

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

Stanislav Klymoshenko

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

Nové způsoby komunikace po metalických vedeních

květen 2019

**Bakalant: Stanislav Klymoshenko
Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.**

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne:

.....
podpis bakalanta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klymoshenko** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **453140**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Síťové a informační technologie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nové způsoby komunikace po metalických vedeních

Název bakalářské práce anglicky:

New Ways of Communicating over Metallic Lines

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte nové varianty komunikačních systémů G.fast a G.mgfast (4. generace DSL systémů). Provéřte případnou možnost vývoje v oblasti DSL systémů 5G (Terabit DSL). V praktické části změřte parametry vybraných vzorků vedení (přenosová funkce, charakteristická impedance, přeslechy NEXT a FEXT v závislosti na kmitočtu) v pásmu kmitočtů očekávaných u G.mgfast (cca do 430 MHz, případně 860 MHz). Zhodnoťte naměřené přenosové parametry, porovnejte s předpoklady (modely daných parametrů) a odhadněte praktickou využitelnost.

Seznam doporučené literatury:

[1] Vodrážka, J.: Přenosové systémy v přístupové síti. Skripta Nakladatelství ČVUT. Praha 2006. ISBN 80-01-03386-4.
[2] Vodrážka, J.: Přístupové přenosové systémy. Cvičení. Měření na přípojkách xDSL. Skripta Nakladatelství ČVUT. Praha 2003. ISBN 80-01-02786-4.
[3] Doporučení ITU-T G.9701: Fast access to subscriber terminals (G.fast). 2014. Dostupné na <http://www.itu.int/rec/T-REC/en> [on-line]

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá modelováním a analýzou nových způsobů komunikace metalickým vedením. Pro modelování a vyhodnocování dat byly použity samostatně definované funkce v interaktivním programovém prostředí a skriptovacím programovacím jazyku Matlab verze 2018b.

Klíčová slova: xDSL, G.Fast, Terrabit DSL, metalické vedení, Cat 5, VDMT, Matlab.

Summary:

This final project deals with modulation and analyzing of new forms of communication by metallic fibre. For modulation and evaluating data with a self defined functions a multi-paradigm numerical computing environment and proprietary programming language Matlab of 2018b version had been used.

Index Terms: xDSL, G.Fast, Terrabit DSL, metallic fibre, Cat 5, VDMT, Matlab.

Obsah

1. Úvod	1
2. Zpracování	2
2.1 Přípojka <i>G.Fast</i>	2
2.2 Řešení přenosu u gigabitových přípojek.....	3
2.2.1 Modulace <i>VDMT</i>	3
2.2.2 Metoda duplexního přenosu <i>TDD</i>	5
2.2.3 Navýšení kmitočtového pásma.....	6
2.2.4 Zvýšení spolehlivosti.....	7
2.3 Přípojka <i>MG.Fast</i>	10
2.3.1 Další vyvoj <i>G.Fast</i>	10
2.4 Terabit <i>DSL</i>	11
2.5 Měření symetrického páru při vysokých kmitočtech.....	12
2.5.1 Měření útlumu vedení	13
2.5.2 Měření útlumu přeslechu na blízkém konci <i>NEXT</i>	14
2.5.3 Měření útlumu přeslechu na vzdáleném konci <i>FEXT</i>	15
2.5.4 Měření vstupní impedance.....	16
2.6 Modelování vedení.....	17
2.6.1 Zpracování naměřených hodnot	17
2.6.2 Vytváření univerzálního modelu vedení.....	19
2.6.3 Výpočet dosažitelné přenosové kapacity	22
3. Závěr	27
4. Literatura	29
4.1 Seznam použité literatury	29
4.2 Seznam obrázků	32
4.3 Seznam tabulek	32
4.4 Seznam zkratk	33

1. Úvod

Velký růst datových služeb a používání sítě Internet poslední dobou zvedá nároky na přenosové rychlosti účastnických přípojek. Nové instalace používají optická vlákna, operátoři však stále hledají možnost používání existujícího metalického vedení a s tím související snížené náklady oproti reinstalaci optických kabelů. Vyřešením této otázky se staly přípojky xDSL [11].

Přípojky xDSL, jak se zdálo, dosáhly poslední etapy svého vývoje variantou VDSL2/2+. Další rozvoj pevných přístupových sítí je záležitostí optických vláken. Nicméně připravované doporučení ITU-T s pracovním označením G.Fast dává metalickým vedením další šanci.

Zatímco v některých částech světa se již delší dobu instalují plně optické přípojky FTTH (Fiber to the Home) na principu pasivní optické sítě (PON) v České republice se rozvíjejí jen velice pomalu. I v řadě dalších zemí se stále počítá s využitím metalických vedení až na hranice teoretického maxima. Za systém, který se na toto maximum dostane, byla ještě donedávna považována přípojka VDSL2.

Formální specifikace G.Fast byly zveřejněny jako ITU-T G.9700 a G.9701 se schválením G.9700 uděleným v dubnu 2014 a schválením G.9701 uděleným 5. prosince 2014. Vývoj byl koordinován s projektem FTTdp (Fiber to the Distribution Point - vlákno do distribučního místa). Název G.Fast je zkratka pro fast access to subscriber terminals (rychlý přístup k účastnickým terminálům), písmeno G představuje řadu doporučení ITU-T G. Omezený demonstrační hardware byl prokázán v polovině roku 2013. První čipové sady byly představeny v říjnu 2014, s komerčním hardwarem zavedeným v roce 2015 a první instalace byla zahájena v roce 2016. [11]

Obecně můžeme říci že přípojka G.Fast je dalším vylepšením přípojek série xDSL, které umožňují používání standardních měděných telefonních metalických kabelů pro telefonický hovor a zároveň připojování k internetu s teoretickou rychlostí downstream 1Gbit/s.

Dalším pokračováním bude specifikace Multi-G.fast, na jejíž specifikaci se pracuje. Zejména na ni je zaměřena tato práce s cílem odhadnout propustnosti na typických příkladech přenosového média.

2. Zpracování

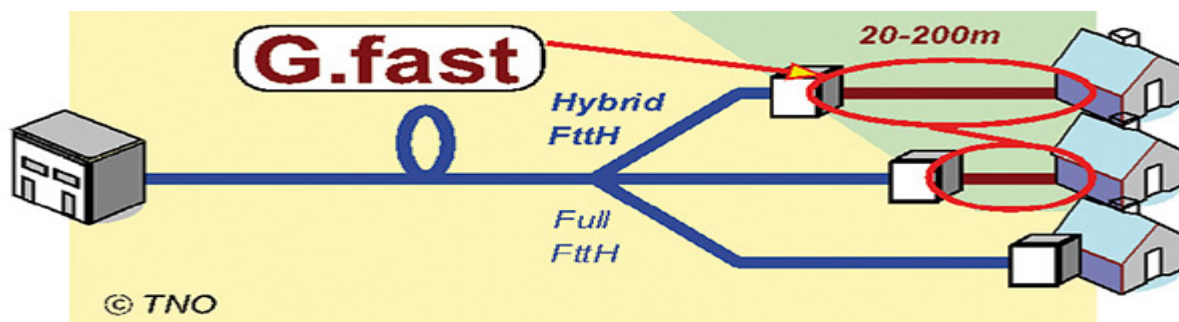
2.1 Přípojka G.Fast

Doporučení ITU-T s pracovním označením G.Fast je novým dechem pro metalická vedení. Jedním z cílů je modernizace už existujícího metalického vedení a tím samym snížení nákladů na instalace nové infrastruktury přístupových sítí. Modernizací myslíme zvýšení downstream a upstream rychlostí u stávajících přípojek typu xDSL na krátkých vzdálenostech cca 100m až 500 Mbit/s, resp. 150 Mbit/s na 250m. V dlouhodobé perspektivě se uvažuje o 1 Gbit/s na 100m. Použitím technologie G.Fast je umožňováno zvýšení přenosových rychlostí v místech kde se z technických nebo jiných důvodu nejde instalovat optická vlákna. [11]

Jako topologie přístupové sítě se používá FTTdp. Nová technologie tzv. inverzní napájení (Reverse power feeding), která se používá u FTTdp, snižuje náklady na instalace redukováním potřeby napájení DPU jednotky a spolu s tím lepší použití energie kvůli nižším ztrátám v kabelu oproti PoE. [12]

Modernizace přenosového vedení obsahuje nejen zvýšení přenosových rychlostí ale i zlepšení provozních parametrů, vedoucích k zajištění spolehlivého provozu.

Jedním ale ne jediným takovým zlepšením je používání inverzního multiplexování.



Obr. 1 Kde se používá G.FAST

	G.Fast	VDSL2
Modulation	DMT (up to 14 bits/Hz)	DMT (up to 15 bits/Hz)
Bandwidth [MHz]	106, 212, 424	8, 12, 17, 30, 35
Max. Transmit Power [dBm]	2 (coax) and 4 - 8 (UTP)	11.5 - 20.5 (UTP)
Duplexing	TDD	FDD
Distance	< 250m 400m (UTP)	< 1000m (2500m) UTP
Bit Rate (up+down) [Mbit/s]	< 1000 (106), < 2000 (212)	< 400(35), < 150(17)
One way latency	< 1ms	< 10 ms
Vectoring	Yes	Optional
Up/Down Rate Ratio	Provisioned, dynamic	Fixed by bandplan
Retransmission	Yes	Optional
Coding	Interleaved RS/Trellis	Interleaved RS/Trellis
Full init time (single line)	20 seconds (typical)	120 seconds (typical)

Tab.1 Porovnání základních vlastností přípojek VDSL2 a G.Fast

2.2 Řešení přenosu u gigabitových přípojek

2.2.1 Modulace VDMT

Primárním cílem vývoje nové generace přípojky xDSL bylo zvýšení přenosové rychlosti, neboli informační propustnosti. Celková informační propustnost digitálních kanálů zaleží na několika parametrech metalického vedení, jak fyzických, tak i elektromagnetických, a taky na omezujících faktorech. Hlavní omezující faktor je přeslechové rušení, způsobené parazitními kapacitními a induktivními vazbami mezi páry v kabelu. [16]

Přípojky xDSL nižších generací využívají modulaci, která umožňuje maximálně efektivně reagovat na vliv úzkopásmového rušení, DMT. Pro vyřešení, neboli zmenšení vlivu přeslechu na vzdáleném konci FEXT se u přípojek G.Fast používá VDMT (Vektorová DMT).

Přenesený signál z prvního páru do druhého páru působí v druhém páru jako negativní rušení a snižuje SNR a tím i výslednou přenosovou rychlost.

VDMT využívá modulační princip, který pomocí propracovanosti matematického aparátu popisujícího parametry symetrických párů a vzájemné přeslechové vazby mezi páry umožňuje eliminování přeslechových vlivů.

Pro správnou funkci VDMT je nutné znát parametry přenosové cesty včetně přeslechů od okolních přípojek, které jsou umístěny ve stejném svazku metalického kabelu. Parametry přenosové cesty jsou zjišťovány během procesu navazování spojení mezi účastnickým modemem a přístupovým multiplexorem DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer). Ke kompenzaci přeslechů je nutné mít k dispozici signály vysílané všemi přípojkami. Ty jsou přítomny v zařízení DSLAM, ale ne v účastnických modemech. Takže kompenzaci je nutné provádět pro oba směry přenosu v DSLAM, resp. pro směr upstream kompenzaci přeslechů na přijímací straně a pro směr downstream předkompenzaci signálu na straně vysílače.

V downstream směru VDMT modulace využívá toho, že všechny přípojky xDSL mají jeden společný systém DSLAM, který uchovává informace o DMT symbolech, vysílaných do metalického vedení. To znamená, že máme jediný vektor hodnot DMT symbolů a kvůli tomu že modulační systém VDMT využívá propracovaný matematický aparát, ze kterého víme parametry jednotlivých párů a přeslechové rušení mezi nimi, můžeme upravovat vstupní vektor DMT symbolů z ohledem na přenosové medium, kterým bude přenášen signál. Ovšem je nutné provádět synchronizaci vysílání všech DMT symbolů pro definované vzájemné působení prostřednictvím přeslechových vazeb. Tento problém však můžeme vyřešit tak, že DSLAM bude centrálním prvkem. Ve směru upstream je to trochu složitější, kvůli různé délce účastnických přípojek. Nicméně existují metody umožňující synchronizaci ve směru od uživatele k přístupovému bodu jako například Zipper FDD, která využívá cyklickou příponu (CS) vkládanou za DMT symbol. Délka CS musí být rovna nebo větší, než je maximální rozdíl zpoždění v šíření signálu kanály. Metoda Zipper FDD eliminuje i zbytkový přeslech NEXT. Nevýhodou však je snížení přenosové rychlosti.

Potlačení přeslechových vlivů se nazývá koordinace vysílání a příjmu. V našem případě VDMT se jedná o koordinaci vysílání jednotlivých přípojek ve svazku metalického kabelu. Čím více přípojek je koordinováno, tím větší přenosovou rychlost mohou dosáhnout jednotlivé přípojky sledovaného kabelu.

Taktéž je ale nutné zmínit se o nevýhodách této metody modulace. Největší problém nastává, když roste požadavek na přenosovou rychlost a s tím i množství přípojek v kabelu.

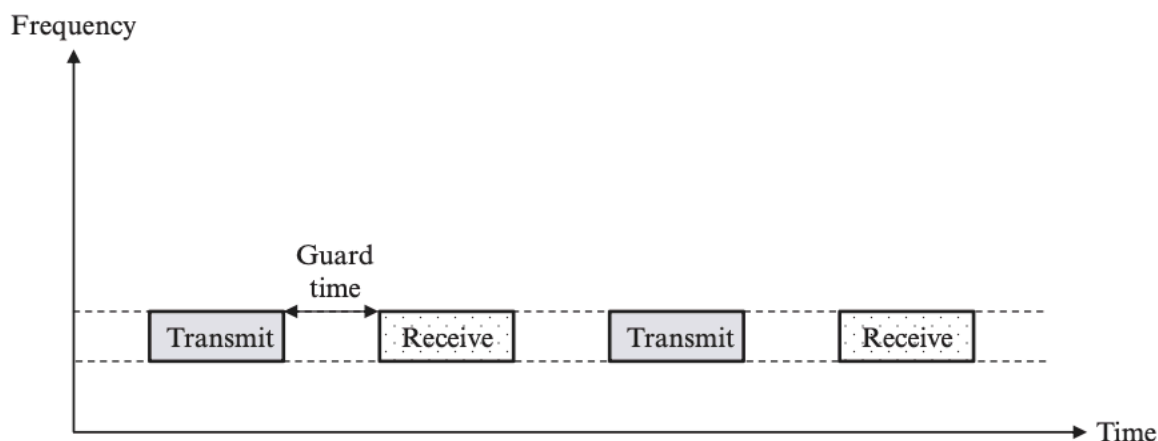
Pro metalické kabely s mnoha set symetrickými páry bude provádění plné koordinace provozu velmi náročné na výpočty související s úpravou DMT symbolů a na výpočty související se získáváním parametrů přenosového prostředí. Lze spočítat, že například pouze pro 50 přípojek

VDSL2 s počtem subkanálů 4096 a modulační rychlostí 4 kBd se bude muset každou sekundu provést v příslušném DSLAM jen při úpravách vysílaných DMT symbolů $40,960 \cdot 10^9$ matematických operací. [1] [8]

2.2.2 Metoda duplexního přenosu TDD

Jak už bylo zmíněno, hlavním zdrojem rušení při přenosu metalickým vedením je přeslechové rušení. Složka FEXT se u přípojek xDSL potlačí pomocí DMT resp. VDMT modulace. Co se týká přeslechu na blízkém konci NEXT u přípojek nižších generací je vyřešena pomocí FDD, frekvenčním oddělováním směru přenosu (downstream a upstream). U přípojky G.Fast se FDD nahrazuje TDD (Time Divisioning Duplex), časové oddělení směru. Považuje se za více efektivní, než použití frekvenčního dělení. V podstatě jde o aplikaci TDM, která emuluje plně duplexní spojení na poloduplexním spoji. Jednou z hlavních výhod TDD je flexibilita při změně poměru upstream a downstream. Při zvedání počtů dat přenášených v downstream směru se dynamicky alokuje více kapacity pro daný směr. Totéž platí i pro upstream. Povinné dělicí poměry jsou 90/10 a 50/50, nepovinné od 50/50 do 10/90. Jde o způsob, jakým je v bezdrátových sítích řešena komunikace v obou směrech. Technika tzv. časového duplexu předpokládá, že pro komunikaci v obou směrech se používají stejné frekvence, ale střídavě v čase. Používají se timesloty, které jdou za sebou. Každý timeslot je vždy použit pro přenos jedním směrem, ale další timeslot již může být využit pro přenos opačným směrem. [13]

Důležitý je i ochranný interval, tzv. "guard time". Je to čas mezi odesláním a přijetím timeslotu. Přibližně odpovídá času kdy daný timeslot projde geografickou cestu mezi vysílačem a přijímačem a zpátky. Musí být dostatečně velký na to, aby nedošlo ke kolizi směrů. Nicméně to znamená, že cesta mezi přijímačem a vysílačem musí být relativně krátká, aby se datový tok pro uživatele tvářil jako plynulý a kontinuální. Tím je definováno pásmo použití časového duplexu. [14]



Obr. 2 Základní představa TDD

Zajímavé je, že FDD a TDD nejsou zcela rovny, pokud jde o jejich vhodnost pro potřeby datových služeb. V případě hlasových služeb ještě nikoli, protože zde je "spotřeba" přenosových kapacit v obou směrech v zásadě stejná. Ale v případě datových přenosů bývají požadavky asymetrické, konkrétně větší ve směru downlinku (od sítě k uživateli), a menší v opačném směru. Technika frekvenčního duplexu, v rámci které by pro oba směry byl vyhrazen stejný počet frekvenčních kanálů, by pak nebyla nejvhodnější. Naopak technika časového duplexu umožňuje rozkládat celkovou přenosovou kapacitu mezi oba směry podle momentálních potřeb. [6]

2.2.3 Navýšení kmitočtového pásma

Se zvětšením nároků na přenosovou rychlost nezbytně souvisí rozšíření kmitočtového pásma. Stejně tak probíhalo rozšíření při rozvoji nižších generací přípojek xDSL, kde se pásmo zvýšilo z 2,2 MHz pro ADSL2+ na 30MHz pro VDSL2+. Frekvenční pásmo pro G.Fast končí na 106 MHz pro první profil, 212 MHz pro 2. profil a 424 MHz pro třetí. Třináásobné zvýšení kmitočtového pásma oproti VDSL2+ dává pětinasobné zvýšení rychlosti ve směru downstream z 200 Mbit/s až 1Gbit/s.

Spektrální hustota výkonu (PSD) je stanovena standardem ITU-T G.9700. Jedná se o míru signálového výkonu oproti frekvence (vyjádřenou v dBm / Hz). Uživatelé mohou odvodit celkový přenosový výkon používaný v pásmu spektra prováděním integrálního výpočtu na PSD každého frekvenčního bodu v pásmu spektra. Ovládání PSD na vedení chrání linku proti vnějšímu šumu a snižuje radiové interference. [3]

PSD maska je sestavena z maximální PSD každého frekvenčního bodu v pásmu spektra. Systém určuje hodnoty PSD pro řadu frekvenčních bodů (tzv. breakpoints) v pásmu spektra a načrtává

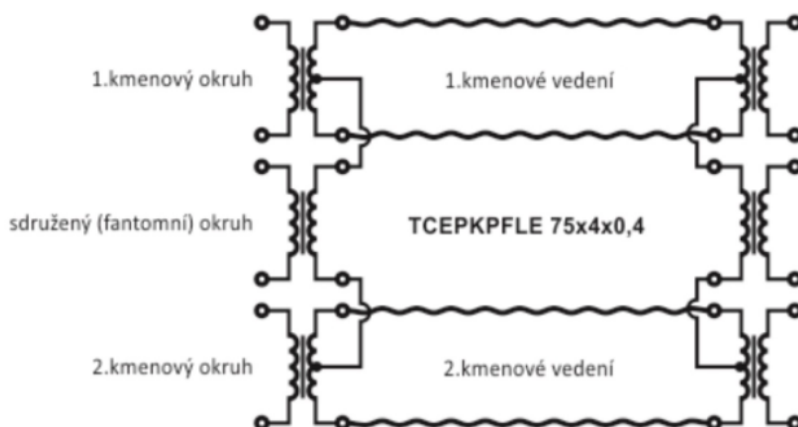
PSD masku pásma interpolačním algoritmem. V porovnání z VDSL má G.Fast jednodušší PSD masku, vzhledem k tomu že používá TDD oproti FDD u VDSL.

2.2.4 Zvýšení spolehlivosti

Další neméně důležitá oblast, kterou je potřeba modernizovat je oblast zvýšení spolehlivosti. Vyšší nároky na přenosovou rychlost automaticky zvyšují nároky na spolehlivost datových spojů, v našem případě metalického vedení. Existuje několik parametru a metod kterými můžeme navýšit naši spolehlivost, popíšme je dále. [2]

2.2.4.1 Využití fantomových okruhů

První z metod pomocí kterých můžeme zvyšovat spolehlivost jsou fantomové okruhy. Fantomové okruhy se v minulosti používaly u dálkových telefonních vedení k zvýšení přenosové kapacity. Principem je navázání signálu do středů transformátorů dvou vedení a tím vytvoření dalšího okruhu. Využití tohoto principu je omezeno směrem k narůstajícímu kmitočtu, nemožností precizního vyvážení symetrizačních transformátorů a dále narůstajícími přeslechy mezi základními okruhy a fantomovým okruhem. Uvedené jevy lze eliminovat potlačováním přeslechů pomocí modulace VDMT a tím dosáhnout u VDSL2 např. sumární rychlosti až téměř 500 Mbit/s v každém ze směrů na délce kabelu 400 m. Mimo metody fantomových okruhů lze realizovat ještě tzv. superfantom pomocí 4 vedení. Tak lze získat celkem 7 okruhů: 4 základní, 2 fantomové a mezi nimi jeden superfantom. Vedle fantomových okruhů se činily pokusy s přenosem v tzv. souhlasném módu, kdy jsou jednotlivé vodiče párů brány jako samostatné přenosové cesty. Vznikající silné přeslechy je možné kompenzovat také použitím VDMT modulace. Tímto řešením se ovšem připravíme o výhodu symetrických vedení, tj. značné odolnosti proti okolnímu rušení. Z důvodu značného vzájemného rušení mezi vedeními a okolím se proto tento způsob prakticky neujal. [3]



Princip fantomového okruhu

Obr.3 Princip fantomového okruhu.

Modelování pro délku kabelu 400 m	Frekvenční plán pro VDSL2 do 17 MHz		Frekvenční plán pro VDSL2 do 30 MHz	
	downstream [Mbit/s]	upstream [Mbit/s]	downstream [Mbit/s]	upstream [Mbit/s]
2 vedení plus fantom	150	67	176	80
2 vedení	166	92	226	118
2 vedení plus fantom s potlačováním přeslechu	382	243	493	449

Tab.2 Modelování přenosové rychlosti pro přípojku VDSL2 s délkou 400m

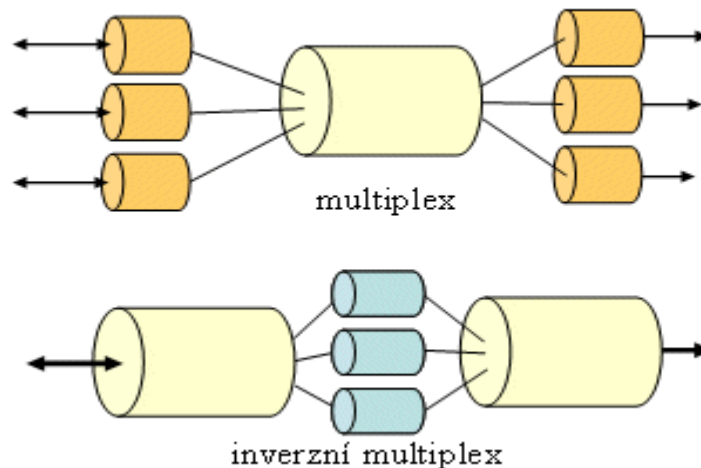
2.2.4.2 Inverzní multiplexing

Techniku slučování kanálů (channel bundlingu) si můžeme představit jako řešení problému s neexistencí dostatečně velkého (širokého) přenosového kanálu. Místo něj se tedy použije patřičný počet menších (užších) kanálů, mezi které se celkový datový tok rozloží.

V praxi ale často nastává i přesně opačný problém: máme jeden větší (širší) přenosový kanál, a potřebujeme jej rozdělit na několik dílčích částí, které by se chovaly jako samostatné a na sobě nezávislé kanály. Tedy tak, aby po nich bylo možné přenášet několik zcela samostatných a na sobě nezávislých datových toků.

Řešení právě popsaného úkolu (rozdělení jednoho přenosového kanálu, případně okruhu, na více částí) se obecně označuje jako "multiplexování", resp. multiplex. Jeho představu obecně naznačuje následující obrázek, který jej dává do protikladu s již popsaným slučováním kanálů (channel bundlingem). Z tohoto obrázku je dostatečně zřejmé, proč se technice slučování kanálů někdy říká také inverzní multiplex.

Je třeba si uvědomit, že použití inverzního multiplexu je možné jen v případě mnohavodičového vedení jako UTP atd. To znamená že v případě G.Fast by měla být použita mnohoúrovňová struktura (na trase od přenosové stanice k účastníku alespoň na konci by měl být použit vícevodičový kabel). [6]



Obr.4 Představa multiplexu a inverzního multiplexu

2.2.4.3 Inverzní napájení

U klasických analogových a základních přípojek ISDN se provádí napájení koncového zařízení z ústředny (typicky napětí zdroje 60 V a napájecí proud v desítkách mA). U přípojek s extrémní rychlostí podle specifikace s pracovním označením G.Fast se počítá s opačným tokem napájení. Z účastnického modemu bude napájen uzel (mini DSLAM) v tzv. distribučním bodě. Důvodem přístupu k tomuto řešení jsou již řadu let řešené problémy s napájením zařízení umístěných v přístupové síti mezi ústřednou telekomunikačního operátora a účastníkem.

Zařízení v distribučním bodě je připojeno k síti operátora optickým vláknem tak, že není možné vzdálené napájení po signálovém vedení.

Vyřešit místní napájení z rozvodné sítě je většinou problematické. Logickým vyřešením je tedy napájení z účastnické strany, kde je však nutná sumarizace napájecího výkonu od několika účastníků najednou.

2.3 Přípojka MG.Fast

2.3.1 Další vyvoj G.Fast

MG.Fast je nové navazující doporučení na G.Fast a je zaměřeno na maximální souhrnnou čistou datovou rychlost 10 Gbit/s a 5 Gbit/s. Bude zprovozněna na takových typech přenosového medií jako: nekvalitní telefonní pár, kvalitní datové vedení (např. Cat 5/6/7), čtyřkované vedení s více prvky (multi-pair / quad kabely) a koaxiální kabel (např. RG-6, RG-11, RG-59).

Provozovatelé metalických sítí tradičně doplňují strategii FTTH s hybridním zavedením vlákna a mědi, ve kterém se vlákno postupně protahuje bliž ke spotřebiteli a technologie digitální účastnické linky (DSL) se používá pro zbývající měď síť.

Bell Labs navrhl systémové koncepce technologie XG-FAST, 5. generaci širokopásmové technologie (5GBB), schopné přenášet datovou rychlost 10 Gbit / s na krátké vzdálenosti. U hardwarově důvěryhodné platformy je prokázáno, že multigigabitové rychlosti jsou dosažitelné pro typické délky až 130 m, přičemž čisté přenosové rychlosti přesahují 10 Gbit / s na nejkratších přípojkách.

Technologie XG-FAST umožní uskutečnit nasazení typu FTTF, což teď znemožňuje mnoho překážek, které doprovázejí tradiční zavedení FTTH. Jednoduché účastnické zařízení XG-FAST by bylo nedílnou součástí rozmístění FTTH a jako takový pomůže urychlit celosvětové zavedení služeb FTTH. Navíc síť FTTF XG-FAST je schopna zajistit dálkově řízenou infrastrukturu a nákladově efektivní multigigabitový backhaul pro budoucí bezdrátové sítě 5G. Na začátku bylo dohodnuto, že název doporučení je "Více gigabitový rychlostní přístup k účastnickým terminálům".

Forum "Rada Gfast" doporučila název technologie být "Gfast Plus". Několik členů uvedlo, že toto jméno nese historii ADSL2+, která rozšířila šířku pásma pouze ve srovnání s ADSL2, a proto nepředstavuje dostatečně velký krok v technologii. [4]

Nakonec bylo dohodnuto pojmenovat technologii podle zkratky názvu doporučení, a to "MGfast".

Tak že základní vlastnosti MG.Fast jsou:

- Nový projekt, který má přidat funkcionalitu mimo G.Fast Profily nad 212 MHz (např. 848 MHz)
- Úplné oboustranné ovládání (režim odrušení ozvěnou)

- Cíle:
 - Uplatnění přenosových rychlostí 5 až 10 Gbit/s na jednom TP/ koaxiálním kabelu.
 - Provoz s nízkou chybovostí na všech uvažovaných typech média.
- Pokročilé kódování (např. LDPC)
- Efektivní multigigabitový backhaul pro budoucí bezdrátové sítě 5G [2]

2.4 Terabit DSL

Jakou maximální reálnou rychlost může dosáhnout digitální účastnická linka (DSL)? Odpověď na tuto otázku dal Dr. John Cioffi když prezentoval “Terabit DSL” na konferenci G.Fast Summit v Paříži. Jako pro všechny DSL je to případ rychlosti proti vzdálenosti. Nový Terabit DSL je údajně schopen dosáhnout jednoho terabit přes 100 metrů, 100 gigabitů přes 300 metrů a 10 gigabitů nad 500 metrů. [5]

Podle Cioffiho by bylo možno posunout pomocí dříve nevyužitých waveguide-mode (vlnovodných režimů) současné využití metalické infrastruktury. Použití waveguide-mode, je podobné použití přenosu milimetrových vln v pokročilých bezdrátových a 5G, což umožňuje použití frekvencí nad 100 GHz. Cioffi ve své zprávě poukazuje na to, že počáteční návrhy naznačují, že latence spojení 50-100 μ s je snadno dosažitelná, což by umožnilo dosáhnout i těch nejpřísnějších specifikací latence 5G 1 ms nebo méně s těmito Terabit DSL. Také Cioffi zdůrazňuje, že dnešní nejrychlejší DSL (G.Fast) využívá pouze 200 MHz, zatímco bezdrátové zařízení využívá 25krát tolik spektra. Cioffi říká, že neočekává, že by někdo doma potřeboval terabit / s (Tbps) - tato technologie bude nejcennější pro datová centra používaná telefonními společnostmi i internetovými společnostmi, jako je Google a Microsoft. Rychlost 10-100 Gbps je však pro sítě dnes již důležitá a trvá na tom, že představuje velký trh. Stovky tisíc 5G malých buněk budou vyžadovat 5-20 gigabitů backhaul, stejně jako kabelové uzly DOCSIS 3.1. Většina článků 5G se připojí k radiči Cloud RAN, který může používat 100 gigabitů na podporu desítek buněk. Vlákno je a vždy bude nákladné nasadit. Existuje miliarda telefonních linek po celém světě, které nyní budou schopny poskytovat rychlosti podobné vláknům. Použití drátů místo vlákn pro backhaul by mohlo podstatně snížit náklady na sítě 5G. [5]

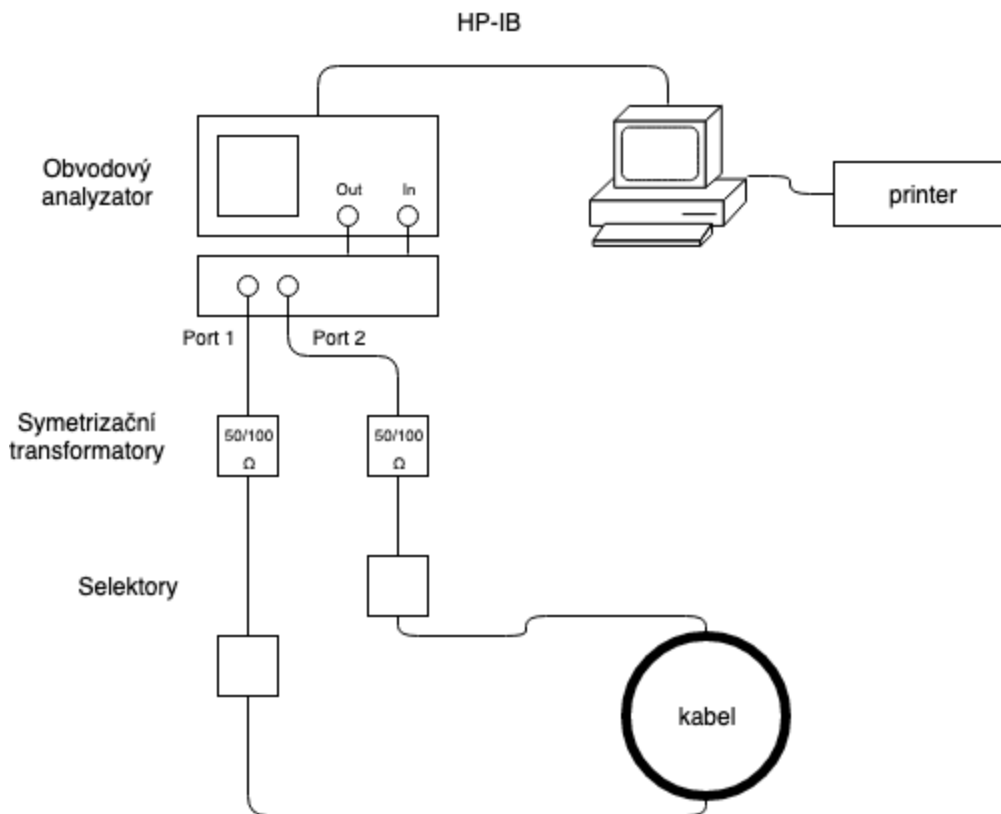
2.5 Měření symetrického páru při vysokých kmitočtech

Parametry vedení a metodika měření byly stanoveny podle specifikace evropských norem pro nasazování analogových a digitálních systémů sdělovacích kabelů přijímané v České republice. Měření přenosových parametrů vedené při vysokých kmitočtech není sám o sobě problém, existuje celá řada testerů pro strukturovanou kabeláž. Ovšem jejich přesnost a rozsah jsou omezené. Pro více objektivní laboratorní měření je třeba použít náročnějšího vybavení.

Pro laboratorní měření lze použít obvodové analyzátoři (Network Analyzer), které dokáží změřit přenosové parametry (např. S-parametry). Z nich lze získat charakteristiky útlumu vedení, přeslechu, odrazu, nesymetrie i charakteristickou impedanci a další. Problémem je vyřešení symetrizačního transformátoru pro široké pásmo kmitočtů a provedení bez odrazového připojení párů k měřicí aparatuře. Jádrem je obvodový analyzátor propojený přes komunikační rozhraní s osobním počítačem, který slouží k záznamu a zpracování výsledků. Koaxiální rozhraní 50Ω se přizpůsobuje přes symetrizační transformátor (Balun) charakteristické impedanci vedení, nejčastěji 100Ω (u stíněných kabelů se vyskytuje i 120Ω , v nižších kmitočtových oblastech do 1 MHz se používá 135Ω).

Dále následují selektory, pomocí nichž se připojují vybrané páry k měření a volí se režim měření útlumu, útlumu přeslechu na blízkém konci NEXT, útlumu přeslechu na vzdáleném konci FEXT či útlumu odrazu. Zároveň se pro potřeby kalibrace a měření charakteristické impedance dá provést rozpojení vodičů páru (naprázdno), spojení (nakrátko) či zakončení jmenovitou reálnou impedancí.

Pomocí obvodového analyzátoři změříme parametry úseku 100 m, nebo jiné vhodné délky symetrického vedení při vysokých kmitočtech. [9][10]



Obr.5 Blokové uspořádání měřicí aparatury pro měření kabelů

2.5.1 Měření útlumu vedení

Útlum je základním parametrem symetrického vedení a vyjadřuje schopnost přenosového média přenést signál představovaný elektrickým výkonem ze vstupu na výstup.

$$A = 10 \log \frac{P_1}{P_2} [dB] \quad (1)$$

kde P_1 výkon na vstupu vedení

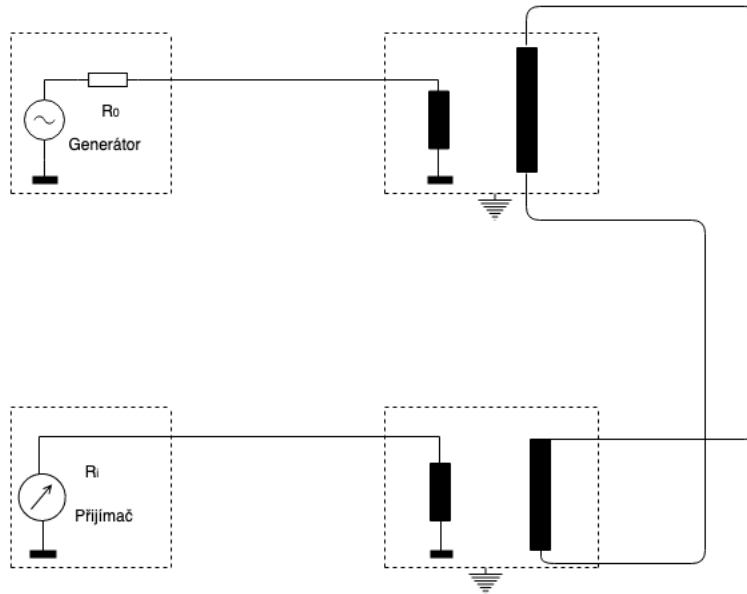
P_2 výkon na výstupu vedení

Často se vyjadřuje také měrný útlum vedení, který je útlumem vedení délky 1 km

(Pozn.: U kabelů UTP a STP se často měří a udává útlum úseku 100 m.)

$$a = A/l \left[\frac{dB}{km}; dB, km \right] \quad (2)$$

Před měřením útlumu je třeba provést kalibraci, při níž se změří celkový útlum přizpůsobovacích zařízení při propojení svorek krátkými propojkami v celém frekvenčním pásmu a zaznamená se pro účely korekce naměřených hodnot.



Obr.6 Schéma zapojení pro kalibraci

Po kalibraci se krátké propojky nahradí měřeným párem a proměří se závislost útlumu na frekvenci v celém požadovaném kmitočtovém pásmu. Při přesných měřeních se provádí teplotní korekce pomocí následujícího vztahu ro útlum přepočtený na délku např. 100 m. Důležité je impedanční přizpůsobení na obou koncích měřených párů.

Obvodový analyzátor je vybaven rozhraním pro měření v nesymetrických obvodech (koaxiální rozhraní s impedancí 50 Ω). K měření v obvodech se symetrickými rozhraními, například pro měření druhého druhu kabelu pro naši úlohu, párů UTP, se musí použít symetrizačních transformátorů s odpovídajícími parametry. Vyjádříme měrný útlum pro známou délku l vzorku.

[9][10]

2.5.2 Měření útlumu přeslechu na blízkém konci NEXT

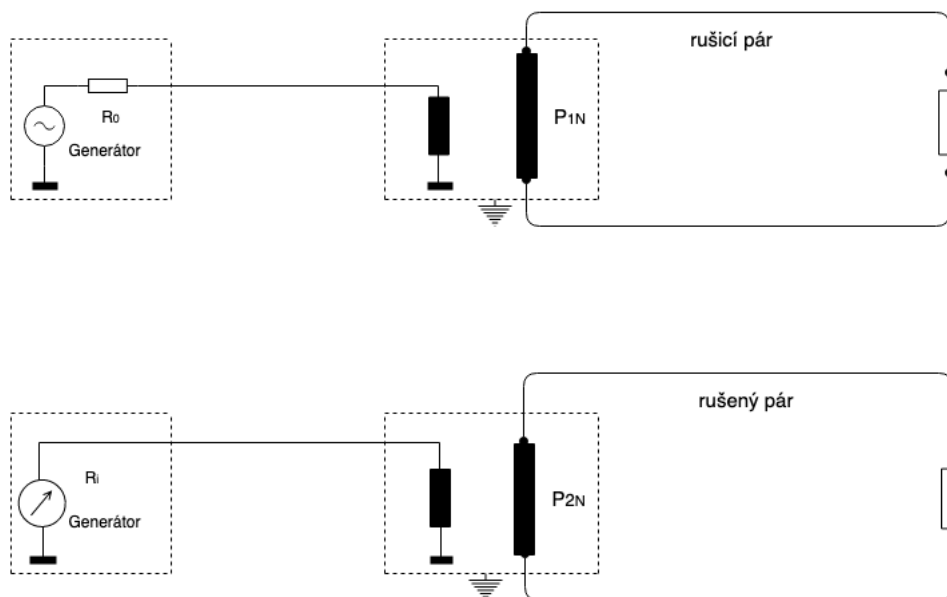
Získá se z poměru výkonů vyjádřených v dB:

$$A_{NEXT} = 10 \log \frac{P_{1N}}{P_{2N}} [dB] \quad (3)$$

kde P_{1N} vstupní výkon na rušícím páru

P_{2N} výstupní výkon na rušeném páru na blízkém konci

Pro měření přeslechu na blízkém konci jsou generátor i přijímač připojeny na stejné straně měřeného kabelu.



Obr.7 Schéma zapojení pro měření NEXT

Opět pomocí měření normovaného přenosu zjistíme útlum přeslechu na blízkém konci NEXT mezi dvěma páry symetrického vedení. Zdroj bude připojen na začátek jednoho páru, vstup analyzátoru na začátek druhého páru. Konce obou páru jsou zakončený zakončovacím odporem.[9][10]

Vyjádríme odstup signálu od přeslechu na blízkém konci (někdy též značeno jako ACR):

$$A_{S/NEXT} = A_{NEXT} - A [dB] \quad (4)$$

2.5.3 Měření útlumu přeslechu na vzdáleném konci FEXT

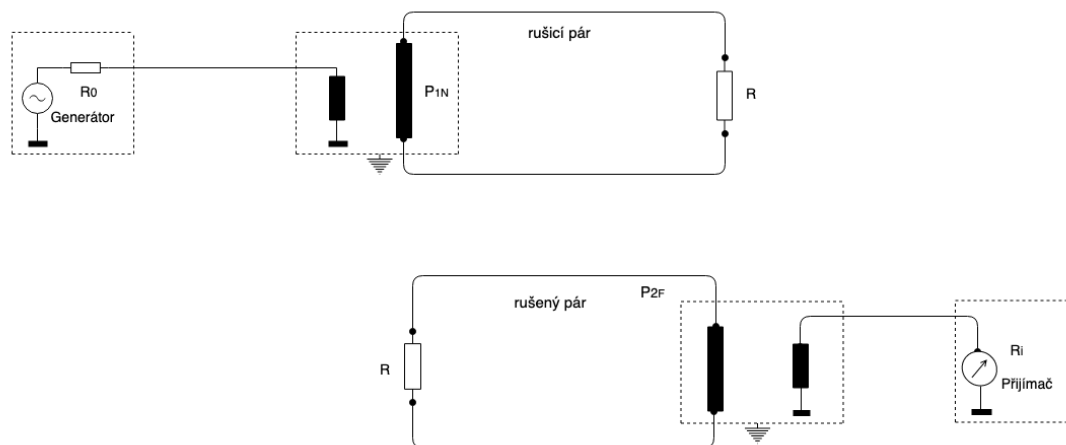
Získá se z poměru výkonů vyjádřených v dB:

$$A_{FEXT} = 10 \log \frac{P_{1N}}{P_{2F}} [dB] \quad (5)$$

kde P_{1N} vstupní výkon na rušeném páru

P_{2F} výstupní výkon rušeného páru na vzdáleném konci

Pro měření přeslechu na blízkém konci jsou generátor i přijímač připojeny na opačných stranách měřeného kabelu.



Obr.8 Schéma zapojení pro měření FEXT

Principiálně se měří útlumy přeslechu jako útlum vedení a stejný je i postup při kalibraci. Konce vedení, které nejsou připojeny k přístrojům musí být zakončeny odpory R s hodnotou blížíící se absolutní hodnotě charakteristické impedance vedení. Ostatní nepoužité páry, na kterých se neprovádí měření, mohou být bez zakončení (naprázdno) nebo přizpůsoben nominální impedanci. Postupně by se měly změřit kombinace všech párů měřeného kabelu, a to z obou stran kabelu. Rozdíly ve výsledcích měření provedených z opačných stran kabelu však bývají minimální. Měřený kabel musí mít minimální délku 100 m. [9][10]

2.5.4 Měření vstupní impedance

Obvody pracující na nízkých kmitočtech, resp. obvody, který mají mále rozměry ve srovnání s vlnovou délkou, lze řešit jako systém aktivních a pasivních prvků, které lze jednoduše charakterizovat dobře známými parametry, Z, Y, H – parametry. V našem případě, měření na vysokých kmitočtech, použití těchto parametrů by bylo velmi obtížné nebo nemožné. Lze velmi těžko dosáhnout zkratování nebo ideálního otevření svorek při definování Z, Y, H – parametrů. S – parametry se proto měří ve stavu přizpůsobení normálové impedanci. Při buzení ze zdroje následně sledujeme postupnou vlnu do zdroje a pak, pomocí odrazového můstku vlnu odraženou zpět do zdroje.

K obvodovému analyzátoru připojíme rozšiřující modul pro měření S-parametrů, který dovolí měřit odrazy a impedance.

Podle stanoveného postupu (záleží na použitých přístrojích), změříme vstupní impedanci vedení při korektním zakončení a určíme průměrnou, minimální a maximální absolutní hodnotu vstupní impedance ve vhodném kmitočtovém rozsahu. [9][10]

2.6 Modelování vedení

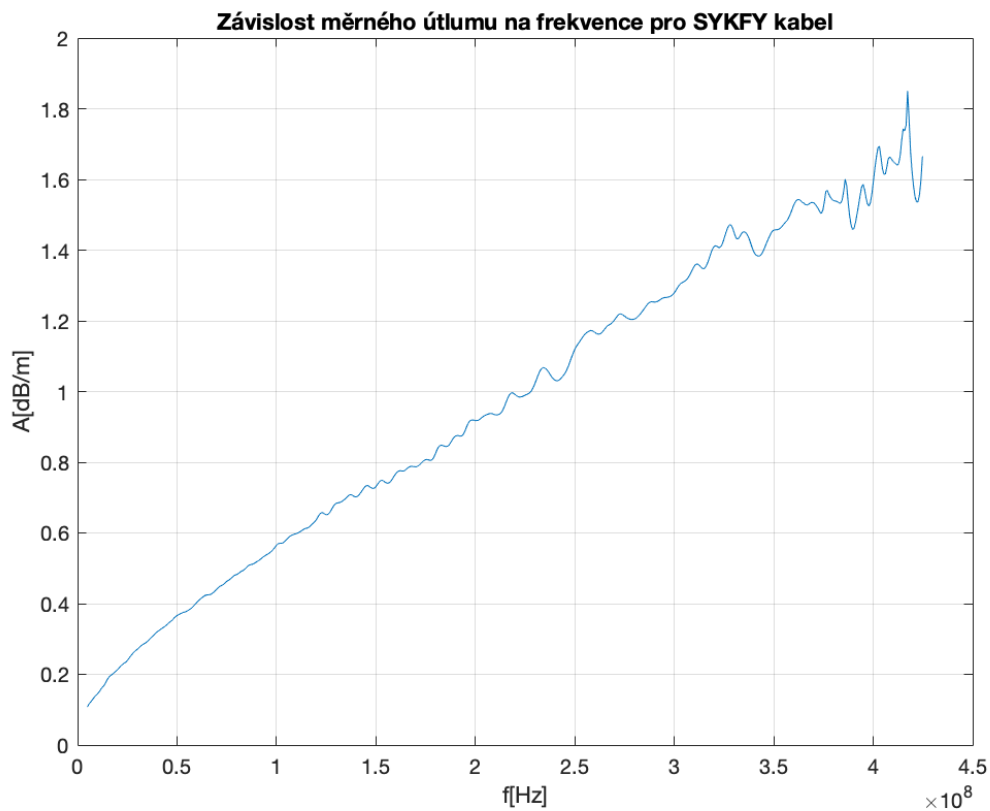
2.6.1 Zpracování naměřených hodnot

První fáze praktické části bakalářské práce spočívala ve zpracování naměřených hodnot pro dva typy kabelů, SYKIFY (telefonní vedení) a UTP (datové symetrické vedení kategorie 5).

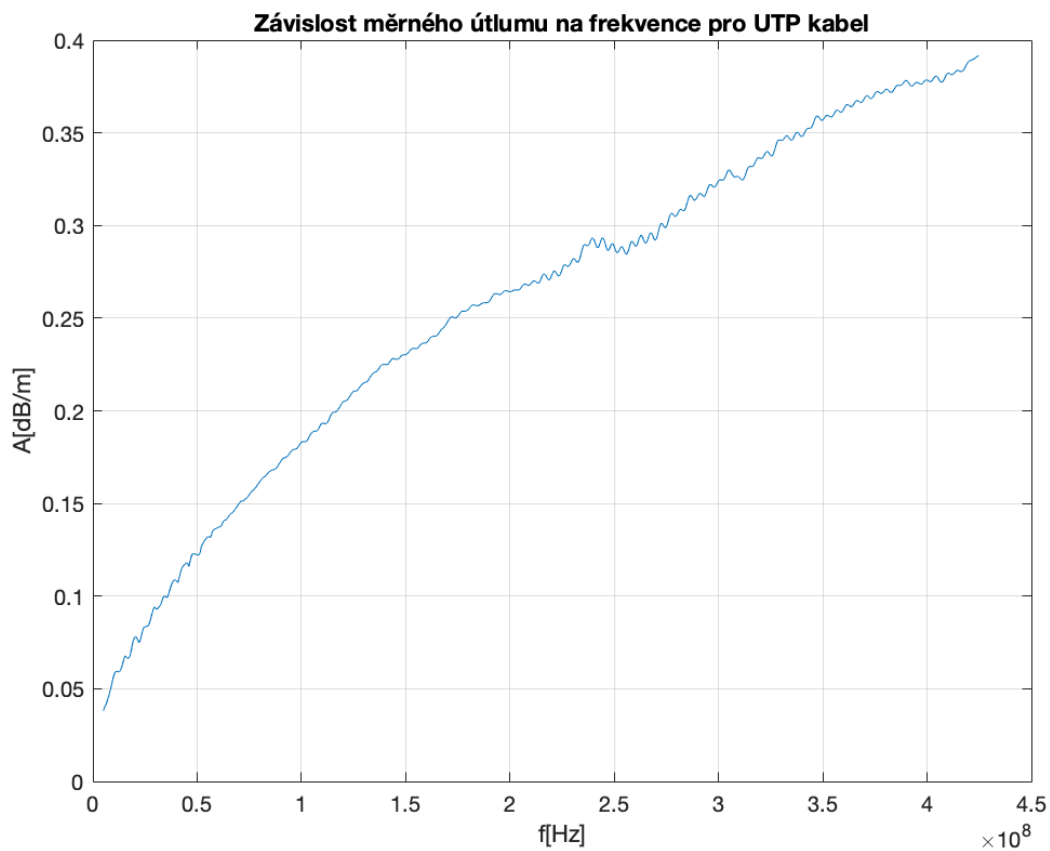
Další fáze byla zobrazení, naměřených hodnot jednotlivých dílčích párů pro SYKIFY a UTP. Pro trošku větší přehlednost, pro každý kabel jsem zprůměroval průběhy dílčích párů a vznikly z toho dva průběhy které v dalším bodě použiji pro vytváření univerzálního modelu.

Už v této fázi modelování je vidět rozdíl mezi telefonním kabelem SYKIFY s izolací PVC a datovým UTP Cat 5, která je nejpoužívanější v danou chvíli pro vnitřní rozvody budov metalického.

Měrný utlum UTP se zvětšení frekvence narůstá zpočátku rychleji, oproti tomu SYKIFY kabel má více lineární závislost. Ovšem na vyšších kmitočtech větší stabilitu ukazuje právě UTP. Navíc hodnoty měrného útlumu pro UTP jsou poměrně menší než hodnoty SYKIFY.



Obr.9 Závislost měrného útlumu na frekvence pro SYKFY kabel.



Obr.10 Závislost měrného útlumu na frekvence pro UTP kabel.

2.6.2 Vytváření univerzálního modelu vedení.

Změřené a zprůměrované průběhy použijeme pro vypočítání modelu. Nejprve musíme provést aproximace daných průběhů. Jako aproximační metodu budeme používat metodu nejmenších čtverců.

Dejme tomu, že máme k dispozici celkem n měření dvojic nezávislé a závislé veličiny: $\{x_i, y_i\}$. Hledejme nyní takovou funkci $F(x)$, která by co nejlépe odpovídala skutečnému průběhu závislosti $y = f(x)$. Triviálním řešením této úlohy je pospojování všech po sobě následujících bodů lomenou čarou, případně nějakou hladkou, dostatečně zvlněnou čarou (např. polynomem $n-1$ stupně), která by procházela důsledně všemi naměřenými body. Takovýto postup by ovšem přicházel v úvahu snad jen tehdy, kdyby byla poloha jednotlivých bodů grafu známa s absolutně přesně, což je nereálné.

Obvykle postupujeme tak, že si hned na počátku definujeme tzv. **regresní model** (regression model). Regresním modelem si z nekonečného množství funkcí, jimiž by bylo možno pozorovanou závislost proložit, vybereme jen jistou omezenou množinu funkcí, přičemž každá z funkcí této zvolené množiny modelových funkcí bude plně definována g parametry, které si pracovně označíme $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_g$. Veličina g pak vyjadřuje počet stupňů volnosti (degree of freedom) zvoleného modelu.

Regresní model představuje množinu podobných funkcí, které se od sebe liší jen různými hodnotami parametrů $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_g$:

$$F(x) = F(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_g, x) \quad (6)$$

Předpokládejme nyní, že jsme v rámci regresního modelu zvolili nějakou konkrétní hodnotu vektoru parametrů β pro i -té měření $\{x_i, y_i\}$ pak lze vyjádřit odchylku tohoto měření od dané závislosti e_i vztahem:

$$y_i = F(x_i, \beta) + e_i \quad (7)$$

Je zřejmé, že čím menší budou odchylky, tím lepší bude proložení pozorované závislosti mezi veličinami y a x .

Naším úkolem nyní bude vybrat z třídy funkcí $F(x_i, \beta)$ popsáných vektorem β , najít takový vektor $\beta = b$, pro nějž budou odchylky e_i minimální. [15]

Nejčastěji používanou, a z mnoha důvodů nejoblíbenější (nikoli však jedinou), je podmínka, aby součet kvadrátů odchylek pro všechny body měření byl minimální. Z této podmínky právě pak vychází tzv. metoda nejmenších čtverců.

Pro náš případ modelování, regresní model je definován následujícím způsobem:

$$\alpha = k_1 * \sqrt{x} + k_2 * x + \frac{k_3}{\sqrt{x}} \quad (8)$$

Kde k_1 , k_2 , k_3 jsou koeficienty modelu, x jsou naměřená data, v našem případě frekvence. Koeficienty, pomocí definované metody Matlabu, spočítáme ze zprůměrovaných průběhů.

	SYKFY	UTP
k1	3.098e-05	1.761e-05
k2	2.481e-09	6.534e-11
k3	1.497	1.851

Tab.3 Koeficienty pro dva typy kabelu

Pak dosadíme alfu, do vzorce pro počítání tzv. čtverců odchylek $S(\beta)$:

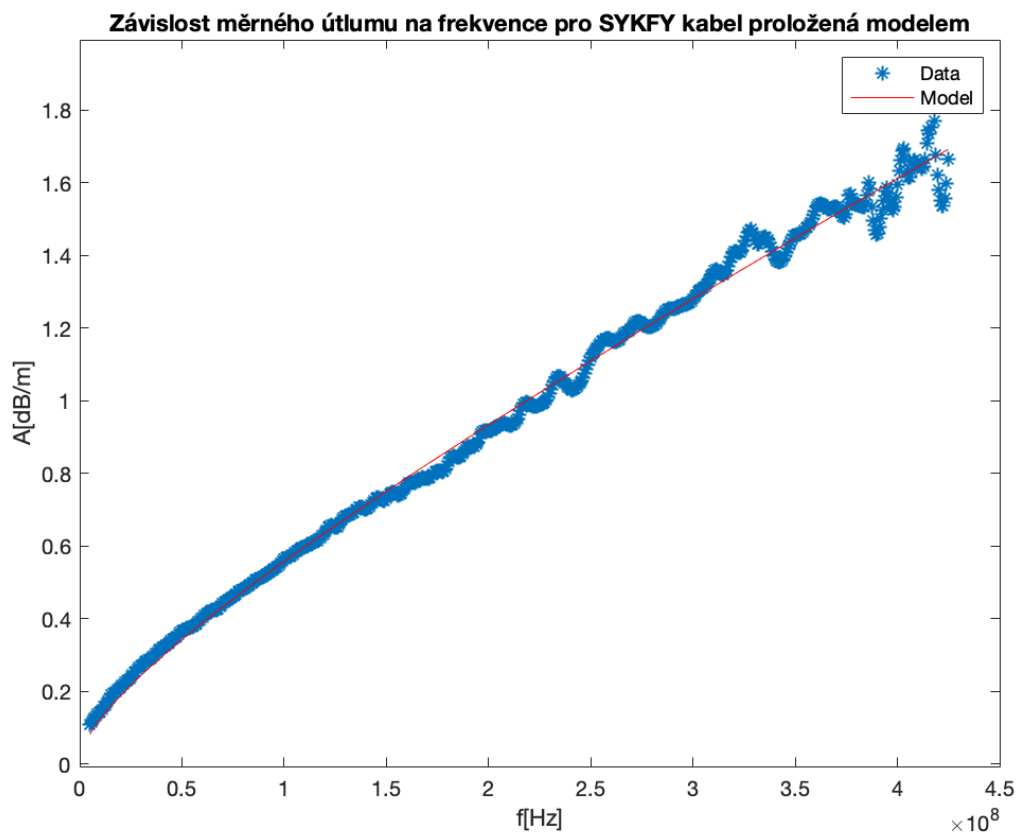
$$S(\beta) = \sum_i^n e_i = \sum_i^n [y_i - \alpha]^2 \quad (9)$$

Z toho nám nakonec vyplyne model vedení pro jeden typ kabelu a pro druhý typ, které můžeme použít pro simulování dalších případů o kterých budeme mít zájem.

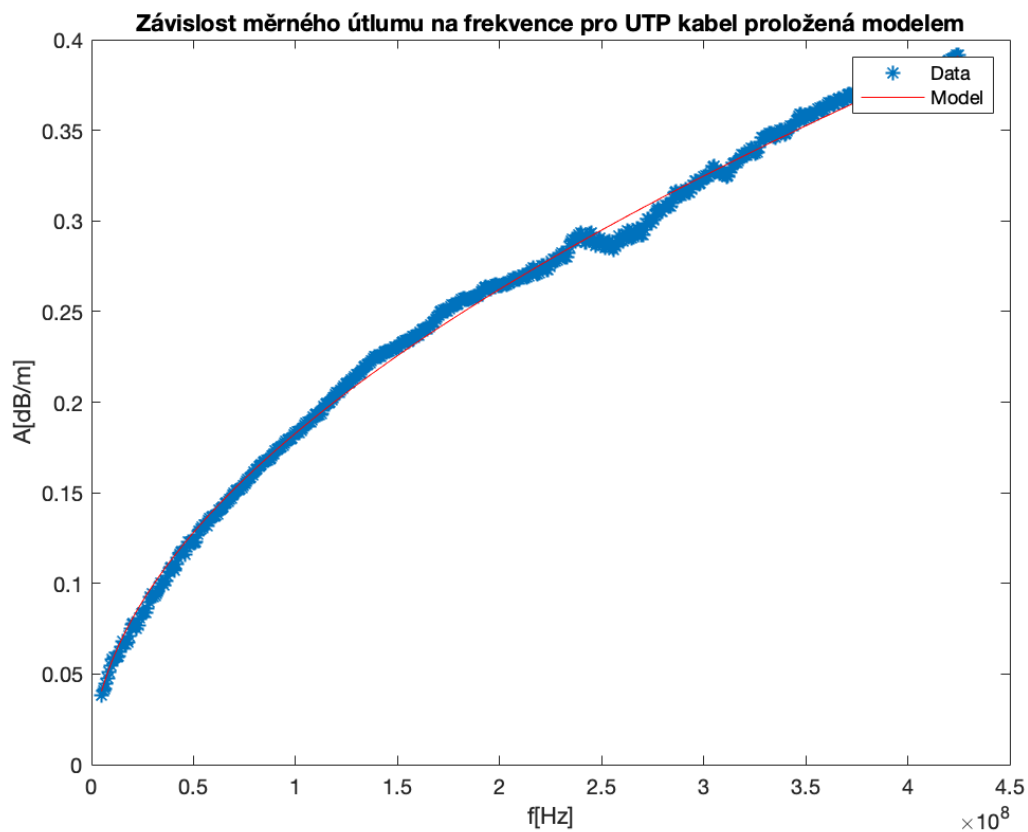
V naší situaci to jsou případy pro tři základní frekvenční pásma:

- 2 MHz až 106 MHz
- 2 MHz až 212 MHz
- 2 MHz až 424 MHz

A dále budeme používat různé hodnoty šumu na pozadí 10^{-18} W/Hz, 10^{-17} W/Hz, 10^{-16} W/Hz.



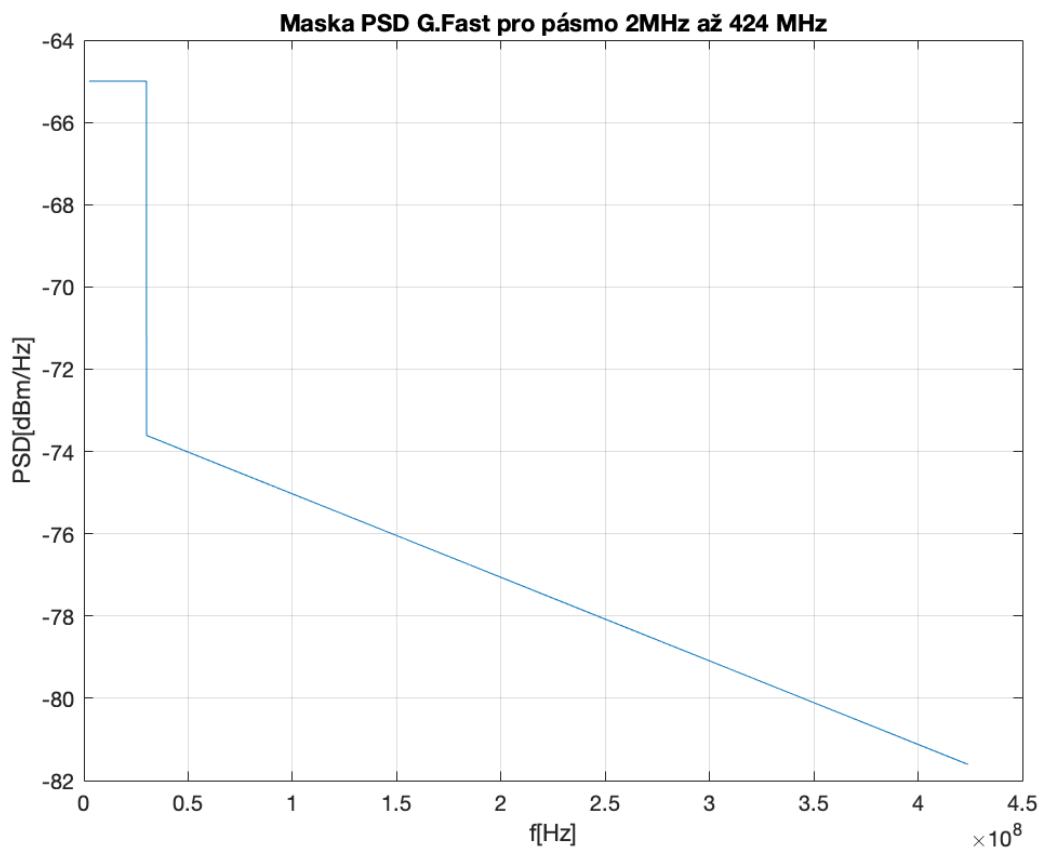
Obr.11 Závislost měrného útlumu na frekvence pro SYKFY kabel proložená modelem.



Obr.12 Závislost měrného útlumu na frekvence pro UTP kabel proložená modelem.

2.6.3 Vypočet dosažitelné přenosové kapacity

Hlavním výstupem práce je vyjádření závislosti reálné bitové rychlosti v závislosti na délce pro různé typy kabelů. Pro spočítání veškerých dalších hodnot je potřeba definovat vstupní výkon, základní pásma a šířku sub kanálů. Podle doporučení G.9700 pro masku PSD G.Fast vytvořit budící signál, kde do 30 MHz je konstantní úroveň signálu, po 30 MHz skoro lineárně klesá. [7]



Obr.13 Maska PSD G.Fast pro pásmo 2 MHz – 424 MHz.

Pro vypočet reálné rychlosti potřebujeme udělat ještě pár důležitých kroků. Prvním krokem pro další porovnání a vyhodnocení je spočítání teoretické informační propustnosti, do které není započítána bitová alokace a která udává jaké rychlosti bychom mohli dosáhnout při nejlepších podmínkách. Teoretickou informační propustnost spočítáme podle vzorce:

$$C = \Delta f * \sum_i \log_2 \left(1 + \frac{S_i}{N_i} \right) \quad (10)$$

$$S_i = S_{vys} * 10^{-l*alfa/10} \quad (11)$$

Kde C je teoretická informační propustnost,
 Δf šířka jednoho sub kanálu,
 S_i výkonová spektrální hustota na vstupu přijímače,
 S_{vys} vysílaný výkon,
 l délka,
 α regresní model,
 N_i šum na pozadí

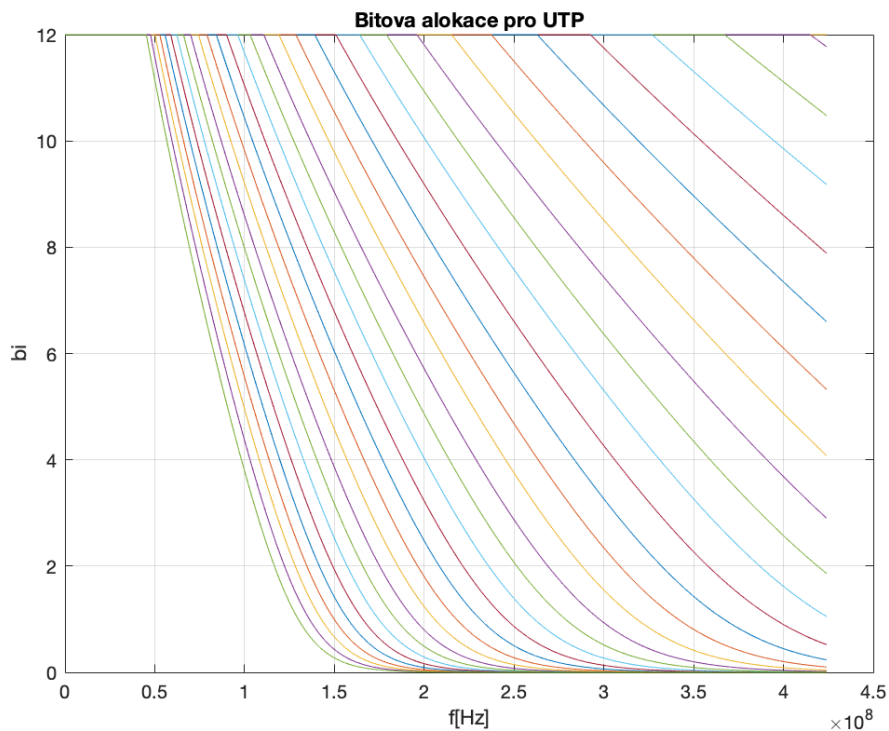
Pro první dvě kmitočtová pásma 2MHz až 106 MHz a až 212MHz jsou první body skoro stejné. To znamená že oba dva druhy kabelu budou mít stejnou přenosovou rychlost na velice krátkých vzdálenostech a nemá smysl uvažovat o tom, zda použít UTP nebo SYKIFY kabel. UTP má více lineární pokles což v důsledku dává větší propustnost na delších vzdálenostech. Naopak informační propustnost SYKIFY kabelu docela rychle klesá což ve výsledku dá malou přenosovou rychlost a nedává možnost použití tohoto typu kabelu pro větší vzdáleností, když mluvíme o vysokých rychlostech.

Dále, po spočítání reálné rychlosti, bude uveden graf pro porovnání reálné rychlosti a teoretické informační propustnosti.

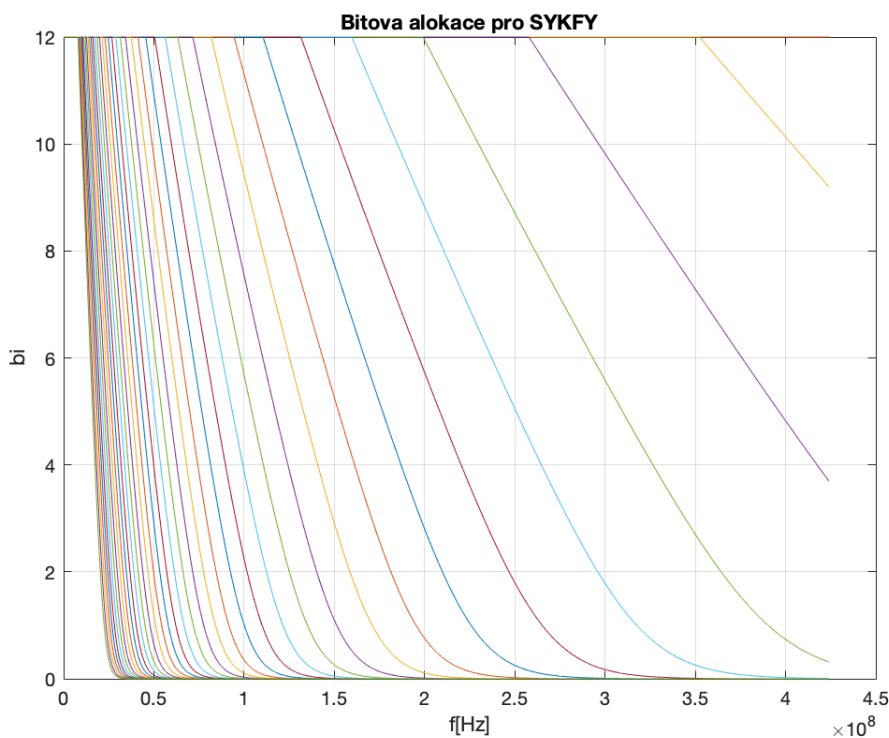
Posledním krokem před počítáním reálné přenosové rychlosti je definování a spočítání bitové alokace. Omezili jsme počet bitů na 12 (dáno možnostmi použitého HW řešení), a spočítání se proběhlo podle vzorce:

$$b_i = \log_2\left(1 + \frac{S_i}{N_i * k_b}\right) \quad (12)$$

Kde b_i je bitová alokace,
 S_i výkonová spektrální hustota na vstupu přijímače,
 k_b Shannon Gap,
 N_i šum na pozadí



Obr.14 Bitová alokace pro UTP pro délku přípojky od 10m do 400m s krokem 10 m.



Obr.15 Bitová alokace pro SYKFY pro délku přípojky od 10m do 400m s krokem 10 m.

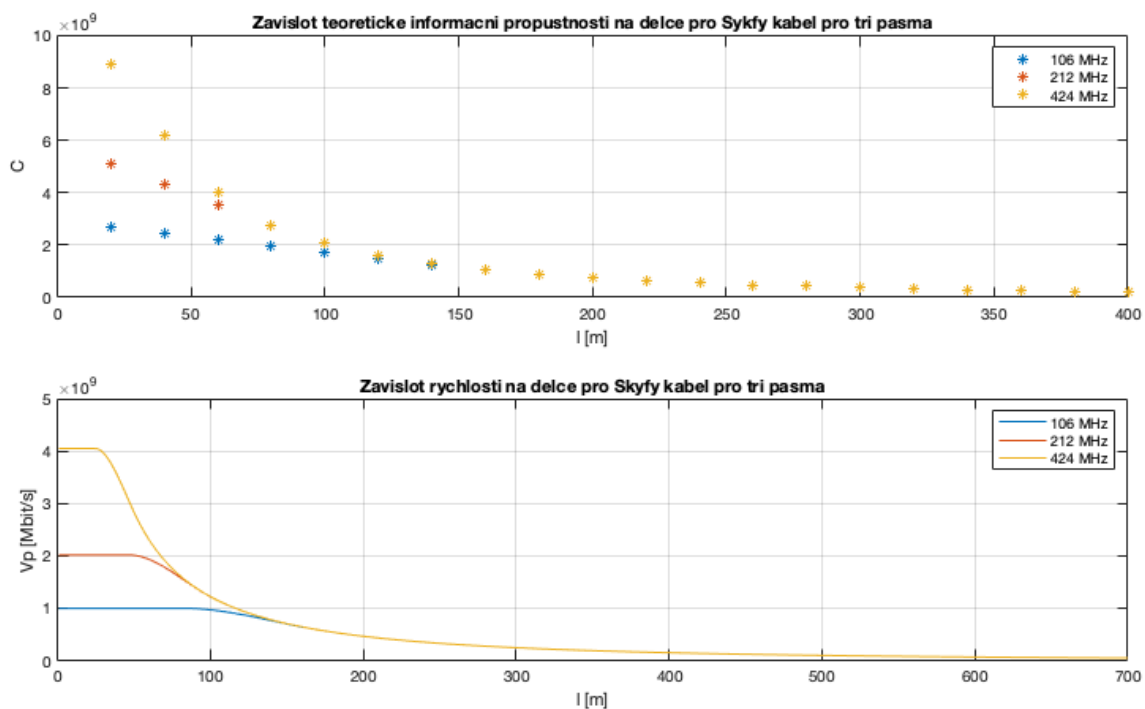
Konečnou etapou měření a modelování univerzálních parametrů vedení je posuzování, který z typu kabelu bude nejvíce vyhovovat pro používání gigabitových rychlostí na velké a střední vzdálenosti.

Podle spočítaných a modelovaných parametrů spočítáme reálnou přenosovou rychlost pro dva druhy kabelu a pro tři kmitočtová pásma. Použil jsem jedinou hodnotu šumu na pozadí AWGN ($N_i = -140 \text{ dBm/Hz}$). Pro výpočet bitové alokaci byla použita kanálová rozteč šířkou 2MHz až 424 MHz a modulační rychlost 40 kBd. Délka vedení při výpočtu byla 400 m. Reálnou rychlost spočítáme podle vzorce:

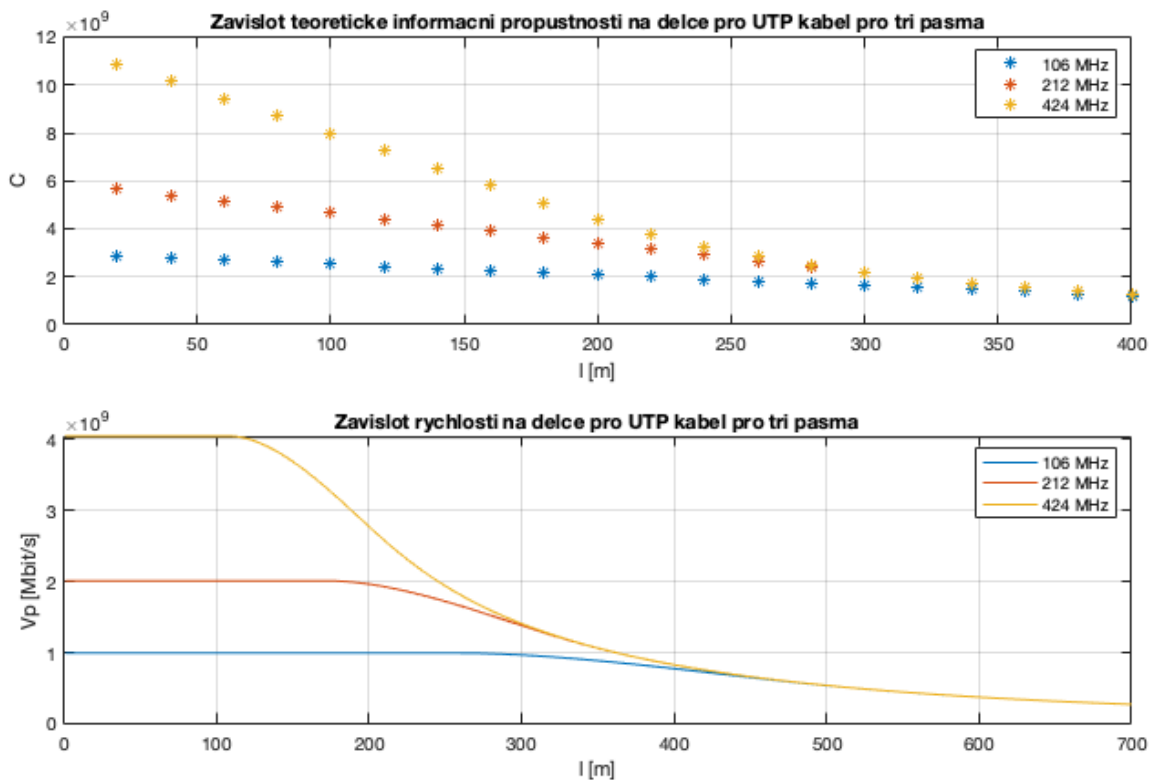
$$v_p = v_m * \sum_i b_i \quad (13)$$

Kde v_p reálná přenosová rychlost,
 b_i je bitová alokace,
 v_m modulační rychlost

Podle spočítaných hodnot a průběhu je vidět že UTP má větší teoretickou informační propustnost a spolu s tím i větší reálnou rychlost. Uvedené rychlosti jsou celkovou kapacitou kanálu, kterou je třeba v praxi rozdělit mezi oba směry přenosu pomocí TDD, při použití metodu s potlačením ozvěn EC.



Obr.16 Zavislost teoretické informační propustnosti a reálné rychlosti na délce pro SYKFY kabel.



Obr.17 Závislost teoretické informační propustnosti a reálné rychlosti na délce pro UTP kabel.

Jak už jsem zmiňoval u výpočtu teoretické propustnosti, SYKFY se zvětšením vzdáleností ukazuje horší hodnoty reálné přenosové rychlosti. Je to nejvíce dáno velkým měrným útlumem oproti UTP kabelu.

Dále bych chtěl odhadnout délky jednotlivých typů kabelu pro přenosové rychlosti, které by nás mohly zajímat při přechodu ze starších přípojek generace xDSL.

V dalších výpočtech a vyhodnocování budou použité takové parametry jako šum na pozadí ($N_i = -140 \text{ dBm}$) a nejširší frekvenční pásmo ($f = 2 \text{ MHz} - 424 \text{ MHz}$). Uvažujme také fullduplexné spojení se stejnou rychlostí downstream a upstream v prvním případě 1Gbit/s a 300 Mbit/s ve druhém při metodě TDD. V jednotlivých směrech se nám uplatní ztráty režii cca 10%, což pro fullduplexní spojení dohromady je 20%.

	<i>SYKFY</i>			<i>UTP</i>		
F [MHz/s]	106	212	424	106	212	424
1 Gbit/s	<i>nedosáhne</i>	<i>nedosáhne</i>	60 m	<i>nedosáhne</i>	<i>nedosáhne</i>	250 m
300 Mbit/s	145 m	145 m	230 m	460 m	460 m	460 m

Tab.4 Porovnání reálné použitelné délky pro SYKFY a UTP kabely

Podle tabulky je dobře vidět, že z hlediska délky, pro 1 Gbit/s rychlost pro SYKFY kabel se dosah snižuje k těm nejkratším vzdálenostem, nezávisle na šířce kmitočtového pásma. U UTP Cat 5, G.Fast vyžaduje nejširší kmitočtové pásmo pro požadovanou rychlost 1 Gbit/s ale umožní ji pro docela velkou a použitelnou vzdálenost 250 m. Pro větší přehlednost jsou vyneseny délky i pro 300 Mbit/s podle kterých lze vidět dnešní použitelné délky pro střední přenosovou rychlost.

3. Závěr

V telekomunikačních sítích se rychle rozvíjí vysokorychlostní přípojky a řeší se otázka, zda je vhodnější použití metalického vedení nebo optického vedení. Většinou to je otázka nákladů, které jsou jednou z nejdůležitějších věcí, která vždycky bude tvořit problém. Pokud budeme mluvit o instalaci páteřní sítě, dává větší smysl používat metalické vedení čili přípojky nové generace G.Fast. Na krátkých vzdálenostech dokážou dosáhnout stejných rychlostí jako optika. Naopak pokud jde o propojení mezi dvěma vzdálenými body je lepší používat optická vlákna, i když budou dražší ale zaručí kvalitnější a vysokorychlostní spojení. Další věc je to že, mnohdy nelze vyměnit už existující vedení z různých důvodů. V tom to případě metalické vedení není potřeba měnit, ale stačí jen vylepšení podle nových standardů. Nové technologie pro metalické vedení jako G.Fast a v budoucnu MG.Fast a TDSL se budou častěji využívat, a s po dalším rozvojem přibudou další technologie které ještě o kousek dál posunou rychlost datového přenosu metalickým vedením.

Daná práce se zabývá metalickým vedením a jejich modelováním. Teoretická část obecně popisuje standard G.Fast jeho základní body a také další možný vývoj podle novějšího standardu MG.Fast. Dále je uveden rozvoj metalické účastnické přípojky do další generace TDSL. V praktické části je uveden postup pro modelování vedení v kabelech dvou základních

typů SYKIFY a UTP. Je vytvořen obecný model stanovením parametrů pro oba typy kabelu. Daný model je pak využit pro stanovení teoretické informační propustnosti a reálné rychlosti přípojky G.Fast v nejširším kmitočtovém pásmu 2 MHz až 424 MHz. Ukazuje se že pro typ UTP požadovanou reálnou rychlost 1 Gbit/s ve směru downstream je možné dosáhnout při délce 250 m a menší. SYKIFY kabel dosáhne požadované rychlosti při délce 60 m a meně. Metody a funkce Matlabu, používané při modelování a vyhodnocování jsou k dispozici v příloze Příloha.zip .

4. Literatura

4.1 Seznam použité literatury

- [1] Ivan Pravda, *Vysokorychlostní přípojky VDSL a G.Fast. Kap. 4. Vysokorychlostní přípojky dle standardu G.Fast*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015 [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/eknihy?book=233-vysokorychlostni-pripojky-vdsl-a-g-fast>.
- [2] Petr Jareš, Jiří Vodrážka. *Standart G.Fast a jeho využití pro FTTH*. Presentace. [online]. Dostupné z: <https://www.action-m.com/ok2013/files/prednasky/at-jares-vodrazka.pdf>.
- [3] Jiří Vodrážka. *Další stádium vývoje digitálních účastnických přípojek*. České vysoké učení technické v Praze, FEL. Access Server [online]. Vydáno dne 20. 03. 2013. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=dalsi-stadium-vyvoje-digitalnich-ucastnickych-pripojek&cislocclanku=2013030001>. ISSN 1214-9675.
- [4] Hubert Mariotte, ITU-T SG 15 Vice Chairman. *Overview of ITU-T SG15 Q4 xDSL and G.(mg)fast*, Slides (Version May 2017) prepared by Frank Van der Putten, Nokia, Rapporteur ITU-T Q4/SG15. [online]. Dostupné z: [https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/com15/Documents/Overview%20of%20SG15%20Q4%20xDSL%20and%20G.\(mg\)fast.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/com15/Documents/Overview%20of%20SG15%20Q4%20xDSL%20and%20G.(mg)fast.pdf).
- [5] Ian Scales IT journalist. *T.faster: DSL's next stop is a terabit*. May 9, 2017. [online]. Dostupné z: <https://www.telecomtv.com/content/broadband/t-faster-dsl-s-next-stop-is-a-terabit-15614/>.
- [6] Jiří Peterka. *Báječný svět počítačových sítí, část VII. - Přenosové techniky*. [online]. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/b05/b1000001.php3>.
- [7] *ITU-T work programme - G.9700 (ex G.fast-psd) - Fast access to subscriber terminals (FAST) - Power spectral density specification*. ITU-T. 2014-01-29. Retrieved 2014-02-14. [online]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9700-201404-I>.

- [8] Petr Jareš. *Vektorová modulace DMT*. České vysoké učení technické v Praze, FEL. Access Server [online]. Vydáno dne 17. 01. 2007. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=vektorova-modulace-dmt&cislocclanku=2007010002>. ISSN 1214-9675
- [9] Jiří Vodrážka, Martin Havlan. *Přístupové přenosové systémy. Cvičení. Měření na přípojkách xDSL*. Skripta Nakladatelství ČVUT. Praha 2003. ISBN 80-01-02786-4.
- [10] Jiří Vodrážka, Boris Šimák. *Digitální účastnické přípojky xDSL. Díl 2. Přenosové prostředí, druhá generace ADSL a VDSL, měření na přípojkách*. Odborné nakladatelství Sdělovací technika. Praha 2008. 1. vydání. ISBN 8086645169, 9788086645162.
- [11] Dmitri Grigoriev, Vadim Bilyk. *How to disperse G.Fast: the establishment of technology*. Vydáno dne 21. 11. 2016. [online]. Dostupné z: <https://nag.ru/articles/article/30454/kak-razgonyali-g-fast-stanovlenie-tehnologii.html>.
- [12] *Access, Terminals, Transmission and Multiplexing (ATTM)*. (PDF). ETSI. September 2016. Retrieved 2018-03-21. [online]. Dostupné z: ["ETSI TS 101 548 - Reverse Powering of Remote Access Equipment V2.1.1"](#).
- [13] Marshall Brain, Jeff Tyson & Julia Layton. *Cell phone Frequencies*. HowStuffWorks. Retrieved 2019-02-14. [online]. Dostupné z: <https://electronics.howstuffworks.com/cell-phone1.htm>.
- [14] Ali Grami. *Introduction to Digital Communications 2016*, Pages 457-491. Elsevier 2016. ISBN: 978-0-12-407682-2. [online]. Dostupné z: <https://static1.squarespace.com/static/54d8bab4e4b0b305b8fcc72a/t/56f333f345bf21a9d5229177/1458779165832/Introduction+to+Digital+Communications+%5B2015%5D.pdf>.
- [15] Zdeněk Mikulášek. *Metoda nejmenších čtverců 1*, Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky. [online]. Dostupné z: https://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F7581mnc_ver1.pdf.

[16] Jiří Vodrážka. *Teoretická informační propustnost účastnických přípojek*. České vysoké učení technické v Praze, FEL. Elektrevue – časopis pro elektrotechniku. 2001. ISSN 1213-1539. [online]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/01031/index.html>.

4.2 Seznam obrázků

Obr.1 Kde se používá G.FAST.....	2
Obr.2 Základní představa TDD	6
Obr.3 Princip fantomového okruhu.	8
Obr.4 Představa multiplexu a inverzního multiplexu.....	9
Obr.5 Blokové uspořádání měřicí aparatury pro měření kabelů.....	13
Obr.6 Schéma zapojení pro kalibraci.....	14
Obr.7 Schéma zapojení pro měření NEXT.....	15
Obr.8 Schéma zapojení pro měření FEXT	16
Obr.9 Závislost měrného útlumu na frekvence pro SYKIFY kabel.	18
Obr.10 Závislost měrného útlumu na frekvence pro UTP kabel.	18
Obr.11 Závislost měrného útlumu na frekvence pro SYKIFY kabel proložená modelem.	21
Obr.12 Závislost měrného útlumu na frekvence pro UTP kabel proložená modelem.	21
Obr.13 Masky PSD G.Fast pro pásmo 2 MHz – 424 MHz.	22
Obr.14 Bitová alokace pro UTP.	24
Obr.15 Bitová alokace pro SYKIFY.....	24
Obr.16 Závislost teoretické informační propustnosti a reálné rychlosti na délce pro SYKIFY kabel.....	25
Obr.17 Závislost teoretické informační propustnosti a reálné rychlosti na délce pro UTP kabel.....	26

4.3 Seznam tabulek

Tab.1 Porovnání základních vlastností přípojek VDSL2 a G.Fast.....	3
Tab.2 Modelování přenosové rychlosti pro přípojku VDSL2 s délkou 400m	8
Tab.3 Koeficienty pro dva typy kabelu	20
Tab.4 Porovnání reálné použitelné délky pro SYKIFY a UTP kabely.....	27

4.4 Seznam zkratek

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
Cat 5/6/7	Kategorie 5/6/7
DAB	Digital Audio Broadcast
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
FDD	Frequency Division Duplex
FEXT	Far End Cross Talk
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTCab	Fiber To The Cabinet
FTTdp	Fiber to the distribution point
FTTF	Fiber To The Frontage
FTTH	Fiber To The Home
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union
ISDN	Integrated Services Digital Network
LDPC	Low Density Parity Check
NEXT	Near End Cross Talk
PON	Passive Optical Network
PSD	Power Spectral Density
RAN	Radio Access Networks
SMC	Spectrum Management Centre
TDD	Time Divisioning Duplex
UTP	Unshielded twisted pair
VKV	Velmi Krátké Vlny