

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 664

ISSN 1213-418X

Pavel Šilhavý

**ŠIROKOPÁSMOVÉ
PŘENOSOVÉ TECHNOLOGIE
PRO METALICKÁ VEDENÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací

Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

**ŠIROKOPÁSMOVÉ
PŘENOSOVÉ TECHNOLOGIE
PRO METALICKÁ VEDENÍ**

**BROADBAND TRANSMISSION TECHNOLOGIES
FOR METALLIC CABLES**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU
TELEINFORMATIKA**



BRNO 2020

KLÍČOVÁ SLOVA

Širokopásmové přenosové systémy, vícetónová modulace, DSL, PLC, DMT, OFDM, modelování přenosových vedení.

KEYWORDS

Broadband transmission technologies, multicarrier modulation, DSL, PLC, DMT, OFDM, transmission line modeling.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:

Originál habilitační práce je uložen na vědeckém oddělení VUT FEKT v Brně.

OBSAH

ÚVOD	5
1 CÍLE HABILITAČNÍ PRÁCE	6
1.1 Pedagogický přínos práce	6
1.2 Vědecký přínos práce	6
1.3 Aktuálnost problematiky	7
2 VÍCETÓNOVÉ MODULACE	7
3 MODULACE DMT A OFDM	8
3.1 Implementace DMT a OFDM modulátoru	9
3.2 Analýzy implementací DMT/OFDM systémů	11
4 ŠIROKOPÁSMOVÉ TECHNOLOGIE PRO METALICKÁ VEDENÍ	13
4.1 Technologie DSL	13
4.2 Technologie PLC	15
5 ALTERNATIVNÍ VÍCETÓNOVÉ MODULACE	16
6 VLIVY LIMITUJÍCÍ DATOVÝ PŘENOS NA METALICKÝCH KABELECH	17
7 MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH VLASTNOSTÍ ŠIROKOPÁSMOVÝCH TECHNOLOGIÍ	19
8 ZÁVĚR	21
POUŽITÉ SYMBOLY V MATEMATICKÝCH ZÁPISECH	23
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	23
POUŽITÁ LITERATURA	25

ŽIVOTOPIS

Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

Datum narození 21. 1. 1977

Kontaktní informace

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací, Technická 12, 616 00 Brno
Tel. +420 541 146 936
E-mail: silhavy@feec.vutbr.cz

Vzdělání

- 1995 – 2000 vysokoškolské studium, zakončené závěrečnou zkouškou, titul Ing. na FEI, VUT v Brně. Obor: Elektrotechnika a sdělovací technika.
2000 – 2003 doktorské studium, zakončené obhajobou dizertační práce, titul Ph.D. na FEKT VUT v Brně. Obor: Teleinformatika.

Pracovní zkušenosti

- 2000 – 2003 **akademický pracovník – asistent**, Ústav telekomunikací, FEKT VUT v Brně.
2003 – dosud **akademický pracovník – odborný asistent**, Ústav telekomunikací, FEKT VUT v Brně.

Odborné zaměření

- datová komunikace po metalických vedeních, zejména DSL a PLC
- modulační systémy a v nich využívané číslicové zpracování signálu
- počítačové modelování přenosových systémů a vedení
- kódování v systémech přenosu dat
- konvergované telekomunikační systémy, zejména s otevřeným kódem
- zátěžové a bezpečnostní testování telekomunikačních systémů

Vědeckovýzkumná činnost je orientována na oblast datových přenosů využívajících vícetónové modulační systémy a v nich aplikované číslicové zpracování signálu. V letech 2000 – 2005 byla výzkumná činnost zaměřena především na způsob ekvalizace přenosového kanálu (projekt GAČR) a algoritmy číslicového zpracování signálů v ní využívané se zaměřením na DSL přenosové systémy pracující v metalické přístupové síti telefonních ústředen. Poté jsem se zaměřil na alternativní přístupy k realizaci vícetónové modulace, zejména bankou filtrů (projekt GAČR). Dlouhodobě se věnuji počítačovému modelování přenosových systémů a vedení (projekt GAČR), jak v oblasti DSL technologií, tak v oblasti datového přenosu po silnoproudých vedeních technologiemi PLC. Mezi další oblasti, kterým se věnuji, patří konvergované telekomunikační systémy, zejména s otevřeným zdrojovým kódem, oblast zátěžového testování datové infrastruktury (projekt MVČR) a oblast bezpečnosti počítačových sítí (projekt MVČR). Rovněž jsem se věnoval i výzkumu a vývoji zdravotnické techniky, kdy se jednalo o vývoj infuzních pump s centralizovanou správou a vazbou na informační systém nemocnice (projekty AVČR a MPO).

Ve své pedagogické činnosti jsem zaměřen ve dvou oblastech. První je oblast datových přenosů, kde již od roku 2011 garantuji předmět Datová komunikace, druhou je oblast telekomunikačních systémů, ve které již od roku 2008 garantuji předmět Telekomunikační a informační systémy. Uvedené předměty systematicky inovuji (projekty OPVK a FRVŠ).

ÚVOD

Stále se zvyšující požadavky na poskytované rychlosti připojení do sítě Internet, Smart Grids, ale i mobilní sítě nové generace 5G vyžadují inovace, a tím i investice v přístupové síti. Ve snaze optimalizovat tyto investice je často snahou využít stávající již položené metalické kabely. Tyto snahy vedly k vývoji a následnému dalšímu zdokonalování širokopásmových přenosových technologií, které jsou nasazovány na přenosových médiích, které nebyly původně navrženy a konstruovány pro vysokorychlostní širokopásmový přenos, tj. pro rychlosti desítek až stovek, ale i tisíců Mbit/s. Tyto technologie tak musí být schopny se adaptovat na rozdílné přenosové vlastnosti jednotlivých kabelů v kmitočtových oblastech, pro něž nebyly konstruovány a jejichž přenosové vlastnosti zde nejsou tedy ani garantovány.

Jednou z prvních širokopásmových technologií nasazených v přístupové síti telefonních ústředen byla technologie ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), jejíž první standardy byly publikovány již koncem 90. let minulého století. Vývoj DSL (Digital Subscriber Line) technologií pak probíhal během dalších dvou dekad a pokračuje dodnes. Jednalo se o ADSL2, ADSL2+, VDSL (Very high-speed Digital Subscriber Line), VDSL2, VDSL2 Vplus a G.fast (Fast access to subscriber terminals), kdy přenosová rychlost postupně vzrůstala od několika Mbit/s až po Gbit/s, kdy již DSL technologie zajišťuje přenos jen na několika desítkách až stovkách metrů na straně uživatele a dále je využita optická infrastruktura. V současné době ITU-T připravuje nový standard G.mgfast (Multi-Gigabit FAST), který by měl dosahovat přenosové rychlosti 5 a 10 Gbit/s.

Všechny výše uvedené technologie využívají digitální modulační techniku s více nosnými, kterých je zde od několika set až po několik tisíců, což umožňuje adaptovat rozložení přenášených dat napříč kmitočtovým spektrem dle konkrétních přenosových vlastností daného přenosového média. Modulace tak vysokého počtu nosných je zde efektivně realizována s využitím algoritmu rychlé Fourierovy transformace.

Širokopásmové technologie však nejsou doménou jen přístupových sítí telefonních ústředen, ale nacházejí stále častěji uplatnění při datovém přenosu po napájecích kabelech v tzv. širokopásmových PLC (PowerLine Communication) technologiích, označovaných BPL (Broadband over Power Lines). Hlavní aplikací PLC technologie je v současné době Smart Metering, Smart Grids a automatizace trafostanic. Uplatnění však nachází i v dalších aplikacích, všude tam, kde využití stávajících rozvodů elektrické energie, a to jak NN (Nízké Napětí), tak VN (Vysoké Napětí), se jeví cenově efektivní oproti budování nové datové infrastruktury nebo jako dočasné řešení do doby vybudování optické infrastruktury. Jedná se tedy nejen o alternativní přístup k realizaci datových rozvodů v rámci budov, ale například i o datové přenosy po napájecích rozvodech zabezpečovací techniky na železnici a v celé řadě dalších aplikacích.

Další oblastí využití digitálních modulací s více nosnými jsou datové přenosy po koaxiálních kabelech společností nabízejících tzv. kabelovou televizi. Poslední verze zde používaného standardu DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), která se však zatím neuplatnila, již využívá modulační systém s více nosnými a nabízí přenosovou rychlost až 10 Gbit/s. Širokou oblastí uplatnění digitálních modulací s více nosnými jsou v neposlední řadě i bezdrátové přenosové systémy, a to od digitální televize DVB-T2 (Digital Video Broadcasting), přes bezdrátové síť WLAN (Wireless Local Area Network) dle IEEE 802.11a, g a n, mobilní síť LTE (Long Term Evolution) a v celé řadě dalších bezdrátových aplikacích. Posledním typem přenosového média, kde se zatím systémy s vysokým počtem nosných realizovaných s využitím FFT (Fast Fourier Transform) příliš neuplatňují, jsou optické kabely, ale dá se předpokládat, že s požadavkem na navyšování přenosové rychlosti dojde i zde k širokému uplatnění. Experimentální systémy zde dosahují přenosové rychlosti přes 100 Tbit/s.

1 CÍLE HABILITAČNÍ PRÁCE

Jak je z úvodu zřejmé, oblast uplatnění širokopásmových digitálních modulací využívajících rychlé Fourierovy transformace je velmi široká a pokrývá dnes všechna přenosová média. Tato práce bude věnována uplatnění těchto modulací na metalických přenosových médiích, kde se především bude věnovat DSL systémům, využívaným v přístupové síti telefonních ústředn na krouceném metalickém páru a PLC systémům nasazovaným na napájecích kabelových rozvodech.

Cíle práce lze rozdělit do několika oblastí, které zahrnují analýzu jednotlivých variant implementací modulací s více nosnými realizovanými s využitím algoritmu rychlé Fourierovy transformace, analýzu jejich výhod, nedostatků a možností omezení vlivu těchto nedostatků, analýzu uplatnění těchto modulací v jednotlivých verzích DSL a PLC systémů a jejich odlišnosti, analýzy a porovnání způsobu řešení duplexního režimu v systémech s více nosnými, alternativní modulační principy realizace vícetónové modulace.

Dalším dílčím cílem je analýza limitujících vlivů na přenos po metalických vedeních, způsoby modelování těchto vlivů pro jednotlivé technologie a typy přenosového média a ověření jednotlivých modelů, rovněž tak porovnání vlastností přenosových médií pro DSL a PLC přenosové systémy.

Výše uvedené dílčí cíle zahrnují řadu vlastních odvození, simulací a měření reálných systémů, kterými se podařilo vybavit laboratoř na Ústavu telekomunikací, s jejichž využitím budou ověřeny a demonstrovány dílčí problematiky. Jak je z výše uvedeného patrné, snahou je komplexní přístup k dané problematice, reflektující dvacetileté zkušenosti v oblasti výzkumu, testování, ověření reálných instalací, ale i pedagogické činnosti v oblasti modulací s více nosnými.

1.1 PEDAGOGICKÝ PŘÍNOS PRÁCE

Pedagogický přínos práce lze nalézt v kapitolách č. 2 a č. 3 habilitační práce věnovaných vysvětlení principů vícetónových modulací. Rovněž tak v kapitole č. 4 habilitační práce věnované příkladům uplatnění vícetónových modulací v reálných DSL a PLC systémech, které nejen umožní seznámení s jednotlivými technologiemi a jejich parametry, ale rovněž lepší pochopení teoretického základu uvedeného v kapitole č. 3 habilitační práce, a to právě díky seznámení s reálnými parametry a implementacemi v reálných systémech. Kapitola č. 6 habilitační práce umožňuje seznámení s limitujícími faktory přenosu na metalických vedeních. Kapitola č. 7 habilitační práce pak uzavírá tuto problematiku vysvětlením způsobů ověření přenosových parametrů pomocí měření a rovněž uvádí i možnosti analýzy systémů s více nosnými. Již více jak 10 let jsem garantem povinného předmětu Datová komunikace, ve kterém se studenti seznamují s problematikou datových přenosů a právě oblast modulací s více nosnými je jednou ze stěžejních problematik, kterým jsou nejen přednášky, ale především laboratorní cvičení věnována. Tato problematika má totiž přímou souvislost s pochopením základních principů datových přenosů, jako je např. kapacita kanálu, neboť se jedná o systémy, které pracují s maximální efektivitou přenosu, tj. snaží se co nejlépe využít poskytnuté přenosové prostředky. V pedagogické práci v této oblasti se rovněž věnuji i přednáškám pro odbornou veřejnost, např. pravidelně připravuji vyžádané přednášky pro Český telekomunikační úřad (ČTÚ).

1.2 VĚDECKÝ PŘÍNOS PRÁCE

Vědecký přínos práce zahrnuje kapitola č. 5 habilitační práce, věnovaná alternativním modulacím, kterým se ve své vědecké práci věnuji, např. kapitola č. 5.2.2 habilitační práce uvádí vlastní přístup překryvné FMT (Filtered MultiTone modulation) modulace, kterou jsem

publikoval. Práce rovněž zahrnuje řadu analýz, které přináší nový pohled na zkoumanou problematiku, např. kapitola 3.1.3 habilitační práce je věnována vlivu cyklické předpony na spektrum vysílaného signálu DMT/OFDM modulací, které je často chybně interpretováno. Dílčím výsledkem je i porovnání přenosových vlastností metalických vedení pro DSL a PLC přenosové technologie, kde v kapitole č. 6.1.8 habilitační práce je odvozen a vysvětlen odlišný průběh přenosových funkcí těchto vedení. Obecně kapitola č. 6 habilitační práce zahrnuje metody simulací vlastností přenosových vedení, kterým se dlouhodobě věnuji a v této oblasti i publikuji. V práci jsou rovněž zúročeny zkušenosti s nasazováním těchto přenosových technologií, a to zejména technologií PLC, kdy jsem se účastnil řady pilotních či ověřovacích projektů, realizovaných pro společnosti E.ON a SŽDC. Kapitola č. 7 habilitační práce tak zahrnuje metody měření těchto systémů a odráží zkušenosti autora v této oblasti.

1.3 AKTUÁLNOST PROBLEMATIKY

Širokopásmové technologie využívající vícetónových modulací zažívají v posledních letech velký rozmach. Jejich aplikace na metalických vedeních je v celku pochopitelná, neboť zde se již dosahované přenosové rychlosti blíží limitům těchto přenosových médií. Aktuálnost problematiky lze demonstrovat v nově vydaných standardech přenosových technologií. Jak již bylo v úvodu zmíněno, v tomto roce ITU-T má publikovat nový DSL standard G.mgfast, který by měl dosahovat přenosové rychlosti 5 až 10 Gbit/s, poslední standard technologie DOCSIS již rovněž využívá vícetónové modulace, u širokopásmových technologií PLC je modulační schéma na bázi vícetónových modulací stále zdokonalováno, např. je aplikován přenos po více vodičích MIMO (multiple-input multiple-output). Ač tyto technologie nabízí dočasné řešení před přechodem na optickou infrastrukturu, vícetónové modulace již začínají nacházet uplatnění i pro přenos po optickém vlákne a může zde být využita řada získaných zkušeností a přístupů z oblasti metalických médií.

2 VÍCETÓNOVÉ MODULACE

MCM (Multi-Carrier Modulation), česky označované jako modulace s více nosnými či vícetónové modulace, představují dnes hojně využívanou alternativu k modulacím s jednou nosnou SCM (Single Carrier Modulation). Pro vícetónové modulace je charakteristické, že poskytnuté přenosové pásmo pro jeden přenosový systém je rozděleno na několik set až tisíců subpásem, které jsou modulovány nejčastěji QAM modulací, kdy tato banka paralelně pracujících QAM modulátorů je implementována s využitím transformace z kmitočtové do časové oblasti.

Vysoký počet nosných, které jsou zde často označovány jako tóny, je dosažen díky efektivní QAM modulaci dílčích nosných, která je realizována v kmitočtové oblasti, a poté je tento „obraz spektra“ převeden do časové oblasti. Přesněji je dle přenášených dat na dané nosné a dle použité QAM modulace určeno z konstelačního diagramu komplexní číslo reprezentující amplitudu a fázi dané nosné, tj. fázor, a poté je takto získaný vektor fázorů převeden do časové oblasti, a tak je vytvořen jeden symbol.

Symbolová, neboli modulační rychlost systému tak násobně klesá oproti modulačnímu systému s jednou nosnou s počtem použitých nosných. Pro převod z kmitočtové do časové oblasti je využíván algoritmus rychlé Fourierovy transformace FFT, přesněji inverzní FFT transformace. Principu modulace s využitím FFT transformace se podrobněji věnuje 3. kapitola habilitační práce.

Tento způsob implementace QAM modulační banky má však i některé nevýhody, které pramení především z obdélníkové obálky takto generovaných symbolů, které korespondují spektra jednotlivých nosných ve tvaru sinc funkcí. Ve snaze odstranit nedostatky vícetónové modulace

realizované přímo algoritmem FFT byla publikována řada alternativních přístupů využívající například rychlé vlnové transformace. Alternativním přístupům je věnována 5. kapitola habilitační práce.

První práce věnované rozdělení datového toku do více paralelních datových toků s úměrně nižší modulační rychlostí byly publikovány již více než před 60 lety [19], myšlenka využít pro realizaci vícetónové modulace algoritmus FFT byla publikována před 50 lety [20], nicméně v té době ji nebylo možno efektivně a cenově dostupně uplatnit. Ke znovuobjevení systému s více nosnými dochází před 30 lety [21], kdy již přichází hardwarové prostředky pro efektivní realizaci vícetónové modulace a rovněž tak vzrůstá požadavek na zvyšování přenosové rychlosti.

Vícetónové modulace jsou velmi efektivní při nasazení jak v přenosových systémech využívajících metalických kabelů, tak v bezdrátových přenosových systémech. Hlavní výhodou nasazení vícetónových modulací pro přenos po metalických kabelech je jejich schopnost rozložit přenášená data napříč kmítočtovým spektrem tak, aby korespondovala odstupům SNR v daných kmítočtových oblastech. Použité metalické přenosové médium tak může mít různě spektrálně profilovanou přenosovou charakteristiku, s různou úrovní rušení napříč kmítočtovým spektrem, neboť vícetónové modulace rozloží tuto spektrálně profilovanou charakteristiku na několik set až tisíců subpásem, která již mají relativně plochou přenosovou charakteristiku a konstantní úroveň rušení, a tedy po uvážení úrovně vysílaného signálu v daném subpásmu i hodnotu odstupů SNR. Dle odstupů SNR v každém subpásmu je pak určen počet bitů, které lze při požadované chybovosti v rámci symbolové periody přenášet na dané nosné v tomto subpásmu a zvoleno odpovídající modulační schéma této nosné. Takto se dokáží vícetónové modulace adaptovat spektrálně profilovanému přenosovému médium.

Druhou neméně významnou výhodou vícetónových modulací je snazší vyrovnávání (ekvalizace) přenosového kanálu, což je dáno s počtem nosných násobně větší časovou délkou symbolu oproti systému s jednou nosnou s obdobnou přenosovou rychlostí. Vyrovnávání přenosového kanálu v systémech s více nosnými lze rozdělit na vyrovnávání v časové oblasti, jehož cílem je eliminace mezisymbolových interferencí a vyrovnání v kmítočtové oblasti, které koriguje amplitudové a fázové zkreslení dané nosné po přenosu kanálem. To již však lze realizovat jednoduchým násobením komplexním číslem reprezentujícím korekci.

Hlavní výhodou nasazení vícetónových modulací pro přenos v bezdrátových systémech spočívá především v násobně větší časové délce symbolu, která umožňuje efektivně potlačovat důsledky vícenásobného šíření signálu.

Vícetónové modulace se již běžně využívají v systémech pro přenos po metalických vedeních a v bezdrátových přenosových systémech, začínají se však objevovat i přenosové systémy s vícetónovými modulacemi pro přenos po optických vláknech. Například v [11] byl publikován experimentální přenosový systém umožňující dosáhnout přenosové rychlosti až 101,7 Tbit/s s využitím 128QAM-OFDM modulace po optickém vlákně. Dá se tedy předpokládat, že s požadavkem na nárůst přenosové rychlosti pro přenosy po optických vláknech se začnou vícetónové přenosové systémy stále více uplatňovat i na tomto přenosovém médium.

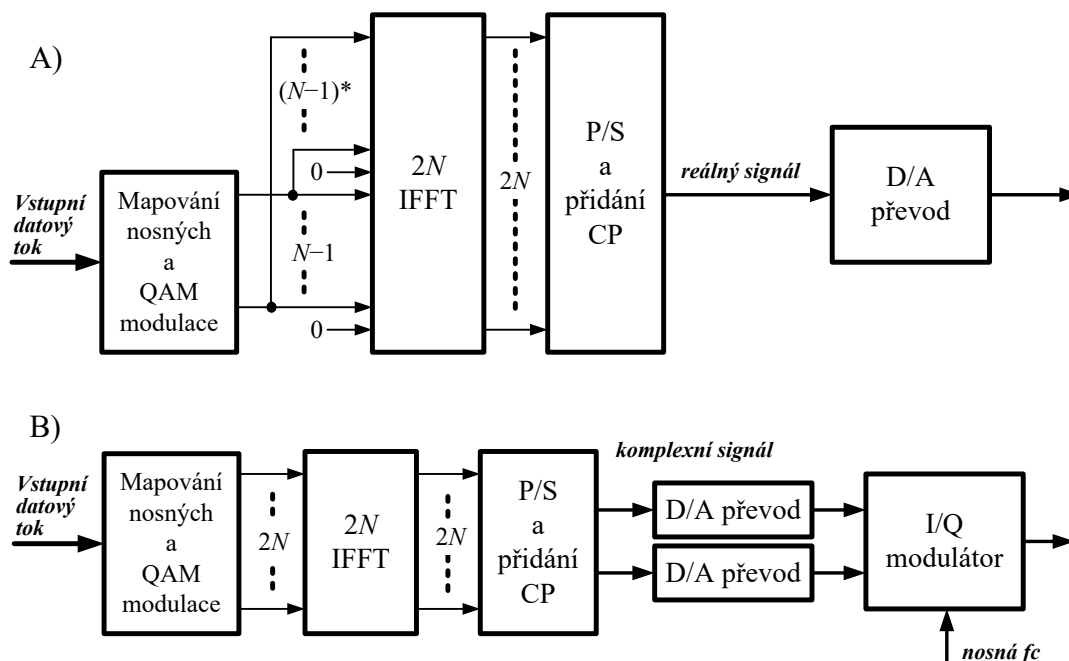
3 MODULACE DMT A OFDM

Oba uvedené typy vícetónové modulace, DMT i OFDM, využívají stejného principu rozdělení poskytnutého kmítočtového pásma na několik set či tisíců subpásem, v nichž je aplikována kvadraturní amplitudová modulace (QAM). Vícetónové modulace tedy realizují banku QAM paralelních modulátorů. Rozdíl mezi DMT a OFDM spočívá především v tom, že s pomocí modulace DMT je realizován přenos v základním pásmu na vyhrazeném přenosovém médium, např. technologie ADSL, VDSL a G.fast, a s pomocí OFDM je realizován přenos v přeloženém nebo i v základním pásmu na sdíleném přenosovém médium, např. technologie DAB, WLAN a PLC.

Z hlediska vlastní realizace pak odlišnost spočívá ve vlastní implementaci (viz obr. 3.1), kdy pro DMT modulaci v základní pásnu je pro vytvoření $N - 1$ nosných zapotřebí IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) řádu $2N$ z důvodu obdržení reálného signálu za modulátorem. Zbývajících $N - 1$ prvků tvoří komplexně sdružené prvky, první prvek stejnosměrnou složku a je zde ještě prvek korespondující zrcadlovému kmitočtu, oba nastaveny na nulovou hodnotu.

V případě realizace OFDM modulace je počet modulovaných nosných totožný s řádem IFFT $2N$. Výsledný komplexní signál je následně vstupním signálem I/Q modulátoru, který zpracuje komplexní signál a v kmitočtovém pásmu jej posune na požadovanou pozici.

Pro úplnost dodejme, že v některých PLC systémech, např. HomePlug či dle IEEE1901 viz kapitola 4.2 habilitační práce, je pro realizaci OFDM uplatněna metoda totožná s výše uvedeným popisem DMT modulace, kterou uvádí obr. 3.1 A).



Obr. 3.1. Konceptní schéma implementace modulátorů DMT (A) a OFDM (B) modulace

3.1 IMPLEMENTACE DMT A OFDM MODULÁTORU

Jak již bylo zmíněno, tyto modulace realizují banku QAM modulátorů. Přenosové rychlosti jednotlivých nosných této banky modulátorů mohou být shodné nebo odlišné. Shodné přenosové rychlosti se využívá u systémů realizujících jednosměrný přenos, tj. například v systémech digitálního rádiového DAB (Digital Audio Broadcasting) či televizního DVB (Digital Video Broadcasting) vysílání. V systémech umožňujících obousměrný (duplexní) přenos je přenosová rychlost, odvíjející se od počtů bitů nesených jednotlivými nosnými, určena při inicializaci komunikace na základě měření přenosového kanálu, kdy je přenášena pseudonáhodná, tj. známá datová sekvence. Ta je přenášena zpravidla 4-bodovým (QPSK) konstelačním schématem aplikovaným na každou nosnou. Na základě měření vlastností přenosového kanálu, ustavení vysílacího výkonu a určení odstupů SNR na každé nosné, jsou určeny počty bitů nesené jednotlivými nosnými a je tak stanoveno aplikované konstelační schéma QAM modulace pro každou nosnou. Tento inicializační proces, jehož cílem je dosáhnout co nejvyšší rychlosti či požadované rychlosti při co nejnižším vysílacím výkonu je označován v anglickém jazyce jako „bit loading“ [46]. Ve svém článku [2] z roku 2001, který byl zřejmě prvním detailním česky psaným popisem principu DMT modulace a byl svého času hojně citován, např. i ve třech skriptech ČVUT v Praze, jsem použil pro tento proces termín „bitová alokace“ a mohu říci, že se

ujal. Některé systémy navíc umožňují změnu počtu bitů nesených jednotlivými nosnými i během přenosu, bez přerušení komunikace. Tento proces se v anglickém jazyce označuje jako „bit swapping“ [46] a česky jej můžeme označit jako bitovou realokaci.

V modulaci OFDM se zpravidla používají konstelační schémata umožňující přenos 2 (QPSK), 4 (16QAM), 6 bitů (64QAM), 8 bitů (256QAM) nebo většího počtu bitů a bývá pravidlem, že se využívají sudé počty bitů. Moderní systémy již často umožňují i liché počty bitů, ale často jako nepovinná modulační schémata, jako např. systém G.hn. Oproti tomu DMT modulace využívá, již od prvních standardů v DSL technologiích, např. ADSL [46], konstelační schémata umožňující přenos 2, 3, 4, 5 až 15 bitů, což dovoluje optimální využití přenosového, zpravidla metalického, média. Nové DSL standardy, např. G.fast [53], podporují i jednobitová konstelační schémata. Součtem všech bitů přenášených na jednotlivých nosných obdržíme počet bitů nesených jedním DMT či OFDM symbolem a vynásobením modulační rychlostí (symbolovou) obdržíme přenosovou rychlost systému.

V DMT a OFDM systémech je datový tok nejprve rozdělen na bloky o velikosti korespondující počtu bitů nesených jedním DMT/OFDM symbolem, které jsou za jednu symbolovou periodu odeslány. Každý tento blok je poté rozdělen na bloky bitů, jejichž počet odpovídá počtu využitých nosných. Počet bitů v jednotlivých blocích je dán počtem bitů, které dle bitové alokace daná nosná umožňuje přenášet. Poté následuje číslicově realizovaná modulace QAM, kdy každému bloku bitů přidruženému dané nosné je určeno dle aplikovaného konstelačního schématu komplexní číslo vyjadřující amplitudu a fázi dané nosné v tomto DMT/OFDM symbolu. V každé symbolové periodě k je tak pro každou nosnou i dle aplikovaného konstelačního schématu a vstupních dat daného bloku přidruženého k této nosné určeno komplexní číslo, reprezentující de facto fázor nosné. Takto je získán v podstatě spektrální obraz DMT/OFDM symbolu, který je algoritmem inverzní rychlé Fourierovy transformace (IFFT) převeden do časové oblasti. Uvedený postup můžeme zapsat matematicky, jak uvádí vztah (3.1).

$$x^k(n) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{i=0}^{2N-1} X_i^k e^{j\frac{2\pi ni}{2N}}, \quad n = 0, \dots, 2N-1 \quad (3.1)$$

pro DMT modulaci v základním pásmu, a tedy obdržení čistě reálného signálu, musí platit:

$$X_i^k \begin{cases} X_{2N-i}^k = (X_i^k)^* & \text{pro } i = 1, 2, \dots, N-1 \\ 0 & \text{pro } i = 0, N \end{cases} \quad (3.2)$$

zde * označuje komplexně sdružené číslo.

OFDM modulace v přeloženém pásmu umožňuje modulovat nezávisle všech $2N$ nosných, a tedy se uplatňuje pouze vztah (3.1), bez podmínek uvedených ve vztahu (3.2) pro DMT modulaci. Výsledkem je komplexní signál $x(n)$, který je po převodu do analogové oblasti pomocí D/A převodníku, označený jako $x(t)$ a je vstupním signálem I/Q modulátoru, jak uvádí obr. 3.1, a jehož funkci můžeme popsat vztahem (3.3).

$$s(t) = \Re\{x(t)\} \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) - \Im\{x(t)\} \cdot \sin(2\pi \cdot f_c \cdot t) \quad (3.3)$$

Jak je zřejmé z předchozího textu, mezi jednotlivými DMT/OFDM symboly dochází ke skokové změně amplitud a fází všech nosných. V důsledku toho na neideálních, spektrálně profilovaných kanálech tak dochází k tzv. mezisymbolovým přeslechům ISI (Inter-Symbol Interference), kdy dle impulsní odezvy konkrétního přenosového kanálu část energie z jednoho DMT/OFDM symbolu ovlivňuje symbol následující. Při terestrickém přenosu obdobně dochází k vzájemnému ovlivňování OFDM symbolů v důsledku vícenásobného šíření signálu.

Z těchto důvodů je vkládána mezi jednotlivé symboly tzv. cyklická předpona, která je tvořena zkopírováním několika vzorků z konce symbolu nebo v případě terestrického přenosu se vkládá tzv. ochranný interval, kdy není mezi symboly vyslán signál. Délka cyklické předpony či ochranného intervalu je navržena dle typu a vlastností přenosového média. U jednotlivých systémů využívajících DMT či OFDM modulaci může být délka cyklické předpony či ochranného intervalu stanovena pevně nebo jsou definovány povolené hodnoty a z nich konkrétní využitá je vyjednána v rámci inicializace komunikace. V přijímači je následně pomocí ekvalizéru v časové oblasti TEQ (Time domain Equalizer) délka impulsní odezvy kanálu zkrácena k délce cyklické předpony, která je poté odstraněna. Problematice návrhových algoritmů TEQ ekvalizérů jsem se dlouhodobě věnoval a na své práce jsem zaznamenal ohlasy, z nichž za nejcennější považuji citace v amerických patentech United States Patent 7,212,595 – Reduced complexity time-frequency trained equalizer for discrete multi-tone based DSL systems, jejímž vlastníkem je kanadská firma Conexant Inc., výrobce modemů a United States Patent 8,345,802 – Receiver for digital modulated signal and receiving method for the same, jejímž vlastníkem je firma Toshiba. Jedná se však o specifickou problematiku číslicového zpracování signálu, která přímo nesouvisí s cíli habilitační práce, a proto zde nebyla rozebírána, bližší informace lze nalézt např. v [3] či [4].

3.2 ANALÝZY IMPLEMENTACÍ DMT/OFDM SYSTÉMŮ

V rámci habilitační práce byla realizována řada analýz demonstrujících některé nedostatky těchto systémů a byly prezentovány metody k omezení jejich vlivů. Uveďme alespoň ve stručnosti analýzu vlivu aplikace cyklické předpony na spektrum DMT/OFDM systémů.

Spektrum těchto systémů bývá často znázorňováno jako spektra jednotlivých nosných ve tvaru ortogonálních sinc funkcí [7], [23], což se stalo de facto určitým grafickým synonymem vícetónových modulací. Jednotlivé DMT/OFDM symboly jsou vysílány jeden za druhým, a pokud není realizováno dodatečné tvarování v časové oblasti, jejich obálku tvoří de facto obdélníkový puls, jehož průběh v časové oblasti označíme $h(t)$. Pokud DMT symbol není rozšířen o cyklickou předponu, která by tvořila cyklické prodloužení symbolu bez změny amplitud a fáze jednotlivých nosných v rámci symbolu, doba trvání obdélníkového pulzu je rovna $T_{\text{sym}} = T$. Spektrum obdélníkového okna $H(f)$ můžeme odvodit, jak uvádí vztah (3.4).

$$\begin{aligned}
 H(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t - kT_{\text{sym}}) e^{-j2\pi f t} dt = \int_{-kT_{\text{sym}}}^{T_{\text{sym}}(1-k)} e^{-j2\pi f t} dt = \\
 &= \frac{1}{-j2\pi f} \left[e^{-j2\pi f t} \right]_{-kT_{\text{sym}}}^{T_{\text{sym}}(1-k)} = \frac{j}{2\pi f} \left(e^{-j2\pi f T_{\text{sym}}(1-k)} - e^{j2\pi f T_{\text{sym}}k} \right) = \\
 &= j \frac{e^{j2\pi f T_{\text{sym}}k}}{2\pi f} \left(e^{-j2\pi f T_{\text{sym}}} - 1 \right) = j \frac{e^{j2\pi f T_{\text{sym}}k}}{2\pi f} \left(-2j e^{-j\pi f T_{\text{sym}}} \cdot \sin(\pi f T_{\text{sym}}) \right) = \\
 &= \frac{\sin(\pi f T_{\text{sym}})}{\pi f T_{\text{sym}}} \cdot T_{\text{sym}} \cdot e^{-j\pi f T_{\text{sym}}(1-2k)} = \text{sinc}(f T_{\text{sym}}) \cdot T_{\text{sym}} \cdot e^{-j\pi f T_{\text{sym}}}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

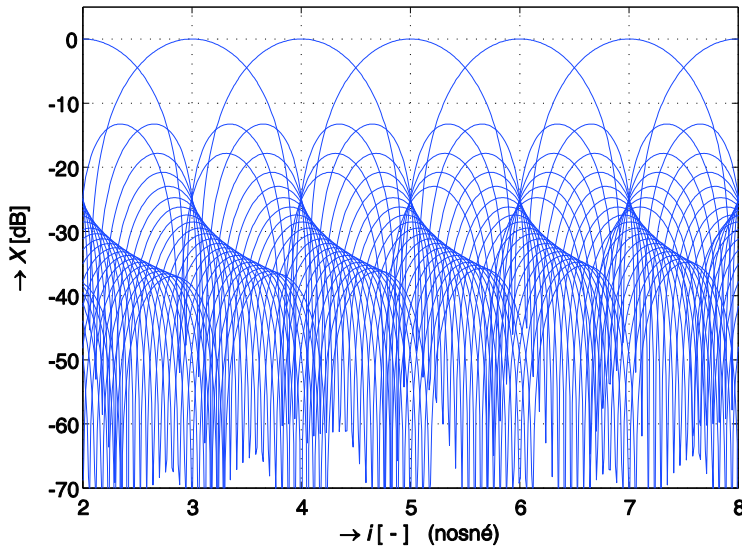
Jak bylo možno očekávat, spektrum jednotlivých nosných bude odpovídat sinc funkcím. Vysílaný signál odpovídá vynásobení obdélníkového okna $h(t)$ a sumy časových průběhů modulovaných nosných. Spektrum je tedy jejich konvolucí. Příspěvek i -té nosné k -tého symbolu do výsledného spektra X_i^k můžeme zapsat, jak uvádí vztah (3.5).

$$\begin{aligned}
X_i^k(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} [X_i^k h(t - kT_{\text{sym}}) e^{j2\pi f_i t}] e^{-j2\pi f t} dt = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} X_i^k e^{j2\pi f_i t} e^{-j2\pi f t} dt * \int_{-\infty}^{\infty} h(t - kT_{\text{sym}}) e^{-j2\pi f t} dt = \\
&= X_i^k \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi(f_i - f)t} dt * \int_{-\infty}^{\infty} h(t - kT_{\text{sym}}) e^{-j2\pi f t} dt = \\
&= X_i^k \cdot \delta(f_i - f) * \text{sinc}(f T_{\text{sym}}) \cdot T_{\text{sym}} \cdot e^{-j\pi f T_{\text{sym}}}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Celkové spektrum, zahrnující příspěvky všech nosných a symbolů, můžeme zapsat vztahem (3.6).

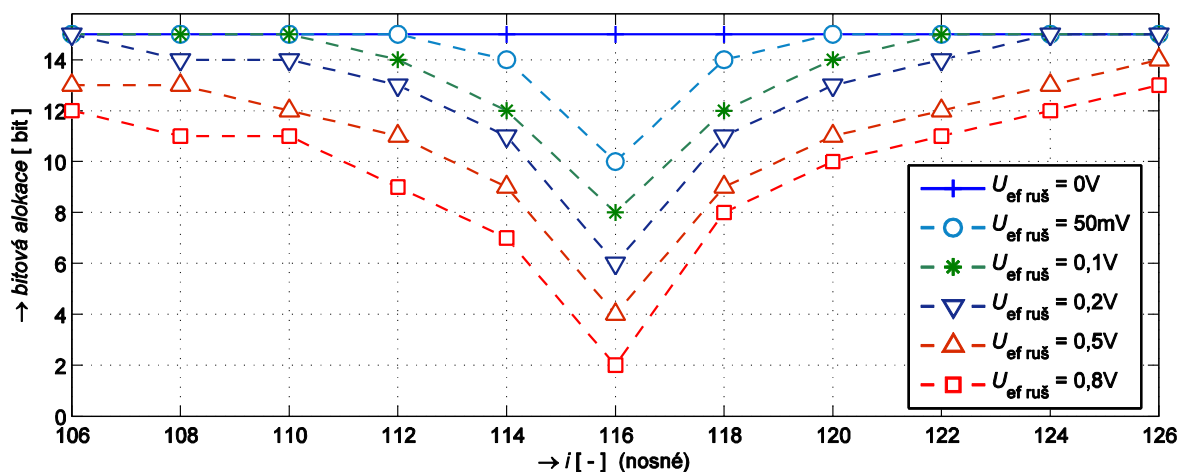
$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^{N-1} X_i^k \cdot \delta(f_i - f) * \text{sinc}(f T_{\text{sym}}) \cdot T_{\text{sym}} \cdot e^{-j\pi f T_{\text{sym}}} \tag{3.6}$$

Spektrum dílčích nosných DMT/OFDM systému je zpravidla prezentováno ve tvaru ortogonálních sinc funkcí, což však platí pouze pro případ $T_{\text{sym}} = T$, a tedy bez zahrnutí vlivu cyklické předpony. Vlivem aplikace cyklické předpony dojde k rozšíření DMT/OFDM symbolu, tedy $T_{\text{sym}} > T$, a tím budou očekávatelně sinc spektra jednotlivých nosných úměrně tomu užší, jak uvádí obr. 3.2, který byl získán z uvedených vztahů pro danou hodnotu CP . Rovněž, jak je



Obr. 3.2. Spektrum DMT modulace s cyklickou předponou pro systém s $2N=512$ a $CP=32$.

z tohoto obrázku patrné, dojde ke ztrátě ortogonality mezi dílčími nosnými. Zpětná demodulace vyžaduje obnovu ortogonality mezi jednotlivými nosnými a symboly, tedy jak v časové, tak kmitočtové oblasti, která je dosažena díky dříve popsané ekvalizaci v časové oblasti s následným odstraněním cyklické předpony. Důsledkem tvaru spekter jednotlivých nosných tj. prolínajících se sinc funkcí, působí nehomogenity na vedení, odrazy na nezakončených odbočkách, úzkopásmové rušení a další vlivy snížení odstupu SNR, a tím i počtu nesených bitů na jednotlivých nosných nejen v kmitočtové oblasti s výskytem daného jevu, ale i na řadě okolních nosných. Tento důsledek demonstruje výsledek měření bitové alokace, uvedený v obr. 3.3. Vliv tohoto jevu lze snížit tvarováním DMT/OFDM symbolů, které bylo v habilitační práci rovněž analyzováno.



Obr. 3.3. Vliv úzkopásmového rušení na bitovou alokaci.

4 ŠIROKOPÁSMOVÉ TECHNOLOGIE PRO METALICKÁ VEDENÍ

Ve 4. kapitole habilitační práce byly analyzovány implementace vícetónových modulací v přenosových systémech DSL (Digital Subscriber Line) a PLC (Power Line Communication), označovaných také jako BPL (Broadband over power lines). Kapitola zahrnuje řadu vlastních simulací a měření s využitím vybavení Laboratoře datových přenosů na Ústavu telekomunikací VUT v Brně, kterou se mi podařilo za téměř dvě dekády vybavit jak vlastními technologiemi, včetně nejnovější technologie G.fast, tak prostředky pro jejich testování, zahrnující mimo jiné přesné simulátory metalických vedení. Krom vlastních implementací jsou zde analyzovány i řešení duplexního přenosu v jednotlivých generacích výše uvedených systémů.

4.1 TECHNOLOGIE DSL

V DSL technologiích je směr přenosu od poskytovatele, kde je instalován DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) k uživateli, kde je instalován účastnický modem CPE (Customer Premises Equipment) označován v anglickém jazyce downstream, česky sestupný směr. Směr od uživatele k poskytovateli je označován v anglickém jazyce upstream, česky vzestupný směr. S ohledem na odlišné požadavky na přenosové rychlosti v jednotlivých směrech přenosu, tj. větší množství dat přenášených v sestupném směru, byl duplexní přenos v DSL technologiích koncipován tak, aby umožnil realizaci nesymetrického duplexního přenosu, zpravidla v poměru cca 1:8 ve prospěch sestupného směru.

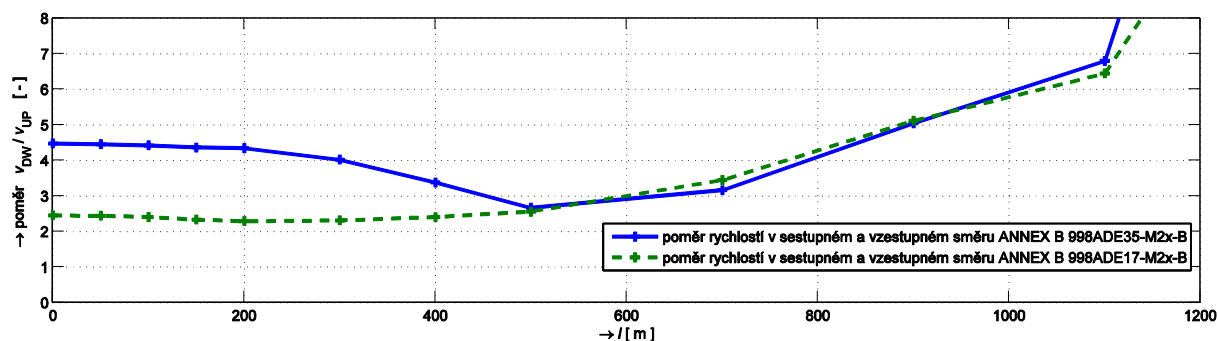
Z hlediska metody realizace obousměrného přenosu se v jednotlivých DSL standardech uplatnily metody kmitočtově děleného duplexu FDD, časově děleného duplexu TDD a obvodově děleného duplexu s využitím echo kompenzace EC. Velmi stručný přehled jednotlivých standardů DSL technologií uvádí Tab. 4-1.

První standardy uváděly maximální přenosové rychlosti v jednotlivých směrech, posléze u VDSL standardů začala být uváděna obousměrná či součtová rychlost obou směrů přenosu (bidirectional data rate), protože VDSL už umožňuje dle volby profilů měnit poměr pásem vyhrazených pro jednotlivé směry. Stejně tak tomu je u technologie G.fast, kde lze volit poměr rychlostí v daných směrech s relativně malým krokem.

Tab. 4-1 Přehled některých parametrů DSL technologií.

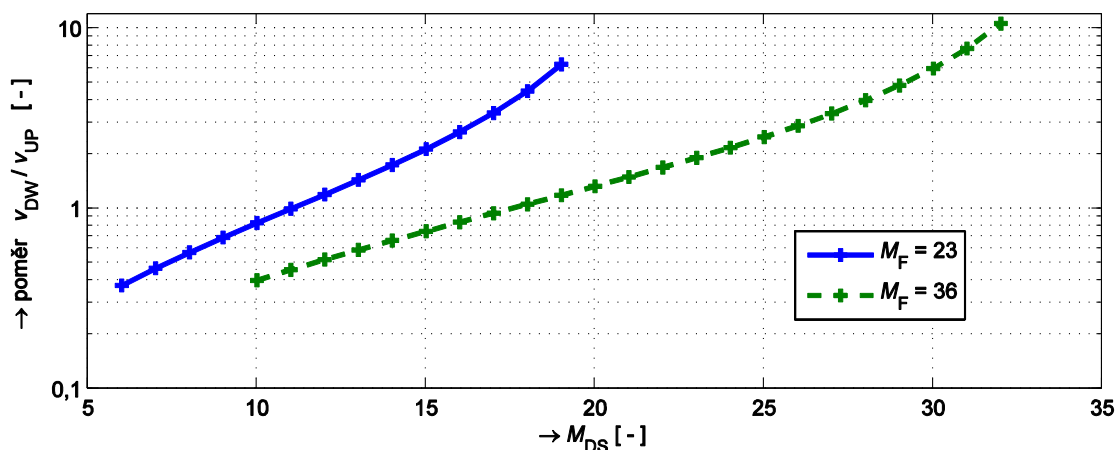
xDSL	ITU-T	rok	rychlost DW/UP či obousměrná [Mbit/s]	f_{\max} [MHz]	Δf [kHz]	metoda duplexu
ADSL	G.992.1	1999	6 / 0,6 (8 / 1)	1,1	4,315	FDD (EC)
ADSL2	G.992.3	2002	8+ / 1	1,1	4,315	FDD (EC)
ADSL2plus	G.992.5	2003	24 / 1	2,2	4,315	FDD (EC)
VDSL	G.993.1	2004	52 / 12	12	4,315	FDD
VDSL2	G.993.2	2005	150	až 17,6	4,315	FDD
			250 (30a Annex P)	30	8,625	
			400 (35b Annex Q - Vplus)	35	4,315	
G.fast	G.9700, G.9701	2014	1000	106	51,75	TDD
			2000	212		
G.mgfast	G.9710, G.9711	2020, v přípravě	5000-10000 (bude upřesněno)	424 848	51,75	TDD/EC

V rámci 4. kapitoly habilitační práce byl proveden podrobný rozbor implementací jednotlivých DSL technologií, doplněný o řadu analýz a výsledků měření. Jako příklad uvedme analýzu změny poměru rychlostí v jednotlivých směrech v závislosti na délce vedení. VDSL technologie specifikuje velké množství kmitočtových plánů a profilů, které byly v kapitole 4. uvedeny, s pomocí nichž lze realizovat jak symetrický, tak asymetrický přenos. Bohužel dosažitelná asymetrie přenosu není příliš vysoká, jak demonstruje obr. 4.1. Například pro dnes u nás běžně používaný profil 998ADE17-M2x-B dosahuje oblasti 0 až 600 metrů poměru 5:2. Nově nasazovaný profil 998ADE35-M2x-B dosahuje již poměr 9:2, avšak jen v oblasti do cca 300 metrů. Navíc, jak je patrné z obr. 4.1, poměr rychlostí je závislý na délce vedení.



Obr. 4.1. Poměr rychlostí v sestupném a vzestupném směru pro VDSL2 profily 35b a 17a.

G.fast technologie již využívá časový duplex TDD. Struktura multirámce je zde třístupňová, neboť zatímco u ADSL a VDSL technologií byl multirámec tvořen přímo DMT symboly, kdy první z nich byl synchronizační, v technologii G.fast je multirámec tvořen TDD rámci, jejichž počet je konfigurovatelný, a každý TDD rámec je tvořen konfigurovatelným počtem DMT symbolů pro sestupný a vzestupný směr, tvořící souvislé bloky DMT symbolů pro sestupný směr a vzestupný směr, oddělené ochrannými intervaly, které v součtu trvají dobu jednoho DMT symbolu a jsou zde právě s ohledem na dobu šíření v jednotlivých směrech přenosu, což je nezbytné pro realizaci časového duplexu TDD. Závislost poměru rychlostí v sestupném a vzestupném směru v_{DW}/v_{UP} v závislosti je zde konfigurovatelná parametry M_{DS} a M_F . Závislost na uvedených parametrech uvádí obr. 4.2. Ke změně v poměru rychlostí v závislosti na délce zde rovněž dochází s ohledem na odlišné bitové alokace v jednotlivých směrech přenosu, ale je menší než cca 5%.



Obr. 4.2. Poměr rychlostí v sestupném a vzestupném směru v závislosti na volbě M_{DS} .

Nově připravovaná technologie s názvem Multi-Gigabit FAST, ve zkratce G.mgfast, by měla dosahovat obousměrné rychlosti 5 až 10 Gbit/s a duplexní přenos bude řešen metodou obvodově děleného duplexu s využitím echo kompenzace EC.

4.2 TECHNOLOGIE PLC

Základní odlišností PLC technologií, podobně jako i DOCSIS technologií je, že zde není vyhrazené médium pro každou dvojici modemů, jako je tomu u DSL technologií. Společně s duplexním přenosem je tedy řešen i vícenásobný přístup k médiu. Pomineme-li úzkopásmové PLC technologie, pracující v pásmu do několika set kHz, v širokopásmových PLC systémech, pracujících v kmitočtovém pásmu až do sta MHz, v současné době dominují dva standardy, a to IEEE1901 [58] a ITU-T G.hn [59]. Oba standardy také nabízí rychlost až Gbit/s na fyzické vrstvě při využití MIMO. V současné době je více rozšířena technologie IEEE1901 a pro domácí použití technologie HomePlug AV2. Porovnání parametrů modulací uvedených standardů uvádí Tab. 4-2.

Tab. 4-2 Přehled modulačních parametrů technologií HomePlug, IEEE1901 a G.hn.

PLC	rok	rychlost na fyz. vrstvě [Mbit/s]	celkový počet nosných	využití nosné	f_{min} [MHz]	f_{max} [MHz]	Δf [kHz]	max. počet bitů na nosnou
HomePlug 1.0	2001	14	127	76	4,49	20,7	195,3125	2
HomePlug 1.0 Turbo	-	85	127	76	4,49	20,7	195,3125	8
HomePlug AV1.1	2007	200	1535	917	1,8	30	24,414	10
HomePlug AV2.1	2014	1500*	4095	až 3455	1,8	86,1	24,414	12
IEEE1901	2010	200 500	2047	až 1974	1,8	30 50	24,414	10 (12)
G.hn	2009	250 500 1000**	1024 2048 4096	až 949 až 1973 až 4021	1,8	25 50 100	24,414	12

Poznámka: Přenosové rychlosti jsou nejvyšší možné hodnoty fyzické vrstvy. * Rychlost u standardu HomePlug AV2.1 zahrnuje technologii MIMO, ta je však dostupná např. i v rozšíření standardu G.hn dle ITU-T G.9963 (G.mimo), a tak by zde rychlost byla cca dvojnásobná oproti uvedené **.

V rámci 4. kapitoly habilitační práce byl proveden podrobný rozbor implementací jednotlivých PLC technologií, doplněný o řadu analýz a výsledků měření. Poměrně zajímavý způsob implementace modulace je specifikován v technologii G.hn, která nabízí pestré uplatnění. Je specifikována pro napájecí, telefonní i koaxiální kabely. Může pracovat jak v základním, tak přeloženém pásmu, na což reflektuje navržená implementace.

5 ALTERNATIVNÍ VÍCETÓNOVÉ MODULACE

Ve 3. kapitole habilitační práce byly uvedeny nedostatky vícetónových modulací DMT a OFDM, které jsou ve své podstatě přímými důsledky relativně snadné implementace těchto modulací s využitím algoritmu FFT. Jednotlivé fázory nosných, jejichž amplituda a fáze korespondují přenášeným bitům dle QAM mapování na těchto nosných, jsou převedeny do časové oblasti algoritmem inverzní FFT a jsou vysílány za sebou, čímž je vytvořena obdélníková obálka těchto DMT/OFDM symbolů. Důsledkem je pak vliv úzkopásmového rušení či nehomogenit na vedení v určité kmitočtové oblasti na řadu sousedních nosných DMT/OFDM systému, které již jsou mimo tuto ovlivňovanou kmitočtovou oblast a naopak mimopásmové rušení DMT/OFDM systémem, tj. ovlivňování kmitočtového pásma mimo využívanou oblast. Ve 3. kapitole habilitační práce byly uvedeny metody potlačení těchto vlivů s využitím dodatečné filtrace a aplikace vhodného okna na rozšířený symbol pomocí cyklické předpony a přípony, tzv. windowed DMT/OFDM [34]. Tyto metody se široce využívají, jak je zřejmé z popisu a analýzy reálných systémů, uvedených ve 4. kapitole habilitační práce. Přesto uvedené nedostatky vedou k neoptimálnímu využití poskytnutého kmitočtového pásma, a tím ke ztrátě v dosažitelné přenosové rychlosti, což je hlavní motivací hledání alternativních přístupů vícetónových modulací. Za základní dva alternativní přístupy k implementaci vícetónové modulace (MCM) můžeme označit realizace s pomocí banky filtrů FMT (Filtered MultiTone modulation) [35], [38] a realizaci s využitím vlnkové transformace DWMT (Discrete Wavelet MultiTone) [29]. Tyto přístupy však nejsou zdaleka jediné, krom realizace s využitím vlnkové transformace byl publikován i přístup realizace OFDM s využitím diskretní kosinové transformace DCT-OFDM [30] a celá řada variant modulací s pomocí banky filtrů FMT, jako například CB-FMT (Cyclic Block FMT) [31]. Uplatnění těchto alternativních přístupů je však zatím minimální, ale například modulace DWMT je specifikována jako alternativní modulační schéma v PLC standardu IEEE1901 [58].

DWMT modulace (Discrete Wavelet MultiTone) [29] realizuje banku modulátorů s využitím algoritmu IFWT (Inverse Fast Wavelet Transform), namísto algoritmu IFFT, který je využit v modulacích DMT/OFDM a windowed DMT/OFDM. Zatímco u DMT/OFDM systémů je na každé nosné modulována dvojice ortogonálních nosičů (sinus a kosinus), a tedy vstupní signál IFFT je komplexní odpovídající QAM modulaci na každé nosné, vstupní signál IFWT je reálný a jedná se tedy o banku PAM modulátorů. Například ve standardu IEEE1901 [58], kde je DWMT modulace jako variantní možnost implementace uváděna, je specifikována až 32PAM, která umožňuje přenášet až 5 bitů na jedné nosné v jednom symbolu. Standardní schéma uváděné s OFDM modulací specifikované v IEEE1901 umožňuje až 4096QAM, tedy přenášet až 10 bitů. U DWMT implementace je však použit dvojnásobný počet nosných, které jsou jinak rozloženy napříč kmitočtovým spektrem než u DMT/OFDM modulací. Důležitými parametry realizace DWMT modulace, které určují vlastnosti systému, jsou volba tzv. mateřské vlnky a faktoru překrytí γ . V závislosti na volbě mateřské vlnky a faktoru překrytí γ jednotlivých symbolů, minimalizuje tato realizace úroveň postranních laloků, a tím i možnost vzájemného prosakování mezi jednotlivými nosnými. Totiž zatímco u DMT/OFDM modulací se z jednoho vektoru fázorů X^k QAM modulací vytváří $2N$ hodnot v časové oblasti, tvořící DMT/OFDM symbol, u DWMT je to $2\gamma N$ hodnot a symboly se vzájemně překrývají. Například při volbě $\gamma=8$ je první postranní

lalok potlačen o cca 45 dB [29], při volbě $\gamma = 4$ o cca 35 dB [58], při volbě $\gamma = 2$ o cca 22 dB [29], přičemž u systémů DMT/OFDM, čemuž odpovídá $\gamma = 1$, je potlačen jen o 13 dB.

FMT (Filtered Multitone Modulation) modulace byla autory původně navržena pro využití ve VDSL technologii [38]. Přímá realizace FMT modulace vyžaduje $2N$ filtrů s konečnou impulsní odezvou (FIR) řádu $2\gamma N$, kde γ je faktor překrytí symbolů v časové oblasti. Lze odvodit, že tzv. kriticky vzorkovanou banku filtrů je možno efektivně implementovat s využitím algoritmu rychlé Fourierovy transformace [37]. V porovnání s DMT/OFDM modulátorem, uvedeným na obr. 3.1 je zde navíc každý výstup IFFT filtrován FIR filtrem řádu γ , ale podobně jako u DWMT modulace není použito vkládání cyklické předpony či přípony. Koeficienty jednotlivých FIR filtrů lze určit z prototypového filtru řádu $2\gamma N$. Způsob návrhu prototypového filtru je shodný, jako v přímé realizaci. FMT modulaci dle [38] můžeme označit jako nepřekryvnou. Jednotlivé nosné jsou zcela odděleny a nepřekrývají se, jako tomu je v DMT/OFDM modulacích. Realizace MCM modulace pomocí banky filtrů FMT nabízí řadu výhod. Užité kmitočtové pásmo je zejména lépe využito v okrajových částech spektra určeného jednotlivým směřům přenosu, kde dochází u DMT modulace ke ztrátám v přenosové rychlosti. Lépe tak lze realizovat kmitočtové dělení směřů FDD. Velmi významně je omezeno mimopásmové rušení.

Uvedené výhody a nevýhody modulací prezentovaných v předchozí kapitole byly motivací k návrhu překryvné FMT modulace s překryvem poloviny pásma subkanálu, kterou jsem publikoval v [39] pod názvem Half-overlap subchannel FMT. U navržené překryvné modulace se jednotlivé nosné vždy z poloviny překrývají, a tak každá nosná ovlivňuje pouze dvě sousední nosné. Výhodou překryvné FMT modulace je, že umožňuje dosažení útlumu postranních laloků s nižším řádem filtru γ , oproti nepřekryvné FMT modulaci.

Problematické modulací bankou filtrů FMT jsem se po jistou dobu intenzivně věnoval a v rámci grantových projektů GAČR 102/06/P160 a GAČR 102/09/1846 publikoval společně s kolegy řadu článků věnovaných překryvné FMT modulaci, ekvalizaci v FMT systémech a optimalizacím implementace FMT modulace s využitím algoritmu FFT.

6 VLIVY LIMITUJÍCÍ DATOVÝ PŘENOS NA METALICKÝCH KABELECH

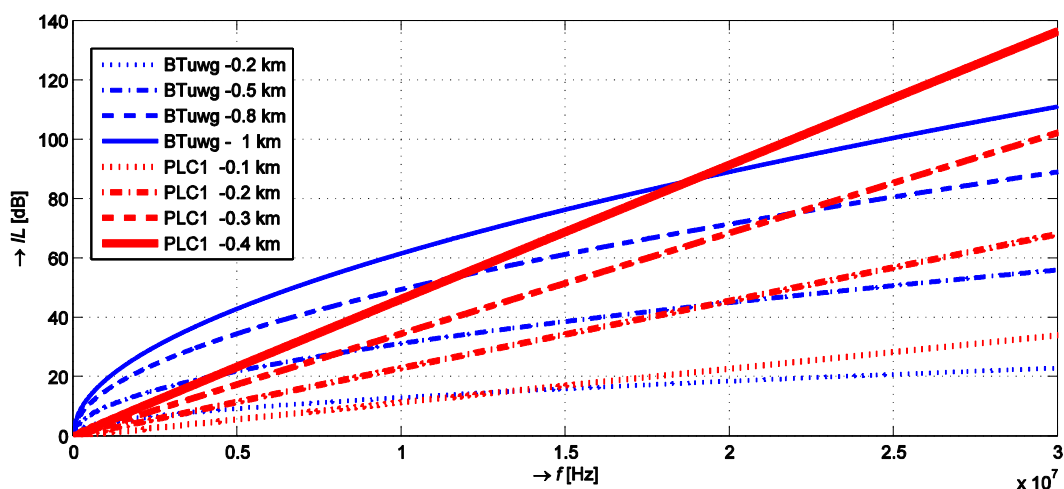
Dosažitelnou přenosovou rychlost u systémů využívajících vícetónových modulací limituje řada vlivů. 6. kapitola habilitační práce byla věnována jejich analýze a srovnání vlastností přenosových kabelů využívaných v technologiích DSL a PLC. Zejména byl zkoumán kmitočtový průběh vložného útlumu a způsob jeho modelování jak u kabelů pro DSL technologie, tak pro PLC technologie a způsoby modelování pro vysoké kmitočty využívané v technologii G.fast. U DSL technologií byla věnována rovněž pozornost přeslechům na blízkém a vzdáleném konci, způsobům jejich modelování a ověření se změřenými průběhy. Byly prezentovány i možnosti jejich potlačení, a to zejména přeslechu na vzdáleném konci, využívané u technologií VDSL2 a G.fast.

Přehledově zde uvedeme témata, která zde byla zkoumána:

- Vložný útlum vedení
 - modely primárních a sekundárních parametrů vedení
 - průběh charakteristické impedance na vyšších kmitočtech
 - měrný útlum
 - modelování vedení o více úsecích
 - vliv zakončovací impedance na vložný útlum
 - modelování napájecích kabelů pro přenos technologiemi PLC
 - porovnání přenosových vlastností telekomunikačních a napájecích kabelů
 - modelování telekomunikačních kabelů pro technologii G.fast

- Přeslechové rušení
 - přeslech na blízkém konci NEXT
 - přeslech na vzdáleném konci FEXT
 - vektorová DMT modulace

Z výše uvedených témat zde uvedme ukázkou z porovnání vložného útlumu telekomunikačního a napájecího kabelu. Bude se jednat o telekomunikační kabel o průměru vodičů 0,5 mm dle modelu BTduwg a napájecí kabel s průřezem vodičů 2,5 mm², dále označený jako PLC1. Průběhy závislosti vložný útlum $IL(f)$ pro různé délky analyzovaných kabelů uvádí obr. 6.1. Velmi orientačně lze říci, že srovnatelný útlum má cca poloviční délka napájecího kabelu v porovnání s telekomunikačním kabelem. Jak je však z obr. 6.1 patrné, vložný útlum porovnávaných kabelů má odlišný kmitočtový průběh. Pokud budeme zkoumat, co je příčinou odlišnosti v kmitočtovém průběhu, je potřeba analyzovat kmitočtové průběhy primárních parametrů vedení. Porovnáme-li kmitočtové závislosti měrného odporu $R(f)$ a měrné vodivosti $G(f)$ pro tuto dvojici kabelů, zjistíme, že hodnoty měrného odporu $R(f)$ jsou podstatně nižší pro napájecí kabel PLC1 oproti telekomunikačnímu a u měrné vodivosti $G(f)$ je tomu přesně naopak. Například na kmitočtu 10 MHz je měrný odpor kabelu PLC1 cca 15% hodnoty kabelu BTduwg, nicméně rozdíl



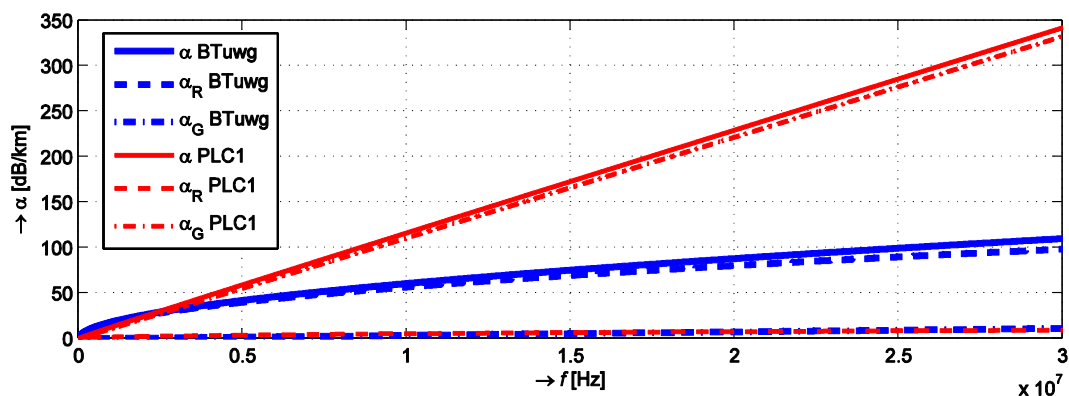
Obr. 6.1. Závislost vložného útlumu IL na kmitočtu pro různé délky telefonního kabelu s průměrem vodičů 0,5 mm (BTduwg) a napájecího s průřezem 2,5 mm² (PLC1).

v hodnotách měrné vodivosti je daleko výraznější. Hodnota měrné vodivosti kabelu BTduwg na kmitočtu 10 MHz je cca 9% hodnoty kabelu PLC1. Zkusme nyní posoudit, jak zásadní vliv mají parametry měrný odpor $R(f)$ a měrná vodivost $G(f)$ na vložný útlum kabelu. Pro posouzení využijeme vztah (6.1), který nám umožní rozdělit a samostatně analyzovat vliv měrného odporu $R(f)$ a měrné vodivosti $G(f)$ na výslednou hodnotu měrného útlumu $\alpha(f)$. Definuujeme tedy jednotlivé části měrného útlumu $\alpha(f)$, a to měrný útlum $\alpha_R(f)$, závislý pouze na hodnotě měrného odporu $R(f)$ a měrný útlum $\alpha_G(f)$ závislý pouze na hodnotě měrné vodivosti $G(f)$.

$$\alpha(f) = \frac{R(f)}{2} \sqrt{\frac{C(f)}{L(f)}} + \frac{G(f)}{2} \sqrt{\frac{L(f)}{C(f)}} = \alpha_R(f) + \alpha_G(f), \quad [\text{Np/km}] \quad (6.1)$$

kde $\alpha_R(f) = \frac{R(f)}{2} \sqrt{\frac{C(f)}{L(f)}}$ a $\alpha_G(f) = \frac{G(f)}{2} \sqrt{\frac{L(f)}{C(f)}}$

Připomeňme, že uvedený vztah platí pro vyšší kmitočty, kde jsou splněny obě podmínky $|j\omega C(f)| \gg G(f)$ a $|j\omega L(f)| \gg R(f)$. Porovnání měrného útlumu $\alpha(f)$ obou kabelů a rovněž tak porovnání jeho dílčích složek, tj. měrný útlum $\alpha_R(f)$ a měrný útlum $\alpha_G(f)$ uvádí obr. 6.2.



Obr. 6.2. Porovnání měrného útlumu $\alpha(f)$, vlivu měrného odporu a svodu telefonního kabelu s průměrem vodičů 0,5 mm (BTduwg) a napájecího kabelu s průřezem 2,5 mm² (PLC1).

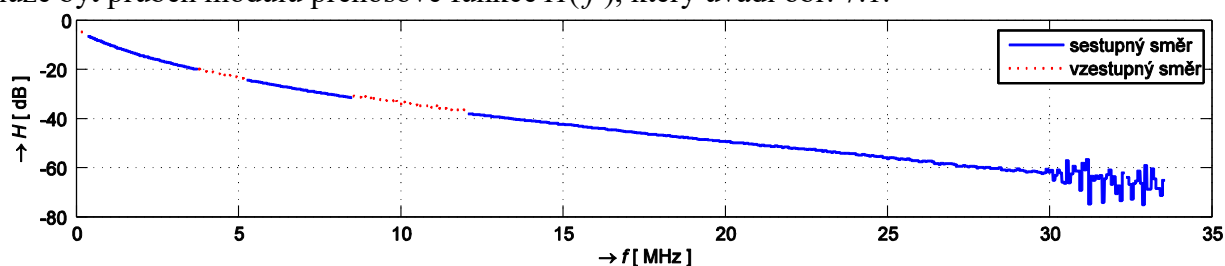
Z obr. 6.2 je patrné, že pro telekomunikační kabel je vliv měrné vodivosti $G(f)$ minimální a v modelech bývá často zanedbáván. Zcela opačně je tomu však u kabelu napájecího, kde je dominantní vliv měrné vodivosti $G(f)$ a naopak vliv měrného odporu $R(f)$ by mohl být zanedbán. Například pro kmitočet 10 MHz je celkový měrný útlum $\alpha(f)$ telekomunikačního kabelu 61 dB/km, z toho měrný útlum $\alpha_R(f)$ závislý na měrném odporu je 57 dB/km a měrný útlum $\alpha_G(f)$ závislý na hodnotě měrné vodivosti je 4 dB/km. Pro napájecí kabel je celkový měrný útlum $\alpha(f)$ kabelu 116 dB/km, z toho měrný útlum $\alpha_R(f)$ závislý na měrném odporu je 5 dB/km a měrný útlum $\alpha_G(f)$ závislý pouze na hodnotě měrné vodivosti je 111 dB/km. Vysoké hodnoty útlumu v porovnání jsou dány vztažením hodnot k délce 1 km, v praktické aplikaci by v této kmitočtové oblasti byly využitelné délky kabelu úměrně menší, např. několik set metrů, a tím přímo úměrně i útlumy nižší.

Odlišnosti v dominanci vlivu měrné vodivosti $G(f)$ a měrného odporu $R(f)$ u daných kabelů pak koresponduje odlišný průběh kmitočtové závislosti měrného útlumu $\alpha(f)$. Je to dáno tím, že měrný odpor $R(f)$ vzrůstá s druhou odmocninou hodnoty kmitočtu, zatímco měrná vodivost $G(f)$ vzrůstá s kmitočtem lineárně. Průběh měrného útlumu $\alpha(f)$ telekomunikačního kabelu v obr. 6.1 tedy odpovídá druhé odmocnině hodnoty kmitočtu, zatímco průběh měrného útlumu $\alpha(f)$ napájecího kabelu (PLC1) lineárně roste s hodnotou kmitočtu. Z fyzikálního hlediska je tato odlišnost dána zejména odlišnými průměry vodičů využívanými v oblasti telekomunikačních kabelů a napájecích kabelů.

7 MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH VLASTNOSTÍ ŠIROKOPÁSMOVÝCH TECHNOLOGIÍ

7. kapitola habilitační práce je věnována možnostem analýzy vlastností širokopásmových technologií v reálných podmínkách. Tedy možnostem získávání informací o aktuálních přenosových vlastnostech modemů při daných podmínkách instalace. Zde mohou být využity informace o vlastnostech navázaného spojení přímo z modemu či testeru emulujícího účastnický modem nebo lze propustnost a další přenosové parametry měřit.

Výhodou širokopásmových technologií je, že díky velkému počtu nosných poskytují modemy či testery emulující modemy celou řadu kmitočtových charakteristik, a tak mohou modemy sloužit i ke kmitočtové analýze přenosového média. Získat tak lze např. přenosovou charakteristiku, rozložení rušení napříč kmitočtovým spektrem a řadu dalších charakteristik. Rovněž lze analyzovat, jak dané přenosové médium dokázala daná technologie využít, a to nejen z dosažené přenosové rychlosti, ale především z průběhu bitové alokace a průběhu odstupů SNR na jednotlivých nosných. Tyto informace pak mohou sloužit k optimalizaci zapojení přenosového média, nalezením problematických míst. Například nezakončené odbočky či další nehomogenity na přenosovém metalickém médiu jsou charakteristické významným snížením hodnoty SNR v úzké oblasti kmitočtového pásma. Bohužel rozsah dostupných informací se u jednotlivých širokopásmových technologií, ale i konkrétních výrobců liší. Navíc u běžných účastnických modemů jsou tyto informace málokdy k dispozici a dostupná je zpravidla jen informace o dosažené přenosové rychlosti, dosažitelné rychlosti a některé provozní statistiky, např. počty korektně a chybně přenesených rámců. Jinak tomu však je u modemu na straně poskytovatele. Zejména DSLAMy, tj. modemy technologií xDSL na straně poskytovatele disponují celou řadou diagnostických možností. V této práci byly využity zejména diagnostické možnosti DSLAMů Nokia, které máme instalovány v laboratoři na Ústavu telekomunikací VUT v Brně. Příkladem může být průběh modulu přenosové funkce $H(f)$, který uvádí obr. 7.1.



Obr. 7.1. Průběh přenosové funkce $H(f)$ VDSL2 998ADE35 při vzdálenosti 400 m.

Rozsah dostupných informací o aktuálních přenosových vlastnostech se v jednotlivých technologiích liší. Zejména v PLC technologiích jsou možnosti analýzy často nedostupné. Výjimečně zde bývají dostupné závislosti odstupů SNR či bitové alokace, zpravidla však pouze hodnoty rychlostí na fyzické vrstvě v obou směrech přenosu.

Objektivní metodou posouzení přenosových vlastností jednotlivých technologií je jejich měření. Hned v úvodu je nutno poznamenat, že jednotlivé technologie nelze porovnávat dle rychlosti udávané výrobcem např. diagnostickým softwarem modemu. Zvláště markantní je rozdíl při porovnání xDSL a PLC technologií. Zatímco xDSL technologie uvádí rychlost na linkové vrstvě, PLC modemy např. standardu HomePlug uvádí hrubou přenosovou rychlost a rychlost na linkové vrstvě je oproti ní cca poloviční, jak bylo demonstrováno v 5. kapitole habilitační práce. Dalším již dříve zmíněným rozdílem xDSL a PLC technologií, který ovlivňuje i metodiku měření je, že xDSL modemy pracují na vyhrazeném médiu, zatímco širokopásmové PLC modemy na sdíleném médiu. Dosaženou rychlost tak bude ovlivňovat počet současně provozovaných modemů, ale i to, zdali testujeme přenos obousměrný či jednosměrný. To již však závisí i na typu dané PLC technologie.

Pro účely testování můžeme využít metody dle RFC2544 [62], dle ITU-T Y.1564 [63] a RFC6349 [64], které jsou běžně síťovými testery podporovány. Každá z uvedených metod nabízí odlišný způsob testování, a proto je vhodné využívat všechny pro komplexní vyhodnocení. Metody RFC2544 a RFC6349 dokáží určit maximální propustnost, RFC2544 využívá transportní protokol UDP, kdežto RFC6349 transportní protokol TCP. Oproti tomu metoda dle ITU-T Y.1564 dokáže ověřit dosažení požadované, přednastavené propustnosti. U metod dle RFC2544 a dle ITU-T Y.1564 lze definovat různé velikosti rámců, pro něž bude realizováno testování. U metody RFC2544 lze definovat set velikostí rámců, pro něž je realizováno měření propustnosti, zpoždění

(latence), ztrátovosti a dalších. U metody dle ITU-T Y.1564 lze definovat více služeb, které jsou testovány individuálně, a poté souběžně. Každý profil má nastavenou přenosovou rychlost, velikost rámců, popř. náhodnou velikost rámců. Dále jsou specifikovány požadované, akceptovatelné hranice rychlosti, zpoždění, změny zpoždění a ztrátovosti. Metoda je určena především pro ověření parametrů připojení do sítě Internet, tzv. SLA (Service-Level Agreements). Jak již bylo uvedeno, metoda RFC6349 využívá transportní protokol TCP, čímž umožňuje vyhodnotit propustnost pro většinu běžných služeb, které využívají TCP protokol. Měření je však ovlivněno volbou velikosti TCP přijímacího okna - RWND (Receive WiNDow), dále jen TCP okna, které je určeno na začátku testu. Jeho nevhodným určením dochází k chybnému určení hodnoty propustnosti. Proto je vhodné realizovat pro porovnání alespoň zkrácené měření metodou RFC2544. Testování pomocí uvedených metod je vhodné realizovat s pomocí dvojice testerů v tzv. duálním režimu, ač testy dle RFC2544 a Y.1564 lze realizovat pouze s jedním přístrojem. Všechny tři metody měří obousměrné zpoždění RTT (Round-Trip Time), pro individuální měření zpoždění v jednotlivých směrech přenosu je nutno k oběma testerům připojit zdroj synchronizace.

V habilitační práci prezentovaná měření měla mít především demonstrativní charakter, naznačila některé vlastnosti přenosových technologií, ale i úskalí při jejich měření. Závislost propustnosti na velikosti rámců se vyskytuje především u PLC technologií. Rovněž bylo porovnáno zpoždění přenosu u technologií VDSL2 a G.fast, z něž je patrné, že technologie G.fast dosahuje lepších parametrů než dnes nasazená technologie VDSL2. Rovněž byla uvedena úskalí při měření propustnosti metodou RFC6349. V tomto směru je potřeba vždy při měření mít představu o dosažitelných přenosových parametrech, slepě nevěřit výsledkům z testerů a pokud možno více metod vzájemně kombinovat. Tato pravidla jsou však obecně platná v nejrůznějších oblastech lidské činnosti.

8 ZÁVĚR

Vícetónové modulace zaznamenaly v posledních dvaceti letech značný vývoj, kde se v oblasti pevných sítí jednalo především o přenos po symetrických metalických přenosových médiích, což je pochopitelné, neboť zde již systémy pracují na hranici přenosové kapacity těchto médií a její dosažení vyžaduje takto složitý modulační systém. Další uplatnění těchto modulací již nyní přichází v systémech pro nesymetrická metalická média, koaxiální kabely, kde nejen poslední verze systému DOCSIS specifikuje využití OFDM modulace, ale i standardy G.fast a G.hn obsahují varianty specifikující přenos po koaxiálním kabelu. Experimentální systémy přenosu po optických kabelech dosahujících až 100 Tbit/s byly zmíněny již v úvodu, a tak se dá očekávat, že tyto modulace naleznou i zde své široké uplatnění.

Habilitační práce zahrnuje řadu odvození, analýz, simulací a výsledků vlastních měření. Cílem bylo vždy ukázat, z čeho byl daný vztah odvozen, za jakých předpokladů platí, či uvést, zda jde o aproximaci získanou z měření. Tento přístup používám i ve své pedagogické praxi, již 10 let garantuji předmět Datová komunikace, a to proto, aby si studenti uvědomili, že řada vztahů byla odvozena za určitých předpokladů, či bylo použito různých zjednodušení, která však mohou mít omezenou platnost.

V rámci habilitační práce, v kapitole č. 3., byl proveden rozbor možnosti implementace modulace s více nosnými s využitím algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Bylo zde poukázáno na několik nedostatků, které limitují dosažitelnou přenosovou rychlost. Rovněž zde byly uvedeny metody, které umožňují vliv těchto nedostatků omezit. Příkladem implementace vícetónových modulací v širokopásmových technologiích pro metalická média byla věnována 4. kapitola habilitační práce. Tato byla věnována technologiím DSL a PLC. Krom porovnání odlišností implementací jednotlivých standardů byl prezentován i vývoj modulací v DSL systémech, vývoj duplexních metod a s využitím vlastních simulací a zejména vlastních výsledků měření byly demonstrovány některé odlišnosti i nedostatky. Alternativním přístupům k realizaci

vícetónové modulace byla věnována 5. kapitola habilitační práce, která zahrnuje i vlastní výzkum v této oblasti, který byl publikován na mezinárodních konferencích, časopisech a byl předmětem výzkumných projektů, např. GAČR. Analýze limitujících vlivů datového přenosu širokopásmovými technologiemi po symetrických metalických vedeních byla věnována 6. kapitola habilitační práce. Krom analýz a odvození jednotlivých parametrů vedení byly prezentovány a porovnány modely kabelů pro DSL a PLC přenosové technologie. Rovněž zde byly analyzovány odlišnosti v průběhu přenosové funkce těchto kabelů a jejich fyzikální základ. Poslední část této kapitoly byla věnována problematice přeslechů, které významně limitují dosažitelnou přenosovou rychlost v DSL přenosových systémech. Jejich aproximace byly porovnány s výsledky měření a byla prezentována analýza vlivu přeslechu na vzdáleném konci v závislosti na délce vedení jako motivace k systému potlačování tohoto přeslechu, který zde byl také prezentován. 7. kapitola habilitační práce byla věnována možnostem analýzy širokopásmových systémů. Byly zde uvedeny diagnostické možnosti širokopásmových systémů, které umožňují jak kmitočtovou analýzu přenosového média, tak analýzu širokopásmových modemů se adaptovat na použité přenosové médium. Rovněž zde byly uvedeny možnosti měření přenosových vlastností širokopásmových modemů, prezentovány výsledky a prezentovány výsledky pro xDSL a PLC systémy. V neposlední řadě bylo poukázáno na úskalí, které testování těmito metodami skýtá.

Z výše uvedeného je patrné, že snahou byl komplexní přístup k problematice širokopásmových technologií využívající metalická přenosová média. Jak bylo rovněž uvedeno, dá se očekávat, že následně vícetónové přenosové technologie najdou své široké uplatnění na optických přenosových médiích, ač jejich výzkum a vývoj pro metalická média stále pokračuje. V roce 2020 ITU-T specifikovalo v [65] výkonové spektrální masky pro připravovanou technologii G.mgfast a v nejbližší době lze očekávat standard specifikující tuto technologii. Opět se zde očekává, dle prvních informací, inovační standard, který oproti standardu G.fast přinese řadu nových funkcionalit, a to zejména inovaci v realizaci duplexního přenosu.

POUŽITÉ SYMBOLY V MATEMATICKÝCH ZÁPÍSECH

a, A, A_B, AB, \dots	- proměnná
A, a, A_b, \dots	- konstanta
$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \dots$	- vektor
$a_n, a(n), \dots$	- Je-li \mathbf{a} vektor, jedná se o jeho n -tý prvek vektoru
$A(b), a(b), \dots$	- proměnná A, a je závislá na proměnné b
\mathbf{a}^k, \dots	- k -tý vektor \mathbf{a}
$a_n^k, a^k(n), \dots$	- n -tý prvek k -tého vektoru \mathbf{a}
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \dots$	- matice
a^*, \dots	- komplexně sdružené číslo k číslu a
$\Re \{a\}, \dots$	- reálná část čísla a
$\Im \{a\}, \dots$	- imaginární část čísla a
$\text{ceil}\{a\}, \dots$	- nejbližší nižší celé číslo
$\mathbf{a}^T, \mathbf{A}^T, \dots$	- transponovaný vektor, matice
$\mathbf{a}^H, \mathbf{A}^H, \dots$	- Hermitovsky sdružený vektor, matice
\mathbf{A}^{-1}	- inverzní matice
$\text{diag}(\mathbf{a})$	- diagonální matice s vektorem \mathbf{a} v hlavní diagonále
$\text{diag}(\mathbf{A})$	- diagonála matice \mathbf{A}
$\hat{a}, \hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{A}}$	- odhad proměnné a , vektoru \mathbf{a} , matice \mathbf{A}
$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$	- násobení vektorů prvek po prvku $[a_0 \cdot b_0 \quad a_1 \cdot b_1 \quad \dots]$
$\mathbf{A} \cdot \mathbf{b}, \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}^T$	- násobení matic a vektorů
$\mathbf{a} * \mathbf{b}$	- konvoluce dvou vektorů

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Anglický význam	Český význam, vysvětlení
A/D	Analog-Digital	převod analogového signálu na číslicový
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	digitální účastnická přípojka s asymetrickým datovým provozem
BPL	Broadband over Power Lines	vysokorychlostní přenos po napájecích rozvodech
CP	Cyclic Prefix	cyklická předpona
CPE	Customer Premises Equipment	účastnický modem
CS	Cyclic Suffix	cyklická přípona
CSMA/CA	Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance	metoda vícenásobného přístupu
DAB	Digital Audio Broadcasting	digitální rádiové vysílání
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification	standard datového přenosu po koaxiálních kabelech
DVB	Digital Video Broadcasting	digitální televizní vysílání

DMT	Discrete MultiTone modulation	Diskrétní vícetónová modulace
DS, DW	DownStream, DoWnstream	sestupný směr datového přenosu
DSL	Digital Subscriber Line	digitální účastnická přípojka
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer	DSL přístupové zařízení poskytovatele
DWMT	Discrete Wavelet MultiTone	vícetónové modulace realizovaná vlnkovou transformací
DS2	Defidev System 2	proprietární standard PLC technologie
EC	Echo Canceller	potlačovač ozvěnového signálu
FDD	Frequency Division Duplex	kmitočtově dělený duplex
FDM	Frequency Division Multiplex	kmitočtové dělený multiplex
FMT	Filtered Multitone Modulation	vícetónová modulace realizovaná banky filtrů
FFT	Fast Fourier Transform	rychlá Fourierova transformace
FIR	Finite Impulse Response	číslicový filtr s konečnou impulsní odezvou
FTU	FAST Transceiver Unit	označení modemu v technologii G.fast
G.fast	Fast access to subscriber terminals	gigabitová digitální účastnická přípojka
G.hn	home network	ITU-T standard PLC technologie
G.mgfast	Multi-Gigabit FAST	multi-gigabitová digitální účastnická přípojka
HomePlug		PLC technologie
ICI	Inter-Carrier Interference	mezitónová interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Eng.	standardizační organizace
IFFT	Infers Fast Fourier Transform	inverzní rychlá Fourierova transformace
IFWT	Inverse Fast Wavelet Transform	inverzní rychlá vlnková transformace
IIR	Infinite Impulse Response	číslicový filtr s nekonečnou impulsní odezvou
ISI	Inter-Symbol interference	mezisymbolová interference
ISCI	Inter-Symbol inter-Carrier interference	mezisymbolová-mezitónová interference
ITU-T	International Telecommunication Union- Telecommunication	Mezinárodní telekomunikační unie pro telekomunikační standardizaci
LTE	Long Term Evolution	typ mobilní datové sítě
MCM	Multi-Carrier Modulation	vícetónová modulace
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	metoda vícecestného šíření signálu
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	typ vícetónové modulace - Ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením
PAM	Pulse Amplitude Modulation	pulsní amplitudová modulace
PAR	Peak-to-Average Power Ratio	poměr maximální a střední hodnoty výkonu
PLC	PowerLine Communication	technologie přenosu po napájecích rozvodech
POTS	Plane Old Telephone Service	telefonní služba
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	kvadrurní amplitudová modulace
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	kvadrurní fázové klíčování
SCM	Single Carrier Modulation	modulace s jednou nosnou
SNR	Signal to Noisy Ratio	odstup signálu od šumu
TDD	Time Division Duplex	časově dělený duplex
TDM	Time Division Multiplex	časově dělený multiplex
TEQ	Time domain Equalizer	ekvalizér v časové oblasti
UP, US	UPstream, UpStream	vzestupný směr datového přenosu
VDSL	Very high-speed Digital Subscriber Line	DSL přípojka s vysokou přenosovou rychlostí
WLAN	Wireless Local Area Network	bezdrátová místní síť

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PROAKIS J.G.. *Digital Communications*. 3rd ed. New York: Mac Graw-Hill. 1995, ISBN 0-07232-111-3
- [2] ŠILHAVÝ, P. Modulace DMT. *Elektrorevue* - Internetový časopis (<http://www.elektrorevue.cz>), 2001, roč. 2001, č. 6. ISSN: 1213- 1539.
- [3] ŠILHAVÝ, P. Ekvalizace v časové oblasti v modulačních systémech využívajících vícetónovou modulaci. *Elektrorevue* - Internetový časopis (<http://www.elektrorevue.cz>), 2007, roč. 2007, č. 5. ISSN: 1213-1539.
- [4] ŠILHAVÝ, P. Time domain equalization in modern communication systems based on discrete multitone modulation. *In Sixth International Conference of Networking*. Sainte-Luce, Martinique, France: IARIA, LCN 2006941010, 2007. ISBN: 0-7695-2805-8.
- [5] CHEN, Walter Y.. *Simulation Techniques and Standards Development for Digital Subscriber Line Systems*. Indianapolis, USA: Macmillan Technical Publishing, 1998. ISBN 1-57870-017-5
- [6] RAUSCHMAYER, D. J.. *ADSL/VDSL Principles: A Practical and Precise Study of Asymmetric Digital Subscriber Lines and Very High Speed Digital Subscriber Lines*. Indianapolis, USA: Macmillan Technical Publishing, 1999. ISBN 1-57870-015-9
- [7] DOSTERT, Klaus.. *Powerline Communications*. Upper Saddle River, NJ 07458 : Prentice Hall PTR, 2001. ISBN 0-13-029342-3.
- [8] *Cable reference models for simulating metallic access networks*, ETSI STC TM6 meeting, 22 - 26 June 1998, Lulea, Sweden.
- [9] CAÑETE, F., CORTES, J., ENTRAMBASAGUAS, L. J.. A channel model proposal for indoor power line communications. *IEEE Communication Magazine*, vol. 49, no. 12, pp. 166–174, 2011. doi: 0.1109/MCOM.2011.6094022.
- [10] ACATAUASSU, D., HÖST, S., BERG, C. Lu. M., KLAUTAU, A., BÖRJESSON, P. O.. Simple and causal copper cable model suitable for G.fast frequencies, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 11, Nov 2014, ISSN 1558-0857.
- [11] QIAN, D., HUANG, M., HUANG, E., SHAO E., HU, J., WANG, T.. High Capacity/Spectral Efficiency 101.7-Tb/s W DM Transmission Using PDM-128QAM-OFDM Over 165-km SSMF Within C- and L-Bands. *IEEE Journal of Light wave Technology*, Vol. 30, No. 10, 2012, ISSN 0733-8724.
- [12] KŘEPELKA, V., VAGNER, P.. *Měření přeslechových vlastností kabelů přístupové sítě pro nasazení technologií xDSL*. Technická zpráva SPT TELECOM ND33- /99. 1999.
- [13] ITU-T Recommendation G.993.5: Self-FEXT Cancellation (Vectoring) for Use with VDSL2 Transceivers. 2010.
- [14] OKSMAN, V., SCENK, H., CLAUSEN, A., CIOFFI, J. M., MOHSENI, M., GINIS, G., NUZMAN, C., MEAS, J., PEETERS, M., FISHER, K., ERIKSSON, P.-E. The ITU-T's New G.Vector Standard Proliferates 100 Mb/s DSL. *IEEE Communication Magazine*, vol. 48, no. 10, pp. 140-148, Oct. 2010. doi: 10.1109/MCOM.2010.5594689.
- [15] XIONG FUQIN. *Digital modulation techniques*. UK: Artech House Publishers Inc., 2000. ISBN 0-89006-970-0
- [16] GINSBURG DAVID. *Implementing ADSL*. Addison-Wesley Longman, Inc., 1999. ISBN 0-201-65760-0

- [17] SUMMERS CHARLES K.. *ADSL standards, implementation and architecture*. CRC Press LL, 2000. ISBN 0-8493-9595-X
- [18] HARTE L., KIKTA R.. *Delivering xDSL*. USA: McGraw-Hill Inc., 2001. ISBN 0-07-134837-9
- [19] DOELZ M. L., HEALD E. T., MARTIN D. L., Binary data transmission techniques for linear systems. *Proceedings of the IRE*. May 1957, DOI: 10.1109/JRPROC.1957. 278415.
- [20] WEINSTEIN S.B.. Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform. *IEEE Transactions on communication*, October 1971, vol.19, no.5, pp.628-634.
- [21] KALET I.. The Multitone channel. *IEEE Transactions on communication*, February 1989, vol.37, no.2, pp.119-124.
- [22] BINGHAM, John A. C.. *ADSL, VDSL, and multicarrier modulation*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000. ISBN 0-471-29099-8.
- [23] BINGHAM J. A. C.. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has Come. *IEEE Communication Magazine*, May 1990, vol.28, no.5, pp.5 – 14.
- [24] HANZO, L., NG, S.X., KELLER, T. WEBB, W. *Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems*. Wiley-IEEE Press, 2004. ISBN 0-470-09468-0.
- [25] CHOW JACKY S., TU JERRY C., CIOFFI JOHN M.. A Discrete Multitone Transceiver System for HDSL Applications. *IEEE Journal on selected areas in communications*, August 1991, vol. 9, no.6, pp. 895 – 908.
- [26] CHOW, J.S.; Cioffi J.M.. A cost-effective maximum likelihood receiver for multicarrier systems, *Proc. IEEE Int. Conf.Comm.*, (Chicago, IL), June 1992, vol. 2, pp. 948-952.
- [27] RUIZ A., CIOFFI JOHN M., KASTURIA S. Discrete Multiple Tone Modulation with Coset Coding for the Spectrally Shaped Channel. *IEEE Transactions on communication*, June1992, vol.40., no.6, pp.1012 – 1029.
- [28] CHOW P. S., CIOFFI J. M., BINGHAM J. A. C.. A Practical Discrete Multitone Transceiver Loading Algorithm for Data Transmission over Spectrally Shaped Channels. *IEEE Transactions on communication*, 1995, vol.43, no.2/3/4, pp.773 – 775.
- [29] SANDBERG STUART D., TZANNES MICHAEL A.. Overlapped Discrete Multitone Modulation for High Speed Copper Wire Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, December 1995, vol. 13, no.9, pp. 1571 – 1585.
- [30] TAN J., STUBER G. L.. Constant envelope multi-carrier modulation. *Proceedings of IEEE Milcom 2002*, October 2002, ISBN: 0-7803-7625-0.
- [31] TONELLO A. M.. A novel multi-carrier scheme: Cyclic block filtered multitone modulation. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2013. ISBN: 978-1-4673-3122-7.
- [32] LEE I., CIOFFI J.M.. A fast computation algorithm for the decision feedback equalizer. *IEEE Transactions on Communication*, November 1995, vol.43, no.11, pp.2742-2749.
- [33] SJÖBERG F., ISAKSSON M., NILSSON R., ÖDLING P., WILSON S.K., BÖRJESSON P.O.. Zipper: A Duplex Method for VDSL Based on DMT. *IEEE Transactions on Communication*, August 1999, vol.47, no.8, pp.1245 – 1251.

- [34] SJÖBERG F., NILSSON R., ISAKSSON M., ÖDLING P.. Asynchronous Zipper, *IEEE International Conference on Communications*, June 1999, ISBN: 0-7803-5284-X.
- [35] CHERUBINI G., ELEFThERIOU E., OELCER S.. *FMT-based physical medium specific function for VDSL*. ANSI T1E1.4/99-554, April 1999.
- [36] BENVENUTO, N., TOMASIN, S., TOMBA, L. Equalization methods in DMT and FMT Systems for Broadband Wireless Communications. *In IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 9. [s.l.] : [s.n.], 2002. s. 1413-1418
- [37] BERENQUER, I., WASSELL, J. I., FMT modulation: receiver filter bank definition for the derivation of an efficient implementation, *IEEE 7th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, Sep. 2002
- [38] CHERUBINI G., ELEFThERIOU E., OLCER S., CIOFFI .M.. Filter bank modulation techniques for VHDSL. *IEEE Communication Magazine*, May 2000, pp.98 - 104.
- [39] ŠILHAVÝ, P.. Half-overlap subchannel Filtered MultiTone Modulation with the small delay. *In The Seventh International Conference of Networking*. Cancun, Mexico: IARIA, LCN 2007941923, 2008. ISBN: 978-0-7695-3106-9.
- [40] SAYED, ALI H. *Fundamentals of Adaptive Filtering*, Wiley, NJ, 2003 ISBN 0-471-46126-1.
- [41] ŠILHAVÝ, P., KRAJSA, O.. Half-overlap Subchannel Filtered MultiTone Modulation and Its Implementation. *In Discrete Time Systems*, s. 363-382, IntechOpen, 2011, DOI:10.5772/14030, ISBN: 978-953-307-200-5.
- [42] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J., ŠILHAVÝ, P. Two-port Network Transfer Function for Power Line Topology Modeling. *Radioengineering*, 2012, vol. 21, no. 1, p. 356-363. ISSN: 1210-2512.
- [43] MLÝNEK, P., MIŠUREC, J., ŠILH[42AVÝ, P., FUJDIK, R., SLÁČIK, J., HASIRCI, Z. Simulation of Achievable Data Rates of Broadband Power Line Communication for Smart Metering. *Applied Sciences - Basel*, 2019, vol. 9, no. 8, p. 1-22. ISSN: 2076-3417.
- [44] MLÝNEK, P., MIŠUREC, J., TOMAN, P., ŠILHAVÝ, P., FUJDIK, R., SLÁČIK, J., HASIRCI, Z., SAMOUYLOV, K. Performance Testing and Methodology for Evaluation of Power Line Communication. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 2018, vol. 24, no. 3, p. 88-95. ISSN: 1392-1215.
- [45] ANSI T1.413-1998: Asymmetric digital subscriber line (ADSL) metallic interface, issue 2, 1998.
- [46] ITU-T Recommendation G.992.1: Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers. ITU-T, June 1999.
- [47] ITU-T Recommendation G.992.3: Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2). ITU-T, April 2009.
- [48] ITU-T Recommendation G.992.5: Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2) – Extended bandwidth (ADSL2plus). ITU-T, January 2009.
- [49] ITU-T Recommendation G.993.1: Very high speed digital subscriber line foundation. ITU-T, June 2004.
- [50] ITU-T Recommendation G.993.2: Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2). ITU-T, February 2019.

- [51] ITU-T Recommendation G.993.5: Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers. ITU-T, February 2019.
- [52] ITU-T Recommendation G.996.1: Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers. ITU-T, February 2001.
- [53] ITU-T Recommendation G.9700: Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Power spectral density specification. ITU-T, April 2014.
- [54] ITU-T Recommendation G.9701: Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Physical layer specification. ITU-T, March 2019.
- [55] HomePlug Specification, Version 1.0.1, December 2001.
- [56] HomePlug AV Specification, Version 1.1, May 2007.
- [57] HomePlug AV Specification, Version 2.1, February 2014.
- [58] IEEE Standard 1901-2010: Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, December 2010.
- [59] ITU-T Recommendation G.9960: Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – System architecture and physical layer specification. ITU-T, November 2018.
- [60] ITU-T Recommendation G.9964: Unified high-speed wireline-based home networking transceivers – Power spectral density specification. ITU-T, September 2016.
- [61] ETSI Recommendation TS 101 388 v1.4.1: Access Terminals Transmission and Multiplexing (ATTM); Access transmission systems on metallic access cables; Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)-European specific requirements. ETSI, 2007.
- [62] IETF - RFC 2544. Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices. Internet Engineering Task Force. Network Working Group, 1999.
- [63] ITU-T Recommendation Y.1564: Ethernet service activation test methodology. ITU-T, February 2016.
- [64] IETF - RFC6349. Framework for TCP Throughput Testing. Internet Engineering Task Force. Network Working Group, 2011.
- [65] ITU-T Recommendation G.9710: Multi-gigabit fast access to subscriber terminals (MGfast) – Power spectral density specification. ITU-T, February 2020.

ABSTRACT

Broadband transmission technologies based on multicarrier modulations have a broad area of application on metallic cables, wireless transmission and a wide application on optical cables can be expected. The work is generally focused on implementations of multicarrier modulations based on the FFT (Fast Fourier Transform) algorithm for baseband and passband transmission. The disadvantages of this implementation are analyzed and the methods of its suppression are mentioned. Also, alternative approaches of multicarrier modulation implementation are presented. The work is particularly focused on transmission technologies for metallic cables, mainly on DSL (Digital Subscriber Line) and PLC (Power Line Communication) technologies. The approaches to modeling of influences, which limit data transmission, are presented. Based on models the transmission properties of transmission mediums used in the mentioned technologies are compared. Last but not least, the possibilities of real system analysis and measurements are presented. The work is written in order to have both scientific and pedagogical contribution. The pedagogical contribution addresses the issue of the introduction to broadband transmission technologies based on multicarrier modulations and its implementation, properties of real systems, limiting influences and measurement methods. The scientific contribution contains author's original results in the domains of modulation system optimization, alternative modulation approaches, analysis of limiting influences, etc.