modulace pro VDSL2

Data nejdříve prochází RS-FEC (Reed Solomon Forward Error Correction), kde jsou skramblována, zabezpečena RS kódem a také je provedeno prokládání. Systém potom namapuje jednotlivé sub-kanály a proběhne bitová alokace, modulace QAM a TCM. Po těchto modulacích následuje IFFT (Inverse Fast Fourier Transform – inverzní rychlá Fourierova transformace), signál je doplněn o cyklickou předponu a

IIR filtr, koriguje se pomocí „windowingu“ a redukce PAR. Poté je signál převeden D/A převodníkem a vstupuje do vedení [11].

### 1.2.1 Bitová alokace

Adaptivní bitová alokace (na obr. 1.6) přiřazuje jednotlivým nosným frekvencím (sub-kanálům) určitý počet bitů (2 – 15) a nastavuje jejich optimální zesílení pro přenos. Alokační závisí na charakteristice přenosového kanálu, na jeho zesílení, poměru SNR (Signal-to-Noise Ratio – poměr signál-šum) atd. Se zvyšující se frekvencí se zpravidla bitové osazení sub-kanálů snižuje.



Obr. 1.6: Ilustrační obrázek adaptivní bitové alokace

Je několik metod, jak provést alokaci bitů – aby se dosáhlo:

1. Maximální rychlosti za stanovené chybovosti, zisku a výkonu signálu
2. Minimální chybovosti za stanovené přenosové rychlosti a výkonu signálu
3. Minimálnímu přenášenému výkonu za stanovené rychlosti a chybovosti

V praxi se nejčastěji používá metoda poslední. Pro výpočty v této práci bude použita první metoda. Cílem je maximální přenosová rychlost systému.

Alokace probíhá při inicializaci systému, zjistí se charakteristiky jednotlivých přenosových kanálů a aplikují se podle ní příslušné bity sub-kanálům. Pro maximální přenos se stanoví počet bitů zjednodušenou rovnicí:

$$b(n) = \log_2 \left( 1 + 10^{\frac{SNR(n) - 9,8 - CE + cg - mar}{10}} \right) \quad (1.1)$$

kde  $b$  je počet bitů,  $n$  je pořadové číslo sub-kanálu,  $SNR(n)$  je poměr signál/šum  $n$ -tého sub-kanálu, pro chybovost  $BER = 10^{-7}$  se volí ztráta 9,8 dB, CE je ztráta cyklickým prodloužením, cg je kódovací zisk ( $cg = 2,51$  (4 dB)), mar (margin) je šumová rezerva ( $mar = 4$  (6 dB)) [12].

Pro alokaci bitů třetí metodou [1] (minimální přenášený výkon za stanovené rychlosti a chybovosti) se nejdříve stanoví množství bitů, které by mělo být přiřazeno jednotlivým kanálům podle vztahu:

$$b(n) = \log_2 \left( 1 + \frac{PSD_{sig}(n) \cdot |H(n)|^2}{PSD_{sum}(n) \cdot \gamma} \right) \quad (1.2)$$

Počet bitů se zaokrouhlí na celočíselnou hodnotu a optimalizace bitové alokace se potom zpětně řeší přidělením výkonu pro jednotlivé sub-kanály, aby mohly stanovený počet bitů přenést a dá se zapsat následující rovnicí:

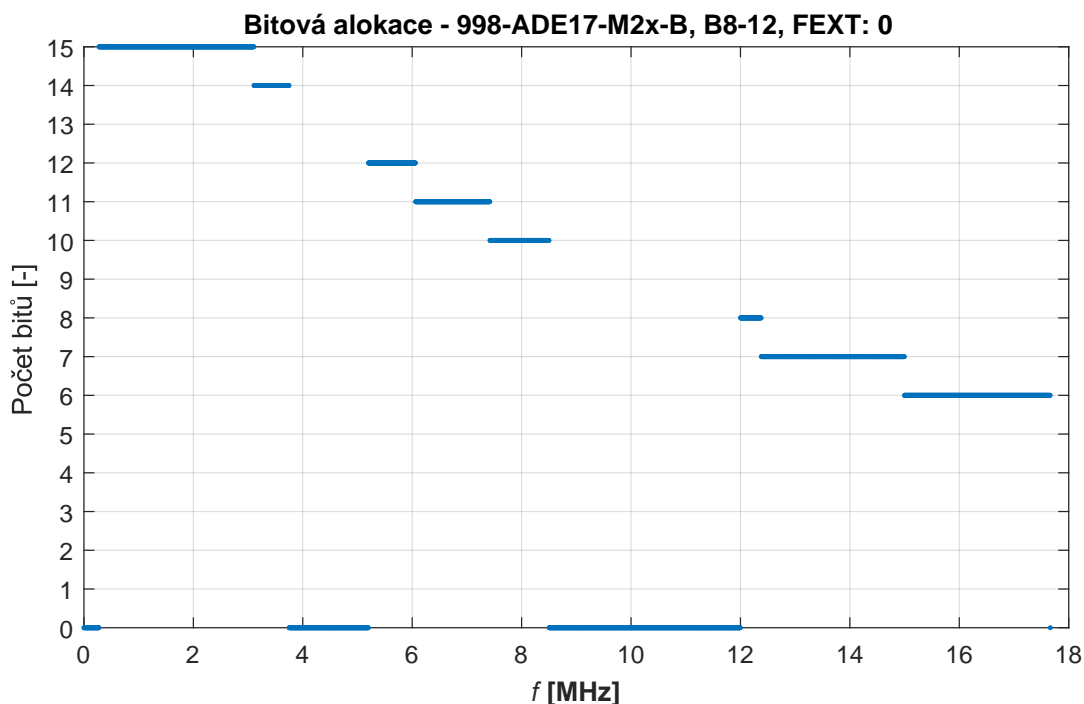
$$PSD_{sig}(n) = \frac{PSD_{sum}(n) \cdot (2^{b(n)} - 1) \cdot \gamma}{|H(n)|^2} \quad (1.3)$$

Přičemž  $\Gamma$  je:

$$\gamma = 10^{9,8 - cg + 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot N}{2 \cdot N - CE}\right)} \quad (1.4)$$

kde  $b$  je počet bitů,  $n$  je pořadové číslo sub-kanálu,  $PSD_{sig}(n)$  je výkonová spektrální hustota signálu v sub-kanálu,  $|H(n)|^2$  je průměrná výkonová přenosová funkce v sub-kanálu,  $PSD_{sum}(n)$  je výkonová spektrální hustota šumu v sub-kanálu,  $\gamma$  je rozdíl poměru signál/šum, 9,8 dB je hodnota pro dosažení chybovosti ( $BER = 10^{-7}$ ), cg je zisk v dB kódováním TCM,  $N$  je celkový počet sub-kanálů a CE je délka cyklického prodloužení [1].

Na obr. 1.7 lze vidět příklad rozložení bitů pro VDSL2 profil 998 ADE17-M2x-B podle rovnice 1.1 při hodnotě bílého šumu  $-120$  [dBm/Hz] pro referenční délku vedení 400 m. Přenosová rychlost ve směru DS při této bitové alokaci činí 115 Mb/s.



Obr. 1.7: Alokace bitů pro nosné frekvence VDSL2 technologie

### 1.2.2 Bit Swap

Funkce Bit Swap umožňuje xDSL systémům změnit alokaci bitů na daném sub-kanálu za provozu linky, aniž by došlo k přerušení toku dat. V praxi si zákazník zaplatí rychlost připojení X Mbit/s a na takovou rychlost se alokuje potřebný počet bitů na sub-kanály. Nealokuje se maximum bitů na každý sub-kanál a vznikají rezervy SNR, které jsou právě využity při bit swapu.

Po zapojení linky se alokuje potřebný počet bitů na jednotlivé sub-kanály (toto rozložení bitů je v ideálních podmínkách neměnné) a započne přenos dat. Pokud se během spojení sníží výkon některého sub-kanálu (třeba náhlým šumem určité frekvence) a daný sub-kanál již nebude schopen přenést dostatečný počet bitů, provede se bit swap.

Jednotky VTU-O a VTU-R mohou inicializovat bit swap. Pro bity, které se už nepodařily alokovat, se využije přebytečného SNR ostatních sub-kanálů. Tyto bity se do nich rozloží, pokud je v nich ještě prostor pro alokaci dalších bitů. Tím se zachová celkový počet bitů a nepřerušuje se tím spojení linky.

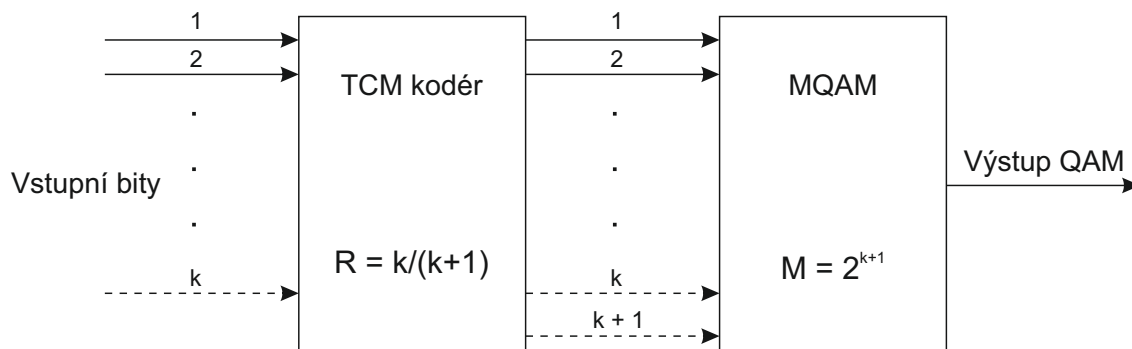
Pokud by tato funkce nebyla dostupná a kvůli náhlému šumu by bylo příliš málo bitů v sub-kanálu alokovaných, mohlo by dojít ke ztrátě spojení [5].



### 1.2.3 QAM/TCM

V xDSL technologiích se používá modulace QAM, neboli MQAM, kde M je počet stavů QAM. Počet stavů dosahuje ve VDSL2 technologii až 32768, tedy 32768QAM a jedna nosná frekvence může nést až 15 bitů (podle bitové alokace) [11].

QAM je modulace na analogové i digitální bázi. Sčítá dva zpravidla sinusové signály, které jsou nezávisle amplitudově modulovány a jsou vůči sobě fázově posunuty.



Obr. 1.8: Blokové schéma TCM

Do toho procesu je aplikována TCM (Trellis Coded Modulation - Trellis kódová modulace), je to kombinace aspektů modulace a kódování. Na obr. 1.8 je blokové schéma TCM-QAM. Na vstup kodéru je přivedeno k bitů, rychlost  $R$  TCM kodéru je popsána rovnicí:

$$R = \frac{k}{k+1} \quad (1.5)$$

Na výstupu TCM je  $(k+1)$  bitů, které vstupují do konstelačního modulátoru (QAM). Počet stavů je tedy  $M = 2^{k+1}$  (a ne  $M = 2^k$  – počet stavů bez TCM). Princip TCM tedy funguje tak, že zdvojnásobí počet stavů modulace (QAM), aniž by se rozšířila rozteč kmitočtového pásma. Jinými slovy zvýší bitovou rychlost a přitom ušetří šířku pásma [11].

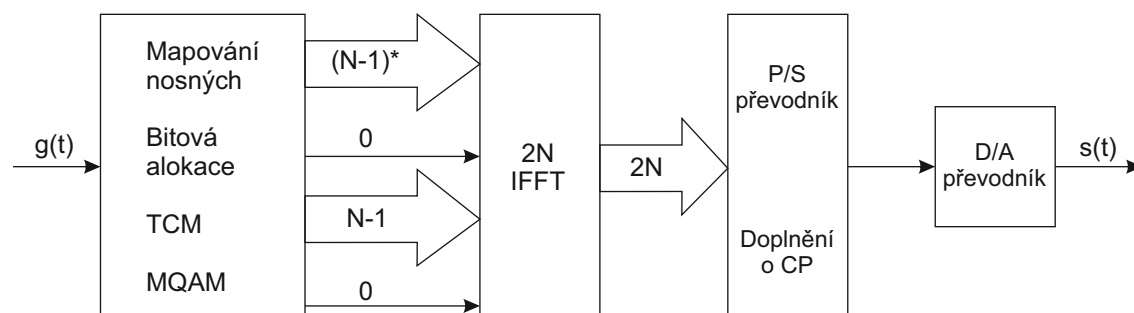
### 1.2.4 Inverzní rychlá Fourierova Transformace

Nosné frekvence jsou transformovány po průchodu systémem modulace QAM pomocí IFFT. IFFT je důležitým krokem DMT a její princip je znázorněn na obr. 1.9 [11]. Vstup (výstup z QAM) charakterizujeme pomocí  $N-1$  komplexních čísel, které jsou doplněny o:

1. Dva nulové prvky modulované na stejnou směrnou složku
2.  $N-1$  komplexně sdružených čísel odpovídajících zrcadlovému kmitočtu

Tato komplexně sdružená čísla jsou v opačném pořadí poskládány za nulovou hodnotu.

Prostřednictvím IFFT se nachází na výstupu  $2N$  reálných hodnot – DMT symbol. IFFT realizuje převod do časové oblasti.

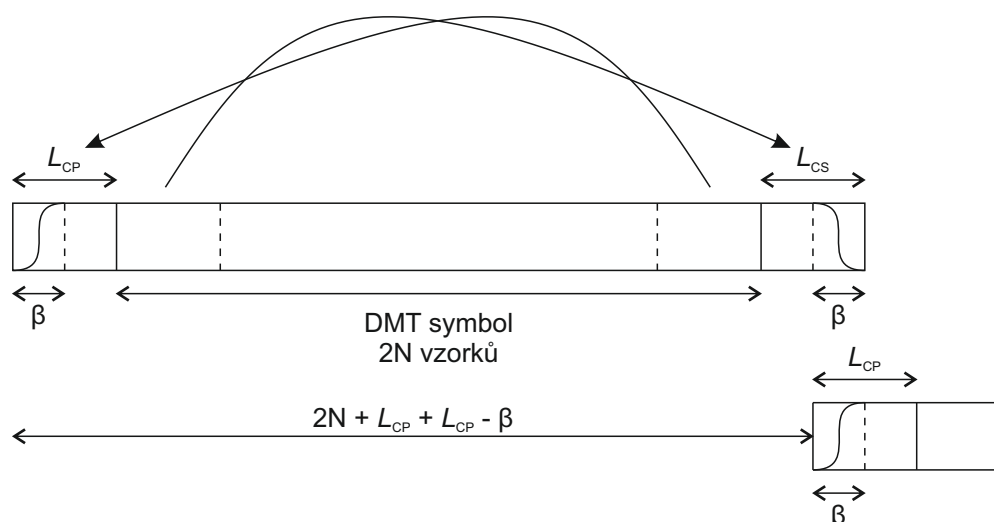


Obr. 1.9: Blokové schéma IFFT

### 1.2.5 Cyklická předpona a přípona

Při přenosu DMT symbolu mají všechny sub-kanály v rámci toho symbolu určitou amplitudu a fázi. Jakmile se inicializuje přenos následujícího DMT symbolu, všechny hodnoty amplitud a fází každého sub-kanálu se skokově změni a spolu s předchozím DMT symbolem se rozkmitá signál – vzniká mezi-symbolový přeslech (ISI – Inter-Symbol Interference). Tato interference pozmění amplitudy a fáze DMT symbolu a způsobuje zkreslení [5].

Přidáním cyklické předpony (CP – cyclic prefix) a přípony (CS – cyclic suffix) a zkrácením impulsní odezvy se vytvoří prostor pro snížení této interference.



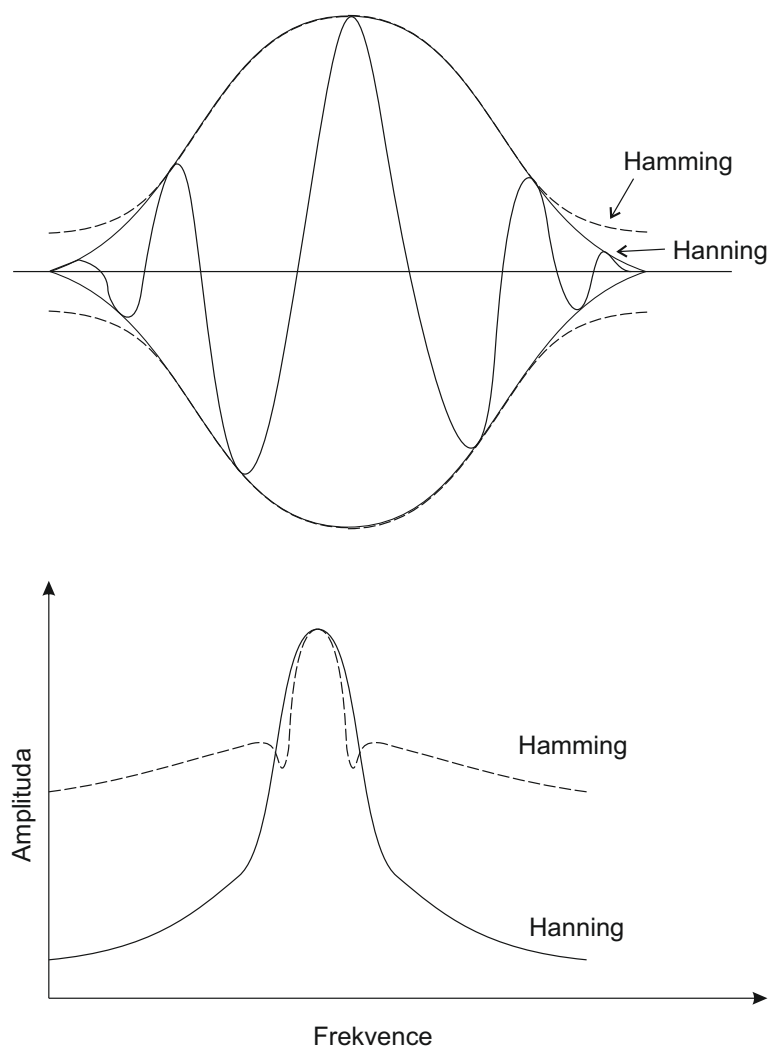
Obr. 1.10: Přidání cyklického prefixu a suffixu

Cyklická předpona – obr. 1.10 – se vytvoří zkopírováním  $L_{CP}$  vzorků na konci symbolu před začátek daného symbolu. Obdobně se vytvoří  $L_{CS}$  jako cyklická přípona. Prvních  $\beta$  vzorků CP a posledních  $\beta$  vzorků je vyhrazeno pro obálku signálu a následný windowing [5].

Celková doba výsledného prvku je rovna  $L_{CE} = L_{CP} + L_{CS} - \beta$  [5]. Na straně přijímače jsou tato cyklická prodloužení poté odstraněna.

### 1.2.6 Windowing

(I)FFT předpokládá, že kontinuální spektrum je jedna perioda periodického signálu. Pokud je tedy signál periodický a v časovém intervalu se nachází celočíselný počet period, nastává ideální bezchybný převod (I)FFT.



Obr. 1.11: Grafické znázornění funkcí Hanning a Hamming

Ne vždy tomu tak je a pak se výsledná charakteristika liší od originálního signálu a ostré přechody jsou nekontinuální. V tomto případě nastává tzv. spektrální průnik, který způsobí rozptýlení úzkých spektrálních čar do širšího signálu.

Windowing tuto chybu minimalizuje redukuje amplitudy nekontinuálních signálů na hranicích každé sekvence. Windowing vytvoří „okno“ pevné délky, jehož amplituda se na hranicích této periody hladce zmenšuje. Pronásobením toho okna se signálem vznikne kontinuální signál bez ostrých změn a minimalizuje se efekt spektrálního průniku [5].

Základními příklady těchto window funkcí je Hanningovo okno a Hammingovo okno – obr. 1.11. Hanningova funkce kompletně eliminuje nespojitosti signálu. Hammingova funkce lépe eliminuje nejbližší interference, ale postrádá efektivitu na hranicích sekvence.

### 1.2.7 Ekvalizér v časové oblasti

Vyrovnaní kanálu v časové oblasti zajišťuje TEQ (Time Domain Equalizer), jehož koeficienty se určí při inicializaci systému. Základní myšlenkou TEQ je zkrátit impulsní odezvu (IR) sub-kanálu.

Ekvalizér se skládá z dopředného filtru, který pracuje jako lineární vyrovnávač. Pomocí jednoduchých technik vyrovnávání ekvalizéru se pro konkrétní kanál navrhne FIR filtr, který dokáže zkrátit IR na dobu CP. Tím se sníží ISI a zachová se ortogonalita systému. Následně pak také odstraní cyklickou předponu [11].

### 1.2.8 Redukce PAR

Když se několik nosných nachází ve stejné fázi, nastává problém – jejich amplitudy se sečtou a vznikne ostrá špička v přenosovém spektru a signál má vysoký PAR (Peak-to-Average Ratio).

Pokud není systém schopen tyto výkonové špičky přenést, dochází k ořezání signálu (Clipping) v digitální části i v analogové. Aby byl systém schopen vyslat danou špičku signálu, musí být v dostatečně vysokém výkonovém režimu, nebo převodníky DAC a ADC musí být schopny převést  $x$  (Zpravidla o 1 bit více, než je třeba pro nefiltrovaný signál s jednou nosnou [1]) extra bitů.

Tento problém se spíše řeší metodami pro redukci PAR. Jejich funkcí je snížení těchto špiček. Je jich několik, a jejich podrobný popis je nad rámec této práce:

1. Ořezávání a filtrování
2. Limitace blokovými kódy
3. Selektivní mapování a sekvence částečného vysílání
4. Nelineární kompenzující transformace

### 1.2.9 Ekvalizér ve frekvenční oblasti

Ve frekvenční oblasti probíhá vyrovnávání kanálu ekvalizérem FEQ (Frequency Domain Equalizer). FEQ kompenzuje lineární zkreslení amplitudy a fáze separátně pro každý sub-kanál – FFT koeficient násobí komplexním číslem [12].

Tento ekvalizér optimalizuje SNR pro každý sub-kanál a tudíž i jeho bitovou rychlost. Tato funkce může být koncentrována na sub-kanály, které byly nejvíce postižené tímto zkreslením, zvýšením počtu koeficientů vyrovnávacího filtru pro tyto sub-kanály.

### 1.2.10 Vektorová modulace DMT

Vektorizace (vectoring, VDMT) je rozšíření standardní DMT. Používá se pro potlačení přeslechů FEXT. Pro tuto funkci je třeba znát všechny přenosové cesty a parametry přeslechů v celém svazku vedení. Jelikož tyto informace jsou dostupné jen DSLAM, probíhá vectoring právě tam.

Vectoring probíhá při inicializaci koncového modemu s DSLAM, při ní si DSLAM zjistí nutné parametry testovací sekvencí. Na tuto sekvenci modemy odpoví a podle zkreslené odpovědi (zkreslené kvůli přeslechům FEXT) DSLAM kompenzuje toto zkreslení [6].

Kompenzace pro downstream spočívá v tom, že DSLAM bude vysílat již dopředu zkreslené (opačně) DMT symboly tak, aby koncový modem po rušení FEXT přijal správný DMT symbol [6].

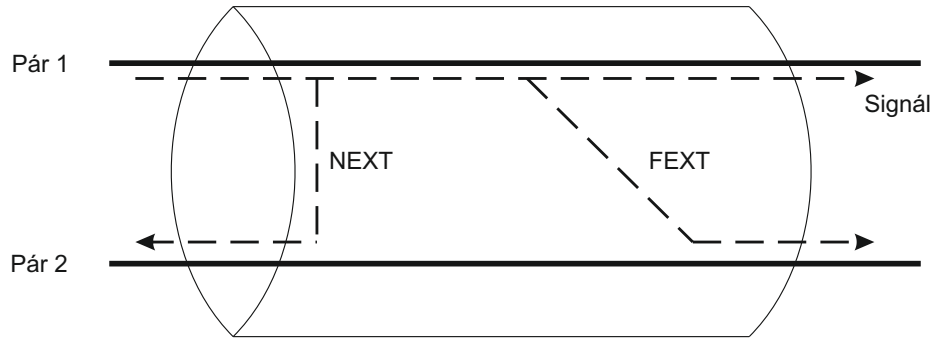
Žádná kompenzace neprobíhá na straně koncového modemu, pro US se signál kompenzuje na straně přijímače – DSLAM. Ten si podle vypočteného zkreslení při inicializaci opraví zkreslené DMT symboly. Tím se výrazně sníží intenzita přeslechů FEXT [6].

## 1.3 Přeslechy

Přeslechy mezi páry vodičů ve více-párových vedeních jsou dominantní složkou rušení v xDSL systémech. Je to rušení, které se šíří z jednoho páru ve vedení a vstupuje do všech ostatních párů ve vedení. Rušící signál proniká mezi jednotlivé páry v důsledku nerovnoměrnosti indukčních a kapacitních nerovnováh podél kabelu. Tyto nerovnoměrnosti vznikají např. v ohybech vedení, neprecizní výrobou kabelu (nedodržení tolerancí).

Pro jejich kompenzování je třeba znát přenosové funkce obou párů, mezi kterými chceme přeslechy kompenzovat. Respektive přenosové funkce zkoumaného kabelu a zbytku systému, který způsobuje rušení.

Přeslechy mezi páry dělíme – dle obr. 1.12 – na dva typy:



Obr. 1.12: Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení

### NEXT (Přeslech na blízkém konci)

NEXT vznikne, když signál vstoupí do vedení a vrátí se směrem ke zdroji rušení. NEXT se zvyšuje se zvyšující se frekvencí a při frekvencích přenášených ve VDSL systémech by byly přeslechy toho typu netolerovatelné. Kvůli tomu jsou VDSL systémy navrženy tak, aby se v nich NEXT nevyskytoval – eliminace pomocí FDD.

Přenosovou funkci rušení NEXT lze vypočítat pomocí upraveného vztahu [1] pro 50ti párový kabel:

$$|H_{\text{NEXT}}(f)| = K_{\text{NEXT}} \left( \frac{N}{49} \right)^{0,6} f^{\frac{3}{2}} \quad (1.6)$$

kde  $H_{\text{NEXT}}(f)$  je přenosová funkce rušení NEXT,  $K_{\text{NEXT}}$  je konstanta přeslechu (pro daný kabel),  $N$  je počet rušících systémů,  $f$  je kmitočet.

Dle předchozího vztahu lze získat:

$$PSD_{\text{NEXT}}(f) = PSD_{\text{Disturber}}(f) \cdot |H_{\text{NEXT}}(f)|^2 \quad (1.7)$$

kde  $PSD_{\text{NEXT}}(f)$  je výkonová spektrální hustota rušení NEXT,  $PSD_{\text{Disturber}}(f)$  je výkonová spektrální hustota systému, odkud rušení pochází [1].

### FEXT (Přeslech na vzdáleném konci)

Druhý typ přeslechu FEXT se projeví, když signál vstupující do vedení pokračuje ve směru k přijímači. Pokud se ve vedení vyskytuje NEXT i FEXT, NEXT bude mít mnohem větší dopad na přenášené signály [1]. FEXT lze potlačit vektorovou DMT modulací.

FEXT je s rostoucí frekvencí intenzivnější a je snižován útlumem vedení. Na rozdíl od NEXT je závislý na délce vedení:

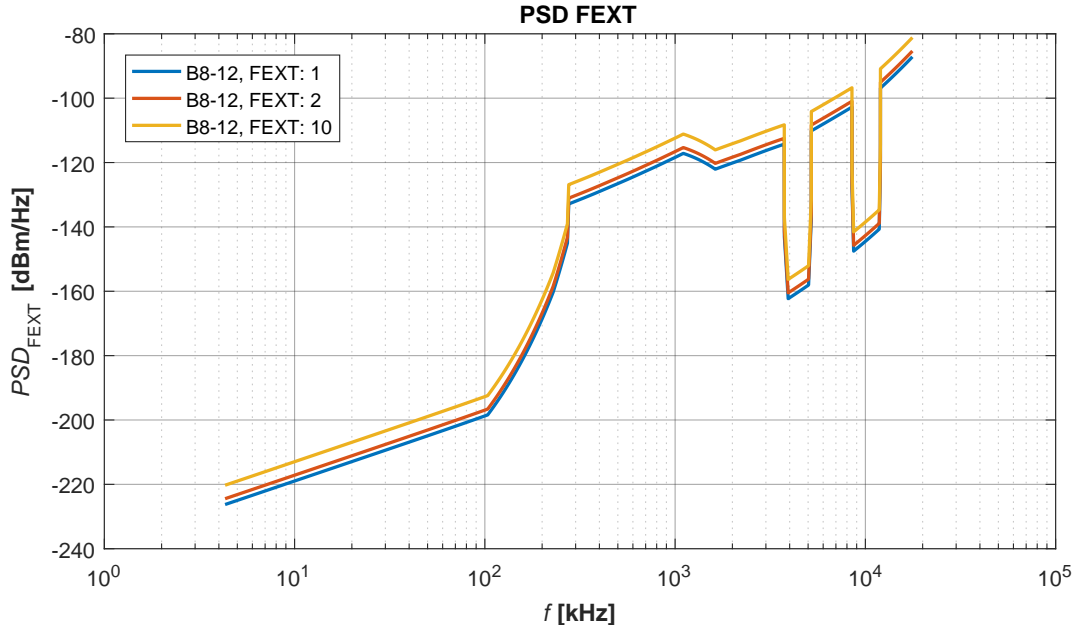
$$|H_{\text{FEXT}}(f)|^2 = \left( \frac{N}{49} \right)^{0,6} \cdot K_{\text{FEXT}} \cdot f^2 \cdot l \cdot |H_{\text{channel}}(f, l)|^2 \quad (1.8)$$

kde  $H_{\text{FEXT}}(f)$  je přenosová funkce rušení FEXT,  $K_{\text{FEXT}}$  je konstanta přeslechu ( $10^{-19,5}$  [3]),  $N$  je počet rušících systémů,  $f$  je kmitočet,  $l$  je délka vedení v km,  $|H_{\text{channel}}(f, l)|$  je přenosová funkce vedení [3].

a výkonová spektrální hustota rušení FEXT bude:

$$PSD_{\text{FEXT}}(f) = PSD_{\text{Disturber}}(f) \cdot |H_{\text{FEXT}}(f)|^2 \quad (1.9)$$

Na obr. 1.13 je vykreslená závislost rušení FEXT na frekvenci pro referenční délku 400 m. Ve všech případech se jedná o profil 998 ADE17-M2x-B (pozn. B8-12 je zkratka tohoto profilu) ve směru DS, jeho PSD maska se znázorněna na obr. 2.1.

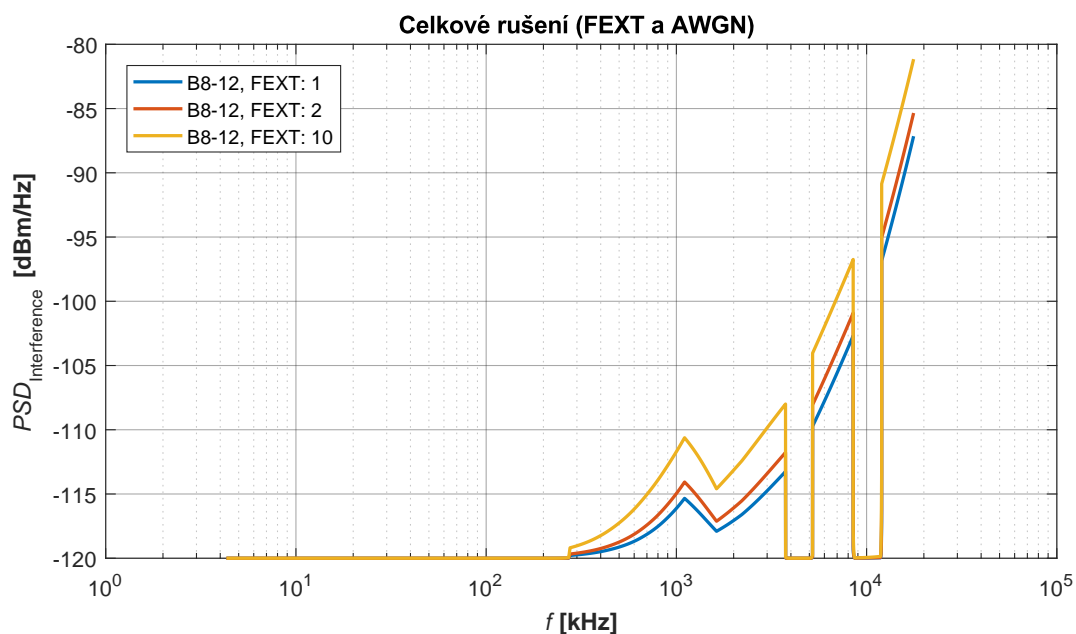


Obr. 1.13: Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení

Na obr. 1.13 lze vidět nárůst rušení FEXT se zvyšující se frekvencí a výrazné změny v křivce právě kvůli zvolenému profilu. Tyto „výchyly“ odpovídají pásmům pro US a skokovým změnám v PSD masce profilu. Graf je vykreslen pro 1, 2 a 10 rušících systémů, vyšší počet pochopitelně odpovídá vyšším hodnotám  $PSD_{\text{FEXT}}$  a to se projeví na přenosové rychlosti systému.

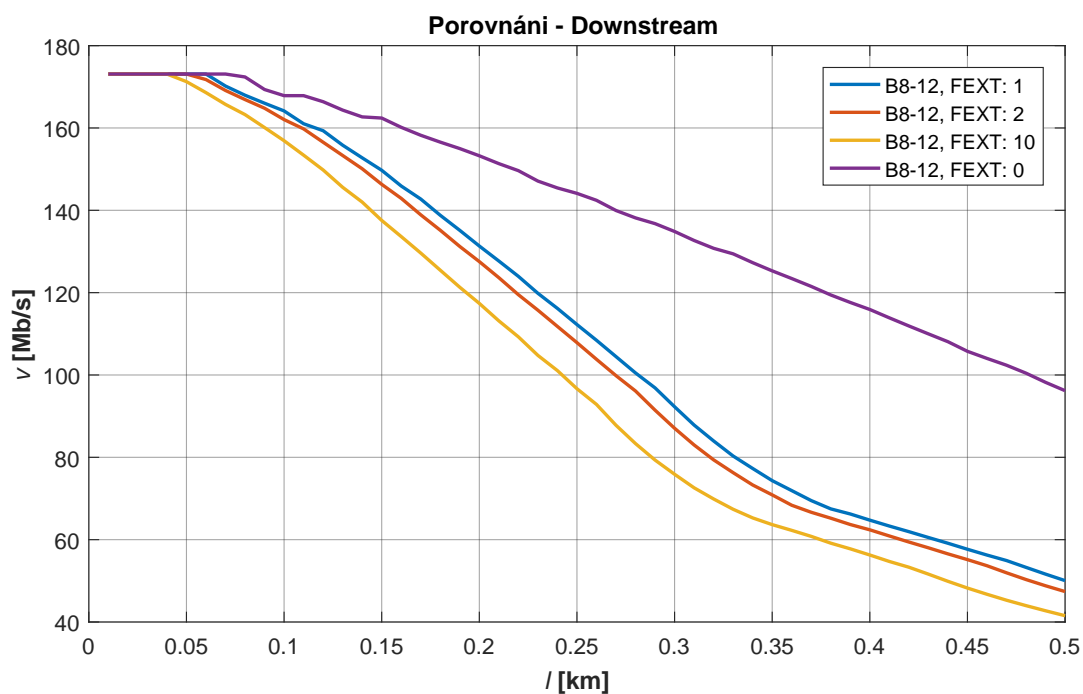
Tento nežádoucí vliv se skládá s bílým šumem (AWGN) a hodnota tohoto šumu je zvolena pro VSDL systémy  $-120$  dBm. Obr. 1.14 znázorňuje složení těchto dvou složek rušení. Na nižší frekvence má větší vliv bílý šum, při vyšších frekvencích dominuje rušení FEXT.

Už jeden rušící systém má razantní vliv na přenosovou rychlost. Na obr. 1.15 je vykreslená závislost přenosové rychlosti profilu 998 ADE17-M2x-B ve směru DS pro jiné počty rušících systémů. Systém bez těchto systémů používá vektorizaci.



Obr. 1.14: Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení

Lze vidět prudce klesající efektivitu systémů bez této funkce. Vektorizace umožňuje dosáhnout kvalitních výsledků i pro početnější systémy a delší vzdálenosti.



Obr. 1.15: Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry vedení



## 2 VDSL2

VDSL2 je DSL technologie, která využívá ještě větší vysílací spektrum, a to až 35 MHz. Fundamentálně se neliší oproti předchůdci (VDSL a ADSL), také používá kmitočtové oddělení DS a US pásem. Nejsilnějším faktorem VDSL2 je fakt, že rychlost výrazně vzrostla. Rychlost se pohybuje od 100 Mb/s až do (teoreticky) 400 Mb/s a závisí na použitém profilu a na vzdálenosti vedení od zdroje. Efektivní vzdálenost VDSL2 se určuje na 400 m, při které profily splňují jejich předpokládané přenosové rychlosti.

Tato technologie může existovat spolu s jinými – jako POTS a ADSL na jednom stejném dvoudrátovém vedení. Modemy VDSL umožňují symetrický i asymetrický přenos.

Frekvenční plán	Parametr	Profily								
		8a	8b	8c	8d	12a	12b	17a	30a	35b
	Max. výkon pro DS [dBm]	17,5	20,5	11,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	17
	Max. výkon pro US [dBm]	14,5								
	Rozteč nosných [kHz]	4,3125							8,625	4,3125
	Minimální obousměrná rychlost [Mbit/s]	50				68		150	200	400
Annex A (998)	DS	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	4095 (17,66)	2666 (23)	-
	US	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	2782 (12)	2782 (12)	3478 (30)	-
Annex B (998E)	DS	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	4095 (17,66)	3478 (30)	8191 (35,324)
	US	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	2782 (12)	3246 (14)	2885 (24,89)	3246 (14)
Annex B (998ADE)	DS	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	4095 (17,66)	2885 (24,89)	8191 (35,324)
	US	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	2782 (12)	2782 (12)	3478 (30)	2782 (12)
Annex B (997)	DS	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1634 (7,05)	1634 (7,05)	1634 (7,05)	1634 (7,05)	1634 (7,05)	3246 (14)	3130 (27)	-
	US	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	2047 (8,832)	2047 (8,832)	1182 (5,1)	2047 (8,832)	2782 (12)	2782 (12)	4095 (17,66)	3478 (30)
Annex C	DS	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	4095 (17,66)	2098 (18,1)	-
	US	Poslední podporovaná nosná (Max. f [MHz])	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	2782 (12)	2782 (12)	3478 (30)	-

Tab. 2.1: Profily VDSL2

## 2.1 Profily VDSL2

VDSL2 disponuje celou řadou profilů, které jsou specifikovány v doporučení ITU-T G.993.2. V tabulce. 2.1 jsou všechny momentálně dostupné profily VDSL2. Jejich obousměrná rychlost je složena z přenosových rychlostí pro DS a US. Použité profily se volí podle např. zaplacené přenosové rychlosti zákazníkem, vzdáleností VTU-R od jednotky VTU-O a koncovým modemem, který ne vždy disponuje všemi profily.

Profily VDSL2 jsou specifikovány podle lokace (Annex): Annex A – Amerika, Annex B – Evropa, Annex C – Japonsko. Každý Annex má kmitočtové plány, které určují rozdělení kmitočtových pásem.

Vysvětlení parametrů profilů na příkladu – Annex B 998ADE17a:

1. Číslo 998 je pro asymetrický provoz (997 je pro symetrický provoz)
2. Znak „ADE“ zpřesňuje rozložení pásem US3 a DS3
3. 17 je označení pro šířku celého spektra (17 664 MHz)
4. „a“ specifikuje PSD profilu

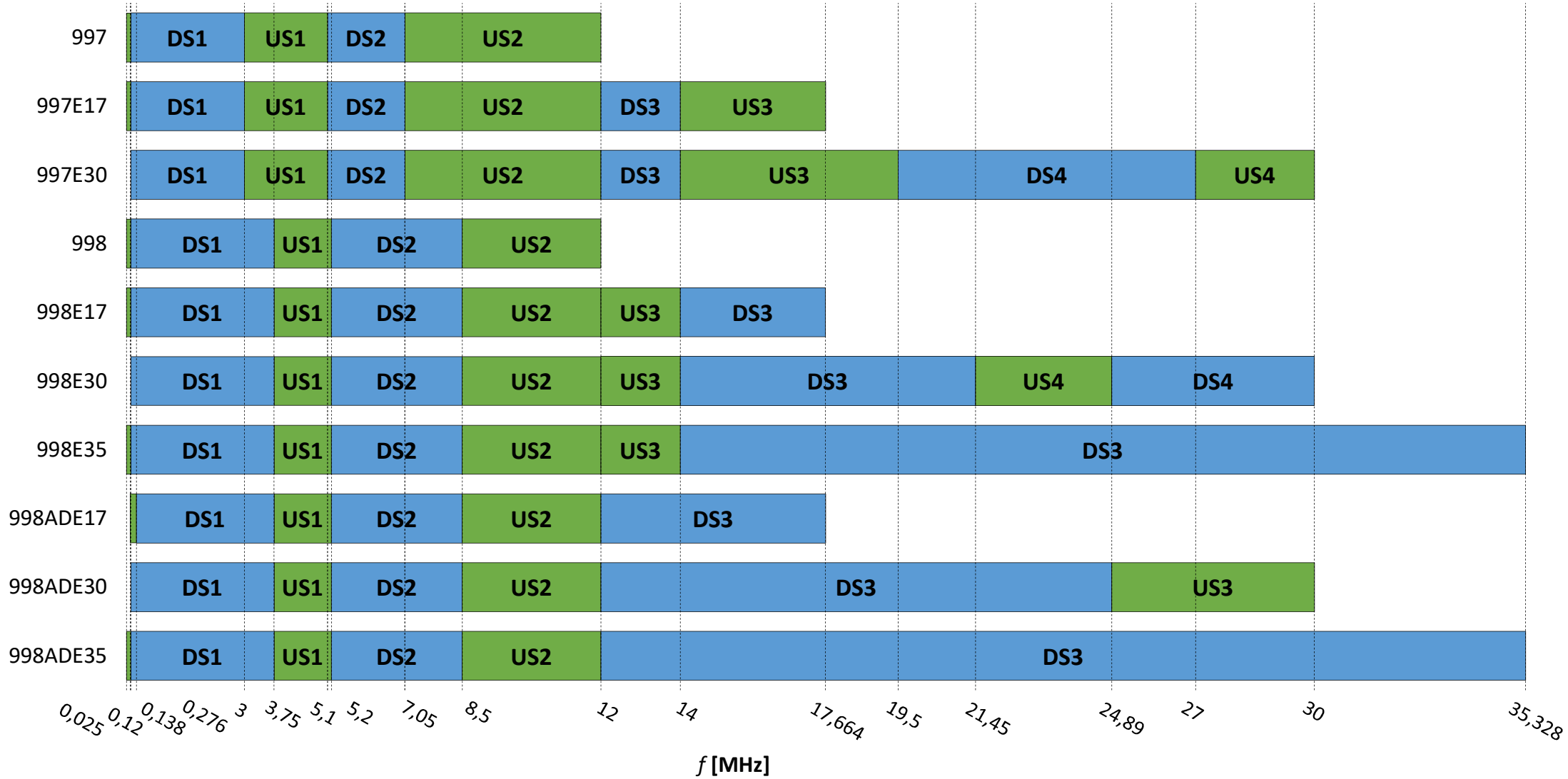
Nejvyužívanějším profilem internetových operátorů je 17a. VDSL2 profil 30a má zdvojnásobenou rozteč sub-kanálů a díky tomu je schopen využít šířku pásma až do 30 Mhz. Modulační rychlost profilu 30a je 8000 B/s, všechny ostatní profily dosahují rychlosti přenosu DMT symbolu 4000 B/s.

Profil 35b – blíže specifikovaný v ITU-T G.993.2 jako Annex Q – dosahuje rychlosti až 400 Mb/s na krátké vzdálenosti při rozteči nosných 4,3125 kHz a jejich počtu 8192. Všechny VDSL2 profily podporují vectoring a jejich rozložení kmitočtových pásem je na následujícím obrázku.

Ne všechny frekvence v rozsahu profilu jsou nosné frekvence. Některé nejsou používány dle standardu DMT modulace, jiné jsou zase omezeny použitým profilem. Nepoužívají se:

1. První sub-kanál
2. Frekvence do 25 KHz
3. Frekvence od 25 KHz do 276 KHz závisí na použité masce profilu
4. Poslední sub-kanál

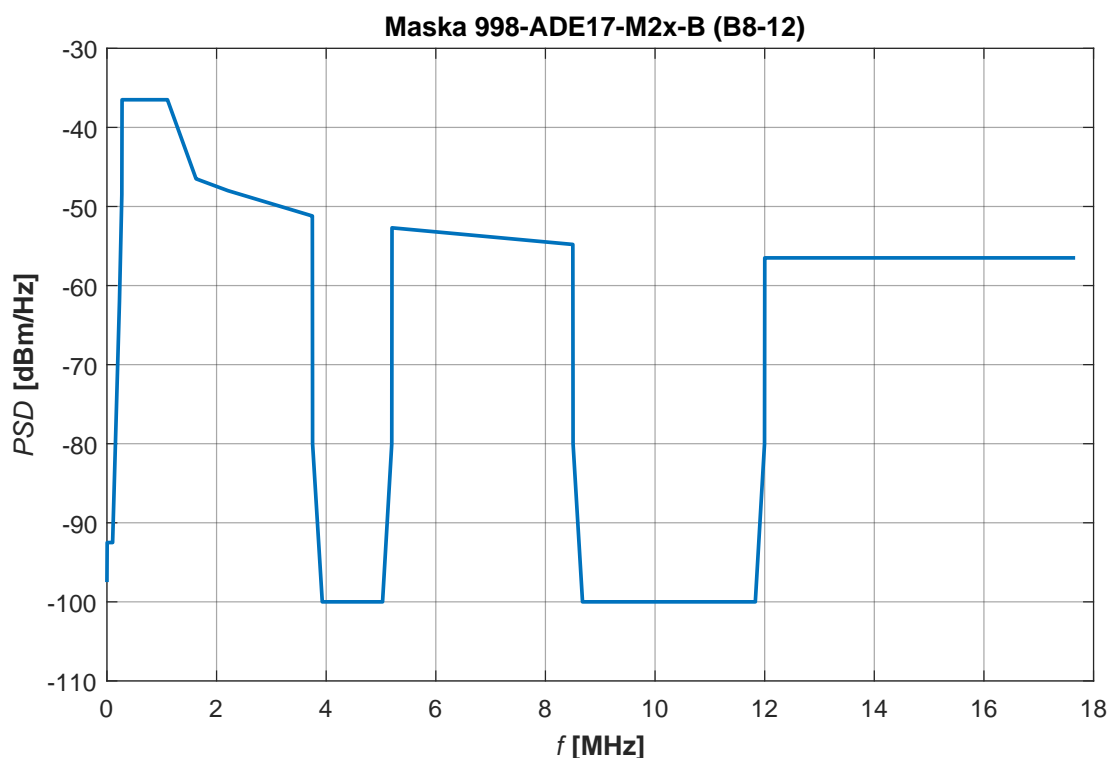
# VDSL2 Profily Annex B



## 2.2 PSD masky

Dle parametrů profilů je v ITU-T G.993.2 ke každému přidělena PSD maska. Tato maska určuje s jakou maximální PSD bude vysílat každý sub-kanál.

Poměr intenzity celkového šumu (rušení, přeslechy a bílý šum) a PSD masky profilu je SNR. Tato hodnota potom přímo souvisí s počtem bitů alokovaných na sub-kanálech – viz. kapitola 1.2.1.



Obr. 2.1: Maska Annex B 998 ADE17-M2x-B pro DS

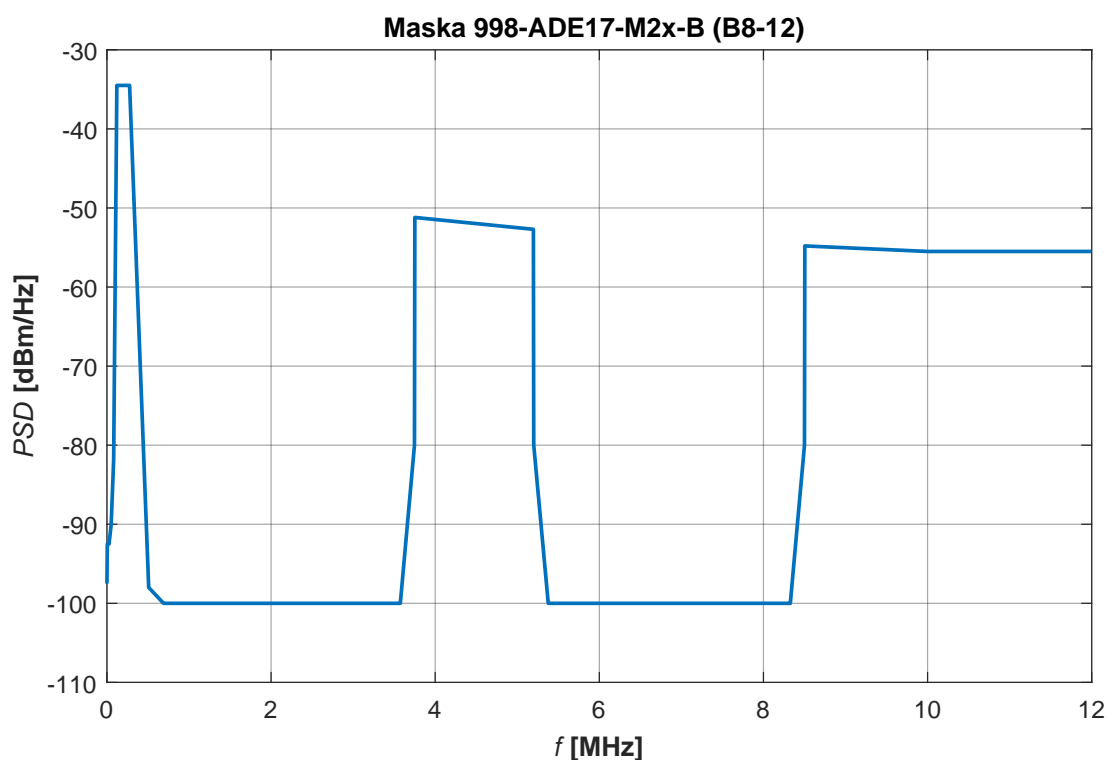
Příklad této masky je na obr. 2.1 pro profil 998 ADE17-M2x-B a v grafu lze vidět rozložení DS/US pásem. PSD masky se liší nejen vybraných profilem, ale také směrem přenosu signálu. Maska pro DS se bude lišit od masky pro US.

Maska pro již zmíněný profil ve směru US je na obr. 2.2. Lze vidět výrazně menší použité kmitočtové spektrum, to je dáno zvoleným plánem 998, který je více zaměřený na Downstream.

Při nízkém šumu lze alokovat každé nosné až 15 bitů. Nejméně lze přenést 2 bity na jednom sub-kanálu.

Většina profilů má několik variací PSD masek, aby byly kompatibilní s různými technologiemi. Celé značení masky je např. 998 ADE17-M2x-B, kde M2x specifikuje

spektrální masku (Annex B ještě nabízí druhou variantu – M1x). Písmeno „B“ charakterizuje rozložení pásma US0. Konkrétně se jedná o masku pro použití s přípojkou ISDN.



Obr. 2.2: Maska Annex B 998 ADE17-M2x-B pro US

Varianty rozložení pásma US0, vzhledem k využívaného frekvenčního pásma a použité technologii:

1. „A“: 25–138 KHz (s POTS)
2. „B“: 138–276 KHz (s ISDN)
3. „M“: 25–276 KHz (rozšířené pásmo US0)
4. „NUS0“: bez pásma US0, kde DS1 začíná na 138 KHz
5. „NUS0-M“: bez pásma US0, kde DS1 začíná na 276 KHz

Tyto variace mění přenosovou rychlost hlavně na větší vzdálenosti. Právě tyto nižší frekvence, které specifikuje pásmo US0, mají největší dopad na delší vzdálenosti.

## 3 TECHNOLOGIE G.FAST

S rostoucími nároky na rychlost internetu koncových účastníků se vyvíjí nové technologie a přenosová rychlost se zvyšuje. Nejnovější generace DSL technologie G.fast je zase o stupeň rychlejší (než její předchůdce VDSL2) a je popsána v doporučeních ITU-T G.9700 [7] a G.9701 [8].

G.fast posunuje hranice kmitočtů pro přenos až na 212 MHz. Nevyužívá již kmitočtové oddělení směrů komunikace, ale TDD – přesněji STDD. PSD masky jsou tedy stejné pro oba směry přenosu signálu. Oba směry využívají plné kmitočtové pásmo stanovené použitým profilem.

Tato „nová“<sup>1</sup> doporučení specifikují přenosovou rychlost na 1 až 2 Gb/s na velmi krátkou vzdálenost. Zakončení optických sítí se více a více přibližuje k zákazníkům (na obrubník před domem, na jednotlivé ulice, do sklepa velkých bytových jednotek atd.) a to napomáhá efektivitě přípojky G.fast. G.fast vyžaduje v domácnostech instalaci jiného hardwaru, než využívá VDSL2. Je nutností mít zařízení jako modem, přepínač a směrovač, která podporují gigabitovou rychlost.

Tato technologie také využívá existující metalické kabely. Jelikož šířka spektra dosahuje až 212 MHz, přípojky G.fast vykazují vysoké úrovně přeslechů. A kvůli těmto vysokým frekvencím mohou vznikat interference s rádiovými signály – amatérská rádia i FM rádia (87,5–108 MHz). Vysílače G.fast umožňují zakázat specifická frekvenční pásma, aby ochránili tato rádia, nebo digitální televize. Mohou vypnout několik pásem najednou a v nich všechny náležící sub-kanály.

Ve VDSL2 je vektorizace signálu volitelná, G.fast má povinnou implementaci vektorové modulace:

1. Lineární vektorizace – kterou využívá VDSL2 – je v G.fastu vylepšená
2. Nelineární vektorizace je plánovaná do budoucna

Nelineární vectoring vykazuje pro vyšší kmitočty lepších výsledků, než lineární [4]. Pro více dostupný profil s šířkou spektra do 106 MHz se nevyplatí implementace komplexní nelineární vektorizace. Zisk přenosové rychlosti (za použití nelineární vektorizace oproti lineární) je v tomto profilu nedostačující.

Profil 212a používá také lineární vectoring – jak je stanoveno normou v dodatku č.3 ITU-T G.9701, kde je specifikovaný profil 212a.

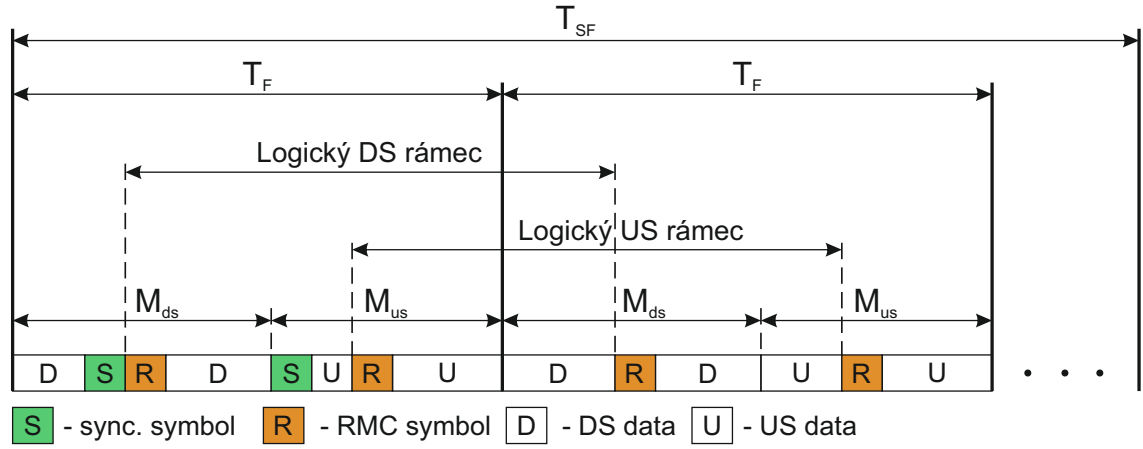
### 3.1 Synchronní časový duplex

G.fast operuje na principu STDD (synchronizované časové oddělení). Tato synchronizace vyžaduje precizní kontrolu a jasně definované délky rámců. Nejdelším periodickým prvkem je superrámec (obr. 3.1), který se skládá z několika TDD rámců.

---

<sup>1</sup>Doporučení ITU-T G.9700 a G.9701 byla poprvé vydána v roce 2014

Ty se skládají z pásem pro DS a US a tichých symbolů, neboli mezer. Superrámce mezi sebou nemají tiché mezery. Druhá možnost rozdělení superrámce je na logické DS rámce a logické US rámce.



Obr. 3.1: Znázornění STDD

První rámec v superrámci je tzv. synchronizační rámec, který se liší od standardního rámce tím, že obsahuje navíc synchronizační symboly (dále jen „sync. symbol“). Jeden DS sync. smlol a jeden US sync. symbol, jejichž individuální délka je rovna délce jednoho TS.

Jednotka FTU-O obsahuje informace o všech přípojkách G.fast a po inicializaci zajistí jednotnou synchronizaci superrámců, rámců, sync. symbolů a RMC (Robust Management Channel) zpráv a symbolů všech přípojek. Tato charakteristická vlastnost STDD umožní distribučnímu bodu vysílat synchronně na všech výstupech. Díky tomu se nepřekrývají DS a US přenosy.

### 3.1.1 Délky rámců

Délka superrámce je:

$$T_{SF} = M_{SF} \cdot T_F \quad (3.1)$$

Délka rámce:

$$T_F = M_F \cdot T_{\text{symb}} \quad (3.2)$$

a

$$M_F = M_{ds} + M_{us} + T_{g1} + T_{g2} \quad (3.3)$$

Pozn.:  $T_{SF}$  je délka superrámce,  $T_F$  je délka rámce,  $M_{SF}$  je počet rámců v superrámci,  $M_F$  je počet symbolů v rámci,  $M_{ds}$  a  $M_{us}$  značí počet symbolů pro DS a US,  $T_{g1}$  a  $T_{g2}$  je délka tichých mezer mezi periody pro DS a US [8].

G.fast podporuje dvě délky rámců [8]  $M_F = 36$  a  $M_F = 23$ , které určují množství rámců a symbolů, aby byla doba trvání superrámce vždy cca 6 ms [10]. Musí se dodržet:  $M_{ds} + M_{us} \leq M_F - 1$ .

$M_{SF}$	$M_F$	Podporované hodnoty pro $M_{ds}$
8	36	10 – 32
12	23	6 – 19

Tab. 3.1: Délky prvků STDD

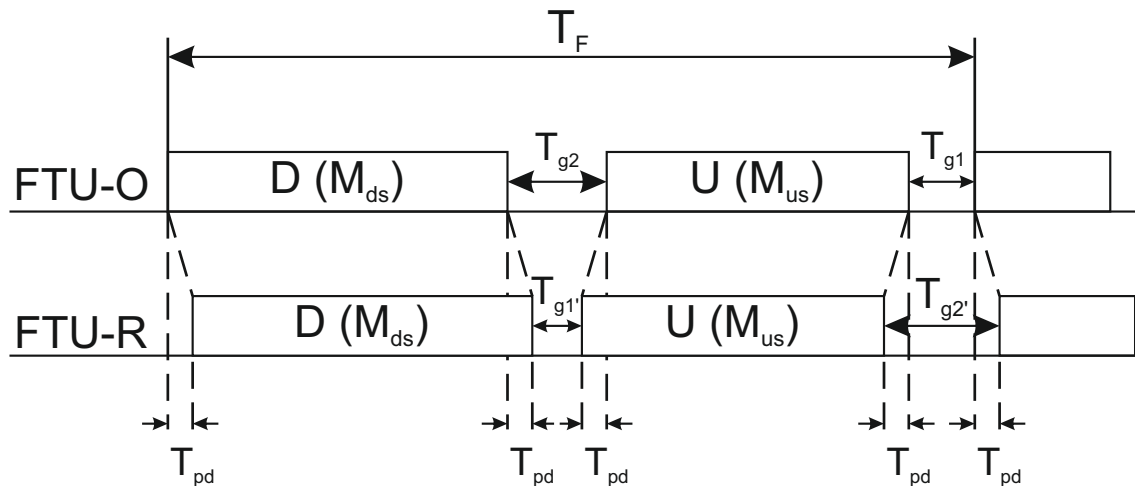
Hodnoty rámce (jako  $M_F$ ,  $M_{ds}$  a  $M_{us}$  period) jsou zvoleny při inicializaci systému a poté se pro daný superrámec nemění.

### 3.1.2 TDD rámec

Struktura TDD rámce lze vidět na obr. 3.2 [8]. Hodnota  $T_F$  definuje periodu rámce, který se skládá ze symbolů:

1.  $M_{ds}$  definuje počet symbolů pro periodu vyhrazenou pro DS
2.  $M_{us}$  definuje počet symbolů pro periodu vyhrazenou pro US
3. Na straně FTU-O jsou mezery  $T_{g1}$  a  $T_{g2}$
4. Na straně FTU-R jsou mezery  $T_{g1'}$  a  $T_{g2'}$

Pozn.:  $T_{pd}$  je doba zpoždění šíření signálu.



Obr. 3.2: Struktura TDD rámce

Periody těchto prvků jsou v následující posloupnosti:  $M_{ds}$  je synchronizována s začátkem rámce, následuje tichá perioda  $T_{g2}$ , poté  $M_{us}$  a nakonec  $T_{g1}$ .

Součet mezer pro FTU-O a FTU-R je stejný:



$$T_{g1} + T_{g2} = T_{g1'} + T_{g2'} \quad (3.4)$$

Délka  $T_{g1} + T_{g2}$  je rovna době jednoho TS. Pokud  $M_F = 36$  a  $M_{ds} = 32$ , lze podle předchozího bodu zjistit, že  $M_{us} = M_F - M_{ds} - 1 = 3$ .

Hodnota  $T_{g1'}$  je určena při inicializaci systému a je dle potřeby upravena pro synchronizaci přijatých  $M_{us}$  symbolů. Rozsah  $T_{g1'}$  je definován od  $6,5 \mu s$  do  $11,2 \mu s$  a maximální hodnota  $T_{g2}$  nesmí přesáhnout  $11,2 \mu s$ , aby bylo možné podporovat krátké vzdálenosti vedení, kde se zpoždění šíření  $T_{pd}$  blíží k nule.

Pozn.: Typické zpoždění šíření signálu je  $0,5 \mu s$  na  $100 m$ . Při nastavení  $T_{g2} = 11 \mu s$  je možné podporovat linky se zpožděním šíření v rozsahu od  $0$  do  $T_{pd} \leq (11 - 6,5)/2 = 2,25 \mu s$ . Tudíž je možné zapojení linek s délkou vedení od  $0$  do  $450 m$ .

### 3.1.3 Řízení toku dat

RMC zpráva se skládá z několika bajtů pro řízení a kontrolu dat, které jsou formátovány do RMC rámce/symbolu. Jeho hlavním údělem je stanovit směr přenosu dat (DS/US). Zpráva se skládá z několika příkazů, z nichž první značí směr přenosu.

RMC rámec má velikost  $N_{RMC} = K_{RMC} + R_{RMC}$ , kde  $K_{RMC}$  značí počet bajtů řídicí složky rámce (zpráva) a  $R_{RMC}$  počet nadbytečných (redundantních) bajtů. RS kódér přidává  $R_{RMC} = 16$  za  $K_{RMC}$  bajty. Rozsah  $K_{RMC}$  se pohybuje od  $32$  do  $64$  bajtů, které zahrnují doplnění na konci posledního příkazu, aby byly dodrženy hranice zprávy v rámci [8].

V TDD rámci je RMC symbol posunut o  $D_{RMCds}$  nebo  $D_{RMCus}$  symbolů od začátku DS nebo US přenosu. Tato hodnota se stanoví během inicializace systému a je stejná pro všechny linky FTU-O, kvůli STDD.

Logický rámec pro DS/US je definován jako perioda symbolů od RMC symbolu pro DS/US až do dalšího RMC symbolu pro stejný směr přenosu. Logické rámce začínající v superrámci patří k danému superrámci i když končí v jiném superrámci.

## 3.2 Inicializace

Inicializace systému je provedena prostřednictvím komunikace mezi FTU-O a FTU-R. Cílem inicializace je:

1. Definice společných operací (profilu, parametrů rámců, nastavení prvotních modulačních parametrů)
2. Synchronizace vzorkování a hranic symbolů
3. Identifikace kanálů a potlačení přeslechů mezi kanály

4. Transport přenosových parametrů z FTU-O do FTU-R, zahrnuje také informace o sekvenci sondy, PSD masce, potlačených sub-kanálů a požadovaných přenosových rychlostech
5. Identifikace šumu
6. Předání parametrů RS-FEC kodéru, prokládání a bitové alokace

Jednotka FTU-R po zapojení pošle žádost o handshake a FTU-O započne přidávací proceduru. FTU-O pošle sekvenci předurčených opakovaných symbolů jako sondu. Během tohoto kroku je jednotka FTU-R v tichém režimu, aby se zjistilo zpoždění šíření kanálu, hranice symbolů a rámců, atd.

### 3.3 Profily G.fast

V dodatku č. 3 ITU-T G.9701 jsou specifikovány 3 profily G.fast pro kroucené dvojlinky – tab. 3.2. Profily G.fast jsou určeny pro krátké vzdálenosti a vysílací výkon je tak optimalizován na 4 dBm (v případě profilu 106b 8 dBm).

Využívá se frekvenční pásmo od 2 MHz do 106 MHz nebo 212 MHz, aby nenastala kolize s ADSL technologií. Výhodou menšího počtu nosných frekvencí je manipulace modemů s menší operační pamětí. Rozteč sub-kanálů je 51,75 kHz a po přidání cyklické přípony a předpony je modulační rychlost symbolu 48 000 B/s [7][8].

Na každý sub-kanál lze alokovat 2 až 14 bitů [8].

Parametr	Profily		
	106a	106b	212a
Vysílací výkon [dBm]	+4	+8	+4
Vectoring	Lineární	Lineární	Lineární
Počet nosných	2048	2048	4096
Rozteč nosných [kHz]	51,75	51,75	51,75
Min. obousměrná rychlost [Mbit/s]	1000	1000	2000
Index nejnižší podporované nosné	43	43	43
Index nejvyšší podporované nosné	2047	2047	4095

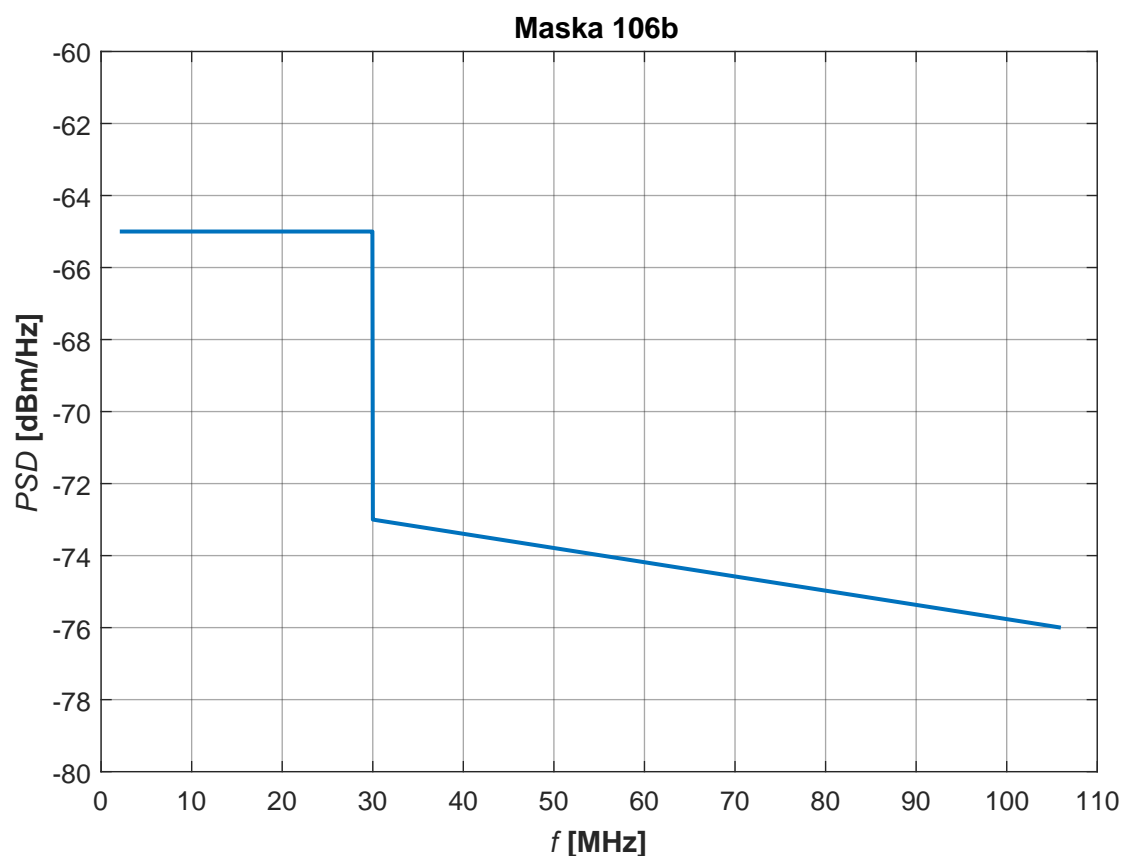
Tab. 3.2: ITU-T G.9701 profily

Vysílací výkon nesmí přesáhnout specifikované hodnoty daných profilů. To je myšleno pro kontinuální signál, ne pro systém využívající TDD. Vysílací výkon je tedy myšlen pro oba směry a v každém může výkon dosahovat stanovených hodnot – např. pro profil 106a 4 dBm pro DS a 4 dBm pro US.

### 3.4 PSD masky

Masky výkonové spektrální hustoty pro G.fast jsou specifikovány v ITU-T G.9700 a mají několik omezení. Spodní limit masek je dán frekvencí 2 MHz, vysoké frekvence jsou omezeny frekvencí profilu – 106 MHz nebo 212 MHz.

Podle konfigurace distribučního bodu lze zakázat jednotlivé nosné, nebo více. Přenosový výkon těchto sub-kanálů bude potom 0 dBm a tato hodnota bude převážovat nad ostatními instrukcemi spojenými s přenosovým výkonem těchto sub-kanálů.



Obr. 3.3: Maska profilu 106b

Příklad masky pro profil 106b je zobrazen v přenosovém rozsahu na obr. 3.3. Nejvyšší bitové alokace bude dosaženo v rozsahu 2 až 30 MHz, kde se PSD masky drží na -65 dBm. PSD vyšších frekvencí než 30 MHz klesá od -73 dBm do -76 dBm. Pro profil 212a tato křivka klesá až do 212 MHz a do -79 dBm.

## 4 VÝSLEDKY STUDENTSKÉ PRÁCE

V rámci diplomové práce byl vytvořen program pro simulaci přípojek VDSL2 a G.fast. Umožňuje výběr ze všech dostupných profilů pro VDSL2 a G.fast technologie, volbu pokročilých parametrů, spustit tyto simulace a zobrazit porovnání výsledků.

Program byl vytvořen v Matlabu verze R2016a a kromě základní instalace vyžaduje funkci findjob.m pro předávání hodnot mezi jednotlivými GUI okny/prvky. Tato funkce lze stáhnout zde.

### 4.1 Ovládání programu

#### 4.1.1 Hlavní menu

V hlavním menu (na obr. 4.1) je zvolen typ metalického vedení a maximální délka vedení. Uživateli je tady umožněno zvolit směr přenosu signálu – DS nebo US, zobrazit grafy PSD masek pro zvolené unikátní profily a grafy rušení ve vybraných systémech. Masky VDSL2 profilů je zobrazena jen pro vybraný směr přenosu signálu.

Lze vykreslit bitovou alokaci profilů a pozorovat na grafech vliv rušících systémů (FEXT) na alokaci bitů. Všechny grafy závislé na délce vedení také obsahují interaktivní prvek „slider“ a s jeho pomocí se uživatel může posunovat po celé zvolené maximální délce vedení.

Kód tohoto programu je součástí této práce a spouští jej funkce GUI.



Obr. 4.1: Hlavní menu programu

Tlačítka Export a Import pracují jen se seznamem profilů, ne se skutečnými výsledky simulace. Uživatel si tak může uložit skupiny testovacích profilů a opakovaně

simulovat s jinými parametry, spustit s jiným typem vedení a jeho maximální délkou. Změnit směr přenosu signálu a přidat si vykreslení grafů PSD masek, interference a bitové alokace.

#### 4.1.2 Přidání profilů

Pro přidání profilů si může uživatel vybrat mezi VDSL2 profily a G.fast profily. U obou lze nastavit počet rušících systémů v rozsahu 1–49, pro modelování přeslechů FEXT. Nebo uživatel může zapnout vektorizaci a dosáhnout nejvyšších přenosových rychlostí.

Plán	MHz	US0
-	-	-
997-M1c-A-7		(B7-1)
997-M1x-M		(B7-3)
997-E17-M2x-A		(B7-9)
997-E30-M2x-NUS0		(B7-10)
998-M2x-A		(B8-4)
998-M2x-M		(B8-5)
998-M2x-B		(B8-6)
998-M2x-NUS0		(B8-7)
998-E17-M2x-NUS0		(B8-8)
998-E17-M2x-NUS0-M		(B8-9)
998-ADE17-M2x-NUS0-M		(B8-10)

☐ Vectoring      Počet rušících systémů:  (1-49)     

Obr. 4.2: Menu pro přidání VDSL2 profilů

Menu pro přidání VDSL2 profilů (obr. 4.2) obsahuje 3 filtry, které usnadňují uživateli práci s hledáním požadovaných profilů. Lze filtrovat profily podle kmitočtových plánů (997 nebo 998), stejných frekvencí a pásma US0. Pozn.: V seznamu profilů je jeden s označením NUS0-A (profil 998 ADE30-M2x-NUS0-A), které má stejné vlastnosti jako NUS0 [5].

Seznam také obsahuje sloupec zkrácených názvů daných profilů [5] pro přehlednější orientaci v seznamu a poté i ve výsledných grafech.

Okno se seznamem G.fast profilů je na (obr 4.3), ještě navíc obsahuje možnost výběru poměru rámců STDD. Hodnoty jsou v souladu s podporovanými hodnotami z tab. 3.1 a s doporučení ITU-T G.9701. Byly také započítány řídicí rámce RMC.

Zobrazené a vybírané hodnoty jsou pro DS, délky rámců pro US jsou automaticky dopočítány až v algoritmu programu.

V obou oknech lze vybrat více profilů naráz se společnými parametry rušících systémů a v případě G.fast menu také včetně společného poměru  $\frac{M_{ds}}{M_F}$  rámců. Poté

G.fast profily

106a
106b
212a

☐ Vectoring     
 Počet rušících systémů:  (1-49)     
 % DS:

Obr. 4.3: Menu pro přidání G.fast profilů

se musí okna opět otevřít a mohou se zvolit stejné profily, ale tentokrát s jinými parametry.

Přesné duplikáty profilů se stejným počtem rušících systémů (pro G.fast i stejné poměry rámců) jsou vyfiltrovány programem.

### 4.1.3 Zobrazení a mazání profilů

Vyberte profily, které se mají odebrat:

106b	# Fext: 1	DS: 86.1 %
212a	# Fext: 1	DS: 86.1 %
998-ADE17-M2x-B	# Fext: 0	
998-ADE35-M2x-B	# Fext: 0	

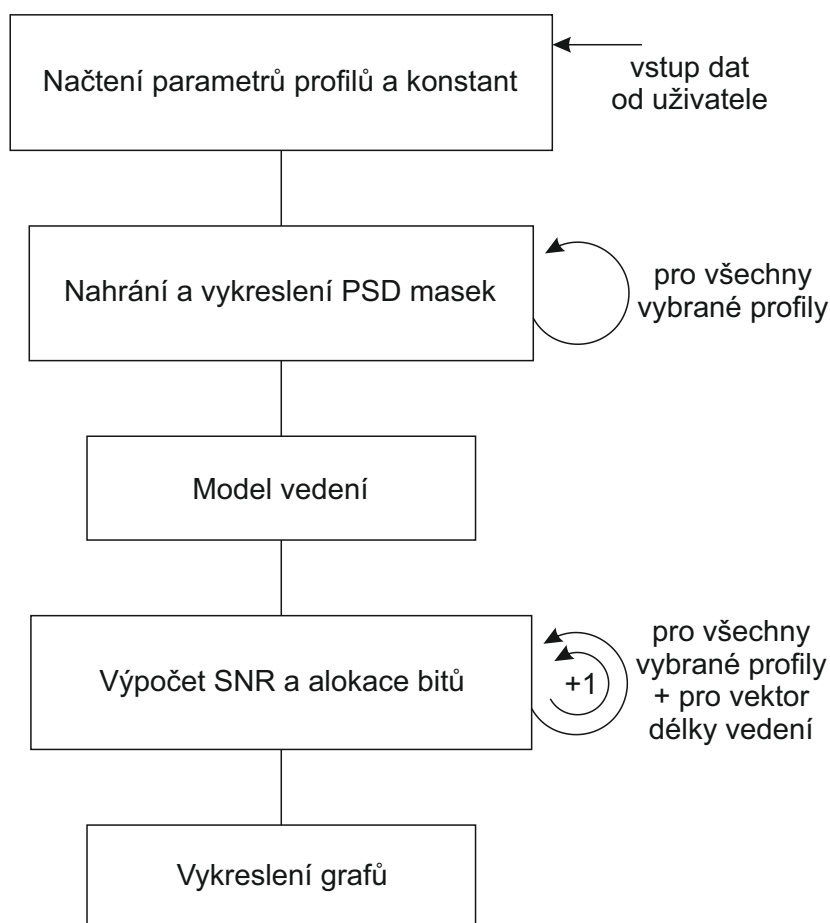
Obr. 4.4: Seznam vybraných profilů

Funkce pro manipulaci profilů je spuštěna tlačítkem „Vymazat profily“. Seznam vybraných profilů je zobrazen na (obr 4.4) i jejich parametry, včetně importovaných

profilů. V tomto okně je umožněno odstranit profily ze seznamu. Lze odebrat více vybraných profilů najednou.

## 4.2 Algoritmus programu

Všechna data vybraná uživatelem jsou odesílána z grafického rozhraní do výpočetního programu. Pro přehled to jsou: vybrané profily, jejich počet rušících systémů (a poměr rámců), typ vedení, jeho max. délka, směr přenosu signálu a 3 volby vykreslení grafů.



Obr. 4.5: Vývojový diagram výpočetní funkce

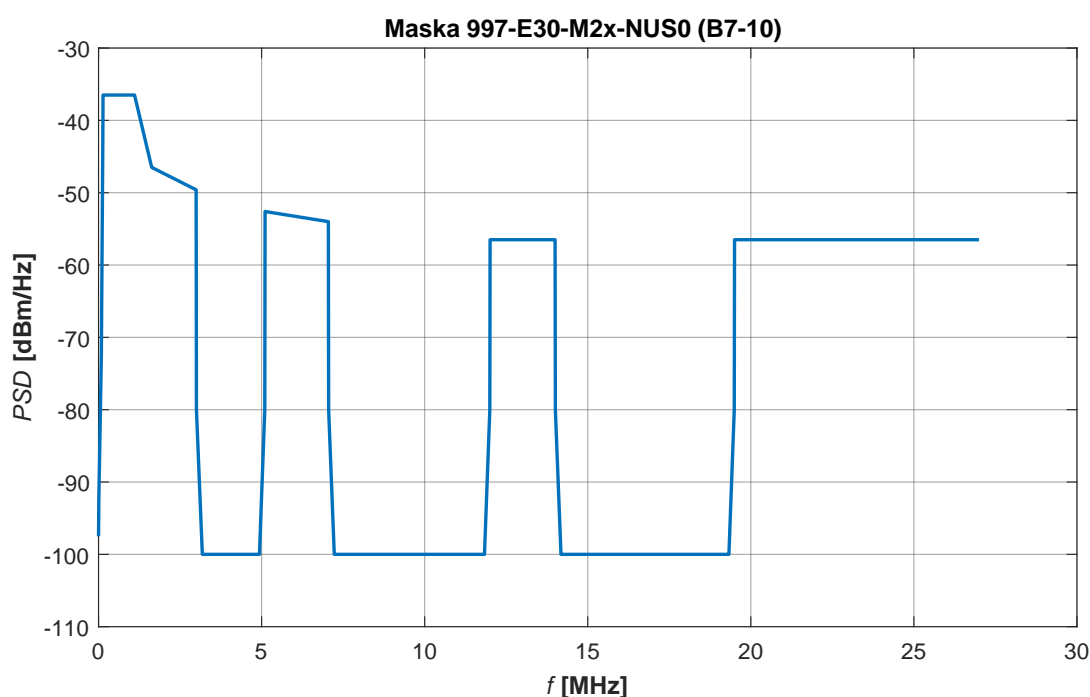
Na obr 4.5 je vývojový diagram výpočetní funkce. Kromě proměnných zvolenými uživatelem jsou programem načteny informace o PSD maskách dle doporučení ITU-T G.993.2 a G.9700, další důležité parametry profilů – jako počet a rozteč subkanálů. Modulační rychlost profilů, maximální frekvence a informace o pásmu US0 (variací A, B, M, NUS0, NUS0-M).

Dále jsou generovány obecné frekvenční parametry, konstanty – např. chybovost BER, kódovací zisk a konstanta přeslechů vedení. A také jsou načteny parametry kabelů – viz. kapitola 4.2.2.

Při volbě směru US jsou pro G.fast profily přepočítány používané rámce  $M_{ds} \rightarrow M_{us}$ .

### 4.2.1 PSD masky

Masky spektrální výkonové hustoty byly převzaty z ITU-T G.993.2 a ITU-T G.9700. Jsou reprezentovány hodnotami v jednotkách dBm pro zlomové nebo důležité sub-kanály.



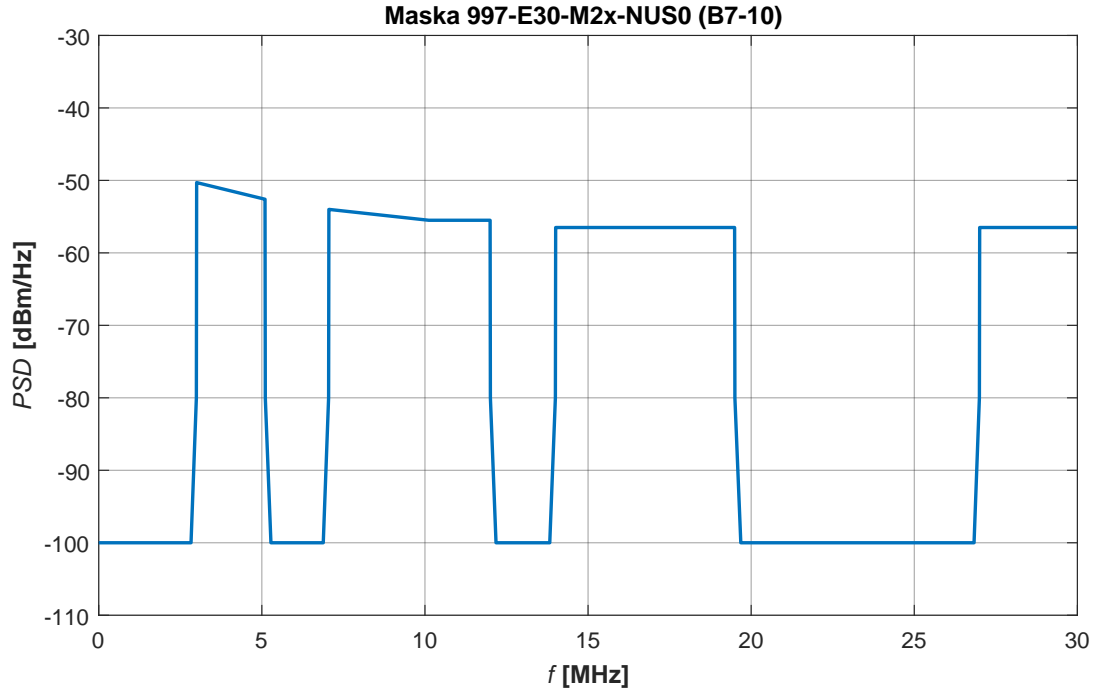
Obr. 4.6: PSD maska profilu 997 E30-M2x-NUS0 pro DS

Příklady těchto masek jsou na obr 4.6 pro DS a na obr 4.7 pro US. Tyto PSD masky jsou vykresleny pro symetrický profil 997 E30-M2x-NUS0. Pásmo US0 je touto maskou nevyužíváno a lze vidět zvýšený počet sub-kanálů vyhrazených pro US, než u masky asymetrického plánu 998 – obr. 2.2.

Profily 30a mají 2krát větší rozteč sub-kanálů než ostatní VDLS2 profily a to 8,625 kHz. Tudíž jsou nekompatibilní s ostatními profily téměř se nepoužívají [9]. Nejvíce je používán profil 998 ADE17a a někde i profil 35b [9].

Testy a simulace provedené v této kapitole jsou soustředěny na G.fast technologii a prominentní profily VDSL2 technologie.





Obr. 4.7: PSD maska profilu 997 E30-M2x-NUS0 pro US

#### 4.2.2 Model vedení

Modely vedení jsou získány ze sbírky referenčních modelů [2]. Byly vybrány kabely od společnosti British Telecom, u kterých je využito 13parametrových modelů. Přesnost těchto parametrů je dobrá do 100 MHz [2] a modely lze použít na vyšší frekvence.

$R_{oc}$	179	$N_b$	1,2
$a_c$	35,89e-3	$g_0$	0,5e-9
$R_{os}$	0,0	$N_{ge}$	1,033
$a_s$	0,0	$C_o$	1e-9
$L_o$	0,884242e-3	$C_\infty$	55e-9
$L_\infty$	800,587e-6	$N_{ce}$	0,1
$f_m$	1e6		

Tab. 4.1: Parametry kabelu BT\_dwug

Parametry těchto modelů jsou jako příklad uvedeny v tabulce 4.1 pro vedení BT\_dwug.

Podle rovnic pro podélnou impedanci  $Z_s(f)$  a příčnou admitanci  $Y_p(f)$  uvedených v [2] jsou spočteny primární parametry toho kabelu  $R(f)$ ,  $L(f)$ ,  $C(f)$ ,  $G(f)$ .

$$Z_s(f) = \left( \frac{1}{\sqrt[4]{R_{oc}^4 + a_c \cdot f^2}} + \frac{1}{\sqrt[4]{R_{os}^4 + a_s \cdot f^2}} \right)^{-1} + j \cdot 2\pi f \cdot \left( \frac{L_o + L_\infty (f/f_m)^{N_b}}{1 + (f/f_m)^{N_b}} \right) \quad (4.1)$$

$$Z_s(f) = R(f) + j \cdot 2\pi f \cdot L(f) \quad (4.2)$$

$$Y_p(f) = (g_0 \cdot f^{N_{ge}}) + j \cdot 2\pi f \cdot (C_\infty + C_o/f^{N_{ce}}) \quad (4.3)$$

$$Y_p(f) = G(f) + j \cdot 2\pi f \cdot C(f) \quad (4.4)$$

Z těchto parametrů je dále vypočtena měrná míra přenosu  $\gamma(f)$  a obrazová impedance  $Z_0(f)$ :

$$\gamma(f) = \sqrt{(R(f) + j \cdot \omega \cdot L(f))(G(f) + j \cdot \omega \cdot C(f))} \quad (4.5)$$

$$Z_0(f) = \sqrt{\frac{(R(f) + j \cdot \omega \cdot L(f))}{(G(f) + j \cdot \omega \cdot C(f))}} \quad (4.6)$$

Zpětná kaskádní matice byla vytvořena dle [2], aby byly přepočteny hodnoty pro proměnlivou délku vedení:

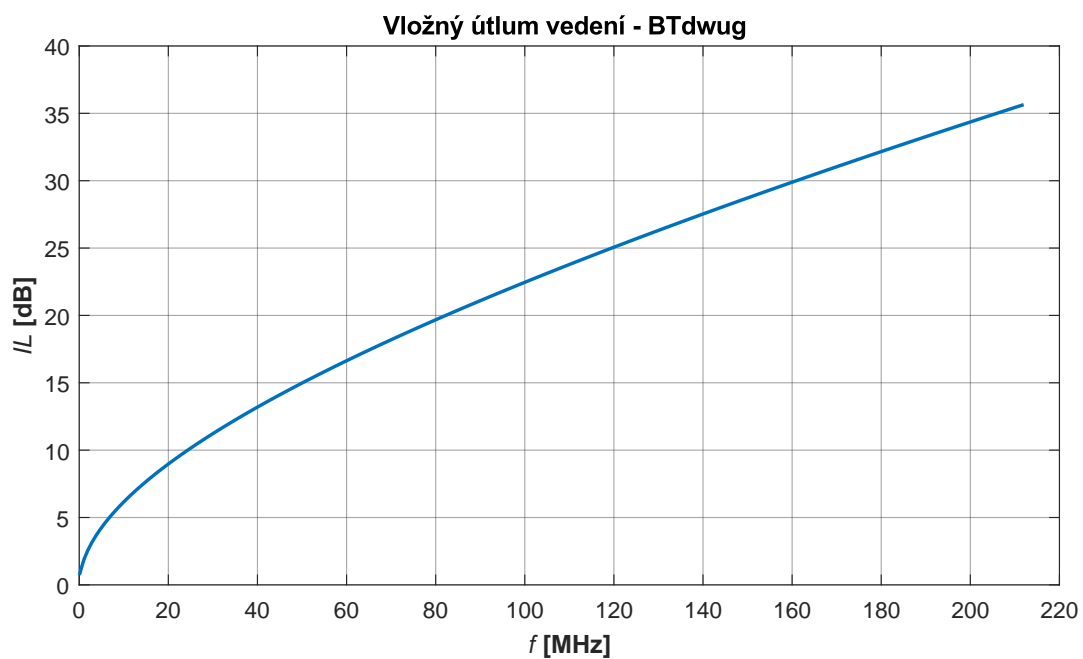
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma(f) \cdot l) & Z_0(f) \cdot \sinh(\gamma(f) \cdot l) \\ \sinh(\gamma(f) \cdot l)/Z_0(f) & \cosh(\gamma(f) \cdot l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

Hodnoty zpětné kaskádní matice jsou pak použity pro výpočet vloženého útlumu vedení. Zadané hodnoty impedance generátoru  $Z_G$  a zakončovací impedance  $Z_L$  jsou  $100 \, \Omega$ .

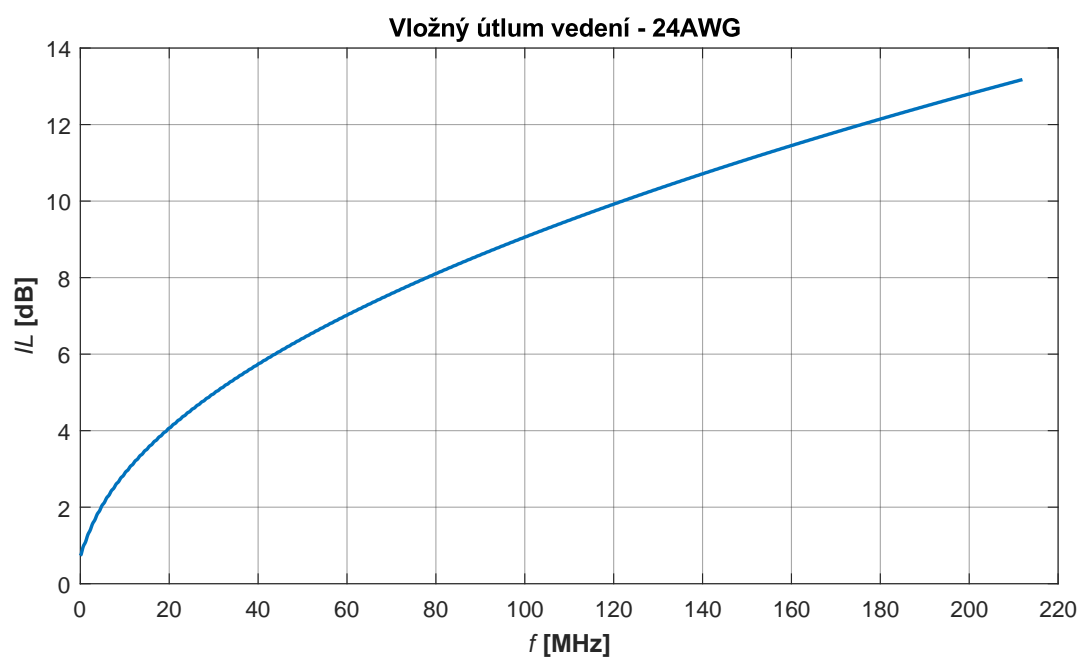
$$IL_{dB}(f) = 20 \cdot \log \left( \left| \frac{A \cdot Z_L + B + Z_G(C \cdot Z_L + D)}{Z_G + Z_L} \right| \right) \quad (4.7)$$

Charakteristika vloženého útlumu simulovaného kabelu BT\_dwug je na obr. 4.8 pro  $l = 100 \, \text{m}$ . Lze vidět nárůst útlumu na vyšších frekvencích a to má ještě větší vliv na větší vzdálenosti.

Pro porovnání je na obr. 4.9 vykreslen kabel 24 AWG, který vykazuje lepších přenosových vlastností. Útlum kabelu je nižší kvůli (mimo jiné) většímu průměru vodiče.



Obr. 4.8: Vložný útlum BT\_dwug na 100 m



Obr. 4.9: Vložný útlum 24 AWG na 100 m

### 4.2.3 Výpočet SNR a alokace bitů

Nejdříve jsou omezeny masky pro G.fast profily, aby nebyl přesažen vysílací výkon 4 dBm (pro profil 106b 8 dBm) v žádném směru přenosu signálu.

Pokud jsou vybrány rušící systémy, provede se výpočet spektrální masky pro rušení FEXT pomocí dvou následujících rovnic:

$$|H_{\text{FEXT}}(f)|^2 = \left(\frac{N}{49}\right)^{0,6} \cdot K_{\text{FEXT}} \cdot f^2 \cdot l \cdot |H_{\text{channel}}(f, l)|^2 \quad (4.8)$$

a

$$PSD_{\text{FEXT}}(f) = PSD_{\text{Disturber}}(f) \cdot |H_{\text{FEXT}}(f)|^2 \quad (4.9)$$

kde  $PSD_{\text{FEXT}}(f)$  je výkonová spektrální hustota rušení FEXT v dBm,  $H_{\text{FEXT}}(f)$  je přenosová funkce rušení FEXT,  $K_{\text{FEXT}}$  je konstanta přeslechu ( $10^{-19,5}$  [3]),  $N$  je počet rušících systémů,  $f$  je kmitočet,  $l$  je délka vedení v km,  $H_{\text{channel}}(f, l)$  je přenosová funkce vedení [3].  $H_{\text{channel}}(f, l)$  se získá převedením vložného útlumu  $IL_{\text{dB}}(f)$  zpět z dB hodnot.

Výkonová spektrální hustota bílého šumu (AWGN) byla zvolena pro VDSL2 systémy  $-120$  dBm a pro G.fast profily  $-130$  dBm. Protože G.fast je zaměřený na krátké vzdálenosti a tyto hodnoty bílého šumu budou více odpovídat reálným podmínkám.

Složením  $PSD_{\text{AWGN}}(f)$  a  $PSD_{\text{FEXT}}(f)$  se dostane hodnota celkového šumu. A  $SNR(f)$  se získá odečtením vložného útlumu a celkového šumu od PSD masky profilu –  $PSD_{\text{TX}}(f)$ .

Všechny veličiny v následující rovnici jsou v dB jednotkách:

$$SNR(f) = PSD_{\text{TX}}(f) - IL(f) - 10 \cdot \log(PSD_{\text{AWGN}}(f) + PSD_{\text{FEXT}}(f)) \quad (4.10)$$

Dále je  $SNR(f)$  přepočteno na diskretní hodnoty dle počtu nosných frekvencí profilu a jejich rozteče –  $SNR(n)$ .  $SNR(n)$  je pak dosazeno do rovnice (1.1) a se zbylými parametry je vypočtena alokace na jednu nosnou frekvenci. Tento cyklus je proveden pro všechny sub-kanály v profilu a po vynásobení modulační rychlostí daného profilu je získána přenosová rychlost systému.

Alokace bitů je ošetřena pro nepoužívané frekvence, frekvence mimo rozsah profilu a jiné frekvence specifikované v této práci. Ošetřeno je také pásmo US0.

Pro VDSL2 je nastavena alokace bitů od 2 do 15 pro každý sub-kanál, pro G.fast od 2 do 14.

#### 4.2.4 Vykreslení grafů

Podle vybraných parametrů v hlavním menu programu se vykreslí požadované grafy. Charakteristiky závislé i na délce vedení obsahují interaktivní prvek „slider“, který umožňuje posun ve vektoru délky po 10 m.

Více křivek v jednom grafu lze kliknutím označit pro zvýraznění vybrané závislosti. Umožňuje to tak snadnější viditelnost vybraného profilu.

## 4.3 Simulace

V tab. 4.2 je přehled parametrů testovaných profilů. Testované profily byly vybrány podle několika parametrů. Tato práce je zaměřená na technologii G.fast, takže zahrnuje všechny profily této technologie. Pro porovnání s technologií VDSL2 jsou zvoleny dva profily – nejpoužívanější 17a a profil 35b s nejvyššími přenosovými rychlostmi.

Pro simulace budou použity 2 různé kabely – BT\_dwug (obr. 4.8) a 24 AWG (obr. 4.9) – pro zjištění vlivu vložného útlumu na tyto technologie.

Parametr	Profily				
	17a	35b	106a	106b	212a
Vysílací výkon [dBm]	+14,5	+14,5	+4	+8	+4
Maximální frekvence [MHz]	17,664	35,328	105,984	105,984	211,968
Počet sub-kanálů	4096	8192	2048	2048	4096
Rozteč sub-kanálů [kHz]	4,3125	4,3125	51,75	51,75	51,75
Min. obousměrná rych. [Mbit/s]	150	400	1000	1000	2000

Tab. 4.2: Parametry testovaných profilů

### 4.3.1 VDSL2 simulace

#### Porovnání pásem US0

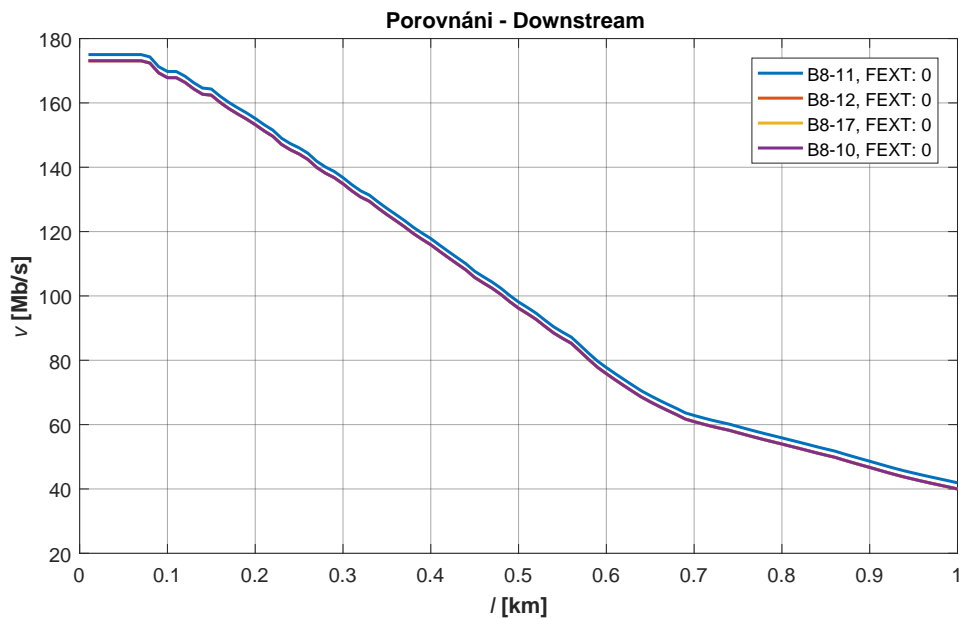
Variace PSD masek v pásmu US0 mají největší vliv na velké vzdálenosti. Testované profily jsou následující:

1. 998 ADE17-M2x-A (B8-11)
2. 998 ADE17-M2x-B (B8-12)
3. 998 ADE17-M2x-M (B8-17)
4. 998 ADE17-M2x-NUS0-M (B8-10)

Všechny systémy využívají vektorizaci, použité vedení je BT\_dwug a jeho max. délka je 1km. Na obr 4.10 je znázorněna závislost přenosové rychlosti na délce vedení.

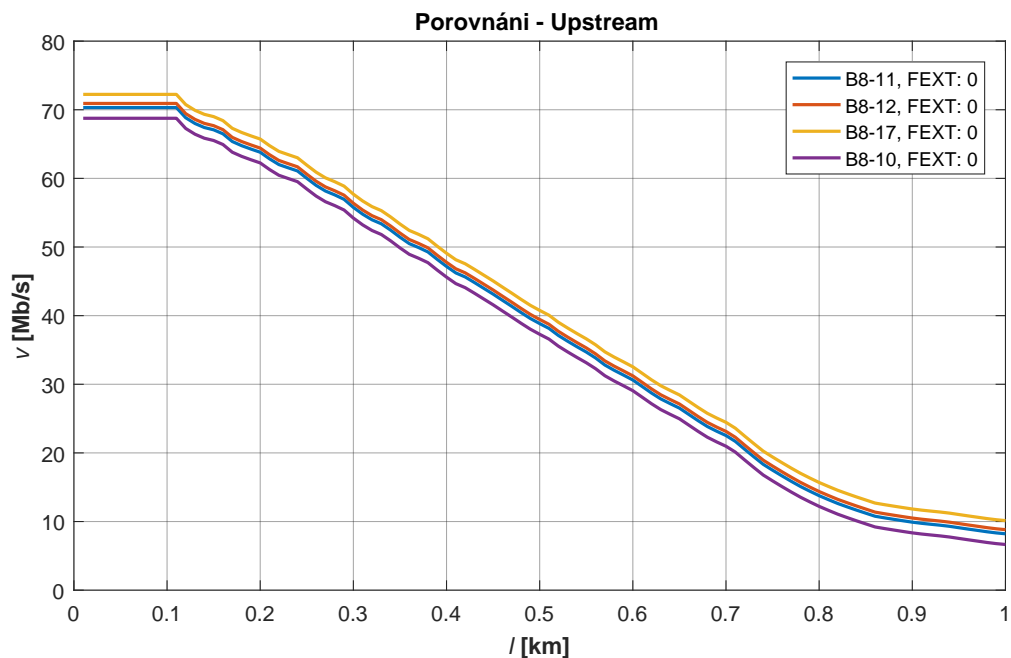
Graf je vykreslen pro DS a lze vidět, že jsou vykresleny jen 2 křivky. To proto, že PSD masky profilů 998 ADE17-M2x-B, 998 ADE17-M2x-M 998 ADE17-M2x-NUS0-M mají stejné vlastnosti pro downstream – viz. kapitola 2.2. A profil 998 ADE17-M2x-A má pásmo US0 ukončené na frekvenci 138 KHz a pásmo DS1 obsahuje širší spektrum pro downstream.

V opačném směru se každá variace PSD masek liší a na obr. 4.11 jsou vidět všechny 4 simulované profily. Profil s nejširším pásmem US0 (998 ADE17-M2x-M)



Obr. 4.10: Vliv pásma US0 na downstream

vykazuje nejlepších výsledků pro US. Po celou délku vedení jsou rozdíly v přenosových rychlostech stejné, avšak na větší vzdálenosti budou tyto rozdíly relativně větší. Proto má volba pásma US0 největší vliv na přenosové rychlosti na velké vzdálenosti.



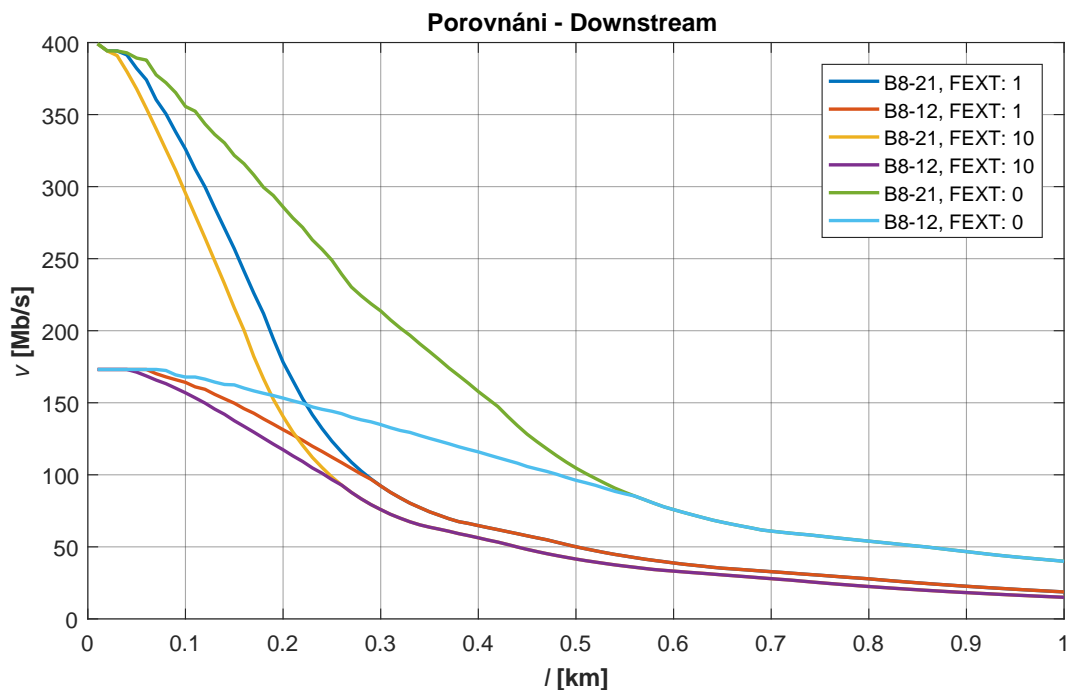
Obr. 4.11: Vliv pásma US0 na upstream

## Vliv vektorizace na VDSL2 profily

Důležitá simulace je pro zjištění vlivu vektorizace. Tato simulace je provedena pro vedení BT\_dwug délky 1km. Vybrané PSD masky VDSL2 profilů jsou:

1. 998 ADE17-M2x-B (B8-12)
2. 998 ADE35-M2x-B (B8-21)

Parametry rušících systémů jsou pro oba profily stejné: 0, 1 a 10 rušících systémů je simulováno pro oba profily.

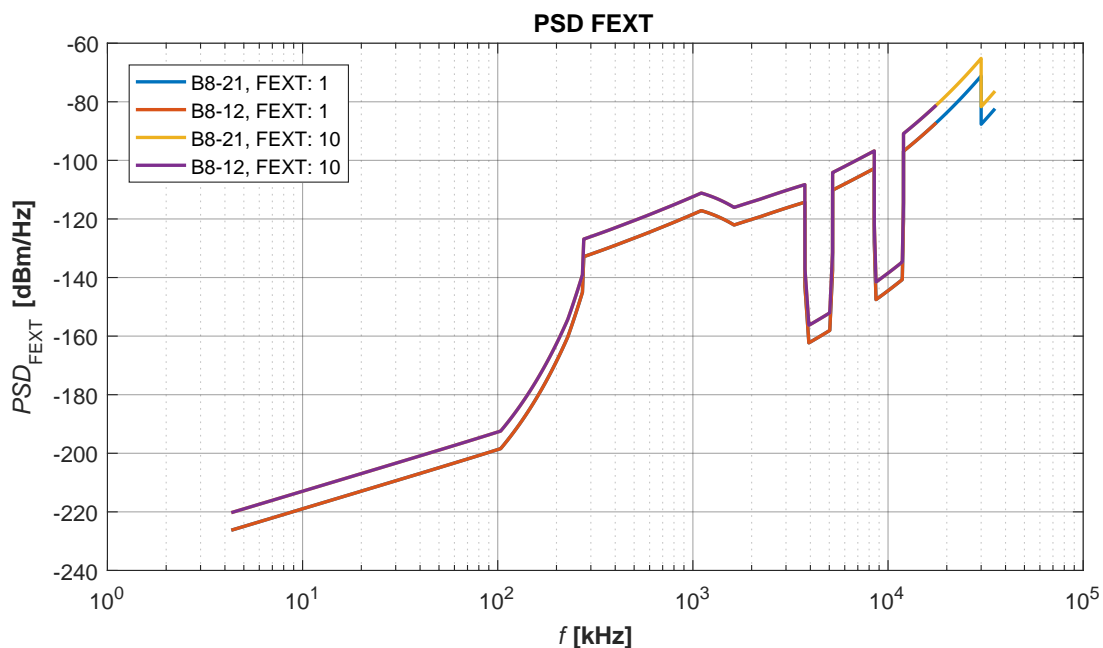


Obr. 4.12: Vliv vektorizace na přenosové rychlosti VDSL2 pro DS

Na obr. 4.12 lze pozorovat prudký pokles pro profil 35b i při jednom rušícím systému. Na určitých vzdálenostech (dle počtu rušících systémů) profil 35b splyne s profilem 17a, protože vyšší frekvence profilu 35b nejsou neosazeny žádnými bity. To je dáno zvyšujícím se útlumem vedení a šumu.

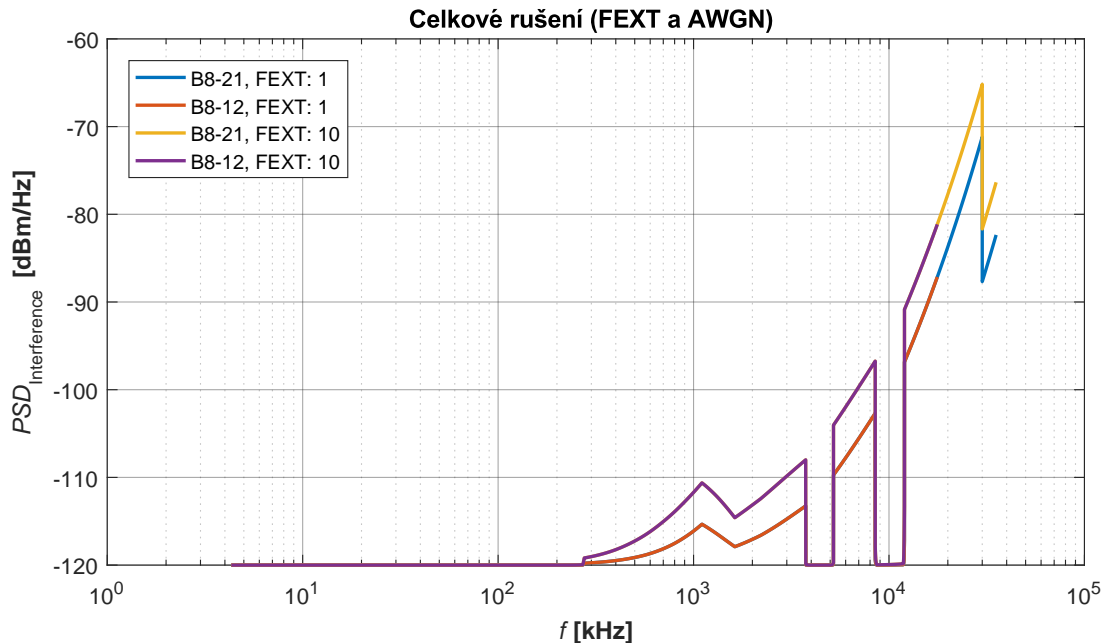
Systém s použitou vektorizací vykazuje mnohem lepších výsledků, jak na dlouhé vzdálenosti, tak i na ty krátké. Na dlouhé vzdálenosti lze pozorovat nevýrazné změny mezi 1 a 10 rušícími systémy, ale mezi systémem s vektorizací a systémem s jen 1 rušícím systémem je značná pokles v přenosové rychlosti po celé délce vedení.

Na obr. 4.13 je znázorněn model přeslechů pro vybrané profily. Profily 35b mají ještě větší útlum z přeslechů kvůli vyšším frekvencím. A na obr. 4.14 je celkový šum – složený z bílého šumu a přeslechů FEXT. Lze vidět, že celkový šum je „ohraňčený“ hodnotou bílého šumu AWGN –120 dBm.



Obr. 4.13: Rušení FEXT ve VDSL2 systémech pro DS

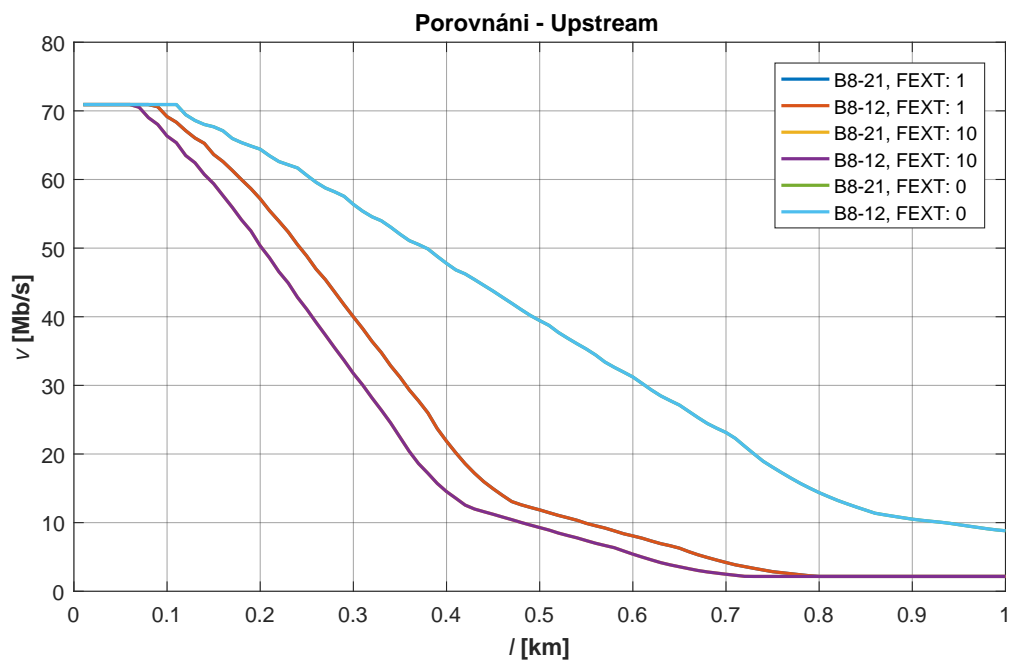
Obě charakteristiky –  $PSD_{\text{FEXT}}(f)$  a celkový šum – jsou znázorněny jako příklad v délce vedení 400 m.



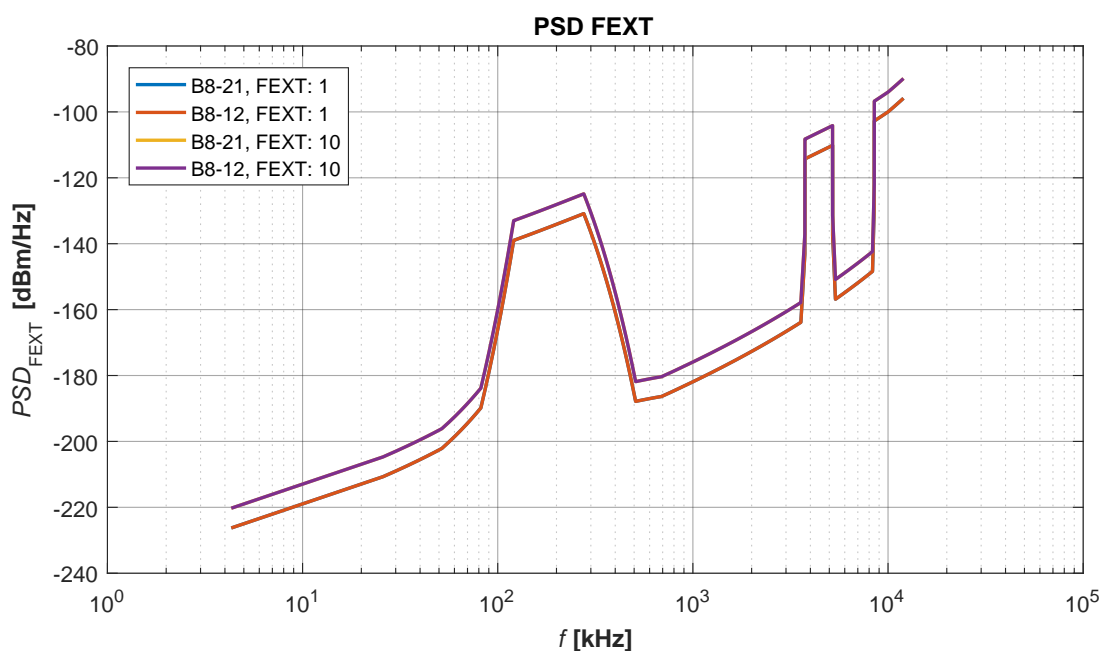
Obr. 4.14: Celkový šum ve VDSL2 systémech pro DS



Pro směr US je rozložení nosných frekvencí i přenosové rychlosti stejné. Jediná změna je v počtu rušících systémů – obr. 4.15.

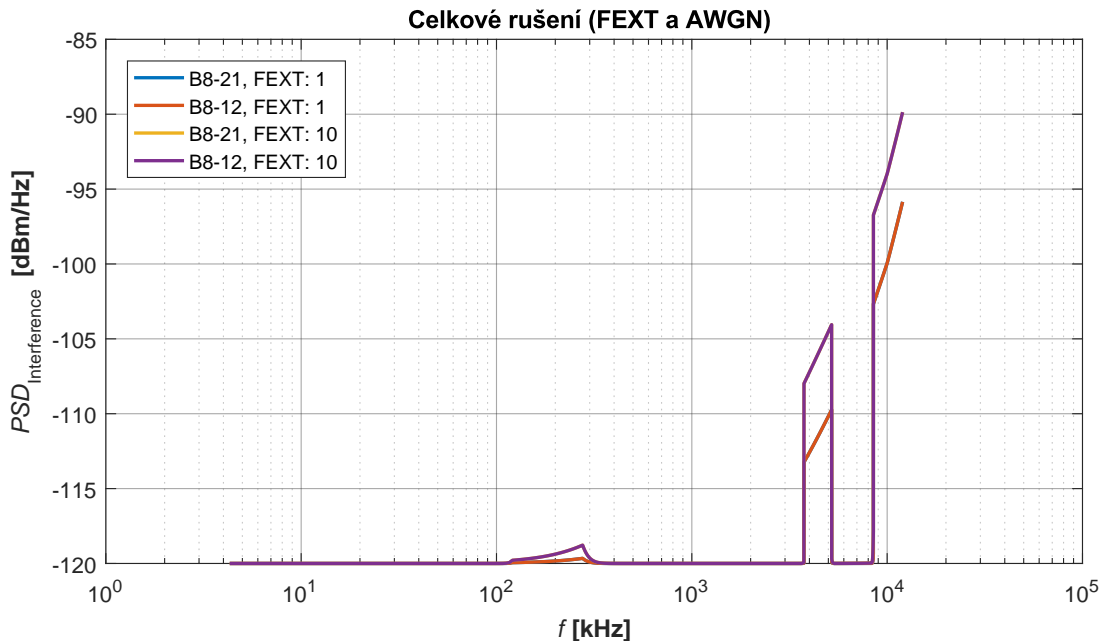


Obr. 4.15: Vliv vektorizace na přenosové rychlosti VDSL2 pro US



Obr. 4.16: Rušení FEXT ve VDSL2 systémech pro US

To se vztahuje i k grafům interference – obr. 4.16 a 4.17, které jsou vykresleny v délce vedení 400 m.



Obr. 4.17: Celkový šum ve VDSL2 systémech pro US

### 4.3.2 G.fast simulace

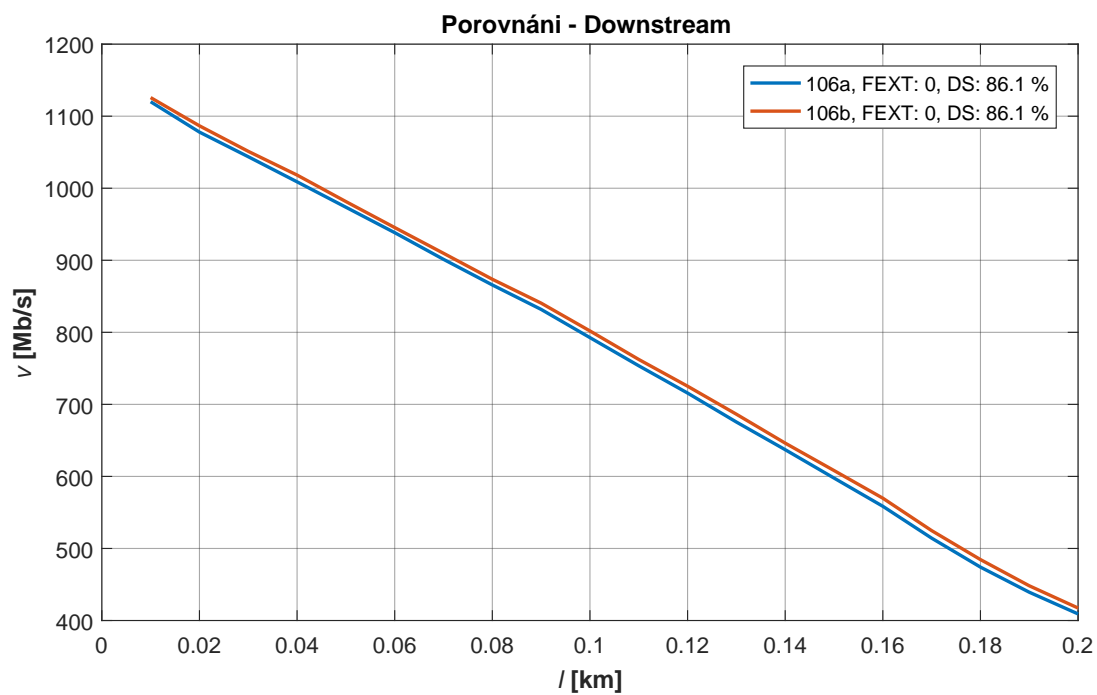
Obdobné simulace pro vliv přínosu vektorizace jsou provedeny pro G.fast profily. Navíc jsou porovnány různé délky rámců  $M_{ds}$ .

#### Vliv vektorizace na G.fast profily

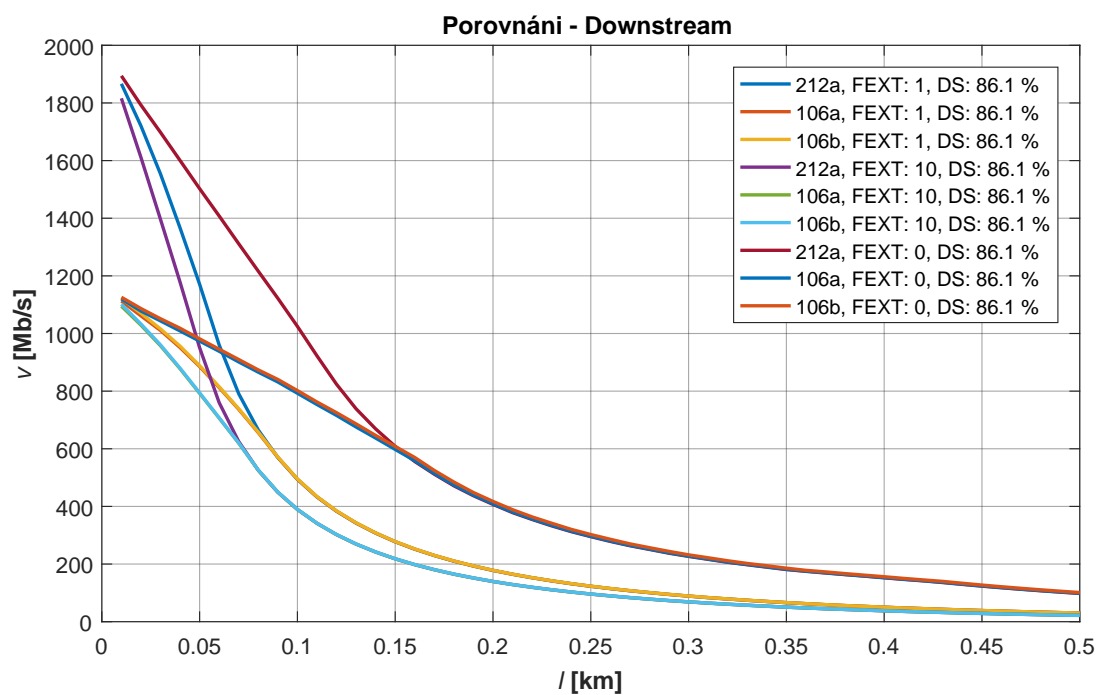
Pro zjištění vliv vektorizace na G.fast profily je zvoleno vedení BT\_dwug o délce 500 m. Četnost rámců  $M_{ds}$  je zvolena, aby se dosáhlo nejvyšších přenosových rychlostí pro DS – čas vyhrazený pro DS je v následujících grafech 86,1 %.

Na obr. 4.19 je vynesena závislost přenosové rychlosti pro G.fast profily s počty rušících systémů: 0, 1 a 10. Rozdíly mezi profily 106a a 106b jsou velice nepatrné a nejlépe jdou vidět na systémech s aktivní vektorizací. Většinu času však splývají. Tento rozdíl jde lépe vidět v podrobnějším zobrazení na obr. 4.18.

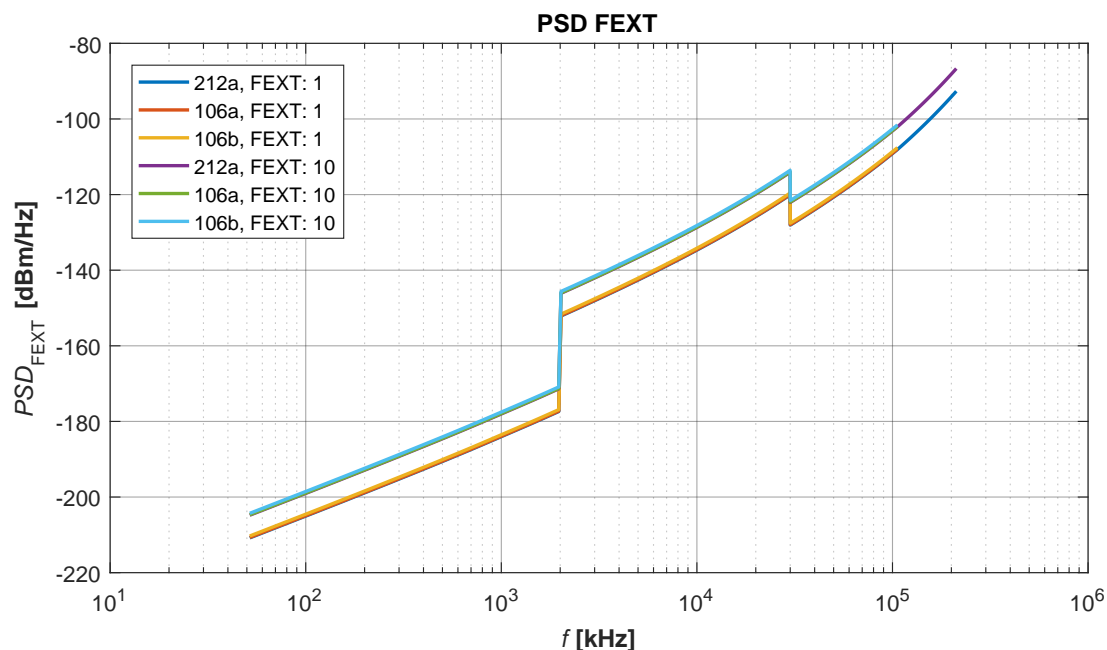
Z grafu na obr. 4.19 lze usoudit, že už jeden rušící systém razantně ovlivňuje přenosové rychlosti už na krátkých vzdálenostech. Vektorizace je pro G.fast systémy povinná a výrazně zlepšuje kvalitu signálu.



Obr. 4.18: Rozdíl v přenosové rychlosti profilů 106a a 106b pro DS

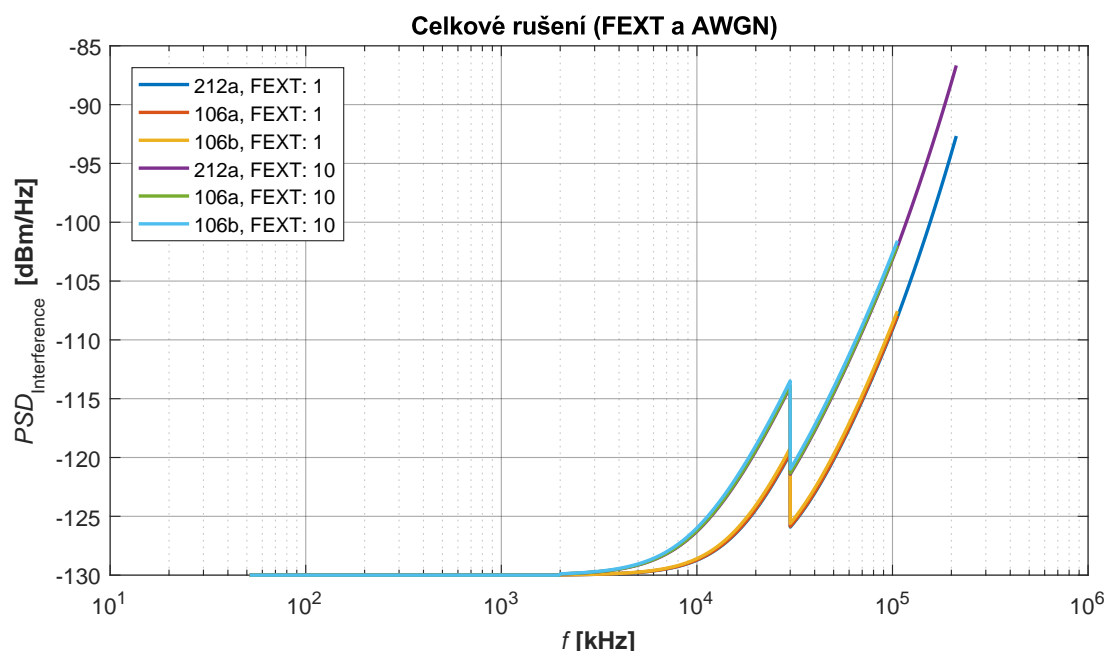


Obr. 4.19: Vliv vektorizace na přenosové rychlosti G.fast pro DS



Obr. 4.20: Rušení FEXT v G.fast systémech pro DS

Na obr. 4.20 je vykreslena závislost spektrální výkonové hustoty rušení FEXT na 100 m a na obr. 4.21 celkový šum na 100 m. Lze vidět, že nízké frekvence jsou ovlivněny bílým šumem a na vyšší frekvence má větší dopad rušení FEXT.



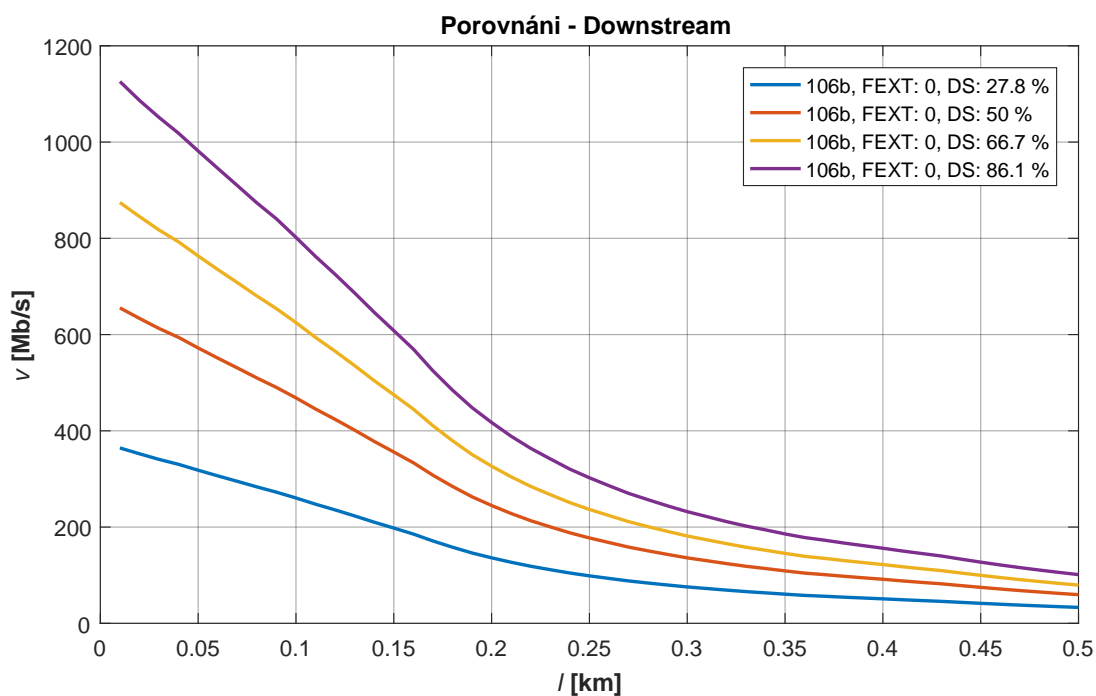
Obr. 4.21: Celkový šum v G.fast systémech pro DS

## Vliv změn délek rámců na G.fast profily

Změny přenosových rychlostí při změnách četností  $M_{ds}$  rámců jsou testovány na profilu 106b. Pro simulaci bylo použito vedení BT\_dwug s maximální délkou 500 m. Vybrány byly následující hodnoty  $M_{ds}$  rámců:

$M_F$	$M_{ds}$
36	32
36	25
36	19
36	11

Tab. 4.3: Testované hodnoty  $M_{ds}$  rámců



Obr. 4.22: Vliv změn  $M_{ds}$  rámců pro DS

V grafu na obr. 4.22 lze vidět, že tyto změny jsou přímočaré a mění rychlost vždy stejně vůči sobě. Při volbě poměru DS/US lze měnit optimální nastavení pro zákazníka s jeho požadavky.

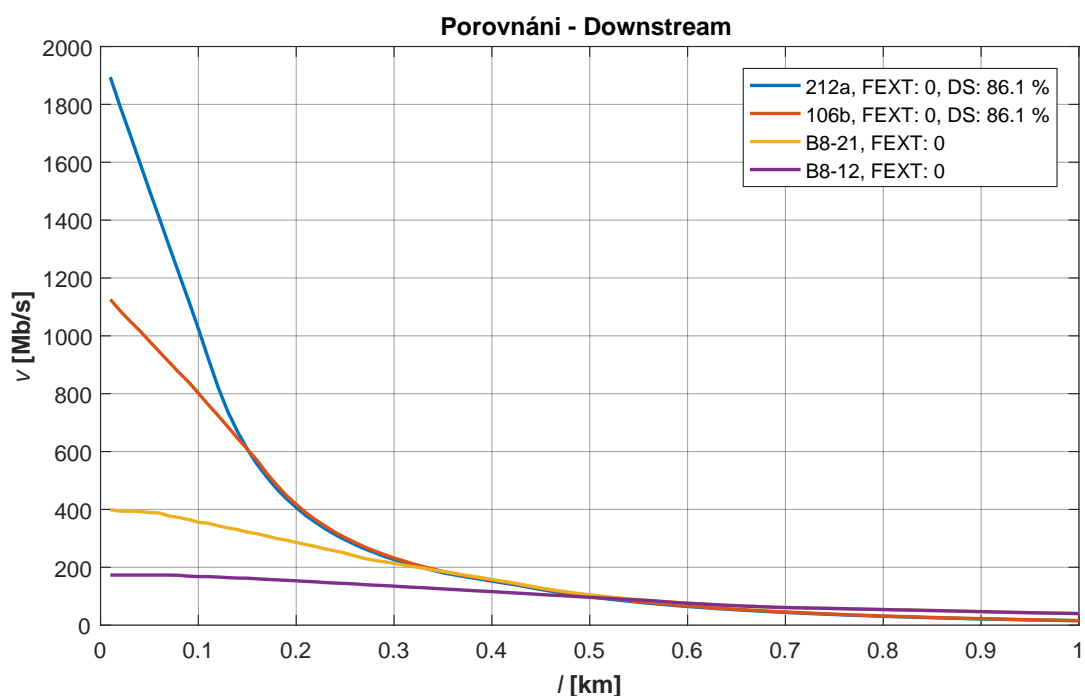
### 4.3.3 VDSL2 a G.fast simulace

Pro porovnání obou technologií byl vyřazen profil 106a, protože v grafu často nejde vidět (kvůli profilu 106b) a tak nemá reálné uplatnění pro analýzu výsledků.

#### Maximální rychlost ve směru downstream

Pro maximální přenosovou rychlost ve směru DS byla nastavena pro G.fast systémy hodnota  $\frac{M_{ds}}{M_F} = 86,1 \%$ .

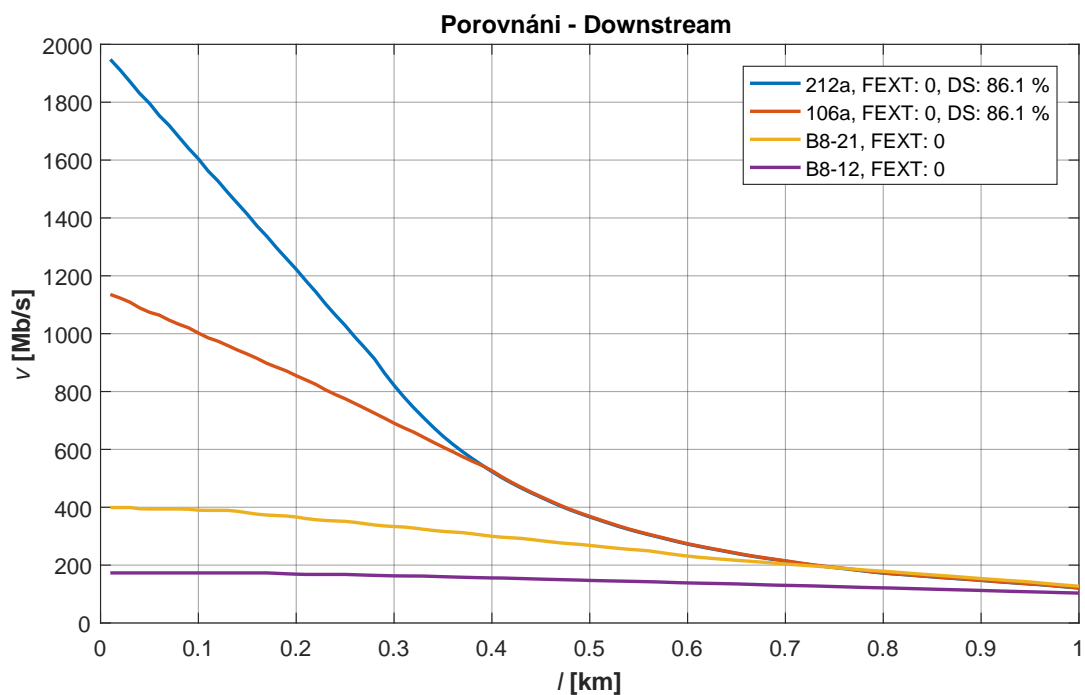
Délka vedení byla zvolena vždy  $l = 1$  km a první kabel použitý pro simulace byl vybrán BT\_dwug. Na obr. 4.23 lze vidět výrazně vyšší rychlosti pro G.fast profily, ale jen na krátké vzdálenosti. Na 400 m vykazuje profil 35b lepších výsledků, než oba G.fast profily, protože vyšší frekvence těchto profilů prudce tlumeny vložným útlumem vedení.



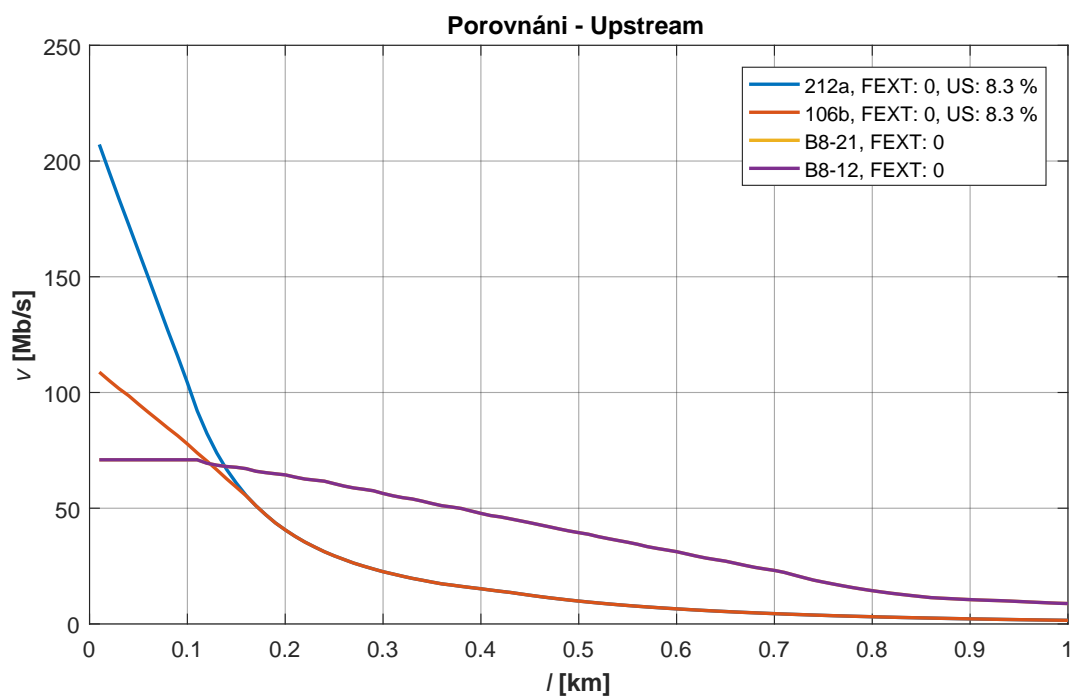
Obr. 4.23: Porovnání obou technologií pro vedení BT\_dwug pro DS

Profily technologie G.fast jsou mnohem více náchylnější a (ne)příznivé vlivy ve vedení. To lze vidět na obr. 4.24, kde změna vedení za kvalitnější výrazně změnila graf přenosové rychlosti. V dobrých podmínkách jsou přenosové rychlosti G.fast profilů vyšší i na 500 m.

Pro opačný směr budou výsledky G.fast profilů o něco horší, protože velká většina času je vyhrazena pro downstream. Efektivní upstream G.fast profilů bude jen do 100 m při použití kabelu BT\_dwug.

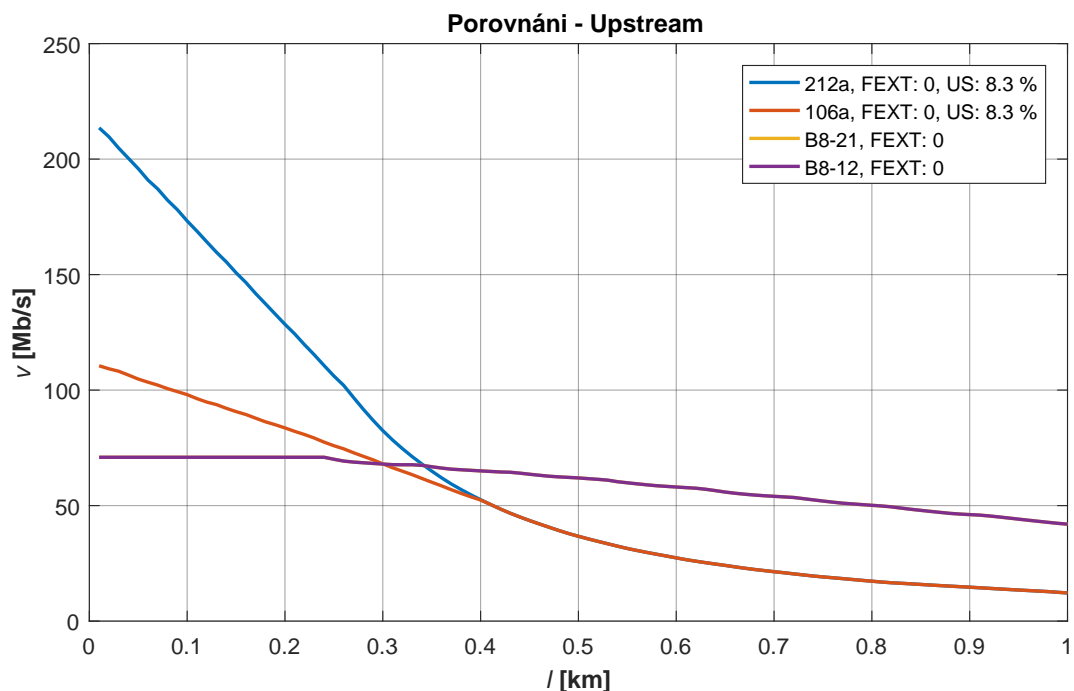


Obr. 4.24: Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro DS



Obr. 4.25: Porovnání obou technologií pro vedení BT\_dwug pro US

Přenosová rychlost pro US bude zase o něco lepší pro kvalitnější kabel 24 AWG – obr. 4.26.



Obr. 4.26: Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro US

### Simulace vyvážených profilů G.fast

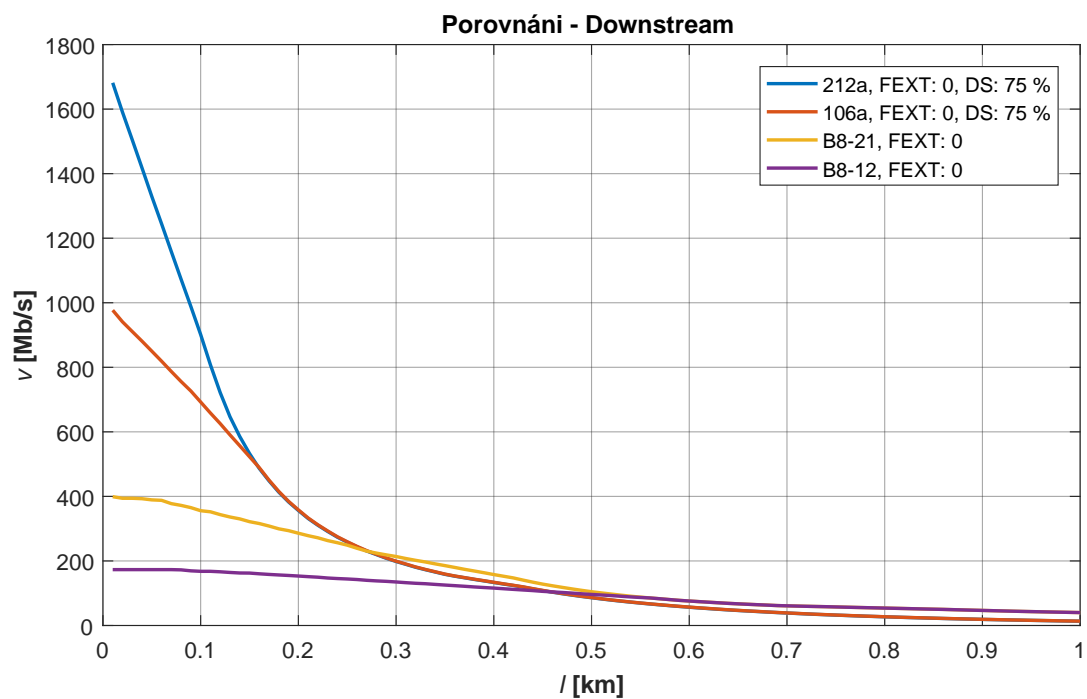
Kvůli nízkým přenosovým rychlostem pro US v předchozí simulaci, bylo spuštěno měření ještě jednou pro  $\frac{M_{ds}}{M_F} = 75\%$ . Tento poměr bude hlavně záviset na požadavcích zákazníka a optimální poměr tak může být vždy jiný.

Délka vedení byla zvolena vždy  $l = 1$  km a stejným způsobem bylo provedeno měření na obou kabelech – BT\_dwug a 24 AWG.

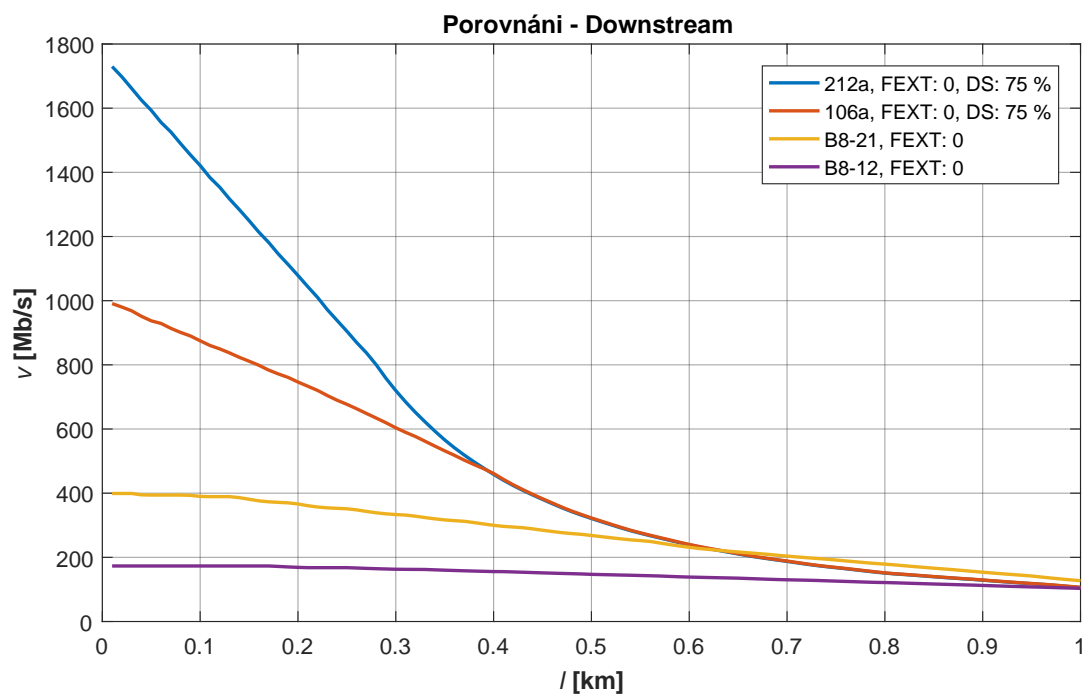
Na obr. 4.27 a 4.28 jdou zase vidět rozdíly mezi kabely BT\_dwug a 24 AWG. Přenosové rychlosti pro DS jsou sice nižší, než v předchozích simulacích, ale to se právě projeví na rychlosti pro US.

Při použití kabelu BT\_dwug rychlosti profilů 106b a 212a klesají pod profil 35b už na zhruba 250 m. S výběrem vedení s nižším vložným útlumem je rychlost profilů 106b a 212a vyšší ještě na 500 m.

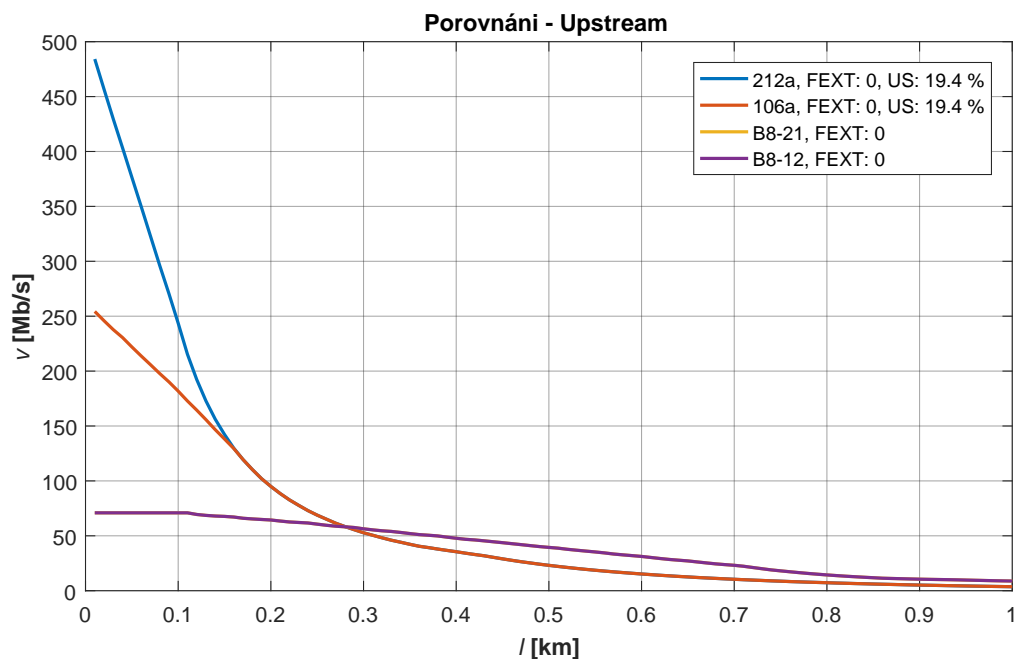




Obr. 4.27: Porovnání obou technologií pro vedení BT\_dwug pro DS

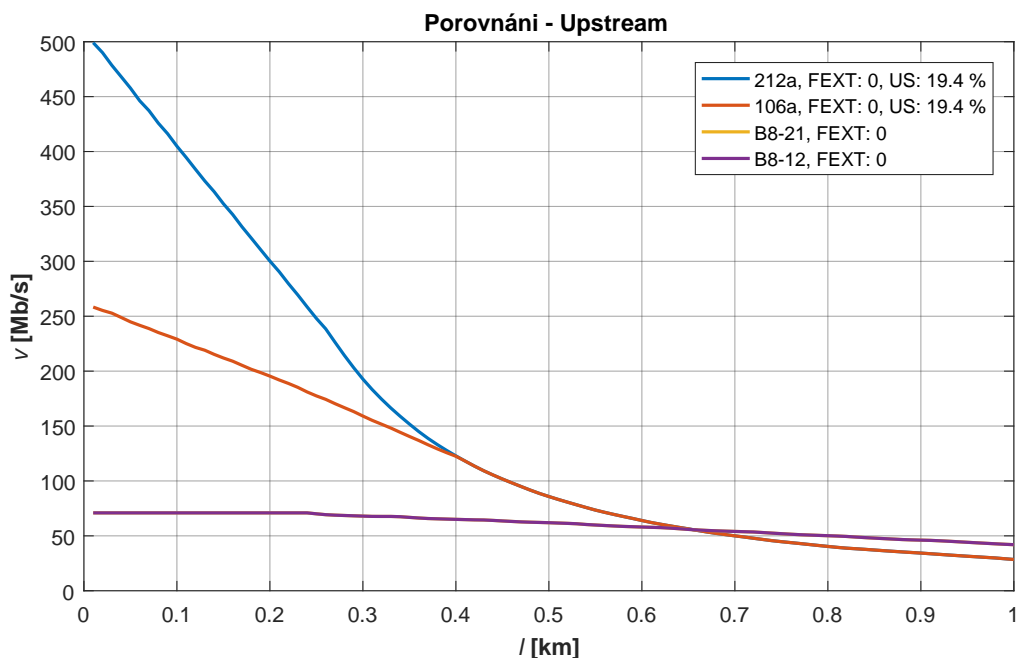


Obr. 4.28: Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro DS



Obr. 4.29: Porovnání obou technologií pro vedení BT\_dwug pro US

Na obr. 4.29 a 4.30 je znázorněna přenosový rychlost pro upstream a je vidět, že tyto hodnoty jsou výrazně vyšší. Dokonce i na 500 m jsou vyšší, než profily VDSL2.



Obr. 4.30: Porovnání obou technologií pro vedení 24 AWG pro US

## 4.4 Zhodnocení výsledků

Z výsledných grafů lze vidět, že na krátké vzdálenosti technologie G.fast dosahuje specifikované obousměrné rychlosti 1 Gbit/s (nebo 2 Gbit/s), ovšem s rostoucí délkou vedení rychlost prudce klesá. Na velmi krátké vzdálenosti jsou přenosové rychlosti profilů G.fast několikanásobně vyšší. Tyto krátké vzdálenosti se liší hlavně v závislosti na vybraném typu vedení, technologie G.fast je více ovlivněna kvalitou vedení (nizkým vložným útlumem) než VDSL2 profily. Profily G.fast jsou více náchylné na útlum přenášeného signálu než profily VDSL2, protože profily G.fast mají nižší vysílací výkon.

Podle zvoleného vedení a ostatních podmínek může G.fast dosahovat vyšších přenosových rychlostí než VDSL2 i na 500 m. Na větší vzdálenosti vykazuje profil VDSL2 35b lepší výsledky, než profily G.fast.

Alokace bitů na nosné frekvence klesá s délkou a frekvencí, protože vložný útlum vedení roste s délkou a frekvencí a snižuje se SNR sub-kanálů. Profily G.fast s vysokou frekvencí a nižšími hodnotami spektrální výkonové hustoty rychle ztrácí na efektivitě se zvětšující se délkou vedení.

VDSL2 profil 35b dosahuje vyšších rychlostí než 17a do vzdálenosti, která se liší podle použitého vedení.

Výhodou VDSL2 technologie je vyšší odolnost vůči rušivým elementům jako je útlum vedení a intenzita bílého šumu. Díky tomu si VDSL2 profily obstojně udržují rychlost s délkou vedení. Implementace profilu 35b je kompatibilní s rozšířeným profilem 17a.

Nahrazení VDSL2 technologie přípojkou G.fast je většinou efektivní na vzdálenosti alespoň do 200 – 250 m od distribučního bodu. Tato vzdálenost lze zvýšit např. kvalitním vedením. Koncovému uživateli lze pak poskytnout výrazně rychlejší připojení. Další výhodou přípojky G.fast oproti VDSL2 je, že disponuje možností volby poměru mezi DS a US přenosy změnou parametrů TDD rámců. VDSL2 profily mají tyto poměr neměnné, jsou specifikované kmitočtovými pásmy pro DS a US.

## 5 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byly do hloubky popsány modulační techniky DSL technologií. Profily technologií VDSL2 a G.fast byly podrobně zpracovány.

V prostředí Matlab byl vytvořen program pro analýzu profilů obou technologií. Program je plně funkční a vykresluje charakteristiky přenosové rychlosti, vložného útlumu vedení, PSD masek profilů, PSD rušení FEXT profilů a bitové alokace profilů.

Program obsahuje všechny dostupné profily technologií VDSL2 a G.fast k datu vyhotovení této práce. Uživatel si může v programu zvolit jakékoli profily v nabídce a porovnat charakteristiky mezi sebou. Program umožňuje volbu typu a délky vedení, směr přenosu signálu a umožňuje přidat rušení (přeslechy FEXT).

Z analýzy profilů pomocí toho programu vyplývá, že technologie G.fast může nahradit technologie VDSL2 na velmi krátké vzdálenosti. Při instalaci přípojky G.fast by se měl obzvlášť klást důraz na použité vedení a rušivé elementy vstupující do přenášeného signálu, protože technologie G.fast je na ně velice citlivá.

# LITERATURA

- [1] BINGHAM, John A. C.. *ADSL, VDSL, and multicarrier modulation*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. ISBN 0-471-29099-8.
- [2] BRINK, Rob F. M. van den. *ETSI-TM6(97)02: Cable reference models for simulating metallic access networks*. [PDF]. Sweden: ETSI, 26. 6. 1998, 1. 7. 1998 [cit. 3. 12. 2017]. Revize 3.
- [3] GOLDEN, P.; DEDIEU, H.; JACOBSEN, K.. *Fundamentals of DSL technology*. New York: Auerbach Publications, 2006. ISBN 0-8493-1913-7.
- [4] Huawei Solutions. *G.fast: Moving Copper Access into the Gigabit Era* [online]. Huawei Technologies Co., Ltd., 1998, 2014 [cit. 3. 12. 2017]. Dostupné z URL: <[http://www.huawei.com/ilink/en/solutions/broader-smarter/morematerial-b/HW\\_278065](http://www.huawei.com/ilink/en/solutions/broader-smarter/morematerial-b/HW_278065)>
- [5] International Telecommunication Union (ITU-T). *Recommendation ITU-T G.993.2: Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)*. ITU-T, January 2015.
- [6] International Telecommunication Union (ITU-T). *Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers*. ITU-T, January 2015.
- [7] International Telecommunication Union (ITU-T). *Recommendation ITU-T G.9700: Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Power spectral density specification*. ITU-T, April 2014.
- [8] International Telecommunication Union (ITU-T). *Recommendation ITU-T G.9701: Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification*. ITU-T, December 2014, April 2017. Amendment 3.
- [9] List of VDSL and VDSL2 deployments. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2006, 2017 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z URL: <[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_VDSL\\_and\\_VDSL2\\_deployments](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_VDSL_and_VDSL2_deployments)>.
- [10] OKSMAN, V.; STROBEL, R.; WANG, X.; WEI, D.; VERBIN, R.; GOODSON, R.; SORBARA, M.. *The ITU-T's new G.fast standard brings DSL into the gigabit era*. IEEE, 2016. ISSN 0163-6804.
- [11] ŠILHAVÝ P.. *Datová komunikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. ISBN 978-80-214-4455-3.

- [12] ŠILHAVÝ P.. *Přenos dat a kódování pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*.  
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních  
technologií, 2013. ISBN 978-80-214-4827-8.

## SEZNAM ZKRATEK

ADSL	asymetrická DSL – Asymmetric DSL
CE	cyklické proudloužení – Cyclic Extension
CP	cyklická předpona – Cyclic Prefix
CS	cyklická přípona – Cyclic Suffix
DMT	diskrétní vícetónová modulace – Discrete Multitone
DS	směr k uživateli – Downstream
DSL	digitální účastnická přípojka – Digital Subscriber Line
DSLAM	DSL Access Multiplexer
FDD	kmitočtové oddělení – Frequency Division Duplex
FEXT	přeslech na vzdáleném konci – Far End CrossTalk
FEQ	frekvenční vyrovnávač – Frequency Domain Equalizer
FFT	rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier Transform
FTU	rychlá vysílací jednotka – Fast Transceiver Unit
FTU-O	FTU na straně optické jednotky – FTU at the Optical network unit
FTU-R	FTU na straně klienta – FTU at the Remote site
IFFT	inverzní FFT – Inverse FFT
IR	impulsní odezva – Impulse Response
ISI	mezi-symbolový přeslech – Inter-Symbol Interference
ITU	mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union
ITU-T	ITU Sektor telekomunikační standardizace – ITU Telecommunication Standardization Sector
MCM	modulace s více nosnými – Multi Carrier Modulation
NEXT	přeslech na blízkém konci – Near End CrossTalk
PAR	odstup průměrného signálu a šumu – Peak-to-Average Ratio
PSD	spektrální výkonová hustota – Power Spectral Density
POTS	tradiční telefonní systém – Plain Ordinary Telephone Service
QAM	kvadrurní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation
RS-FEC	Reed Solomon Forward Error Correction
SNR	odstup signál-šum – Signal-to-Noise Ratio
STDD	synchronizované TDD – Synchronous TDD
TCM	Trellis kódová modulace – Trellis Coded Modulation
TDD	časové oddělení – Time Division Duplex
TEQ	časový vyrovnávač – Time Domain Equalizer
TS	časový interval, symbol – Timeslot
US	směr od uživatele – Upstream
VTU	VDSL2 vysílací jednotka – VDSL2 Transceiver Unit

VTU-O	VTU na straně optické jednotky – VTU at the Optical network unit
VTU-R	VTU na straně klienta – VTU at the Remote site
VDMT	vektorová DMT – Vectored DMT
VDSL	vysokorychlostní DSL – Very High Speed DSL



# SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD

69

## A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Na přiloženém DVD lze nalézt elektronickou verzi diplomové práce a výsledný program práce, který se spustí souborem GUI.m.

DVD také obsahuje textový soubor Verze\_Matlabu.txt, kde jsou informace o verzi Matlabu a použitých rozšíření Matlabu. Rovněž obsahuje odkaz pro stáhnutí funkce findjobj.m, která je kriticky důležitá pro správnou funkčnost programu.