

Výkonnost přípojek G.fast odhadnutá pomocí simulačního modelu v porovnání s experimenty na reálné technologii

The performance of G.fast line estimated using a simulation model in comparison with experiments on real technology

Jiří Vodrážka, Petr Jareš

vodrazka,jaresp@fel.cvut.cz

Katedra telekomunikační techniky, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze

DOI: -

Abstract: G.fast technology (ITU-T working designation, also Gigabit DSL) is currently the latest technology for data transmission in metallic access networks. The construction of hybrid FTTx lines (Fiber To The "x") is expected with G.fast metallic sections. For operation in real telecommunication networks, the G.fast technology is currently fully prepared only in its narrowest frequency band. For this reason, it is possible to rely primarily on simulations and modeling for various transmission environments and parameters. Based on experience in the band up to 106 MHz, results can be extrapolated for wider bands. The paper presents transmission performance calculations for specific metallic lines and specific spectral power density profiles. Theoretical calculations are confronted with the real measurements. The measurements were performed at an experimental workplace built at the Department of Telecommunication Engineering, FEE, CTU in Prague with the help of ZyXEL equipment.

Výkonnost přípojek G.fast odhadnutá pomocí simulačního modelu v porovnání s experimenty na reálné technologii

Jiří Vodrážka, Petr Jareš

Katedra telekomunikační techniky, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze
Email: {vodrazka,jaresp}@fel.cvut.cz

Abstrakt – Technologie G.fast (pracovní označení ITU-T, které se ujalo, jinak též Gigabit DSL) je prozatím nejnovější technologií pro přenos dat v metalických přístupových sítích a předpokládá se její využití především pro budování hybridních přípojek FTTx (Fiber To The „x“). Pro provoz v reálných telekomunikačních sítích, je technologie G.fast prozatím plně připravena jen ve svém nejužším kmitočtovém pásmu. Z tohoto důvodu se lze pro účely komplexních analýz opírat především o simulace a modelování pro různá přenosová prostředí a parametry. Na základě zkušeností v pásmu do 106 MHz lze extrapolovat výsledky i pro širší pásma. V článku jsou prezentovány výpočty výkonnosti přenosu pro konkrétní metalická vedení a konkrétní profily spektrální výkonové hustoty. Teoretické výpočty jsou konfrontovány s reálnými měřeními. Měření byla provedena na experimentálním pracovišti vybudovaném na katedře telekomunikační techniky, FEL, ČVUT v Praze za pomoci zařízení firmy ZyXEL.

Klíčová slova: Access network; NGA; VHCN; Twisted pair; xDSL; G.fast.

1 Úvod

Přípojky označované jako G.fast, jsou 4. generací systémů xDSL (Digital Subscriber Line) dle doporučení ITU-T G.9700/ITU-T G.9701 [6] [7]. Přípojky G.fast jsou určeny pro metalické přístupové sítě, konkrétně pro tzv. poslední míli (reálně metalická část sítě max. několik málo stovek metrů). Přípojky G.fast mají několik nových vlastností oproti předchozí generaci přípojek VDSL2 (Very High Bit Rate DSL) [1]. Hlavním cílem je dosažení vyšších přenosových rychlostí, než jaké jsou schopny dosáhnout stávající přípojky DSL (Digital Subscriber Line). Požadovaná přenosová rychlost je až 1 Gbit/s symetricky na cca 100 m délky účastnického vedení. Připravené rozšíření Multi-G.fast (ITU-T G.9711) umožní přenosové rychlosti 5 až 10 Gbit/s. Pro dosažení vysokých přenosových rychlostí je nutné adekvátně zkrátit délku účastnického vedení a také potlačovat přeslechy typu FEXT (Far End Cross-talk) za pomoci modulace VDMT (Vectored Discrete Multi-tone), tzv. „vektoringu“ známého již z VDSL2.

2 Přípojky G.fast

Z důvodů krátké vzdálenosti metalického vedení jsou přípojky G.fast určeny především pro hybridní přístupové sítě

FTTdb (Fiber To The distribution Point). V tomto typu sítě se předpokládá, že umístění opticky připojených distribučních uzlů (Remote DSLAM – DSL Access Multiplexor) bude velmi blízko koncových účastníků. Délka účastnického vedení bude do 250 m, spíše méně. FTTdb je obdoba konceptu sítě FTTB (Fiber To The Building) pro rozptýlenou zástavbu (rodinné domky). Vzhledem k optickému připojení distribučních uzlů umožňují přípojky G.fast volitelně využít tzv. inverzní napájení po metalické části sítě od koncových uživatelů.

Technologie G.fast má takové přenosové parametry [2], že je schopna plnit požadavky, které jsou kladeny na síť NGN (Next Generation Network) [3], případně i gigabitové sítě VHCN (Very High Capacity Network) pro přístup k internetu.

Plnění požadavků pro přístupové sítě NGN [5] přípojky G.fast souvisí s dvěma klíčovými oblastmi. První oblastí je způsob navyšování propustnosti, druhou oblastí je zvyšování spolehlivosti.

Výkonnost přenosu přípojky DSL je možné navýšit dvěma způsoby. Zprv je nezbytné aktivně využívat potlačování přeslechů pomocí modulace VDMT (Vectored DMT). Zadruté je možné navýšit výkonost přenosu rozšířením kmitočtového pásma. Tuto možnost využívaly i předchozí generace systémů xDSL. U přípojky G.fast je požadována spektrální kompatibilita se stávajícími přípojkami VDSL2 a respektování existence dalších služeb ve vyšších kmitočtových pásmech radiového spektra – například respektování pro DAB (Digital Audio Broadcasting). Pro tyto účely je definováno několik masek PSD (Power Spectral Density), včetně operátorem definovaných výřezů ve spektru podle místních podmínek. V závislosti na parametrech přenosového prostředí mohou být počátky kmitočtového pásma přípojky G.fast na 2,2 MHz; 18 MHz a 30 MHz. Konec kmitočtového pásma je definován kmitočtem 106 MHz nebo 212 MHz [6]. V budoucnu se uvažuje také o rozšíření kmitočtového pásma do 424 MHz a 848 MHz (rozšíření Multi-G.fast). Zvýšení spolehlivosti přípojky a celé infrastruktury je docíleno již zmíněným inverzním napájením nebo využitím více souběžných vedení a fantómových okruhů [4].

Metalická vedení se používají i v řadě průmyslových aplikací. Např. přípojky SHDSL (Single-pair High-bit-rate DSL) a VDSL se využívají v energetických sítích Smart Grid pro připojení spínacích a rozpínacích stanic na úrovni VN. V souvislosti s instalací optických kabelů v energetických sítích lze i zde využít kombinace přenosových médií s metalickým segmentem osazeným technologií G.fast. V průmyslových provozech se dá nahradit původní sběrnice RS-485 segmenty G.fast. Obecně je vhodná tato technologie tam, kde není možné, z důvodů parametrů kabeláže (útlum,

přeslechy, odrazy) nevyhovujících specifikacím kategorie 5E a vyšším, použít Ethernet. A také tam, kde je k dispozici jen jediný pár v kabelu, či vzdálenost přesahuje referenční délku LAN (Local Area Network) segmentu 100 metrů.

3 Modelování přípojek G.fast

Simulace přípojek G.fast využívají doporučené analytické modely přenosového prostředí a modulační metody. V modelech přenosového prostředí se modelují parametry vedení, parametry a charakter rušení. S ohledem na rozšířené kmitočtové pásmo nezle pro dostatečně přesné modelování parametrů metalického vedení využít klasické modely, jakou jsou například modely British Telecom. Pro přípojky G.fast se využívá model s tzv. podélnou impedancí a příčnou admitancí. Pro modelování vlivů od zdrojů externího rušení, se využívají funkce pro útlum přeslechu [8].

K modelování přípojek G.fast (k dispozici jsou samozřejmě i modely předchozích generací xDSL) byl na katedře telekomunikační techniky, FEL, ČVUT v Praze sestaven simulační program, dostupný též ve své základní verzi na webových stránkách [9].

4 Experimentální pracoviště

Pro validaci schopností simulátoru G.fast bylo sestaveno experimentální pracoviště, které je vybaveno metalickými kabely a přenosovými systémy, které se obvykle využívají pro koncepci FTTx. Konkrétně je pracoviště vybaveno více typy metalických vedení, které umožňují ověřovat parametry přenosových systémů ve scénářích typických pro datové sítě privátních uživatelů i pro situace v různých druzích průmyslových aplikací. Jedná se o kabely pro vnitřní instalace budov typu UTP (Unshielded Twisted Pair, kategorie 5E), kabely SYKFY (odpovídá kategorii 3) v délkách 100 m a 305 m. Pracoviště je také vybaveno vedeními, které jsou využívány v posledním úseku přístupové sítě mezi koncem optické infrastruktury a koncovým zákazníkem. Konkrétně se jedná se o místní úložný kabel typu TCEPKPFLE 75x4x0,4 mm v délce 100 m a 400 m.

Experimentální pracoviště je dále vybaveno dvojicí ústřednových jednotek Remote DSLAM typu ZyXEL GES2104-A55 disponujících po čtyřech G.fast portech [10]. Účastnické modemy jsou typu Zyxel XMG3927-B Series Dual-Band Wireless AC/N, které podporují VDSL2 a G.fast a fungují zároveň jako účastnický router/switch/Wi-Fi access point. Součástí experimentálního pracoviště jsou i měřicí přístroje, jako spektrální, vektorové analyzátoři, generátory rušení a šumu (Arbitrary Waveform Generators).

5 Příklad porovnání provedených simulací s experimenty

Byla provedena reálná měření k ověření funkcionality experimentálního pracoviště.

- Porty DSLAM byly nastaveny na režim G.fast s nejvyšší rychlostí (tj. sdílená rychlost 1 Gbit/s pro oba směry upstream + downstream).
- Kmitočtové pásmo portů DSLAM bylo nastaveno na šířku 106 MHz, tj. od 43. subkanálu (2,22525 MHz) do 2047. kanálu (105,93225 MHz).
- Dělení sdílené rychlosti 1 Gbit/s datového spoje bylo nastaveno symetricky 50:50 (odpovídá parametru MDS 18).
- Hodnota šumové rezervy NM = 6 dB (Noise Margin).

Výsledky měření reálné výkonosti přenosu v závislosti na délce metalického vedení, jsou uvedeny v tabulce 1. Je uveden součet přenosových rychlostí obou směrů upstream i downstream a vyjadřuje tak celkovou kapacitu datového spoje. Tato kapacita je u přípojek G.fast sdílena principem TDD (Time Division Duplex).

Tabulka 1: Porovnání výsledků experimentu a simulací pro místní telekomunikační kabel TCEPKPFLE.

Délka přípojky	Změřená přenosová rychlost	Odhadnutá přenosová rychlost	Relativní odchylka rychlostí
[m]	[Mbit/s]	[Mbit/s]	[%]
100	845	963	14
200	540	508	-6
400	280	225	-19
500	173	157	-9

Výsledky byly získány pro bílý šum na pozadí AWGN (Additive White Gaussian Noise) -140 dBm/Hz a průměrnou odhadnutou hodnotu kódového zisku CG = 8,6 dB (Code Gain). Kódový zisk vychází z experimentálních hodnot poskytnutých diagnostikou zařízení. Simulované hodnoty byly pro objektivnější porovnání očištěné o redundantní opravné symboly FEC (Forward Error Correction) a vestavěný služební komunikační kanál.

Odchylky naměřených a simulovaných (odhadnutých) přenosových rychlostí vyčíslené v posledním sloupci tabulky 1 vycházejí poměrně vysoké. Jedním z důvodů jsou v simulacích nezahrnuté negativní vlivy, jako nehomogenita vedení (důsledkem je vyšší přenosová rychlost simulace, projevuje se pro vzdálenost 100 m) a dále zjednodušené modelování šumu AWGN (ve skutečnosti je šum na pozadí po potlačení přeslechů kmitočtově závislý a ovlivněný i obtížně predikovatelným radiovým rušením). Lze tedy konstatovat, že za zjednodušujících podmínek provedené simulace jsou použitelné jen pro hrubý odhad výkonosti přenosu. Pro přesnější zjištění přenosové rychlosti je vhodné provést experiment na daném komunikačním kanále.

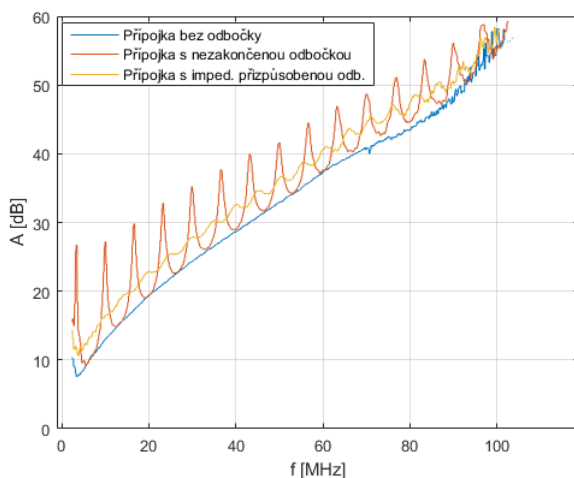
Simulace byly provedeny s využitím vysílacích parametrů v souladu s doporučením pro přípojky G.fast. Vysílací PSD maska má hodnotu -65 dBm/Hz od počátku využívaného kmitočtového pásma do 30 MHz a klesá na -76 dBm/Hz na kmitočtu 106 MHz.

6 Grafické výstupy a ukázky parametrů

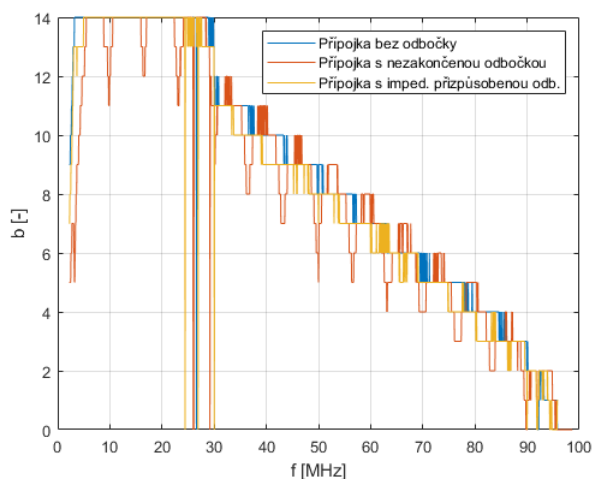
Byla provedena také demonstrační měření vlivu nezakončené a zakončené odbočky na útlumovou charakteristiku přenosové cesty.

Hodnoty v grafech na obrázku 1 a 2 jsou poskytnuty interní diagnostikou zařízení DSLAM. Vedení bylo v tomto případě typu UTP kategorie 5E o délce 200 m, délka odbočky byla 20 m a byla umístěna v polovině vedení, tedy ve vzdálenosti 100 m od počátku vedení.

Na následujících grafech je znázorněna útlumová charakteristika (obrázek 1) a bitová alokace (obrázek 2 – bitové skupiny mapované na jednotlivé subkanály podle aktuálního poměru signálu k šumu – SNR, Signal-to-noise Ratio) pro tři uvažované případy.



Obrázek 1: Grafy kmitočtové závislosti útlumu poskytnuté interní diagnostikou DSLAM na vedení UTP o délce 200 m (modře), pro totéž vedení s nezakončenou odbočkou o délce 20 m (červeně) a pro stejnou odbočku impedančně přizpůsobenou (žlutě).



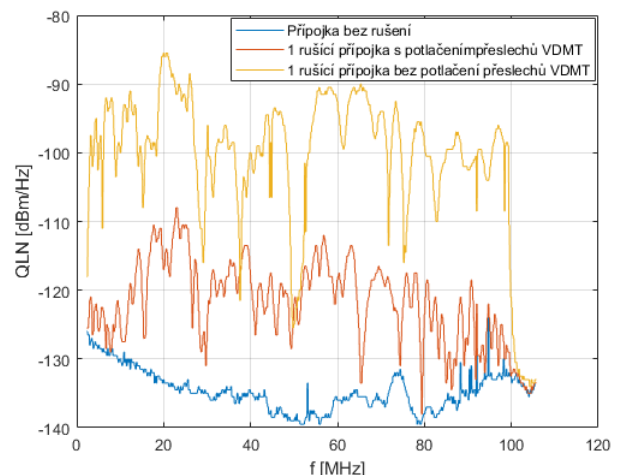
Obrázek 2: Grafy kmitočtové závislosti bitové alokace poskytnuté interní diagnostikou DSLAM na vedení UTP o délce 200 m (modře), pro totéž vedení s nezakončenou odbočkou o délce 20 m (červeně) a pro stejnou odbočku impedančně přizpůsobenou (žlutě).

7 Ověření funkce potlačování přeslechů

Bylo provedeno i měření vlivu koordinace vysílání modulací VDMT na výkonost přenosu. Ve scénářích měření byly ve svazku metalického kabelu aktivní vždy dvě přípojky G.fast. Jak ukazuje tabulka 2, v prvním scénáři byly obě přípojky řízeny jedním DSLAM a vysílání bylo koordinováno, tedy pomocí modulace VDMT byly potlačovány přeslechy typu FEXT. V druhém scénáři byly souběžně přípojky řízeny dvěma různými DSLAM, tedy bez koordinace a bez potlačování přeslechů. Vedení bylo typu TCEPKPFLE o délce 100 m.

Tabulka 2: Porovnání výsledků experimentu – účinnost potlačování přeslechů za pomoci modulace VDMT (vektoring).

G.fast	Číslo přípojky	Rychlost upstream	Rychlost downstream	Snížení celkové rychlosti
Scénář		[Mbit/s]	[Mbit/s]	[%]
S potlačovacím přeslechem VDMT	1	427	395	97
	2	431	398	98
Bez potlačování přeslechu VDMT	1	106	124	27
	2	97	140	28



Obrázek 3: Graf kmitočtové závislosti spektrální výkonové hustoty šumu (QLN) poskytnuté interní diagnostikou DSLAM pro případ bez rušení (modře), rušení jednou přípojkou s potlačováním přeslechů VDMT (červeně), rušení jednou přípojkou bez potlačování přeslechů VDMT (žlutě).

Pro měření efektu modulace VDMT byly ověřeny i předpoklady o úrovni šumového pozadí. Šum pozadí byl zkoumán jako parametr QLN (Quite Line Noise). V případě, že ve svazku kabelu není provozována ani jedna přípojka G.fast, je úroveň AWGN rovna přibližně -135 dBm/Hz. Pokud je ve svazku kabelu provozována jedna koordinovaná přípojka G.fast, vzroste šumové pozadí ve sledované přípojce na úroveň přibližně -122 dBm/Hz. V případě provozu nekoordinované přípojky vzroste šumové pozadí až na úroveň -101 dBm/Hz

v důsledku nepotlačeného přeslechu typu FEXT. Grafy QLN na obrázku 3 ukazují hodnoty šumu poskytnuté interní diagnostikou DSLAM.

V důsledku nárůstu šumu klesne při dvou koordinovaných přípojkách přenosová rychlost každé z nich o cca 2,5 %. Ovšem při nekoordinovaných přípojkách je pokles velice dramatický, a to na cca jednu čtvrtinu.

8 Závěr

Článek pojednává o vysokorychlostní komunikaci po metalických vedeních pro přístup k internetu a pro průmyslové aplikace. Nejprve byla popsána technologie G.fast, způsob modelování přípojek a simulace výkonnosti přenosu. Poté bylo popsáno experimentální pracoviště založené na Remote DSLAM typu ZyXEL GES2104-A55 disponujících po čtyřech G.fast portech a modemech Zyxel XMG3927-B. Dále byly porovnány výsledky experimentů a simulací. Výsledky byly získány pro bílý šum na pozadí AWGN -140 dBm/Hz a průměrnou odhadnutou hodnotu kódového zisku $CG = 8,6$ dB.

Odchytky naměřených a simulovaných (odhadnutých) přenosových rychlostí vycházejí poměrně vysoké. Za zjednodušujících podmínek provedené simulace jsou tak použitelné jen pro hrubý odhad výkonnosti přenosu. Pro přesnější zjištění přenosové rychlosti je vhodné provést experiment na daném komunikačním kanále.

Byl prezentován a diskutován vliv potlačování přeslechů při použití modulace VDMT. V důsledku nárůstu šumu klesne při dvou koordinovaných přípojkách přenosová rychlost každé z nich pouze o cca 2,5 %. Ovšem při nekoordinovaných přípojkách je pokles velice dramatický, a to na cca čtvrtinu rychlosti.

Technologie G.fast s rezervou dokáže splnit podmínky pro přístupové sítě nové generace NGA. Požadavky se ovšem budou zvyšovat a postupně budou atakovat až hranici 1 Gbit/s v souvislosti s budováním tzv. gigabitové společnosti v rámci EU a sítí s velmi vysokou kapacitou VHCN. Základní varianta G.fast do kmitočtu 106 MHz dokáže zajistit rychlost 1 Gbit/s v součtu obou směrů přenosu, přípojka do 212 MHz pak pro každý směr samostatně. Dosažení rychlostí 5 až 10 Gbit/s umožní varianta Multi-G.fast v pásmu do 424 či 848 MHz.

Poděkování

Tento článek vznikl v rámci interního grantového projektu ČVUT v Praze s reg. číslem SGS18/182/OHK3/3T/13.

Vybavení experimentálního pracoviště na katedře telekomunikační techniky, FEL, ČVUT v Praze dodala za zvýhodněných podmínek společnost ZyXEL.

Literatura

- [1] STARR, T., J. M. CIOFFI and P. J. SIL-VERMAN. Understanding Digital Subscriber Line Technology. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. ISBN 0-13-780545-4.
- [2] VODRAZKA, Jiri, Tomas ZEMAN a Jaromir HRAD. Impact of High-Capacity Internet Access on Technical

- Level of e-Learning. In: 2019 29th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEEIE) [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 1-5 [cit. 2020-10-16]. ISBN 978-1-7281-3222-8. Dostupné z: doi:10.1109/EAEEIE46886.2019.9000447
- [3] JARES, Petr a Jiri VODRAZKA. Selection of Digital Subscriber Lines Ready for Next Generation Access. Advances in Electrical and Electronic Engineering [online]. 2015, 13(4), 320 - 324 [cit. 2020-10-16]. ISSN 1804-3119. Dostupné z: doi:10.15598/aeec.v13i4.1459
- [4] LAFATA, Pavel, Petr JARES a Jiri VODRAZKA. Increasing the transmission capacity of digital subscriber lines. In: 2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 292-296 [cit. 2020-10-16]. ISBN 978-1-4673-1118-2. Dostupné z: doi:10.1109/TSP.2012.6256301
- [5] VODRAZKA, J., P. JARES a L. MEJZROVA. Methodology for selection of telecommunication technology in smart applications and networks. In: 2018 Smart City Symposium Prague (SCSP) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-6 [cit. 2020-10-16]. ISBN 978-1-5386-5017-2. Dostupné z: doi:10.1109/SCSP.2018.8402661
- [6] ITU-T Recommendation G.9700. Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Power spectral density specification. Geneva: ITU-T, 2019.
- [7] ITU-T Recommendation G.9701. Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Physical layer specification. Geneva: ITU-T, 2019.
- [8] NEVOSAD, Marek, Pavel LAFATA a Petr JARES. Modeling of Telecommunication Cables for Gigabit DSL Application. Advances in Electrical and Electronic Engineering [online]. 2013, 11(5), 336 - 341 [cit. 2020-10-16]. ISSN 1804-3119. Dostupné z: doi:10.15598/aeec.v11i5.874
- [9] Simulace přípojky G.fast. 2014. Matlab server. Dostupné na: <http://matlab.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=201411001>
- [10] Firemní dokumentace ZyXEL, GES2104 Series. Dostupná na: https://www.zyxel.com/cz/cs/products_services/4-port-Environmental-Hardened-G-fast-DPU-GES2104-Series/overview