

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická
Czech Technical University of Prague, Faculty of Electrical Engineering

Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.

Hierarchická aktivní přístupová síť využívající existující metalické kabely

Hierarchic Active Access Network with Existing Metallic Cables

Summary

The bit rate in the metallic access network dramatically decreases dependent on the length and increasing number of digital lines in the cables. The research aim was to develop methods maximizing the channel capacity. The analysis of physical medium was prepared and the optimal modeling was proposed. The new conception of hierarchic active access network with line bounding and crosstalk cancellation was proposed. The selection of dominant crosstalk is beneficial for information capacity of the line. The effects of fully and partially coordinated network were discussed. The parameters of local quad cables, frequency band in tens MHz and lengths of typical section in local networks were used for simulations. The proposed hierarchic active access network can be gradually upgraded to hybrid access network with increasing proportion of optic fibers.

Souhrn

V metalické přístupové síti strmě klesá dosažitelná přenosová rychlost s délkou přípojky a nárůstem počtu digitálních přípojek v kabelech. Cílem bylo navrhnout postupy pro maximalizaci propustnosti. Nejprve byly provedena analýza přenosového prostředí a navrženy optimalizované postupy pro jeho modelování. Dále byla navržena nová koncepce přístupové sítě s aktivními prvky, sdružováním vedení do svazků a potlačováním přeslechů. Pro potlačování přeslechů je účelné provést selekci zdrojů rušení. Jsou diskutovány různé scénáře a výsledky pro plně koordinovanou a částečně koordinovanou síť. Jsou uvažovány místní čtyřkované kabely, horní kmitočet pásma řádově v desítkách MHz a délky odpovídající kabelovým sekcím v místní síti. Navrženou hierarchickou aktivní přístupovou síť lze postupně převést na hybridní přístupovou síť s postupně narůstajícím podílem optických sekcí.

Klíčová slova:

přístupová síť, symetrické vedení, digitální účastnické přípojky, přeslechy, xDSL

Key words:

access network, twisted pair, digital subscriber line, crosstalk, xDSL

© Jiří Vodrážka

Praha 2007

ISBN

Obsah

1	Úvod	6
2	Nové způsoby modelování účastnických přípojek.....	6
	2.1 Modelování vedení.....	6
	2.2 Modelování přeslechů	8
	2.3 Potlačování přeslechů.....	11
3	Hierarchická aktivní přístupová síť s použitím VDMT	13
	3.1 Návrh struktury a její rozbor	13
	3.2 Modelové případy	15
4	Závěr.....	16
5	Odkazy na literaturu	17
6	Nejvýznamnější publikace autora vztahujících se k tématu	18
7	Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.....	20

1 Úvod

Informační propustnost digitálních účastnických přípojek je limitována zejména útlumem vedení a přeslechy uvnitř daného kabelu. Charakter projevu přeslechu na blízkém konci do značné míry předurčuje metodu duplexního přenosu. K maximalizaci propustnosti přípojek je možno využít potlačování přeslechů pomocí modulace VDMT. Přímo na vstupu přijímačů lze kompenzovat přeslechy typu FEXT ve směru vzestupném, ovšem za předpokladu synchronizace vysílání symbolů DMT všemi účastnickými modemy. Při přenosu ve směru sestupném je nutno provádět předkompenzaci přeslechů tak, aby po průchodu kanálem byl signál zatížen zbytkovými přeslechy pod hladinou bílého šumu. V návaznosti na výsledky dosažitelné pomocí potlačení přeslechů byl navržen způsob řešení hierarchicky uspořádané metalické přístupové sítě s aktivními prvky. K připojování síťových prvků v místech větvení přístupové sítě je využito sdružování vedení (inverzní multiplex) a koncentrace účastnického provozu.

2 Nové způsoby modelování účastnických přípojek

V návaznosti na existující znalosti a modely popsané v dostupné literatuře, např. [4], [3], [7], byly vytvořeny nové modely pro potřeby simulace digitálních účastnických přípojek.

2.1 Modelování vedení

V práci [1] je uveden příklad primárních a sekundárních parametrů vedení čtyřkové konstrukce s průměrem jádra 0,4 mm a izolací PE změřených do kmitočtu 100 MHz a aproximovaných za pomoci modelu dle British Telecom.

Ukazuje se, že teorie homogenního vedení je použitelná pro popis a modelování v oblasti kmitočtů, které využívají vysokorychlostní účastnické přípojky. Nicméně se vzrůstajícím kmitočtem (kolem 10 MHz a výše) se projevují u symetrických párů v místní síti nehomogenity, protože kabely nejsou původně konstruovány pro širokopásmové přenosy, ale zejména pro přenosy telefonní. Otázkou je, do jaké míry lze existující způsob modelování modifikovat, aby bylo možno postihnout vyhovujícím způsobem nehomogenity vedení a modelovat takto vznikající odrazy.

Nehomogenity vedení se projevují jednak lokálními maximy na útlumové charakteristice, resp. minimy přenosové funkce, jednak odrazy, vícenásobným příjmem symbolů digitálního signálu a tedy mezisymbolovou interferencí. Ve výsledku pak je přenosová funkce vedení ovlivněna mnoha faktory a jednou z možností je modelování [6] prostředí s vícecestným šířením.

Pro praktické použití lze použít zjednodušující model, který vychází ze skutečných podmínek v přístupové síti, a sice nehomogenity simulovat diskrétně

jako omezený počet impedančních závad na vedení. V takovém případě vedení modelujeme jako kaskádu jednotlivých úseků různých vlastností a rozměrů.

Chceme-li stanovit přenosovou funkci vedení složeného z více úseků různých parametrů a obsahujícího i odbočky či jiné obvodové prvky, můžeme ji vyjádřit ze součinu matic popisujících jednotlivé kaskádně řazené úseky. Použijeme kaskádní parametry (označované též ABCD), jejichž význam vyplývá z obvodových rovnic dvojbranu:

$$u_1 = a u_2 - b i_2 \quad i_1 = c u_2 - d i_2 \quad (1)$$

Úsek homogenního vedení délky l_i pak můžeme popsat maticí:

$$\mathbf{A}_{Li} = \begin{bmatrix} (\cosh(\gamma_i(f) \cdot l_i)) & (Z_{ci}(f) \cdot \sinh(\gamma_i(f) \cdot l_i)) \\ \left(\frac{\sinh(\gamma_i(f) \cdot l_i)}{Z_{ci}(f)} \right) & (\cosh(\gamma_i(f) \cdot l_i)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Výsledná matice bude dána součinem dílčích matic. Uvedený postup se běžně používá pro určení výsledné přenosové funkce vedení složeného z více různých úseků, případně při modelování vedení s odbočkami. Obdobný postup lze použít i pro modelování symetrických vedení s nehomogenitami. Model bude tvořen maticemi popisujícími různě dlouhé homogenní úseky vedení. Mezi každé dva homogenní úseky vedení budou vloženy nehomogenity různého charakteru. Celá kaskáda bude ukončena opět homogenním úsekem vedení.

Jsou dvě možnosti definování nehomogenit: pomocí impedančních závad v kombinaci sériové a paralelní impedance (vhodné pro méně závažné závady), pomocí elektricky krátkých úseků vedení s odlišnými sekundárními parametry, nebo kombinací obojího (vhodné pro výrazné nehomogenity). Výsledná matice bude dána součinem lichého počtu dílčích matic $(1+2n)$ takto:

$$\begin{bmatrix} a(f) & b(f) \\ c(f) & d(f) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{L1} \cdot \prod_{i=2}^n (\mathbf{A}_{Di} \cdot \mathbf{A}_{Li}) \quad (3)$$

kde \mathbf{A}_{Li} jsou matice (2) popisující homogenní úseky vedení a \mathbf{A}_{Di} jsou matice modelující nehomogenity. Počet matic závisí na požadovaném charakteru nehomogenit. Pro praktické použití lze doporučit modelování nehomogenit pomocí elektricky krátkých úseků vedení s odlišnými sekundárními parametry. Vztah (3) lze pak přepsat jako součin matic takto:

$$\begin{bmatrix} a(f) & b(f) \\ c(f) & d(f) \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\gamma_1, Z_{c1}, l_{L1}) \cdot \prod_{i=2}^n \left[\mathbf{A}(\gamma_i, Z_{ci}, l_{Di}) \cdot \mathbf{A}(\gamma_1, Z_{c1}, l_{Li}) \right] \quad (4)$$

kde l_{Li} jsou délky úseků homogenního vedení a l_{Di} jsou délky úseků modelujících nehomogenity. Pro úspěšné modelování je nutné dodržet podmínku:

$Z_{c1} \neq Z_{ci}$ pro $i > 1$. Měrné míry přenosu mohou být shodné.

Dále je nutno volit vhodně různé délky úseků tak, aby platilo:

$l_{Lj} \neq l_{Li}$ a $l_{Dj} \neq l_{Di}$ pro $j \neq i$

Pro přiblížení pseudonáhodnému charakteru nehomogenit vznikajících při procesu výroby a instalace kabelů je vhodné volit délky tak, aby netvořily celistvé násobky. Výhodou uvedeného způsobu modelování vedení s nehomogenitami je možnost použít shodné simulační nástroje jako při modelování kaskády úseků vedení, ovšem při respektování výše uvedených pravidel.

2.2 Modelování přeslechů

Přeslechy jsou charakteristické velmi vysokým rozptylem hodnot. Při zpřesňování modelování přístupové sítě je nutné opustit zjednodušující předpoklad o rovnoměrném rozprostření rušících párů v profilu kabelu, který má za následek zjednodušující výpočet přeslechových parametrů K_N a K_F [1]. Míra přeslechového rušení se bude počítat pro jednotlivé úseky zvlášť a pomocí přeslechových parametrů bude zohledněna poloha rušeného páru a rušícího páru. Na obr. 1 je uveden příklad analýzy přeslechů na blízkém konci pro směr downstream.

Celkový přeslechový šum rušící přenos vzestupného směru (od DSLAM k účastnickému modemu) v důsledku přeslechu na blízkém konci v páru k lze vypočítat jako sumarizaci dílčích přeslechů v jednotlivých bodech větvení p od všech $m-1$ přípojek v kabelu:

$$N_{Nk} = \sum_{p=2}^{m_p-1} \left[\prod_{j=p}^{m_p-1} |H_{jk}|^2 \cdot \sum_{i=1, i \neq k}^m \left(|H_{Npi}|^2 \cdot S_{Upi} \right) \right] = \sum_{p=2}^{m_p-1} \left[\prod_{j=p}^{m_p-1} |H_{jk}|^2 \cdot \sum_{i=1, i \neq k}^m \left(|H_{Npi}|^2 \cdot S_{Ui} \cdot \prod_{j=p}^{m_p-1} |H_{ji}|^2 \right) \right] \quad (5)$$

m je počet přípojek v kabelovém stromě

m_p je počet bodů kabelového stromu počítáno od zařízení DSLAM (bod 1) k účastnickému modemu (bod m_p)

$H_{jk,i}$ je přenosová funkce mezi j a $j+1$ bodem kabelového stromu vedení k (i) – při neexistenci příslušného segmentu pro dané vedení (kratší větev stromu) dosazována hodnota 1

H_{Npi} je přenosová funkce přeslechu na blízkém konci od vedení i v bodě p – při neexistenci příslušného bodu pro dané vedení (kratší větev stromu) dosazována hodnota 0

přeslechů v jednotlivých bodech větvení p od všech m přípojek v kabelu (obr. 2):

$$N_{Fk} = \sum_{p=2}^{m_p-1} \left[\prod_{j=p}^{m_p-1} |H_{jk}|^2 \cdot \sum_{i=1; i \neq k}^m \left(|H_{Fpi}|^2 \cdot S_{Di} \cdot \prod_{j=1}^{p-2} |H_{ji}|^2 \right) \right] = \sum_{p=2}^{m_p-1} \left[\prod_{j=p}^{m_p-1} |H_{jk}|^2 \cdot \sum_{i=1; i \neq k}^m \left(|H'_{Fpi}|^2 \cdot S_{Di} \cdot \prod_{j=1}^{p-1} |H_{ji}|^2 \right) \right] \quad (7)$$

kde

m je počet přípojek v kabelovém stromě

m_p je počet bodů kabelového stromu počítáno od zařízení DSLAM (bod 1) k účastnickému modemu (bod m_p)

$H_{jk, i}$ je přenosová funkce mezi j a $j+1$ bodem kabelového stromu vedení k (i)

H_k je celková přenosová funkce vedení k

H_{Fpi} je přenosová funkce přeslechu na vzdáleném konci od vedení i z bodu $p-1$ do bodu p – při neexistenci příslušného bodu pro dané vedení (kratší větev stromu) dosazována hodnota 0

H'_{Fpi} je přenosová funkce přeslechu na vzdáleném konci od vedení i v bodě p – při neexistenci příslušného bodu pro dané vedení (kratší větev stromu) dosazována hodnota 0

S_{Di} je spektrální výkonová hustota výkonu signálu na výstupu vysílače na vedení i ve směru sestupném (výstup z DSLAM)

Pro uvažované shodné přenosové funkce vedení všech párů je můžeme sloučit do celkové přenosové funkce vedení a pokud je kabelový strom tvořen vedením stejného typu lze vyjádřit přenosovou funkci vedení pomocí měrného útlumu α , takže dostaneme:

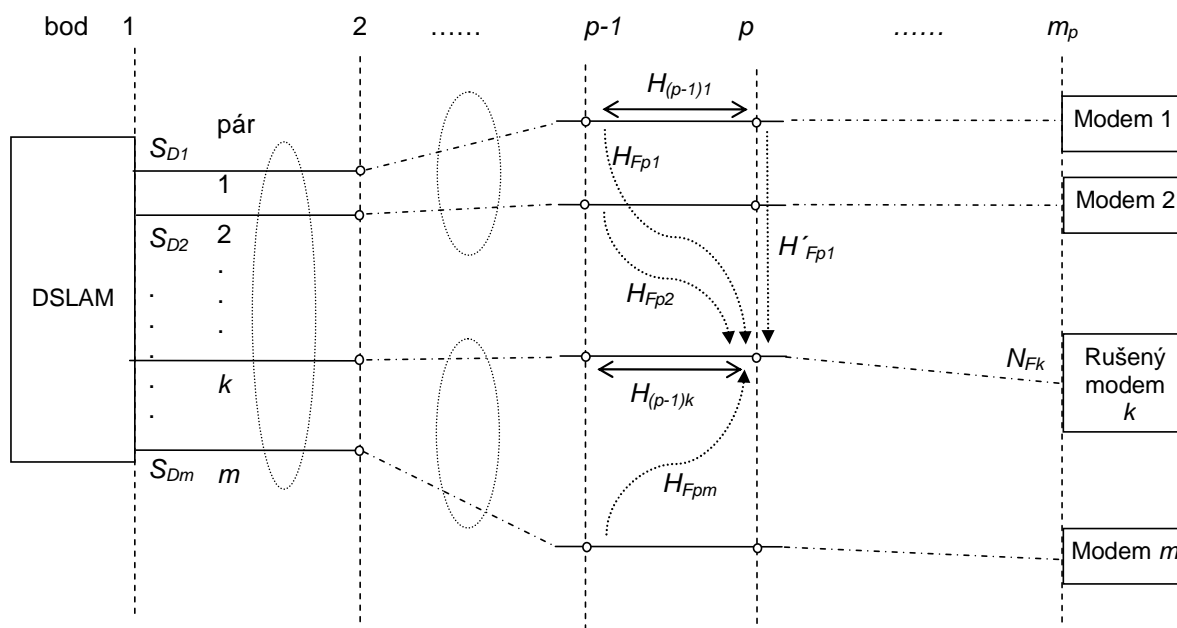
$$N_{Fk} = f^2 \cdot e^{2 \cdot \alpha \cdot l_k} \sum_{p=2}^{m_p-1} \left[l_{kp} \cdot \sum_{i=1; i \neq k}^m (K_{Fpi} \cdot S_{Di}) \right] \quad (8)$$

kde

l_k je celková délka vedení k

l_{kp} je délka vedení mezi p a $p+1$ bodem kabelového stromu vedení k – při neexistenci příslušného segmentu pro dané vedení (kratší větev stromu) dosazována hodnota 0

K_{Fpi} je parametr přeslechu na vzdáleném konci od vedení i v bodě p



obr. 2 Analýza přeslechu FEXT ve směru downstream v kabelovém stromě

Vzhledem k velkému počtu symetrických párů v jednom metalickém kabelu a z toho vyplývající náročnosti při jejich získání měřením kabelu a vzhledem k nárokům při výpočtech, je možné provést určitou redukci počtu přeslechových parametrů jejich sdružením podle polohy. Přeslechy v kabelu mají charakter náhodné veličiny, nicméně s ohledem na obvyklou konstrukci místních kabelů, které jsou v síti používány, je možné symetrické páry (a následně přeslechové parametry) rozdělit do následujících kategorií:

1. Sousední páry – páry v rámci jedné čtyřky a páry sousedních čtyřek v rámci stejné podskupiny
2. Blízké páry – páry ve vzdálených čtyřkách stejné nebo sousední podskupiny
3. Vzdálenější páry – páry ve čtyřkách vzdálených podskupin (oddělených minimálně jednou podskupinou)
4. Vzdálené páry – páry ve čtyřkách jiných skupin

Pro účely modelování kabelového stromu je vhodné zavést pátou kategorii, která představuje páry v různých větvích kabelového stromu. Jedná se o různé kabely prakticky bez přímé elektromagnetické vazby, kde můžeme předpokládat nulové přeslechy a tedy $K_N=0$ a $K_F=0$.

2.3 Potlačování přeslechů

Pro potřeby správy spektra [12] a koordinace vysílání jednotlivých transceiverů metodou Vectored DMT (VDMT), bude však nezbytná plná znalost

přenosových funkcí přeslechů mezi jednotlivými páry v celém profilu kabelu H_{ij} v podobě matice:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdot & \cdot & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & \cdot & \cdot & H_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & H_{kk} & \cdot \\ H_{m1} & H_{m2} & \cdot & \cdot & H_{mm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Přitom H_{ij} pro $i=j$, tedy prvky matice na hlavní diagonále jsou přenosovými funkcemi přípojky i a H_{ij} pro $i \neq j$ jsou přenosovými funkcemi přeslechů na vzdáleném konci z přípojky i do přípojky j . Za předpokladu dominantního přeslechu FEXT, kdy NEXT je redukován např. frekvenčním dělením FDD, lze redukovat celkový šum na vstupu přijímače kompenzací FEXT [10]. Jelikož účastnické modemy jsou v různých místech a vzdálenostech od DSLAM, musí být provedena předkompenzace na straně vysílače v DSLAM, kde jsou k dispozici všechny vysílané signály, které jsou též zdrojem přeslechů. Tímto způsobem lze provést potlačení přeslechů v sestupném směru.

Vzhledem k výpočetní náročnosti je nutné provádět potlačení jen od omezeného počtu přípojek, resp. u omezeného počtu subkanálů [13] a realizovat tak **částečné potlačení přeslechů FEXT** [14]. Lze tak provádět **selekcí prostorovou, frekvenční, příp. obojí zároveň**. Selekcí je možno provádět během inicializace spojení na základě analýzy přenosových funkcí. Přitom lze jako východisko vzít maximální možnou míru potlačení přeslechů danými technickými prostředky (maximalizace propustnosti), nebo na základě požadavků na přenosové rychlosti podle povahy poskytovaných služeb zvolit potřebný rozsah redukce přeslechů.

Uvažujeme modulaci DMT, frekvenční pásmo od 138 kHz do 30 MHz a přenosové funkce vedení a přeslechů získané měřením na úseku místního kabelu s délkou 400 m a s průměrem jádra 0,4 mm. Výběr vedení k potlačení se provádí na základě stanovení meze (odstup v dB) vzhledem k nejhoršímu případu přeslechů. V tab. 1 jsou uvedeny výsledky pro prostorovou selekcí pro různý práh pro potlačení přeslechů. Vedle dosažitelné přenosové rychlosti (přípustná chybovost 10^{-7} , šumová rezerva 6 dB), která je počítána přes celé pásmo bez rozlišení směrů přenosu, jsou uvedeny i počty vedení, která jsou nad stanoveným prahem a která je nutno zapojit do systému potlačování přeslechů.

Mez pro potlačení	[dB]	0	6	10	12	14	20
Přenosová rychlost	[Mbit/s]	89	110	118	131	168	345
Počet vedení	[-]	0	4	8	16	32	49

tab. 1 Výsledky simulace pro prostorovou selekcí při potlačování FEXT

Je zřejmý postupný nárůst přenosové rychlosti s narůstajícím počtem koordinovaných vedení, avšak k plnému potlačení (v posledním sloupci) se přibližují přenosové rychlosti s narůstajícím počtem koordinovaných vedení jen velmi zvolna.

Lepších výsledků lze dosáhnout při frekvenční selekci (výběr tónů ze všech vedení), jak ukazuje tab. 2 na dosažitelných přenosových rychlostech a přepočtených počtech vedení. Přepočet je proveden vzhledem k celkovému počtu subkanálů. Je zřejmé, že výběr tónů DMT začíná spíše v dolní polovině spektra (ovšem ne na nejnižších kmitočtech) tam, kde je útlum přeslechu nejnižší.

Mez pro potlačení	[dB]	0	6	10	12	16	20
Přenosová rychlost	[Mbit/s]	89	100	109	117	146	198
Přepočet tónů na počet vedení	[-]	0	1,1	3	5,7	16,2	29,8

tab. 2 Výsledky simulace pro frekvenční selekci při potlačování FEXT

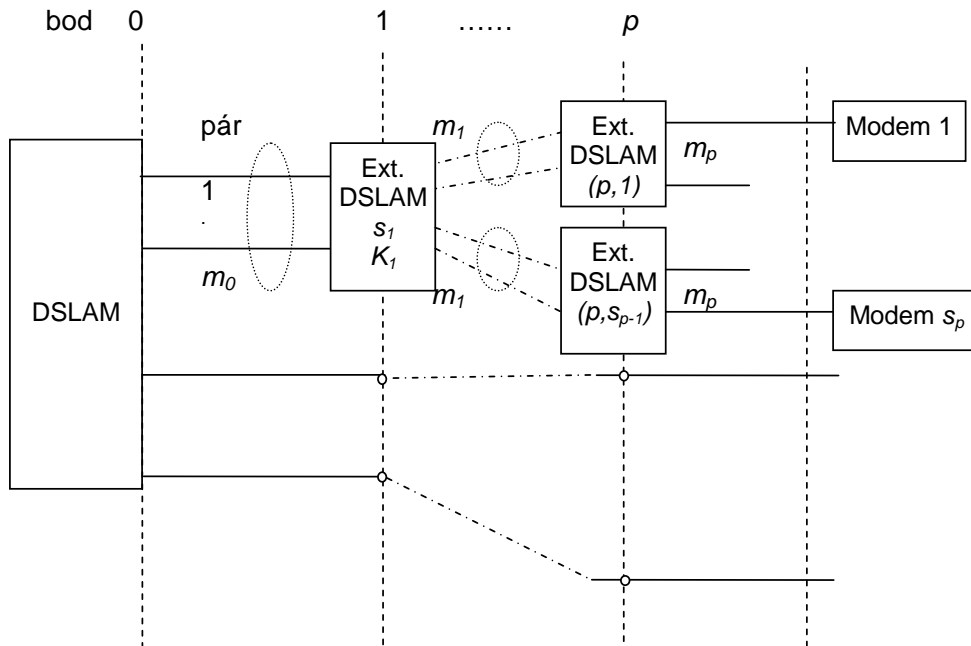
3 Hierarchická aktivní přístupová síť s použitím VDMT

Koncepce hierarchické aktivní přístupové sítě řeší značně omezenou překlenutelnou vzdálenost u metalických vedení při požadavku účastnických přenosových rychlostí řádově desítek Mbit/s. Zvýšení dosahu je možné pomocí aktivních prvků umístěných ve struktuře kabelového stromu, podobně jako u hybridní přístupové sítě FTTC (FTTCab) ovšem s tím rozdílem, že aktivní prvek není připojen k centrálnímu prvku provozovatele optickým vláknem, ale svazkem metalických vedení v existujícím místním kabelu na principu tzv. inverzního multiplexu (též zkratka IMA či označení Multi-Pair Bonding).

3.1 Návrh struktury a její rozbor

Pro maximalizaci přenosové rychlosti je vhodné použít potlačování přeslechů ve svazku např. 10 párů (5 čtyřek), což odpovídá jedné podskupině místního kabelu. V traťovém rozvaděči, příp. i v síťových rozvaděčích je umístěn aktivní prvek (externí jednotka DSLAM) připojená k centrálnímu DSLAM svazkem vedení pro zvýšení přenosové rychlosti. V aktivních síťových prvcích navíc dochází ke sdružování toků od více účastníků a lze uplatnit koncentraci provozu. Obecně je možno uspořádání hierarchické přístupové sítě zobrazit strukturou na obr. 3. Na účastnický multiplexor DSLAM je připojen svazkem m_0 párů externí DSLAM umístění v mezilehlém rozvaděči (traťový rozvaděč). Přenos ve svazku vedení je zajišťován pomocí přípojek VDSL2 s modulací VDMT, tedy s kompenzací přeslechů FEXT uvnitř svazku k maximalizaci přenosové rychlosti. Za předpokladu stejných rychlostí přípojek ve svazku $R(d_0)$ pracujících na vzdálenosti d_0 je přenosová rychlost této sekce $R_0 = m_0 \cdot R(d_0)$, což

je rychlost, kterou je připojena externí jednotka DSLAM k centrálnímu multiplexoru DSLAM.



obr. 3 Obecná struktura hierarchické přístupové sítě

Na externí DSLAM mohou být připojeni přímo účastníci, nebo může následovat další hierarchický stupeň externích DSLAM v počtu s_1 připojených svazkem m_1 párů na vzdálenost d_1 rychlostí $R_1 = m_1 \cdot R(d_1)$. Přitom se využívá koncentrace provozu, takže $R_0 \leq s_1 \cdot R_1$. Zavádíme koncentrační činitel K_1 , takže lze vyjádřit:

$$R_0 = R_1 \frac{s_1}{K_1} \quad \text{a obecně pro } p \text{ stupňů hierarchie} \quad R_0 = R_p \prod_{i=1}^p \frac{s_i}{K_i} \quad (10)$$

a dále platí:

$$m_0 R(d_0) = m_p R(d_p) \cdot \prod_{i=1}^p \frac{s_i}{K_i} \quad (11)$$

Pro rychlost v místě p lze psát:

$$R_p = m_0 R(d_0) \cdot \prod_{i=1}^p \frac{K_i}{s_i} \quad (12)$$

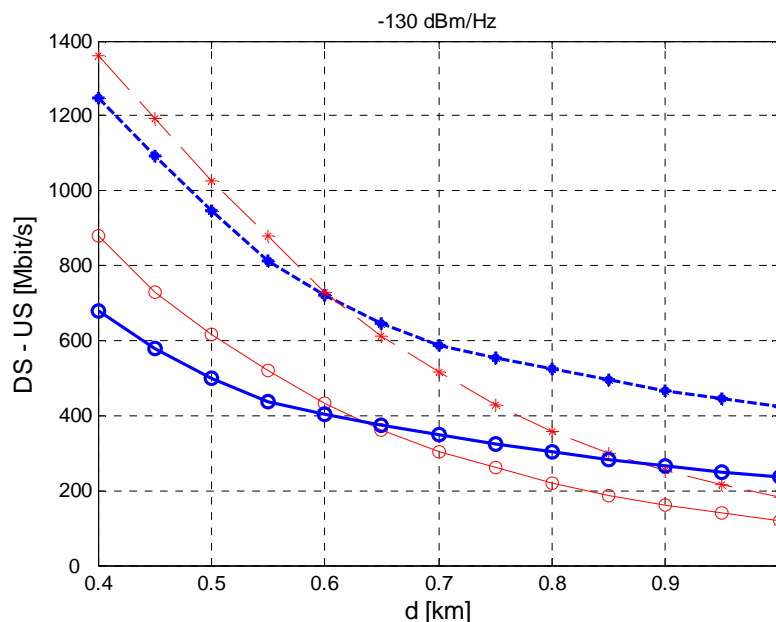
Výsledná rychlost pro účastníka bude limitována propustností všech sekcí:

$$R_s = \min \left\{ m_p R_p(d_p), m_{p-1} R_{p-1}(d_{p-1}) \cdot \frac{K_p}{s_p}, \dots, m_1 R_1(d_1) \cdot \prod_{i=2}^p \frac{K_i}{s_i}, m_0 R_0(d_0) \cdot \prod_{i=1}^p \frac{K_i}{s_i} \right\} \quad (13)$$

Pro telekomunikační aplikace v přístupové síti není praktické vytvářet více než dvě úrovně hierarchie. Koncentrační (agregační) poměr je možné volit v určitém rozmezí v závislosti na typech provozovaných služeb, např. poměr $1:K_1$, kde K_1 je z intervalu 2 až 20 u jednoúrovňové hierarchie, příp. poměr $1:K_1:K_2$, kde K_1 je z intervalu 2 až 5 a K_2 z intervalu 2 až 8 u dvouúrovňové hierarchie.

3.2 Modelové případy

Pro odhad dosažitelné přenosové rychlosti [11] budeme uvažovat, že je použito potlačování přeslechů ve svazku 10 párů. Pokud bude použito úplné potlačení přeslechů FEXT, bude působit pouze zbytkový šum pozadí AWGN (uvažována hodnota -130 dBm/Hz) a dostaneme rychlosti ve směru vzestupném a sestupném podle obr. 4 pro kmitočtový plán 997.



obr. 4 Celkové přenosové rychlosti svazku pro plán 997 s úplnou (čárkovaně) a částečnou (plnou čarou) koordinací VDMT (sestupný směr modře, vzestupný směr červeně)

V praxi však v kabelu budou přítomny další nekoordinované přípojky, a sice ADSL (zde uvažováno 20% z profilu kabelu), ADSL2+ (uvažováno 10% z profilu kabelu) a SHDSL (uvažováno 6% z profilu kabelu). Pak vyjdou nižší přenosové rychlosti znázorněné v obrázcích plnou čarou. Podle vzdálenosti externích DSLAM od centrálního DSLAM a dále délek přípojek od posledního aktivního prvku k účastnickým modemům můžeme dospět k různým výsledkům a zejména k široké škále kombinací přenosových rychlostí. Uvedeme si příklady scénářů řešení jednoúrovňové aktivní přístupové sítě.

V tab. 3 pro plán 997. Jsou uvažovány tři délky sekcí d_0 od centrálního DSLAM k externímu DSLAM. Pro každý případ dále dvě varianty délky d_1 a v posledním sloupci celková délka od centrálního DSLAM k účastnickému modemu d . Výsledná přenosová rychlost pro účastníka bude vždy menší

z hodnot $R(d_1)$ a R_1 pro příslušný směr provozu. Snahou je, aby parametry hierarchické přístupové sítě d_0 , d_1 , m_0 , m_1 , s_1 , K_1 byly nastaveny tak, aby se rychlosti $R(d_1)$ a R_1 příliš nelišily. V praxi bude nutné vycházet ze skutečné situace v síti, protože zejména vzdálenost d_0 bude určena polohou traťové či síťové rozvodny. Vzdálenosti d_1 pak budou nabývat hodnot v intervalu, který bude omezen minimálními přípustnými hodnotami přenosových rychlostí pro poskytovanou službu. Dosah je možno prodloužit sdružením více vedení i na poslední sekci k účastnickému modemu (poslední řádek tabulky). Výsledky pro kmitočtový plán 998 jsou uvedeny v [1].

d_0	m_0	R_{0US}	R_{0DS}	d_1	m_1	$R(d_1)_{US}$	$R(d_1)_{DS}$	s_1	K_1	R_{1US}	R_{1DS}	d
km	-	Mbit/s	Mbit/s	km	-	Mbit/s	Mbit/s	-	-	Mbit/s	Mbit/s	km
0,4	10	878	679	0,4	1	88	61	100	10	87,8	67,9	0,8
0,4	10	878	679	0,6	1	44	34	200	10	43,9	34,0	1
0,6	10	431	404	0,6	1	44	34	120	10	35,9	33,7	1,2
0,6	10	431	404	0,8	1	22	24	180	10	23,9	22,4	1,4
0,8	20	440	608	0,6	1	44	34	150	10	29,3	40,5	1,4
0,8	20	440	608	0,8	2	44	48	120	10	36,7	50,7	1,6

tab. 3 Dosažitelné přenosové rychlosti pro různé scénáře hierarchické aktivní přístupové sítě pro kmitočtový plán 997

4 Závěr

Teorie homogenního vedení je známá již dlouhou dobu a ukazuje se, že je stále použitelná pro popis a modelování v oblasti kmitočtů, které využívají vysokorychlostní účastnické přípojky. Ukázalo se, že lze existující způsoby modelování modifikovat, aby bylo možno postihnout vyhovujícím způsobem nehomogenity. Informační propustnost digitálních účastnických přípojek je limitována zejména přeslechů uvnitř daného kabelu. K maximalizaci propustnosti přípojek je nutno využít potlačování přeslechů (modulace VDMT) v centrálním prvku přístupové sítě na straně poskytovatele (DSLAM). Vzhledem k výpočetní náročnosti je nutné provádět koordinaci jen u omezeného počtu přípojek, resp. u omezeného počtu subkanálů a realizovat tak částečné potlačení přeslechů FEXT. Lze tak provádět selekci prostorovou, frekvenční, příp. obojí zároveň.

Koncepce hierarchické aktivní přístupové sítě je originálním přínosem autora k řešení značně omezené překlenutelné vzdálenosti u metalických vedení při požadavku účastnických přenosových rychlostí řádově desítek Mbit/s. Zvýšení dosahu je možné pomocí aktivních prvků umístěných ve struktuře kabelového stromu, podobně jako u hybridní přístupové sítě FTTC (FTTCab) ovšem s tím rozdílem, že aktivní prvek není připojen k centrálnímu prvku provozovatele optickým vláknem, ale svazkem metalických vedení v existujícím

místním kabelu na principu tzv. inverzního multiplexu (též zkratka IMA či označení Multi-Pair Bonding).

Pro maximalizaci přenosové rychlosti je vhodné použít potlačování přeslechů ve svazku vedení. V traťovém rozvaděči, příp. i v síťových rozvaděčích je umístěn aktivní prvek (externí jednotka DSLAM) připojená k centrálnímu DSLAM svazkem vedení pro zvýšení přenosové rychlosti. V aktivních síťových prvcích navíc dochází ke sdružování toků od více účastníků a lze uplatnit koncentraci provozu.

Při zpracování bylo použito známých modelů, jakož i nových postupů a zkušeností získaných autorem za dobu 10 let působení v daném oboru. Během této doby byla změřena a analyzována celá řada kabelů a získány zkušenosti s praktickým provozem digitálních účastnických přípojek. K simulacím pak bylo využito prostředí Matlab. Pro zpřístupnění výsledků výzkumu široké odborné veřejnosti byl zprovozněn Matlab Web Server (<http://matlab.feld.cvut.cz>), který umožňuje provádět vybrané simulace on-line prostřednictvím sítě Internet.

Poznatky o vlastnostech a využití symetrických vedení pro vysokorychlostní přenos byly rozšiřovány postupem doby v návaznosti na disertační práci při řešení projektů s podporou GAČR (2 projekty standardní a jeden projekt postdoktorský) a s podporou GA AV v rámci národního programu výzkumu. Praktické uplatnění výsledky výzkumu našly při spolupráci s provozovateli a dalšími subjekty u nás (Český Telekom, Prakab, MI ČR, ČTÚ) i v zahraničí (Slovak Telecom, Teleconnect - Dresden).

Autor navázal na tradiční výzkum přenosu po vedeních, který byl vždy klíčovou problematikou na katedře telekomunikační techniky. Rozvinul poznatky pro aplikace vysokorychlostního přenosu v přístupových sítích. Výsledky bádání byly průběžně zveřejňovány v podobě publikací, článků v časopisech a příspěvků na konferencích.

5 Odkazy na literaturu

- [1] Vodrážka, J.: Vysokorychlostní přenos signálu po symetrických vedeních v přístupové síti. Habilitační práce. ČVUT FEL, Praha 2007.
- [2] Šimák, B. - Vodrážka, J. – Svoboda, J.: Digitální účastnické přípojky xDSL, 1. díl, Metody přenosu, popis přípojek HDSL, SHDSL, ADSL, VDSL. Sdělovací technika, Praha 2005.
- [3] Vodrážka, J. – Šimák, B.: Digitální účastnické přípojky xDSL, 2. díl, Vlastnosti přenosového prostředí a jejich měření. Sdělovací technika, Praha 2007.
- [4] Bingham, J. A. C.: ADSL, VDSL, and Multicarrier Modulation. John Wiley & Sons, Inc., New York 2000.
- [5] Rauschmayer, D. J.: ADSL/VDSL Principles: A Practical and Precise Study of Asymmetric Digital Subscriber Lines and Very High Speed

- Digital Subscriber Lines. Macmillan Technical Publishing, Indianapolis 1999.
- [6] Hrasnica, H.: Broadband Powerline Communications Networks. John Wiley & Sons, Chichester 2004. ISBN 0-470-85741-2
 - [7] Hughes, H.: Telecommunications Cables: Design, Manufacture and Installation. Chichester: John Wiley&Sons, 1997. ISBN 0-471-97410-2.
 - [8] Galli S., Kerpez K. J.: The problem of summing crosstalk from mixed sources. Communications Letters IEEE. Vol. 4, no. 11. Nov. 2000. p. 325-327.
 - [9] J. Kerpez, K. J. - Galli, S.: Methods of Summing Crosstalk From Mixed Sources—Part II: Performance Results. IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, no. 4, April 2002 p. 600-607
 - [10] Cendrillon, R. – Ginis, G. - Bogaert, E. – Moonen, M.: A Near-Optimal Linear Crosstalk Canceler for VDSL. Submitted to IEEE Transactions on Signal Processing 2004. on-line (10.11.2006)
 - [11] Lin, S. - Wei, C. H.: Optimal Channel Capacity Analysis for DMT VDSL System of Various Symbol Rates. Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM'01.
 - [12] Song, K. B. - Chung, S. T. - Ginis, G. - Cioffi, J. M.: Dynamic Spectrum Management for Next-Generation DSL Systems. IEEE Communications Magazine, October 2002.
 - [13] Brady, M. H. - Cioffi, J. M.: The Worst-Case Interference in DSL Systems Employing Dynamic Spektrum Management. Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Applied Signal Processing. Volume 2006, Article ID 78524, p. 1–11.
 - [14] Cendrillona, R. - Ginisb, G. - Moonena, M. - Acker K.: Partial crosstalk precompensation in downstream VDSL. Signal Processing 84. Elsevier (2004) p. 2005–2019. on-line: <http://www.elsevier.com/locate/sigpro>.

6 Další významnější publikace autora

- [A1] Vodrážka, J.: Teoretická informační propustnost účastnických přípojek. Elektrotechnika – časopis pro elektrotechniku, 2001. ISSN 1213-1539.
- [A2] Vodrážka, J.: Spektrální kompatibilita digitálních účastnických přípojek. Sdělovací technika. 10/2001. ISSN 0036-9942
- [A3] Vodrážka, J. - Hrad, J.: Comparison of Symmetric Pairs Parameters, elektronický časopis ElectronicsLetters.com na adrese <http://www.electronicletters.com>. 20.11.2001
- [A4] Vodrážka, J.: Modelování přeslechů v kabelech se symetrickými páry. Slaboproudý obzor. 2002, roč. 59, č. 1, s. 20-23. ISSN 0037-668X.
- [A5] Vodrážka, J.: Spectral Characteristics of Digital Subscriber Line Systems. 2002. Internet: www.electronicletters.com. ISSN 1213-161X.

- [A6] Vodrážka, J.: Přeslechy a jejich modelování. 2002. Internet: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02061/>. ISSN 1213-1539.
- [A7] Vodrážka, J.: Simulation of xDSL Access Network. In RTT 2003 - Proceedings. Bratislava: FEI, Slovak University of Technology, 2003, s. 187-189. ISBN 80 227 1934-X.
- [A8] Vodrážka, J.: Cross-Talk is Determinant of Duplex Method. In RTT 2004 [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2004, s. 0102_0005. ISBN 80-01-03063-6.
- [A9] Vodrážka, J.: Power Line Models. In RTT 2005 Proceedings [CD-ROM]. Ostrava: VŠB - TUO, FEI, Katedra elektroniky a telekomunikační techniky, 2005, ISBN 80-248-0897-8.
- [A10] Vodrážka, J. - Hubený, T. - Jareš, P.: Crosstalk Parameters for Subscriber Line Modeling. In Electronics and Telecommunications - Papers. Riga: Riga Technical University, 2005, s. 18-19.
- [A11] Vodrážka, J.: Downstream Power-Back-Off Used for ADSL. In Proceedings EC-SIP-M 2005. Bratislava: Slovak University, 2005, s. 349-353. ISBN 80-227-2257-X.
- [A12] Vodrážka, J. - Zahradník, P.: Filtering for FDD ADSL. In Proceedings of the Conference TSP'2005. Brno: University of Technology, 2005, s. 87-90. ISBN 80-214-2972-0.
- [A13] Vodrážka, J. - Šimák, B.: Theoretical Limits of DSL Lines. In Communication and Information. Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl, 2005, s. 243-246. ISBN 80-8040-269-8.
- [A14] Vodrážka, J. - Hrad, J.: Using Simulations for Evaluation of Measurements on ADSL2+ Lines. Acta Electrotechnica et Informatica. 2006, vol. 6, no. 1, s. 66-70. ISSN 1335-8243.
- [A15] Vodrážka, J.: Analyse of Hybrid Access Network. In Research in Telecommunication Technology 2006 [CD-ROM]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, vol. I, s. 14-17. ISBN 80-214-3243-8.
- [A16] Kuchar, A. - Hrstka, J. - Vodrážka, J.: Access networks in the Czech Republic – status and issues. In 1st International Conference on Access Networks [CD-ROM]. Athens: Athens Information Technology, 2006.
- [A17] Vodrážka, J. - Jareš, P.: Using Simulations for Qualification of ADSL2+ Lines. In IWSSIP 2006 and COST 292. Košice: HARLEQUIN s.r.o., 2006, s. 35-38. ISBN 80-89082-09-2.
- [A18] Vodrážka, J. - Jareš, P. - Prokop, T.: Modeling of Middle-range Metallic Lines for Ethernet with VDMT. In IWSSIP 2007 & EC-SIPMCS 2007. University of Maribor, 2007, s. 277-280. ISBN 978-961-248-029-5.
- [A19] Vodrážka, J. - Hrad, J. - Jareš, P.: Modeling of Access Network Structure. In Proceedings of the 6th Conference on Telecommunications [CD-ROM]. Lisboa: Instituto de Telecomunicações, 2007, s. 469-472. ISBN 978-989-8109-01-9.

7 Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.

Narozen 29. 4. 1966 v Praze. Absolvoval Střední průmyslovou školu elektrotechnickou Praha 2 - Ječná, obor Automatizační technika. V letech 1985 až 1989 studoval ČVUT FEL v Praze v oboru Telekomunikační technika, v letech 1996 až 2000 externí formu postgraduálního studia tamtéž. Od roku 1996 zároveň působí jako odborný asistent na Katedře telekomunikační techniky a vedoucí laboratoře přenosové techniky. Od roku 1998 přednáší a vede cvičení předmětů Přenosové systémy I a II i další.

Od roku 2003 působí jako školitel v doktorském studiu, člen komise pro státní doktorské zkoušky, od roku 2007 i jako člen komise pro obhajoby disertačních prací oboru Telekomunikační technika. Aktivně se podílí na rozvoji elektronické podpory výuky (aplikace a rozvoj systému LMS, LG a jejich obsahu) a celoživotního vzdělávání (kariérní kurzy ČVUT FEL).

V roce 2005 byl jmenován vedoucím pracovní skupiny Přenosová média a systémy, roce 2006 správcem položky rozpočtu a v roce 2007 zástupcem vedoucího Katedry telekomunikační techniky.

Podílí se na řadě grantových projektů (GAČR, NPV), projektů ve spolupráci s externími organizacemi a je koordinátorem skupiny na katedře telekomunikační techniky řešící výzkumný záměr Výzkum perspektivních informačních a komunikačních technologií. Pravidelně a intenzivně publikuje, je členem redakční rady konference Teleinformatika a elektronického časopisu Access server. Členem grantové komise FRVŠ G1 byl v letech 2004 až 2005. V rámci komise při APVTS se podílel na vytvoření nového plánu přenosových parametrů pro veřejné telefonní sítě v letech 2004 až 2005.