

Konference Optické komunikace 2007

Vážení účastníci konference Optické komunikace 2007,

optické komunikační systémy stále pokračují ve svém dramaticky rychlém postupu, ale současně sílí soutěž s mnoha dalšími přenosovými médii. Dávno skončila doba dedikovaných distribučních (komunikačních) sítí pro daný účel (např. televizní vysílání, hlasová služba atd.). Hovoříme obecně o datových přenosech (např. triple play) a rozlišení se týká spíše typu komunikace: stacionární – mobilní, point-to-point, point-to-multipoint, datacasting atd. Proto jsme se pokusili letošní ročník konference OK 2007 zaměřit na tento probíhající konkurenční boj mezi optickými přenosovými médii a ostatními přenosovými možnostmi a vyhodnotit současný stav a blízkou budoucnost v oblasti optických komunikací. Tato fáze rozvoje datových sítí zřejmě patří kombinovaným (hybridním) komunikačním systémům od globálních páteřních sítí až po „last mile“ k vlastnímu uživateli, které kombinují a budou kombinovat v různých sestavách všechny existující technické principy. Všichni ale očekáváme, že poněkud vzdálenější budoucnost již postupně přinese plně optické sítě dosahující až ke konečnému stacionárnímu uživateli.

OBSAH

<u>Dvojměrné modelování fotonických struktur</u> <i>Čtyrský J.</i>	1
<u>Výukové soubory pro vláknovou optiku, optoelektroniku a optické komunikace</u> <i>Hájek M., Švrček M.</i>	11
<u>Lavínová fotodióda s rezonančním převýšením (RCE APD)</u> <i>Haško D., Kováč J., Škriniarová J., Jakobovič J., Uherek F., Chovan J.</i>	17
<u>Meracie pracovisko pre meranie polarizačnej závislosti vložných strát pasívnych prvkov integrovanej fotoniky</u> <i>Chovan J., Uherek F., Haško D.</i>	21
<u>Hybridní fotonické integrované obvody s planárními polymerními optickými vlnovody</u> <i>Jeřábek V., Hüttel I., Prajzler V., Bušek K., Arciniega J.A.</i>	29
<u>Optické vlastnosti vrstev GaN s dotací Er³⁺ + Yb³⁺ iontů</u> <i>Jeřábek V., Prajzler V., Hüttel I.</i>	35
<u>Svářečky optických vláken Corning nové generace</u> <i>Kracík J.</i>	41
<u>Hnací síly a brzdy zavádění optiky do přístupových sítí doma a ve světě</u> <i>Kuchar A., Hrstka J.</i>	53
<u>Zkušenosti z výstavby a provozu multifunkční sítě ve městě Šumperk</u> <i>Kuchar A., Purš J.</i>	65
<u>Přehled nejaktuálnějších vědeckých problémů v oblasti disperze u mikrostrukturálních vláken</u> <i>Lucki M., Vodrážka J., Boháč L.</i>	71
<u>FTTx in Europe – trends, opportunities challenges</u> <i>Magnago A.</i>	77
<u>Kónicky zúžená optická vlákna</u> <i>Martan T., Kaňka J., Podrazký O., Kašík I., Matějec V.</i>	89
<u>DWDM pro metropolitní sítě v kombinaci s CWDM a jedno vlákno</u> <i>Šíma J.</i>	99

<u>Využití mřížky s dlouhou periodou pro konverzi fázové modulace na amplitudovou při 160Gb/s</u> <i>Škoda P., Honzátko P., Kumpera A.</i>	107
<u>Satelitní a mobilní optické spoje</u> <i>Wilfert O., Henniger H., Kolka Z.</i>	113
<u>Kolik jsou lidé ochotni zaplatit za poskytované služby</u> <i>Zajíček M.</i>	127
 <i>Přílohy</i>	
<u>Realita měření pasivních optických sítí</u> <i>Brouček J., Kosour P.</i>	
<u>xDSL versus optika</u> <i>Jalamudis P.</i>	
<u>Optická přístupová síť v reálných číslech</u> <i>Kotas R., Potrok P.</i>	

DVOJMĚRNÉ MODELOVÁNÍ FOTONICKÝCH STRUKTUR

Jiří Čtyrský

Anotace

Příspěvek popisuje původní metodu pro dvojměrné modelování fotonických struktur pomocí rozvoje optických polí v harmonické vlny. Je stručně popsán princip metody a její rozšíření a zdokonalení dosažené v poslední době. Metoda je kriticky porovnána s příbuznými modálními metodami, jako je metoda rozkladu obousměrné vlastní vidy a metoda Fourierova rozvoje. Jsou uvedeny příklady aplikací metody pro modelování různých typů fotonických struktur (mikrorezonátory, fotonické krystaly, plazmonické struktury). V závěru je stručně diskutována možnost rozšíření metody na modelování reálných trojměrných struktur.

Klíčová slova

Integrovaná fotonika, numerické modelování, modální metody, metoda rozkladu v obousměrné vlastní vidy, metoda Fourierova rozvoje, mikrorezonátory, fotonické krystaly, nanofotonika, plazmonika.

1. Úvod

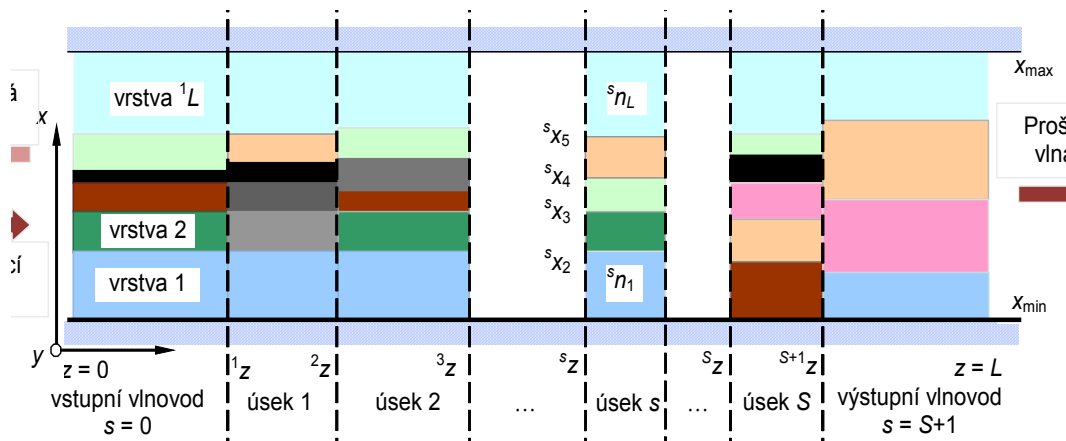
Numerické modelování a simulace se již staly nepostradatelnou součástí výzkumu a návrhu pokročilých struktur integrované fotoniky a jejich význam stále roste. Umožňují totiž strukturu do značné míry optimalizovat již při návrhu a výrazně tak zmenšit počet finančně nákladných vývojových iterací, které jsou zapotřebí k dosažení požadovaných technických i ekonomických parametrů. Numerické modelování kromě toho umožňuje detailněji pochopit fyzikální procesy v navrhované struktuře, a stává se tak i velmi cennou pedagogickou pomůckou při výuce na vysokých školách. I když návrhové a simulační programové balíky pro fotonické struktury se ještě zdaleka nevyrovňají svou sofistikovaností a uživatelským komfortem návrhovým systémům rutinně používaných v mikroelektronice, situace se postupně mění. Dosavadní rozdíl je dán nejen řádově nižšími náklady vynaloženými na vývoj fotonických simulačních systémů, ale i značnou topologickou a technologickou rozmanitostí fotonických struktur. Situaci rovněž komplikuje i vektorový charakter optického záření, který je třeba v moderních fotonických součástkách plně respektovat.

Každý pokročilejší programový balík pro modelování integrovaných fotonických struktur obsahuje nástroje pro řešení dvou základních typů úloh, a to pro výpočet vlastních vidů podélně homogenní vlnovodné struktury („řešič“ vidů, angl. „mode solver“), a pro výpočet rozložení optického záření ve více či méně složité obecné vlnovodné struktuře (metody obvykle, ale nepřesně nazývané „metody šíření optického svazku“, angl. „beam propagation methods“). Řešiče vidů se mj. zpravidla používají i pro výpočet rozložení optických polí, kterými jsou složitější vlnovodné struktury buzeny na vstupu.

Tento příspěvek popisuje jednu z modálních metod pro výpočet rozložení pole v obecné dvojdímenzionální (2D) vlnovodné struktuře, která plně bere v úvahu i zpětně se šířící odražené vlny. Metoda vychází z klasické metody rozkladu v obousměrné vidy (*bidirectional expansion and propagation method*, „BEP“) [1].

2. Metoda rozkladu ve vlastní vidy využívající Fourierův rozvoj

Obecnou dvojrozměrnou vlnovodnou strukturu, v níž hledáme rozložení pole, je možno schematicky znázornit jako kaskádně řazené úseky vlnovodů, viz Obr. 1. Každý podélně homogenní úsek vlnovodu přitom považujeme za vrstevnatou strukturu; případný gradientní profil indexu lomu nahrazujeme skokovou funkcí.



Obr. 1: Schematické uspořádání vlnovodné struktury.

Původní metoda BEP [1, 2] je určena k výpočtu rozložení optického záření, které ve struktuře vznikne při buzení vlnou o známém (příčném) rozložení pole, která na vlnovodnou strukturu dopadá zleva. Vlnovodnou strukturu rozdělíme na podélně homogenní úseky; pokud struktura obsahuje podélně plynule proměnné části, je zapotřebí je aproximovat vhodně zvolenou soustavou homogenních úseků. V každém homogenním úseku nalezneme soubor vlastních vidů, a vyjádříme celkové pole jako jejich superpozici s dosud neznámými amplitudami, přičemž bereme v úvahu vidy šířící se v obou směrech osy z . Na rozhraní podélně homogenních úseků aplikujeme podmínky spojitosti tečných složek intenzit elektrického a magnetického pole. Tím získáme relace mezi komplexními amplitudami vidů v sousedních úsecích. Rozložení vstupního záření vyjádříme jako superpozici vidů vstupního úseku vlnovodu šířících se v kladném směru osy z . Amplitudy vidů ve výstupním úseku vlnovodu šířících se v záporném směru osy z položíme rovny nule, poněvadž vlnovodná struktura není buzena zprava. Relace mezi komplexními amplitudami nám pak umožní vypočítat komplexní amplitudy všech vidů ve všech úsecích vlnovodu a určit tak rozložení pole uvnitř struktury, i pole odražené a prošlé vlny.

Pro výpočet souboru vlastních vidů v každém úseku vlnovodu je výhodné diskretizovat jejich spektrum tím, že se struktura uzavře do výpočetního okna konečného rozměru v příčném směru x (na Obr. 1 jsou stěny definovány souřadnicemi x_{\min} a x_{\max}). Jako okrajové podmínky se s výhodou volí elektricky nebo magneticky dokonale vodivé stěny. Nežádoucí odrazy záření zpět do vlnovodné struktury lze do značné míry potlačit tzv. transparentními nebo absorpčními okrajovými podmínkami; v našem případě využíváme tzv. dokonale přizpůsobené vrstvy („perfectly matched layers“, PML [3-5]).

Spolehlivý výpočet velkého množství vlastních vidů všech homogenních úseků je obtížný, zejména pro ztrátové struktury, v nichž je nutné hledat konstanty šíření vidů v komplexní rovině. Pro usnadnění výpočtu jsme v našem algoritmu využili rozklad všech složek polí v harmonické funkce splňující potřebné okrajové podmínky.

V případě vidů TM polarizace (vektor \mathbf{E} leží v rovině xz) je pro dobrou konvergenci algoritmu navíc nutno použít vhodný postup výpočtu využívající tzv. fourierovské faktorizace [6-8]. Tento postup převádí úlohu určit vlastní vidy homogenních úseků struktury na problém lineární algebry – výpočet vlastních hodnot a vlastních vektorů matice, pro jehož řešení existují velmi efektivní, spolehlivé a ověřené algoritmy. Metodu BEP využívající rozvoje v harmonické funkce jsme označili akronymem BEX (*bidirectional eigenmode expansion using harmonic expansion*).

Využití rozvoje polí v harmonické funkce má své výhody i nevýhody. Základní nevýhodou je, že pro dostatečnou přesnost výpočtu je zapotřebí vzít v úvahu větší počet harmonických funkcí než přesně vypočtených vlastních vidů, čímž roste výpočetní náročnost. Výhodou metody je především algoritmická jednoduchost a numerická robustnost. Zatímco v původní metodě BEP vedou podmínky spojitosti polí na rozhraních homogenních úseků k nutnosti počítat překrytové integrály rozložení polí vidů na obou stranách rozhraní, v metodě BEX je tento problém redukován na prostý výpočet skalárního součinu dvou vektorů.

Další výhodou metody BEX je, že striktně zachovává reciprocitu a pro bezztrátové struktury i výkon (na rozdíl od metody BEP, u níž pro zachování reciprocity i výkonu je nutno algoritmus výpočtu určitým způsobem upravit). Algoritmus metody BEX je zvláště jednoduchý, pokud příčné rozložení indexu lomu v každém podélně homogenním úseku je po částech konstantní (tj. úsek je tvořen vrstevnatou strukturou – multivrstvou).

Pro výpočet rozložení pole podél struktury s vnitřními odrazy je třeba použít numericky stabilní algoritmus; v našem programu je proto použita metoda rozptylové matice. Ta je sice výpočetně poněkud složitější než metoda příčné impedance (admittance), její výhodou je ale zřejmá fyzikální interpretace.

Metoda BEX umožňuje také efektivní způsob výpočtu rozložení prošlého a odraženého záření ve vlnovodných strukturách periodických ve směru šíření, jako jsou např. braggovské mřížky, fotonické krystaly a vlnovody v nich vytvořené. Postup výpočtu je takový, že nejprve vypočítáme rozptylovou matici jedné periody struktury, a z ní pak určíme Blochovy vidy periodické struktury. V bázi Blochových vidů je pak možno snadno popsat průchod vlny celou periodickou strukturou najednou. Blochovy vidy samy o sobě poskytují navíc mnoho informací o vlastnostech periodické struktury, zejména o případné existenci, poloze a šířce zakázaného pásu energií fotonů. Podrobný popis metody BEX byl nedávno publikován v práci [9].

2. Zdokonalení a rozšíření metody

Původní metoda popsaná v práci [9] používala pro rozklad optického záření TE i TM polarizace pouze sinových funkcí typu

$$u_m(x) = \sqrt{\frac{2}{X}} \sin\left[\frac{mp}{X}(x - x_{\min})\right] \quad X = x_{\max} - x_{\min}, \quad m = 1, 2, K, M, \quad (1)$$

kde M je počet harmonických funkcí, které uvažujeme. Algoritmus výpočtu byl sice jednoduchý, ale umožňoval používat pro vlny TE polarizace pouze elektricky vodivé stěny a pro vlny TM polarizace pouze magneticky vodivé stěny. Je přitom známo [10], že porovnání výsledků získaných s oběma typy okrajových podmínek umožňuje dobře posoudit vliv velikosti výpočetního okna. Metoda byla proto rozšířena tak, aby umožňovala aplikovat všechny kombinace elektrických i magnetických stěn pro TE i TM polarizaci. K tomu bylo třeba použít další soubory funkcí – kosinový,

$$v_1(x) = \sqrt{\frac{1}{X}}, \quad v_m(x) = \sqrt{\frac{2}{X}} \cos\left[\frac{(m-1)p}{X}(x - x_{\min})\right] \quad m = 2, K, M, \quad (2)$$

posunutý sinový,

$$u_m(x) = \sqrt{\frac{2}{X}} \sin\left[\frac{\left(m - \frac{1}{2}\right)p}{X}(x - x_{\min})\right] \quad m = 1, 2, K, M, \quad (3)$$

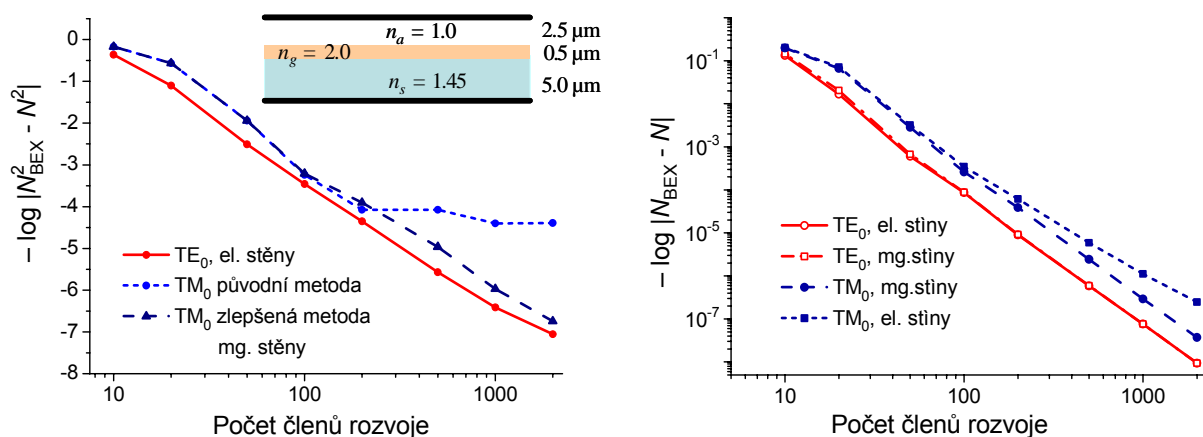
a posunutý kosinový,

$$v_m(x) = \sqrt{\frac{2}{X}} \cos\left[\frac{\left(m - \frac{1}{2}\right)p}{X}(x - x_{\min})\right] \quad m = 1, 2, K, M. \quad (4)$$

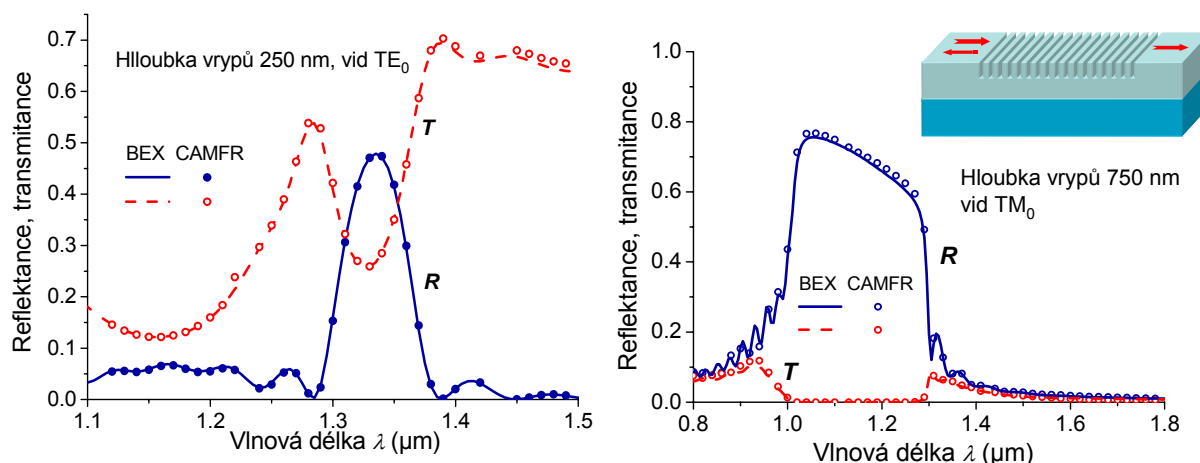
Toto rozšíření umožňuje zefektivnit modelování struktur se zrcadlovou symetrií ve směru kolmém na směr šíření. V takové struktuře se totiž šíří nezávisle symetrické a antisymetrické vidy. Vložíme-li do roviny symetrie struktury elektricky nebo magneticky vodivou stěnu, stačí pak počítat šíření pouze v jedné polovině struktury, tj. s poloviční velikostí výpočetního okna. Můžeme pak snížit počet členů rozvoje na polovinu bez ztráty přesnosti, čímž několikanásobně (téměř 8×) urychlíme výpočet.

Podrobný rozbor dále ukázal, že pro vlny TM polarizace mezi dvěma magnetickými stěnami je třeba v harmonickém rozvoji podélné složky magnetického pole vzít v úvahu také konstantní člen $v_1(x)$ (viz vztah **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), který v původní verzi metody [9] nebyl uvažován. Jak velký vliv má tato modifikace na přesnost výpočtu, lze dobře ukázat na jednoduchém příkladu výpočtu efektivního indexu lomu základních vidů TE_0 a TM_0 vrstevného vlnovodu Si_3N_4 na podložce SiO_2 .

Referenční hodnota efektivního indexu lomu byla vypočtena rigorózní metodou přenosové matice [11]. Jak je zřejmé z Obr. 2, konvergence vidu TM_0 se použitím zdokonalené metody výrazně zlepšila. Optimální využití fourierovské faktorizace se projevuje tím, že rychlost konvergence pro polarizaci TM je téměř stejná jako pro polarizaci TE.



Obr. 2: Chyba efektivního indexu lomu vidů TE_0 a TM_0 planárního vlnovodu (vložený obrázek v levém grafu) v závislosti na počtu členů rozvoje pro původní a zlepšenou metodu (vlevo) a pro elektrické a magnetické stěny (vpravo). Vlnová délka $1,3 \mu\text{m}$.



Obr. 3: Spektrální závislost modální reflektance a transmittance hluboké mřížky o 20 periodách vyleptané ve vrstevném vlnovodu Si_3N_4 tloušťky 500 nm na podložce SiO_2 . Střída mřížky 1:1, perioda 430 nm. Vlevo: hloubka vrypů 250 nm, vid TE_0 , vpravo hloubka vrypů 750 nm (mřížka proleptaná až do substrátu do hloubky 250 nm), vid TM_0 .

Správná funkce zdokonaleného algoritmu byla ověřena porovnáním výsledků získaných s volně dostupným softwarovým nástrojem CAMFR [12] založeným na metodě BEP [2, 4]. Jako modelová struktura byla zvolena hluboká vlnovodná mřížka (zobecněná srovnávací úloha akce COST 268 [13]). Vlnovodná struktura je též jako na vloženém obrázku v levém grafu na Obr. 2. Shoda výsledků je velmi dobrá; drobné odlišnosti jsou způsobeny relativně malým počtem 75 vidů u programu CAMFR a 100 členů rozvoje u metody BEX, které byly při výpočtu použity.

Kromě metody BEP reprezentované programem CAMFR existuje i metoda fourierovského rozkladu [7, 14, 15] vyvinutá P. Lalannem se spoluautory, která dává rovněž v podstatě identické výsledky [13]. Proč jsme tedy metodu BEX vyvíjeli, v čem jsou její přednosti? Pokusíme se stručně odpovědět.

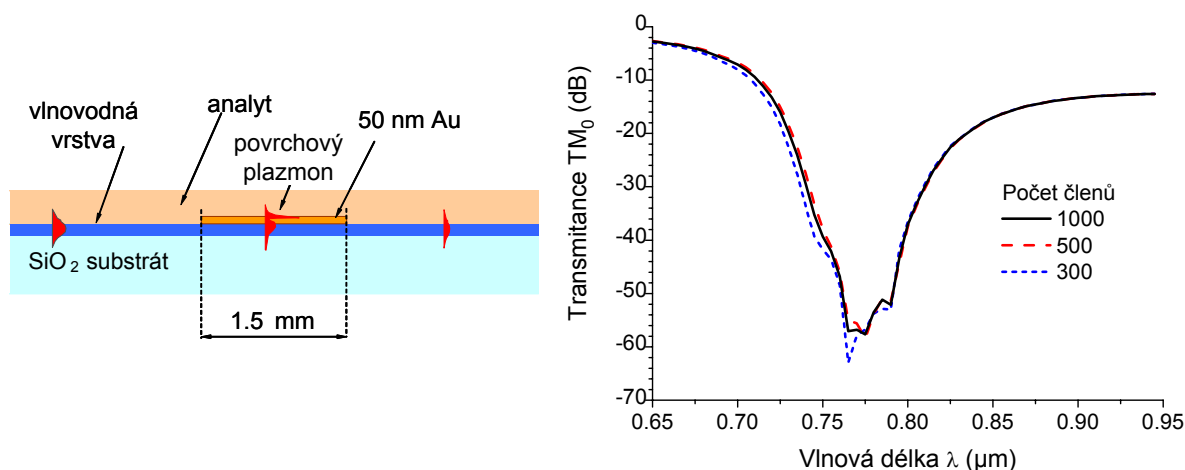
Základní princip programu CAMFR a metody BEX je týž, rozdíl je ve způsobu výpočtu vlastních vidů podélně homogenních úseků vlnovodů. CAMFR pracuje s „rigorózně“ spočítanými vidy, BEX s jejich Fourierovým rozvojem ve výpočetním okně. Vidy určené metodou BEX jsou tedy určeny s menší přesností. Jejich hledání je však algoritmicky podstatně jednodušší, a to i pro ztrátové struktury. Proces „sešívání“ vidů na rozhraní podélně homogenních úseků vlnovodů je u metody BEX rovněž mnohem jednodušší. Metoda BEX z principu zachovává reciprocitu a pro bezeztrátové struktury i výkon, zatímco u metody BEP nejsou tyto vlastnosti samozřejmé a musí být do algoritmu vhodným způsobem „uměle“ implementovány. Zkušenosti ukazují, že metoda BEX je výpočetně robustnější (selhává méně často) než metoda BEP, která však je obecně poněkud přesnější, zejména pro struktury obsahující velmi tenké vrstvy. Jak však ukážeme dále, metoda BEX poskytuje použitelné výsledky i pro struktury s tenkými kovovými vrstvami umožňujícími šíření povrchových plazmonů.

Metoda BEX je rovněž velmi blízká metodě Fourierova rozkladu, ta však využívá periodické okrajové podmínky na hranicích výpočetního okna, a místo rozkladu v sinové nebo kosinové funkce využívá rozkladu v komplexní exponenciály. To sice vede na jednodušší algoritmus výpočtu, ale není možné použít techniku „dokonale přizpůsobených vrstev“ pro potlačení nežádoucích odrazů od okrajů výpočetního okna, takže je třeba volit jiné, zpravidla složitější postupy, jako je např. nelineární transformace souřadnic v blízkosti okrajů výpočetního okna [15]. Také není možné využít symetrie problému k redukci výpočetní náročnosti, jako v případě metod BEX. Z obecného hlediska tak lze říci, že metoda BEX stojí zhruba uprostřed

mezi metodou BEP a metodou Fourierova rozkladu, a v mnohých případech využívá výhod obou z nich. Z praktického hlediska je její velkou výhodou relativní jednoduchost, stabilita a vhodnost pro implementaci v programovacím prostředí MATLAB (většina výpočetních operací má charakter problémů lineární algebry).

3. Příklady použití

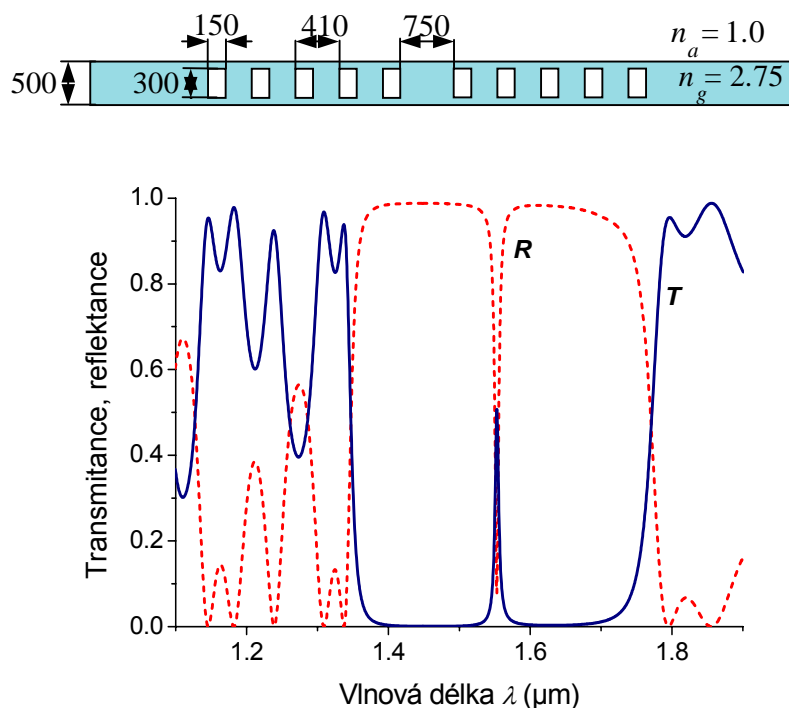
Metoda BEX využívá Fourierova rozvoje, takže při modelování struktur obsahujících velmi tenké vrstvy bychom měli očekávat ztrátu přesnosti vlivem omezeného prostorového rozlišení. Ve skutečnosti není tento nedostatek příliš významný, jak je zřejmé z příkladu na Obr. 4.



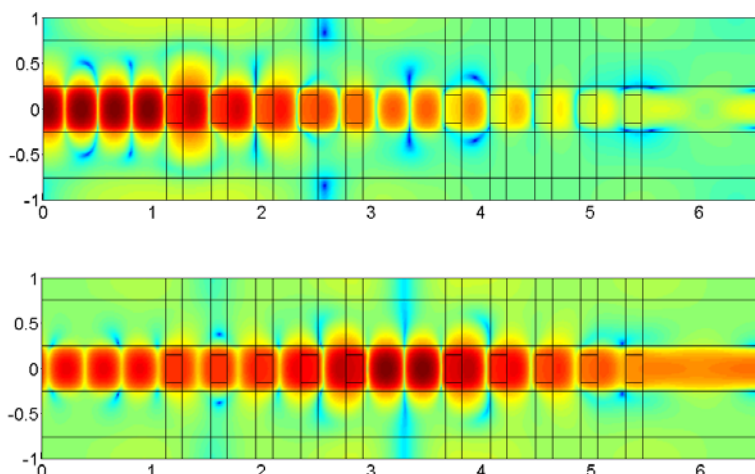
Obr. 4: Spektrální závislost transmittance vidu TM_0 ve vlnovodné struktuře umožňující rezonanční excitaci povrchového plazmonu (model vlnovodného senzoru s povrchovým plazmonem).

Graf znázorňuje spektrální závislost transmittance vidu TM_0 planárního vlnovodu tvořeného vrstvou dopovaného SiO_2 tloušťky $3 \mu m$ na podložce z taveného křemene. Index lomu vlnovodné vrstvy je zvýšen o $0,006$ vůči podložce. Na vlnovodu v úseku dlouhém $1,5 \text{ mm}$ je nanosena zlatá vrstva tloušťky 50 nm , na jejíchž rozhraních mohou být rezonančně excitovány povrchové plazmony. Komplexní permitivita zlaté vrstvy na vlnové délce $0,8 \mu m$ je $e_{Au} = -27.3426 + 2.0170i$. Nad vlnovodem je prostředí (analyt) s indexem lomu $1,4$. Z grafu je zřejmé, že metoda BEX umožňuje s malou chybou určit i značný útlum procházejícího vidu překračující při rezonanční excitaci povrchového plazmonu hodnotu 50 dB i při relativně nevelkém počtu 300 členů rozvoje.

Další příklad demonstruje použití metody BEX na „nanofotonický“ vlnovodný spektrální filtr. Ve vlnovodu z křemíku na podložce SiO_2 o příčných rozměrech $500 \times 300 \text{ nm}$ jsou vytvořeny obdélníkové otvory o rozměrech $300 \times 150 \text{ nm}$, které tvoří Fabryův-Perotův rezonátor s rozloženými braggovskými zrcadly. Alternativně je možno tuto strukturu považovat za filtr tvořený „poruchou“ uprostřed jednodimenzionálního „fotonického krystalu“. Pro účely modelování je trojrozměrná struktura redukována na dvojdimenzionální problém pomocí metody efektivního indexu lomu. Struktura je znázorněna v horní části Obr. 5, dolní část ukazuje spektrální závislost transmittance vidu TE_{00} . Na vlnové délce $1,55 \mu m$ má filtr úzké propustné pásmo o pološířce přibližně 5 nm , což odpovídá činiteli jakosti filtru asi 310 . Na Obr. 6 je znázorněno rozložení pole v nanofotonickém filtru na Obr. 5 pro dvě různé vlnové délky optického záření. Horní obrázek odpovídá buzení vlnovou délkou $1,45 \mu m$, která je uvnitř zakázaného pásu fotonického krystalu mimo rezonanci mikro dutiny,



Obr. 5: Spektrální závislost transmittance „nanofotonického filtru“ tvořeného mikrodutinou v jednorozměrném fotonickém krystalu vytvořeném v křemíkovém nanodrátu (nahore).



Obr. 6: Rozložení pole v nanofotonickém filtru podle Obr. 5 pro dvě vlnové délky optického záření. Nahore: vlnová délka $1,45 \mu\text{m}$ (mimo rezonanci), dole: vlnová délka $1,55 \mu\text{m}$ (v rezonanci).

dolní obrázek vlnové délce $1,55 \mu\text{m}$, odpovídající rezonanční frekvenci filtru. Z obrázku je zřejmé, že v prvním případě dochází ke zpětnému odrazu téměř veškerého dopadajícího výkonu, zatímco ve druhém případě podstatná část výkonu (podle grafu na Obr. 5 přibližně 50%) filtrem prochází.

4. Shrnutí a závěr

V příspěvku jsme podali stručnou charakteristiku nové varianty metody rozkladu v obousměrně se šířící vidy pro numerické modelování dvojměrných fotonických struktur, v nichž může docházet k silným vnitřním odrazům. Metoda využívá rozkladu vlastních vidů v řadu harmonických funkcí splňujících požadované okrajové podmínky na hranicích výpočetního okna. Metoda je algoritmicky relativně jednoduchá, numericky stabilní, s velmi širokými aplikačními možnostmi. Na několika

příkladech různých struktur (periodické vlnovodné struktury a struktura umožňující excitaci povrchového plazmonu) jsme ukázali některé možnosti jejího použití. Nedávno byla rovněž v práci [16] podrobně popsána aplikace této metody na modelování integrovaných fotonických struktur s mikrozónátory.

Dalším vývojovým stupněm metody, o němž uvažujeme, je její zobecnění na reálné trojrozměrné struktury. Trojrozměrná verze původní metody BEP již byla komercializována [17], je však velmi náročná na výpočetní čas (i finanční prostředky). Zobecnění metody využívající rozkladu vidů v harmonické funkce by mohlo výrazně urychlit výpočet vlastních vidů. Numerická náročnost by sice zůstala i přesto velká, metoda by však svým charakterem měla umožnit poměrně efektivní paralelizaci výpočtu. Způsob optimálního uplatnění fourierovské faktorizace, velmi účinný u dvojrozměrných struktur, však není pro trojdimenzionální struktury zcela jasný. Vzhledem k rychle narůstajícím potřebám trojrozměrného modelování jsou tyto problémy velkou aktuální výzvou k další práci.

5. Přehled literatury

- [1] G. Sztefka and H.-P. Nolting, "Bidirectional eigenmode propagation for large refractive index steps," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, pp. 554-557, 1993.
- [2] P. Bienstman, "Rigorous and efficient modelling of wavelength scale photonic components," PhD Thesis, University of Gent, 2001.
- [3] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of Computational Physics*, vol. 114, pp. 185-200, 1994.
- [4] P. Bienstman, H. Derudder, R. Baets, F. Olyslager, and D. De Zutter, "Analysis of cylindrical waveguide discontinuities using vectorial eigenmodes and perfectly matched layers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT49, pp. 349-354, 2001.
- [5] W. C. Chew, J. M. Jin, and E. Michielsen, "Complex coordinate stretching as a generalized absorbing boundary condition," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 15, pp. 383-369, 1997.
- [6] P. Lalanne and G. M. Morris, "Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 13, pp. 779-784, 1996.
- [7] P. Lalanne and E. Silberstein, "Fourier-modal methods applied to waveguide computational problems," *Optics Letters*, vol. 25, pp. 1092-1094, 2000.
- [8] L. Li, "Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 13, pp. 1870-1876, 1996.
- [9] J. Čtyroký, "A simple bi-directional mode expansion propagation algorithm based on modes of a parallel-plate waveguide," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 38, pp. 45-62, 2006.
- [10] C. Vassallo, *Optical waveguide concept*. New York: J Wiley, 1992.
- [11] J. Chilwell and I. Hodgkinson, "Thin-films field-transfer matrix theory of planar multilayer waveguides and reflection prism-loaded waveguides," *Journal of Optical Society of America*, vol. A-1, pp. 742-753, 1984.
- [12] P. Bienstman, <http://camfr.sourceforge.net/>

- [13] J. Čtyroký, S. Helfert, R. Pregla, P. Bienstman, R. Baets, R. de Ridder, R. Stoffer, G. Klaasse, J. Petráček, P. Lalanne, J.-P. Hugonin, and R. M. De La Rue, "Bragg waveguide grating as a 1D photonic bandgap structure: COST 268 modelling task," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 34, pp. 455-470, 2002.
- [14] E. Silberstein, P. Lalanne, J. P. Hugonin, and Q. Cao, "Use of grating theories in integrated optics," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 18, pp. 2865-2875, 2001.
- [15] J. P. Hugonin, P. Lalanne, I. d. Villar, and I. R. Matias, "Fourier modal methods for modelling optical dielectric waveguides," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 37, pp. 107-119, 2005.
- [16] J. Čtyroký, I. Richter, and M. Šiňor, "Dual resonance in a waveguide-coupled ring microresonator," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 38, pp. 781-797, 2006.
- [17] FIMMWAVE, Photon Design, Ltd., <http://www.photond.com>

Prof. Ing. Jiří Čtyroký, DrSc.
Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.
Chaberská 57, 182 51 Praha 8
tel: 266 773 409
fax: 284 680 222
e-mail: ctyroky@ufe.cz

VÝUKOVÉ SOUBORY PRO VLÁKNOVOU OPTIKU, OPTOELEKTRONIKU A OPTICKÉ KOMUNIKACE

Martin Hájek, Miroslav Švrček

Anotace

Společnost MIKROKOM se již řadu let zabývá vývojem učebních pomůcek a souborů pro výuku vláknové optiky, optoelektroniky a optických komunikací a výsledky tohoto dlouhodobého vývoje bychom chtěli v příspěvku představit. Zabýváme se v něm přístupy k vytváření uvedených souborů a pomůcek a konkrétními výsledky našeho vlastního vývoje, které ve svém dnes již velmi širokém záběru zahrnují oblasti od názorné demonstrace fyzikálních jevů na plastových optických vláknech, přes práci s v praxi nejrozšířenějšími skleněnými vlákny až po soubory zahrnující celou škálu aktivních a pasivních prvků optických sítí a systémů a umožňující výstavbu komplexního optického přenosového spoje. Takový systém pak má pomocí různých pomůcek a vybavení pro měření seznámit studenty s vlastnostmi, zacházením, měřením a využitím optických vláken, tras a aktivních a pasivních komponent a nakonec i s celým optoelektronickým přenosovým systémem pracujícím s různými typy signálů. Zvláštní místo bude věnováno také úsilí, implementovat do výukových souborů moderní technologie jako např. vlnový multiplex WDM nebo oblast spektrálních měření.

Klíčová slova

Výuka, výukové soubory, vláknová optika, optické komunikace, optická trasa, optické vlákno, měření

1. Vývoj výukových souborů pro vláknovou optiku

Společnost MIKROKOM, s.r.o. se od svého založení před 15-ti lety věnuje intenzivně oblasti využití optických vláken a optickým komunikacím. Ve společnosti funguje optická laboratoř, která má mnohaleté zkušenosti s měřením optických tras, vláken, součástek a systémů nebo s kalibrací měřících přístrojů pro vláknovou optiku. Pro měření je laboratoř autorizována i k provádění úředních měření a kalibrační laboratoř je mezinárodně akreditovaná.

Již od samého počátku své existence společnost MIKROKOM intenzivně spolupracuje také se středními a vysokými školami. Příkladem toho je i letos realizovaný rozsáhlý grantový projekt (zadaný MŠMT a podpořený z fondů EU) školení SŠ pedagogů po celé ČR, kde je věnována stěžejní pozornost právě optickým komunikacím. Podobně se laboratoř zabývá také již přes deset let vývojem učebních pomůcek a souborů pro výuku vláknové optiky, optoelektroniky a optických komunikací na středních a vysokých školách a výsledky tohoto vývoje zde chceme představit.

Požadavky kladené na výukové soubory a pomůcky v tak moderním a dynamickém oboru, jakým jsou optické komunikace a vláknová optika, jsou poměrně náročné. Jde o vývoj takových souborů, které by nejen názornou a přístupnou formou seznamovaly studenty s danou problematikou tzn. s nejdůle-

žitějšími fyzikálními principy a technickými přístupy, ale aby byly tyto soubory i co nejbližší reálné praxi a dále aby postihovaly pokud možno i moderní a nové technologie, které se v tomto dynamickém oboru stále objevují a rychle se dostávají i do praxe. To vše by mělo být navíc samozřejmě pro školy i prakticky – a tudíž i cenově – dostupné.

Během dlouholetého vývoje jsme postupně vyvinuli celou řadu výukových souborů, které na sebe vzájemně navazují. V tomto příspěvku bychom se chtěli věnovat dvěma stěžejním, které zastupují dva základní druhy výukových souborů, které se principiálně liší. První z nich je zaměřen zejména na principy přenosu informace optickým vláknem a součástí přenosového řetězce optického spoje a dále na různé fyzikální jevy ve vláknech a parametry vláken atd. Tento soubor proto využívá plastová optická vlákna pro maximální názornost, jednoduchost a také odolnost. Druhý soubor je naproti tomu více zaměřen na reálnou praxi, a proto je postaven na skleněných vláknech, která použití v optických komunikacích dominují.

2. Principy a názornost – výukový soubor EF-970

Výukový soubor EF-970 včetně řady jeho doplňků jsme vyvíjeli v rámci evropského podpůrného programu EUREKA pro španělského partnera (společnost PROMAX) který dnes ve spolupráci s námi soubor vyrábí.

Pro názornost a jednoduchost je užito standardního plastového optického vlákna (POF) o průměru 1 mm. Díky velkému průměru těchto vláken a díky použití zejména zdrojů záření v oblasti viditelných vlnových délek, je možné řadu jevů názorně (vizuálně) demonstrovat. Kromě toho je velká výhoda těchto vláken v jednoduchosti a odolnosti i pro ne zcela korektní zacházení (např. zašpinění či poškrábání čel optických konektorů, mechanické deformace nebo ohyby vláken apod.), což se pro výuku na škole hodí. Základní zaměření souboru je jednak v představení vlastností optického přenosového spoje a jeho optoelektronických komponent a jednak na parametry a vlastnosti optických vláken a nejrůznějších optovláknových součástek.

Z hlediska přenosu signálu pomocí optického vlákna otevírá soubor širokou paletu možností. Lze s ním vybudovat optický spoj přenášející analogový signál, který může být jak externí, tak z vlastního generátoru na různých frekvencích a různého tvaru. Může to být také audio, video nebo digitální signál. K vysílání do optického vlákna je možné použít buď laserový zdroj záření nebo LED diody na řadě vlnových délkách v pásmu 520 nm až 1300 nm. Pro detekci signálu jsou k dispozici různé typy fotodetektorů (PIN, lavinová fotodioda APD) z různých materiálů (Si, Ge, InGaAs). Díky tomu lze studovat vlastnosti různých typů zdrojů záření a fotodetektorů včetně spektrální závislosti různých materiálů fotodetektorů. Dva základní bloky souboru – vysílač a přijímač (obr. 1) jsou také vybaveny řadou měřicích bodů umožňujících připojení osciloskopu či voltmetru a samotný vysílač souboru je vybaven



Obr. 1

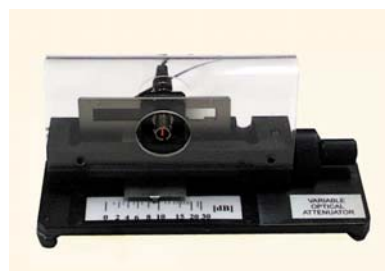
vlastním měřidlem proudu vysílacími zdroji záření. Soubor umožňuje přenos dvou nezávislých kanálů a tím i reflektuje moderní trendy v optických komunikacích a umožňuje postavit pomocí svých dalších optovláknových prvků (vláknových rozbočnic a optických filtrů) i dvoukanálový systém vlnového multiplexu WDM na vlnových délkách 660 nm a 850 nm.

Druhá skupina úloh se souborem EF-970 je zaměřena na studování vlastností optických vláken, tras a různých dalších optosoučástek a s tím i problematiku jejich měření. Přijímač souboru funguje ve zvláštním režimu také jako měřidlo výkonu a tím umožňuje provádět např. měření útlumu optického vlákna a trasy, zkoumání vlivu různých deformací a ohybů na útlum vlákna, měření numerické apertury vlákna (NA), měření útlumu konektorových spojení a mnoha dalších optovláknových součástek jako jsou optické rozbočnice, filtry a další, které jsou součástí výukového souboru (obr. 2). Díky zdrojům vysílače na řadě vlnových délek lze měřit často zajímavou spektrální závislost útlumu vláken a uvedených prvků a např. u systému WDM je možné měřit spektrální parametry celé trasy.

Součástí souboru je také proměnný optický attenuátor (obr. 3), jehož jádrem je útlumový klín vytvořený tiskovou metodou laserovým osvitem na průhlednou fólii, čímž byla získána stupnice útlumu do 30 dB. Díky proměnnému attenuátoru lze měřit jednak překlenutelný útlum nejrůznějších optických spojů sestavených v rámci souboru nebo je možné zkoumat vlastní parametry attenuátoru (např. jeho spektrální vlastnosti).



Obr. 2



Obr. 3

Soubor obsahuje dále také několik experimentů z oblasti optovláknových senzorů a též konektorovací soupravu pro ST konektory (které se všude v souboru užívají), která má za cíl praktické seznámení s procesem konektorování optických vláken. Součástí souboru je také samozřejmě skriptum, obsahující teoretické základy dané problematiky a zejména podrobné návody na několik desítek praktických experimentů. Ilustrativní ukázky některých využití souboru včetně video-ukázek můžete najít na stránkách vytvořených jednou ze škol, kde se soubory již používají ve výuce – SPŠE a VOŠ v Olomouci:

<http://www.lmsunifor.com/web/foxisapi.dll/lmsunifor.logon?U=VOSSPSE&P=student&L=CS>.

3. Blízko praxi – výukový soubor OPTEL PROFI

Soubor OPTEL PROFI slouží k seznámení s vláknovou optikou přímo v té podobě, v jaké ovládla svět telekomunikací a přenosu dat. Soubor je postaven na skleněných optických vláknech a to mnohovidových (MMF 50/125 a 62,5/125) i jednovidových (SMF). Všechny komponenty souboru jsou takové, které se běžně používají v praxi optických komunikací na různých úrovních od transportních až po místní sítě. Jedná se nejen např. o propojovací šňůry (patchcords), optickou trasu (délky 1 km), konektory a konektorové spojky (ST/PC) se soupravou na jejich čištění nebo útlumové články, ale i o měřicí zdroje optického záření (s LED i lasery) a měřidlo optického výkonu (obr. 4).

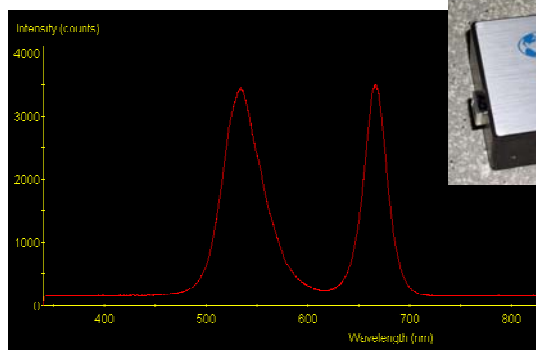
Úlohy a experimenty se souborem jsou tedy zaměřeny na zkoumání a experimenty s vlastnostmi skleněných optických vláken, trasy, konektorů apod. Soubor umožňuje názorné studium řady jevů, které jsou pro skleněná vlákna charakteristické, jako je vliv ohybu na útlum MMF a SMF vláken nebo vliv buzení u MMF vláken, kde se zjišťuje i dopad užití laserových oproti LED zdrojům záření apod. Blízko praxi ukazuje např. i měření útlumu 1 km dlouhé trasy, které se zde provádí metodami, kterých se běžně v terénu užívá a jsou doporučené dle mezinárodních norem a také pomocí měřicích přístrojů, kterými se optické trasy v praxi měří. S tím, s čím se studenti seznámí v tomto výukovém souboru, se později setkají ve svém případném zaměstnání při návrhu, zapojování, měření, či údržbě optické sítě. Součástí souboru jsou samozřejmě také učební texty, v nichž je popsán návod a postup pro řadu experimentů.



Obr. 4

4. Moderní způsob výuky vláknové optiky

S dalším růstem použití optických vláken v nových aplikacích a oblastech (a to nejen v optických komunikacích), kterého jsme neustále už po léta svědky, je tím více stále důležitější a nezbytnější i názorný a od praxe neodtržený způsob výuky. V našem příspěvku jsme chtěli prezentovat moderní výukové soubory, které jsme v uplynulých letech vyvinuli v naší laboratoři vláknové optiky a vř. techniky. Na dvou stěžejních souborech jsme chtěli prakticky ukázat i hlavní trendy v této oblasti, což je maximální názornost, přístupnost, univerzalita a modulárnost, což představuje především



Obr. 5

zmíněný soubor EF-970 a dále co nejtěsnější sepětí s reálnou praxí, o což usiluje druhý výukový soubor OPTEL PROFI. S oběma soubory je možné provádět desítky experimentů, jejichž hlavní kostra a návod je obsažen v učebních textech, kde jsou jednotlivé experimenty popsány s nezbytným teoretickým pozadím.

Jelikož se v této oblasti snažíme o další vývoj, který by co nejvíce odrážel současné moderní trendy, připravili jsme v současné době další výukový soubor, jehož jádrem je optický spektrální analyzátor (OSA), který dále rozvíjí širokou problematiku spektrálních měření např. i WDM přenosových systémů (Obr. 5).

Ing. Martin Hájek
Ing. Miroslav Švrček
MIKROKOM, s.r.o.
Pod Vinicí 622
Praha 4, 143 00
e-mail: martin.hajek@mikrokom.cz
miroslav.svrcek@mikrokom.cz
www.mikrokom.cz
www.mikrokom.sk
www.mikrokom.pl

LAVÍNOVÁ FOTODIÓDA S REZONANČNÝM PREVÝŠENÍM (RCE APD)

*Daniel Haško, Jaroslav Kováč, Jaroslava Škriniarová, Ján Jakobovič,
František Uherek, Jozef Chovan*

Anotácia

V príspevku je riešená problematika návrhu a charakterizácie elektrických a optických vlastností spektrálne selektívneho fotodetektora na báze materiálového systému GaAs/AlGaAs pre oblasť 850 nm využiteľného v optických komunikačných systémoch (OKS). Takýto typ detektora je možné realizovať vložением absorpčnej oblasti do interného alebo externého rezonátora, čím vznikne selektívny fotodetektor s rezonančným prevýšením (Resonant Cavity Enhanced - RCE). Selektívna detekčná vlnová dĺžka RCE fotodetektora závisí od dĺžky rezonančnej dutiny, pričom umiestnenie absorpčnej vrstvy do dutiny Fabry-Perotovho mikrorezonátora spôsobí viacnásobný prechod žiarenia s rezonančnou vlnovou dĺžkou cez absorpčnú vrstvu. To má za následok podstatné zvýšenie absorpcie v detektore v porovnaní s bežnými PIN fotodiódami. Proces lavínovania ešte zvyšuje efekt rezonančného prevýšenia. Na pripravených vzorkách lavínových RCE bol dosiahnutý lavínový zisk viac ako 15, na vlnovej dĺžke 850 nm pri závernom napätí 14.5 V s časom nábehu a dobehu $t_r = 390$ ps, $t_f = 420$ ps.

Kľúčové slová

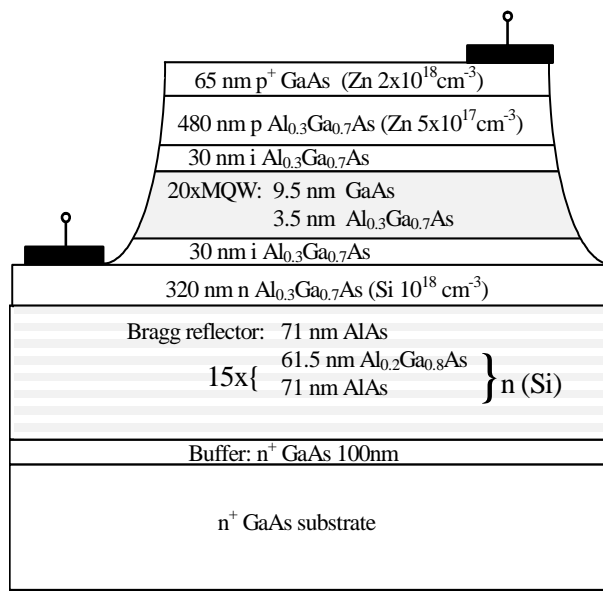
Fotodetektory, lavínová fotodióda s rezonančným prevýšením, selektivita, rýchlosť odozvy, citlivosť

1. Úvod

OKS na kratšie vzdialenosti (lokálne siete) využívajú fotodetektory pracujúce na vlnovej dĺžke 850 nm. Zvýšenie prenosovej kapacity už vybudovaných OKS sa dosahuje združovaním prenosových kanálov - napr. spektrálnym multiplexom (WDM). Demultiplex vlnových dĺžok možno realizovať buď použitím interferenčného alebo vláknového filtra, rozkladového prvku (mriežky alebo prizmy), alebo pomocou spektrálne selektívneho fotodetektora. Vysokú kvantovú účinnosť, selektivitu a rýchlosť pri nízkom prúde za tmy je možné dosiahnuť použitím RCE štruktúry [1]. Pri tomto type štruktúry sa využíva tenká absorpčná vrstva vložená medzi dve paralelné zrkadlá vytvárajúce Fabry-Perotov rezonátor [2]. Šírka rezonančnej dutiny je navrhnutá podľa požadovanej rezonančnej vlnovej dĺžky. Efektívna hrúbka absorpčnej vrstvy sa zvyšuje, pretože vstupujúce fotóny sa viacnásobne v rezonátore odrazia [3]. Ďalšie zvýšenie citlivosti je možné dosiahnuť lavínovým násobením vygenerovaných nosičov [4]. Vďaka týmto vlastnostiam sú RCE lavínové fotodiódy (APD) vhodné najmä na využitie v prijímačoch širokopásmových OKS [5]. Príspevok sa zaoberá analýzou vlastností pripravených RCE APD na báze GaAs/AlGaAs pre OKS pracujúcich na vlnovej dĺžke 850 nm.

2. Štruktúra RCE APD

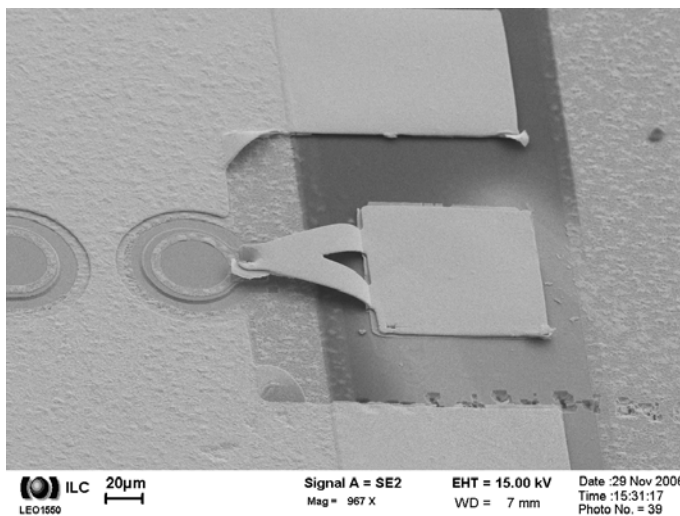
Pre vyšetovanie vlastností RCE fotodetektorov je rezonančný systém obyčajne asymetrický. Reflektivita horného zrkadla je najčastejšie realizovaná iba rozhraním vzduch - polovodič, pričom spodné zrkadlo, pri ktorom požadujeme čo najväčšiu reflektivitu, je použitý Braggov reflektor s niekoľkonásobnými párami striedajúcich sa štvrtvlnových polovodičových vrstiev. Vlnovú dĺžku maxima citlivosti RCE detektora možno doladiť odleptaním časti rezonátora, čiže zmenou šírky dutiny, čo je však proces nevratný. Ďalšou možnosťou je meniť uhol dopadu žiarenia na povrch detektora čím sa mení optická šírka dutiny a tým aj rezonančná vlnová dĺžka. Zaujímavá je aj možnosť meniť rozmery dutiny mechanicky. V tomto prípade je horné zrkadlo pohyblivé a jeho poloha sa mení elektrostaticky alebo piezoelektricky. Ak sa ako absorpčná vrstva použije štruktúra mnohonásobných kvantových jám (MQW) možno využiť kvantový Starkov jav (QCSE) a vlnovú dĺžku ladiť zmenou vonkajšieho elektrického poľa. Účinnosť detekcie sa výrazne zvýši selektívne len na rezonančnej vlnovej dĺžke. Navyše menšia hrúbka absorpčnej vrstvy v štruktúre podstatne zníži čas prechodu vygenerovaných nosičov ku kontaktom, čím sa zvýši rýchlosť odozvy fotodetektora. Prierez navrhnutou štruktúrou GaAs/AlGaAs RCE APD pre oblasť vlnových dĺžok v blízkosti 850 nm je na obr. 1. Štruktúra pozostáva zo spodného zrkadla - 15.5 párov AlAs/Al_{0,2}Ga_{0,8}As s hrúbkou $\lambda/4$, narastenom na n^+ GaAs substráte. Horné zrkadlo tvorí rozhranie polovodič - vzduch. Maximum odrazivosti spodného zrkadla je navrhnuté na vlnovú dĺžku 855 nm. Ako absorpčná oblasť je použitá MQW štruktúra s 20 GaAs kvantovými jamami s hrúbkou 9.5 nm. Hrúbka susedných Al_{0,3}Ga_{0,7}As vrstiev je navrhnutá tak, aby maximálny zisk bol na požadovanej vlnovej dĺžke.



Obr. 1: Prierez štruktúrou GaAs/AlGaAs RCE APD

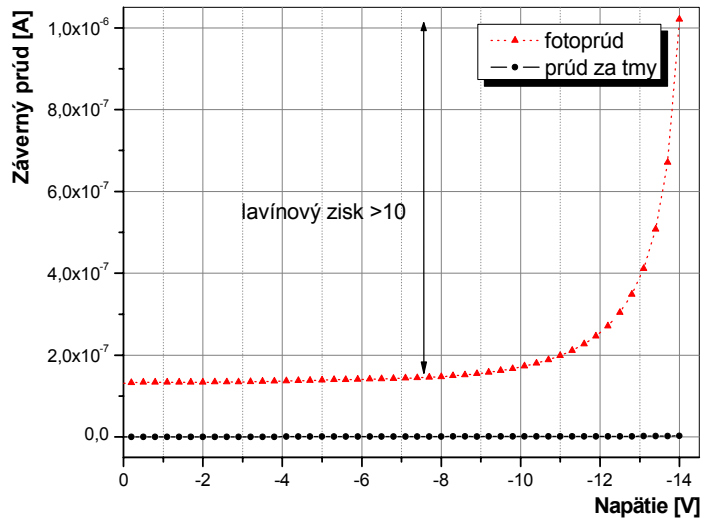
3. Charakterizácia pripravených RCE APD

Štruktúra lavínovej fotodiódy bola narastená MOCVD technológiou na Univerzite v Lipsku. RCE APD boli pripravené štandardnou fotolitografiou, mokrým chemickým leptaním a ohmicke kontakty boli vytvorené napařením. Prvky s planárne vyvedenými kontaktmi pomocou vzdušného kovového mostíka (air-bridge) umožňujú podstatne zmenšiť aktívnu plochu APD a tým zvýšiť rýchlosť ako aj šírku prená-

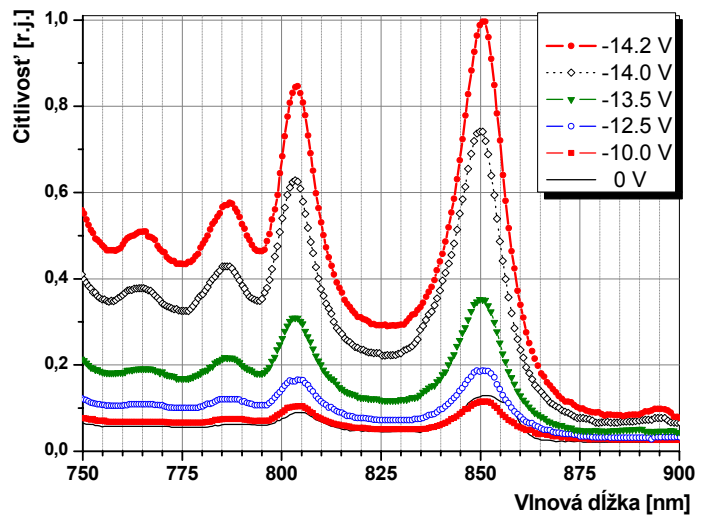


Obr. 2: Čip fotodiódy so vzdušným kovovým mostíkom

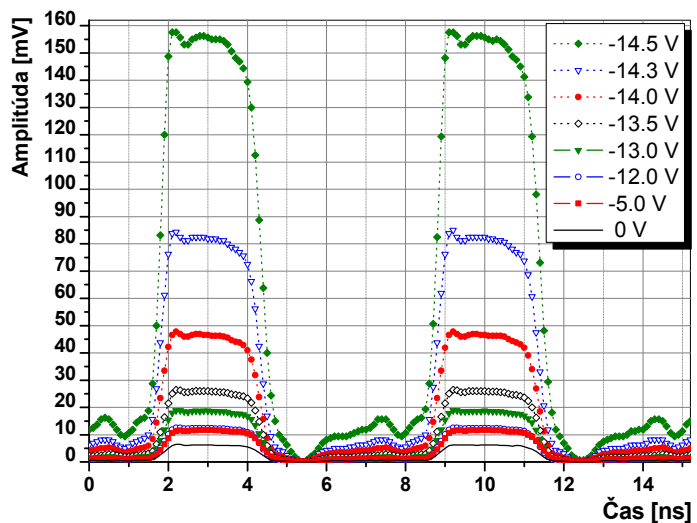
šaného pásma. Vytvorenie air-bridge je technologicky náročné a vyžaduje niekoľko technologických krokov, no umožňuje kontaktovať prvky menších rozmerov. Realizované fotodiódy majú priemer aktívnej oblasti $35\ \mu\text{m}$. Čip celej fotodiódy spolu s kontaktnými plôškami je zobrazený na obr. 2. Na prípravných prvkoch boli namerané V-A charakteristiky, spektrálne charakteristiky a rýchlosť odozvy na optický impulz. Na obr. 3 je znázornená V-A charakteristika pripravených RCE APD spolu s určeným lavínovým ziskom. Prúd za tmy je zobrazený plnou čiarou a fotoprúd pri osvetlení čiarkovanou. Prvky vykazujú prúd za tmy v blízkosti prierazu $2\ \text{nA}$, prierazné napätie v oblasti $14\ \text{V}$ a lavínový zisk viac ako 10. Spektrálne charakteristiky lavínovej fotodiódy bez pripojeného a s pripojeným záverným napätím do $14.2\ \text{V}$ sú na obr. 4. S rastúcim napätím sa v dôsledku kvantového Starkovho javu čiastočne posúva maximum fotoprúdu, zodpovedajúce absorpčnému prechodu v kvantovej jame, k väčším vlnovým dĺžkam. Vlnovú dĺžku preladiteľných RCE fotodetektorov možno elektricky nastaviť na vlnové dĺžky jednotlivých kanálov WDM OKS. Navyše, ak systém nevyžaduje súčasné prijímanie všetkých kanálov, možno jeden fotodetektor použiť na detekciu viacerých kanálov. Proces lavínovania zasa zvyšuje efekt rezonančného prevýšenia. Spektrálny lavínový zisk je viditeľný pri záverných napätiach vyšších ako $10\ \text{V}$ (obr. 4). Nízka kapacita prvku sa podieľa na rýchlejšej odozve na optický impulz. Na obr. 5 je znázornená závislosť rýchlosti časovej odozvy na vstupný optický impulz s vlnovou dĺžkou $850\ \text{nm}$ od pripojeného záver-



Obr. 3: V-A charakteristika GaAs/AlGaAs RCE APD



Obr. 4: Spektrálna charakteristika RCE APD



Obr. 5: Rýchlosť fotodozvy GaAs/AlGaAs RCE APD

ného napätia. So zvyšujúcim sa záverným napätím sa skracuje nábežná aj dobežná hrana meraného optického impulzu. V blízkosti prirazného napätia bol nameraný čas nábehu $t_r = 390$ ps a čas dobehu $t_f = 420$ ps. Z porovnania amplitúd odozvy fotodiódy na optický impulz pri rôznych záverných napätiach bol dosiahnutý lavínový zisk viac ako 15.

4. Záver

Boli pripravené a charakterizované GaAs/AlGaAs RCE APD pre OKS pracujúce na vlnovej dĺžke 850 nm s MQW absorpčnou vrstvou a planárne vyvedenými kontaktmi pomocou vzdušného kovového mostíka. Vytvorený mostík umožnil zredukovať aktívnu plochu prvku na priemer 35 μm a tým zlepšiť elektrické a optické vlastnosti fotodiód. Fotodiódy RCE APD dosahujú lavínový prriez v blízkosti záverného napätia 14 V, pri nízkom prúde za tmy 2 nA. Spektrálna charakteristika RCE APD vykazuje maximum na vlnovej dĺžke 850 nm dané navrhnutým rezonátorom. Proces lavínovania zvyšuje efekt rezonančného prevýšenia. Na pripravených RCE APD bol dosiahnutý lavínový zisk viac ako 15 na vlnovej dĺžke 850 nm pri závernom napätí 14.5 V s časom nábehu $t_r = 390$ ps a dobehu $t_f = 420$ ps.

5. Použitá literatúra

- [1] Kishino K. et al.: *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, Vol. 27, pp. 2025-2034
- [2] Chin A. et al.: *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, Vol. B 8, pp. 339-342
- [3] Kuchibhotla R. et al.: *IEEE Phot. Techn. Lett.*, 1991, Vol. 3, no. 4, pp. 354-356
- [4] Nie H. et al.: *Appl. Phys. Lett.*, 1997, Vol. 70, no. 2, pp. 161-163
- [5] Lenox C. et al.: *IEEE Phot. Techn. Lett.*, 1999, Vol. 11, no. 9, pp. 1162-1164

PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci projektov Slovenskej grantovej agentúry č. 1/3076/06 Medzinárodného laserového centra a č. 1/3108/06 Katedry Mikroelektroniky FEI STU.

Ing. Daniel Haško
Medzinárodné laserové centrum
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava, SK
tel: +421 2 65421575
fax: +421 2 65423244
e-mail: hasko@ilc.sk

MERACIE PRACOVISKO PRE MERANIE POLARIZAČNEJ ZÁVISLOSTI VLOŽNÝCH STRÁT PASÍVNYCH PRVKOV INTEGROVANEJ FOTONIKY

Jozef Chovan, František Uherek, Daniel Haško

Anotácia

Príspevok sa zaoberá návrhom a realizáciou meracieho pracoviska pre meranie polarizačnej závislosti vložných strát pasívnych prvkov integrovanej fotoniky.

V úvode príspevku sú uvedené dôvody potreby merania polarizačnej závislosti vložných strát fotonických prvkov a obvodov pre optické komunikačné systémy.

V druhej časti príspevku sú uvedené tri možné metodiky merania a vyhodnotenia polarizačnej závislosti vložných strát prvkov integrovanej fotoniky a ich základne vlastnosti.

V ďalšej časti príspevku je opísané zrealizované meracie pracovisko pre meranie polarizačnej závislosti vložných strát nezapuzdrených fotonických obvodov.

V záverečnej časti príspevku sú uvedené výsledky merania polarizačnej závislosti vložných strát 20 kanálového nezapuzdreného AWG obvodu pre DWDM systémy a sú porovnané namerané hodnoty jedného AWG kanála tromi opisovanými metódami.

Kľúčové slova

Charakterizácia, fotonika, fotonické integrované obvody, spektrálny multiplex, AWG obvody

1. Úvod

Používanie EDFA v optických komunikačných systémoch umožňuje dosiahnutie prenosových vzdialenosti 100 –viek kilometrov a tiež umožňuje realizáciu opticky transparentných prenosových systémov v celej dĺžke. Zvyšovanie prenosovej rýchlosti a vzdialenosti zvyšuje požiadavky na prenosové parametre optickej trasy a tiež meranie parametrov, ktoré boli doposiaľ zanedbávané. Jedným z typických príkladov je polarizačná závislosť strát (PDL - polarization dependent loss).

PDL je maximálna zmena transmisie optických komponentov v závislosti na všetkých možných polarizačných stavov optického žiarenia. PDL vykazujú mnohé optické komponenty ako sú optické deliče, filtre, prepínače, atenuátory, izolátory a podobne.

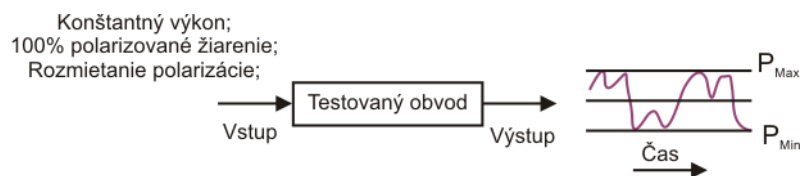
V komunikačnom systéme polarizačné zmeny prenosových parametrov optického vlákna sú spôsobené jeho mechanickým namáhaním alebo tepelnou indukciou dvojlomu. Ak tieto zmeny PDL optického vlákna sa s kombinujú so zmenami PDL optických komponentov, tak môžu vzniknúť nežiadané fluktuácie výkonovej úrovne optického signálu na strane prijímača. Z tohto dôvodu je dôležité pre stabilitu optických komunikačných systémov poznať PDL hodnoty pre jednotlivé optické komponenty a tiež vyvíjať a vyrábať optické komponenty, ktoré vykazujú nižšie hodnoty PDL ako súčasne typy optických prvkov.

2. Polarizačná závislosť strát

PDL je miera rozdielu transmisie špička - špička optických komponentov alebo systému v závislosti od všetkých možných stavov polarizácie vstupného žiarenia. Je to pomer maximálnej a minimálnej transmisie v závislosti od všetkých možných stavov polarizácie vstupného žiarenia. PDL je definovaná nasledovne:

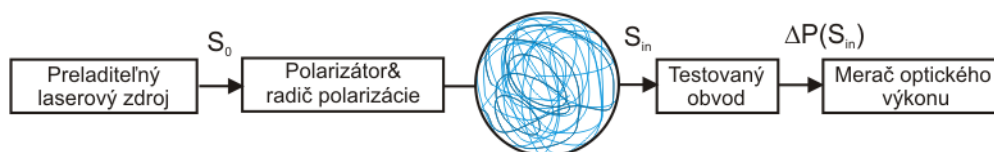
$$PDL_{dB} = 10 * \log\left(\frac{P_{Max}}{P_{Min}}\right) \quad (1)$$

Na obr.1 je efekt časovej zmeny polarizácie optického žiarenia na vstupe testovaného optického obvodu na výstupný výkon. Ak na vstupe obvodu sa mení polarizácia úplne polarizovaného a konštantného optického žiarenia tak na výstupe obvodu, ktorý vykazuje PDL, vzniknú zmeny optického výkonu.

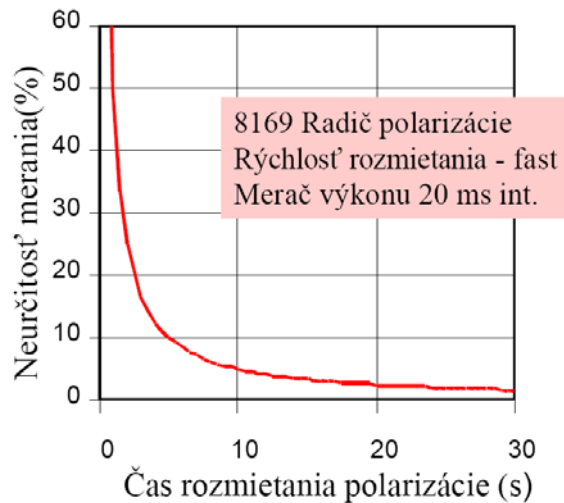


Obr. 1: Polarizačná závislosť strát pasívnych optických komponentov.

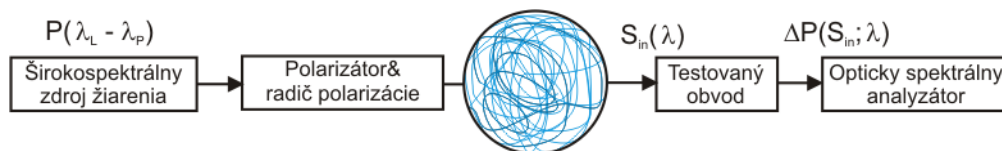
V súčasnosti v princípe existujú dva základné typy metód merania PDL. Prvá metóda merania PDL je založená na princípe generácie a rozmietať všetkých možných stavov polarizácie vstupného žiarenia testovaného obvodu a zaznamenávanie minimálnej a maximálnej hodnoty optického výkonu na výstupe testovaného obvodu (obr. 2). Táto meracia technika vyžaduje kalibráciu radiča polarizácie pre všetky generované stavy polarizácie, pretože obyčajne takýto radič vykazuje vnútorne PDL. Počas merania sú generované také isté polarizačné stavy ako počas kalibrácie a tak je možné realizovať korekciu merania. Takéto meranie je časovo náročné. Zmeranie jednej hodnoty PDL trvá rádovo 10 –ky sekúnd. Ak hodnoty vnútornej PDL radiča polarizácie sú zanedbateľné v porovnaní s PDL meraného obvodu (DUT - Device Under Test), tak kalibrácia nie je nutná a polarizácia žiarenia na vstupe meraného obvodu môže byť generovaná náhodne. V tomto prípade môže byť dosiahnutý čas merania menej ako 2 sekundy v kombinácii s časom integrovania merača optického výkonu na výstupe 20ms a pri zmeraní 100 stavov polarizácii. Vygenerovať a rozmietať všetky možné stavy polarizácie optického žiarenia na vstupe testovaného obvodu je prakticky nemožné. Je reálne možné rozmietať iba určitý počet polarizačných stavov s rýchlosťou vhodnou pre integračný čas optického merača výkonu na výstupe testovaného obvodu. Na obr. 3 je závislosť neurčitosti merania jednej hodnoty PDL v závislosti od času merania a teda od času rozmietať polarizácie vstupného žiarenia a zaznamenávanie minimálnych a maximálnych hodnôt výkonu na výstupe testova-



Obr. 2: Meracia technika rozmietať polarizácie vstupného žiarenia.



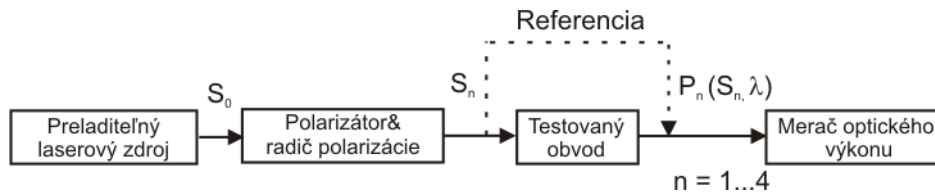
Obr. 3: Neurčitosť merania PDL v závislosti od času rozmiatania polarizácie na vstupe DUT.



Obr. 4: Metóda rozmiatania polarizácie a skenovania spektra.

ného obvodu [3]. Touto metódou merania PDL a zapojenia na obr. 2 je možné zmerať hodnotu PDL pre určitú vlnovú dĺžku na ktorej generuje žiarenia laserový zdroj. Meranie PDL optických prvkov pre WDM systémy vyžaduje ich meranie v určitom spektrálnom rozsahu. Ak je potrebné zmerať PDL len určitých bodoch spektrálneho rozsahu, tak metóda rozmiatania polarizácie je pre takéto meranie vhodná a je časovo nenáročná. Ak však hodnoty PDL je potrebné zmerať v celom spektrálnom rozsahu napr. C-pásme, tak táto metóda je časovo náročná. Modifikáciou zapojenia na obr.2 a to zámienou lasera za širokospektrálny zdroj žiarenia a merača optického výkonu za optický spektrálny analyzátor (OSA) je možné zrealizovať meranie PDL v určitom spektrálnom rozsahu metódou rozmiatania polarizácie a skenovania spektra (obr.4). OSA skenuje výstupné spektrum výstupného žiarenia a zaznamenáva maximálne a minimálne hodnoty pre celý spektrálny rozsah merania. Podmienkou správnej funkcie merania je, že rýchlosť rozmiatania polarizácie žiarenia na vstupe testovaného obvodu musí byť menšia ako rýchlosť skenovania a zaznamenávania spektra výstupného žiarenia. Taktiež hodnota internej PDL radiča polarizácie musí byť zanedbateľná voči PDL testovaného obvodu.

Druhý typ metód merania PDL sú založené na vygenerovaní známych polarizácií na vstupe testovaného obvodu a následný výpočet PDL. Typickým príkladom je Mueller/Stokes metóda merania. V tejto metóde je PDL merané meračom optického výkonu pri štyroch presne definovaných polarizáciách vstupného žiarenia. Analýzou Mueller/Stokes [1] je možné vypočítať hodnotu PDL. Bloková schéma tejto metódy merania je na obr. 5. Meranie a výpočet PDL metódou Mueller/Stokes pozostáva z troch krokov. Prvý krok je zmeranie optického výkonu optického žiarenia na výstupe radiča polarizácie pre štyri presne definované stavy polarizácie. Druhým krokom merania je zmeranie optického výkonu žiarenia na vý-



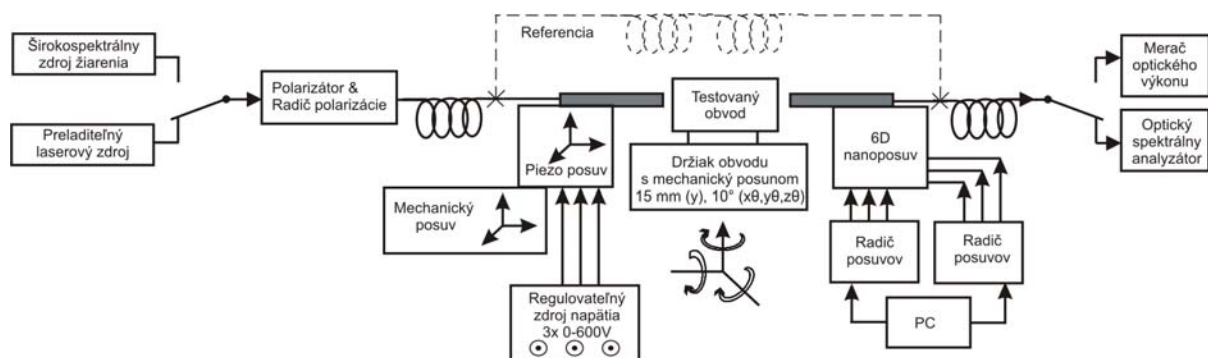
Obr. 5: Mueller/Stokes metóda merania PDL.

stupe testovaného obvodu pre tie isté štyri stavy polarizácie žiarenia ako v prvom kroku merania. Tretím krokom merania je výpočet PDL. Jednou z najväčších výhod tejto metódy je časová nenáročnosť vzhľadom na generáciu iba štyroch stavov polarizácie a príslušné meranie výkonu optického žiarenia. Touto metódou merania je možné časovo efektívnejšie merať PDL WDM prvkov v určitom spektrálnom rozsahu v porovnaní s metódou rozmietania polarizácie a skenovania spektra. Presnosť merania PDL WDM prvkov touto metódou je determinovaná presnosťou a opakovateľnosťou preladenia laserového zdroja a tiež jeho výkonovou stabilitou v celom meranom spektrálnom rozsahu.

3. Meracie pracovisko

Navrhnuté a realizované meracieho pracoviska na meranie PDL pasívnych prvkov integrovanej optiky umožňuje meranie PDL všetkými tromi opisovanými meracími metodikami v prechádzajúcej kapitole. Meracie pracovisko je navrhnuté pre meranie nezapuzdrených planárnych pasívnych optických prvkov a integrovaných obvodov.

Bloková schéma navrhnutého meracieho pracoviska je na obr. 6. Na začiatku meracieho pracoviska je možné použiť dva optické zdroje a to buď preladiateľný laserový zdroj alebo širokospektrálny optický zdroj (EDFA v režime ASE), ktoré je možné striedavo pripájať na vstup polarizátora a radiča polarizácie. Spektrálny rozsah merania PDL Mueller/Stokes metódou a metódou rozmietania polarizácie je limitovaný spektrálnym preladením laserového zdroja. V súčasnosti laboratórium MLC, kde bolo meranie pracovisko zrealizované, disponuje DFB preladiateľným laserovým zdrojom v spektrálnom rozsahu od 1548nm do 1552nm. Polarizátor a radič polarizácie je v meracom pracovisku realizovaný jedným monolitickým prístrojom AGILENT 8169A, ktorý obsahuje lineárny polarizátor a sériovú kombináciu polvlnnej a štvrtvlnnej doštičky. Táto konfiguráciu umožňuje nastaviť ľubovoľný polarizačný stav optického žiarenia na jeho výstupe. Tento radič polarizácie je kalibrovaný pre vlnovú dĺžku 1540nm, avšak existujú korekčné koeficienty pre spekt-

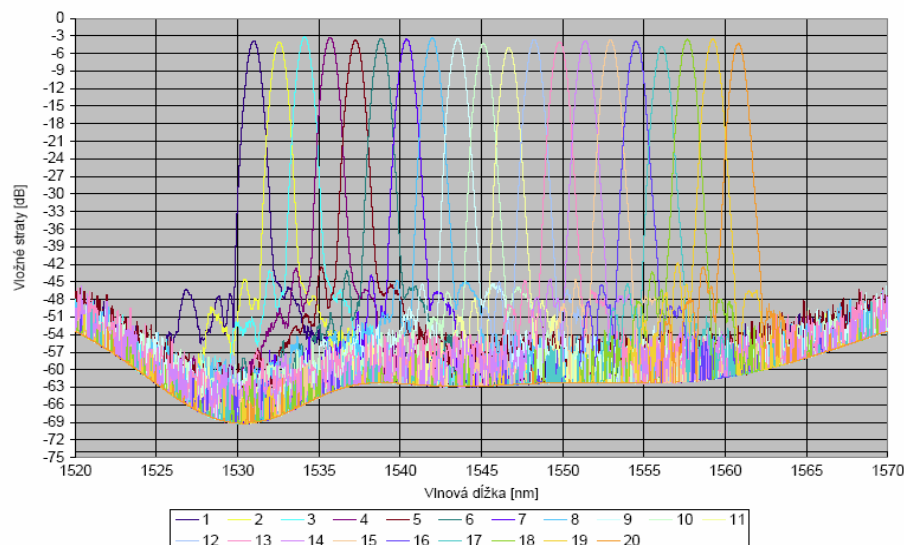


Obr. 6: Meracie pracovisko pre merania PDL.

rálny rozsah od 1260nm do 1580nm [1]. Žiarenie z výstupu polarizátora je štandardným jednomódovým optickým vláknom (OV) privádzané na vstup meraného obvodu. Na konci vstupného OV je fokusačná optika, ktorá tvaruje výstupné žiarenie z OV pre optimalizáciu naviazania žiarenia do vstupného vlnovodu meraného obvodu [2]. Fokusačná optika je uchytená na kombináciu dvoch 3D posuvov. Kombinácia dvoch 3D posuvov umožňuje nastavovať priestorovú pozíciu fokusačnej optiky v troch nezávislých smeroch s nasledovnými parametrami: hrubý posun 30mm s rozlíšením 10 μ m na dielik, jemný posun 2mm s rozlíšením 2.5 μ m na dielik a piezo posun 5 μ m s rozlíšením 10nm na 1V. Testovaný obvod je uchytený na držiak s mechanickými posuvmi, ktoré umožňujú natáčanie držiaka vo všetkých troch osiach a tiež posuv vo vertikálnom smere. Na výstupnej strane meraného obvodu je umiestnený držiak fokusačnej optiky na 6D posuvoch, ktoré umožňujú nastavenie výstupnej optiky 6 -tich nezávislých smeroch. Minimálny krok nastavenia v x, y, z osiach je 50nm a v rotáciách okolo jednotlivých osí je 0.05°. Jednomódovým OV je výstupné žiarenie z testovaného obvodu privádzané buď na optický merač výkonu alebo optický spektrálny analyzátor v závislosti od potrieb meracej metodiky PDL. Pomocou merača optického výkonu je možné sledovať v reálnom čase veľkosť optického signálu naviazaného do OV na výstupe meraného obvodu. Toto umožňuje nastaviť správne priestorové pozície vstupnej a výstupnej fokusačnej optiky. V realizovanom experimentálnom pracovisku je použitý OSA AGILENT 86140B, ktorý umožňuje merania v spektrálnom rozsahu od 600nm do 1700nm s max. spektrálnym rozlíšením 60pm. Tento OSA je inteligentný merací prístroj s operačným systémom UNIX, čo umožňuje vytváranie automatických meracích programov v samotnom OSA. Jednou z aplikácií štandardne dodávanou je "Passive Components Test (PCT) Application", ktorá obsahuje knižnicu príkazov pre výpočet rôznych parametrov z nameraných dát. Túto knižnicu príkazov je možné použiť pre vytvorenie skriptu na výpočet požadovaných výstupných parametrov z charakterizácie meraného obvodu.

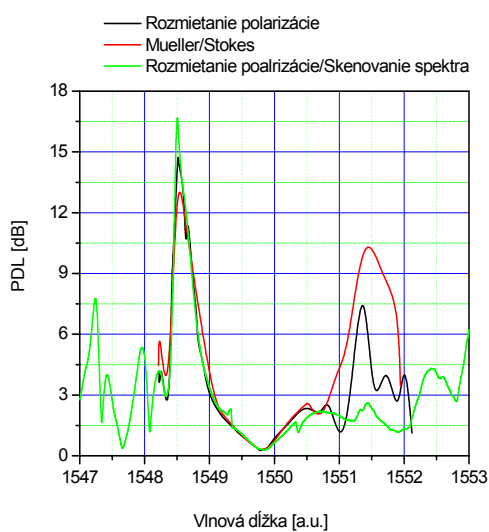
4. Výsledky merania

Na obr. 7 sú spektrálne závislosti vložných strát 20 kanálového nezapuzdreného AWG obvodu pre WDM systémy v spektrálnom rozsahu 1520 až

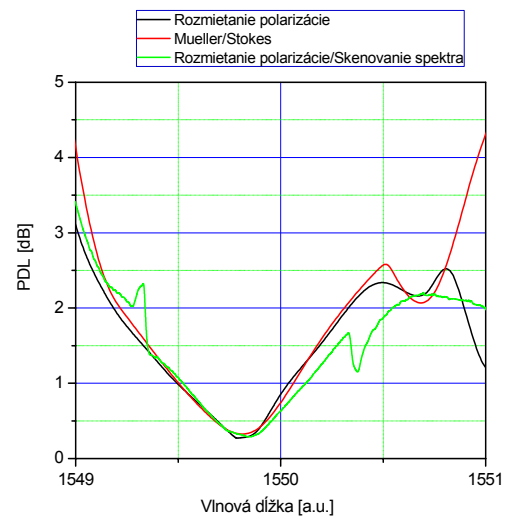


Obr.7: Vložné straty 20 kanálového 100 GHz testovaného AWG obvodu.

1570nm, ktorého hodnoty PDL sme merali navrhnutým a zrealizovaným meracím pracoviskom. Prístrojové vybavenie laboratória, kde je meracie pracovisko realizované determinuje to, že PDL v celom rozsahu C komunikačného pásma je možné merať PDL iba metódou rozmiatania polarizácie a skenovania spektra. Pre porovnanie nameraných hodnôt PDL všetkými tromi opisovanými metódami bolo zrealizované meranie PDL 13 -teho kanála AWG obvodu v spektrálnom rozsahu od 1548nm do 1552nm. Porovnanie nameraných hodnôt je na obr. 8. Na obr. 9 je detail porovnania nameraných hodnôt v oblasti prepúšťania meraného kanála AWG obvodu. Najväčšia zhoda nameraných hodnôt PDL týmito tromi metódami je v oblasti prepúšťania kanála AWG obvodu a to s odchýlkami menej ako 0.05dB. V pásme zádrže tohto kanála sú odchýlky nameraných hodnôt PDL väčšie. Tieto nepresnosti meraní sú spôsobené meraním výstupného integrálneho optického výkonu testovaného obvodu na úrovniach jednotiek nanowattov.



Obr. 8: Hodnoty PDL 13-teho kanála AWG obvodu.

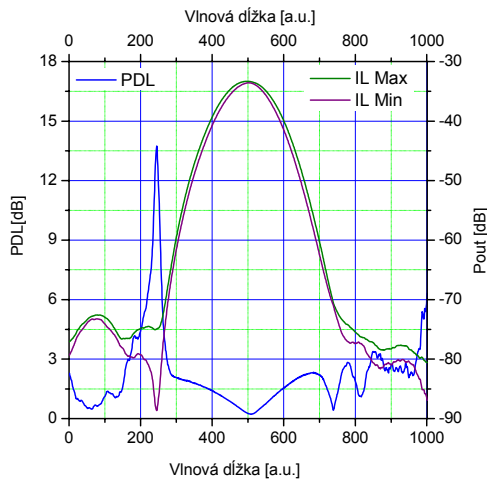


Obr. 9: Detail hodnotou PDL 13-teho kanála AWG obvodu v pásme prepúšťania.

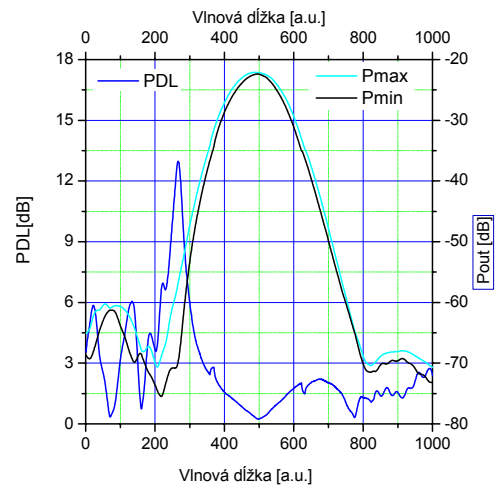
Na obr. 10 až 12 sú namerané hodnoty PDL 2, 11 a 18 -teho kanála AWG obvodu metódou rozmiatania polarizácie a skenovania spektra. Na každom obrázku sú zobrazené krivky minimálnych a maximálnych hodnôt výstupného výkonu testovaného obvodu (P_{max} a P_{min}) v závislosti od rozmiatania stavu polarizácie vstupného žiarenia v spektrálnom rozsahu 6nm. Rozdiel kriviek maximálnych a minimálnych hodnôt výstupného výkonu sú hodnoty PDL. Doba merania jedného kanála bola 2 minúty a doba jedného skenu výstupného spektra 200ms. Namerané hodnoty PDL pre 2, 11 a 18 -ty kanál sú porovnané na obr. 13. Z tohto porovnania je možné sledovať zmenu spektrálnej pozície a hodnoty prvého maxima PDL v ľavo od minima PDL v závislosti od meraného kanála. Namerané hodnoty minim PDL v pásme prepúšťania jednotlivých kanálov sa líšia o menej ako 0.15dB.

5. Záver

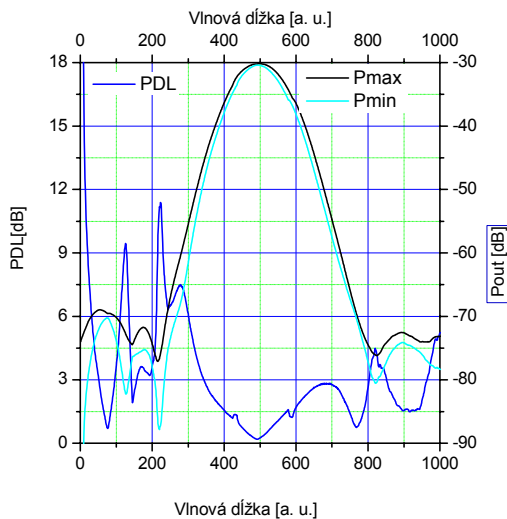
S navrhnutým a realizovaným meracím pracoviskom je možné merať polarizačnú závislosť vložných strát nezapuzdrených pasívnych optických prvkov a integrovaných obvodov v spektrálnom rozsahu od 1535nm do 1565nm. Boli zmerané PDL jedného kanála 20 kanálového AWG obvodu tromi rôznymi metódami v spektrálnom rozsahu od 1548nm do 1554nm a hodnoty boli vzájomne porovnané.



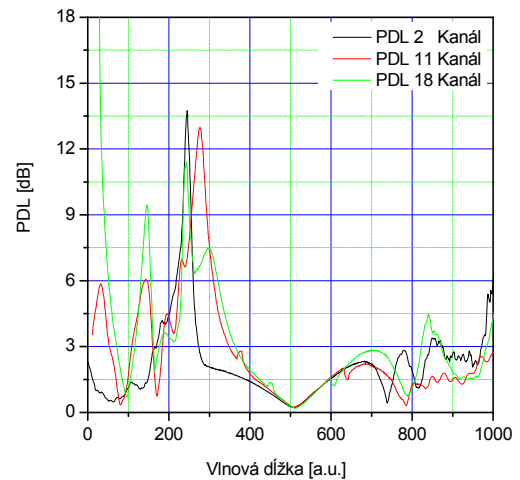
Obr. 10: Hodnoty PDL 2 -teho kanála AWG obvodu.



Obr. 11: Hodnoty PDL 11 -teho kanála AWG obvodu.



Obr. 12: Hodnoty PDL 18 -teho kanála AWG obvodu.



Obr. 13: Porovnanie hodnôt PDL 2, 11 a 18 -teho kanála AWG obvodu.

Odchýlky nameraných hodnôt týmito tromi metódami v oblasti prepúšťania kanála AWG obvodu boli menej ako 0.05dB. Metódou rozmietania polarizácie a skenovania spektra boli zmerané PDL všetkých 20 -tich kanálov testovaného AWG obvodu v spektrálnom rozsahu od 1525nm do 1565nm a boli vzájomne porovnané hodnoty PDL troch kanálov.

Táto práca vznikla v rámci projektov podporovaných Ministerstvom školstva Slovenskej republiky AV 4/0121/06, VEGA 1/3076/06, a VEGA 1/3108/06. Súčasne chceme poďakovať firme PHOTEON Technologies, Bregenz, Rakúsko za poskytnutie vzoriek AWG na overenie činnosti navrhnutého pracoviska.

6. Použitá literatúra

- [1] Webový portál firmy AGILENT, <http://www.agilent.com>
- [2] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, Fundamentals od Photonics, A Wiley Interscience Publication, New York, 1991

Jozef Chovan, Daniel Haško
Medzinárodné laserové centrum
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava
Slovenská Republika
e-mail: chovan@ilc.sk
hasko@ilc.sk
<http://www.ilc.sk/>,

František Uherek
Katedra mikroelektroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita
Ilkovičova 3,
812 19 Bratislava
Slovenská Republika
e-mail: frantisek.uherek@stuba.sk
<http://www.kme.elf.stuba.sk>

HYBRIDNÍ FOTONICKÉ INTEGROVANÉ OBVODY S PLANÁRNÍMI POLYMERNÍMI OPTICKÝMI VLNOVODY

Vítězslav Jeřábek, Ivan Hüttel, Václav Prajzler, Karel Bušek, Julio Armas Arciniega

Anotace

V tomto článku je uveden návrh a experimenty, které vedly ke konstrukci hybridního optoelektronického integrovaného obvodu (POIO) pro příjem optoelektronických informací. Jsou zde popsány základní charakteristiky jednotlivých částí POIO a optimalizace jejich parametrů. POIO obsahuje vstupní část s organickým planárním optickým vlnovodem, detekční část s PIN detektorem (FD) v SMD pouzdře a výstupní elektrickou mikrovlnou část. Na základě vlastností výše popsaných základních částí POIO (výsledky z měření v laboratoři a ze simulací v programu BeamProp) optimalizujeme parametry POIO jako celku. Realizovaný projekt je založen na zkušenostech s implementací polymerních vlnovodů na pracovištích ČVUT a VŠCHT v Praze.

Klíčová slova

POIO – planární optický integrovaný obvod, optické ztráty, optický vlnovod, index lomu, numerická apertura NA.

1. Úvod

Hybridní technologie integrace planárních optoelektronických obvodů (POIO) umožňuje konstrukci integrovaných obvodů kombinujících komponenty s pasivní funkcí (vlákna a planární optické vlnovody) a aktivní optoelektronické prvky (laserové diody, optické zesilovače, a fotodiody), sloučené v POIO na jedné podložce. V tomto článku popisujeme vývoj prvku POIO, který bude realizován na Českém Vysokém Učení Technickém v Praze na katedře mikroelektroniky a na Vysoké škole chemicko – technologické v Praze. V článku je uveden popis experimentů, směřujících ke konstrukci POIO obvodu pro příjem optoelektronických informací. V aktuálních zahraničních zdrojích [1], [2] jsou hybridní obvody s optickými planárními vlnovody koncipované na základě polymerních materiálů jako jsou polymetakrylát (PMMA), deuterated ethylene glycoldimetacrylate, (pro 1550nm), nebo různých typech epoxypolymerů.

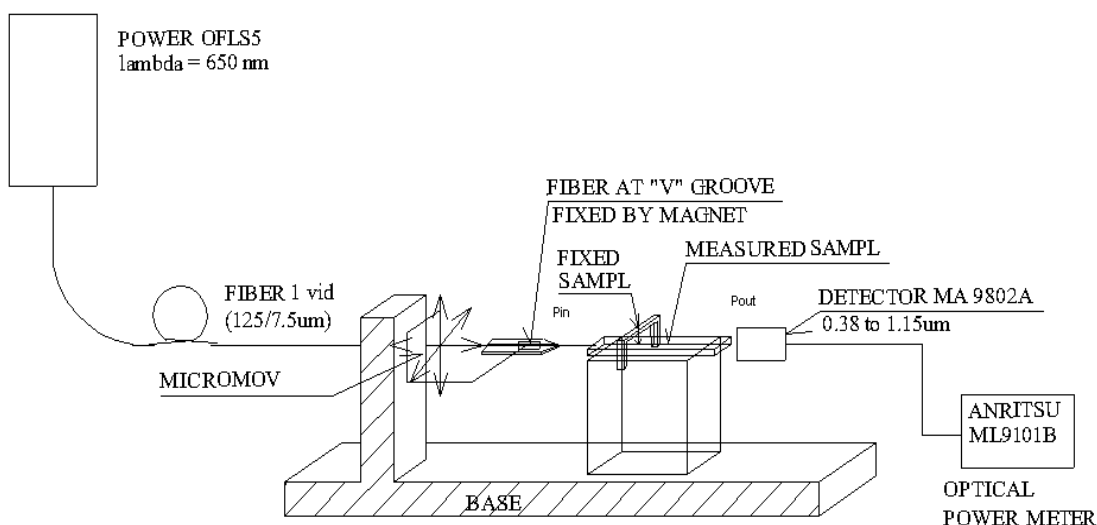
Návrh POIO je založen na zkušenostech s implementací polymerních vlnovodů na pracovišti Českého Vysokého Učení Technického v Praze a Vysoké škole chemicko technologické. Na základě využití epoxydového rezistu SU-8 2000 jsme provedli návrh, materiálově technologického řešení a diagnostiku POIO. Jako výchozí obvod jsme volili kombinaci planárního optického vlnovodu a PIN fotodetektoru umístěného na zvláštním nosníčku.

První etapa návrhu POIO řešila optickou vazbu z jednovidového optického vlákna do hřebenového planárního optického vlnovodu a z planárního vlnovodu na aktivní plochu fotodetektoru. Vysokých optických vazebních účinností vlákno-optický vlnovod a optický vlnovod-fotodetektor bylo využito pro stanovení optických ztrát planárního organického optického vlnovodu.

Ve druhé etapě bude proveden návrh a zhotovení platformy technologie pro hybridní POIO s ohledem na numerickou aperturu vlnovodů vyrobených z organického polymeru SU-8.

2.Návrh a výsledky

V první části našeho projektu jsme se zaměřili na optimalizaci vazby optického vlákna do proužkového optického vlnovodu. Pro tento účel byly použity polovodičové zdroje pracující na vlnové délce 650 nm a 1550nm. Optické záření ze zdrojů bylo přes optický konektor zavedeno do optického jednovidového vlákna (SFM) s parametry 3,5/125 μm (průměr jádra/průměr jádra s pláštěm), NA=0.14 a rozdílem refraktivního indexu lomu 0,36%. Výše popsané optické vlákno bylo navázáno na kanálkový optický vlnovod pomocí piezoelektricky ovládaného manipulátoru s dostatečnou přesností nastavení polohy v osách X,Y,Z. Po navázání optického záření z optického (SFM) vlákna do optického planárního vlnovodu je měřena intenzita optického záření, které prošlo na výstup optického vlnovodu měřičem optické energie (ANRITSU ML910B) viz. obr. 1



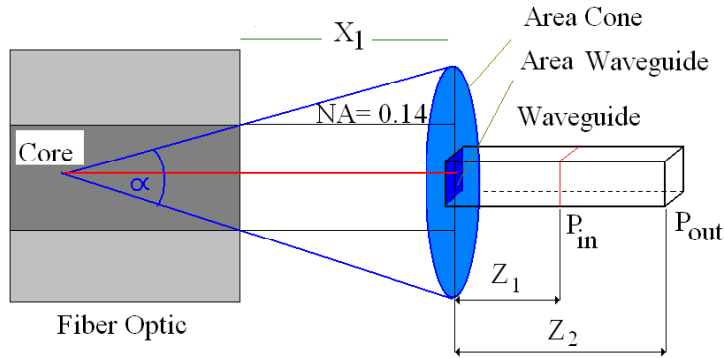
Obr. 1: Schéma navázání optického záření do planárního proužkového vlnovodu.

Byly použity vzorky vlnovodů vytvořené z organického materiálu Su-8 2000 a pro srovnání rovněž vzorky kanálkových vlnovodů z lithium niobatu a skla BK7. Pro zhotovení kanálkových vlnovodů na bázi polymerů byla použita metoda spin-couingu a UV expozice viz lit. [3]. Kanálkové vlnovody v lithium niobatu a sklu BK7 byly vytvořeny klasickými metodami difúzí Ti a iontovou výměnou Ag^+ a K^+ za ionty Na^+ .

Nejdůležitějším parametrem optických vlnovodů jsou optické ztráty. Optické ztráty jsou v optických vlnovodech způsobeny zejména rozptylem, absorpcí a vyzářením. Optické ztráty optických vlnovodů na bázi polymeru Su-8 2000 resp. skel a lithium niobatu byly měřeny metodou přímého navázání optického záření z vlákna do hrany vlnovodu. Měření byla opakována u většího souboru vzorků (v našem případě bylo měřeno 10 vzorků). Optické ztráty jsou v tomto případě popsány vztahem (1) a znázorněny na obr.2. Výsledky z měření optických ztrát jsou uvedeny v tabulkách Tab .1 a Tab .2.

Optické ztráty:

$$n \equiv \frac{10 \log(P_2 / P_1)}{Z_2 - Z_1} \left[\frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right] \quad (1)$$



Obr. 2: Schematické znázornění parametrů ve vztahu (1) pro optické ztráty.

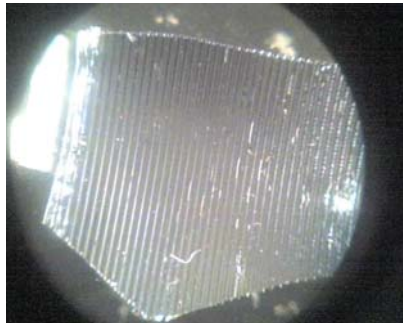
Hřebenový vlnovod	λ (μm)	Šířka (μm)	Hloubka (μm)	P _{out1} (μW)	P _{out2} (μW)	ΔL vzorku (mm)	Optické ztráty (dB/cm)
Su-8	650	200	2	0,74	2,06	0,78	4,47
Su-8	1550	200	2	1,14	2,01	0,78	2,7

Tab. 1: Parametry vazby a optické ztráty pro vlnovody na bázi Su-8 2000 při $P_{in} = 34.7 \mu\text{W}$.

Pro měření optických ztrát vzorků na bázi polymeru Su-8 2000 byla použita metoda dvou délek, založená na měření optických ztrát vzorku originální délky (P_{out1}) a vzorku po zlomení (P_{out2}). Při této metodě je značně eliminována chyba způsobená vazebními ztrátami. Tyto ztráty jak je patrné z naměřených výkonů na výstupní fasetě jsou větší než 10 dB.

Kanálkové vlnovody	λ (μm)	Šířka (μm)	Hloubka (μm)	P _{in} (μW)	P _{out} (μW)	Optické ztráty (dB/cm)
BK7	650	6.8	7.0	34.6	25.2	0.499
LiNbO ₃	650	5.1	6.8	34.7	18.6	1.13

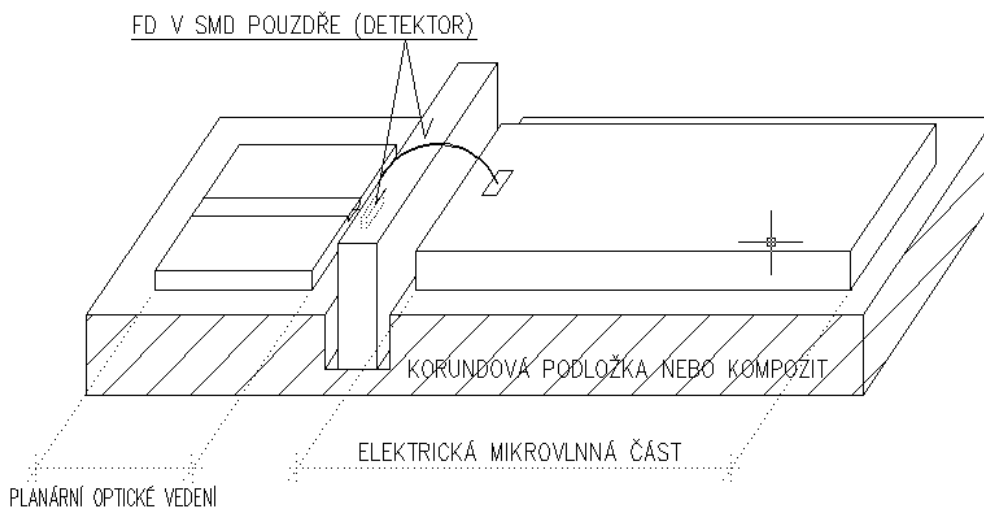
Tab. 2: Parametry vazby a optické ztráty anorganických vlnovodů.



Obr. 3: Měřený vzorek hřebenového optického vlnovodu na bázi polymeru Su-8 2000.

Druhá část našeho výzkumu bude zaměřena na návrh optimalizaci a zhotovení platformy technologie pro hybridní POIO optoelektronického přijímače. POIO se skládá ze tří částí viz. Obr. 4. Vstupní optickou částí je planární optický vlnovod. Na

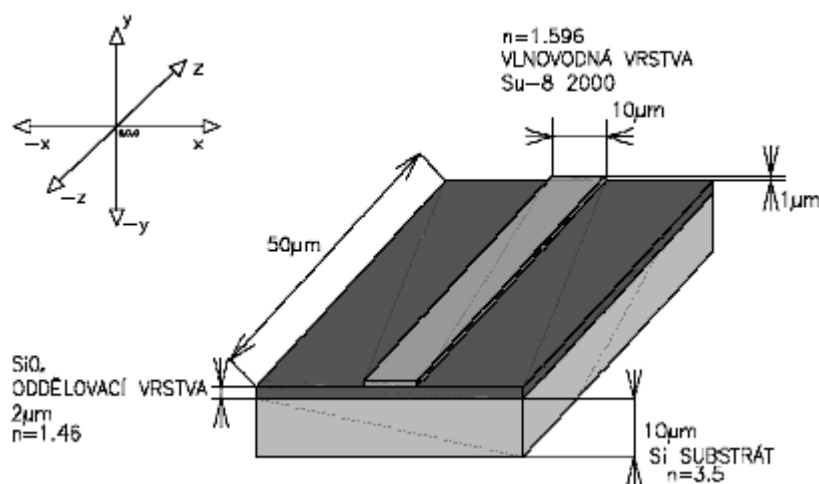
výstupu optického vlnovodu je optické záření směřováno na aktivní plochu PIN fotodetektoru optického záření (FD ve SMD pouzdře). Výstupní sekce POIO je tvořena planárním hybridním mikrovlnným obvodem. Optická část je realizována polymerní vrstvou NANOTM SU-8 2000 nanosenou použitím metody spin-coatingu na substrátu křemíku s oddělovací vrstvou z oxidu křemičitého. V programu BeamProp byl simulován model optického planárního hřebenového vlnovodu viz. obr.č.4 s ohledem na optimalizaci vzdálenosti fotodetektoru od výstupní fasety optického vlnovodu.



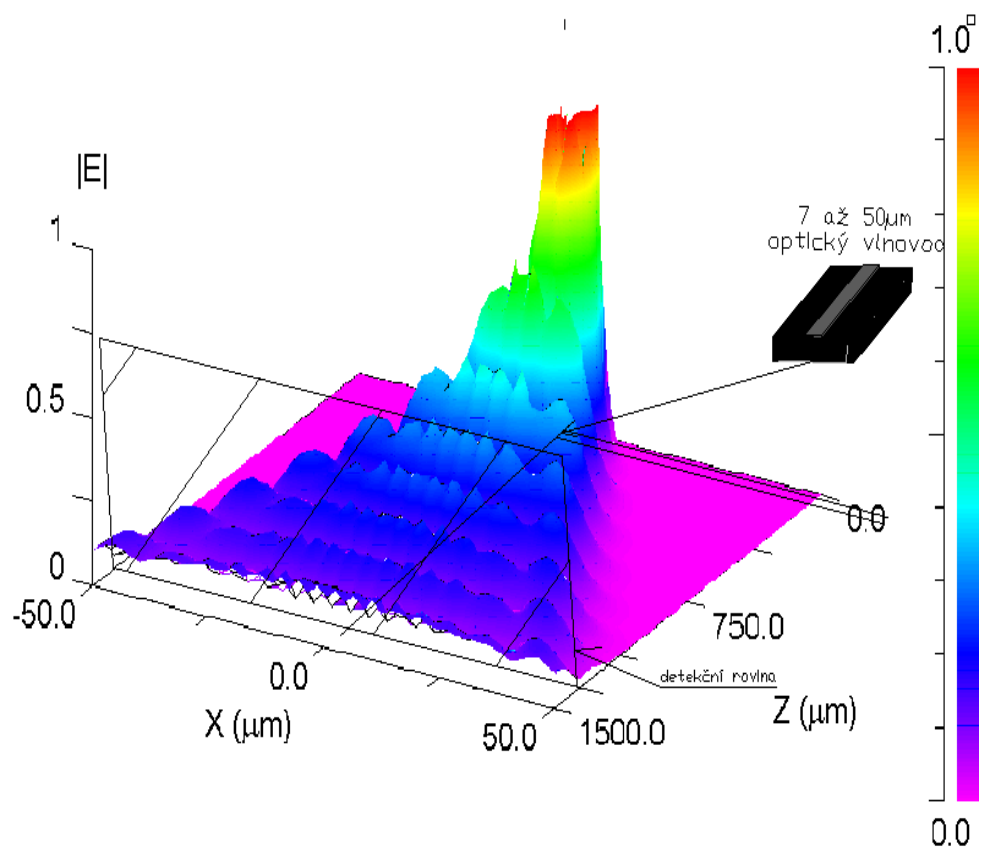
Obr. 4: Schéma POIO.

V programu BeamProp byla simulována optimální vazební vzdálenost mezi výstupní fazetou planárního optického hřebenového vlnovodu viz. obr. 5 a fotodetektoru s aktivní plochou $100 \times 100 \mu\text{m}$ a pro vlnovou délku zdroje 1550 nm , polarizace TE. Jako zdroj byl použit model optického vlákna s rozdílem refraktivního indexu lomu $0,36\%$, délka $5 \mu\text{m}$. Konec modelu optického vlákna je vzdálen $2 \mu\text{m}$ od vstupní fasety optického vlnovodu.

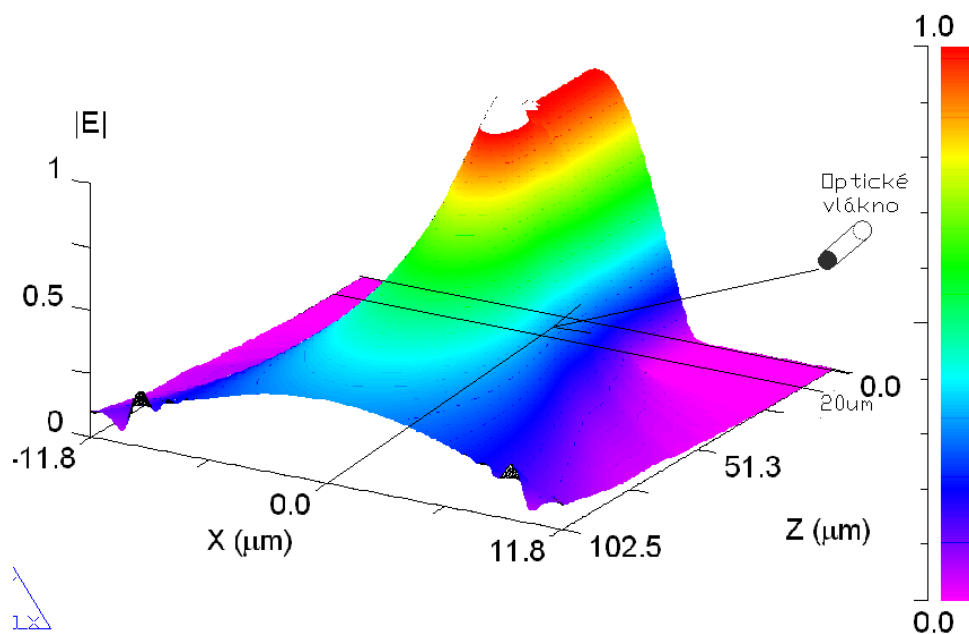
Rozměry vlnovodné vrstvy ($10 \mu\text{m}$ - šířka vlnovodné vrstvy, $1 \mu\text{m}$ hloubka vlnovodné vrstvy) byly zvoleny na základě výsledků simulací s ohledem na minimální počet vedených vidů, vhodnou velikost výstupní apertury vlnovodu a šířku masky



Obr. 5: Model optického vlnovodu - simulace v programu BeamProp.



Obr. 6: 3D graf rozložení absolutní hodnoty intenzity elektrického pole E sestavy optický hřebenový vlnovod $10\ \mu\text{m}$ -detekční rovina $100\times 100\ \mu\text{m}$ -výsledek simulace v programu BeamProp pro vlnovou délku 1550nm ($n=1$ pro vnější prostředí).



Obr. 7: 3D graf rozložení absolutní hodnoty intenzity elektrického pole E mezi optickým vláknem délky $20\ \mu\text{m}$ s průměru $9\ \mu\text{m}$ (jádro) a hřebenovým vlnovodem šířky $10\ \mu\text{m}$ -výsledek simulace v programu BeamProp pro vlnovou délku 1550nm ($n=1$ pro vnější prostředí).

vlnovodů. Výstupní apertura modelu optického vlákna je 0.0685 (pro vlnovou délku 1550nm). Výstupní apertura modelu planárního optického kanálkového vlnovodu je 0,032 (pro vlnovou délku 1550nm). Na základě výsledků simulací v programu BeamProp je optimální vzdálenost fotodetektoru s aktivní plochou 100x100 μ m od výstupní fazety optického vlnovodu 1450 μ m viz. Obr. 6.

3. Závěr

V tomto článku jsou prezentovány metody a výsledky měření optických ztrát optických vlnovodů na bázi polymeru SU-8 2000 resp. lithium niobátu a skla BK7. Průměrná hodnota optických ztrát pro SU-8 je 4,47 dB/cm pro vlnovou délku 650nm a 2,7dB/cm pro vlnovou délku 1550nm, což je srovnatelné s hodnotami u vzorků z anorganických materiálů. Ve druhé části článku jsou uvedeny simulace sestavy model optické vlákno – model optický vlnovod – detekční rovina (fotodetektoru s aktivní plochou 100x100 μ m) pro vlnovou délku zdroje 1550nm. Na základě provedených simulací je optimální vzdálenost výstupní fazety modelu optického vlnovodu a detekční roviny (fotodetektoru) 1450 μ m. Výstupní apertura modelu optického vlnovodu je 0,032 což je cca. 2 násobně menší než výstupní apertura modelu optického vlákna 0,0685. Byl navržen planární mikrovlnný optoelektronický přijímač, který bude vyroben s použitím dostupné hybridní technologie jako první integrovaný POIO realizovaný na FEL ČVUT.

Náš výzkum vznikl za podpory Grantové agentury České republiky (Ga102/06/0424) a za podpory výzkumného programu MSM6840770014 České vysokého učení technického v Praze.

4. Přehled literatury

- [1] Hashimoto, T., Nakasuga, Y., et al., Multichip Optical Hybrid Integration Technique with Planar Lightwave Circuit Platform, *J. of Lightwave Technology*, Volume 16, Number 7, (1998), pages 1246-1257.
- [2] Eldada, L., Shacklette, L.W., Advances in Polymer Integrated Optics, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Volume 6, Number 1, (2000), pages 54-68.
- [3] Švorčík, V., Hüttel, I., Paláček, P., Polymethylmethacrylate Optical Waveguides Prepared in Electrical Field, *Materials Letters*, Volume 61, Number 1-4, (2007), pages 953–955.

Vítězslav Jeřábek, Václav Prajzler
Karel Bušek, Julio Armas Arciniega
ČVUT, Fakulta elektrotechnická v Praze
Katedra mikroelektroniky
email: jerabek@fel.cvut.cz

Ivan Hüttel
VŠCHT, Fakulta chemické technologie v Praze

OPTICKÉ VLASTNOSTI VRSTEV GaN s DOTACÍ Er³⁺ + Yb³⁺ IONTŮ

Vítězslav Jeřábek, Václav Prajzler, Ivan Hüttel

Anotace

Příspěvek pojednává o vlastnostech vrstev galia nitridu s dotací vzácných zemin. Vrstvy GaN byly vyrobeny metodou epitaxe z plynné fáze (MOCVD) na Al₂O₃ substrátu. Dotace vrstev GaN ionty Er³⁺ a Er³⁺/Yb³⁺ byla provedena pomocí iontové implantace. U vrstev byla zjištěna fotoluminiscence na vlnové délce 1 530 nm při optickém čerpání 980 nm.

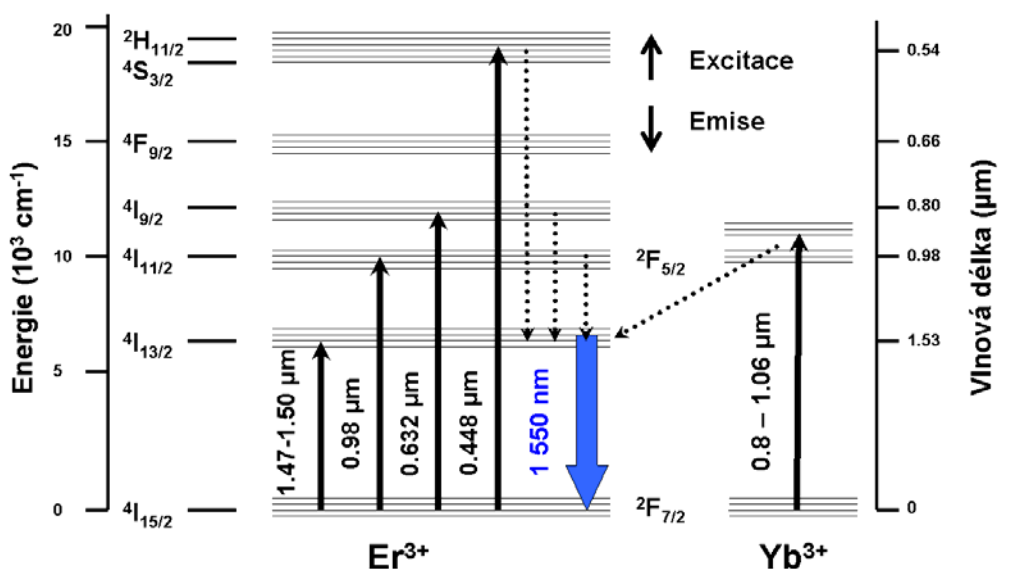
Klíčová slova

Optické vlastnosti, GaN, Erbium, Yterbium, Iontová implantace

1. Úvod

Vrstvám galia nitridu (GaN) je v poslední době věnována velká pozornost, protože se jedná o přímý polovodič s velkou šířkou zakázaného pásu (3,39 eV) s unikátními vlastnostmi. GaN vrstvy s dotací Tm³⁺ (477 nm – modrá barva), Er³⁺ (537/558 nm - zelená barva) a Eu³⁺ (621 nm – červená barva) mohou být použity jako základní materiál pro výrobu barevných displejů [1,2]. GaN vrstvy s dotací Er³⁺ iontů mohou sloužit pro realizaci optických zesilovačů pracujících na vlnové délce 1 530 nm [3].

Materiály s velkou šířkou zakázaného pásu s dotací Er³⁺ vykazují nižší teplotní zhášení [4] fotoluminiscence a proto jsou tyto vrstvy vhodným kandidátem pro dotaci vzácnými zeminami. Na obrázku 1 je uveden energetický diagram optického materiálu s dotací Er³⁺ a Yb³⁺ iontů. Pro Er³⁺ dotované optické zesilovače se obvykle používá optické čerpání na vlnových délkách 1,47 – 1,50 μm nebo 0,98 μm. Optické materiály s obsahem Yb³⁺ mají silný absorpční pás kolem vlnové délky 0,98 μm. Proto přidáním Yb³⁺ iontu do optického zesilovače s obsahem Er³⁺, lze dosáhnout větší optické účinnosti při optickém čerpání na vlnové délce 0,98 μm.



Obr.1: Energetický diagram pro Er³⁺ a Yb³⁺ ionty.

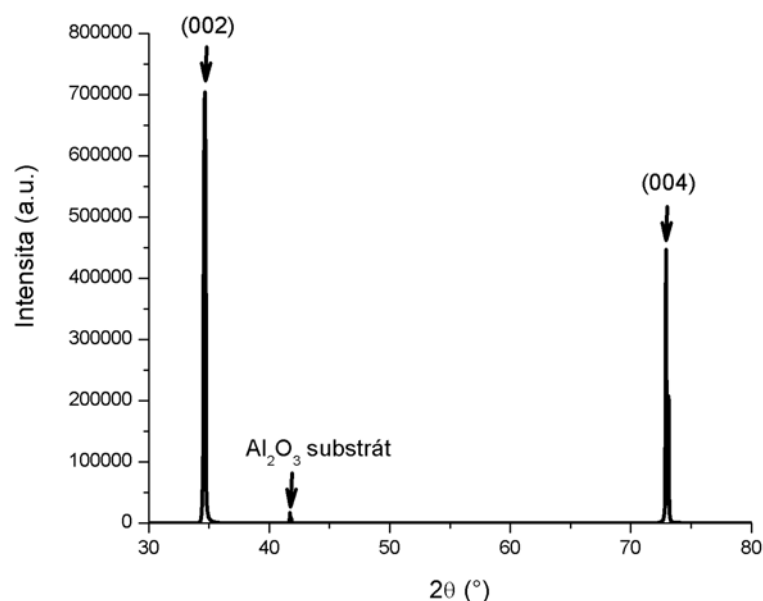
2. Výroba vzorků GaN s dotací Er^{3+} a $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$

Vrstvy GaN byly vyrobeny metodou MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) na safírovém substrátu a byly dotovány pomocí iontové implantace ionty Er^{3+} a $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$. Hloubkový koncentrační profil byl před depozicí vypočítán pomocí programu SRIM2003 [5]. Implantace byla provedena za použití energií 190 keV a 210 keV při pokojové teplotě a 300 keV při teplotě 450°C. Implantační dávky byly zvoleny v rozsahu od $1 \cdot 10^{13}$ iont $\cdot\text{cm}^{-2}$ do $5 \cdot 10^{15}$ iont $\cdot\text{cm}^{-2}$ pro dotaci Er^{3+} ionty a od $5 \cdot 10^{13}$ iont $\cdot\text{cm}^{-2}$ do $5 \cdot 10^{16}$ iont $\cdot\text{cm}^{-2}$ pro dotaci Yb^{3+} ionty. Po implantaci byly vzorky žihány při teplotě až 930°C po dobu 30 minut v dusíkové atmosféře.

Struktura vrstev byla zjišťována metodou XRD (X-Ray Diffraction). Složení vzorků bylo zjišťováno metodami RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) a ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis). Fotoluminiscenční spektra byla měřena pomocí optického čerpání polovodičového laseru P4300 ($\lambda_{\text{ex}} = 980$ nm) a He-Ne laseru ($\lambda_{\text{ex}} = 632,8$ nm). Ge detektor byl použit pro detekci v rozsahu vlnových délek od 1 000 nm do 1 600 nm.

3. Vlastnosti vrstev

XRD spektrum vrstev GaN je uvedeno na obr.2. Vrchol $2(\Theta) = 34,6^\circ$ a vrchol $72,9^\circ$ odpovídá (002) a (004) monokrystalické vrstvě GaN s hexagonální wurtzitovou strukturou. Měření XRD také ukázalo, že elementární buňky měly rozměry $a = 3,1891$ Å, $b = 3,1891$ Å a $c = 5,1855$ Å.

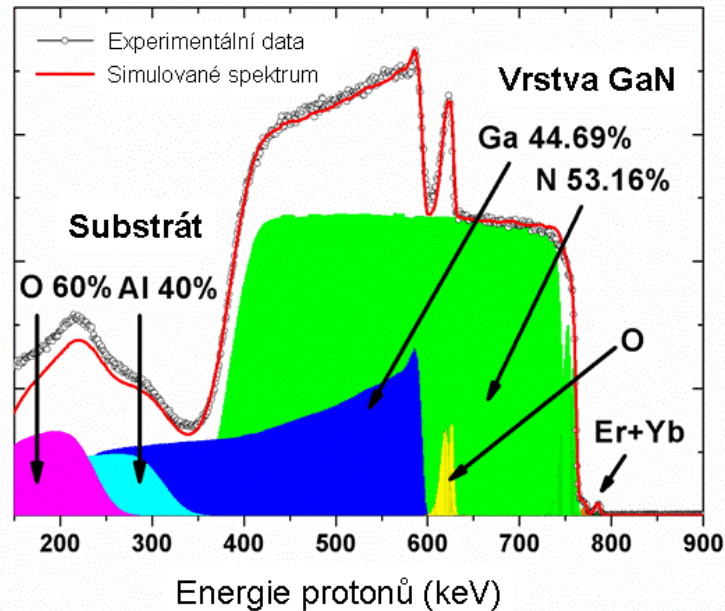


Obr.2: XRD spektrum vrstev GaN vyrobených metodou MOCVD na Al_2O_3 substrátu.

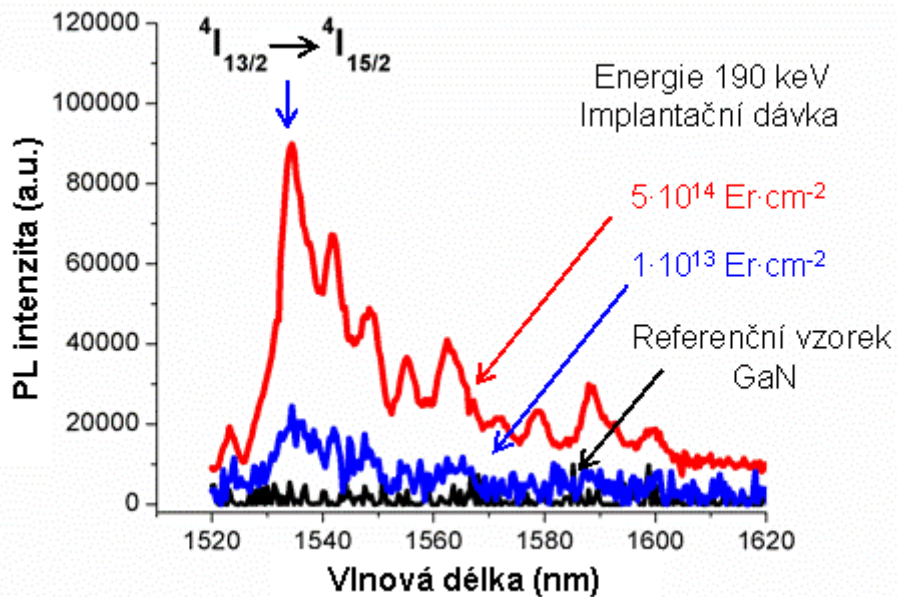
Složení vrstev bylo zjišťováno analytickými metodami RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) a ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis). V případě metody RBS bylo použito energie 2,37 MeV protonů a 2,7 MeV alfa částic. Typický příklad RBS spektra je uvedeno na obr.3. Protože erbium a yterbium má blízké atomové číslo proto nelze tyto dva prvky rozlišit a bylo tedy zjišťován součet těchto dvou prvků. Vrstvy GaN obsahovaly Er+Yb od 0,02 do 3,38 at.% v závislosti na aplikované implantační dávce.

Fotoluminiscenční spektra GaN vrstev dotovanými Er³⁺ ionty implantovanými pomocí energie 190 keV excitovanými 632,8 nm jsou uvedeny na obrázku 4. Na obrázku je vidět typická fotoluminiscence na vlnové délce 1 530 nm odpovídající Er³⁺ iontu. Z obrázku také vyplývá, že s vyšší implantační dávkou se fotoluminiscence zvyšuje.

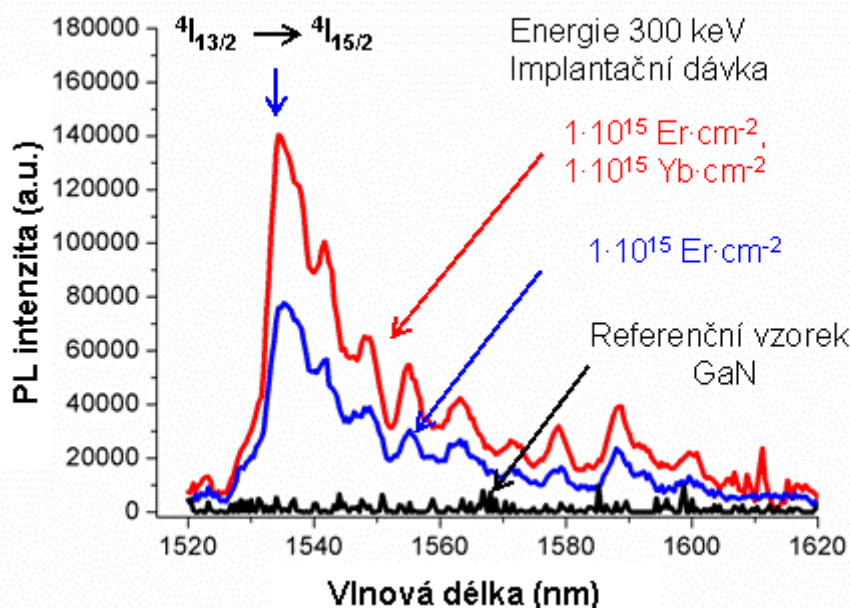
RBS spektrum měřeno protony energií 2370 keV



Obr.3: RBS spektrum vrstev GaN s dotací Er a Yb iontů (depoziční podmínky: energie 300 keV, implantační dávka $1 \cdot 10^{15}$ Er·cm⁻², $1 \cdot 10^{16}$ Yb·cm⁻²).



Obr.4: Fotoluminiscenční spektra Er³⁺:GaN vrstev čerpaných He-Ne laserem $\lambda_{ex} = 632,8$ nm (měření bylo prováděno při teplotě 4 K).



Obr.5: Fotoluminescenční spektra $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{GaN}$ vrstev čerpaných He-Ne laserem $\lambda_{\text{ex}} = 632,8 \text{ nm}$ (měření bylo prováděno při teplotě 4 K).

Na obrázku 5 jsou uvedeny fotoluminescenční spektra $\text{Er}^{3+}:\text{GaN}$ vrstev s kodotací Yb^{3+} iontů. Iontová implantace byla v tomto případě provedena energií 300 keV. Vrstvy vykazovaly fotoluminiscenci na vlnové délce 1 530 nm odpovídající Er^{3+} přechodu ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. Z obrázku také vyplývá, že přidáním Yb^{3+} iontu dojde ke zvýšení fotoluminiscence. U vzorků byly měřeny fotoluminescenční spektra při optickém čerpání 980 nm (při pokojové teplotě). Tyto vzorky také vykazovaly luminiscenci na vlnové délce 1 530 nm, ale tato fotoluminiscence byla slabší než při optickém čerpání 632,8 nm (měřeno při teplotě 4K).

4. Závěr

V předkládaném článku popisujeme přípravu a studium vlastností vrstev GaN s obsahem Er^{3+} a $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ iontů. Vrstvy GaN byly připraveny metodou MOCVD a dotace byla provedena pomocí iontové implantace. U vzorků byla změřena fotoluminiscence na vlnové délce 1 530 nm. U vzorků $\text{Er}^{3+}:\text{GaN}$ s kodotací Yb^{3+} byla fotoluminiscence silnější.

Náš výzkum vznikl za podpory Grantové agentury České republiky (Ga102/06/0424) a za podpory výzkumného programu MSM6840770014 České vysokého učení technického v Praze.

15. Přehled literatury

- [1] A.J. Steckl, J.C. Heikenfeld, D.S. Lee, M.J. Garter, C.C. Baker, Y.Q. Wang, R. Jones, "Rare-Earth-Doped GaN: Growth, Properties, and Fabrication of Electroluminescent Devices," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 8(4), 749-766 (2002).
- [2] Y.Q. Wang, A.J. Steckl, "Three-Color Integration on Rare-Earth-Doped GaN Electroluminescent Thin Films," *Applied Physics Letters* 82(4), 502-504 (2003).

- [3] A. Polman: "Erbium Implanted Thin Film Photonic Materials," *Journal of Applied Physics*, 82(1), 1-39 (1997).
- [4] P.N. Favennec, H. Lharidon, M. Salvi, D. Moutononnet, Y. Leguillou, "Luminescence of Erbium Implanted in Various Semiconductors – IV-Materials, III-V-Materials and II-VI Materials," *Electronics Letters* 25(11), 718-719 (1989).
- [5] <http://www.srim.org/>

Vítězslav Jeřábek
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2
166 27 Praha 6
Česká republika
tel.: +420 22435 2317
e-mail: jerabek@fel.cvut.cz

Ivan Hüttel
Ústav inženýrství pevných látek
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
Technická 5
166 28 Praha 6
Česká republika
tel.: +420 220443205
e-mail: Ivan.Huttel@vscht.cz

SVÁŘEČKY OPTICKÝCH VLÁKEN CORNING NOVÉ GENERACE

Jiří Kracík

Anotace

Cílem příspěvku je představit novou generaci optických svářeček fy Corning, řadu od jednodušších typů po nejpreciznější. Přístroje jsou určeny jak pro spojování jednotlivých vláken, tak ribbonových pásků a vyznačují se mj. zcela novým ergonomickým designem. Všechny přístroje splňují povinné požadavky směrnic EU pro CE, RoHS a WEEE kompatibilitu.

Klíčová slova

LIDTM (Local light Injection and Detection) systém pro nejpreciznější sváření; CDSTM (Core Detection System) pro rychlé, precizní sváření; L-PASTM (Lens Profile Alignment System) především pro MM vlákna; interní GPS přijímač k automatické kompenzaci vlivů nadmořské výšky; GPS určení polohy; Li-Ion baterie 7,2 Ah pro extrémní výdrž; bezúdržbové plášťové PD elektrody; rychlá RapidoShrink píčka; nízká váha.

1. Úvod

Počátkem r. 2007 uvedla fa CORNING na trh novou generaci svařovacích přístrojů pro optická vlákna.

Principiálně vycházejí z mnoho let osvědčené robustní konstrukce přístrojů, určených pro rutinní a spolehlivý provoz v terénních podmínkách. Jedná se o řadu 4 přístrojů od typů pro nejnáročnější aplikace až po jednodušší a nyní velmi žádané přístroje pro FTTx. Na trh je v současné době uváděn přístroj pro ribbon pásky. Všechny přístroje přicházejí se zcela novým, netradičním designem, ergonomicky přizpůsobeným rutinní práci.

Všechny přístroje v plném rozsahu splňují zákonné požadavky EU na CE, RoHS a WEEE kompatibilitu. To byl též jeden z důvodů pro totální inovaci svářeček.

Firma VNT Nachrichtentechnik sro Praha, která zde historicky zastupuje firmu CORNING, nabízí tyto přístroje pod tímto označením:

- OptiSplice LID
- OptiSplice CDS
- OptiSplice ONE
- OptiSplice Ribbon

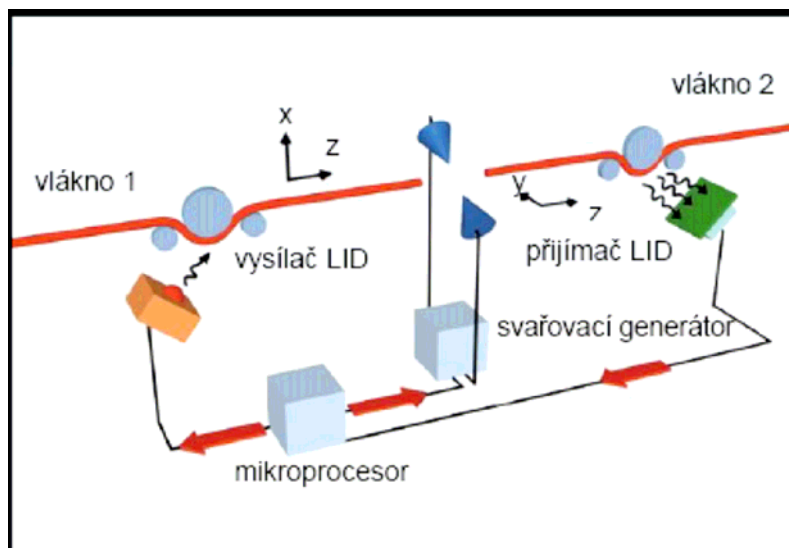
2. Princip LIDTM

Známý a osvědčený systém LID (Local light Injection and Detection) umožňuje měření průchozího světla a tak dovoluje:

- vysoce precizní polohování jádra na jádro vláken,
- automatickou regulaci doby svařování AFCTM,
- měření útlumu spoje,
- automatické rozeznání typu vlákna prostřednictvím snímání vidového pole,
- útlumové spoje s vysokou přesností.

Světlo v jednovidové oblasti s měřicí vlnovou délkou 1300 nm se naváže v levém ohebném vazebním členu (vysílač) do jádra jednoho vlákna a opět se získá z druhého vlákna v ohebném vazebním členu na pravé straně (přijímač). Změří se přijatá úroveň světla a použije se pro řízení různých úkolů.

System LID je vhodný pro všechna komerčně obvyklá vlákna s primární ochranou 250 μm .



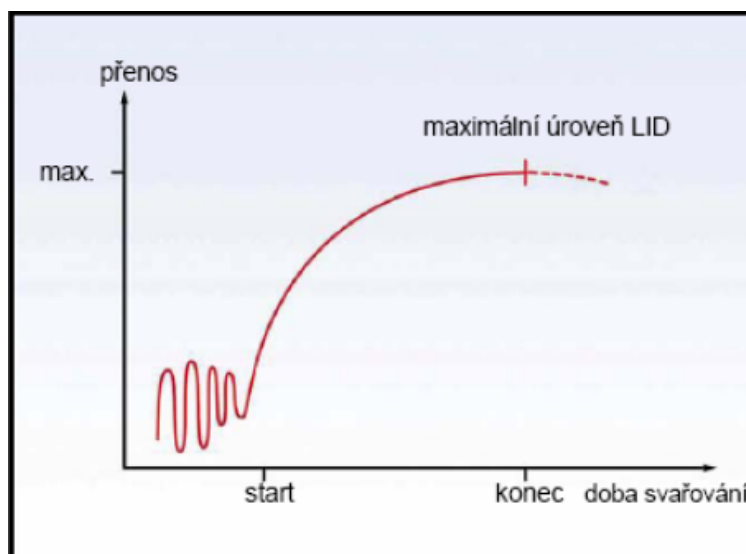
Obr. 1: Princip systému LID.

Automatická regulace doby svařování AFC

Pomocí AFC se během svařovacího procesu vyhodnocuje světelný výkon přenesený přes svařované místo a při dosažení nejlepšího možného přenosu se svařovací proces ukončí.

Tím se kompenzují vlastnosti vláken, stav elektrod a rovněž mění se podmínky okolního prostředí (vlhkost vzduchu, tlak vzduchu, teplota atd.) a prostřednictvím optimálního polohování jádra na jádro se zaručí nejmenší možný útlum pro každý jednotlivý svár.

Tento nejpřesnější systém využívá pouze přístroj OptiSplice LID.



Obr. 2: Princip automatické regulace doby svařování AFC.

3. Princip CDS™

Systém rozeznání jádra CDS™

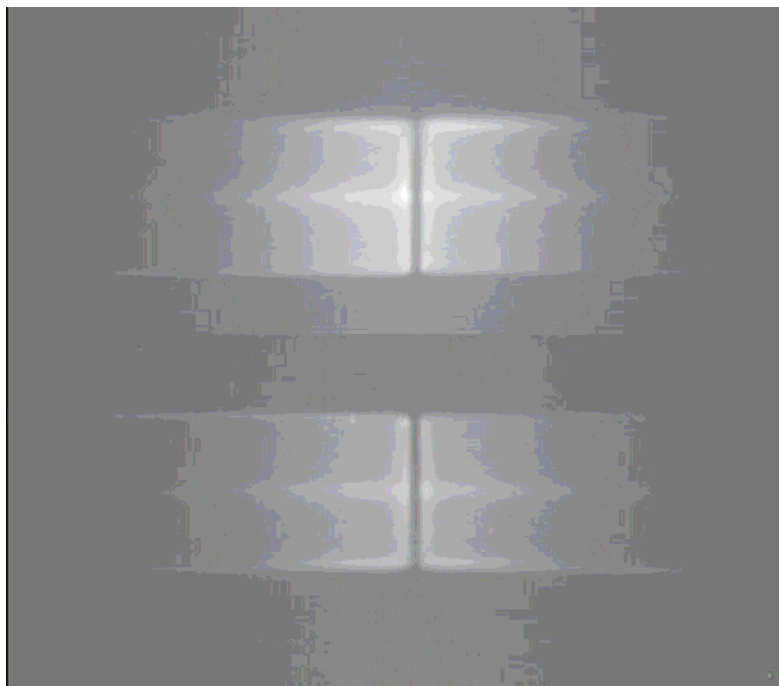
CDS je velice rychlý systém pro polohování jádra na jádro ve třech osách a zaručuje minimální útlum spoje. Doba pro vytvoření spoje včetně polohování jádra na jádro je u tohoto systému zredukována na několik vteřin. Tento systém dosahuje vynikajících výsledků spojů.

Během rozeznání jádra se u CDS analyzují poloha a velikost jádra vlákna na digitálním vyobrazení svařované oblasti. Jeden krátký světelný oblouk vlákno nasvítí. Prostřednictvím odlišného dopování jádra vlákna, svítí jádro jasněji než okolní plášťové sklo. Pro přesné trojrozměrné vyhodnocení se umístění jádra vyšetřuje odděleně v pohledech x a y.

Mikrokontrolér svářečky analyzuje digitální obraz obou pohledů a zjistí geometrii vlákna. Tím je určena trojrozměrná poloha vlákna v obou koncích vláken a použije se pro polohování jádra na jádro.

Aby se působilo proti samocentračnímu jevu při značné excentricitě jádra a plášťového skla, optimalizuje řízení svařovacího procesu automaticky nastavení odpovídajícího přídatného přesazení.

Pro optimalizaci vyhodnocení útlumu spoje se započítá přesazení vláken po vyrovnání jádra na jádro, čímž se dosáhne zlepšení korelace mezi zobrazenou a skutečnou hodnotou.



Obr. 3: *Vlákna rozeznaná CDS v pohledech x a y.*

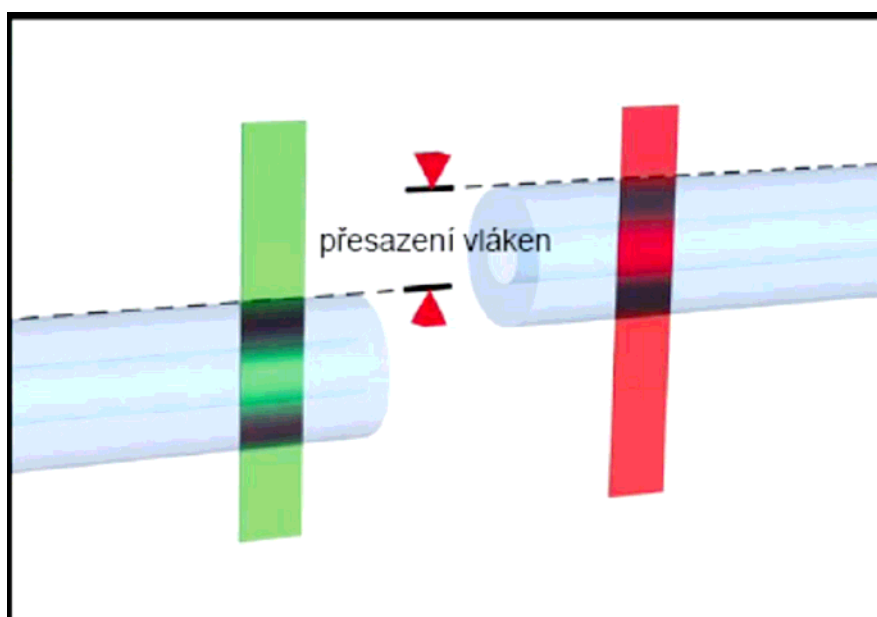
S tímto systémem pracuje OptiSplice CDS a jako druhým, přepínatelným i OptiSplice LID.

4. Princip L-PAS™

Vyhodnocení videoobrazu L-PAS™

Vyobrazení konců optických vláken se vyhodnocuje pomocí zpracování videoobrazu L-PAS™ (Lens Profile Alignment System). Vyobrazení konců vláken se snímá s pomocí dvou optických systémů a rovněž dvou kamer ve dvou pohledech (osy x a y). Videoobraz se pro další analýzu digitalizuje a poté se následně používá pro rozeznání polohy vlákna, posouzení kvality koncových ploch a rozpoznání nečistot.

Systém L-PAS používá k řízení polohování vláken jasový profil příslušných sloupců a řádků videoobrazu. Tyto profily zahrnují všechny viditelné detaily vláken, včetně případných stínů podél centra vlákna, možná poškození, přesazení vláken a rovněž částice nečistot.

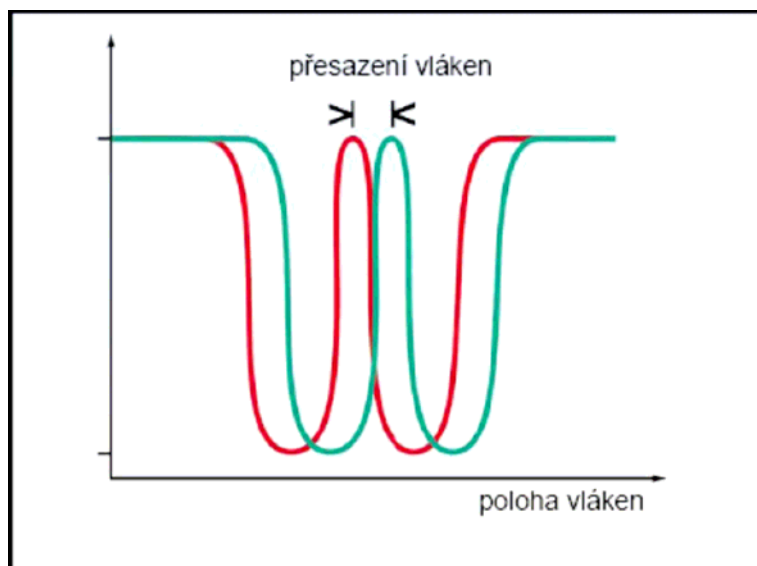


Obr. 4: Jasové profily dvou videosloupců v jednom pohledu na konce vláken s přesazením.

Postup křížové korelace umožňuje výjimečně přesný výpočet polohy vlákna z jasových profilů obou pohledů na vlákna.

Obrázky ukazují jako příklad dva videosloupce a typický průběh jasových profilů proti sobě stojícího páru vláken s přesazením vláken v jednom pohledu. Případné odchylky (přesazení) se zjistí pomocí funkce křížové korelace všech relevantních jasových profilů podél celého vlákna.

Díky použitému procesu to umožní odhad útlumu spoje pomocí zjištěných údajů přesazení před a po svařovacím procesu.



Obr. 5: Jasový profil jednoho sloupce dvou proti sobě stojících konců vláken v jednom pohledu.

Ve všech přístrojích L-PASTM umožňuje rychlé předběžné polohování a patentovanou automatickou kompenzaci špatného úhlu lomu až do 2,5° mezi konci vláken a rovněž rozeznání příliš velkého úhlu obou os vláken (špatná poloha vlákna ve V-drážce). Proto je opakovaná příprava vláken potřebná pouze ve velice řídkých případech.

Na tomto principu pracují přístroje OptiSplice ONE a Ribbon. Předchozí LID a CDS ho používají pro sváření multimódových vláken a jako hrubé přednastavení před iniciací LID a CDS procesu.

5. OptiSplice LID



Obr. 6: Svářečka OptiSplice LID v nainstalované pracovní poloze.

- pro nejvyšší nároky na kvalitu a spolehlivost spoje
- kompaktní, precizní a spolehlivá svářečka do terénu
- pro všechny typy běžných jednovidových i vícevidových vláken včetně speciálních typů jako LS, DS, NZDS
- díky LID systému precizní polohování jádro na jádro
- optimalizace útlumu každého sváru pomocí AFC
- typický útlum < 0,02 dB pro standardní jednovidová vlákna a < 0,03 dB pro NZDS
- pravé měření útlumu sváru pomocí LID na 1310 nm
- výroba přesných útlumových svárů 0,1 až 10,0 dB
- doba svařování 35 - 40 sec (LID), 15 – 25 sec (CDS)
- barevný 6,4“ VGA displej, zvětšení 140 krát
- zobrazení obou pohledů současně
- díky LID rozeznání typu vlákna (měření vidového pole)
- automatická kompenzace nadmořské výšky -2000 m až +4500 m pomocí GPS systému
- tahový test
- možnost přepnout do CDS módu
- díky GPS přijímači je navíc svár v paměti lokalizován pomocí GPS souřadnic
- plný automat
- bateriové napájení
- české menu (15 jazyků)



Obr. 7: Svářečka OptiSplice LID s volitelným příslušenstvím.

6. OptiSplice CDS



Obr. 8: Svářečka OptiSplice CDS s namontovanou píčkou.

- optimální pro rychlé, vysoce kvalitní sváry jednotlivých vláken
- kompaktní a robustní svářečka do terénu
- pro všechny typy běžných jednovidových a vícevidových vláken včetně speciálních LS, DS, NZDS
- typický útlum < 0,03 dB pro standardní jednovidová vlákna a < 0,12 dB pro NZDS
- posouzení útlumu sváru pomocí CDS s odchylkou < 0,03 dB
- doba svařování 15 – 25 sec
- barevný 6,4“ VGA displej, zvětšení 140 krát
- zobrazení obou pohledů současně
- automatická kompenzace nadmořské výšky -2000 m až +4500 m pomocí GPS systému
- tahový test
- díky GPS přijímači je navíc každý svár v paměti lokalizován pomocí GPS souřadnic
- plný automat
- bateriové napájení z Li-Ion 7,2 Ah
- české menu (15 jazyků)

7. OptiSplice ONE



Obr. 9: Přístroj OptiSplice ONE s namontovanou píčkou.

Svařovací systém OptiSplice ONE je kompaktní a příruční svařovací jednotkou, která se používá v lokálních LAN sítích a v sítích FTTx pro trvalé spojení optických vláken.

Díky své nízké váze a kompaktní konstrukci je ideální pro použití tam, kde panují těsné prostorové a pracovní podmínky. Díky ergonomickému rozložení ovládacích prvků a přizpůsobení krátkým rezervním délkám vláken je přístroj předurčen pro tato použití.

- pevné V-drážky: Polohování vláken dle vnějšího obrysu systémem L-PAS™
- ideální pro FTTx a LAN aplikace
- pro všechny typy běžných jednovidových a vícevidových vláken
- díky samostředícímu efektu průměrný útlum < 0,05 dB při nízké excentricitě vláken (< 0,4 μm)
- spolehlivé vyhodnocení útlumu díky 3-rozměrnému vyhodnocení polohy vláken a digitalizaci obrazu
- doba svařování < 10 sec
- 100 krát zvětšení
- příruční a robustní konstrukce s ergonomickým designem
- transflexní 3,5" displej s podsvětlením (vysoký kontrast i na slunci)
- nízká váha 1,5 kg (2,0 kg)
- kompletní protivětrný kryt
- Li-Ion akumulátor 7,2 Ah
- plný automat s českým menu
- minimální nároky na údržbu
- atraktivní cena vzhledem k užitným vlastnostem

8. OptiSplice Ribbon



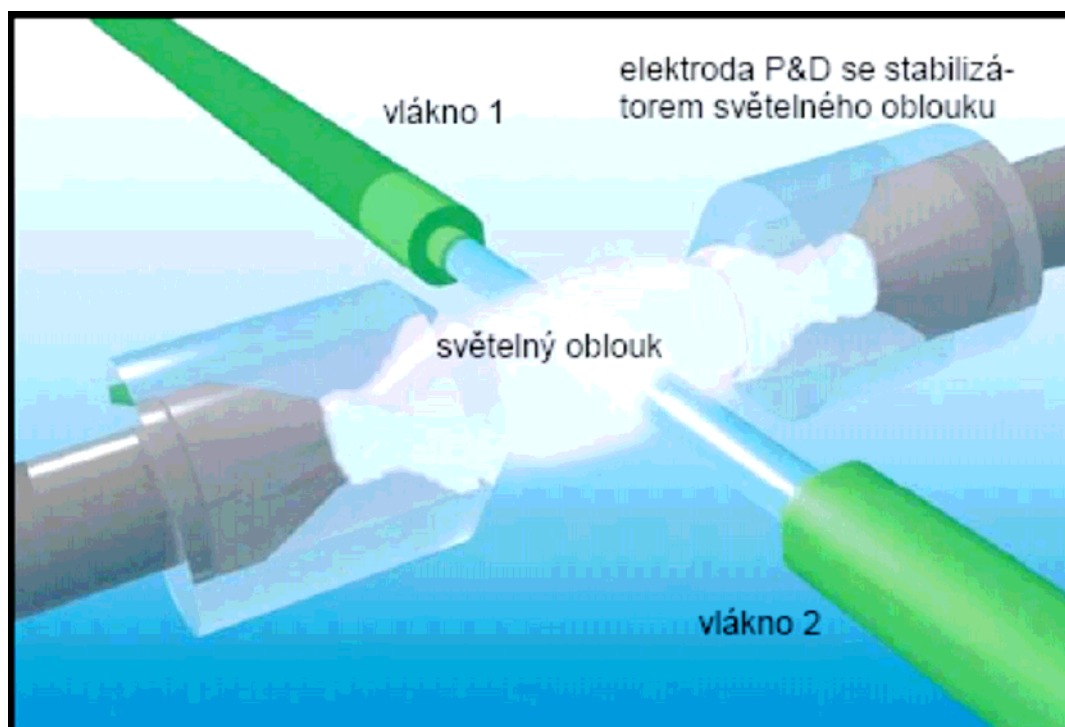
Obr. 10: Základní přístroj OptiSplice Ribbon.

- ideální pro FTTx a LAN aplikace
- pevné V-drážky: Polohování vláken podle jejich vnějšího obrysu systémem L-PAS™
- vysoce precizní V-drážky (křemík)
- výměnné držáky vláken pro různé ribbon pásky
- typický útlum < 0,05 dB pro standardní jednovidová vlákna (střední hodnota pro 12 vláknový ribbon)
- spolehlivé vyhodnocení útlumu díky trojrozměrnému vyhodnocení polohy vláken
- doba svařování < 10 sec
- transflexní 3,5" displej s podsvětlením
- kompaktní, robustní a příruční konstrukce
- nízká váha 1,5 kg (2,0 kg)
- kompletní protivětrný kryt
- Li-Ion akumulátor 7,2 Ah
- plný automat s českým menu



Obr. 11: Kufřík jako pracovní stanice se závěsnými popruhy.

9. Plášťové elektrody PD



Obr. 12: Elektrody P&D s trubičkami z křemenného skla pro stabilizaci světelného oblouku.

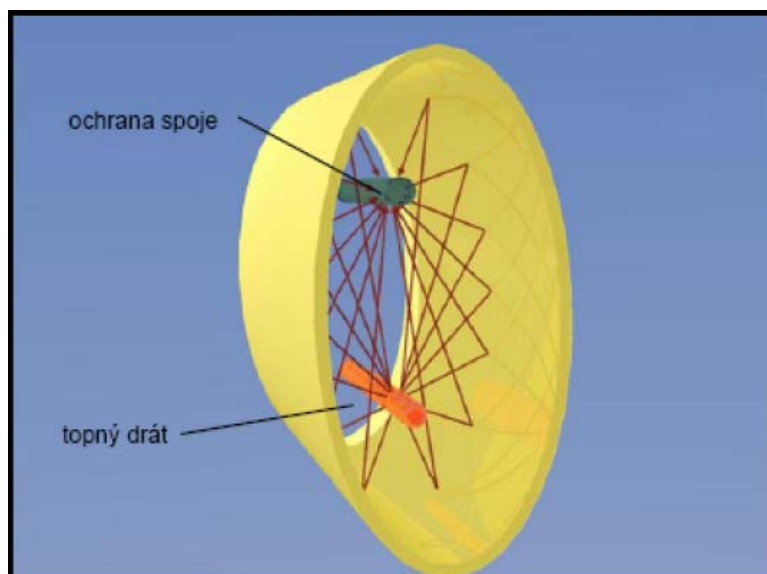
- patentovaná konstrukce
- oproti standardním elektrodám snižují střední útlum svařovaného spoje až o 50 %
- stabilizace oblouku díky přitmeleným trubičkám z křemenného skla
- ochrana špiček elektrod před poškozením
- není potřebné žádné ruční čištění (pouze čistící oblouk)
- životnost min. 7000 svárů
- vyšší produktivita díky max. preciznosti svařování s nejnižšími hodnotami útlumu i pro NZDS vlákna a extrémně dlouhé životnosti elektrod

Tyto elektrody používají OS-LID, OS-CDS svářečky a lze je též osadit do novějších typů X60 a X77 svářeček.

10. RapidoShrink píčka

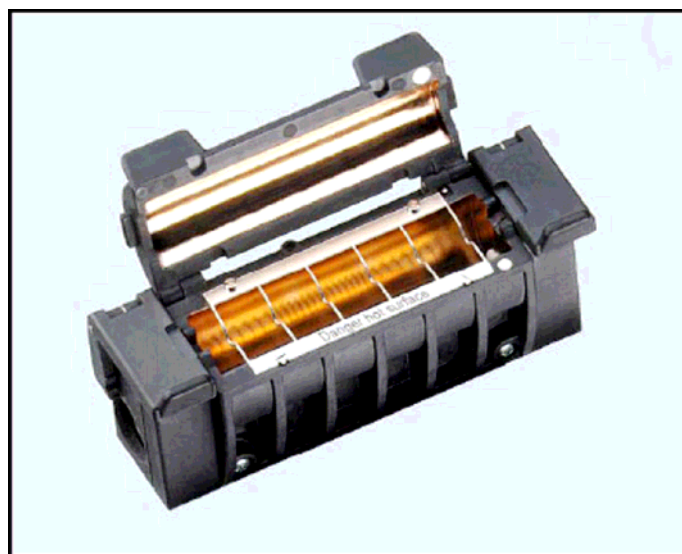
Standardní píčka:

- smršťovací ochrana svárů leží v U-drážce
- ohřev drážky odporovým topným prvkem
- povrchu válcové ochrany se dotýká jen malá spodní část U-drážky
- zbytečně se ohřívá vzduch uvnitř drážky – ten pak ohřívá samotnou smršťitelnou ochranu spoje
- stojí čas a energii

Rapido Shrink pícka:

Obr. 13: Rozdělení tepelného záření v elipsovitém zrcadle.

- přímý transport tepla na ochranu pomocí tepelného záření
- zbytečně se neohřívá materiál ani vzduch v pícce
- válcové pozlacené zrcadlo eliptického průřezu
- v jednom ohnisku topné těleso
- v druhém ohnisku smrštitelná trubička
- mimořádná energetická účinnost
- 20 sec smršťování standardní 60 mm trubičky
- 50 % spotřeba energie
- delší provoz svářečky z baterie
- programovatelný provoz dle typu ochrany
- napájení buď ze svářečky nebo jako samostatný přístroj napájený ze síťového adaptéru



Obr. 14: Otevřená rychlá smršťovací pícka RapidoShrink.

11. Závěr

Uvedené přístroje představují další kvalitativní posun v technologii potřebné pro spojování moderních optických vláken. Velmi příznivý je i poměr výkon/cena. Lze jen doufat, že si získají stejnou oblibu u pracovníků a instalačních firem jako předchozí, osvědčené typy, označené původně RXS a následně CORNING. O úspěšnosti těchto typů na trhu svědčí fakt, že jen v České republice jich bylo za 15 let prodáno 189 ks. Samozřejmostí je komunikace v českém jazyce a dlouhodobě zajištěný servis.

12. Přehled literatury

Katalogové listy fy Corning.

Ing. Jiří Kracík
VNT Nachrichtentechnik spol. s r.o.
K Rybníku 379
252 42 Jesenice u Prahy
tel.: 241931040
fax: 241931037
e-mail: kracik@vnt.cz

HNACÍ SÍLY A BRZDY ZAVÁDĚNÍ OPTIKY DO PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍ DOMA A VE SVĚTĚ

Anton Kuchar, Jaroslav Hrstka

Anotace

V současné době již nikdo nepochybuje o tom, že sítě typu FTTx jsou tím nejperspektivnějším řešením pro přístupové sítě, po technické stránce jsou zralé a na trhu je dostatečná nabídka příslušných zařízení, nicméně tempo jejich zavádění do praxe se v jednotlivých zemích i regionech velmi liší. V přednášce je mapována aktuální situace v budování a využívání optických přístupových sítí v zahraničí i doma. Pozornost je věnována také ekonomickým a politickým aspektům tohoto procesu. Je učiněn pokus najít odpověď na otázku proč je situace taková jaká je – co pohání a co brzdí zavádění optiky do přístupových sítí doma a ve světě.

Klíčová slova

Telekomunikace, optické komunikace, optické sítě, přístupové sítě, FTTx, FTTH, FTTB

1. Úvod

Při hledání odpovědi na otázku co pohání a co brzdí zavádění optiky do přístupových sítí doma a ve světě budeme vycházet z těchto faktů:

- požadavky koncových uživatelů na přenosovou kapacitu neustále narůstají exponenciálně
- optické přístupové sítě jsou bezkonkurenční co se týká přenosové kapacity – ta je prakticky neomezená. V některých zemích někteří operátoři nabízejí kapacitu optických přípojek 1 Gb/s až ke koncovým uživatelům
- technologie FTTx jsou natolik zralé, že náklady na výstavbu a provoz sítí FTTx jsou srovnatelné s náklady na výstavbu a provoz sítí založených na zavedených technologiích
- kompletní náhrada stávajících pevných účastnických (převážně metalických) přípojek by vyžadovala ohromné investice a realizační kapacity s významným dopadem na životní prostředí ve městech a obcích
- slabým místem při zajišťování širokopásmových přípojek až ke koncovým uživatelům zejména v vícejednotkových bytových domech jsou vnitřní (vnitroobjektové) sítě
- nabídka služeb, které vyžadují vysokou přenosovou kapacitu až ke koncovým uživatelům a za které jsou zákazníci ochotni přiměřeně platit, zatím není dostatečná, resp. tam kde je dostatečná, je pro většinu potenciálních zákazníků zatím příliš drahá
- situace v různých zemích se velmi liší v závislosti na jejich ekonomice, relevantní legislativě, tradicích, atd.

Nakonec naznačíme trendy rozvoje sítí typu FTTx. jak se nám jeví v současné době.

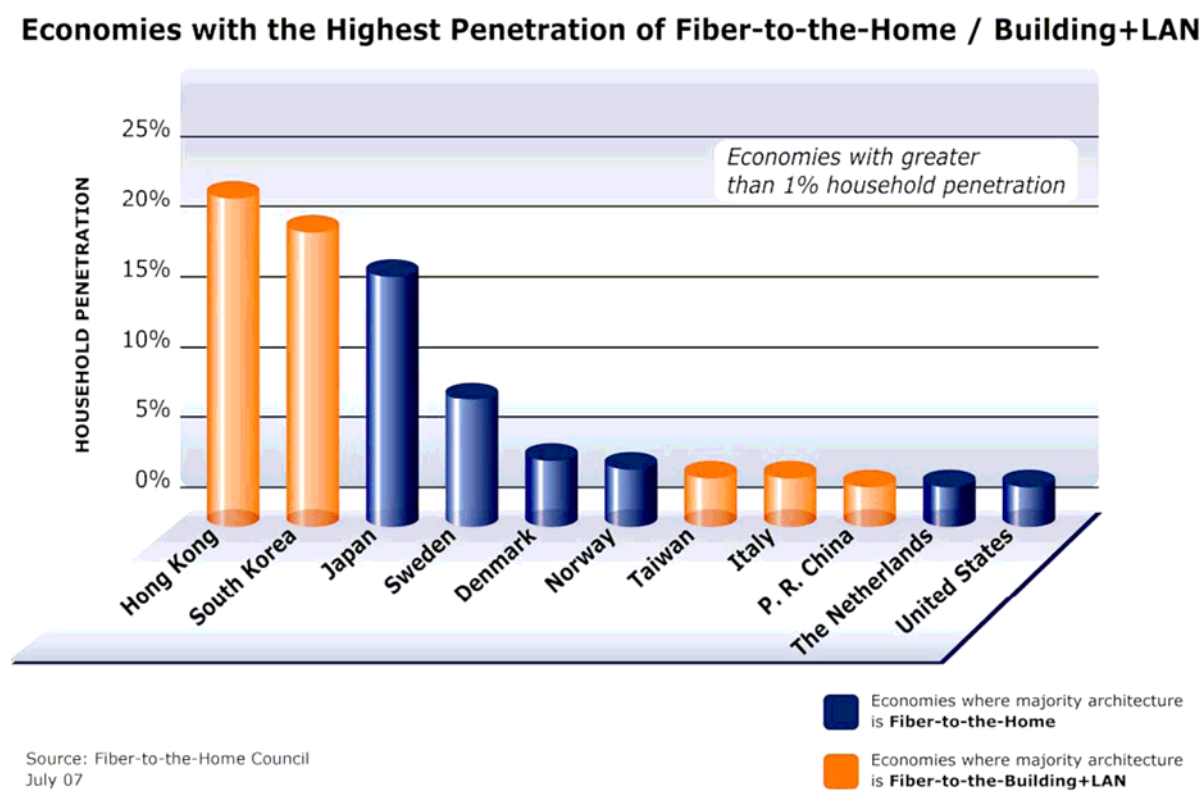
2. Situace v zavádění sítí FTTx ve světě

Při porovnávání počtů optických přípojek v sítích označovaných kolektivně „FTTx“ (Fibre To The x = vlákno k blíže nespecifikovanému místu zakončení optické

sítě) je třeba si uvědomit, že neexistuje všeobecně přijatá metodika jak tyto počty stanovit pro různé „x“. Budeme se pokud možno (bude-li ve zdroji informace „x“ uvedeno) držet metodiky organizace FTTH Council: Domácnosti (resp. jejich členové) budou považovány za připojené k síti FTTx, jestliže optický kabel je k nim přiveden přímo (FTTH = Fibre To The Home) nebo alespoň k patě jejich bytového domu (FTTB = Fibre To The Building). Další typy přístupových sítí z širší rodiny sítí FTTx (FTTP, FTTC, FTTN ...) nejsou zde uvažovány.

Obrázek 2.1 ukazuje prvních jedenáct zemí světa s nejvyšším procentem domácností připojených k sítím FTTx klasifikovaných podle výše uvedené metodiky vyšším než 1%. V zemích, ke kterým jsou na obrázku přiřazeny modré sloupce, převládají přípojky typu FTTH, v zemích, ke kterým jsou přiřazeny červené sloupce převládají přípojky typu FTTB, přičemž vnitřní rozvody jsou realizovány jako metalické sítě typu LAN, nebo VDSL.

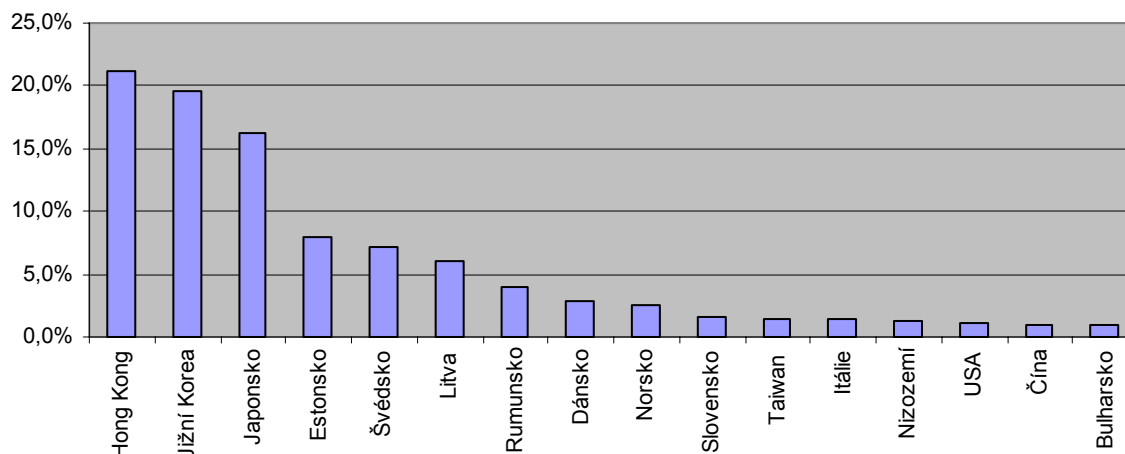
V kategorii sítí typu FTTH (umožňujících koncovým účastníkům připojit se bez agregace rychlostí nejméně 100 Mb/s) již tradičně vede Japonsko (16,3%), kde existuje silné konkurenční prostředí a současně vláda podporuje budovatele těchto sítí různými daňovými úlevami. V této kategorii si dobře vedou také země severní země (Švédsko 7,2%, Dánsko 2,9%, Norsko 2,5%) a Holandsko. V těchto zemích nejvýznamnějším činitelem byla a zatím stále je iniciativa měst a obcí a provozovatelů sítí netelekomunikačního typu (energetické sítě, vodovody a kanalizace, apod., tzv. „utilities“). Širokopásmové připojení prostřednictvím sítí FTTB má v Hong Kongu 21,2% domácností a v Jižní Korei 19,6% domácností. V těchto zemích žije velká část populace v bytových domech.



Obr. 2.1: Vedoucí země v budování sítí FTTx (FTTH + FTTB) [1].

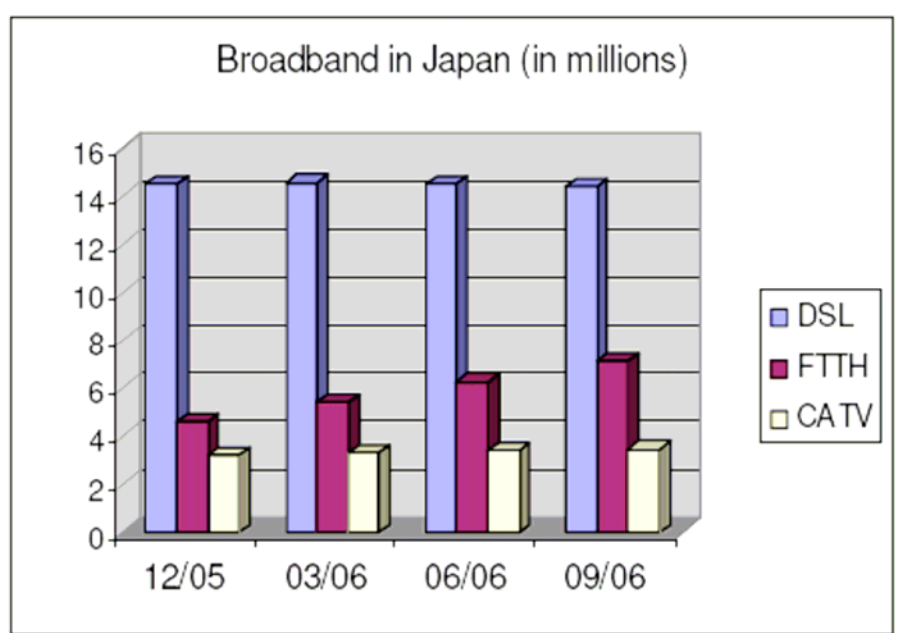
Přehled uvedený na obr. 2.1. vypracovaný organizací FTTH Council však nezahrnuje nové členské státy EU. Proto jsme jej doplnili údaji získanými vlastním průzkumem z různých zdrojů (obr. 2.2). Z těchto zemí si velmi dobře vedou zejména Estonsko a Litva, ale překvapivě také Rumunsko, následované Slovenskou republikou.

Penetrace domácností s optickou přípojkou k Internetu



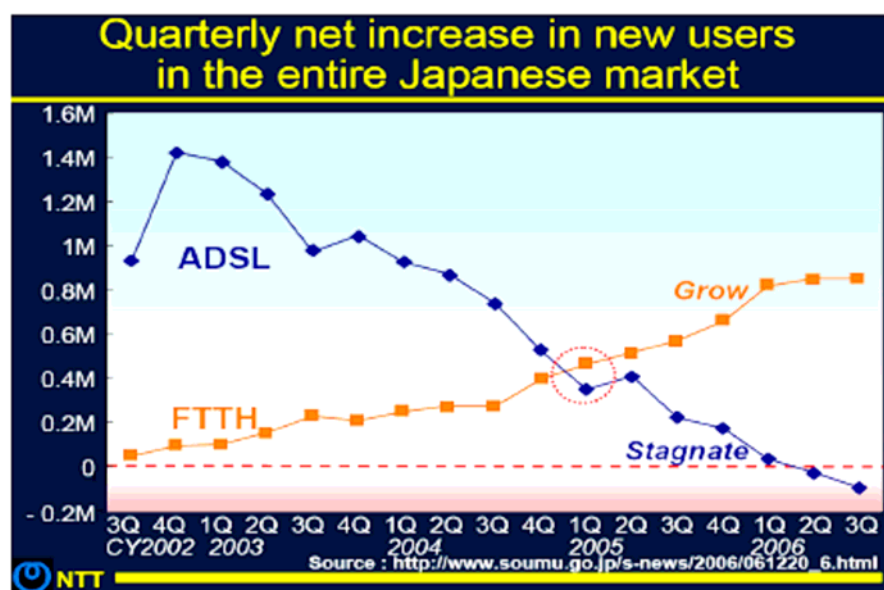
Obr. 2.2: Aktualizovaný přehled penetrace domácností sítěmi FTTx.

V Japonsku (obr. 2.3 a 2.4) a v Jižní Korei roste penetrace FTTx již na úkor sítí xDSL, které tam byly v rozsáhlé míře vybudovány v předchozí etapě. Ke konci roku 2006 bylo realizováno více než 7 milionů účastnických přípojek typu FTTH (viz www.soumu.go.jp):



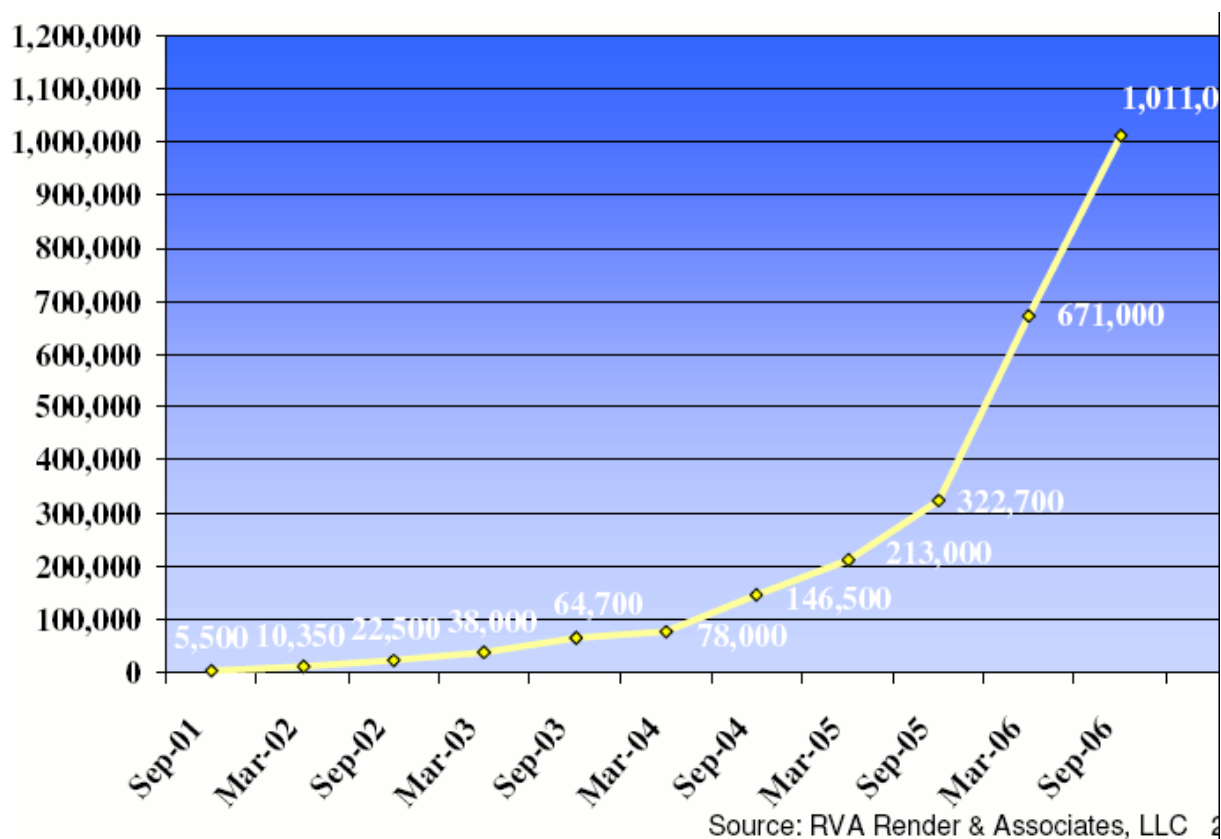
Obr. 2.3: Vývoj počtu širokopásmových přípojek xDSL, FTTH a kabelové televize v Japonsku v r. 2006.

Měsíční přírůstek činil 280 000 přípojek FTTH. Uživatelé připojení prostřednictvím DSL přecházejí na přípojky FTTH (obr. 2.4):



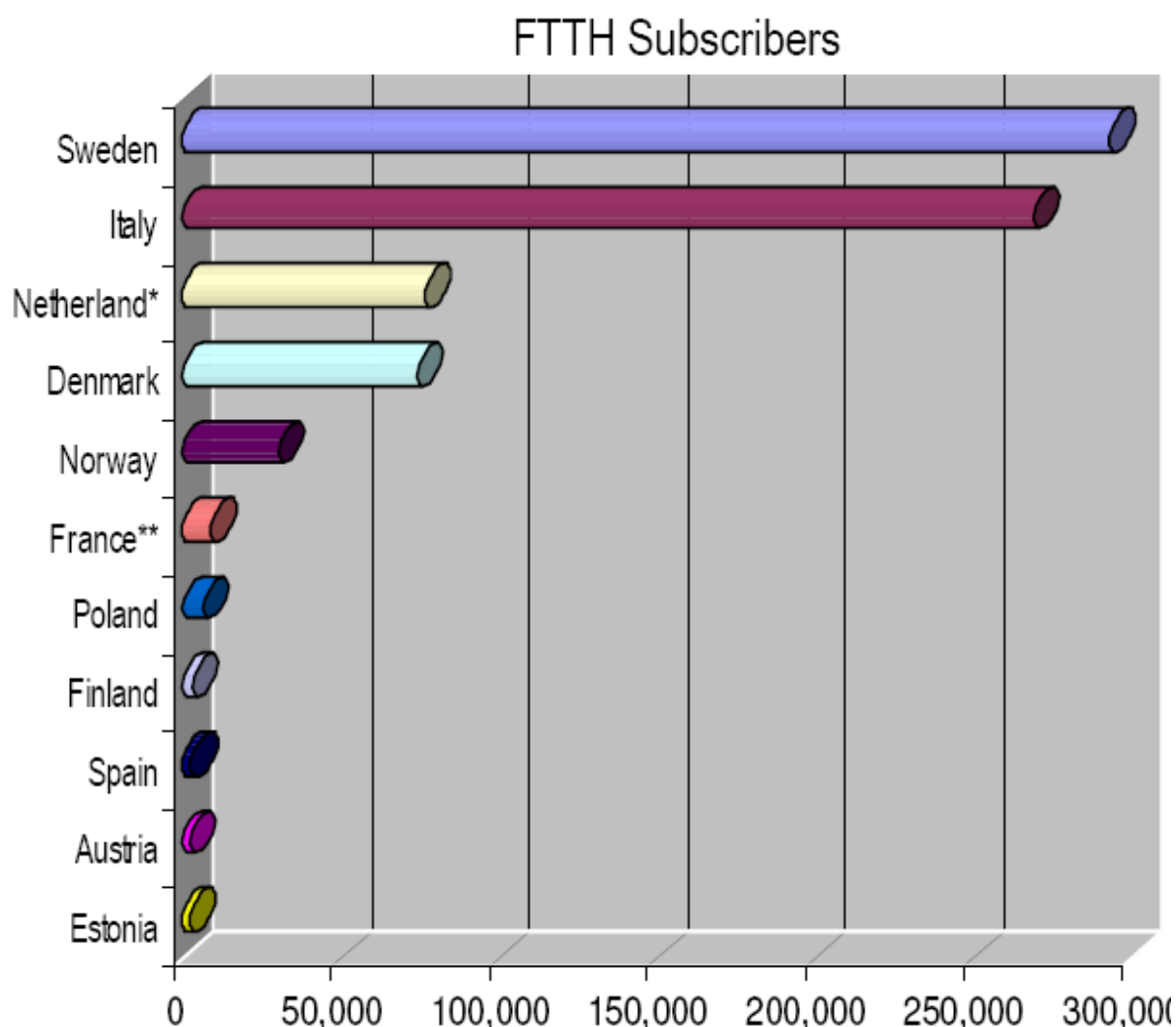
Obr. 2.4: Vývoj počtu širokopásmových přípojek xDSL a FTTH v Japonsku od r. 2003.

Ačkoliv penetrace sítí FTTx do domácností v USA byla jen kolem 1%, vzhledem k velikosti tamějšího trhu, se jedná o vysoké absolutní počty přípojek. Ke konci roku 2006 tam bylo připojeno již více než 6 mil. účastníků technologií FTTx, z nichž přes 1 milion bylo aktivních (platících). Poté, co tamější regulátor vyňal přístupové sítě z povinnosti je zpřístupnit konkurenci, rostl počet přípojek FTTx exponenciálně (obr. 2.5). Přírůstek v r. 2006 oproti předchozímu roku byl 200%.



Obr. 2.5: Vývoj počtu širokopásmových přípojek FTTx v USA od r. 2001.

V Evropě je situace velmi složitá, neboť podmínky v jednotlivých zemích se výrazně liší. Přesto, že Evropská komise zatím nevyňala sítě FTTx z povinnosti je zpřístupnit, bylo v Evropě vybudováno celkem již přes 3 mil. přípojek FTTx, z nichž 1,3 miliónu je aktivních. Roční nárůst byl však pouze 30%. Z velkých telekomunikačních operátorů se odhodlal budovat sítě FTTx ve velkém rozsahu zatím jen France Telecom, který byl k tomu dotlačen vysokou aktivitou alternativních operátorů. Například, společnost Iliad Group (Free) plánuje koncem roku 2007 vybudovat nákladem 160 mil. € v jihovýchodní části Paříže 30 000 přípojek FTTH. Na tuto výzvu reagoval France Telecom oznámením, že do konce r. 2008 nabídne možnost připojení k jeho síti FTTx milionu pařížských domácností. Ostatní velcí evropští telekomunikační operátoři zatím váhají. Budují přístupové sítě FTTN, resp. FTTCabinet kombinované s přípojkami ADSL2+, resp. VDSL (vlákno k přístupovému uzlu sítě, zde konkrétně k přístupovému multiplexoru DSLAM). Deutsche Telecom, který vybudoval sítě FTTCabinet/VDSL v deseti největších městech umožňující připojit se více než 8 mil. potenciálních zákazníků rychlostí až 50 Mb/s, je ve sporu s Evropskou komisí, která zatím odmítá vyjmout sítě FTTx vybudované dominantními operátory z povinnosti poskytnout je jejich konkurentům z řad alternativních operátorů (zpřístupnění účastnických přípojek – „Local Loop Unbundling“, LLU). British Telecom přehodnocuje svoji politiku budovat přístupové sítě typu FTTN pod vlivem trendů vývoje přístupových sítí, Swisscom koupil italský Fastweb, který byl evropským průkopníkem v budování sítí FTTH. Absolutní počty přípojek FTTx ve vybraných evropských zemích jsou ukázány na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Absolutní počty přípojek FTTx v některých evropských zemích v r. 2006. (Zdroj: IDATE).

3. Situace v zavádění sítí FTTx v ČR a ve Slovenské republice

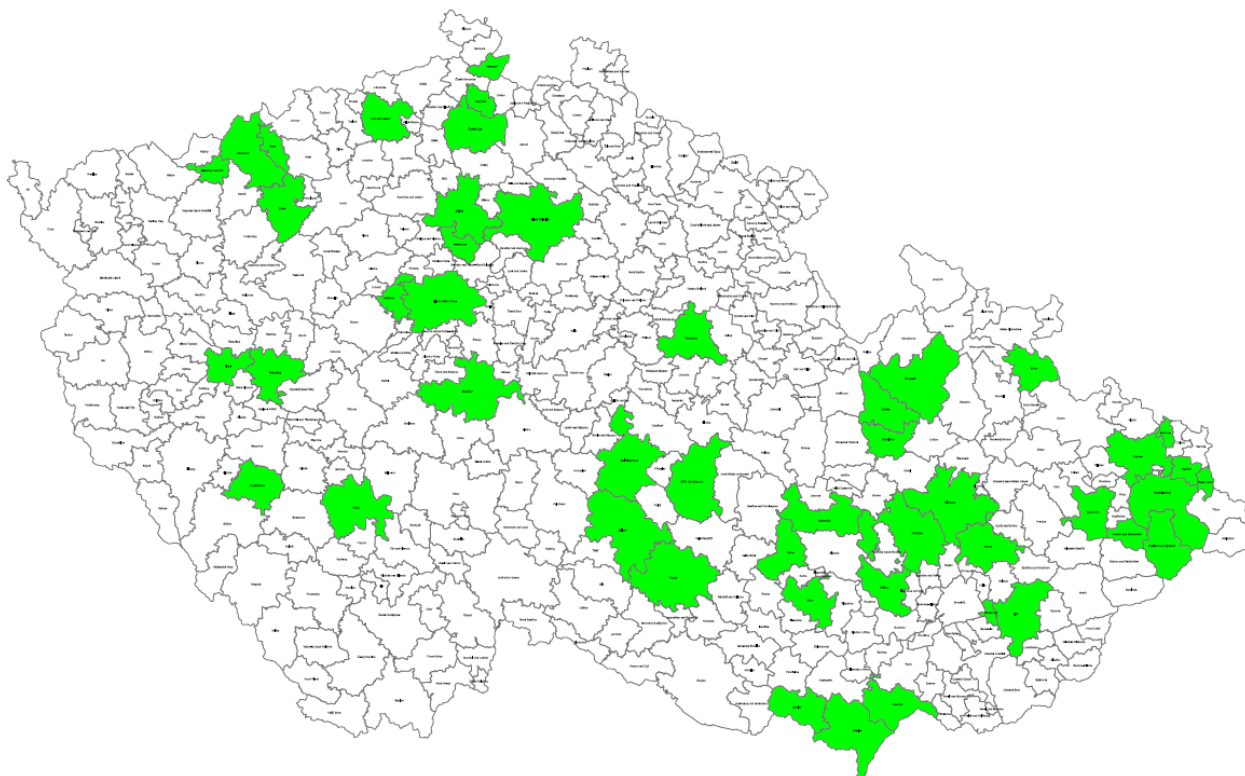
Dominantní operátor Telefonica O2 Czech Republic, a.s., který je prakticky výhradním vlastníkem přístupových sítí v ČR, se ještě nerozhodl zde budovat přístupové sítě typu FTTx. Zatím ověřoval vhodné technologie na pilotních projektech. V České republice byla však realizována řada menších projektů FTTx, viz příložená tabulka 3.1. Žel, jednotliví operátoři neposkytují oficiální informace o počtu realizovaných přípojek ani aktivních zákazníků. K 30.6.2007 bylo v ČR realizováno odhadem 33 000 přípojek FTTx. V porovnání s 2. čtvrtletím roku 2006, kdy bylo realizováno cca 23 000 přípojek FTTx, to představuje nárůst o 44 %. Některé obce a města připravují realizaci sítí FTTx financovanou ze svých zdrojů, případně s účastí soukromého kapitálu. Pokrytí území ČR sítěmi FTTx (obr. 3.1), které jsou až na malé výjimky typu FTTB, slouží domácnostem zejména v panelových domech. Ty nejmenší sítě FTTx jsou typu bod-bod (P2P), rozsáhlejší využívají i optické rozbočovače a slučovače (větvené pasivní optické sítě PON, P2MP). Optická síť bývá ukončena na patě domů, kde je obvykle umístěn také ethernetový prepínač, který může mít i některé funkce směrovače. Síť uvnitř objektu využívá nestíněné kroucené měděné páry, nejčastěji kategorie CAT-5.

	Společnost	www stránky	Pokrytí
1.	Grape SC a.s.	www.grapesc.cz	Chomutov, Jirkov, Podbořany
2.	Kabell	www.kabell.cz	Klášterec nad Ohří,
3.	KVE.CZ s.r.o.	www.kve.cz	Pardubice,
4.	Master Internet s.r.o.	www.master.cz	Praha, Brno, Ostrava,
5.	Mattes AD spol. s r.o.	www.802.cz	Frýdek-Místek, Frýdlant nad Ostravicí,
6.	Maxprogres s.r.o.	www.99maxprogres.cz	Brno, Boskovice,
7.	Metropolnet a.s.	www.metropolnet.cz	Ústí nad Labem,
8.	Smart Comp., a.s.	www.netbox.cz	Brno, Jihlava, Praha,
9.	NeTron s.r.o.	www.domanet.cz	Český Těšín, Frenštát pod Radhoštěm,
10.	T-Systém Pragonet	www.pragonet.cz	Praha,
11.	AQUA	www.moravanet.cz	Šumperk, Zábřeh,
12.	Dragon Electronic	www.dragon.cz	Mladá Boleslav,
13.	NJNET s.r.o.	www.njnet.cz	Nový Jičín,
14.	Limet Network s.r.o.	www.limet.cz	Praha,
15.	Ovanet, a.s.	www.ovanet.cz	Ostrava,
16.	Poda s.r.o.	www.poda.cz	Ostrava, Bohumín, Havířov,
17.	Velbnet s.r.o.	www.velbnet.cz	Plzeň,
18.	Faster CZ spol. s r.o.	http://web2.faster.cz	Brno,
19.	IJC s.r.o.	www.metronet.cz	Mladá Boleslav,
20.	Luděk Tkáč – Final	www.spcnet.cz	Krnov,
21.	Trioptimum s.r.o.	www.trionet.cz	Mělník,
22.	Dial Telecom	www.dialtelecom.cz	Praha,
23.	Softex Group s.r.o.	www.softexgroup.cz	Benešov,
24.	Cabel Media s.r.o.	www.cabelmedia.cz	Praha 8,
25.	KT Přerov	www.ktprerov.cz	Přerov,
26.	CentroNet	www.centro-net.cz	Praha 1,
27.	Metropolitní síť Prostějov	www.mspv.cz	Prostějov,
28.	Metropolitní s.r.o.	www.metropolitni.cz	Havlíčkův Brod,

29.	NetDataComm s.r.o.	www.netdatacomm.cz	Brno-Chrlice,
30.	CL-NET s.r.o.	www.clnet.cz	Česká Lípa, Varnsdorf, <i>Nový Bor</i> ,
31.	ABLE agency s.r.o.	www.ada.net.cz	Adamov,
32.	Severostav spol. s r.o.	www.jaw.cz	Praha,
33.	Jiří Kobilák – KOBNET	www.kobnet.cz	Praha 3,
34.	Šumava Net s.r.o.	www.sumava-net.cz	Horažďovice,
35.	CZ Speed NET	www.czspped.net	Praha 6,
36.	Agentura STAP s.r.o.	www.pacchetto.cz	Praha 8, Praha 10,
37.	Alcomp spol. s r.o.	www.ralsko.net	Česká Lípa,
38.	Jana Pěnkavová (Osmium&Roneblue)	www.osro.eu	Rokycany a okolí,
39.	Petr Slezák – Pescom Net	www.pescomnet.cz	Praha 11,
40.	YCNEGA technologies s.r.o.	www.ycnega.cz	Tišnov,
41.	Simelon s.r.o.	www.simelon.net	Písek,
42.	Radim Pytela	www.acvyskov.cz	Vyškov,
43.	Kasten NET, spol. s r.o.	www.netnet.cz	Neratovice,
44.	Evkanet s.r.o.	www.evkanet.net	Poruba,
45.	Avonet s.r.o.	www.avonet.cz	vybrané lokality ve Zlínském kraji
46.	Infos Art s.r.o.	http://infos.infos.cz	Vyškov, Prostějov
47.	Optinet s.r.o.	http://optinet.cz	Olomouc,
48.	Trinity Czech Republic, s.r.o.	http://metron.cz	Třebíč,
49.	Ing. Jan Rýznar – RPS Computer	www.rps.cz	Mohelnice, Olšany,
50.	Satt, a.s.	www.satt.cz	Žďár nad Sázavou,
51.	TC servis s.r.o.	www.tcservis.cz	Zlín, Otrokovice,
52.	Dozimont s.r.o.	www.dozimont.cz	Ústí nad Labem,
53.	Poruba.net	www.poruba.net	Ostrava,
54.	Qnet CZ s.r.o.	www.qnet.cz	Brno,
55.	CDC Data	www.mikulov.net	Mikulov,
56.	RTV-5	www.rtv5.cz	Břeclav,
57.	TETA	www.tetanet.cz	Ústí nad Labem
58.	Ohře media spol. s r.o.	www.ohremedia.cz	Žatec,
59.	Bc. Čech Jan	www.net-connect.cz	Hodonín,

Tab. 3.1: Společnosti, které nabízí v ČR připojení domácností k síti FTTx. Zdroj: Závěrečná zpráva úkolu na podporu státní zprávy v r. 2007 (52/3) TESTCOM: „Počty přípojek vysokorychlostního přístupu“. Květen 2007.

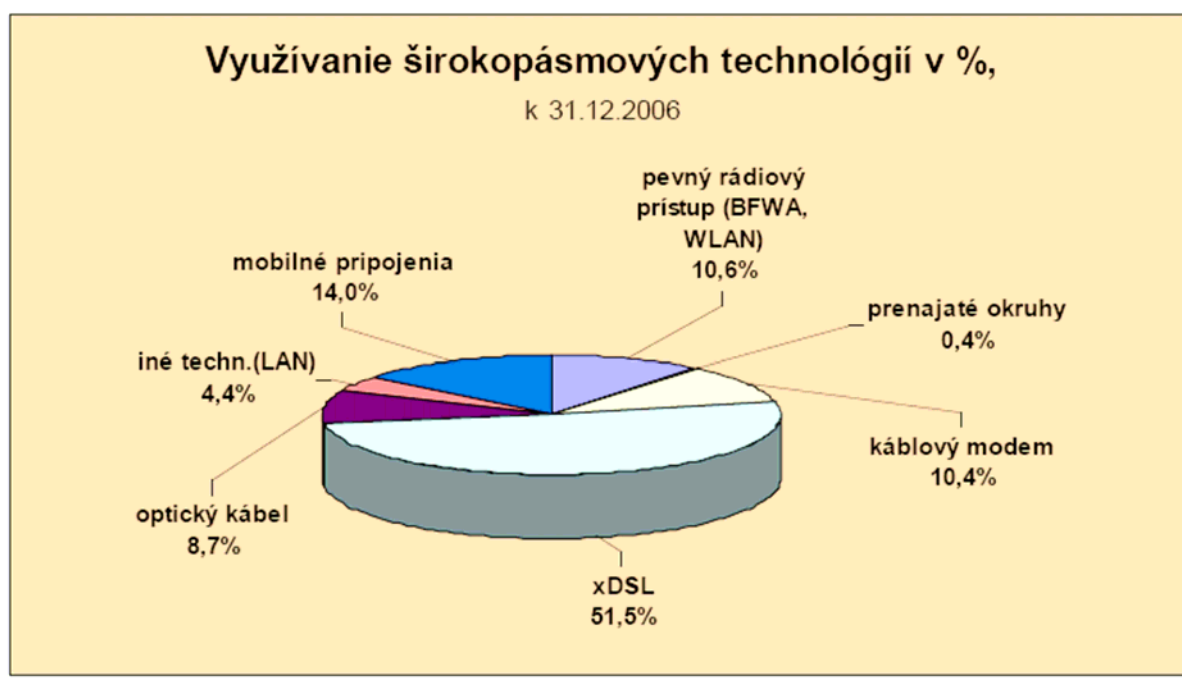
Mapa pokrytí řešením FTTx (září 2007)



Obr. 3.1: Mapa pokrytí ČR sítěmi FTTx (září 2007, zdroj TESTCOM).



Obr. 3.2: Nárůst celkového počtu širokopásmových přípojek ve Slovenské republice, realizovaných všemi dostupnými technologiemi – viz obr.3.3.



Obr. 3.3: Podíl jednotlivých technologií na celkovém počtu širokopásmových přípojek na Slovenské republice.

Na Slovensku byla realizována řada úspěšných projektů metropolitních sítí (např. Bratislava, Košice, Liptovský Mikuláš, Trnava, Zvolen a další), většinou z iniciativy a kapitálovou účastí samosprávních orgánů (projekty typu PPP – Public Private Partnership) [2]. Staví se a připravují se další. Významně se angažuje také soukromá společnost Orange Slovensko (dceřina společnosti France Telecom), která plánuje umožnit do konce roku na Slovensku připojení až 200 000 domácností technologií FTTH.

Celkový počet širokopásmových přípojek na Slovensku roste exponenciálně (obr. 3.2), v němž jsou zahrnut i počet přípojek FTTx, který podle odhadu V. Murína a D. Plintovičové Vladimír Murín, VÚS_dosáhne koncem roku 2007 počtu 39 000.

4. Ekonomické a legislativní aspekty budování a provozování sítí FTTx

Při posuzování ekonomické stránky sítí FTTx je v první řadě třeba rozlišit náklady na jejich realizaci tj. investiční náklady od nákladů na jejich provoz tj. provozní náklady. Dříve byla pozornost věnována především první položce, když se tyto náklady porovnávaly s náklady na vybudování metalických, resp. rádiových přístupových sítí. V tomto směru jsou dnes optické sítě zcela konkurenceschopné v porovnání s metalickými sítěmi. Základním problémem je však skutečnost, že metalické sítě jsou již vybudované (a v ČR i SR jsou poměrně „mladé“) a tudíž telekomunikační operátoři se je snaží maximálně využít. Proto, zejména v Evropě, se zatím tyto sítě modernizují tak, že vlákno vede „jen“ k (z místní ústředny vysunutému) uzlu vybavenému optickým zakončením, multiplexorem a xDSL modemy, odkud vedou ke koncovým uživatelům již jen metalické účastnické přípojky.

Podle [3] 80% nákladů na vybudování FTTH připadne na pasivní infrastrukturu a tudíž jen 20% na (aktivní) zařízení v ústředně a u koncových zákazníků. Z toho vyplývá, že z hlediska nákladů není tak rozhodující, zda zvolit technologii GE-PON (Ethernet), nebo (univerzálnější) G-PON. První položka se dále dělí na náklady na výkopové práce, pokládku chrániček (trubek pro kabely), konektory a skříně pro umís-

tění zařízení, které činí 70% z celkových nákladů a zbylých 10% případně na instalaci (zafukování) vláken. Velmi podstatnou položkou na vybudování sítí FTTx jsou mzdové náklady, které se ovšem v jednotlivých zemích a regionech velmi liší.

Náklady na provoz přístupových sítí byly donedávna v ekonomických úvahách dosti opomíjeny. Avšak díky výraznému pokroku v oblasti optických technologií se dnes již někteří operátoři rozhodli vybudovat hybridní přístupové sítě, tj. část metalických sítí nahradit optikou, protože náklady na údržbu optických sítí jsou již nižší než sítí metalických a také jsou méně poruchové.

Při rozhodování o výstavbě sítí FTTx je třeba brát v úvahu následující skutečnosti:

- Zda se jedná o starou zástavbu s již vybudovanou klasickou (metalickou) přístupovou sítí. Je-li tato v dobrém stavu, je třeba využít alespoň její část modernizací položením optických kabelů spojujících DSL přístupové multiplexory (DSLAMy) s místní ústřednou. Při výstavbě na zelené louce je výhodné připojit do výkopů pro inženýrské sítě chráničky, do kterých lze podle potřeby ve vhodnou dobu zafouknout optické kabely vedoucí až k jednotlivým objektům
- Hustota zástavby, složení populace (věková a profesní struktura) a místní geografické podmínky. Tyto faktory podstatně ovlivní návratnost investic
- Jaké jsou jiné možnosti (ve staré zástavbě) připojit se širokopásmovou přípojkou k síti (xDSL telko operátora, televizní kabelový rozvod, WiFi, Wimax, atd.)
- Možnost partnerství veřejného a soukromého sektoru při financování výstavby FTTx sítě.

Sítě FTTx lze v zásadě realizovat na bázi přístupového protokolu Gigabitový Ethernet (GE-PON) podle standardu IEEE 802.3 nebo jako síť G-PON podle standardu ITU-T G.984, které jsou univerzálnější (vhodné pro kontinuální i paketový provoz), efektivnější, ale nákladnější na investice.

Jak bylo zmíněno v předchozích odstavcích, situace v budování optických přístupových sítí v různých částech světa je velmi rozdílná. Proč je tomu tak?

Obecně lze na tuto otázku odpovědět konstatováním, že situace v různých zemích se velmi liší v závislosti na jejich ekonomice, relevantní legislativě, tradicích, atd.

Technologie pro síť FTTx, jako každá vyspělá technologie, jsou relativně drahé. Proto se nejdříve uplatní v bohatších zemích. Teprve až se tam masově rozšíří, ceny příslušných dílů a zařízení poklesnou natolik, že se tyto sítě ve větší míře začnou budovat i v ekonomicky méně vyspělých zemích. Příklad rychlého rozšíření mobilních sítí v zemích s nízkými příjmy na obyvatele však ukazuje, že toto schéma nemusí vždy platit. Záleží na mnoha jiných faktorech. Například jedním z důvodů, proč Evropa zaostává v budování sítí FTTx za USA a Japonskem je, že zatímco v těchto zemích se běžně v přístupových sítích používají závěsné kabely, jejichž instalace je mnohem rychlejší a levnější než je ukládat do země, v Evropě to v městské zástavbě není dovoleno.

Byly již provedeny studie, jak se v USA na tržní ceně objektu promítne jeho vybavenost optickou přípojkou. Podle [4] měly tyto (rodinné) domy v roce 2007 vyšší tržní hodnoty o 4,8% ve srovnání s domy bez přípojky FTTx.

Legislativní prostředí ve vedoucích zemích z pohledu sítí FTTx, tj. v Japonsku, Jižní Korei, USA a EU se dost podstatně liší. Zatímco v prvních dvou zemích nejenže neexistují legislativní opatření, která by odrazovala potencionální investory sítí FTTx stavět, vlády těchto zemí cílevědomě a účinně výstavbu sítí FTTx podporují. Japonští investoři dostávají na výstavbu sítí FTTH daňové úlevy, resp. levné půjčky. Jak již bylo zmíněno, v USA zaručila investorům, že jimi vybudované optické přístupové sítě nebudou po nějakou dobu muset zpřístupnit konkurentům. V EU takové opatření zatím

nebylo přijato. Připravuje se nový regulační rámec pro oblast elektronických telekomunikací. Zatím není jasno, jak bude v tomto rámci otázka zpřístupnění sítí FTTx řešena. I v této situaci však některé země hledají cesty jak podpořit výstavbu sítí FTTx. Například švédská vláda poskytuje obcím finanční podporu na výstavbu sítí FTTx a přispívá na poplatky uživatelům těchto sítí. Avšak metropolitní sítě postavené s podporou z veřejných zdrojů musejí být otevřené pro jakéhokoliv poskytovatele služeb, který o to projeví zájem.

Pro ČR je existující a bude i nový regulační rámec EU závazný. Jinou otázkou je, zda, resp. jak bude současná vláda výstavbu sítí podporovat. Tzv. „broadbandový fond“ ve výši asi 800 mil. Kč, který svým usnesením předchozí vláda vyčlenila, byl čerpán jen v prvním roce plánovaného čtyřletého období, pak byl zrušen. Ve velkých městech nepochybně budou sítě FTTx vybudovány i bez podpory vlády. Zůstanou však oblasti, zejména venkovské, kde pro soukromý kapitál ještě dlouho nebude atraktivní takové sítě budovat. Tam bude záležet jen na místních samosprávách, jak si s tímto problémem poradí. Jednou z cest, jak tento problém řešit, je získání podpory ze strukturálních fondů EU, dokud je čas (do r. 2013). Další možností (nejlépe současně) je využít místní iniciativy lidí, kteří jsou ochotni se v dané věci angažovat. Příkladem může být Švédsko, kde takto bylo „optifikováno“ mnoho (velkých i malých) měst a obcí, které se nyní postupně propojují do společných nejdříve regionálních a posléze do celonárodní optické sítě.

5. Závěr

Dnes již není pochyb o tom, že dozrál čas pro masové nasazování optiky do přístupových sítí. Svědčí o tom statistiky o vybudovaných sítích FTTx v průmyslově vyspělých zemích, tempo růstu počtu přípojek FTTx ve světě, rozhodnutí řady velkých telekomunikačních operátorů budovat sítě FTTx, nabídka technologie na trhu a rostoucí poptávka po šířce pásma účastnických přípojek. Rozhodnutí, zda v daném a místě a v daném čase síť FTTx vybudovat, musí však být učiněno na základě důkladné analýzy, aby projekt byl životaschopný.

6. Přehled literatury

- [1] FTTH Council, červenec 2007 www.ftthcouncil.org
- [2] Seminár "Metropolitné siete a OP IS", Banská Bystrica, 19.4.2007, <http://www.p3.sk/verbal/119/>)
- [3] Rubenstein, Ray: „Optical access: is cost still the sticking cost?“. Fibre systems Europe, winter 2006, str. 12-14
- [4] David Meis: „FTTH gives homeowners a raise“. Lightwave, 8/2007

Anton Kuchar
 ÚFE AV ČR Praha, v.v.i.
 Chaberská 57
 182 51 Praha 8
 tel.: 266 773 408
 fax.: 284 680 222
 e-mail: kuchar@ufe.cz

Jaroslav Hrstka
 TESTCOM
 Hvoždanská 3
 143 01 Praha 4
 tel.: 271 192 445
 fax.: 272 934 560
 e-mail: hrstka@testcom.cz

ZKUŠENOSTI Z VÝSTAVBY A PROVOZU MNOHOFUNKČNÍ SÍTĚ VE MĚSTĚ ŠUMPERK

Anton Kuchar, Jiří Purš

Anotace

V příspěvku je popsán projekt optické multifunkční přístupové sítě typu FTTB, který v Šumperku realizuje společnost AQUA a.s. Autoři se s účastníky konference podělí o zkušenosti získané při výstavbě i provozu této sítě.

Klíčová slova

Telekomunikace, optické komunikace, optické sítě, přístupové sítě, FTTx, FTTH, FTTB

1. Úvod

Protože protažení světlovodných přípojek až ke koncovým (individuálním) uživatelům až do jejich domovů, resp. kanceláří, je stále příliš drahé, v současné době je jednou z možností ekonomicky schůdného řešení realizace širokopásmového připojení přivést signál po optických vláknech k nějakému distribučnímu bodu, vysunutého z ústředny blíže k uživatelům (FTTNode), nebo umístěnému v rozvodové skříni na ulici (FTTCurb), nebo na hranici areálu (FTTPremises), či až na patě objektu/budovy (FTTBuilding), odkud se rozvádí některou z klasických metod metalickou sítí ke koncovým uživatelům. Společnost AQUA, a.s. poskytující zejména služby kabelové televize a internetu v regionu Zábřehska a Šumperka, vypracovala a nyní realizuje projekt multifunkční sítě typu FTTB v Šumperku a Zábřehu n. Moravě. Nabízí koncovým uživatelům prostřednictvím standardní vnitrobjektové strukturované kabeláže kategorie 5 připojení k vysokorychlostnímu internetu rychlostí od 1 Mb/s do 10 Mb/s za přijatelné ceny. Projekt zahrnuje také zavedení služby digitální televize „Quickmedia IPTV“ na bázi internetového protokolu (IPTV) s možností přijímat pomocí set top boxu až 40 televizních programů na standardním TV přijímači.

Cílem příspěvku je podělit se s účastníky konference o zkušenosti z výstavby, provozu a poskytování služeb multifunkční sítě ve městě Šumperk (obr.1). Sít realizovala společnost Aqua,a.s., která provozuje sítě kabelové televize v Zábřehu, Postřelmově, Šumperku a Víkřovicích a poskytuje tam službu přístupu k Internetu prostřednictvím své služby Moravanet [1].



Obr.1: Město Šumperk.

2. Technické údaje o projektu

Byla zvolena architektura sítě založená na pasivní fyzické infrastruktuře a kruhové topologii optických kabelů, které propojují Ethernetové přepínače umístěné na patách budov (FTTB, obr.2). Elektrická energie je k těmto spínačům přiváděna na nízkém napětí z centrální stanice po měděných párech integrovaných přímo v optických kabelech. Zvolení kruhové topologie umožňuje efektivní nasazení i RSTP protokolu, který zajistí funkčnost sítě i v případě výpadku jedné z optických větví sítě. Vnitřní sítě v obsluhovaných budovách mají hvězdicovou topologii a jsou realizovány na bázi nestíněných kroucených měděných párů kategorie 5 (UCP Cat-5) běžně používaných pro realizaci podnikových datových sítí LAN. Toto uspořádání umožňuje připojit k síti každou domácnost v obou směrech (symetricky) rychlostí až 100 Mb/s, což je dostatečná přenosová kapacita pro poskytování prakticky libovolného portfolia služeb, včetně např. současného připojení více TV přijímačů, HDTV, atd.



Obr.2: Schéma sítě FTTB realizované ve městě Šumperk v první etapě.

V první etapě byla realizována výstavba, kdy byl z domovních přepínačů (obr.3) přiveden jeden metalický kabel do jednotlivých podlaží respektive bytů. Ukazuje se, že pro IPTV je optimální instalovat nejméně dva metalické kabely na jeden byt. Např. společnost SOFTEX, s.r.o. v Mostě používá až 3 metalické kabely na jeden byt. Toto opatření umožní v budoucnosti implementovat další služby (například oddělení IPTV od internetu, připojení více set-top-boxů, apod.). Jelikož cena metalického kabelu je nízká, toto řešení je finančně nenáročné, ale funkcionality sítí se přiblíží sítím FTTH.



Obr.3: Detailní zapojení domovních přepínačů s dálkovým napájením a optickou vanou.

Síť FTTB v Šumperku je připojena pomocí gigabitového optického okruhu k centrálnímu uzlu na nádraží v Zábřehu, odkud je společností Sloane Park [4] zajištěna mezinárodní i národní konektivita. K realizaci optického provedení přepínačů byly použity jednovláknové optické kabely s 24 vlákny uloženými v chrániče. Kabely obsahují 4 trubičky po 6 vláknech. Jednotlivé segmenty sítě jsou nasvíceny zásuvkovými moduly SFP (1310nm) umístěnými v jednotlivých přepínačích.

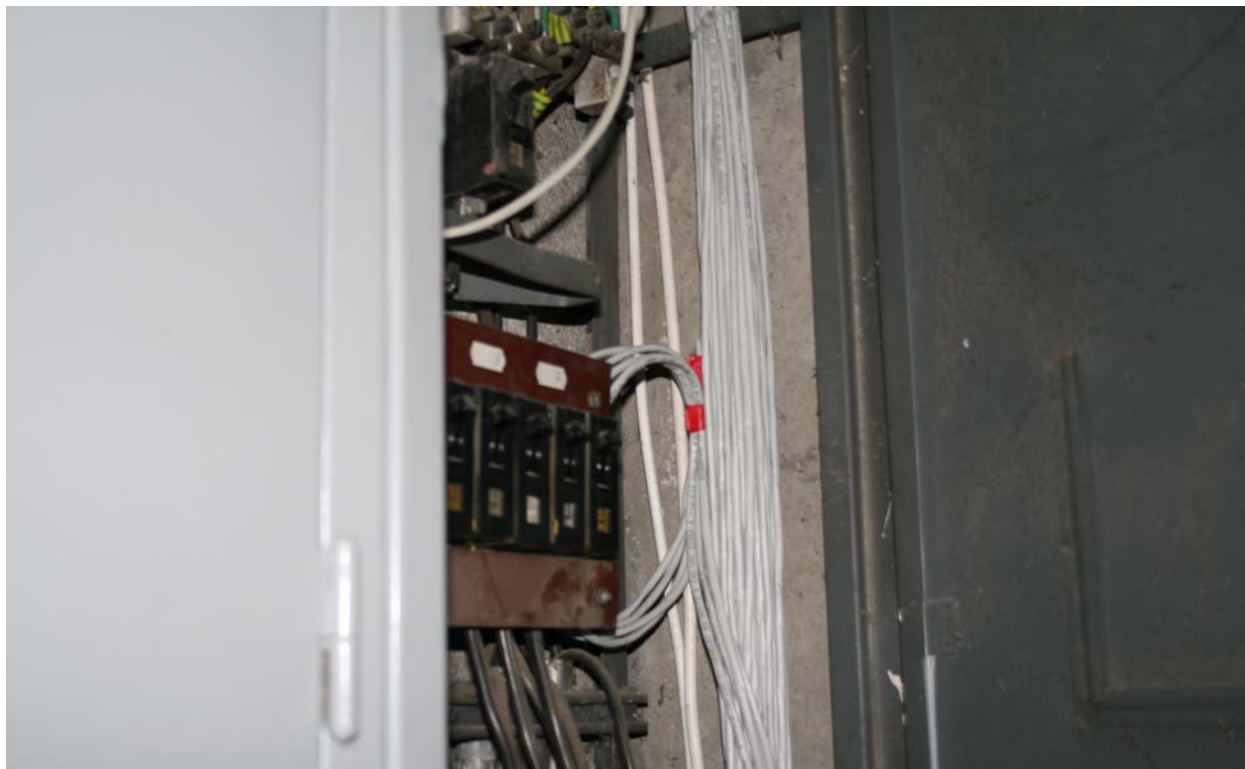
Řešení domovní kabeláže pomocí UTP kabelů je na obr.4. Samotná kabeláž může být realizována přípravou předběžně pouze na patře domu a samotný rozvod do bytu je realizován po přihlášení účastníka ke službě. Výhodou tohoto řešení je, že k účastníkovi je přiveden signál přes standardizované rozhraní s konektorem RJ-45.

3. Postup realizace sítě FTTB v Šumperku

První etapa výstavby sítě byla zahájena v květnu 2006 v lokalitě sídliště ČSA (8.května) Šumperk pro cca 600 domácností. Provoz části sítě vybudované v první etapě byl zahájen v prosinci 2006. Druhá etapa výstavby byla zahájena v lednu 2007. Cílem této etapy bylo vybudovat světlovodný spoj se Zábřehem na Moravě s přenosovou kapacitou 1 Gb/s. Tato etapa byla úspěšně skončena v květnu 2007 zprovozněním optického 1Gb/s propojení obcí Zábřeh-Šumperk-Vikýřovice.

Třetí etapa, jejíž cílem je připojit k síti FTTB 2500 bytových jednotek v Šumperku, byla zahájena v červnu 2007. 200 bytových jednotek by mělo být připojeno do konce října 2007. Předpokládá se, že tato etapa bude ukončena v období prosinec 2007 až březen 2008.

Propojení hlavní stanice sítě (sídlíště severovýchod) s nádražím ČD v Zábřehu bylo realizováno v červenci 2007. Práce na rozšíření stávající lokality ČSA Šumperk směrem k ČSA22 byly zahájeny v červnu 2007. V rámci projektu bylo v roce 2006 - 2007 položeno celkem 8.16 km optických tras. Na síti FTTB bylo provedeno 395 optických svárů a položeno přes 19km kabelů UTP.



Obr.4: Síť realizovaná kabely UCP uvnitř bytových domů připojených k síti FTTB v Šumperku.

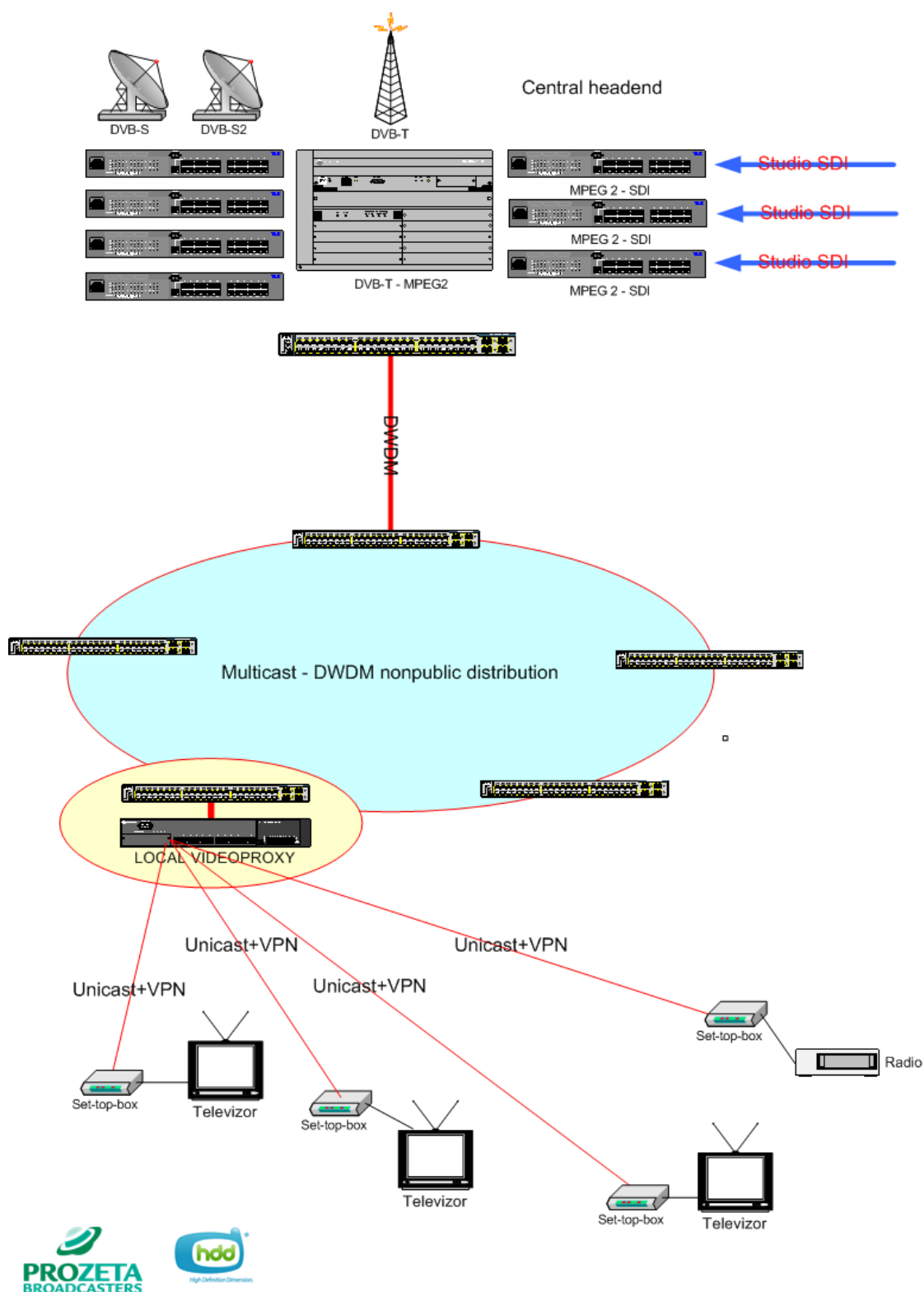
4. Nabízené služby

Jako základní službu nabízí provozovatel symetrické propojení k síti Internet standardně rychlostí od 1 Mb/s (v obou směrech) do 10 Mb/s.

Od května 2007 je vybraným zákazníkům zkušebně nabízena služba QUICKMEDIA IPTV. Služba je založena na distribuci ve formátu MPEG-2 pro SD kanály a MPEG-4/H.264 pro HDTV programy. Na lokální Videoproxy server v Šumperku, který je umístěn v 3.ZŠ, je přiveden zdrojový multicastový paket 35-ti programů, který je dále převeden do formátu unicast. Příslušný program je stále v digitálním formátu (MPEG-2/MPEG-4/H.264) distribuován po zabezpečené privátní lince VPN k set-top-boxům umístěným u klientů. Nyní je však již k jednotlivým set-top-boxům distribuován vždy jeden vybraný kanál, který po autorizaci mezi lokálním Videoproxy a set-top-boxem naváže komunikaci. Set-top-boxy jsou v řešení Společnost Prozeta, spol. s r.o. Praha [2] vybaveny pouze analogovými výstupy. V set-top-boxech tedy dojde k převodu digitálního signálu na analogový signál a ten je následně distribuován do televizorů nebo VGA monitorů. Novější set-top-boxy umožňují i příjem HDTV programů v normě 1080i.

Od 1.11.2007 je plánován u IPTV služby přechod na komerční provoz. Prostřednictvím společností HDD, s.r.o. [3], jenž vznikla v oce 2006 speciálně pro distribuci programů IPTV, a tvůrce technického řešení IPTV společnosti Prozeta, s.r.o. (viz obr.5) je zákazníkům nabízen programový balíček QUICK MEDIA IPTV, který v současné době obsahuje více jak 35 TV programů. Pro rok 2007-8 jsou připraveny další atraktivní námětové programy, tak i nově programy v kvalitě HDTV (1080i).

Od roku 2008 se bude na platformě IPTV zavádět i služba VoD (video na přání) umožňující připojení PC i set-top-boxů. Uvedená služba bude opět realizována pomocí společnosti Prozeta a slovenského partnera Kabelplus [5]. O nasazení služby VoIP nebylo prozatím rozhodnuto.



Obr. 5: Řešení IPTV od společností Prozeta a HDD.

5. Závěry, doporučení a otevřené otázky

- Klesají ceny koncových zařízení. Ceny za výkopové práce a za pokládku kabelů stagnují. Výrazně ale vzrostly náklady na „inženýring“, zejména na získání stavebního povolení a souhlasu společenství vlastníků jednotek v panelových domech k vybudování a provozování vnitřních rozvodů.

- Přivedením signálů v optické podobě alespoň k objektům je nejperspektivnějším řešením přístupových sítí, které umožňuje s vysokou kvalitou a spolehlivostí poskytovat veškeré služby požadované zákazníky v domácnostech i v kancelářích.
- Nasazení technologie FTTB je provozně efektivní a spolehlivé. Od zahájení projektu do září 2007 nebyla ve Městě Šumperk od připojených klientů uplatněna jediná reklamace.
- Všechny nabízené rychlosti připojení k Internetu až po tu zatím nevyšší (10 MB/s) jsou v symetrickém provedení. Konkurenční technologie DSL nebo připojení pomocí kabelových modemů (v sítích kabelová televize) toto řešení na vyšších rychlostech neumožňují.
- Nejžádanější připojení je nyní rychlost 3 Mb/s v obou směrech poskytované v Šumperku za 399,-Kč.
- Kruhová topologie sítě nabízí redundanci, ale může být nahrazena variantou, kdy každý jednotlivý vchod do objektů je připojen vlastním gigabitovým přívodem z centrály. Čistě hvězdicové řešení se v praxi začíná prosazovat více než kruhová topologie.
- Implementace digitální IPTV v režimu „unicast“ (zvolený program je vysílán jednotlivým účastníkům) je výhodná pro hvězdicovou strukturu sítě a při této volbě není potřeba klást extrémní požadavky na domovní přepínače. Při volbě „unicast“ navíc není nutné (u vybraných programů) zajistit šifrování programů, na rozdíl od varianty „multicast“ (stejná programová nabídka je vysílána všem účastníkům), kde tento požadavek je víceméně u většiny programů. Šifrování samozřejmě má dopad do nákladové ceny služby IPTV.
- Úspora lokálního napájení při implementaci optických kabelů s integrovanými měděnými páry nebo položením napájecích kabelů je dále umocněna i možností případné vlastní výroby elektrické energie, tak i jednodušší zálohování celé sítě pomocí UPS.
- Přivedení minimálně dvou UTP kabelů do každého bytu znamená významné možnosti v budoucí nabídce IT služeb.
- Při vlastní výstavbě, kde je více jak 150 optických svárů zvážit vlastní nákup svářečky a zaškolení obsluhy.

6. Odkazy

[1] <http://www.moravanet.cz>

[2] <http://www.prozeta.cz>

[3] <http://www.hddtv.cz>

[4] <http://www.sloane.cz>

[5] <http://www.kabelplus.tv>

Anton Kuchar
 ÚFE AV ČR Praha, v.v.i.
 Chaberská 57
 182 51 Praha 8
 tel.: 266 773 408
 fax.: 284 680 222
 e-mail: kuchar@ufe.cz

Jiří Purš
 AQUA a.s.
 Mukařovská 25
 100 00 Praha 10
 tel.: 274 813 757
 fax.: 274 818 503
 e-mail: aqua@moravanet.c

PŘEHLED NEJAKTUÁLNĚJŠÍCH VĚDECKÝCH PROBLÉMŮ V OBLASTI DISPERZE U MIKROSTRUKTURNÍCH VLÁKEN

Michal Lucki, Jiří Vodrážka, Leoš Boháč

Abstrakt

Článek představuje vybrané aspekty v oblasti mikrostrukturálních vláken, primárně pak nelineární a disperzních vlastností PCF vláken. Výzkum v této oblasti směřuje například k použití nelineárních jevů kvantových struktur u mikrostrukturálních optických prvků budoucích vysokorychlostních přenosových systémů, jako jsou elektromagneticky transparentní nelineární mikrostrukturální přepínače, mikrostrukturální vazební články nebo kompenzátory chromatické disperze na bázi záporné disperze indukované v mikrostrukturálním vlákně ohybem. Tento mechanismus umožňuje teoreticky dosáhnout rekordní záporné disperze (tisíce ps/nm/km) s velkou efektivní plochou vidu bez nutnosti dotace jádra. Přestože možnost použití záporné disperze pro kompenzaci kladné disperze standardních optických vláken je předmětem diskuze (převážně díky ztrátám způsobených ohybem), lze dojít k několika závěrům. U disperze indukované ohybem mikrostrukturálního vlákna je přeladění průběhu záporné disperze v rozsahu desítek nanometrů dosaženo navíjením kompenzačního na cívku s různým průměrem. Provedl jsem studium mechanismu šíření záření PCF vláknem pro různé poloměry ohybu, předpokládanou toleranci odchylek strukturálních parametrů a různé konfigurace mikrostruktur a defektů. Cílem bylo připravit optimální průběh indexu lomu IGPCF vláken, provést studium deformace vidové struktury a vazeb mezi videm LP_{01} a plášťovými vidy ve stavu zřazování, určení optimální konfigurace umožňující dosažení maximální velikosti záporné disperze s výpočtem citlivosti vlákna na změnu poloměru ohybu a nepřesnosti výroby. Přehled mnoha dalších vybraných aktuálních problémů v této oblasti – nelinearit u mikrostrukturálních vláken – bude dále prezentován.

Klíčová slova

Záporná chromatická disperze, ohyb vlákna

1. Rozsah zkoumané problematiky a její aktuální stav

Do nejaktuálnějších témat v oblasti mikrostrukturálních vláken bezesporu patří problematika chromatické disperze, primárně záporné a kompenzace chromatické disperze u optických přenosových tras s jednovidových vláknem dle ITU G.562, kterých je dnes v praxi většina. Nejběžnější je kompenzace kladné disperze telekomunikačního vlákna pomocí speciálně navrženého kompenzačního DCF vlákna, které má velký a především záporný koeficientem chromatické disperze. Toto se většinou dosahuje návrhem jádra o malém průměru s velkým relativním rozdílem indexu lomu (až 2% oproti klasickému vláknem, kde se pohybuje tento parametr v desítkách procenta) a jedním postranním prstecem s větší hodnotou indexu lomu než má bezprostřední okolí jádra.

I když se u úplně prvních DCF vláken dosahovalo záporného koeficientu chromatické disperze několik desítek ps/nm/km na 1550 nm [1], dnešní moderní DCF vlákna mají tento koeficient ve stovkách ps/nm/km.

Existuje řada dalších nedořešených otázek, jako je např. použití technik dosud

známých u klasických vláken pro vlákna mikrostrukturální, vývoj technik nových, kompenzace nejen chromatické disperze, ale i dalších nežádoucích jevů, mezi něž patří výkonové a ohybové ztráty a zkreslení vidového profilu. Kompletní studium této problematiky by mělo vést k získání úplných vidových, disperzních profilů (stanovení závislosti minimální záporné disperze nebo nulové disperze na vlnové délce) na strukturálních parametrech s cílem určit tolerance nepřesnosti výroby; problém ztrát a chromatické disperze u mikrostrukturálních vláken s ohledem na jejich optimalizaci a minimalizaci ztrát, které jsou dány nejen absorpcí látky, ale i samotným mechanismem šíření světla během přenosu. V poslední době bylo prokázáno, že záporná chromatická disperze (CD) může být vytvořena v mikrostrukturálním vlákně jeho ohybem, proto nedílnou součástí studia je zkoumání jeho vlivu na velikost disperze. Tento problém je zvláště důležitý u sítí typu FTTx u nichž se vyžaduje použití vláken, jež z hlediska zachování parametrů musí být velmi odolná proti ohybu v určitém rozsahu vlnových délek. Nelze tedy akceptovat ohybově závislé změny např. disperze nebo útlumu. V rámci simulací byla provedena optimalizace návrhu struktury PCF vlákna tak, aby byl zajištěn minimální útlum při ohybu vlákna pod úhlem menším než o 90° . Jako nejvhodnější se jeví buď použití odrazné látky na místě ohybu a nebo změna charakteru ohybu na tzv. obloukový, který představuje mnohem lepší vlastnosti než třeba ohyb schodovitý.

Mezi nejvýspělejší světové laboratoře, které se zabývají zmíněnou problematikou lze zahrnout: laboratoře Thorlabs i Blaze-Photonics ve Velké Británii, USA, Japonsku, Švédsku, Německu a Crystal-Fibre v Dánsku. Modelování mikrostruktur je předmětem zájmu The Joannopoulos Research Group na Massachusetts Institute of Technology, Photonics and Photonic Materials Group University of Bath, UK (P. Russell, T. Birks, J. Knight); Center for Ultrahigh-bandwidth Devices for Optical Systems (CUDOS), Australia (B. Kuhlmeier, M. de Sterke); Optoelectronics Group, University of California, USA (Prof. E. Yablonovitch); Fiber Optics Group, Wrocław University of Technology (W. Urbanczyk); Institute of the Research in Optical Communications and Microcavities, France (S. Février, J. Auguste, J. Blondy, F. Gerome) nebo Research Center COM, Technical University Denmark (A. Bjarklev, K. Hansen, J. Jensen, J. Folkenberg, N. Mortensen, M. Nielsen).

2. Metodika řešení zkoumaných problémů

Běžně používané simulační metody, jako je např. FDTD nebo plně vektorová FDFD umožňují provést komplexní studium mikrostrukturálních vláken, včetně analýzy jejich nelineárních vlastností, které lze s výhodou využít u mikrostrukturálních prvků budoucích vysokorychlostních přenosových, ale i spojovacích systémů, jako jsou např. směrovače, prepínače, kompenzátory nebo regenerátory optických signálů. Zmíněné simulační metody jsou implementovány ve většině komerčně dostupných simulačních programů (např. Mode Solver, Lumerical Inc.). Tyto nástroje umožňují stanovit konstantu šíření optické vlny a následně i hodnoty efektivního skupinového indexu lomu a jeho derivaci vzhledem k vlnové délce záření (z níž lze vypočítat disperzi).

Největším problémem je, že proces optimalizace struktury PCF vlákna se v mnoha případech provádí metodou pokus-omyl, což ve složitějších případech vede k velké časově náročnosti.

Například, u DCF vláken (Dispersion Compensating Fiber) může být cílem optimalizace nalezení největší záporné chromatické disperze při požadované vlnové délce. Následně se potom zkoumají fluktuace této hodnoty při neměnné vlnové

délce, ale při odchylkách strukturálních parametrů s cílem stanovit citlivost na tyto změny. Ve skutečnosti se jedná o volbu hodnot vlnových rozsahů, velikosti mikrostruktur, jejich konfiguraci, zkoumání vlivu defektů vzniklých nepřesnostmi výroby, volbu konstanty mříže, způsob a stupeň dotování jádra a jeho rozměry, rozložení vidů, optimalizace jednovidového režimu přenosu a korekci pole vidu. V neposlední řadě je významné srovnání stupně citlivosti různých parametrů na danou odchylku ve struktuře vlákna. Při reálné výrobě je nutné přizpůsobit technologii tak, aby byly primárně dodrženy ty strukturální parametry na nichž jsou sledované přenosové parametry nejsilněji závislé – nejvíce citlivé. Tyto parametry jsou pak testovány u polotovaru, ostatní parametry, které jsou na stejnou odchylku méně citlivé jsou aktualizovány a realizovány jako poslední v pořadí [2].

Kromě analýz, které mají bezprostřední vztah k reálným aplikacím, existuje mnoho dalších, typicky vědeckých problémů, jako je např. zkoumání vazby základního vidu do plášťových vidů nebo zvětšení efektivní plochy vidu v důsledku vzniku supervidu, atp. Studium tohoto typu se sice nejeví účelné pro konkrétní aplikace, nicméně umožňuje ozřejmit mnoho fyzikálních jevů, které byly zkoumány právě metodou pokus-omyl, protože nebyl doposud znám jejich mechanismus vzniku. Tento typ studia problému však nezřídka vede k závěrům, které mají velice málo společného s možností praktického použití, např., v poslední době mnoho světových laboratoří soutěžilo o docílení největší hodnoty záporné disperze, aniž by tyto hodnoty byly vůbec prakticky nutné, a to bez ohledu na omezení, které znemožňují rozumné využití těchto výsledků v praxi. Nedílnou součástí analýz by měl být proto komplexní výzkum daného jevu i z hlediska změn na parametry ostatní, jako je např. velikost ztrát optického výkonu nebo korekce tvaru pole vidu. Výzkum by měl být prováděn vždy s ohledem na možné budoucí aplikace – nejlépe v několika oborech.

3. Přehled aktuálních výsledků a problémů v oblasti disperze u mikrostrukturálních vláken

U tradičních DCF vláken s velkým relativním rozdílem indexu lomu lze dosáhnout záporného koeficientu chromatické disperzi řádu stovek ps/nm/km při 1550 nm [1] a u vláken s koncentricky uspořádanými jádry až -1800 ps/nm/km [3].

Kombinace techniky koncentrických jader a mikrostrukturálních vláken byla nadějná, bylo ale prokázáno, že jejich výroba je mnohem náročnější než se původně předpokládalo. Vytvoření struktury koncentrických jader u PCF vlákna vyžaduje, aby určitý prstec mikrostruktur byl vyroben s mnohem menšími rozměry než ostatní. Dále bylo prokázáno, že hodnota a pozice maxima záporné disperze je velice citlivá na přesnost při výrobě malých mikrostruktur [2]. Jedním s možných řešení je úplné odstranění těchto mikrostruktur, avšak za cenu nutného dotování jádra. Záporná CD u PCF vlákna s mikrostrukturami eliptického tvaru představuje hodnoty řádu několika ps/nm/km, nicméně ve zcela širokém vlnovém rozsahu pásem S, C, a L [4].

V poslední době bylo prokázáno, že záporná chromatická disperze (CD) může vzniknout v mikrostrukturálním PCF vlákně jeho ohybem [5]. Ohyb vlákna může být dostatečně popsán pomocí ekvivalentního profilu indexu lomu. Výhodou je, že zde navrhovaná metoda nevyžaduje dopování v jádře. Největší dosažená hodnota záporné CD byla přes -185000 ps/nm/km ve třetím přenosovém okně. Plocha základního vidu byla 700 μm^2 , několiknásobně větší než u klasických kompenzačních vláken. Zásadním problémem byla příprava disperzních charakteristik analyzované struktury v závislosti na velikosti ohybu a zhodnocení výsledků s ohledem na možnost výroby a použití v telekomunikační technice. Záporná CD a vlnová délka

s minimální CD je velmi citlivá na odchylky ve velikosti mikrostruktur, zejména v oblasti vysoké koncentrace propagačních stavů. Vyplyvá to z faktu, že záporná CD se vyskytuje v úzkém rozsahu vlnových délek. Pozice špičky záporné CD byla též velmi citlivá na deviaci hodnoty poloměru ohybu vlákna, pro který byla stanovena jistá negativní odchylka (menší poloměr ohybu neboli větší křivost). Zvětšení velikosti mikrostruktur anebo poloměru ohybu vede k posunutí minimální CD ke kratším vlnovým délkám. Přestože možnost aplikace záporné CD pro kompenzaci disperze skupinové rychlosti vysokorychlostních přenosových systémů je diskutabilní (z důvodu nároku na přesnost výroby a značných ztrát), je možno učinit závěr o vlivu ohybu způsobeného navíjením vlákna na cívku na spektrální charakteristiky vlákna. Existuje potenciální možnost ladění vlnové délky odpovídající nulové disperzi nebo minimální záporné disperzi navíjením DCF vlákna na disk pro přesné určení poloměru navíjení.

Aktuální publikace o tomto problému ukazují na shodu výsledků obdržených různými simulačními metodami (disperzní profily kuplujících modů, Olszewski *et al*, 2007). Záporná chromatická disperze vzniklá ohybem u klasického DCF vlákna byla naměřená v roce 2007 (Fevrier *et al*, 2007). Pokud je u klasického DCF vlákna s koncentrickými jádry opticky výkon přenášen v LP₀₂ vidu v externím jádře, u mikrostrukturních vláken bude tento výkon rozptýlen na mikrostrukturách. Gerome *et al* (2006) navrhl ladění pracovní vlnové délky klasických DCF vláken makroohybem v průběhu navíjení vlákna na cívku. Koeficient záporné CD byl -1800 ps/nm/km. V tomto směru mikrostrukturní vlákna nabízejí zápornou disperzi i desetkrát větší (-185000 ps/nm/km (2007)), a navíc s velkou plochou vidu nejen díky správné volbě poloměru ohybu, ale též díky optimalizací velikosti a rozmístění mikrostruktur. Největší dosažené záporné hodnoty koeficientu CD byly publikovány Yangem (-50000 ps/nm/km u klasického PCF vlákna a -590000 ps/nm/km u mikrostrukturního vlákna s koncentrickou konfigurací jader, Yang *et al*, 2006 [2]).

Podle [6] navíjení na cívku o průměru 3,3 cm umožňuje ladění pracovní vlnové délky v rozsahu 40 nm. Pokud navijeme DCF vlákno na cívku, musíme počítat s tím, že minimální záporná CD se mírně posune směrem ke kratším vlnovým délkám. (Pro vysvětlení, minimální záporná chromatická disperze je pro případ, když rozdíl mezi efektivními indexy lomu obou koncentrických jader je nulový). Posun minima záleží hlavně na hodnotě poloměru ohybu (je úměrná $1/R$, kde R je poloměrem ohybu). V případě PCF vláken to ale může znamenat zmenšení minimální hodnoty disperze, která odpovídá je svázána z unikátní kombinací velikosti mikrostruktur a poloměru ohybu.

Ohnuté vlákno ve skutečnosti vede dva supervidy, působením ohybu se energie záření v případě klasických vláken začne přelévat z LP₀₁ vidu do LP₀₂ vidu a nebo do množiny plášťových vidů (u PCF vláken) vzhledem k tomu, že vytvoření jednoho LP₀₂ vidu není možné kvůli rozptylování na mikrostrukturách. Gerome *et al* prokázali, že LP₀₁ je charakterizován zápornou CD a LP₀₂ – kladnou. Zdánlivě vznik záporné disperze úzce souvisí s vazbou obou vidů, nicméně unikátní vlastnosti LP₀₁ zůstávají v platnosti i pro případ, kdy by byl excitován pouze jeden LP₀₁ vid, hovoříme tedy spíše o fyzikálních podmínkách, za kterých oba vidy mohou vzniknout než o vazbě obou vidů [7]. V případě, kdy je excitován pouze LP₀₁ vid, špička kladné disperze se nevyskytuje a špička záporné disperze bude posunuta do oblasti delších vlnových délek.

Největší přelévání energie vzniká při shodě rychlosti šíření vln v jednotlivých videch, dále tomu odpovídají kmity na průběhu charakteristiky ztrát základního vidu. V teoretických analýzách se často předpokládalo zjednodušení, že mikrostruktury

jsou rozmístěny v prostoru do nekonečna, což je daleko od reality a vede k nepřesným výsledkům. Donesedávna se často předpokládalo, že ztráty způsobené ohybem jsou úměrné $1/R$ a $1/\lambda$. Celkový průběh ztrát je sice rostoucí, ale ne monotónně. Lepší model předpokládá konečný region s mikrostrukturami, který navazuje na křemíkový plášť [8]. Z posledních publikací vyplývá, že charakter těchto ztrát je spíše kmitavý [9]. Příčinu kmitavého charakteru ztrát je třeba hledat u přelévání energie ze základního vidu do množiny plášťových vidů (nebo vidů v externích jádrech), kde je světlo rozptýleno na mikrostrukturách anebo vyzářeno ven ze struktury vlákna.

Mechanismus ohybu byl předmětem mnoha dalších odborných publikací. Model ohybu ve tvaru oblouku se jeví nejméně ztrátovým – transmitance přes 98,5% (ve srovnání s ohybem eliptickým) [10]. Starší řešení předpokládalo pouhé odstranění určitých mikrostruktur, které budou v rozích ohybu [11]. Dále bylo prokázáno, že za určitých podmínek [12] se cívka s vláknem může chovat jako citlivý interferometr, pokud dojde k přelévání energie s jednoho úseku do jiného úseku téhož vlákna na místě, které zaručuje, že obě vlny jsou v protifázi.

Řešením, které se momentálně jeví jako nejvíce optimální je návrh struktury vlákna, u něhož běžný ohyb nezpůsobí změnu spektrálních či disperzních charakteristik vlákna či zkreslení vidového tvaru vedené vlny. Tsuchida et al [13] vypracovali návrh vlákna, které na vlnových délkách běžně používaných v telekomunikacích zaručuje dostatečnou toleranci na úhel vyzařování (parametr cut-off wavelength a ztráty) v závislosti na změně poloměru ohybu v rozsahu, který odpovídá podmínkám v kancelářském prostředí.

Brzká budoucnost je spojena s problémem kompenzace disperze s použitím mikrostrukturálních vláken, s problémem redukce (anebo aspoň kompenzace) ztrát způsobených ohybem, analýzou přelévání energie mezi základním videm a vidy vyššího řádu, jako důsledek ohybu. Kontrola tohoto procesu může přinést možnost přepínání energie mezi jádry správně zvoleným ohybem vlákna, čili umožnilo by to vytvoření transparentního optického prepínače. K tomu je nutno vyřešit problém vidového zkreslení a agregovat optický výkon, který se rozptyluje na mikrostrukturách.

Tento příspěvek byl prezentován za podpory projektu GA102/07/1503.

4. Literatura

- [1] A. Antos and D. Smith: Design and characterization of dispersion compensating fiber based on the LP₀₁ mode, *J. Lightw. Technol.*, Vol. 12, no. 10, pp. 1739–1745, 1994
- [2] S. Yang, Y. Zhang, X. Peng, Y. Lu, S. Xie, J. Li, W. Chen, Z. Jiang, J. Peng, H. Li: Theoretical study and experimental production of high negative dispersion photonic crystal fiber with large area mode field, *Opt. Express* 3015, Vol. 14, No. 7, 2006
- [3] Auguste et al *Opt. Fib. Technol.* 8, 2002
- [4] S. Kim, U. C. Paek. and K. Oh: New defect design in index guiding holey fiber for uniform birefringence and negative flat dispersion over a wide spectral range, *Opt. Express* 6039, Vol. 13, No. 16, 2005
- [5] M. Lucki, L. Bohac, J. Burcik: Chosen aspects of negative dispersion generation in index guiding photonic crystal fibers, In *Photonic Crystal Fibers*. Bellingham, WA: The International Society for Optical Engineering, Proc. SPIE Vol. 6588, 65880W, 2007

- [6] S. Fevrier, J.-L. Auguste, J.-M. Blondy, A. Peyrilloux, P. Roy, D. Pagnoux: Accurate tuning of the highly-negative chromatic dispersion wavelength into a dual concentric core fibre by macro-bending, *Fibers and waveguide components* P1.8, 2007
- [7] F. Gerome, J. Auguste, J. Maury, J. Blondy, and J. Marcou: Theoretical and Experimental Analysis of a Chromatic Dispersion Compensating Module Using a Dual Concentric Core Fiber, *J. Lightwave Technol.* Vol. 24, No.1, 2006
- [8] D. Marcuse: influence of the curvature on the losses of doubly clad fibers, *Appl. Opt.* 21, 4208-4213, 1982
- [9] J. Olszewski, M. Szpulak, W. Urbanczyk: Effect of coupling between fundamental and cladding modes on bending losses in photonic crystal fibers, *Opt. Express* 6015, Vol. 13, No. 16, 2005
- [10] Y. Zhang and B. Li: Photonic crystal-based bending waveguides for optical interconnections, *Opt. Express* 5723, Vol. 14, No. 12, 2006
- [11] A. Talneau, L. L. Gouezigou, N. Bouadma, M. Kafesaki, C. M. Soukoulis, and M. Agio: Photonic-crystal ultrashort bends with improved transmission and low reflection at 1.55 μm , *Appl. Phys. Lett.* 80, 547-549, 2002
- [12] M. Sumetsky, Y. Dulashko, A. Hale, Fabrication and study of bent and coiled free silica nanowires: Self-coupling microloop optical interferometer, *Opt. Exp.* 3521, vol. 12, No. 15, 2004
- [13] Y. Tsuchida, K. Saitoh, M. Koshiba, Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses, *Opt. Exp.* 4770, vol. 13, No.12, 2005

Michal Lucki
Jiří Vodrážka
Leoš Boháč
ČVUT v Praze
Katedra telekom. techniky FEL
Technická 2
166 27 Praha 6
tel: 224 35 5994
fax: 267 310 503
e-mail: luckim1@fel.cvut.cz

FTTX IN EUROPE – TRENDS, OPPORTUNITIES CHALLENGES

Andrea Magnago

Executive summary

One can observe a substantial growth in FTTx across Europe, some countries leading the way, others sitting back and waiting. Sweden has been an early adopter in this field since the end of the 90's building considerable experience and a number of very interesting cases that are known worldwide. This session will present some of these innovative and successful FTTx case studies such as Malarenergi and Wienstrom but also take a look at what is happening in other countries in Europe. One unique FTTH case in the Netherlands achieved penetration rates of over 80% for triple play in a city already served by ADSL and CATV. How have they done that? But connecting homes and buildings with fibre is just the first step. There are some challenges and question marks that need to be addressed in order to build a successful business case.

Key words

FTTx, FTTH, FTTB, fibre, triple play, PacketFront, OPEX, CAPEX, control and provisioning, BECS, automation, service differentiation, ASR's (access switching routers), DRG, Service Selection Portal, open access, business models, internet centric services.

1 Broadband network opportunities and challenges

The majority of broadband network operators and network owners share the same challenges and opportunities associated with broadband deployment, regardless of access technology used. Among DSL, CATV, FTTx and wireless network owners, the challenges and the opportunities are primarily business-related, rather than technical. Typical and important areas of consideration are:

How to increase revenue:

- Increase service-take-rate and average revenue per user (ARPU) on existing customer base
- Attract new customers through more and enhanced services
- Minimize churn

How to control costs:

- Minimize operational expenditures (OPEX)
- Minimize capital expenditures (CAPEX)

Other business-related challenges:

- Choice of business model: retail, wholesale or a combination of these
 - o Open or closed access network

Building a viable business case for broadband deployment is largely a question of automation and of service differentiation. Automation as a means of controlling the costs, including network operation and provisioning of services is crucial for profitability. This is an area where PacketFront has unique expertise. The automated broadband solution from PacketFront has been built with one clear objective – to allow advanced IP technology to facilitate a profitable broadband deployment.

1.1 Challenge – Emerging internet-centric services

Several heavyweight Internet players have recently launched Internet-centric alternatives to fixed voice traffic, and in some cases they have even introduced individual distribution of audio/video content. This development poses important challenges for access network operators. The players, such as AOL, Google and iTunes, are using the Internet to distribute their services, and have started to invest heavily into the platforms needed to begin delivery of voice-over-IP (VoIP), video-on-demand (VoD) and IP-television (IPTV).

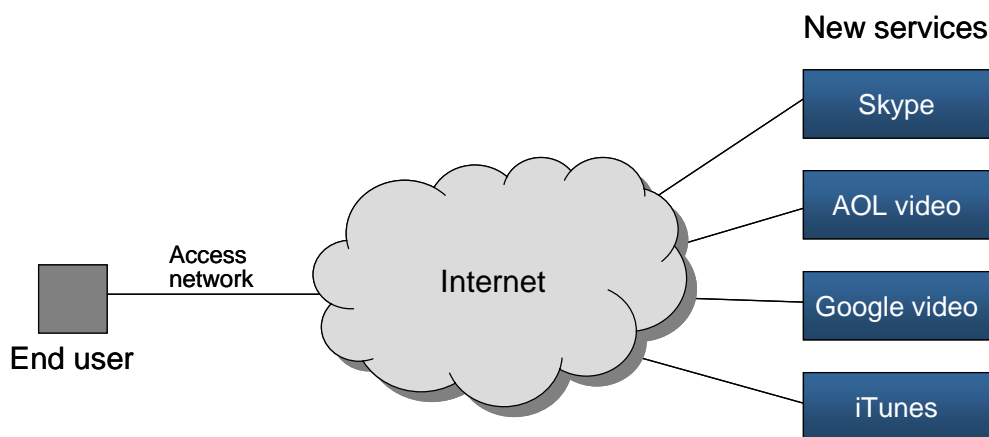


Fig. 1: Internet-centric providers.

Such services have undoubtedly been designed to keep network operators out of the future revenue stream! Some of these players are associated with large owners of attractive content (such as motion pictures), and there is thus a real risk that these players will be able to obtain a large share of the financial return that traditional network operators have aimed at by investing in delivery mechanisms for video.

One key question here is how long network operators will be willing to accept that a largely unrestricted amount of value-added Internet traffic passes through their access networks at flat-rate pricing. One solution is to filter out traffic from certain service providers, another solution is to introduce metered access, in which end users pay for certain services or for traffic volumes that exceed a certain monthly level. Filtering out traffic, however, is certainly not a recommended solution, because it will be difficult to retain a customer base that has previously enjoyed unlimited bandwidth.

An alternative, and preferable, way forward is to find incentives for the providers of the services to join forces with the network operators, sharing competence and resources to deploy a model from which both parties benefit. End users will also benefit, since they will be able to take advantage of higher quality, higher availability and security, and a wider range of services.

1.2 Challenge – How to increase revenues?

One of the top priorities for all broadband operators today is to increase the total service revenue. The focus is on how to increase the customer base and how to increase the average revenue per user (ARPU).

Selling more to the existing customer base or selling to new customers. Avoiding customers buying from the competitors (reducing churn). These are all ways of increasing revenue. Extending the variety of services offered broadens the service

portfolio, and tends to make each broadband consumer spend more on broadband services. In other words the service-take-rate is increased. With more services to choose from, end users' total consumption of services from the broadband connection tends to rise. And, with more services to choose from, the chances of attracting new customer groups increase too, as the greater variety of services satisfies the needs of a broader section of the population, both demographically and geographically.

So how does the PacketFront solution lead to service innovation, service differentiation and enhanced quality of existing services? PacketFront's solution is designed to manage services – not connections or ports on a broadband router. PacketFront's solution is designed to treat each single service offered by each service provider separately.

Ease of use is another key feature if end users are to increase their broadband consumption. Through the Service Selection Portal (SSP), end users can self-provision any service of their choice – in real time. No waiting at the customer support desks. And the self-provisioning is done either from a PC or from the TV.

A network owner and/or a service provider must address the following areas, in order to maximize revenue:

- Service differentiation
- Pricing and packaging strategies
- Ease of use
- Services on demand
- Security

1.2.1 Differentiated data and Internet services

PacketFront's automated broadband solution offers a number of features that are crucial for service creation and deployment, and management of data and Internet services in broadband networks. By being able to set parameters like a) QoS, b) security, c) bandwidth, and d) priority on a per service basis, the flexibility of managing each service is unlimited and the total bandwidth to the home premises can be utilized more efficient. Services are easily defined in BECS, and the capability mentioned above makes service differentiation an easy task, as well as the introduction of new services.

The parameters can be limited for each service type. For example, this makes it possible to assign different bandwidths to each end-user client. A PC with Internet access can be allowed 2 Mbit/s, while an IP-based digital TV service can run at 8 Mbit/s on the same access line.

Finally, since one end user is able to subscribe to many different services, he/she can have different bandwidths for the same end-user PC depending on the destination (also known as "destination-based services"). In the example below (Figure 2), the PC can be assigned to an ASP service with a fileserver for data storage. This service allows the PC to use 10 Mbit/s – with the 2 Mbit/s Internet access limit still in place.

1.2.2 Differentiated IPTV and video services

As in above chapter discussing differentiated data and Internet services, PacketFront's broadband solution offers immense flexibility in giving individual treatment to services such as IPTV and Video-On-Demand. The network manages access to content, presenting the option of allowing end users to order, cancel or

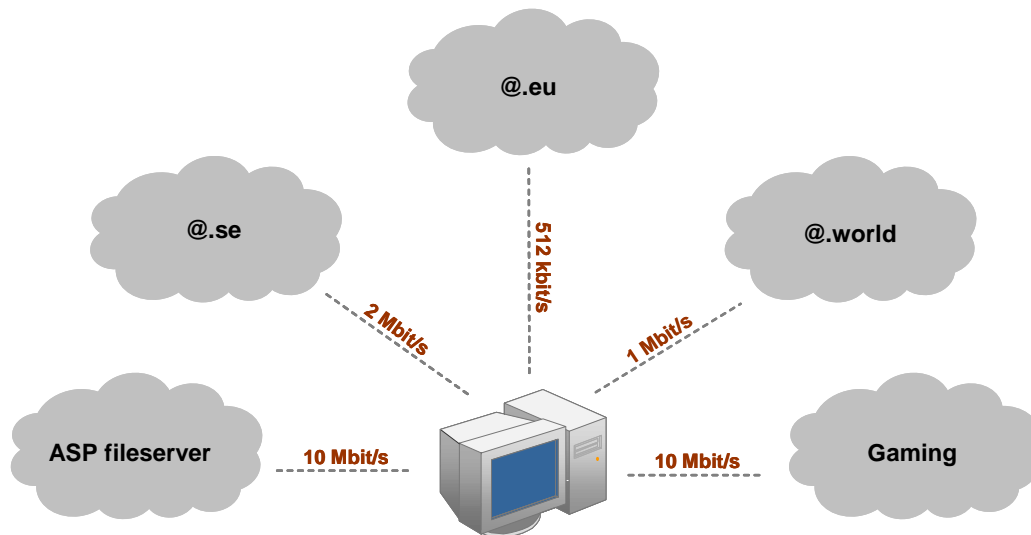


Fig. 2: Multiple Services with different service parameters. The solution allows an end user to receive different bandwidths (and different pricing) for different Internet services, depending on the destination.

change their channel subscription themselves. Through the Service Selection Portal (SSP), the end users can select the TV channels of their choice. The TV channel will then be provisioned and activated automatically via the access unit (ASR). Costs are minimal, even when customers select individual channels or pay-per-view. This opens up the opportunity to offer channels “à-la-carte” instead of bundling channels or mixing the two models.

1.3 Challenge – How to control costs?

The typical high-risk costs in a broadband business case occur in two areas: predicting the operational costs (OPEX), and managing the system costs (CAPEX). The following operational costs are hard to predict:

- The amount of man-hours spent on network upgrades – how many system engineers are required?
- The number of times end users will contact the customer support centre, and the time spent on troubleshooting different faults.
- The estimated time needed for provisioning a service upgrade from 1 Mbps to 10 Mbps, or for adding another TV channel, for one end user.
- The number of man-hours spent on changing the configuration setting for a service with 10,000's end users.

The list above can be extended with over a hundred detailed operational questions that all have an impact on the business case of running a complex triple-play network.

1.4 Low operating costs and automation

Operating costs are hard to predict, and are unfortunately often underestimated, reducing profitability for network owners. When designing the automated broadband solution, PacketFront has focused on automating tasks that, by nature, are repetitive and consume large amounts of man-hours. Automating these tasks will dramatically lower operating costs.

Automated key functions:

- Dynamic configuration changes
- Software verification and upgrades
- Provisioning of new services
- Provisioning of service changes
- Mass deployment
- End user self-registration
- End user service selection

PacketFront's broadband solution provides automated configuration of network elements. BECS stores all configurations and manages all configuration changes in the network. Managing multiple services, combined with many thousands of end users, usually requires a lot of manual input. Thanks to BECS, PacketFront's solution manages multiple services in an automated manner, and the manual work required is reduced to an absolute minimum.

Mass deployment of network elements is facilitated through automation. Installation of the ASRs does not require high-cost network engineers; you simply connect the fiber, and the ASR will automatically receive the correct software version and configuration files upon connecting to the network. The same procedure applies in the case of replacing a unit.

Self-registration and self-provisioning are also supported by means of automation. End users can subscribe to a service, and obtain immediate access to it without any manual interaction, avoiding a wait at the customer support help desk.

1.5 Low capital investment – out-of-the-box solution

One of the most underestimated challenges in a CAPEX budget for broadband operations is the system side. It is not only complex but also very costly. It is common for provisioning/OSS/BSS projects to run heavily over budget due to an endless need for upgrades and changes. This often results in a conglomerate of different software systems, often from different vendors. Dependences between the systems are usually created with continuous upgrades and costly integration work as a result. As presented below (Figure 3) a key objective for PacketFront is to develop a more complete and pre-integrated solution that works "out-of-the-box". This reduces the cost dramatically, and reduces the time to become operational from several quarters, or even years, to less than one week.

2 PacketFront solution overview

The majority of broadband network operators and network owners share the same challenges and opportunities associated with broadband deployment, regardless of access technology used. Among DSL, CATV, FTTH and wireless network owners, the challenges and the opportunities are primarily business-related, rather than technical. Typical and important areas of consideration are:

How to increase revenue:

- Increase service-take-rate and average revenue per user (ARPU) on existing customer base
- Attract new customers through more and enhanced services
- Minimize churn

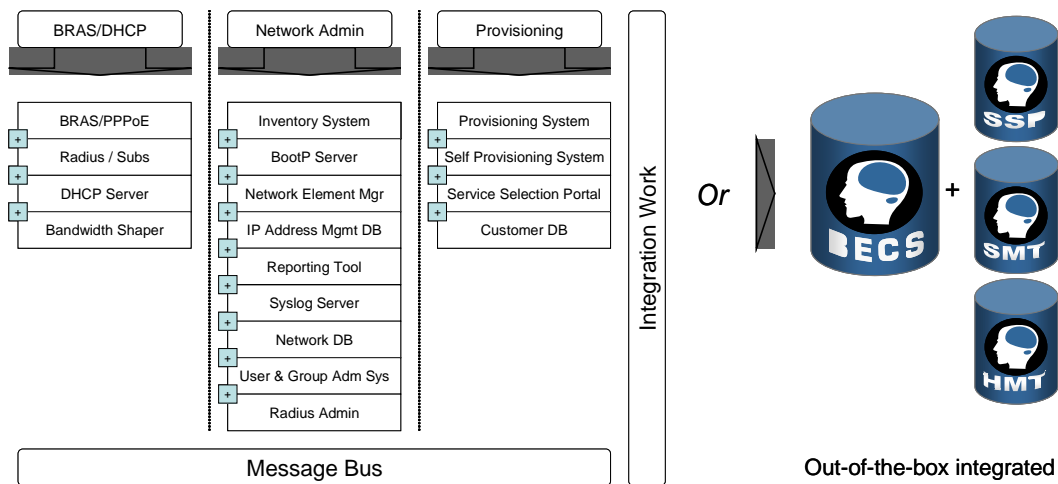


Fig. 3: Common systems for network automation, control and provisioning compared to an all-in-one solution.

How to control costs:

- Minimize operational expenditures (OPEX)
- Minimize capital expenditures (CAPEX)

Other business-related challenges:

- Choice of business model: retail, wholesale or a combination of these
 - o Open or closed access network
 - o Different models for the funding and ownership of network infrastructures, passive and active.

Building a viable business case for broadband deployment is largely a question of automation and of service differentiation. Automation as a means of controlling the costs, including network operation and provisioning of services, is crucial for profitability. This is an area where PacketFront has unique expertise. The automated broadband solution from PacketFront has been built with one clear objective – to allow advanced IP technology to facilitate a profitable broadband deployment.

Automation is one cornerstone of PacketFront's broadband solution, and service differentiation and business model flexibility are others. Business model flexibility is vital to support separated ownership of network infrastructure from service provisioning. In other words, flexibility in the choice of business model, and hence the separated ownership, is an enabler of an open-access environment. In such networks (open-access networks) services are offered from third-party service providers and distributed over a shared broadband infrastructure. This is becoming more and more common as organizations like utilities, municipalities and property owners start to deploy broadband networks, but it is also attracting CATV operators and telecom operators.

2.1 The automated broadband solution

PacketFront's fully automated broadband solution consists of two core product families:

Network automation, control and provisioning software:

- BECS™, Control and Provisioning System
- SMT, Subscriber Management Tool
- HMT, Helpdesk Management Tool
- SSP, Service Selection Portal

FTTH & FFTB access and Triple Play CPE's:

- ASR 4000 series of Advanced Services Router for FTTH access. ASR 4000 comes in hardened version for installation in non-controlled environments. ASR 4000 features the iBOS software.
- ASR 5000 series of Advanced Services Router for high-capacity FTTH access, and cost-efficient aggregation of low- bandwidth access technologies such as WiFi, WiMAX, etc. ASR 5000 is intended for central office installations. ASR 5000 features the iBOS software.
- The DRG's series of CPE's are dissigned to support triple play and are fully managed and integrated with BECS.

2.2 BECS™ - Automation and Control

Automation in controlling the network and in the provisioning of services is the key to profitability. PacketFront has developed a series of software products, all of which perform different tasks based on the importance of automation. Furthermore, all software platforms come pre-integrated and fully supported, minimizing the need for manual work.

BECS – Automation, control and provisioning system

BECS is a unique and centralized control and provisioning system for automation of resource-demanding tasks in the network. Its key functions are:

- Authentication and authorization of users, clients and services
- Policy decision for service access and control
- Service policy provisioning, on demand or scheduled
- Element management, including automated software control and upgrades
- Network awareness for end-to-end service quality control
- IP address management and advanced DHCP server functions
- Providing network statistics (e.g. for Service Level Agreements (SLA), troubleshooting, billing, or other strategically important purposes)
- Providing a Mediation Point for integration with external third-party OSS/BSS systems as well as towards PacketFront systems (SMT, HMT, SSP)

SMT, Subscriber Management Tool – Controlling the subscribers

SMT is a subscriber management tool that further automates the network tasks. Its key functions are:

- Maintaining a database of all households, users, clients and services
- Managing end user's "periods of notice" when changing or deactivating services
- Logging service usage, activation and de-activation
- Providing hacker and abuse traceability from the logging records
- Providing functionality for suspension and resumption of end users

HMT, Helpdesk Management Tool – Fast troubleshooting

HMT is designed to reduce the resolution time at the service provider's customer support helpdesk, and to equip the helpdesk with advanced troubleshooting tools. Its key functions are:

- Providing helpdesk applications for service providers
- Ensuring visibility of key network information, including the service's status at the end user's premises
- Providing case/end user log with interaction towards BECS and SMT

SSP, Service Selection Portal – Services on demand

SSP is an end-user portal that allows self-provisioning of services in real time. Through the easy-to-use interface, service consumption tends to increase, while lowering the cost of service provisioning. Its key functions include:

- Attractive and user-friendly interface designed for both PC and TV, an example of which is illustrated in the next page (Figure 4)
- The option to select, activate, change or de-activate services in real time from PC or TV
- Selection of services from multiple service providers
- On-demand, automated provisioning of the services

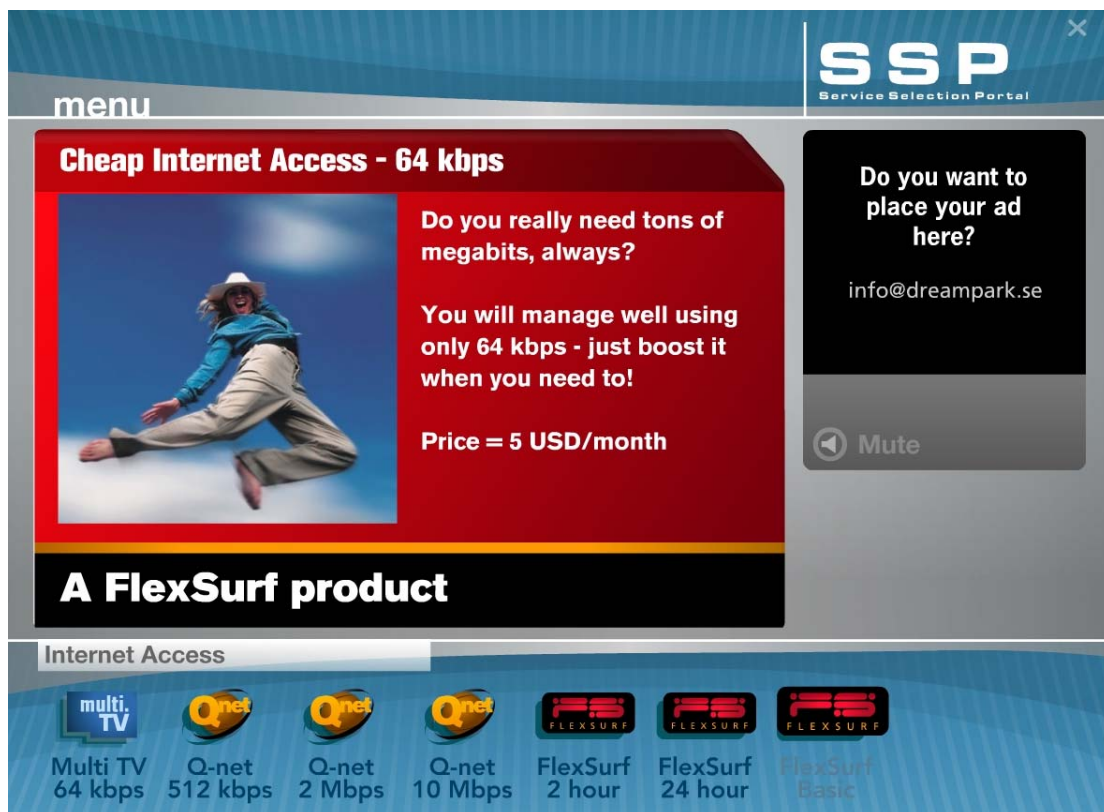


Fig. 4: Example of the Service Portal layout.

2.3 FTTH Advance Services Router

2.3.1 ASR 4000 & 5000 Series Access Products

The Advanced Services Routers (ASR) are the policy enforcement points in the network. Depending on the network topology required and the nature of end-user needs, the location of the ASR is flexible. The network builder decides whether to place it close to, or far from, the end users. The ASRs are controlled by BECS, and all software updates and configuration profiles are automatically provisioned and supervised through this connection.

ASR 4000 & 5000 family

The ASR 4000 family is purpose-built for point-to-point FTTH and FFTB access.

- Up to 24 fast Ethernet end-user ports and 2 Gigabit Ethernet uplinks
- Support for multiple fiber types: multi mode (MM), single mode (SM), single mode Bi-directional and 10/100 TX
- Hardened version for non-controlled environments
- Policy enforcement point for BECS decisions
- Fully automated by BECS
- BECS-controlled software upgrades and configuration changes
- Redundant and field-replaceable external power supplies (AC)



Fig. 5: ASR 4000 & 5000.

2.4 Customer premises equipment – DRG Series

On the customer premises side, PacketFront offers a combined and integrated solution which includes different CPE components and a Fibre Termination Unit.

The DRG 580 is a triple-play home gateway that provides up to 1 Gbps WAN access, 4 or 8 LAN ports with 100 Mbps, and 2 telephone lines. The DRG series is designed for residential customers, small offices and medium size businesses wishing to take advantage of multiple LAN ports and high through-put. The Fibre Termination Unit (FTU) is built to be integrated with the DRG, which is made possible by a snap in construction on the Fibre Termination Unit as shown below in figure 5. The FTU protects fibre and connectors from damage in the household and eliminating the need for patch cables.



Fig. 6: DRG and Fibre Termination Unit.

3 International FTTx case studies

3.1 Wienstrom (Austria)

Customer description

Wien Energie Wienstrom is a multi utility company with over 100 years of history serving some 230'000 customers and with about 3'000 employees – www.wienstrom.at

Wien Energie is Austria's largest regional energy and related services provider. As a provider of energy services, Wien Energie supplies electricity, natural gas and district heating to more than 2 million people and 230,000 businesses in greater Vienna. Wien Energie has recently launched its FTTH operations and will during the next two years connect 50.000 households in Vienna to the open access network that it calls "blizznet". The network will provide triple play services to the residential household in Vienna, and will allow external service providers to hook into the FTTH network and deliver services.

Network size

Following a long evaluation period of about 1 year the initial roll out has begun replacing about 1'000 customers equipped with a solution from a different vendor. The intention is to reach 5'000 homes passed by September 2007 and to reach its first major milestone of 50'000 homes passed by Q1 2009.

After a long evaluation and a competitive tender, PacketFront was awarded the contract for the access network devices and the control and provisioning system. In addition to the automation benefits PacketFront was also chosen because of its media flexibility (copper, MMF, SMF supported), ease of use and competitive pricing

Solution details

PacketFront is delivering the BECS™ control and provisioning system, the ASR 4000 range of Advanced Services Routers, and the DRG family of customer premises equipment. Siemens is integrating and installing the PacketFront solutions with the rest of the network equipment.

3.2 Nuenen (Netherlands)

Customer description

Onsnet Nuenen is a cooperative owned by the residents of Nuenen to provide fiber access to each residence. Various service providers share this fiber plant to offer services to the Nuenen residents. – www.onsnetnuenen.nl

Network

The network comprises FTTH for practically the entire town of Nuenen, some 7,500 residences. The town of Nuenen is situated close to the city of Eindhoven. During the first year of operation, when residents were entitled to subscribe for free, a take-up rate of about 95% was achieved. At the end of the initial year, when services were charged for, approximately 80% of the subscribers were still willing to pay for the service, in an areas already served by the PTT and CATV provider.

Solution details

The Onsnet Nuenen project was one of the first FTTH projects in the Netherlands, pioneering the concepts of universal coverage, open access and the “triple-play” of voice, internet and video. Currently, one service provider is used for the Voice and Data (Internet) services and a second one provides analog CATV radio and TV channels. Trials have also been run for IPTV and Video on Demand using the QoS features of the PacketFront network elements.

VolkerWessel, one of the largest construction companies in the Netherlands installs and manages the network via PacketFront’s BECS™ control and provisioning system. ASR 4624 Single Mode Single Fibre routers are deployed within the network and subscribers gain access via a DRG with both CATV and FTU modules installed.

3.3 DU (Dubai)

Customer description

EITC, operating under the brand name “du”, is the licensed second operator for the United Arab Emirates, and provides TV, Internet and both fixed and mobile telephony services to its subscribers. It serves many new residential projects and is the ISP for the Dubai Internet City free trade zone, where it operates one of the largest VOIP systems in the world. – www.du.ae

Network size

The network is large (>50,000 customers and expected to double in the coming months). It serves a large number of new developments in the UAE, including the Palm Island, International City and Jumeirah Beach Residence developments.

Solution details

The network is primarily new-build FTTH of various sorts – with Cat5 cabling used in some apartment blocks, as well as a few ADSL2+ connections serving older buildings such as a shopping mall. EITC provides a full triple-play service to all its subscribers and, critically, is the only source of “cable” TV, landline telephony or Internet access for most of them. As a result, the reliability of the FTTH network is key for reasons of both safety and customer satisfaction.

3.4 MalarEnergi (Sweden)

Customer description

Mälarenergi is a modern multi-utility company fully-owned by the Västerås municipality. Mälarenergi Stadsnät, its broadband subsidiary, provides broadband connectivity for 30,000 households and 2,000 businesses. Mälarenergi Stadsnät employs 16 full-time employees. www.malarenergi.se/stadsnat

MalarEnergi has built the most advance Open Access FTTH network in Europe given the number of services and service providers it counts today.

Network size

The network currently passes some 30,000 homes and approximately 2,000 businesses. In the next couple of years this is expected to expand to around 50,000 premises in total. Approximately 65% of the premises passed have taken advantage of one or more of the 105 different service offerings supplied by 30 different providers. The service providers include the former national operator TeliaSonera which offers Internet access over the network.

Solution details

The network is primarily new-build FTTH of various sorts, including Cat5 cabling in some apartment blocks, as well as a few ADSL2+ connections serving some more distant locations. In the future, WiMAX may be used for some locations. The network.

4 Conclusion

PacketFront's automated broadband solution is designed for the cost-efficient delivery of triple-play services in triple play FTTx networks. Control of the services is the key to high revenue. This control may be the difference between success and failure in a business case. An intelligent solution able to support different business models, such as open access, as well as being able to treat each service individually can help the operator face the business challenges related Internet-centric services.

5 Sources

PacketFront Sweden

Andrea Magnago
Senior Account Manager
PacketFront Sweden
Isafjordsgatan 35
164 40 Kista
Sweden
tel: +46 870 982 24
fax: +46 870 982 01
e-mail: Andrea@packetfront.com

KÓNICKY ZÚŽENÁ OPTICKÁ VLÁKNA

Tomáš Martan, Jiří Kaňka, Ondřej Podrazký, Ivan Kašík, Vlastimil Matějec

Anotace

Příspěvek se zabývá kónicky zúženými jednovidovými optickými vlákny a zúženými mikrostrukturními optickými vlákny. Byla navržena zúžená mikrostrukturní optická vlákna ve formě opto-vláknové součástky s vysokým nelineárním koeficientem pro generaci superkontinua v telekomunikačním pásmu 1550 nm. Byly provedeny technologické experimenty pro přípravu zúžených optických vláken na zkonstruovaném univerzálním, počítačem řízeném, zařízení. Pomocí zkonstruované-ho zařízení pro zužování optických vláken byly též vyrobeny špičky na jednovidových optických vláknech sloužící jako sondy pro měření pH.

Klíčová slova

Jednovidové optické vlákno, mikrostrukturní optické vlákno, zúžené optické vlákno, generace superkontinua, vláknová sonda.

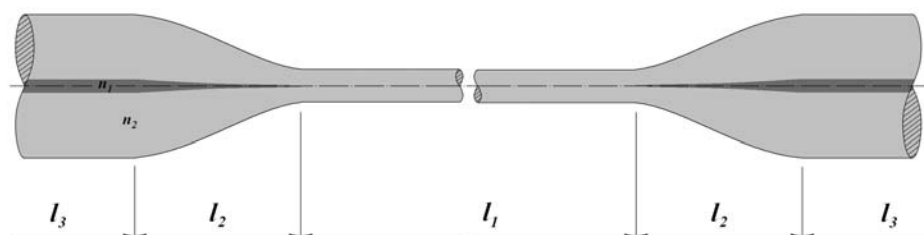
1. Úvod

Mnoho optických vláknových komponent je založeno na kónicky zúžených optických vláknech OFT (Optical Fiber Tapers). OFT mohou být použity například pro směrové vazební členy, pro tvarování stopy pole optického svazku, v nelineární optice, ale také jako chemické nebo bio-chemické senzory.

OFT sestává z úzkého pasu l_1 a ze dvou kónických přechodů l_2 , které navazují na původní nezúžené optické vlákno l_3 , viz obrázek 1. OFT se vyrábějí různými způsoby podle konkrétní aplikace, například leptáním nebo tvářením vlákna zahřátého plamenem, CO₂ laserem či elektrickým obloukem.

Cílem práce bylo navrhnout OFT na mikrostrukturních optických vláknech a provést technologické experimenty pro přípravu takových OFT pomocí univerzálního zařízení. Dalším dílčím cílem bylo na univerzálním zařízení připravit zúžená jednovidová optická vlákna pro vláknové sondy.

Před samotnými technologickými experimenty bylo tedy nutné navrhnout vhodnou konečnou příčnou strukturu pasu OFT, ale také zkonstruovat zařízení pro jejich přípravu. Další úlohou technologických experimentů byla optimalizace kónických přechodů tak, aby byly minimalizovány vložné ztráty OFT.



Obr. 1: Podélná struktura zúženého jednovidového optického vlákna.

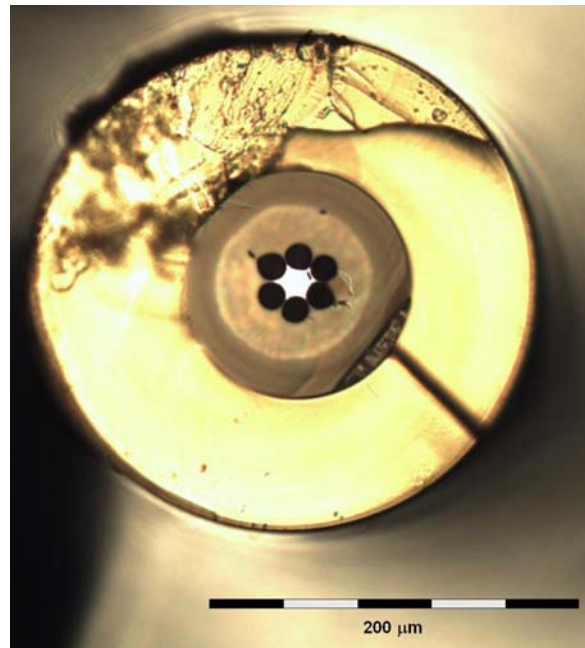
2. Návrh zúženého mikrostrukturního optického vlákna

Pro modelování a přípravu OFT jsme použili mikrostrukturní optické vlákno, jehož mikroskopická fotografie je na obrázku 2. Mikrostrukturní optické vlákno bylo vyrobeno v oddělení technologie optických vláken ÚFE AV ČR, v.v.i. Podrobnější informace o vyráběných mikrostrukturních (fotonických) optických vláknech a jejich vlastnostech jsou uvedeny v [1].

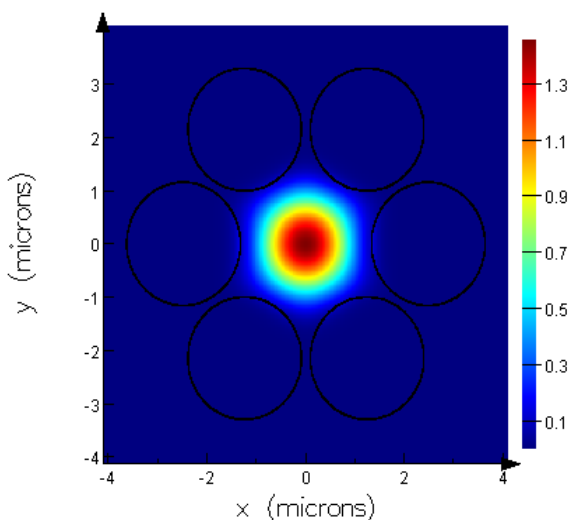
Model zúženého mikrostrukturního optického vlákna z čistého křemene

Modelování šíření vidů jádrem OFT bylo nejprve provedeno pro mikrostrukturní optické vlákno z čistého křemene. Původní struktura nezúženého mikrostrukturního vlákna s primární a sekundární ochranou je na obrázku 2. Plášť tohoto mikrostrukturního optického vlákna má hexagonální uspořádání vzduchových otvorů o průměru 14,5 μm a středovou roztečí sousedních otvorů 15,6 μm . Vnější průměr pláště tohoto vlákna je 125 μm .

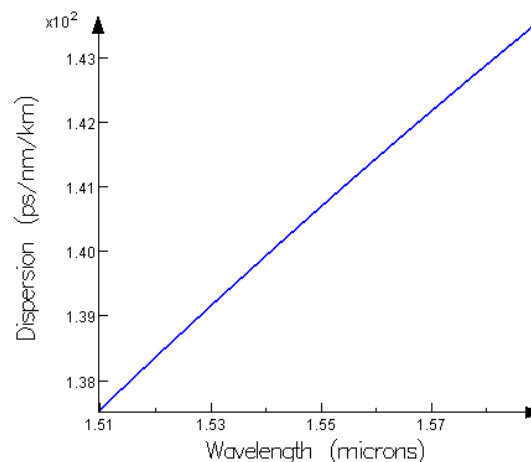
Pas zúženého optického vlákna byl navržen s vnějším průměrem 20 μm , takže otvory v hexagonálním uspořádání pláště měly průměr 3,3 μm a jejich středová rozteč byla 2,48 μm . Efektivní index lomu vedeného vidu ($\lambda = 1550 \text{ nm}$) a vidová plocha byly vypočteny $n_{\text{eff}} = 1.39703$ a $A_{\text{eff}} = 4.19 \mu\text{m}^2$. Pro tuto strukturu je nelineární koeficient $\gamma = 21,5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (SiO_2) a koeficient



Obr. 2: Příčná struktura mikrostrukturního optického vlákna před zúžením včetně primární a sekundární ochrany.



Obr. 3: Rozložení intenzity elektrického pole pro vedený vid v pasu zúženého optického vlákna.



Obr. 4: Vypočtená disperzní charakteristika zúženého vlákna.

útlumu $\alpha = 0.0371$ dB/cm. Rozložení intenzity elektrického pole pro vedený vid pasem OFT je na obrázku 3. Z obrázku 3 je patrné, že je světlo dobře lokalizované v jádru podél celého pasu vlákna dlouhého 50 mm. Vypočtená disperzní charakteristika pro toto OFT je na obrázku 4. Hodnota nelineárního koeficientu γ pro vlnovou délku 1550 nm je relativně vysoká, protože hodnoty přibližně $20 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ jsou typické pro pásmo viditelných vlnových délek. Avšak pro navržené OFT délky 50 mm nebyl nelineární koeficient dostatečně vysoký. Pro dosažení vyšších hodnot nelineárního koeficientu při zachování stejné struktury zúženého vlákna je možné využít na místo čistého křemene vlastností olovnatých skel.

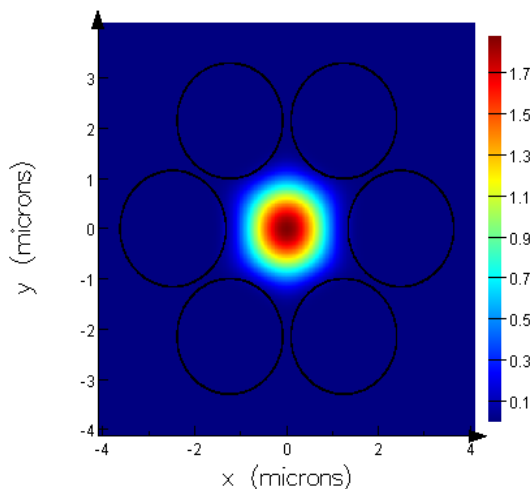
Model zúženého mikrostrukturního optického vlákna z olovnatého skla

Pro zvýšení hodnoty nelineárního koeficientu γ byla navržena stejná struktura OFT, avšak z olovnatého skla „Shott glass SF57“. Pro vlnovou délku 1550 nm jsou parametry vlákna: efektivní index lomu $n_{\text{eff}} = 1.44364$, efektivní vidová plocha $A_{\text{eff}} = 6.28 \mu\text{m}^2$, koeficient útlumu $\alpha = 0.000304$ dB/cm a nelineární koeficient $\gamma = 453.5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. Index lomu skla „Shott glass SF57“ je $n = 1.8$ ($\lambda = 1550$ nm) a nelineární index lomu $n_2 = 4.1 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$. Rozložení intenzity elektrického pole pro vedený vid pasem OFT je na obrázku 5. V tomto případě je světlo dobře lokalizované v jádru podobně jako v předchozím případě struktury vlákna z čistého křemene. Vypočtená disperzní charakteristika pro toto OFT je na obrázku 6.

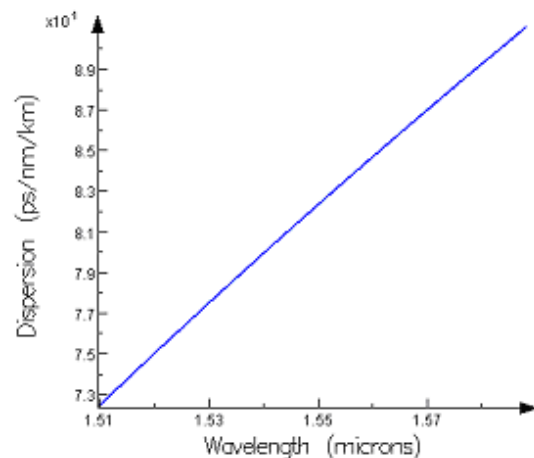
Nelineární koeficient zúženého mikrostrukturního optického vlákna připraveného z olovnatého skla „Shott glass SF57“ je přibližně 21x vyšší než koeficient γ vlákna z čistého křemene. Proto je vlákno z olovnatého skla vhodnější pro generaci superkontinua.

3. Simulace generace superkontinua

Generace superkontinua v pásmu 1550 nm byla modelována ve zúženém mikrostrukturním optickém vlákně z olovnatého skla „Shott glass SF57“ o délce pasu 50 mm. Simulace generace superkontinua byla provedena na základě numerického řešení nelineární Schrödingerovy rovnice (NLSE). NLSE byla řešena pseudo-spektrální Fourierovou metodou dělení kroků (SSFM).



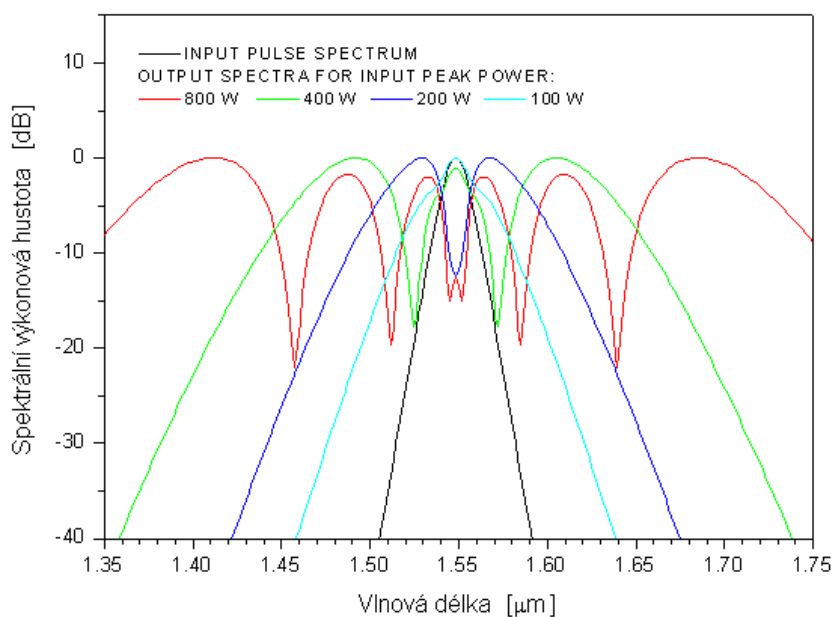
Obr. 5: Rozložení intenzity elektrického pole pro vedený vid v pasu zúženého optického vlákna.



Obr. 6: Vypočtená disperzní charakteristika zúženého vlákna.

Ve zúženém mikrostrukturním optickém vláknu z olovnatého skla je spektrum rozšiřováno nelineárním fázovým posunem, který je způsoben vlastní modulací fáze. Simulace spektrálního rozšiřování indukovaného pomocí vlastní modulací fáze závislé na špičkovém výkonu vstupních pulsů je na obrázku 7.

Simulace demonstruje, že se spektrum pikosekundových optických pulsů postupně rozšiřuje se zvyšujícím se špičkovým výkonem vstupních pulsů generovaných na vlnové délce 1550 nm v oblasti anomální disperze. Pro špičkový výkon vstupních pulsů měnící se od 100 W do 800 W dochází k rozšiřování spektra přes pásma C (1530 nm – 1565 nm), přes pásma S (1460 nm – 1530 nm) a L (1565 nm – 1625 nm) a dále přes pásma E (1360 nm – 1460 nm), U (1625 nm – 1675 nm) a dále.

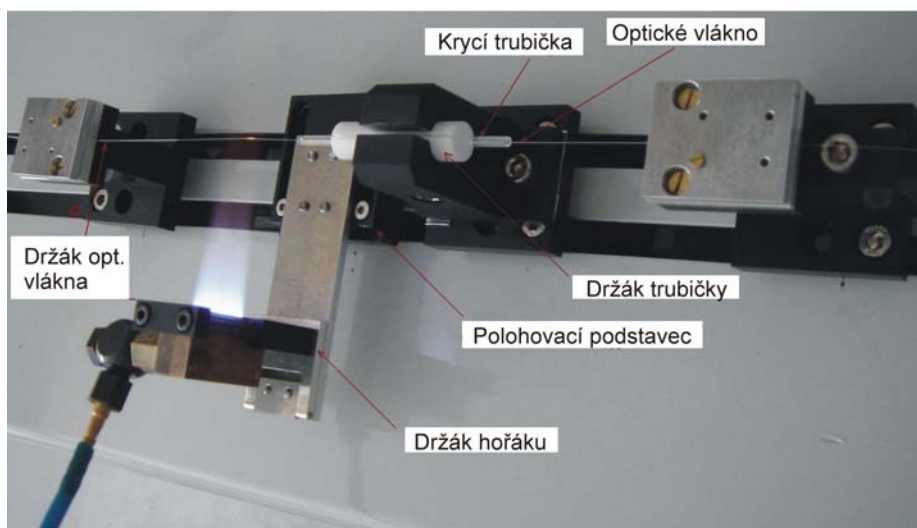


Obr. 7: Závislost spektrální výkonové hustoty na vlnové délce pro optické pulsy se zvyšujícím se špičkovým výkonem od 100 do 800 W.

3. Zařízení pro přípravu zúžených optických vláken

Pro přípravu OFT je možné použít různé metody. V případě přípravy zúženého mikrostrukturního vlákna pro generaci superkontinua o délce pasu 50 mm bylo vhodné tvářet optické vlákno plamenem. Pro ohřev vlákna na cca 1800 °C byl zvolen plyn propan-butan a kyslík. Princip zužování optických vláken byl založen na tažení konců krátkého úseku (obvykle desítky cm) optického vlákna opačnými směry, zatímco jeho středová část byla zahřívána plamenem.

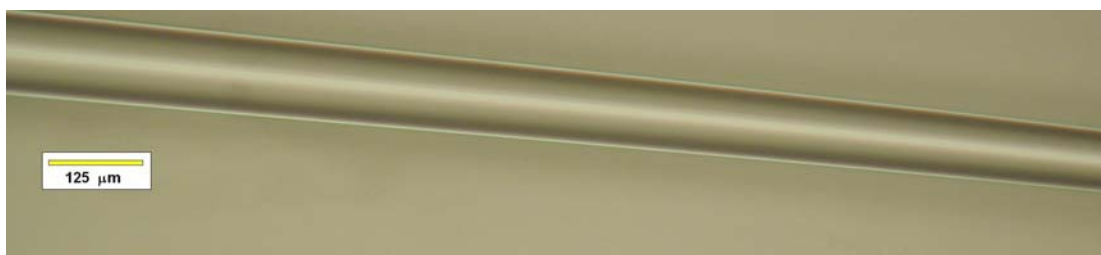
Bylo navrženo a zkonstruováno počítačem řízené zařízení umožňující reprodukovatelnou přípravu OFT s programovým řízením jeho parametrů (přesný tvar a délka OFT). Podrobnější popis zařízení pro přípravu OFT je uveden v [2] až [4]. Na obrázku 8 je fotografie mechanické části zařízení pro přípravu OFT. Do držáků optického vlákna je optické vlákno upevněno a během procesu tažení vlákna se tyto držáky pohybují od sebe. Mezi držáky optického vlákna se pohybuje plynový hořák, který nahřívá definovanou oblast vlákna. Po ukončení procesu tažení je OFT chráněno připravenou krycí trubičkou.



Obr. 8: Fotografie mechanické části zařízení pro přípravu zúžených optických vláken.

4. Příprava kónicky zúžených optických vláken

Na zkonstruovaném zařízení byla vytvořena technologie pro přípravu OFT. Technologické pokusy byly nejprve prováděny na konvenčních jednovidových vláknech Corning SMF28e. Na obrázku 9 je fotografie přechodové oblasti OFT. Na tomto obrázku je patrná vynikající podélná homogenita přechodové oblasti zúženého jednovidového optického vlákna.



Obr. 9: Mikroskopická fotografie přechodové oblasti zúženého jednovidového optického vlákna.

Při prvních desítkách technologických experimentů byly vložné ztráty OFT vysoké, např. 20 dB, ale postupně se technologie propracovávala a vložné ztráty zúžených vláken klesaly. K poklesu vložných ztrát přispěla zejména optimalizace tvaru a délky přechodových oblastí OFT. Nejprve byly experimenty soustředěny na minimalizaci vložných ztrát u kratších vzorků s tím, že po dosažení optimálních parametrů byla délka OFT zvětšována. Technologii přípravy OFT se podařilo zvládnout natolik, že bylo připraveno např. OFT s vložnými ztrátami 0,17 dB na vlnové délce 1550 nm. Toto OFT mělo parametry: délka pasu 36 mm, průměr pasu 17 μm , délka přechodových oblastí 10 mm. Vložné ztráty byly měřeny cut-back metodou. Minimální velikost vložných ztrát je tedy zachována při tzv. adiabatickém tvaru přechodů zúženého optického vlákna.

V dalších technologických experimentech byla šířka pasu zmenšována a délka pasu byla zvětšována společně s přechodovými oblastmi zúženého vlákna. Na obrázku 10 je mikroskopická fotografie úseku pasu zúženého jednovidového vlákna jehož průměr je 8 μm a délka pasu byla 40 mm a délka přechodových oblastí byla 41 mm. Celková délka OFT byla 122 mm.



Obr. 10: Mikroskopická fotografie podélné struktury pasu zúženého jednobodového vlákna s průměrem 8 μm .

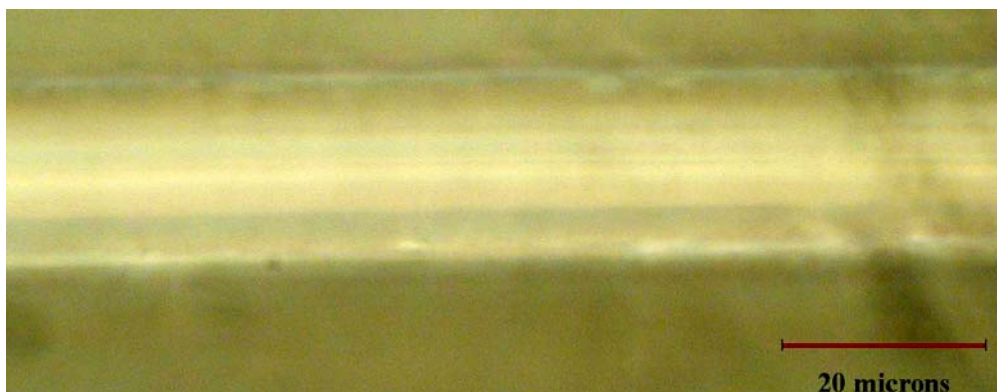
Zúžená mikrostrukturální optická vlákna

Po úspěšném vytvoření technologie přípravy zúžených jednovidových optických vláken byla další etapa technologických experimentů zaměřena na zúžená mikrostrukturální optická vlákna. V tomto případě bylo nutné zúžit mikrostrukturální vlákno tak, aby při procesu tažení nedocházelo ke kolapsu axiálních otvorů v plášťové oblasti vlákna. Úlohou tedy bylo dosáhnout konstantního tlaku v axiálních otvorech, aby byla celá struktura optického vlákna zmenšena v daném poměru.

Tuto etapu technologických experimentů se podařilo také úspěšně zvládnout. Axiální otvory zachovávaly svůj tvar po celé délce OFT, takže nedocházelo k jejich kolapsu ani rozšiřování a vnitřní struktura vlákna byla homogenní. Mikroskopická fotografie části pasu zúženého mikrostrukturálního vlákna je na obrázku 11. Vnější průměr zúženého mikrostrukturálního vlákna je 20 μm . Z obrázku M je patrné, že axiální otvory zachovávají svůj tvar.

5. Zúžené optické vlákno jako sonda pro měření pH

Zalamovaná OFT mohou také sloužit jako vláknové sondy s vysokým prostorovým rozlišením pro měření pH v roztocích, ale také v buňkách a v mezibuněčném prostoru organismů. Pro výrobu OFT jsme nejprve použili PCS (Plastic Clad Silica) optické vlákno s průměrem jádra 210 μm a vnějším průměrem 250 μm , které bylo postupně leptáno pro dosažení požadovaného kónusu. Tato metoda však byla nevyhovující, neboť je použitelná pouze pro leptání PCS vlákna, kdy je po odstranění pláště vlákna leptáno pouze křemenné jádro vlákna. Metodu tedy nelze použít pro zužování jednovidových optických vláken. V důsledku naleptání se také snižuje mechanická odolnost takto připravených kónicky zúžených optických vláken.



Obr.11: Podélná struktura pasu zúženého mikrostrukturálního optického vlákna.

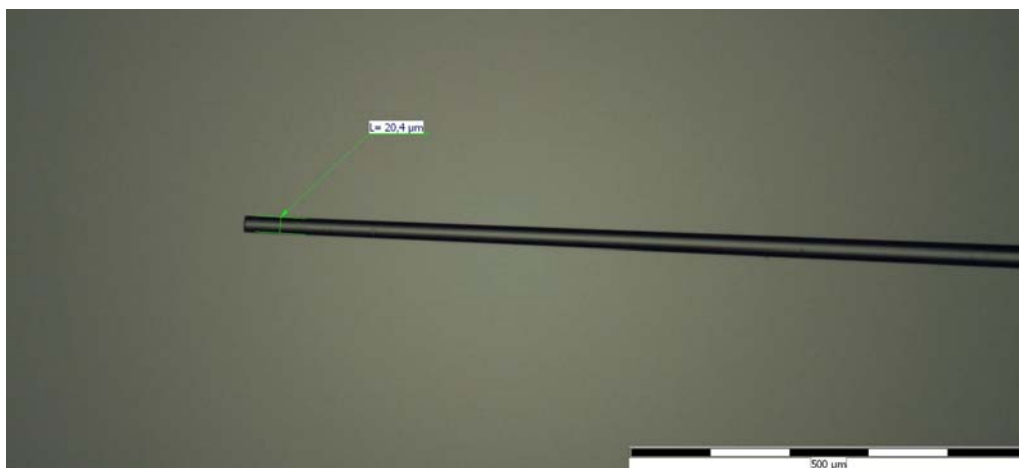
V tomto případě se ukázala vhodná metoda založená na zužování jednovidového optického vlákna pomocí zařízení zkonstruovaného v ÚFE AV ČR, v.v.i. Vlákňové sondy byly připravovány programově řízeným tažením konců optického vlákna, jehož středová oblast byla zahřívána plamenem. OTF byla touto metodou vyráběna z jednovidového optického vlákna s průměrem jádra 3 μm a vnějším průměrem 125 μm , které bylo připraveno v oddělení technologie optických vláken ÚFE AV ČR, v.v.i.

Byla vyrobena OFT s průměrem pasu od 20 μm až po 3 μm , viz obrázky 12, 13 a 14. Na všech fotografiích je patrná vynikající podélná homogenita pasu zúženého optického vlákna. Fotografie jsou pořízeny na mikroskopu Olympus BX-51. Tvar kónických přechodů OFT s uvedenými průměry pasů (špiček) byl optimalizován za účelem minimalizace vložných ztrát. Pro zamezení křehnutí vláknových sond byly pasy (špičky) a přechodové oblasti zúžených vláken pokoveny vrstvou oxidu india a cínu (ITO) o tloušťce 200 nm, viz obrázky 12, 13 a 14. Tak bylo dosaženo potřebné ochrany OFT a zároveň byl zpevněn jejich povrch, což umožňuje lepší manipulaci při měření pH v rostlinných a živočišných buňkách.

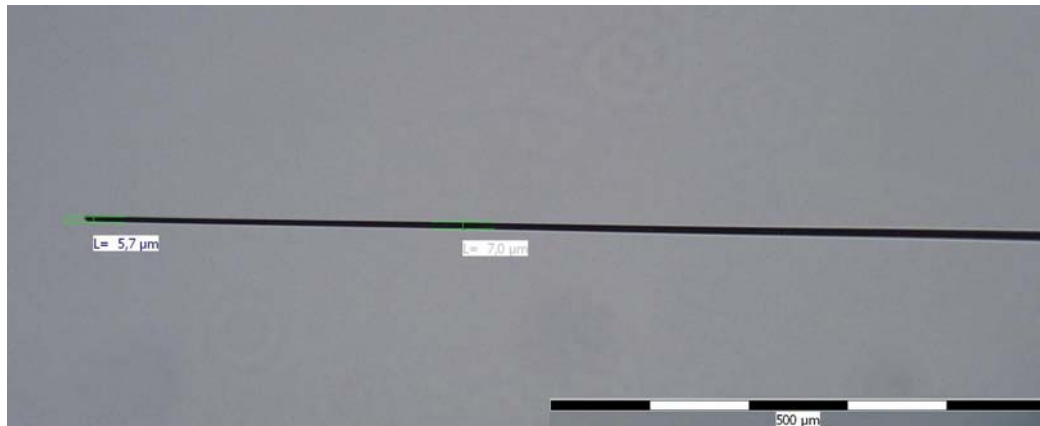
Měření pH je založeno na měření fluorescence (posuvu maxim fluorescence) pH převodníků (např. fluoresceinu, karboxyfluoresceinu), které jsou imobilizovány na špičce vláknové sondy. U takto připravených vláknových sond se předpokládá vysoké prostorové rozlišení. Sondy lokálně měřící pH tak bude možné použít pro detekci toku auxinů skrze buněčnou membránu, viz [5].

6. Závěr

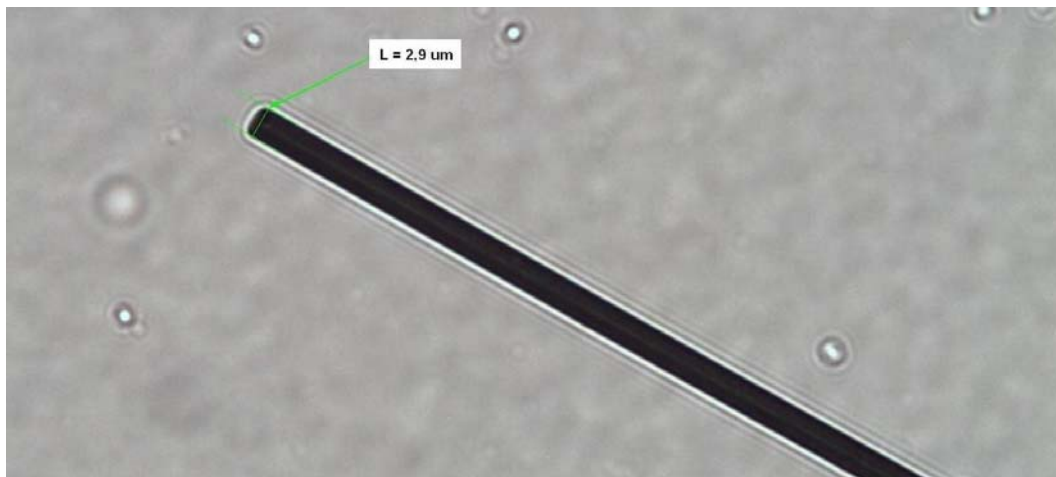
Za účelem generace superkontinua bylo navrženo zúžené mikrostrukturální optické vlákno s hexagonálním uspořádáním axiálních vzduchových otvorů v plášti vlákna. Zúžené mikrostrukturální vlákno bylo navrženo z čistého křemene a pro zvýšení nelineárního koeficientu bylo vlákno navrženo z olovnatého skla. V navrženém zúženém optickém vláknu o délce pasu 50 mm byla simulována generace superkontinua. Superkontinuu bylo simulováno na základě numerického řešení nelineární Schrödingerovy rovnice užitím Fourierovy metody dělených kroků. Při zvyšujícím se výkonu vstupních optických pulsů od 100 W do 800 W došlo k rozšiřování spektra pulsů na základě vlastní modulace fáze v pásmu C přes pásmo



Obr. 12. Mikroskopická fotografie podélné struktury zalomeného pasu (špičky) zúženého vlákna o tloušťce 20 μm vytvořeného z jednovidového optického vlákna 3/125. Zvětšeno 10x.



Obr. 13: Podélná struktura zalomeného pasu (špičky) zúženého vlákna o tloušťce 6 μm vytvořené z jednovláknového optického vlákna 3/125. Zvětšeno 10x.



Obr. 14: Podélná struktura zalomeného pasu (špičky) zúženého vlákna o tloušťce 3 μm vytvořené z jednovláknového optického vlákna 3/125. Zvětšeno 100x.

S a L k pásmu E a pásmu U. Superkontinua generovaného v pásmu 1550 nm je možné využít v telekomunikacích jako multi-frekvenční zdroj pro WDM systémy, pro konvertory vlnových délek, optické signálové regenerátory.

Bylo navrženo a zkonstruováno počítačem řízené univerzální zařízení pro přípravu zúžených optických vláken. Na tomto zařízení byla postupně vypracována technologie přípravy zúžených jednovláknových optických vláken a zúžených mikrostrukturálních optických vláknec. Pro minimalizaci vložných ztrát zúžených optických vláken byl nalezen tzv. adiabatický tvar přechodu. Připravená zúžená optická vlákna byla vložena do krycí trubičky, která sloužila jako ochrana zúženého vlákna před vnikem OH iontů.

Pomocí univerzálního zařízení byly též vyrobeny vláknové špičky, na jejichž povrch byla nanášena vrstva ITO. Tyto pokovené vláknové špičky na jednovláknových optických vláknec slouží jako sondy pro měření pH.

7. Poděkování

Výzkum byl podporován Grantovou agenturou České republiky, grant č. 102/05/0995 a grantem LC 06034 s názvem „Regulace morfogeneze rostlinných buněk a orgánů“ (REMOROST), jehož poskytovatelem je Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

8. Přehled literatury

- [1] Kaňka, J., Honzátko, P., Matějec, V. Kašík, I., Martan, T. Mikrostrukturní optická vlákna. In: *Optické komunikace O.K. 2002*. Praha, Tech-Market 2002, p. 41-50.
- [2] Martan, T. Generation of Supercontinuum in Nonlinear Microstructure Optical Fibre [doctoral thesis], Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, 2006
- [3] Martan, T., Novotný, K., Honzátko, P., Kaňka, J. Apparatus for Tapering Optical Fibers, *Applied Electronics 2005, International Conference*, University of West Bohemia, 2005, p. 402-403. ISBN 80-7043-369-8.
- [4] Martan, T., Honzátko, P., Kaňka, J., Novotný, K. Workplace for manufacturing devices based on optical fiber tapers, *Proceedings of SPIE, Volume 6609, 66090K*, 2007.
- [5] Podrazky, O., Mrazek, J., Seidl, M., Kasik, I., Tobiska, P., Matejec, V., Martan, T., Aubrecht, J. Optical principle of pH measurement for detection of auxin flow through cellular membrane, *Proceedings of SPIE, Volume 6585, 65850Y*, 2007.

Tomáš Martan
Ústav fotoniky a elektroniky, Akademie věd ČR, v.v.i.
Chaberská 57
18251, Praha 8 - Kobylisy
Česká republika
tel: 266773528
fax: +420 284 680 222
e-mail: martan@ufe.cz

DWDM PRO METROPOLITNÍ SÍTĚ V KOMBINACI S CWDM A JEDNO VLÁKNO

Jaromír Šíma

Anotace

Příspěvek je zaměřen na popis řešení postupného přechodu optické sítě CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) na optickou síť s využitím DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) technologie. Dále jsou popsány možnosti řešení DWDM sítě v obousměrném režimu s využitím jednoho vlákna.

Klíčová slova

Optické sítě, vlnový multiplex, CWDM, DWDM, EDFA zesilovač, optický cirkulátor, optický interleaver, pásmový filtr

1. Úvod

Doposud se technologie DWDM používá většinou pro dálkové a meziměstské sítě. V metropolitních sítích a na krátké vzdálenosti se běžně nasazuje technologie CWDM. V případě, kdy technologie CWDM již nestačí (malý počet kanálů, nízká přenosová rychlost do 2,5Gbit/s), je možné stávající síť CWDM rozšířit o další kanály DWDM. K tomu je nejlepší použít přenosové kanály CWDM 1530 a 1550 nm.

Také se můžeme setkat se situací, kdy je k dispozici jen jedno optické vlákno. V případě použití pouze technologie CWDM zde není problém – pro obousměrný přenos využijeme střídavě sousední vlnové délky pro příjem a vysílání. Tento princip můžeme zachovat také v případě, kdy použijeme technologii DWDM na krátkou vzdálenost – bez využití EDFA zesilovačů. Pro trasy s větším útlumem, kdy je nutné již nasazení EDFA optických zesilovačů, musíme celé přenosové pásmo DWDM rozdělit tak, aby byl oddělen směr vysílání a příjmu.

2. Technologie CWDM

Technologie CWDM je forma vlnového multiplexu, která využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie hustého multiplexu DWDM. Samotný princip CWDM není nový. Již v doporučení ITU-T G.671 bylo specifikováno, že CWDM multiplex by měl mít odstup jednotlivých kanálů menší než 50 nm a větší než 1000 GHz (což je přibližně 8 nm pro vlnovou délku 1550 nm). Teprve příchod pevné specifikace jednotlivých vlnových délek dal základ pro velký rozvoj a hromadné nasazení této technologie.

Standardizační komise ITU (International Telecommunication Union), skupina T (Telecommunication standardization sector ITU-T) vydala 13. června roku 2002 doporučení: ITU-T G.694.2 - Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid.

Standard ITU-T G.694.2 definuje velikost odstupů jednotlivých kanálů vlnových délek pro použití CWDM technologie tak, aby bylo možné jako zdroje záření použít laserové diody bez nároku na chlazení. Jednotlivé vlnové délky byly také zvoleny tak, aby byly kompatibilní s klasickými používanými vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm.

Označení - kód kanálu CWDM	Nominální vlnová délka [nm]	Rozdělení spektra jednovidového vlákna 9/125 μm
27	1270	O – Original 1260 – 1360 nm Původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm
29	1290	
31	1310	
33	1330	
35	1350	
37	1370	E – Extended 1360 – 1460 nm Nové pásmo, využitelné pouze s novými typy vláken typu „Low Water Peak“ podle standardu ITU-T G.652.C
39	1390	
41	1410	
43	1430	
45	1450	
47	1470	S – Short 1460 – 1530 nm Pásmo kratších vlnových délek, které je využíváno pro nové typy přenosů, zvláště CWDM
49	1490	
51	1510	
53	1530	
55	1550	
57	1570	C – Conventional 1530 – 1565 nm L – Long 1565 – 1625 nm Pásmo dlouhých vlnových délek, využíváno pro novější typy přenosů
59	1590	
61	1610	

Tab. 1: Tabulka vlnových délek CWDM podle standardu ITU-T G.694.2.

Jednotlivé vlnové délky CWDM technologie jsou definovány v rozsahu 1270 nm až 1610 nm se vzájemným odstupem 20 nm.

Vlastní standard G.694.2 předpokládá použití nechlazených laserových zdrojů s celkovou tolerancí od nominální střední vlnové délky v rozsahu ± 6 až 7 nm. Vzhledem k toleranci, která je povolena standardem, se v praxi ustálila šířka pásma v rozsahu $\pm 6,5$ nm, jak pro používané CWDM filtry, tak i pro toleranci vlnových délek laserových diod pro celý rozsah pracovních teplot.

V únoru 2004 byl přijat další standard pro technologii CWDM–ITU-T Recommendation G.695 „Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications“. Tento standard popisuje doporučené parametry optického rozhraní z důvodu vzájemné kompatibility zařízení CWDM různých výrobců.

Pro konstrukci CWDM filtrů se používá osvědčená technologie tenkovrstvých filmů, která byla již ověřena při použití technologie DWDM. Prakticky to znamená menší počet potřebných napařených vrstev a tedy i nižší cenu, než v případě filtrů pro technologii DWDM. Na rozdíl od hustého vlnového multiplexu DWDM tady máme širší propustné pásmo $\pm 6,5$ nm od střední vlnové délky optického kanálu. Vzhledem k teplotnímu posunu vlnové délky optického transceiveru (DFB laseru, pro rozsah pracovních teplot od 0°C do +70°C) se v praxi používá vlnová délka optického multiplexeru vždy větší o 1nm, než je nominální vlnová délka laseru. Střed CWDM kanálu pro nominální vlnovou délku 1550 nm je tedy ve skutečnosti 1551 nm.

S tímto posunem středu pásma pasivních CWDM filtrů o jeden nanometr je třeba také počítat v případě kombinace systému CWDM a DWDM.

3. Technologie DWDM

Hustý vlnový multiplex (Dense Wavelength Division Multiplexing) se používá hlavně na dálkových optických trasách a vyžaduje precizní laserové chlazené zdroje a ostatní náročné optické komponenty, jako jsou optické zesilovače EDFA, kompenzátory disperze apod.

Frekvence [THz]	Kanál DWDM dle ITU	Vlnová délka [nm]
192,0	920	1561,42
192,1	921	1560,61
192,2	922	1559,79
192,3	923	1558,98
192,4	924	1558,17
192,5	925	1557,36
192,6	926	1556,55
192,7	927	1555,75
192,8	928	1554,94
192,9	929	1554,13
193,0	930	1553,33
193,1	931	1552,52
193,2	932	1551,72
193,3	933	1550,92
193,4	934	1550,12
193,5	935	1549,32
193,6	936	1548,51
193,7	937	1547,72
193,8	938	1546,92
193,9	939	1546,12
194,0	940	1545,32
194,1	941	1544,53
194,2	942	1543,73
194,3	943	1542,94
194,4	944	1542,14
194,5	945	1541,35
194,6	946	1540,56
194,7	947	1539,77
194,8	948	1538,98
194,9	949	1538,19
195,0	950	1537,40
195,1	951	1536,61
195,2	952	1535,82
195,3	953	1535,04
195,4	954	1534,25
195,5	955	1533,47
195,6	956	1532,68
195,7	957	1531,90
195,8	958	1531,12
195,9	959	1530,33
196,0	960	1529,55

Tab. 2: Tabulka vlnových délek části pásma „C“ DWDM 100GHz podle standardu ITU-T G.694.1.

Doporučení ITU-T G.694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“ specifikuje jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek v rozsahu od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz), (tzv. S, C a L pásmo).

Pro další použití v metropolitních sítích je vhodné omezit technologii DWDM pouze na využití „C“ pásma v oblasti 1530 až 1565 nm, kdy existují vhodné cenově dostupné komponenty (výměnné transceivery DWDM v provedení SFP, XFP a Xenpak a EDFA zesilovače pro C pásmo).

4. Výběr vlnových délek CWDM

Všechny vlnové délky CWDM technologie (k dispozici je 18 kanálů) můžeme využít jen s vláknem typu „Low Water Peak“ neboli s plným spektrem podle standardu G.652.C/D. Vláknem G.652.C/D je nový typ vlákna, které je vyrobeno bez zvýšení útlumu („water peak“) v oblasti vlnových délek okolo 1383 nm.

V běžných případech stávajících optických tras máme ale většinou k dispozici jen standardní optické jednovláknové vlákno 9/125um, odpovídající standardu ITU G.652.

Pro kratší vzdálenosti, kdy můžeme vzhledem k útlumu používat vlnové délky již od 1270 nm, je pro standardní optické vlákno G.652 k dispozici 16 kanálů, s vlnovými délkami 1270, 1290, 1310, 1330, 1350, 1410, 1430, 1450, 1470, 1490, 1510, 1530, 1550, 1570, 1590 a 1610 nm.

Pro delší vzdálenosti už nelze přenosové okno v pásmu 1300 nm použít a zbývá nám k dispozici celkem osm přenosových kanálů (pásma S + C + L), v rozsahu od 1470 do 1610 nm.

Dále se kvůli jednoduchosti budeme zabývat jen horními osmi kanály CWDM (1470-1610 nm).

5. Kombinace technologií CWDM a DWDM

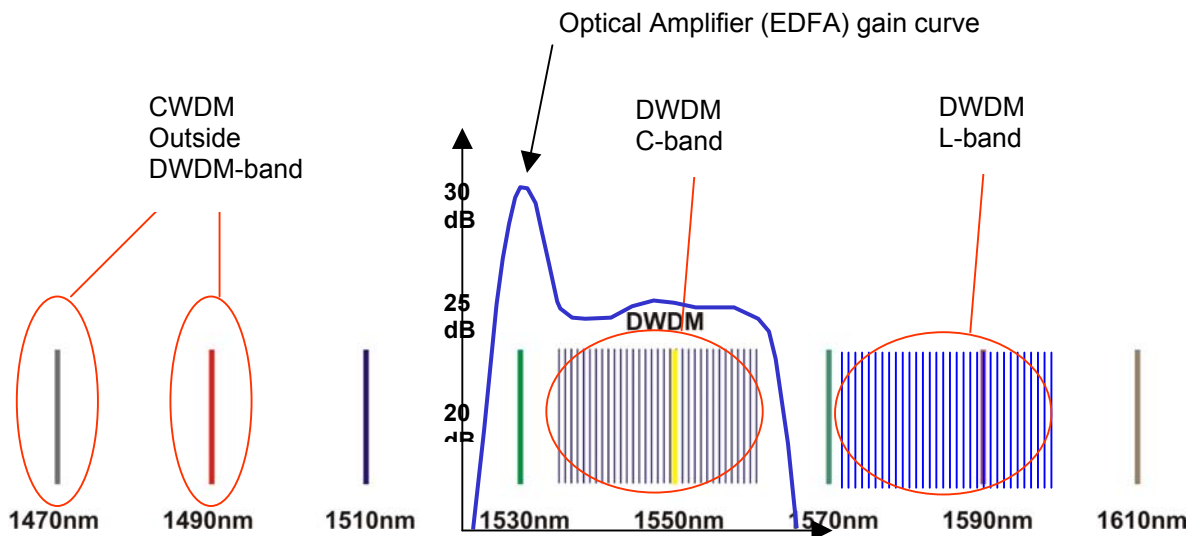
Technologie CWDM lze v případě potřeby vhodně zkombinovat s technologií hustého multiplexu DWDM. Pro technologii DWDM se používají EDFA optické zesilovače, které se běžně dodávají pro práci v pásmu C nebo L, případně pro obě pásma dohromady.

Pro kombinaci s technologií DWDM v metropolitních sítích je vhodné počítat pouze s využitím C pásma.

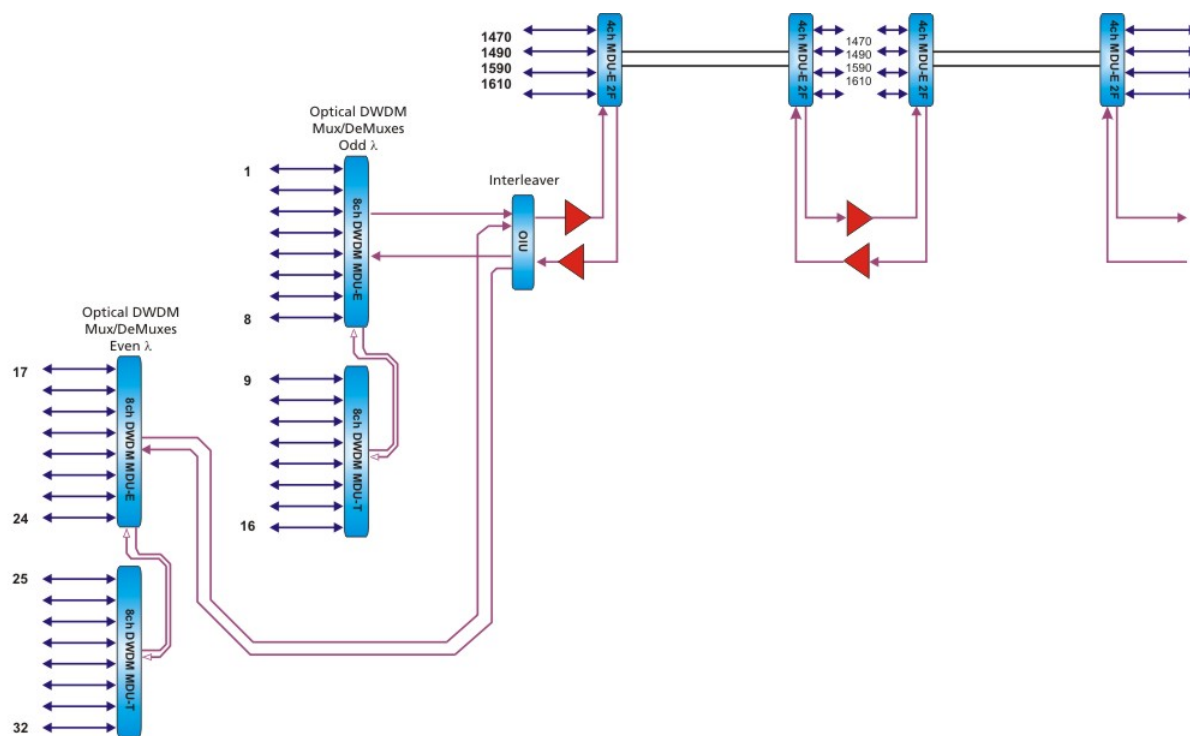
Pro běžnou situaci s klasickým osmikanálovým CWDM multiplexerem máme tedy k dispozici pro budoucí rozšíření pouze dva kanály, kanál 53 a 55. Vezmeme-li v úvahu šířku CWDM kanálu, pro použití systému DWDM je prakticky v tomto kanálu č. 55 (1551 nm) k dispozici 16 kanálů s rozestupem 100 GHz. V kanálu č. 53 je v C pásmu k dispozici prakticky jen 8 kanálů DWDM s rastrem 100GHz.

Celková využitelná kapacita tohoto systému bude tedy 6 kanálů CWDM a 24 kanálů DWDM.

Pokud budeme dopředu uvažovat o plném využití systému DWDM, je vhodné již na začátku použít CWDM Mutli/Demultiplexer s pouze čtyřmi vlnovými délkami 1470/1490/1590/1610 nm (nebo ještě lépe se šesti kanály 47/49/51/57/59/61) s vyvedeným expanzním portem. Na tento expanzní port je vyveden zbytek použitého spektra a je tak k dispozici skoro celé C pásmo pro systém DWDM (celkem 32 kanálů).



Obr.1: Kombinace CWDM a DWDM – využití pásma.



Obr.2: Kombinace CWDM a DWDM – celkem 4ch CWDM a 32ch DWDM.

6. Provoz po jediném optickém vlákně

V případě, kdy potřebujeme dosáhnout nejnižší ceny vlastního řešení, můžeme využít ke komunikaci pouze jediné optické vlákno. To v zásadě není problém pro technologii CWDM, kdy použijeme sousední vlnové délky proti sobě jako příjem a vysílání a tak i zvýšíme izolaci mezi jednotlivými kanály. Počet přenosových kanálů, který máme k dispozici, je tak samozřejmě polovinou počtu použitých vlnových délek.

Pro systém DWDM a krátkou vzdálenost, kdy není nutné nasadit optické EDFA zesilovače, lze s výhodou použít stejný princip jako v případě CWDM.

Pro delší trasy a větší počet kanálů DWDM (vyšší útlum Multi/Demultiplexerů) je nutné nasazení EDFA zesilovačů. Musíme proto vhodně oddělit směr vysílání a příjmu pro použití standardních EDFA zesilovačů (existují sice i EDFA zesilovače, které zesilují obousměrně, ale nejsou běžně komerčně dostupné a mají i další nevýhody – vyšší šum apod.).

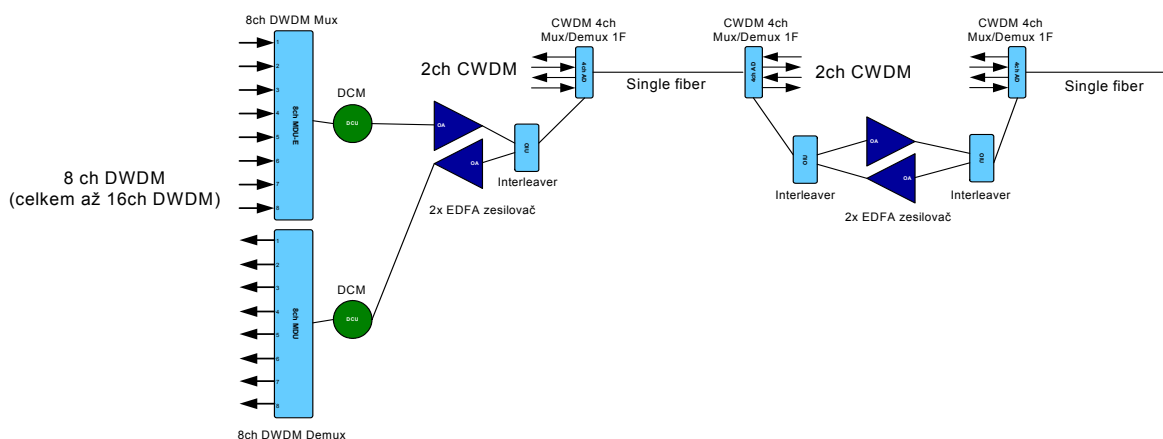
K oddělení směru příjem/vysílání v DWDM síti lze v zásadě použít několik způsobů. Jeden z nejjednodušších je **použití optických cirkulátorů**. Optický cirkulátor umí rozdělit obousměrný signál z jednoho do dvou vláken a je vlnově nezávislý. Jeho použití spolu s EDFA zesilovači ale přináší vlivem zpětného rozptylu světla ve vlákně zhoršení optického šumu v trase a pro delší vzdálenosti s více EDFA zesilovači je tak nepoužitelný.

Dále můžeme použít **pásmový filtr** (rozdělení celého pásma DWDM na dvě poloviny), kdy horní polovina pásma je určena pro jeden směr přenosu a druhá polovina pásma po obrácený směr. Toto řešení se používá nejvíce, nevýhodou ve srovnání s použitím interleaveru je nižší izolace mezi kanály.

Pokud nám postačí na jednom vlákně s CWDM systémem provozovat pouze dalších 8 DWDM kanálů, lze na rozdělení směrů příjem/vysílání použít přímo vlastní CWDM Multiplexer/Demultiplexer. Pro jeden směr tak použijeme kanál CWDM č. 53 a pro druhý směr kanál CWDM č. 55.

Technicky nejlépe vychází **použití interleaveru**, který rozdělí pásmo DWDM s odstupem 100 GHz na dvě s odstupem 200 GHz (rozdělí vlnové délky sudá/lichá do dvou směrů). Zvyšuje se tak izolace mezi jednotlivými kanály za cenu dražší použité optické součástky.

Na obrázku č. 3 je naznačeno použití interleaveru 100/200GHz spolu se čtyřportovým CWDM Multi/Demultiplexerem s expanzním portem a osmikanálovým DWDM Multi a Demultiplexerem. Tento DWDM systém lze rozšířit o dalších 16 vlnových délek (sudá/lichá) a dostat se tak na celkovou kapacitu dvou CWDM přenosových kanálů a 16ti DWDM přenosových kanálů.



Obr.3: Kombinace CWDM a DWDM – na jediném vlákně, 2ch CWDM a až 16ch DWDM.

7. Závěr

Příznivá cena technologie CWDM/DWDM umožňuje až neobvykle vysokou návratnost investice, obvykle v řádu 9 až 12 měsíců. (Cena instalace se bude samozřejmě vždy lišit případ od případu, a bude nejvíce záviset na ceně pronájmu/instalace nových optických vláken, která bychom potřebovali v případě, kdy by technologie CWDM/DWDM nebyla použita).

Možnost budoucího rozšíření systému CWDM o další kanály DWDM nám umožňuje zachovat již vynaložené prostředky a velmi efektivně lépe využít šířku optického pásma jednovláknového vlákna.

8. Přehled literatury

- [1] ITU-T Recommendation G.694.2 „Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid“
- [2] ITU-T Recommendation G.695 „Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications“
- [3] ITU-T Recommendation G.694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“
- [4] Katalogové listy a literatura firem Cisco, Finisar, Lumentis
- [5] Firemní literatura Transmode Systems AB, Švédsko

Ing. Jaromír Šíma
RLC Praha a.s.
www.rlc.cz
e-mail: sima@rlc.cz

VYUŽITÍ MŘÍŽKY S DLOUHOU PERIODOU PRO KONVERZI FÁZOVÉ MODULACE NA AMPLITUDOVOU PŘI 160GB/S

Pavel Škoda, Pavel Honzátko, Aleš Kumpere

Anotace

Navrhli jsme konvertor fázové modulace na amplitudovou využívající vláknové mřížky s dlouhou periodou. Tento prvek jsme použili ve vlnovém konvertoru pracujícím při přenosové rychlosti 160Gb/s.

Klíčová slova

Konverze fázové modulace na amplitudovou, vlnový konvertor

Úvod

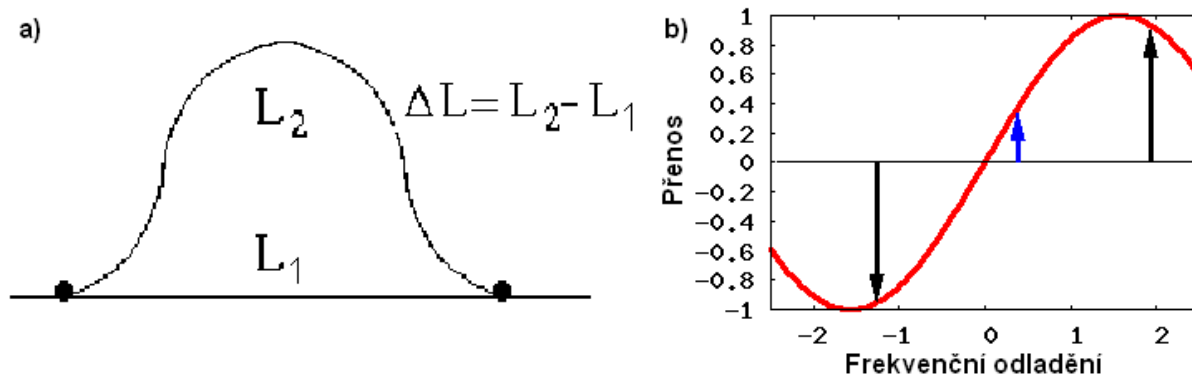
Základem komunikačních systémů nové generace budou celooptické telekomunikační sítě pro přenos dat na vysokých přenosových rychlostech. Jedním z důležitých prvků takového komunikačního systému je optický router, jehož základem je celooptický vlnový konvertor. Pro konverzi se často využívá nelinearit optických vláken [1] nebo polovodičového zesilovače [2,3]. Součástí takového vlnového konvertoru je konvertor fázově modulovaného signálu na amplitudově modulovaný, který je často realizován asymetrickým Machovým-Zehnderovým interferometrickým filtrem. Toto řešení bývá označováno také jako diferenciální interferometr [4,5]. Od takového filtru očekáváme, kromě potlačení signálu na nosné frekvenci, také upravení fázové charakteristiky signálu tak, aby dolní postranní pásmo změnilo svoji fázi o π . Na základě znalosti přenosové funkce mřížky s dlouhou periodou jsme navrhli a ověřili použití této mřížky ve vlnovém konvertoru místo výše zmíněného interferometrického filtru. Použití mřížky s dlouhou periodou jako diferenciátoru bylo publikováno v [6]. První experimenty s použitím mřížky s dlouhou periodou jsme již publikovali na [7].

Teorie

Konverze fázové modulace na amplitudovou lze dosáhnout pomocí asymetrického Machova-Zehnderova interferometrického filtru, který je zjednodušeně znázorněn na obr. 1a a bývá nazýván diferenciálním interferometrem. Díky různě dlouhým ramenům Machova-Zehnderova zapojení vznikne časový posuv mezi šířícími se signály v obou větvích a výsledná přenosová funkce je součinem funkce sinus a fázového faktoru (1).

$$T = e^{ik\frac{L_1+L_2}{2}} \sin\left(\frac{k\Delta L}{2}\right) \quad (1)$$

Pokud se takovýto filtr vhodně nastaví, pak jeho přenosová charakteristika může v ideálním případě vypadat podle obr. 1b. Z obrázku je vidět, že signál na nosném kmitočtu bude částečně potlačen a fázový rozdíl mezi dolním a horním postranním pásmem bude změněn o π . Stejnou funkci diferenciálního interferometru



Obr. 1: a) Schéma asymetrického Machova-Zehnderova interferometrického filtru
b) a jeho přenosová charakteristika.

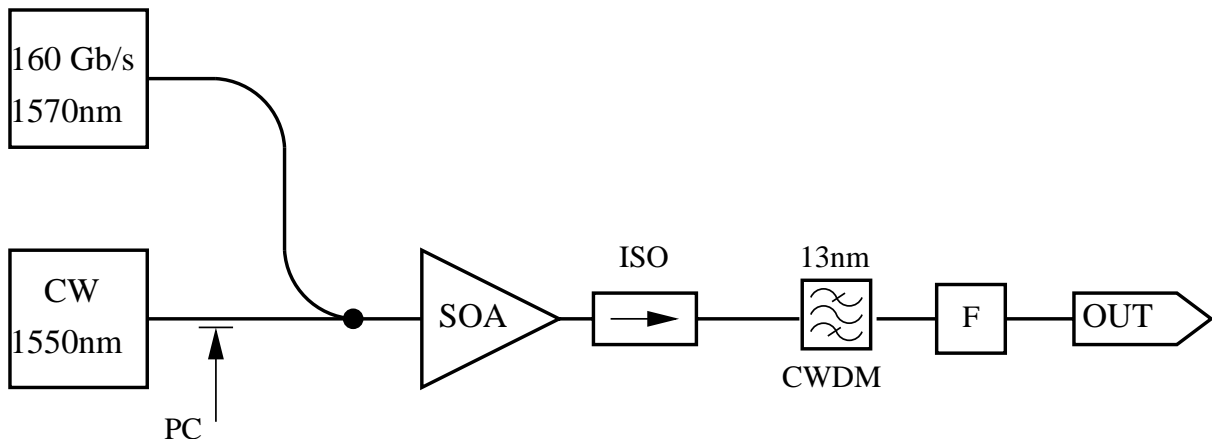
zastane Lyotův filtr, který můžeme sestavit z polarizačního kontroléru, vysoce dvojlomného vlákna a polarizátoru. Pomocí polarizačního kontroléru rovnoměrně rozdělíme energii do obou hlavních os vysoce dvojlomného vlákna, které vytvoří zpoždění mezi signálem v rychlé a v pomalé ose. Obě složky signálu spolu interferují na polarizačním děliči svazku, který je orientován tak, aby jeho hlavní osy svíraly s osami vysoce dvojlomného vlákna úhel 45%. Správným nastavením polarizačního kontroléru získáme vhodné podmínky pro konverzi.

Nevýhodou diferenciálních interferometrů je periodický charakter jejich přenosové charakteristiky. Jak je vidět z obr. 1b, diferenciální interferometr sice vhodně potlačí nosnou vlnu a otočí fázi u nejbližší harmonické, ale vzdálenější harmonické mohou být nevhodně potlačeny a jejich fáze nebudou vyrovnány. Diferenciální interferometry jsou tedy nevhodné pro konverzi pikosekundových pulsů, které mají široké spektrum. Mřížka s dlouhou periodou má pro účely konverze vhodnější přenosovou funkci, která je zobrazena na obr. 4a. Mřížka nepotlačuje vzdálená postranní pásma a může vyrovnat spektrální fázi signálu. Při konverzi krátkých pulsů ji lze tedy s výhodou použít místo diferenciálního interferometru.

Experiment

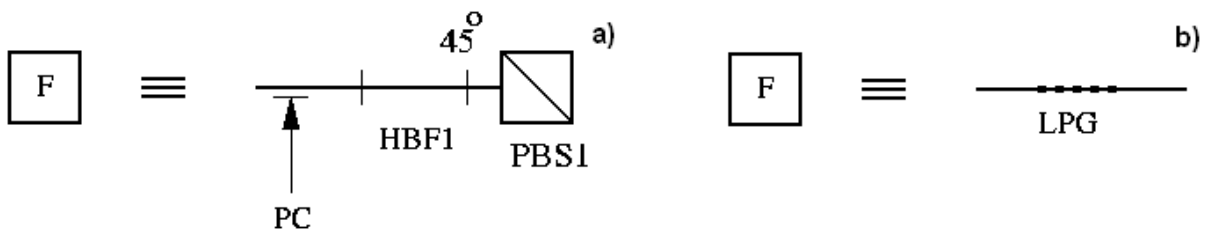
Pro ověření možnosti použití mřížky s dlouhou periodou pro konverzi fázové modulace na amplitudovou jsme sestavili experiment podle obr. 2. Jako data jsme použili periodický sled pulsů s opakovacím kmitočtem 160 Gb/s, který byl vytvořen jako zázněj dvou kontinuálních vln s následnou kompresí v kompresoru pulsů. Spektrum datových pulsů je na obr. 5a a jejich autokorelace na obr. 5b. Spektrální čáry jsou od sebe vzdáleny 1.3nm a opakovací perioda pulsů je 6.25ps, což odpovídá 160Gb/s. Šířka pulsů v polovýšce je 1.5ps. Kontinuální vlna na 1550nm a data na 1570nm jsou sloučeny a vyslány do polovodičového zesilovače. Zde je kontinuální vlna fázově modulována vlivem křížové fázové modulace a současně amplitudově vlivem křížové modulace zisku. Použili jsme polovodičový zesilovač od firmy Kamelian s relaxační dobou zisku přibližně 25ps. Za polovodičový zesilovač jsme zařadili izolátor, abychom předešli případnému laserování. Demultiplexerem jsme vybrali pouze modulovaný signál na 1550nm a ten poslali dále do konvertoru.

První v řadě jsme ověřili použití Lyotova filtru pro konverzi fázové modulace na amplitudovou doplněním experimentálního schématu podle obr. 3a. Spektrum resp. autokorelace konvertovaných pulsů je na obr. 5c resp. 5d. Je vidět, že při použití Lyotova filtru ke konverzi jsou částečně potlačena postranní pásma.

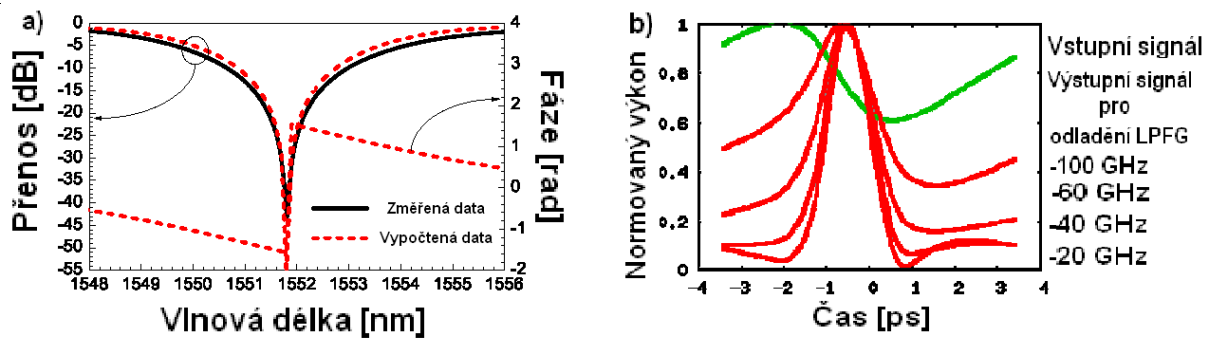


Obr. 2: Schéma experimentu.

Dále jsme použili mřížku místo Lyotova filtru a upravili experimentální schéma podle obr. 3b. Její přenosová funkce je na obr. 4a.

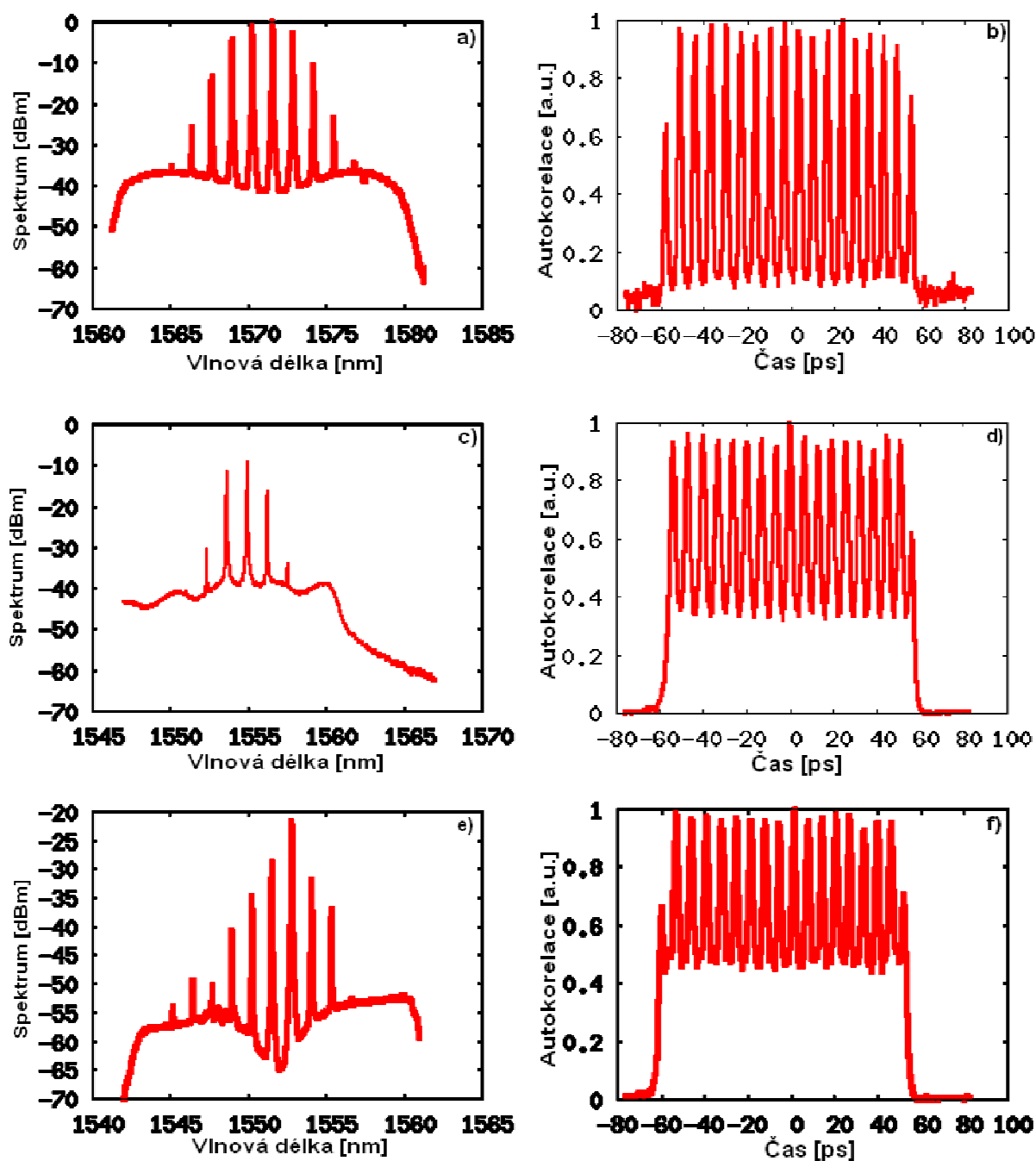


Obr. 3: a) Lyotův filtr b) optická vláknová mřížka s dlouhou periodou.



Obr. 4: a) Přenosová a fázová charakteristika použité mřížky
b) Závislost šířky výstupních pulsů na odladění mřížky.

Mřížka rezonuje na frekvenci 1551,8nm a má zde útlum 43dB. Numericky simulovaný vliv odladění na tvar výstupního pulsu je uveden na obr. 4b. Vidíme, že při malém odladění vzniká parazitní puls. Naopak při velkém odladění je významné pozadí a pulsy se rozšíří. Minimální dosažená šířka pulsu byla 1.1ps při odladění o 40GHz do červena.



Obr. 5: a) Spektrum signálu na 160Gb/s b) a jeho autokorelace c) spektrum konvertovaného signálu pomocí Lyotova filtru d) a jeho autokorelace e) spektrum konvertovaného signálu pomocí mřížky f) a jeho autokorelace.

Takto naladěnou mřížku s dlouhou periodou jsme použili jako konvertor fázové modulace na amplitudovou. Získali jsme tak spektrum konvertovaných pulsů resp. jejich autokorelaci, které je na obr. 5e resp. 5f. Pokud porovnáme spektra konvertovaných pulsů při použití diferenciálního interferometru a mřížky s dlouhou periodou, pak je vidět, že konverze fázové modulace na amplitudovou pomocí mřížky s dlouhou periodou potlačuje méně postraní pásma signálu, než je tomu u diferenciálního interferometru. Použitá mřížka s dlouhou periodou byla vyrobena pomocí CO₂ laseru a byla dlouhá 10cm s periodou 512 μ m.

Závěr

Navrhli jsme a experimentálně ověřili možnost použití mřížky s dlouhou periodou jako konvertoru fázové modulace na amplitudovou, který hraje zásadní roli ve vlnových konvertorech založených na křížové fázové modulaci. Dokázali jsme, že mřížka s dlouhou periodou je pro konverzi fázově modulovaného signálu na amplitudově modulovaný vhodnější než diferenciální interferometr. Díky jednodušší struktuře mřížky oproti celému diferenciálnímu interferometru mohou být také její náklady na výrobu podstatně nižší. Takovéto mřížky pak můžeme využít například pro získání hodinového signálu ze signálu s alternující fází, což lze uplatnit v budoucích celooptických sítích s rozdílovým fázovým klíčováním.

Poděkování

Náš dík patří R. Slavíkovi za přípravu mřížky s dlouhou periodou. Projekt byl podporován programem "Informační společnost" Akademie věd České republiky (1ET300670502).

Reference

- [1] V.G. Ta'eed, L. Fu, M. Pelusi, M. Rochette, I.C.M. Littler, D.J. Moss, and B.J. Eggleton. Error free all optical wavelength conversion in highly nonlinear as-se chalcogenide glass fiber. *Optics Express*, 14(22):10371–10376, 2006. Cited By (since 1996):3.
- [2] M. Hattori, K. Nishimura, R. Inohara, and M. Usami. Bidirectional data injection operation of hybrid integrated soa-mzi all-optical wavelength converter. *Journal of Lightwave Technology*, 25(2):512–519, 2007. Cited By (since 1996):
- [3] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, H. deWaardt, A. M. Koonen, G.D. Khoe, X. Shu, I. Bennion, and H.J.S. Dorren. Error-free 320-gb/s all-optical wavelength conversion using a single semiconductor optical amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 25(1):103–108, 2007. Cited By (since 1996):
- [4] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima. Spectral phaselocking in ultrafast all-optical mach-zehnder-type semiconductor wavelength converters. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 38(11 A):L1243–L1245, 1999. Cited By (since 1996): 9.
- [5] J. Leuthold, C. H. Joyner, B. Mikkelsen, G. Raybon, J.L. Pleumeekers, B.I. Miller, K. Dreyer, and C.A. Burrus. 100 gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated soa delayed-interference configuration. *Electronics letters*, 36(13):1129–1130, 2000. Cited By (since 1996): 78.
- [6] R. Slavik, Y. Park, M. Kulishov, R. Morandotti, and J. Azana. Ultrafast all-optical differentiators. *Optics Express*, 14(22):10699–10707, 2006. Cited By(since 1996): 6.
- [7] P. Honzátko, R. Slavík, A. Kumpera, P. Škoda, "Phase-to-amplitude conversion using long period fiber grating for wavelength conversion at 160 Gb/s", C14-THU, CLEO/Europe-IQEC 2007 Conference Digest, Munchen, 2007

Pavel Škoda
 ÚFE AV ČR
 Chaberská 57
 182 51 Praha 8 - Kobylisy
 tel: +420 266 773 528
 e-mail: skoda@ufe.cz

SATELITNÍ A MOBILNÍ OPTICKÉ SPOJE

Otakar Wilfert, Hennes Henniger, Zdeněk Kolka

Anotace

Úspěchy optických bezkabelových spojů pracujících s optickou vlnou v uzavřeném nebo volném (atmosférickém i kosmickém prostoru) ukazují dobrou perspektivu této technologie a není pochyb o tom, že tato technologie je připravena k širokému nasazení v praxi. Optické spoje mají oproti radiovým spojům řadu výhod. Hlavními přednostmi jsou vysoká přenosová rychlost a vysoká bezpečnost přenosu. Zdokonalení systému pro zjištění a sledování vzájemně se pohybujících komunikačních stanic umožnilo rozvinout oblast optických mobilních spojů. V příspěvku je uvedena stručná charakteristika satelitních a mobilních optických spojů a aktuální výsledky vědeckých projektů zabývajících se touto problematikou.

Klíčová slova

Atmosférické optické spoje, fotonické sítě, atmosférické přenosové prostředí, satelitní optické spoje, mobilní optické spoje

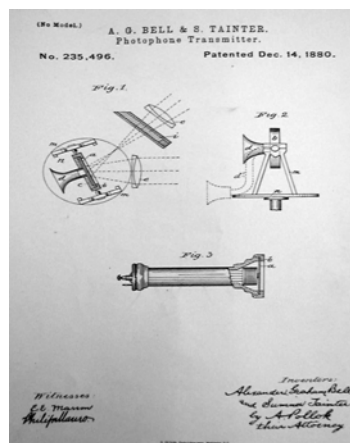
1. Úvod

Historicky první zařízení, které pracovalo na základě přenosu informace optickým svazkem - a svým charakterem odpovídalo optickým bezkabelovým spojům tak, jak je chápeme v dnešní době – bylo patentováno A. G. Bellem a jeho spolupracovníkem Ch. S. Tainterem v roce 1880 [1]. Autentické nákresy patentovaného zařízení, které bylo nazváno „photophone“, jsou uvedeny na obr. 1.

Bell považoval „photophone“ za svůj největší vynález, dokonce větší než telefon. Zdrojem světla u photophonu bylo Slunce, které ozařovalo systém zrcadel, z nichž jedno mělo funkci modulátoru. Modulační zrcadlo bylo vychylováno lidským hlasem a způsobilo změny optické intenzity na selenovém článku v přijímači. Změny detekovaného optického výkonu byly v přijímači přeměněny na elektrický proud a pomocí sluchátek opět na lidský hlas. Proces přenosu uskutečněný photophonem je znázorněn na obr. 2.

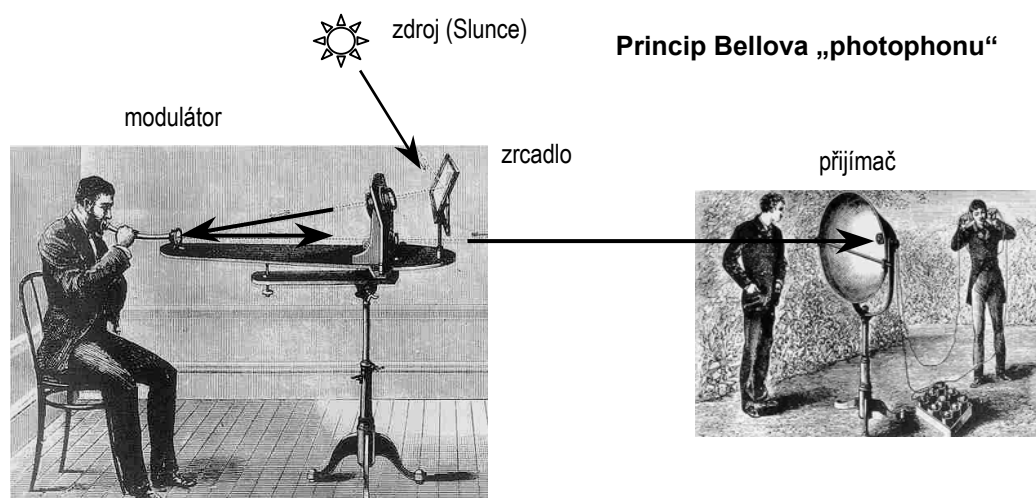


Charles
Summer Tainter



Alexander
Graham Bell

Obr. 1: Fotografie autorů a autentické výkresy patentovaného optického bezkabelového spoje „photophone“.



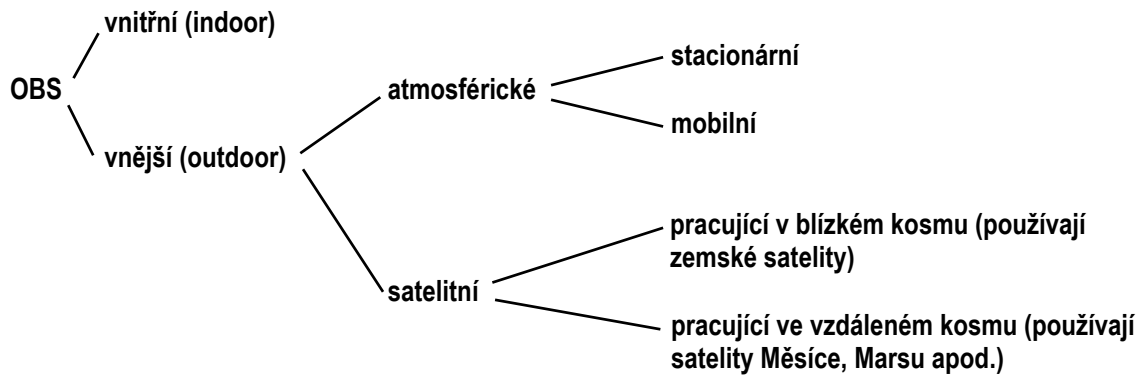
Obr. 2: Znárodnění funkce „photophonu“.

Technologie Bellova photophonu nemohla zajistit požadovanou kvalitu komunikace, ale jednalo se o historicky první zařízení, které prakticky demonstrovalo funkci optického bezkabelového spoje. Radiová komunikace předvedená Marconim v roce 1895 měla rychlejší rozvoj.

Větší pokrok optických bezkabelových spojů byl možný až po úspěších v oblastech laserové technologie, laserových diod, fotodiod a optických vláken. Dnes se optickým bezkabelovým spojem (OBS) - v zahraniční literatuře označovaným zkratkou FSOL (free space optical link) nebo FSOC (free space optics communication) - rozumí komunikační technologie, která přenáší signál v atmosféře nebo kosmickém prostoru pomocí optických svazků. Ve vysílači může být použit laser, laserová dioda (LD) nebo infračervená elektroluminiscenční dioda (IRED). V přijímači bývá použita fotodioda typu PIN nebo lavinová fotodioda (APD). Využívají se obvykle pásma 850 nm, 1060 nm nebo 1550 nm, avšak experimentuje se i na jiných vlnových délkách. Zpravidla se jedná o přenos informace v digitální podobě.

OBS jsou zajímavé z několika důvodů:

- Jejich použití není v současné době vázáno na licenční řízení.
- Pracují v rozsahu optických vlnových délek a nedochází tedy ke znečištění životního prostředí vyzařováním elektromagnetické energie na radiových frekvencích.
- Díky velmi úzkému svazku (řádově miliradiány) mohou být rušeny nebo odposlouchávány jen velmi obtížně. Nemají postranní vyzařování. Případný narušitel musí prakticky vstoupit do svazku, což lze monitorovat.
- Potenciál OBS z hlediska šířky pásma přenosu odpovídá možnostem vláknové optiky a jsou tedy přirozeným článkem moderních kabelových optických sítí.
- Mohou pracovat v režimu jednofotonového přenosu s technikou distribuce kvantových stavů fotonů umožňující aplikaci optické kvantové kryptografie s vysoce zabezpečeným přenosem utajovaných zpráv.
- Jednotlivé části spoje se snadno integrují do celku družice.

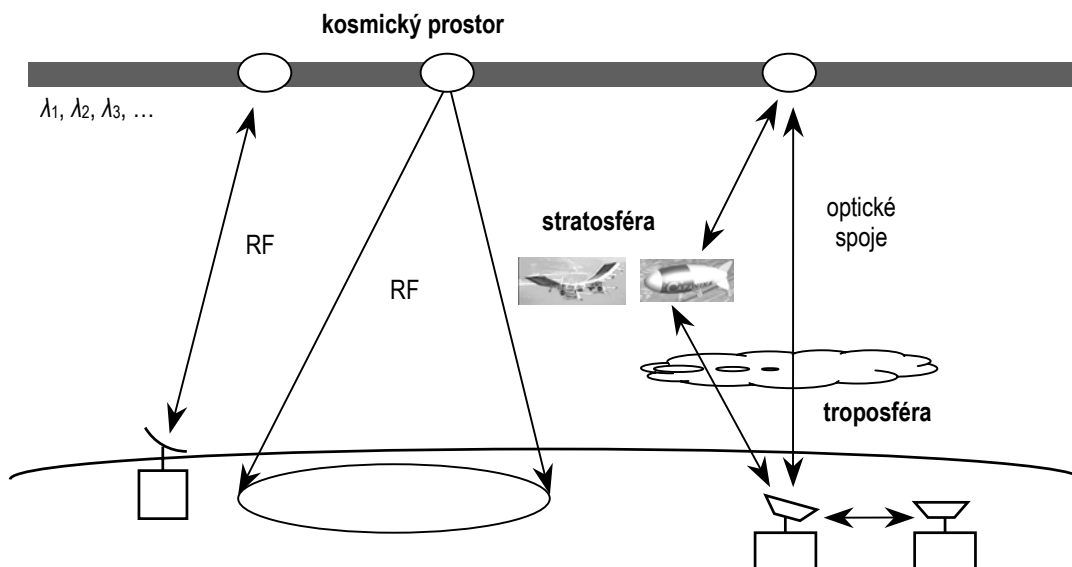


Obr. 3: Dělení OBS podle umístění terminálů a podmínek, ve kterých pracují.

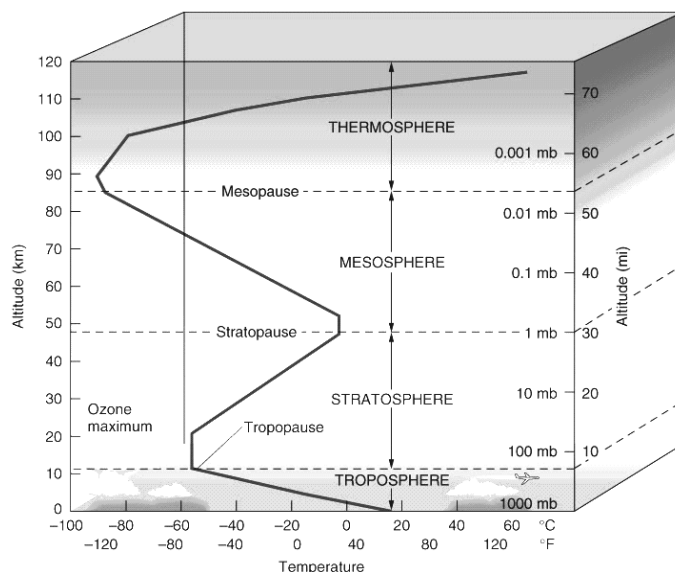
Podle umístění terminálů se OBS dělí na spoje pracující v uzavřeném prostoru (indoor) a spoje pracující vně budov (outdoor). Dělení OBS - podle umístění terminálů a podmínek, ve kterých pracují - je ukázáno na obr. 3.

OBS budou v blízké budoucnosti patřit k základním technologiím bezkabelových sítí WAN (wide area networks) [2]. Základní koncept integrovaných bezkabelových sítí WAN je ukázán na obr. 4. OBS mohou být použity pro komunikaci jak mezi satelity navzájem, tak (jako „uplink“ či „downlink“) mezi satelitem a stratosférickou (HAP; high altitude platform) nebo pozemskou základnovou stanicí. Pozemské stanice mohou být stacionární nebo mobilní a mohou být umístěny na budově, na vozidle nebo na lodi.

V tomto příspěvku je pozornost zaměřena na satelitní a mobilní optické spoje. Uvedena je stručná charakteristika takových spojů a aktuální výsledky projektů zabývajících se jejich problematikou. Optické svazky některých spojů procházejí zčásti jak kosmickým prostorem, tak atmosférou. Na obr. 5 jsou pro názornost uvedeny jednotlivé vrstvy atmosféry a jejich stručná charakteristika [3].



Obr. 4: Znárodnění možného uspořádání integrovaných bezkabelových sítí WAN zahrnující kosmické i pozemské prostředky (podle [2]).

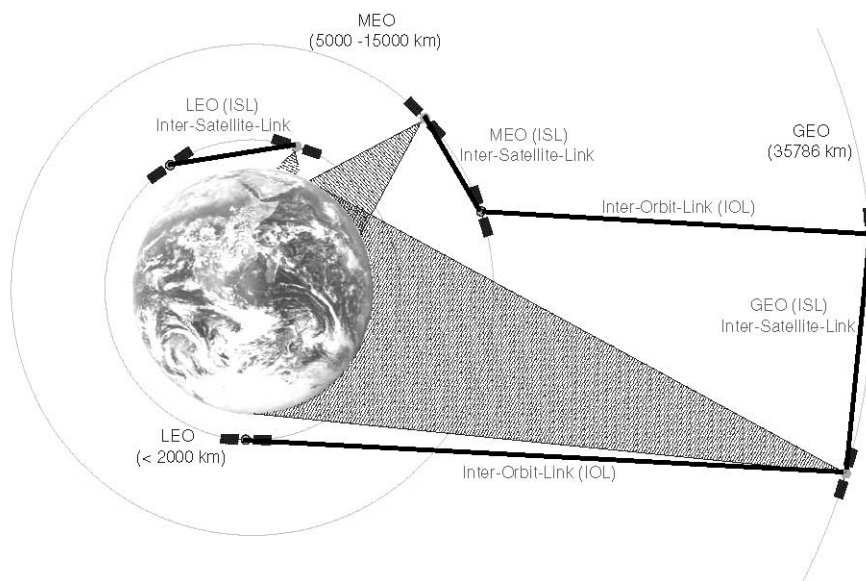


Obr. 5: Znárodnění jednotlivých vrstev atmosféry (podle [3]) (uvedena je závislosti teploty a tlaku atmosféry na výšce).

2. Satelitní optické spoje

Optické bezkabelové spoje pracující v kosmickém prostoru (satelitní optické spoje) mají pro některé své vlastnosti dobrou perspektivu. K jejich pozitivním vlastnostem patří zejména:

- relativně malá hmotnost,
- malé rozměry,
- malá spotřeba elektrické energie a
- vysoká přenosová rychlost.



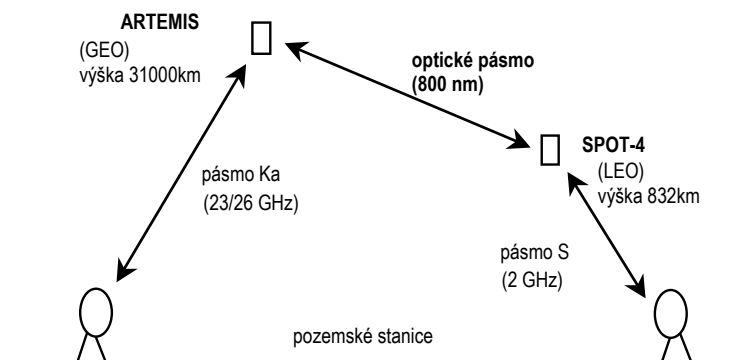
Obr. 6: Znárodnění satelitních optických spojů mezi satelity Země na různých oběžných drahách (podle [4]).

Pro satelitní optické spoje mohou sloužit satelity Země na různých oběžných drahách. Družice na geostacionární oběžné dráze GEO (Geostationar Earth Orbit) obíhají Zem ve výšce asi 36 000 km nad rovníkem s dobou oběhu 24 hodin a z pozemského stanoviště se jeví jakoby na jednom místě. Družice na střední oběžné dráze MEO (Medium Earth Orbit) obíhají Zem 4x-6x denně ve výškách asi 1200 km až 35 000 km. Družice na nízké oběžné dráze LEO (Low Earth Orbit) obíhají Zem ve výškách asi 200 km až 1 200 km s dobou oběhu 80 min až 130 min. Znázornění oběžných drah zemských družic je uvedeno na obr. 6.

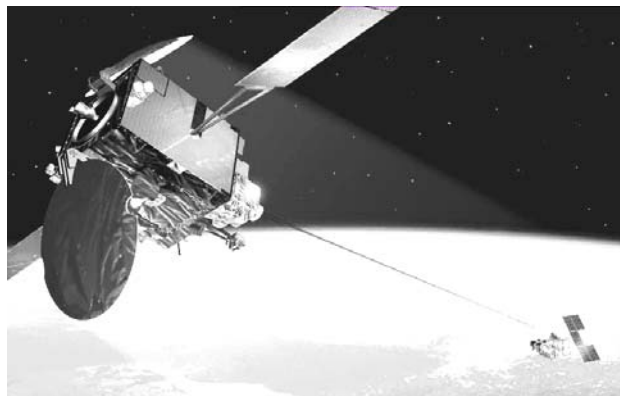
Využití OBS pro komunikaci mezi satelity (OISL; optical inter-satellite link), jako alternativní technologie k radiovým spojům, bylo ověřeno v rámci projektu SILEX (Semiconductor-laser Inter-satellite Link Experiment) podporovaného institucí ESA (European Space Agency) [5].

Projekt SILEX (viz obr. 7) zahrnuje optický spoj pracující mezi geostacionární družicí ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite) a družicí na nízké dráze SPOT-4 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) [6]. Družice ARTEMIS komunikuje s pozemními stanicemi v pásmu Ka, družice SPOT-4 v pásmu S a vzájemná komunikace mezi družicemi je uskutečněna optickým spojem v pásmu 800 nm.

Úspěšný optický přenos mezi družicí ARTEMIS (GEO) a družicí na nízké dráze (LEO) SPOT-4 byl uskutečněn v listopadu 2001 (viz obr. 8). Optická komunikace probíhala po dobu asi 20 minut s přenosovou rychlostí 50 Mbit/s a chybovostí menší než 10^{-9} [7]. Ve vysílači byl použit polovodičový laser GaAlAs. Pro detekci optického signálu byla použita lavinová fotodioda.



Obr. 7: Znázornění satelitního optického spoje v rámci projektu SILEX.



Obr. 8: Optická komunikace mezi družicemi ARTEMIS (GEO) a SPOT-4 (LEO) (podle [7]).

Myšlenku využít optický svazek ke komunikaci mezi satelity podpořila rovněž japonská instituce JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), která vypustila experimentální satelit „Kirari“ OICETS (Optical Inter-orbit Communication Engineering Test Satellite). Oboustranná komunikace mezi družicemi ARTEMIS (GEO) a OICETS (LEO, výška 610 km) byla uskutečněna v prosinci 2005 [8].

Významný pokrok v satelitní komunikaci nastal v březnu 2006, kdy se podařilo institucím JAXA a NICT (National Institute of Information and Communication Technology) provést experiment s laserovým svazkem, při kterém byla ověřena optická komunikace mezi družicí OICETS a pozemskou stacionární stanicí NICT v Koganei, Tokio [9]. Jedná se o světové prvenství v uskutečnění optické komunikace mezi družicí na nízké oběžné dráze a pozemskou stacionární stanicí.

Optická komunikace mezi družicí na geostacionární dráze (ARTEMIS) a stacionární pozemskou stanicí (Tenerife, Kanárské ostrovy) byla již v minulosti uskutečněna, avšak spojení družice na nízké oběžné dráze s pozemskou stanicí je významné tím, že byla ověřena citlivost a dynamika systému zachycení a sledování (APT, acquisition, pointing and tracking system). Zatímco družice na geostacionární oběžné dráze svoji polohu vůči Zemi prakticky nemění, družice na nízké oběžné dráze se vůči Zemskému povrchu pohybuje relativně rychle.

Zdokonalení systému APT pro zachycení a sledování vzájemně se pohybujících stanic vedlo k dalšímu úspěchu – uskutečnění úspěšné optické komunikace mezi družicí ARTEMIS a letounem Mystère 20 (prosinec 2006). V případě optického spoje mezi družicí a klasickým letounem se opět jedná o světové prvenství. Komunikace probíhala během dvou letů při výškách letounu 6 km a 10 km [10].

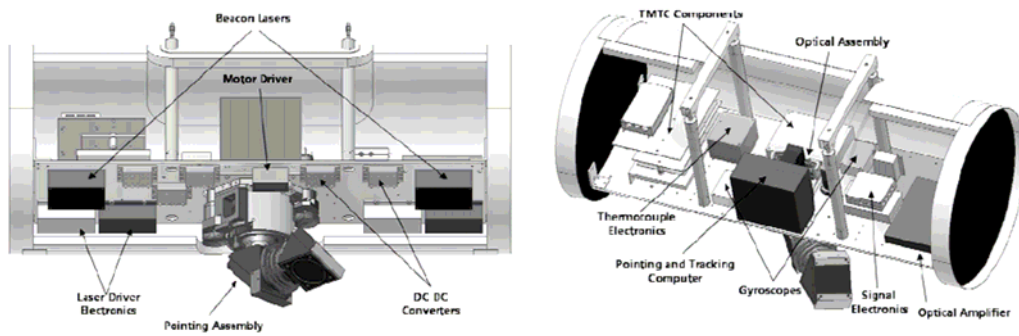
Kvalitní systém APT je jedním z hlavních požadavků na spolehlivou funkci nejen satelitních optických spojů, ale zejména mobilních optických spojů, o nichž bude pojednáno v následující kapitole.

3. Mobilní optické spoje

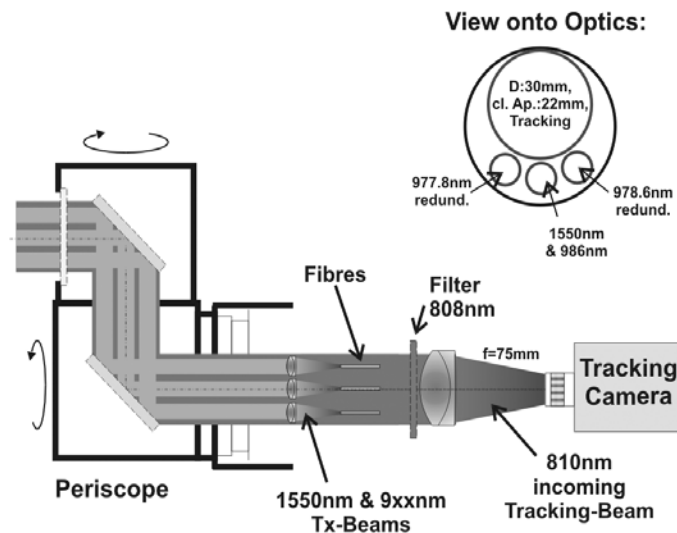
Satelitní a mobilní optické spoje řeší mnoho společných problémů, mají však i své zvláštnosti, které spočívají v rozdílných prostředcích a podmínkách, ve kterých pracují. Mobilním optickým spojem (M-FSOL; mobile free-space optical link) se rozumí OBS, u kterého se vzájemná poloha komunikujících stanic mění. M-FSOL používají ke komunikaci kosmické, vzdušné i pozemské stanice. Musí zvládnout komunikaci mezi navzájem se pohybujícími stanicemi při relativně vysokých vzájemných rychlostech pohybu. Pozemské stanice mohou být nesený prostředky pohybujícími se na hladině vody nebo na nerovném terénu.

M-FSOL mají oproti stacionárním spojům (F-FSOL; fixed free-space optical links) vysoké požadavky na přesnost vzájemného zamíření a sledování komunikujících stanic. Požadavek přesnosti, rychlosti a dynamiky systému zamíření a sledování (ATP) je daný relativně malou divergencí vysílaného optického svazku a malým zorným úhlem přijímače, což souvisí s celkovou charakteristikou a energetickou bilancí OBS.

Příklad řešení systému APT integrovaného do komunikační části terminálu a podporovaného GPS (Global Positioning System) je uveden na obr. 9. Jedná se o terminál umístěný na stratosférickém balonu, který byl vyvinut v DLR (German Aerospace Center) a použit při experimentu v rámci EU-FP6 projektu CAPANINA (Communications from Aerial Platforms Providing High Bandwidth Communications for All). Optická část terminálu je ukázána na obr. 10. Vysílací systém pracuje se třemi optickými kanály. Kanál s délkou vlny 1550 nm slouží jako komunikační kanál



Obr. 9: APT systém integrovaný do komunikační části optického terminálu umístěného na stratosférickém balonu (podle [11], projekt CAPANINA).

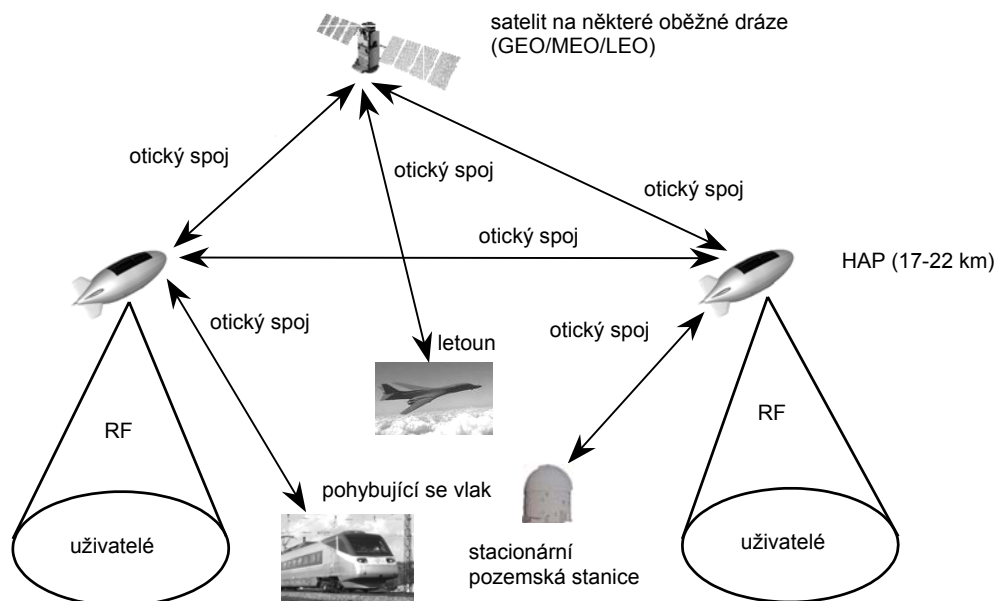


Obr. 10: Optická část terminálu s APT systémem (podle [11], projekt CAPANINA).

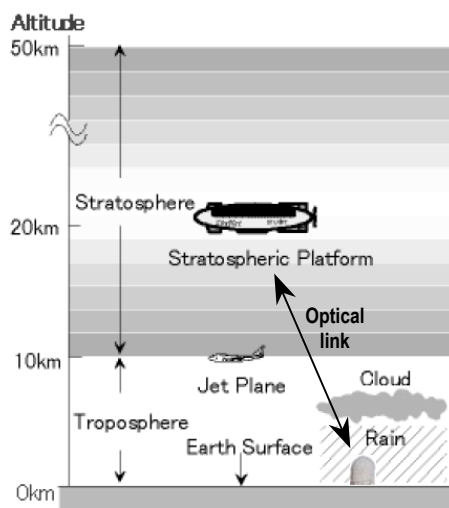
a kanály s délkami vln 977,8 nm a 978,6 nm jsou součástí systému APT. Vysílací čočky jsou ozařovány optickými vlákny. Poloha zrcadel dvouosého zaměřovacího systému je řízena počítačem, který zpracovává signály z gyroskopu a rychlé CMOS snímací kamery umístěné tak, jak ukazuje obr. 10.

Oblast M-FSOL nabývá na důležitosti pro rostoucí potřebu zvýšit přenosovou rychlost a bezpečnost přenosu. Příklad uspořádání komunikační sítě zahrnující M-FSOL je znázorněna na obr. 11. Mezi použité prostředky patří satelity Země, bezpilotní vzdušná plavidla (UAV; unmanned aerial vehicle), výškové základny (HAP; high altitude platform), klasické letouny a pozemní stacionární nebo mobilní prostředky vojenského i civilního významu.

M-FSOL pracují zčásti nebo zcela v atmosférických podmínkách a jsou oproti satelitním optickým spojům pracujícím pouze v kosmu zatíženy úniky způsobenými turbulencí atmosféry. Zvýšenou oblačností nebo náhodnou přítomností objektů mezi vysílačem a přijímačem (narušení požadavku přímé viditelnosti stanic) může nastat i přerušování svazku. Charakter přenosového prostředí, ve kterém M-FSOL pracují, je ukázán na obr. 12.



Obr. 11: Celkový pohled na možné uspořádání M-FSOL (podle [4]).



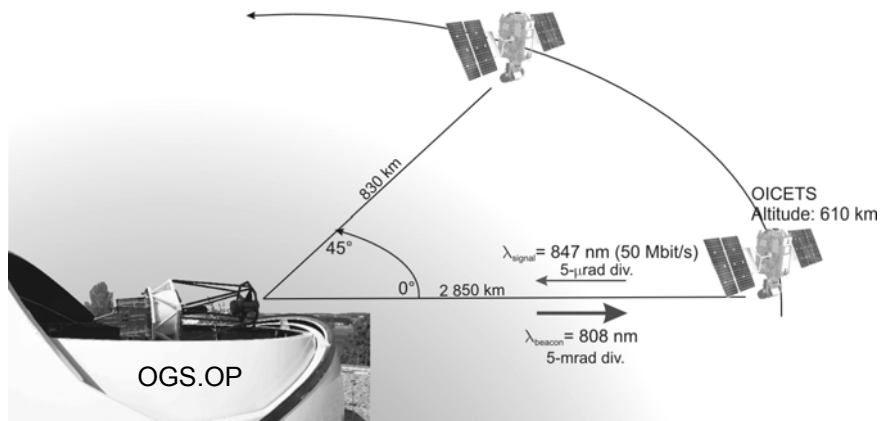
Obr. 12: Charakter přenosového prostředí, ve kterém pracují M-FSO.

Navzdory uvedeným problémům jsou M-FSOL předmětem velkého zájmu, protože nabízejí širokopásmový a bezpečný provoz. Vysoce směrový svazek zaručuje vysokou prostorovou selektivitu přenosového kanálu, proto nehrozí interference s jinými spoji. Velkou výhodou je také to, že optické frekvence nejsou zatím pro komunikační účely regulovány.

Typické parametry M-FSOL terminálů jsou [12]:

- divergence optického svazku: 1/1000 až 1/100 stupně,
- optický výkon vysílače: 100 mW až několik jednotek W,
- průměr vysílací apertury: několik cm,
- průměr přijímací apertury: několik dm,
- přenosová rychlost: 100 Mbit/s až několik Gbit/s.

V budoucnu se očekává, že technologie M-FSOL zvládne důležité úkoly dálkového monitorování Země. Reálnost takového řešení potvrdily experimenty, na kterých významným podílem participovaly evropské instituce. V rámci experimentu KODO (Kirari Optical Downlink to Oberpfaffenhofen) spolupracovaly již zmíněné instituce německá DLR a japonská JAXA [12]. Optický satelitní terminál byl během přeletu japonského satelitu „Kirari“ OICETS (LEO, výška asi 610 km) zaměřen na mobilní německou zemskou stanici OGS-OP (Optical Ground Station Oberpfaffenhofen) ve Wesslingu. Z osmi pokusů o přenos bylo pět úspěšných. Tři pokusy o spojení byly znemožněny zvýšenou oblačností. Při přenosu byla použita intenzitní modulace a přímá detekce (IM/DD). Přenosová rychlost dat byla 50 Mb/s s chybovostí menší než 10^{-6} . Vzájemné polohy družice OICETS a mobilní pozemské stanice OGS-OP jsou znázorněny na obr. 13.



Obr. 13: Vzájemné polohy družice OICETS a mobilní pozemské stanice OGS-OP (podle [13], projekt KODO).

Satelit Kirari OICETS tedy celkem prokázal proveditelnost:

- komunikace mezi družicemi (OICETS - ARTEMIS),
- komunikace mezi družicí a stacionární zemskou stanicí (NICT v Koganei) a
- komunikace mezi družicí a mobilní zemskou stanicí (OGS-OP ve Wesslingu).

V rámci již zmíněného EU-FP6 projektu CAPANINA byl v DLR vyvinut optický komunikační terminál (FELT, Freespace Experiment Laser Terminal) určený pro ověření optické komunikace využívající prostředků HAP. Optický terminál FELT byl umístěn na dálkově řízeném stratosférickém balonu a vypuštěn v srpnu 2005 na ESRANGE (European Space Range) poblíž Kiruny ve Švédsku (viz obr. 14) do výšky 22 km.

Cílem experimentu v Kiruně bylo prověřit podmínky pro využití prostředků HAP jako páteřní komunikační sítě. Optický spoj ze stratosférického terminálu FELT na přenosnou zemskou stanici TOGS (Transportable Optical Ground Station) byl uskutečněn na délce vlny nosné 1550 nm s přenosovou rychlostí 1,25 Gb/s a chybovostí menší než 10^{-9} . Vysílaný optický výkon byl 100 mW. Průměr vysílací apertury na FELT byl 5 cm a průměr přijímací optiky na TOGS byl 40 cm. Mechanická montáž optické soustavy přenosné zemské stanice TOGS je ukázána na snímku (viz obr. 15).



Obr. 14: Základna ESRANGE (European Space Range) poblíž Kiruny ve Švédsku.

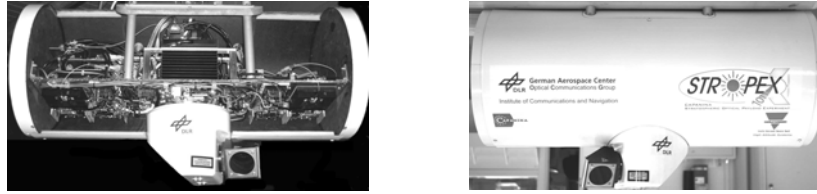


Obr. 15: Přenosná zemská stanice použitá při experimentu CAPANINA v Kiruně (podle [14]).



Obr. 16: Stratosférický balon nesoucího vysílací optický terminál (podle [11]).

Snímek stratosférického balonu nesoucího optický terminál po zachycení optického svazku systémem APT je uveden na obr. 16. Celkový pohled na samotný terminál (FELT) ukazuje snímek na obr. 17.



Obr. 17: Celkový pohled na uspořádání stratosférického optického terminálu FELT (podle [11]).



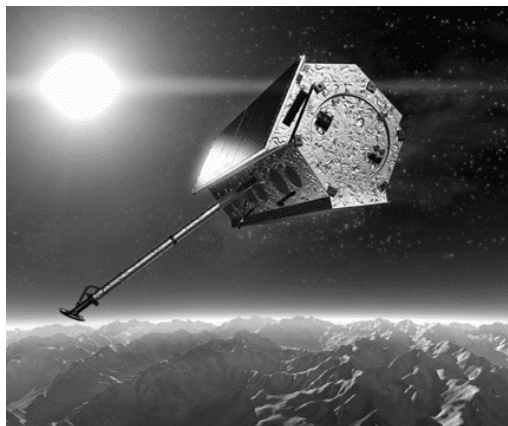
Obr. 18: Optická část spoje umístěná na pohybujiícím se vozidle spolu s diagramem oka a vysílaným svazkem snímaným CCD kamerou (podle [12], projekt MOND).

Proveditelnost mobilního optické spoje mezi vysoce dynamicky se vzájemně pohybujiícími zemskými stanicemi byla demonstrována v rámci projektu MOND (Mobile Optical Near-Ground Demonstrator) ve spolupráci mezi DLR (Wessling) a firmou Carl-Zeiss Optronics GmbH (Oberkochen). Cílem experimentu bylo ukázat možnost kompenzace silných vibrací a rychlých výškových změn vozidla během komunikace [12].

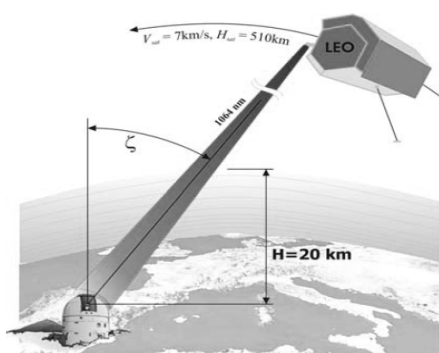
Optická část spoje umístěná na pohybujiícím se vozidle je ukázána na obr. 18. Na tomto obrázku je současně uveden diagram oka ukazující kvalitu přijímaného signálu a optický svazek vysílaný z protilehlé stacionární pozemní stanice.

Pohybujiící se vozidlo bylo vybavené inerciálním navigačním senzorem (podporovaným systémem GPS) poskytujícím informaci systému APT. Komunikační kanál pracoval na optické nosné 1550 nm a přenášel video signál (HDTV) s přenosovou rychlostí 1,5 Gb/s. Použití techniky speciálního kanálového kódování zabezpečilo odolnost přenosového systému proti přerušení svazku náhodnou překážkou.

V budoucnu se plánují další experimenty, které budou zaměřeny na zdokonalení technologie satelitních a mobilních optických spojů. Např. v červnu 2007 byla z kosmodromu Baikonur v Kazachstánu vypuštěna německá družice TerraSAR-X (LEO, výška 510 km; viz obr. 19), která je mimo jiné vybavena kosmickým terminálem pro koherentní optickou komunikaci [12]. Terminál byl vyvinutý ve spolupráci mezi DLR a firmou Tesat-Spacecom GmbH (Backnang, Německo). Koherentní optický spoj pracuje na délce vlny nosné 1064 nm se šířkou pásma přenosu 7 GHz. Pro příjem signálu byly vybrány dvě stacionární pozemské stanice ve Španělsku. Cílem experimentu je zkoumat vliv turbulentní atmosféry na koherentní optický přenos ze satelitu. Scénář tohoto experimentu je naznačen na obr. 20.



Obr. 19: Německá družice TerraSAR-X nesoucí jako druhotné zařízení terminál pro koherentní optický spoj.



Obr. 20: Scénář experimentu s koherentní optickou komunikací (podle [15]) (spoj mezi družicí LEO TerraSAR-X a pozemní stacionární stanicí ve Španělsku).

5. Závěr

Mnoho aktivit v oblasti satelitní a mobilní optické komunikace vyzdvihuje důležitost vysoké přenosové rychlosti a bezpečnosti přenosu nabízené optickými bezkabelovými spoji. Experimenty uskutečněné v této oblasti ukazují, že optické bezkabelové spoje ve funkci satelitních nebo mobilních spojů by mohly být jedním z hlavních článků budoucích bezkabelových komunikačních sítí. Optická komunikace ve vzdáleném kosmu mezi družicí Marsu a zemskou stanicí se teprve připravuje. Pro tento výzkum plánuje NASA v roce 2009 vypustit k Marsu družici (MTO, Mars Telecommunication Orbiter) s optickým terminálem [16].

K překonání slabé stránky optických bezkabelových spojů - závislosti přenosu na stavu atmosféry – slouží technika samoopravných a detekčních kódů (FEC - Forward Error Correction a ARQ - Automatic Repeat-reQuest). Technikou ARQ je řešen problém náhodného přerušování svazku. Vzájemné nalezení stanic v prostoru a plynulé sledování komunikujících stanic dnes řeší velmi citlivý, rychlý a dynamický systém APT. Deformaci vlnoplochy přijímané optické vlny zhoršující energetickou bilanci spoje lze řešit použitím adaptivní optiky. Zvýšení odolnosti spoje proti rušivým vlivům záření pozadí se řeší metodou koherentní optické komunikace. Pro další zvýšení citlivosti přijímače jsou vyvíjeny speciální fotodiody (Geiger-Mode APD).

Není pochyb o tom, že technologie optických bezkabelových spojů je připravena k použití jak ve funkci satelitních, tak mobilních spojů.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumného záměru MSM21630513 a grantových projektů č. 102/05/0571, č. 102/05/0732, č. 102/06/1358, č. 102/04/2080 a č. 102/05/732.

6. Přehled literatury

- [1] WilferT, O. *Complex model of FSO links*. In Proceedings of the 17th International Travelling Summer School on Microwave and Lightwaves (ITSS 2007). Pforzheim (Germany): Pforzheim University. July 7 – 13, 2007.
- [2] Chan, V.,W.S. Free-Space Optical Communications. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 12, p. 4750-4762.
- [3] <http://burro.cwru.edu/Academics/Astr201/Atmosphere/atmosphere1.html>
- [4] Císař, J. *Laser Satellite Communications: Design and Limitations*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 89 s.
- [5] Wilfert, O., Kasal, M. *Interoperabilita optických a družicových spojů*. In Sborník příspěvků celostátní konference Multimediální radiokomunikace. Pardubice 2000, s. 29-48.
- [6] Tolker-Nielsen, T., Oppenhaeuser, G. *Orbit Test Results of an Operational Optical Intersatellite Link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX*. In Preceedings of the SPIE, Vol. 4635, 2002.
- [7] G. Oppenhäuser *A world first: Data transmission between European satellites using laser light*. ESA news, European Space Agency, 22 November 2001. (http://www.esa.int/esaCP/ESASGBZ84UC_index_0.html)
- [8] T. Jono, Y. Takayama, K. Ohinata *Demonstrations of ARTEMIS-OICETS Inter-Satellite Laser Communications*. 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, AIAA-2006-5461, San Diego, California, June 2006.
- [9] Japan Aerospace Exploration Agency, "Successful Optical Communication Experiment between the NICT Optical Ground Station and the Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite", April 2006. (http://www.jaxa.jp/press/2006/04/20060407_kirari_e.html)
- [10] "Another world first for Artemis: a laser link with an aircraft," ESA news, European Space Agency, 18 December 2006. (http://www.esa.int/esaCP/SEMN6HQJNVE_Benefits_0.html)
- [11] Horwath, J., Knapek, M., Epple, B., Brechtelsbauer, M., Wilkerson, B. *Broadband Backhaul Communication for Stratospheric Platforms: The Stratospheric Optical Payload Experiment*. In Proceedinds of the SPIE, Vol. 6304, 2006.
- [12] Henniger, H., Epple, B., Giggenbach, D. *Mobil FSO activities in Europe and fading mitigation approaches*. In Proceedings of the RADIOELEKTRONIKA 2007. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2007.
- [13] http://www.kn.dlr.de/freespaceoptics/papers/2007_KIODO_SPIE_NP.pdf

- [14] Knappek, M., Horwath, J., Perlot, N., Wilkerson, B. *The DLR Ground Station in the Optical Payload Experiment (STROPEX) – Results of the Atmospheric Measurement Instruments*. In Proceedings of the SPIE, Free-Space Communication VI, San Diego, 2006.
- [15] Horwath, J., David, F., Knappek, M., Perlot, N. *Coherent Transmission Feasibility Analysis*. In Free-Space Laser Communication Technologies XVII. Edited by Mecherle, G. Stephen. Proceedings of the SPIE, Volume 5712, pp. 13-23 (2005).
- [16] <http://www.scienceworld.cz>

Otakar Wilfert, Zdeněk Kolka
VUT v Brně
Purkyňova 118
612 00 Brno
e-mail: wilfert@feec.vutbr.cz,
kolka@feec.vutbr.cz
tel: 541 149 130, 148
fax: 541 149 244

Hennes Henniger
German Aerospace Center (DLR)
Oberpfaffenhofen
822 34 Wessling, Germany
hennes.henniger@dlr.de

KOLIK JSOU LIDÉ OCHOTNI ZAPLATIT ZA POSKYTOVANÉ SLUŽBY

Miroslav Zajíček

Anotace

Vývoj cen na českém broadbandovém trhu indikuje velký stupeň konkurence, dramatický růst nabídky a mírný růst poptávky (ale dramatický růst poptávaného množství). Regulační opatření neměly na tento vývoj žádný zásadní vliv. Za poslední čtyři roky došlo k poklesu cen na jednotku konektivity na desetinu až čtyřiceti původních cen. Tento vývoj lze očekávat i do budoucna s tím, že hlavním nositelem poklesu bude zejména rostoucí rychlost připojení, nikoliv již přímý pokles cen za konektivitu jako takovou. Zároveň cenový vývoj již indikuje oddělení „zrna od plev“, tj. perspektivních technologií od těch, které na trhu neuspěly a to dále ukazuje, jak neefektivní stávající regulace ICT sektoru jsou.

Klíčová slova

ADSL, CATV/kabelové televize, broadband, cena za širokopásmový přístup, širokopásmové připojení, UMTS, xDSL, WiFi, CDMA, dokonalá konkurence, konkurence jako proces

1. Úvod

Tento příspěvek je v pořadí již pátým příspěvkem, který mám čest na této konferenci přednést. A možná je to i příležitost poněkud shrnout všechny příspěvky předchozí, neboť ve všech lze nalézt určitou jednotící linii. A touto linií je ekonomický způsob myšlení a pohledu na národní hospodářství a konkrétněji na telekomunikační sektor. Pokud bychom se tedy na předchozí příspěvky přednesené autorem této poznámky od roku 2003 na konferencích Optické komunikace, pak nalezneme určitý příběh – příběh o tom, jak je špatné chápání ekonomických jevů na teoretické rovině přenášeno do roviny národohospodářské teorie a potažmo i praxe. Tato poznámka je pak pokračováním celého příběhu, resp. jeho doplněním o data, která zatím nebyla ve své totalitě prezentována.

2. Úloha cen

V minulých prezentacích jsem argumentoval a na základě reálných dat dokazoval (snad dostatečně) platnost následujících tvrzení:

1. Klíčovou ekonomickou veličinou je cena – je to nejenom efektivní nástroj pro přenos relevantních informací pro činnost všech ekonomických subjektů, ale i zásadní motivační faktor. Jakákoliv jejich regulace je vysláním špatného a matoucího signálu ekonomickým subjektům, což způsobuje neefektivnosti v ekonomickém systému, jejichž dopady zpravidla není ani možné dohlédnout.
2. Aby nedocházelo k motivačním selháním, je nutné vždy dodržovat vlastnická práva. Jakékoliv jejich porušení způsobuje změny v motivacích ekonomických

subjektů, což má nepříznivé dopady zejména do dlouhodobých a nákladných činností (zejména tedy v oblasti investiční výstavby).

3. Chápání trhu, tj. vzájemné substituovatelnosti jednotlivých produktů musí být co nejširší. Pokud je užší, je možné vždy nalézt zdánlivě existující monopoly či dominantní postavení některých firem a to i v odvětví, která jsou plně konkurenční. Chybné chápání konkurence pak může způsobit zcela chybnou regulační a zejména antimonopolní politiku.

3. Dokonalá konkurence vs. konkurence jako proces

K těmto klíčovým tezím z minulých vystoupení bych rád dodal ještě několik dalších. Zprvée, je nutné zde vysvětlit, že ekonomická teorie není zcela zajedno, co se míní pod pojmem konkurence. V zásadě existují dva pohledy – statický a dynamický. Paradoxně je ten statický pohledem, který ve stávající ekonomické teorii převažuje. V tomto pohledu hraje klíčovou roli teorie tzv. dokonalé konkurence, jejímž účelem bylo vysvětlit zejména tvorbu cen a efektivitu tržního systému. Bohužel tato teorie se postupem času dostala na scestí a to zejména proto, že při snaze vysvětlit cenu začala být stavěna na zcela nerealistických předpokladech, které v dnešní podobě lze shrnout následovně:

1. Existuje nekonečné (nebo alespoň dostatečně velké) množství jak spotřebitelů, tak i producentů;
2. Všichni spotřebitelé i producenti jsou tzv. price-takers (svou poptávkou nebo nabídkou nemohou ovlivnit tržní cenu);
3. Všechny ekonomické subjekty mají dokonalé informace;
4. Neexistují transakční náklady;
5. Všichni spotřebitelé a producenti jsou vzájemně zastupitelní a jsou stejní (tj. mají stejné nákladové a užitkové funkce);
6. Výrobci produkují vzájemně zaměnitelný výrobek, který nelze z hlediska spotřebitele nijak od sebe rozlišit.

Za těchto okolností teorie tvrdí, že cena odpovídá tzv. mezním nákladům a dílčí a celkové rovnováhy mají všechny velmi příjemné vlastnosti počínaje alokační a konče tzv. distribuční efektivitou.

Problém celého modelu je ten, že pokud nejsou splněny všechny zmíněné předpoklady, pak tyto vlastnosti splněny nejsou a model se dostává o oblasti suboptimality, neboli vzniká tzv. tržní selhání. A v reálném životě zmíněné předpoklady nejsou splněny prakticky nikdy. Jinými slovy, v reálném světě je tržní uspořádání suboptimální. Na tomto místě se nebudu pouštět do diskuse o tom, že podobné úvahy jsou nazývány tzv. omylem nirvány, tj., že i kdyby reálný trh byl suboptimální, pak musíme porovnávat reálné s reálným a „ideál“ dokonalé konkurence je ideálem, jehož není možné nikdy dosáhnout a proto, pro praktickou hospodářskou politiku nemá příliš velký význam. Pro tu by mělo význam pouze srovnání reálných alternativ a institucionálních uspořádání.

Nicméně problém teorie dokonalé konkurence je ještě mnohem hlubší. A to ten, že se jedná nejenom o nerealistický model (ostatně všechny modely jsou do určité míry nerealistické – jinak by nebyly operacionalizovatelné), nýbrž že tento model se především snaží zodpovědět špatnou otázku. Ve skutečnosti není problémem, jak vysoká/nízká je cena. Problémem je zejména to, jakou má cena úlohu. A na to nám ekonomická teorie dává jednoznačnou odpověď – již jsme řekli, že

přenáší informace. Jenomže v modelu dokonalé konkurence by pro tento nástroj nebylo místa. Již v samotných předpokladech totiž je určeno, že všechny tržní subjekty vědí všechno – tedy, že mají všechny relevantní informace k dispozici. Proč by tedy kdokoliv v tomto modelu potřeboval cenu, jako informační zdroj. Tento logický rozpor v teorii dokonalé konkurence (tj. vysvětluje velikost něčeho, co vlastně ani pro vlastní existenci nepotřebuje) není možné nijak překlenout. Proto existuje (poněkud menšinová) dynamická teorie konkurence někdy nazývaná jako teorie konkurence jako procesu. Jejími tvůrci jsou dva ekonomové se silnými středoevropskými a částečně také českými kořeny – Joseph Schumpeter a Friedrich August von Hayek. Tito ekonomové ve svých úvahách dospěli k logickému závěru z úvah o roli ceny v ekonomickém systému a z úvah o reálném konání lidí na trhu. Pokud cena plní informační roli, pak musí sloužit k tomu, aby překonávala nějaký problém – problém naší neschopnosti mít všechny relevantní informace, případně velké nákladnosti je vyhledávat a vyhodnocovat. A konkurence je proces, který slouží k vyhledávání řešení reálných situací s omezenými informacemi za pokud možno co nejnižších nákladů. Cena tak není cílem vysvětlení ekonomické teorie, nýbrž nástrojem.

Pokud bychom to tedy shrnuli, z hlediska většinové neoklasické mikroekonomie je konkurence proces, ve kterém k jeho perfektnímu fungování nutně potřebují všechny informace (proto jsou nutné předpoklady nulových transakčních nákladů, dokonalé a beznákladové informovanosti). Tento proces vede k tržním cenám na úrovni mezních nákladů v případě dokonalé konkurence – tj. cena je výsledkem konkurenčního procesu. Naopak z hlediska Hayeka (a jeho pozdějších následovníků¹) naopak cena je prostředkem, díky kterému v procesu konkurence dochází k eliminaci problému nedostatečných informací tou nejméně nákladnou cestou (tj. při minimalizaci transakčních nákladů). Obě teorie jsou vzájemně protichůdné a jakoby jsou navzájem postavené na hlavu.

A zejména mají obrovsky rozdílné dopady na národohospodářská doporučení. Jestliže podle teorie dokonalé konkurence platí, že odchýlení se od předpokladů je důvodem pro regulační zásahy s cílem vylepšit stav směrem k ideálu dokonalé konkurence, pak procesní teorie konkurence indikuje, že absolutním tabu hospodářské politiky je zásah do cenového systému.

Podle teorie konkurence jako procesu totiž platí, že žádná cena není „nesprávná“. Vždy nese s sebou informaci o tom, co se děje na trhu – i když to někdy nemusí být informace příjemná. Avšak problém není možné vyřešit zastřelením nositele špatných zpráv (tedy regulací).

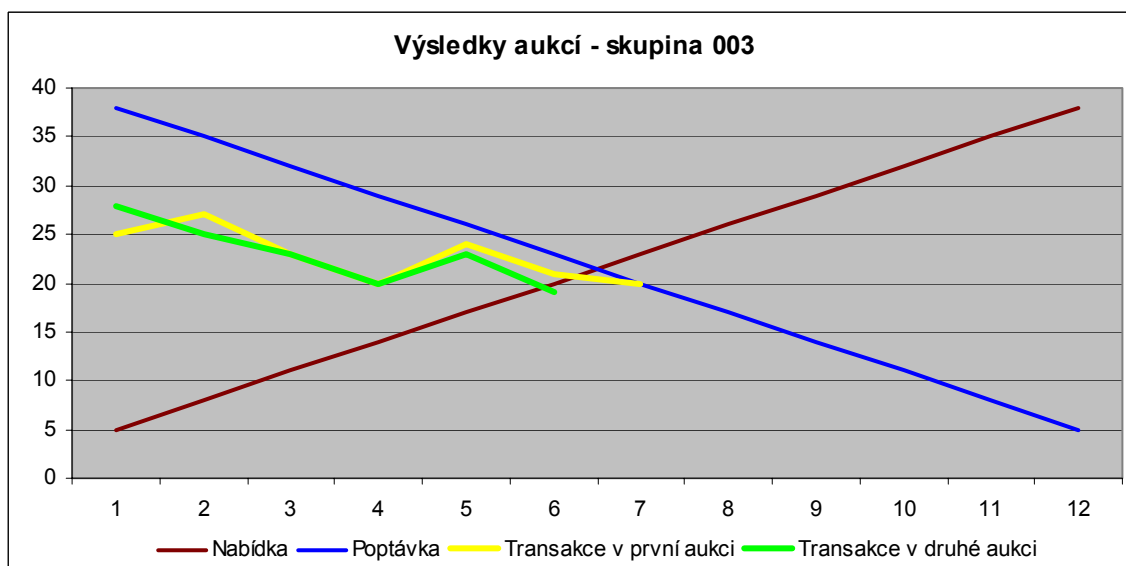
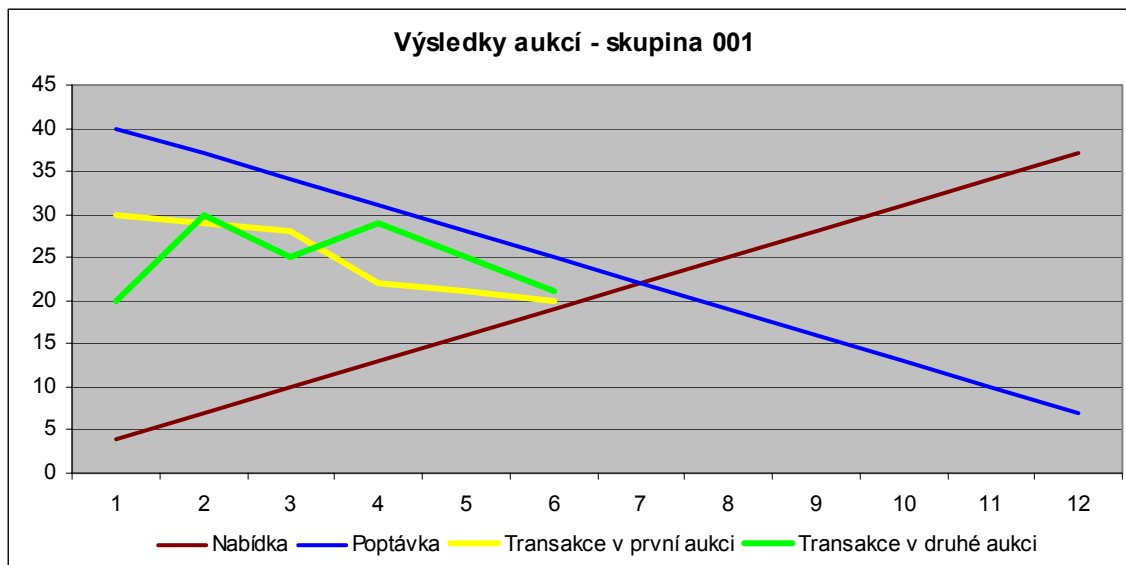
4. Experimenty v ekonomii

Zajímavou indikaci, která z těchto teorií je správná poskytl v 60. letech ekonom Vernon Smith, který provedl experiment, kdy skupinu studentů nechal sehrát dvojitou aukci o imaginární výrobek s tím, že část z nich hrála producenty (měli určeny své náklady) a část studentů hrála spotřebitele (měli určeny ochotu zaplatit). Tyto studenty podle velikosti maximalizace zisku nebo užítku pak vyplácel zcela neimaginárními penězi. Při sestavování experimentu porušil všech předpoklady dokonalé konkurence. Na každé straně trhu byly jenom tři subjekty, navzájem se jejich poptávkové a nabídkové křivky lišily, nikdo kromě svým poptávkových a nabídkových křivek neměl ani tušení o tvaru ostatních křivek.

¹ Ale nejenom jich – k podobným závěrům dochází např. i Vernon Smith se svojí experimentální ekonomikou).

Smithova predikce (na základě teorie dokonalé konkurence) byla, že studenti nemohou dospět do konkurenčního optima a to ani z hlediska ceny ani z hlediska množství. K jeho velkému překvapení studenti bez problémů do optima dospěli. A hlavním důvodem bylo, že reagovali na jedinou informaci, kterou měli k dispozici – na cenu².

S několika skupinami studentů (kteří neměli nejmenší tušení o tom, proč experiment provádíme) jsem výsledky V. Smithe zreplikoval a to v říjnu letošního roku. Výsledky byly v podstatě stejné – viz grafy.



Důvodem celého pojednání o cenách je snaha dokázat, že je informací, kterou je nutné na trhu nejenom brát v úvahu, ale také zdrojem velmi zajímavých informací o trhu samém. Přesto, že se téměř nikdy nenachází v optimu na střetu nabídky

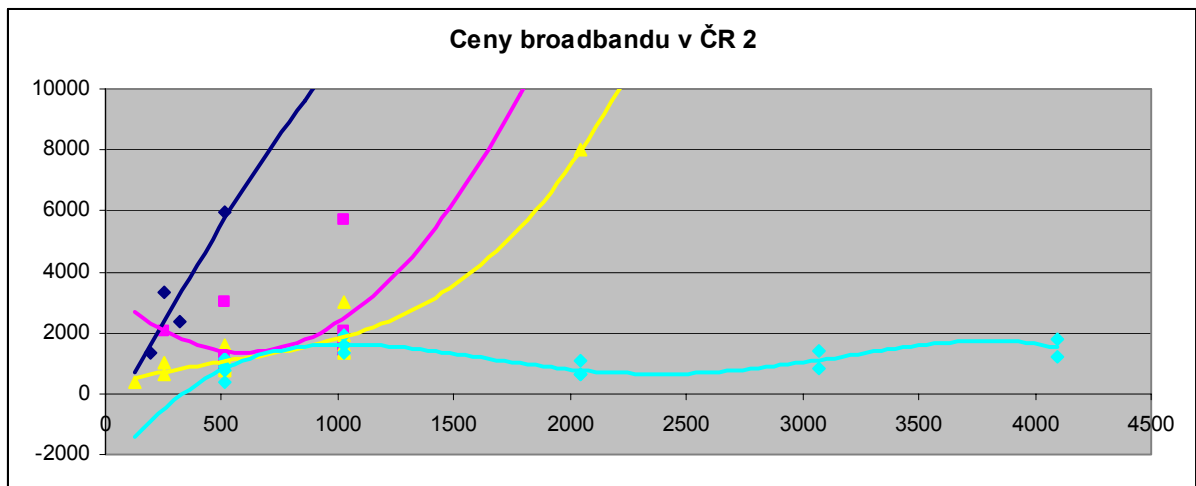
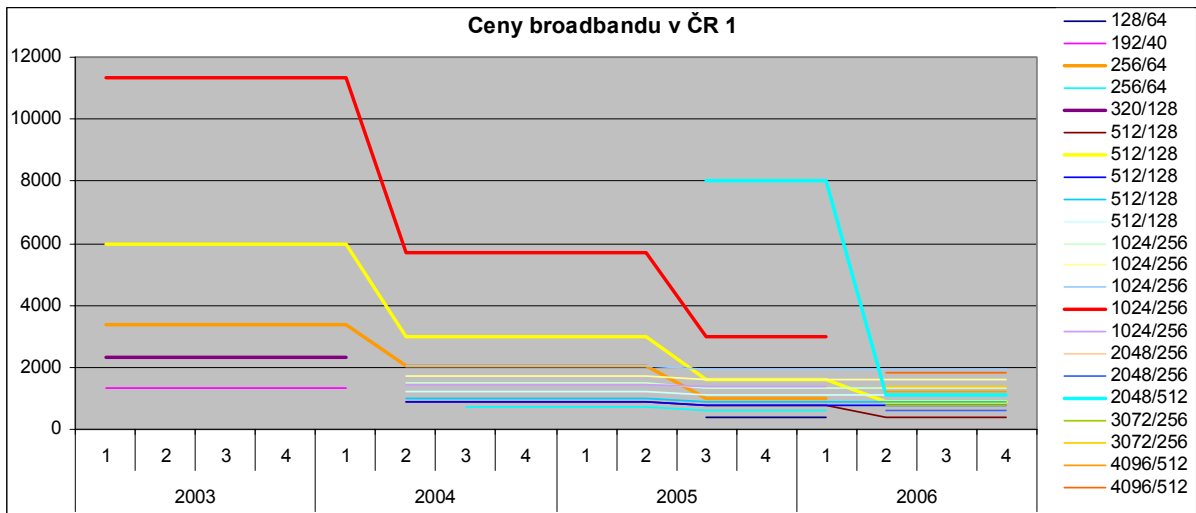
² Mimochodem, tento experiment založil nový vědní obor – experimentální ekonomii a za její rozvoj dostal Vernon Smithe v roce 2001 Nobelovu cenu za ekonomii.

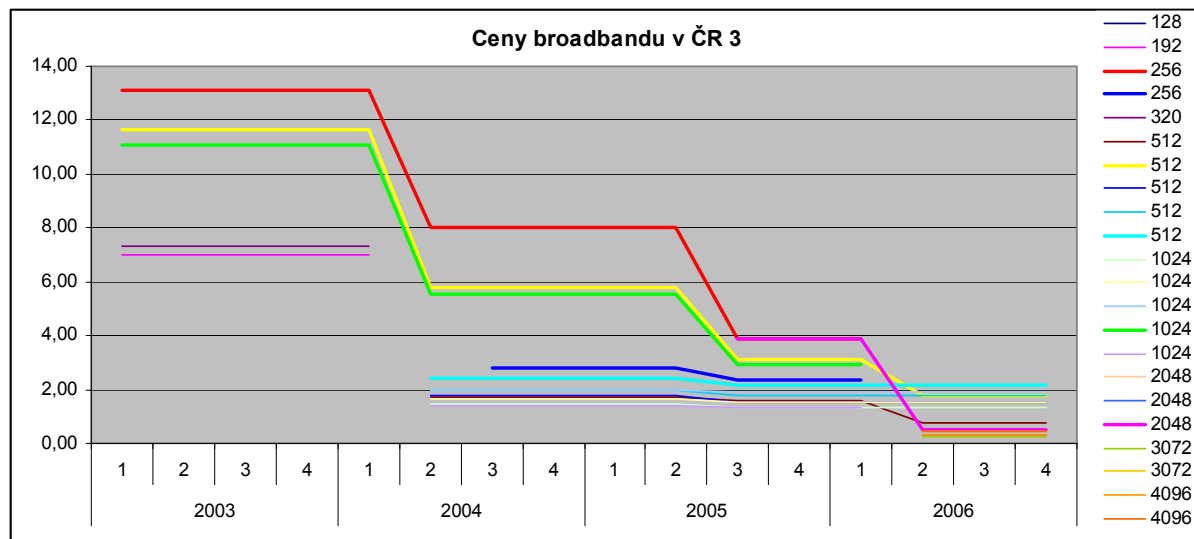
a poptávky, její pohyby mají tendenci k optimu směřovat i když to se neustále mění. Trochu tento proces připomíná snahu dohonit neustále se pohybující terč. A z pohybů ceny je možné leccos o trhu vyčíst – a to jak o minulosti, tak i o představách všech tržních hráčů o budoucnosti.

Pokud např. dojde k růstu ceny, pak vysvětlení může být dvojitý – buď vzrostla poptávka nebo poklesla nabídka. Rozlišovacím znakem je pak to, co se stane s objemem trhu – pokud poklesne, pak se jedná o pokles nabídky a naopak pokud vzroste, pak se jedná o růst poptávky. Samozřejmě není vždy situace tak jednoznačná jasná, nicméně pohybů cen lze vždy získat zajímavé informace.

5. Vývoj cen broadbandu v ČR

Jak se tedy českého broadbandového připojení vyvíjely? V zásadě lze jejich vývoj zobrazit na následujících dvou grafech.





V grafech jsou zobrazeny ceny za připojení prostřednictvím technologie ADSL, CATV a CDMA. U ostatních technologií se historický vývoj cen se vývoj nijak dramaticky neliší.

6. Závěry

Z výše uvedených grafů (a grafů a dat z minulých prezentací) lze odvodit následující závěry:

1. V průběhu času klesají ceny dramaticky; pokud bychom si zvolili za srovnávací jednotku cenu za jednotku konektivity konečného zákazníka, pak ceny klesly v některých případech až čtyřicetkrát! V těch nejméně výhodných variantách pak sedmkrát. Lze bez nadsázky říci, že trh broadbandu patří k trhům s nejrychleji klesajícími cenami. Rozhodně tato situace neindikuje ani existenci ani zneužívání monopolního či dominantního postavení jedné firmy (což je dodatečný argument k argumentům prezentovaným na minulé konferenci ohledně správné definice relevantních trhů). Z tohoto hlediska je vlastně název příspěvku nepřesný – místo názvu „Kolik jsou vlastně lidé ochotni zaplatit za poskytované služby“ by se celý příspěvek měl spíše jmenovat „Za kolik jsou poskytovatelé ochotni je poskytovat“ nebo spíše „Jaké informace o trhu nám nese vývoj cen v oblasti broadbandu“.
2. Z vývoje cen a zároveň z vývoje velikosti trhu (a zejména substitučního vztahu mezi narrowbandem a broadbandem – viz opět příspěvek na konferenci OK 2006) lze odvodit, že hnacím motorem poklesu cen je poměrně ostrá konkurence na trhu (tj. růst nabídky), neboť trh jako celek sice roste ale mnohem méně intenzivně než klesají ceny. Větší část růstu trhu je vyvolána právě poklesem cen a nikoliv růstem poptávky. Jinými slovy – roste zejména poptávané množství – samotná křivka poptávky se posouvá mnohem pomaleji.
3. Nabídka roste nejenom díky existujícím subjektům na trhu, nýbrž zejména díky nově vstupujícím subjektům (zejména se jedná o CDMA síť O2, nové služby T-Mobile na síti TTD UMTS, nové provozovatele Wi-Fi (dnes je v ČR kolem 900 set provozovatelů) a vstup čtvrtého operátora U:FON se sítí CDMA).

4. Ceny za vyšší rychlosti klesají rychleji (strmost křivky v druhém grafu klesá) a tento trend podporuje přechod ke kvalitnějšímu připojení pro stávající uživatele, ale i přechod spotřebitelů ze segmentu narrowbandu k broadbandu (což je ta samá změna, ale pokud si definujeme trh broadbandu samostatně, pak se jedná o rozšíření trhu jako takového).
5. Migrace od nižších k vyšším rychlostem se projevuje také na technologické bázi, neboť některé druhy připojení k internetu prakticky odumírají – Dial-up, ISDN, GPRS.
6. Pokud jde o ceny Wi-Fi připojení, pak tyto nejsou zahrnuty v existujících grafech, ale je možné sumarizovat, že za poslední čtyři roky je průměrný pokles cen za připojení (při konstantní rychlosti, přičemž průměrné rychlosti připojení také poměrně dramaticky rostou) cca 16%. Tato čísla vycházejí z RT Auditu, což je rezidenční výzkum, kterého se zúčastní panel cca 2500 domácností. Z tohoto počtu je cca 360 domácností připojeno přes Wi-Fi. Výzkum probíhá formou sběru dat z účtů za telekomunikační služby – tj. získávají se skutečně placené sumy, nikoliv sumy deklarované (což je rozdíl od dat prezentovaných v grafech, které by bylo nutné snížit o promo akce atd.). Pokud jde o celkový pokles, pak se jedná cca o 15% ročně, tj. zhruba podobně jako u části trh připojení prostřednictvím Wi-Fi.
7. Z výše řečeného (ve vazbě na prezentaci v roce 2006) vyplývá indikace, že skutečně všechny typy broadbandového připojení jsou substituty a jako takové jsou nejenom spotřebiteli, tak i jejich poskytovateli vnímány.
8. V cenové oblasti se objevují inovativní cenové strategie, které vyplývají jak z celkového vývoje trhu, tak zejména z postavení jednotlivých subjektů na trhu a z jejich marketingových strategií. To je další ukázka živosti trhu, i když to značně komplikuje analýzu. Pokud bychom tyto strategie shrnuli, pak se jedná zejména o bundling služeb (O2, T-Mobile, ale i Wi-Fi operátoři), tak zejména o snahu získat tržní niky (např. skupinu dosud váhajících uživatelů dial-up nebo GPRS – viz třeba jedna z produktových řad UFON).
9. Při detailnějším pohledu na data lze zjistit, že došlo ke změně tržní dynamiky – předtím určoval dění na trhu O2 se svojí nabídkou, na kterou ostatní reagovali. Dnes se situace obrátila – určující silou na trhu jsou kabelové televize a Wi-Fi operátoři, na jejichž produktové řady O2 a další reagují.
10. Role čistě mobilních operátorů, kteří vsadili na evropské technologie UMTS (T-Mobile a Vodafone) je na trhu broadbandu stále mizivá. Operátoři, kteří vlastní síť s technologiemi postavenými na CDMA jsou mnohem dynamičtější, i když jejich podíl stále není vysoký, což je ale způsobeno zejména a) u O2 tím, že se jedná o integrovanou společnost, kde CDMA síť není preferovanou technologií, b) operátor U:FON se na trhu pohybuje pár měsíců. Nicméně už jeho vstup značně oživil aktivitu O2 v oblasti zanedbávané sítě CDMA.
11. Z výše řečeného vyplývá, že se jasně začíná ukazovat, které technologie jsou v dnešní situaci perspektivní pro broadband – tedy xDSL, Wi-Fi a CDMA. Ačkoliv u dvou z nich platí, že nebyly nikdy pro účely toho, k čemu jsou používány vytvářeny ani zamýšleny. Naopak technologie typu UMTS (HSPDA) a FWA jsou odsouzeny k postupnému úpadku – z cenových důvodů., neboť jsou příliš drahé. Pokud jde o WiMAX nebo optické sítě, pak zatím minimálně z ČR není dostatek dat. U exotičtějších technologií (např. OFDM) zatím brání stávající regulace využití spektra k jejich vyzkoušení u nás.

12. Opět se ukazuje, že stávající management EMS je extrémně zastaralý, neefektivní a nákladný. Stejně tak regulace trhu ADSL, byť v ČR ne tak dramatická jako jinde v Evropě) nijak nepřispívá k tomu, aby se trh broadbandu rozvíjel. Velkou chybou by bylo stávající regulace broadbandového trhu, které zatím ničí „jenom“ jeho ADSL část aplikovat i na další existující části (CATV) nebo dokonce na části se rozvíjejí, což je zejména oblast optických sítí.

Ing. Mgr. Miroslav Zajíček, MA
Vysoká škola ekonomická
Katedra ekonomie a Katedra hospodářských dějin
Nám. W. Churchilla 4
130 67 Praha 3
tel.: 224095339
fax: 224930
e-mail: miroslav.zajicek@libinst.cz



PROFiber[®]
N E T W O R K I N G

Realita měření pasivních optických sítí EPON, GPON



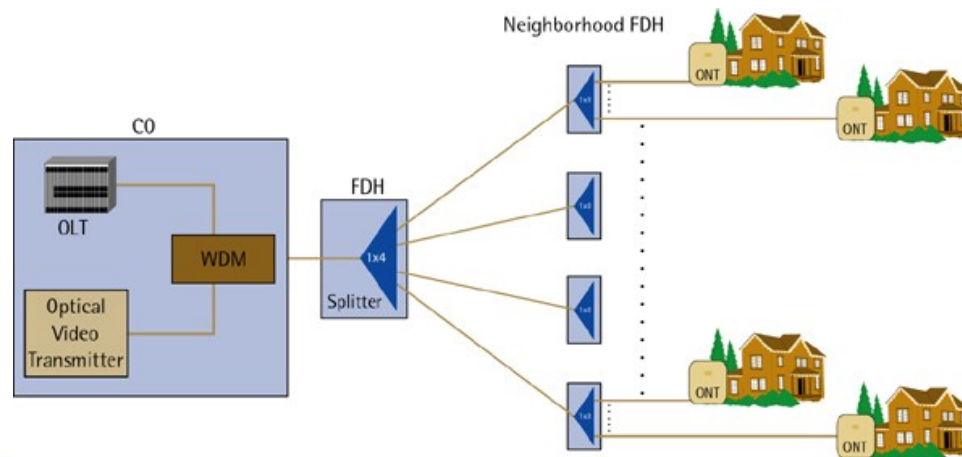
Jan Brouček, Pavel Kosour
Optické komunikace, Praha 2007

Realita měření PON

Zkušenosti skupiny PROFiber (dříve MIKROKOM) s měřením PON:

- v prvním nasazení GPON na Slovensku
- v sítích kabelové televize (HFC hybridní opticko-koaxiální sítě)
- v přípravě projektů EPON, GPON v České republice a na Slovensku

Know-how našich dodavatelů EXFO (měřicí technika), ALLOPTIC (EPON technologie)



EPON vs. GPON

GPON

- Definována ITU-T G.984.1-.4
- Instalace od r 2006
- Využívá rámcování GEM: Ethernet začleněn do synchronních rámců pomocí GFP
- Přenosová kapacita 2.5Gbps
- splittery 1:64 (1:128)

EPON

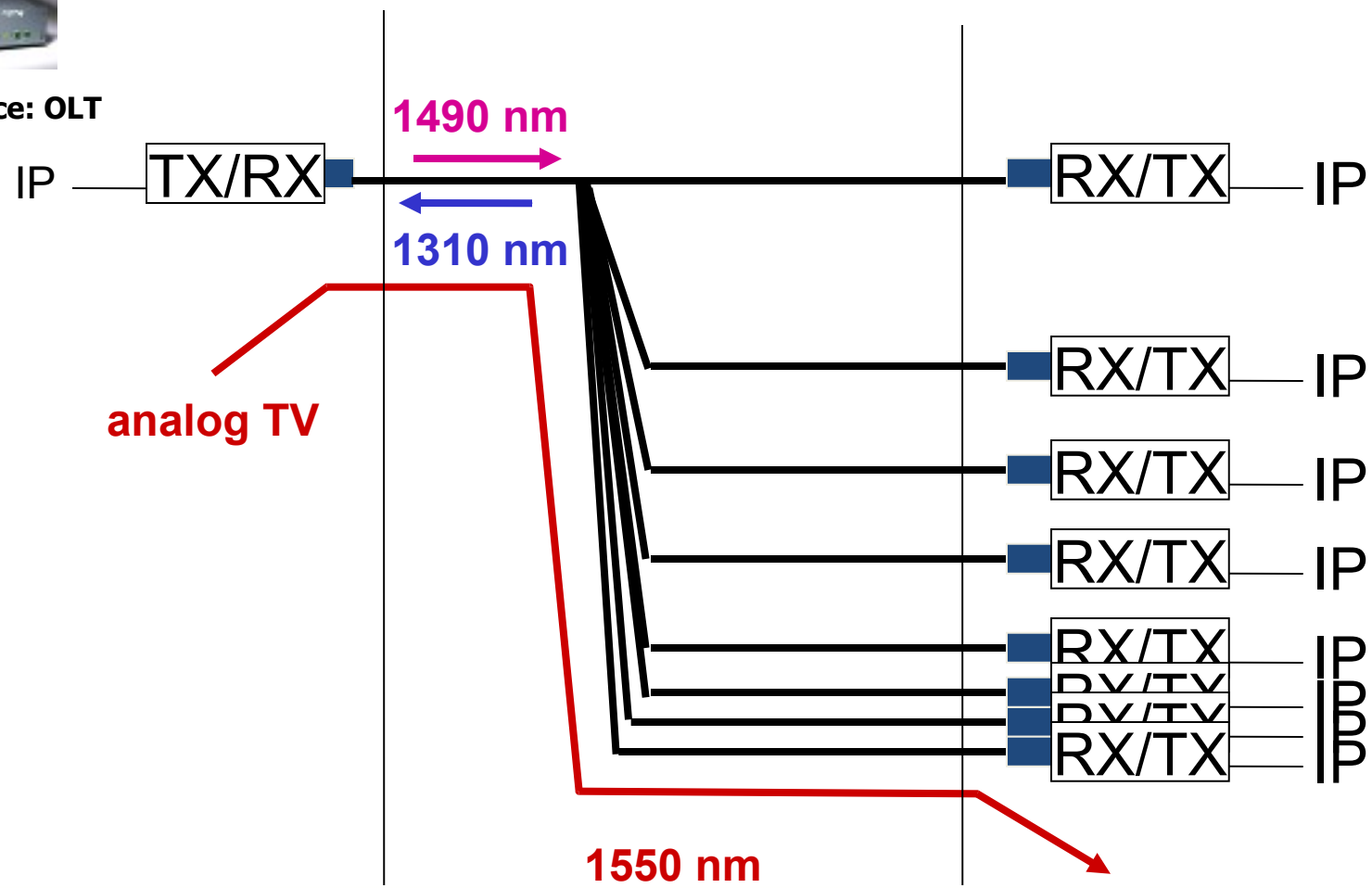
- Definována IEEE 802.3ah
- Instalace od r 2001
- Založena na Ethernet protokolu
- Přenosová kapacita 1 Gbps (migrace na 10 Gbps v r. 2007)
- splittery 1:32 (1:64)

FTTx PON



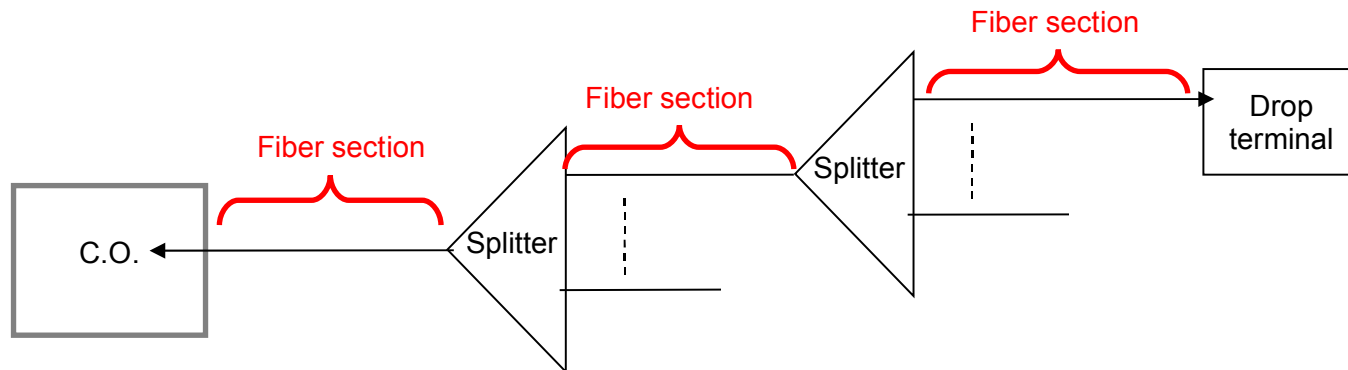
Central Office: OLT

ONU/ONT



Topologie sítě FTTx PON

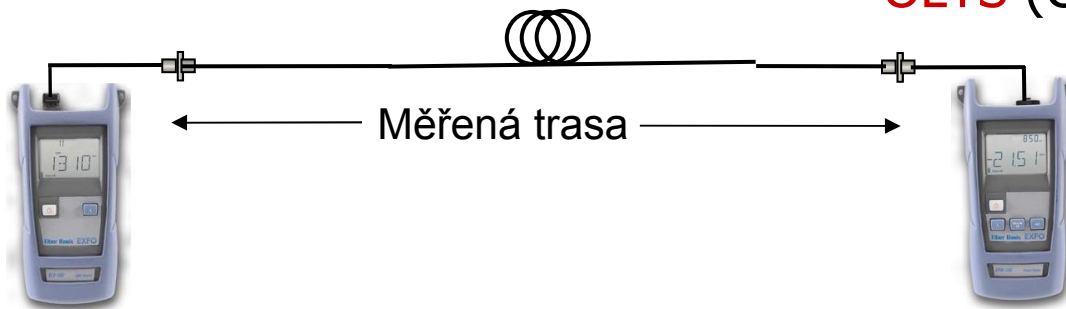
- jednoduchá (1:32, 1:64) nebo dvojitá hvězda (1:8 - 1:8)
- měření po segmentech
- propojení segmentů konektory vs. svary/mechanickými spojkami



Typy měřících metod

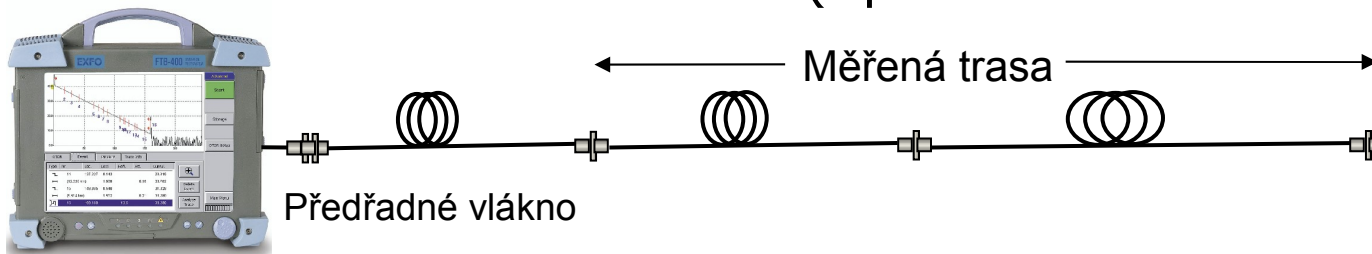
- Transmisní - Přímá metoda (zdroj záření + měřidlo výkonu)

OLTS (Optical Loss Test Set)



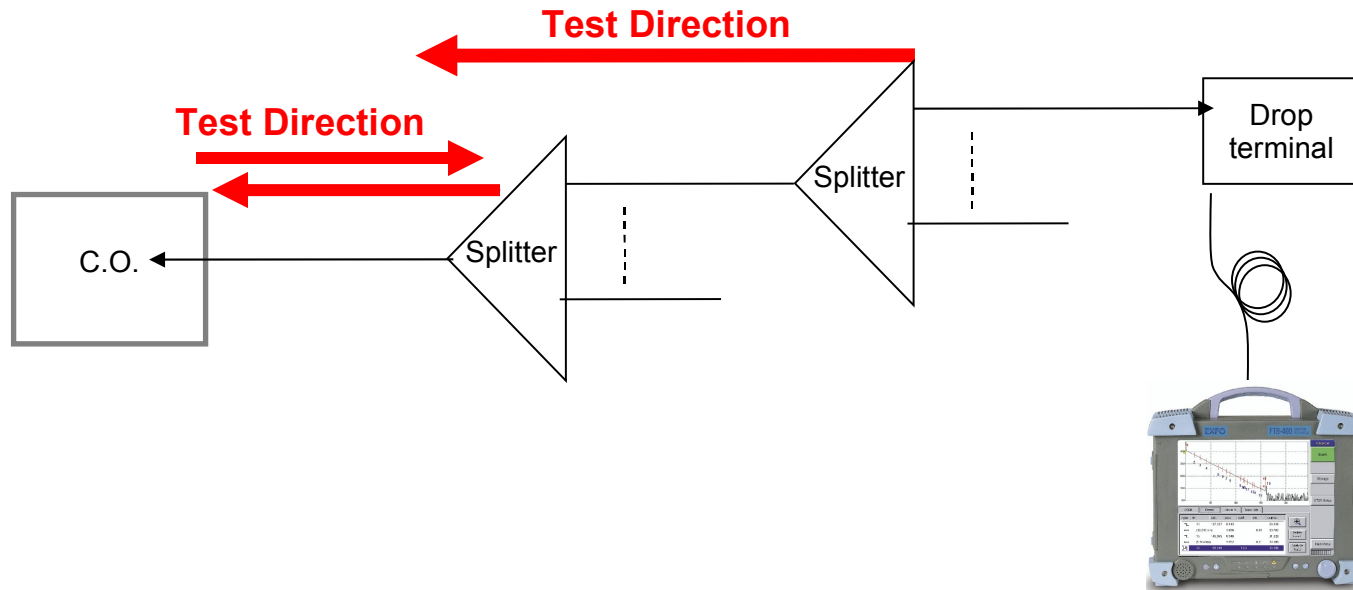
- Reflektometrická metoda (reflektometr)

OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)



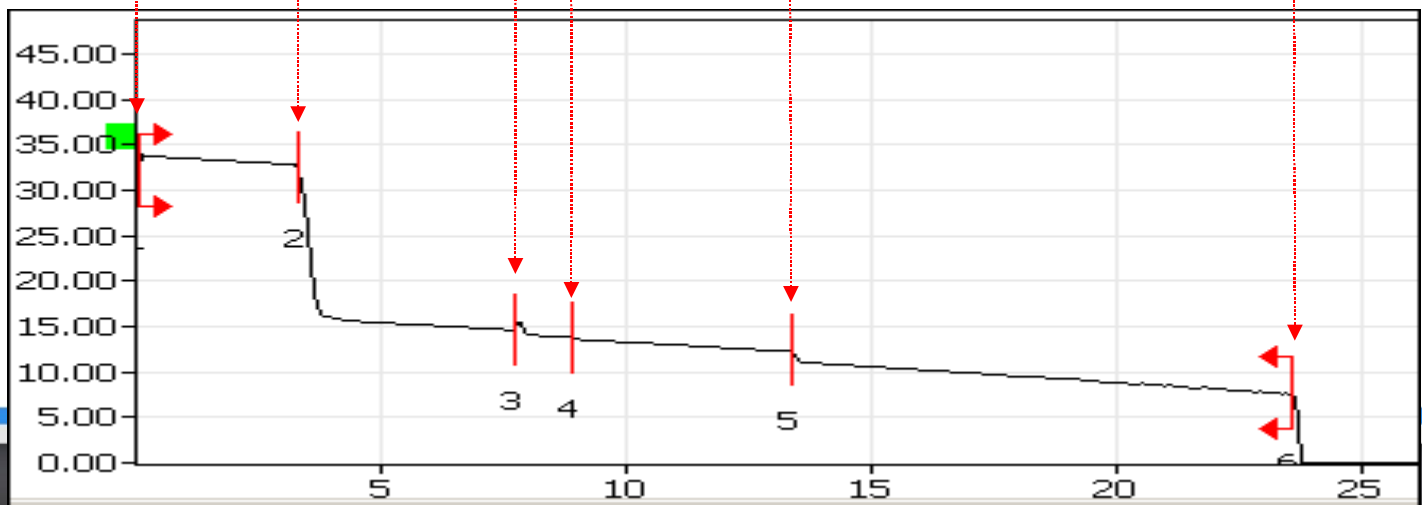
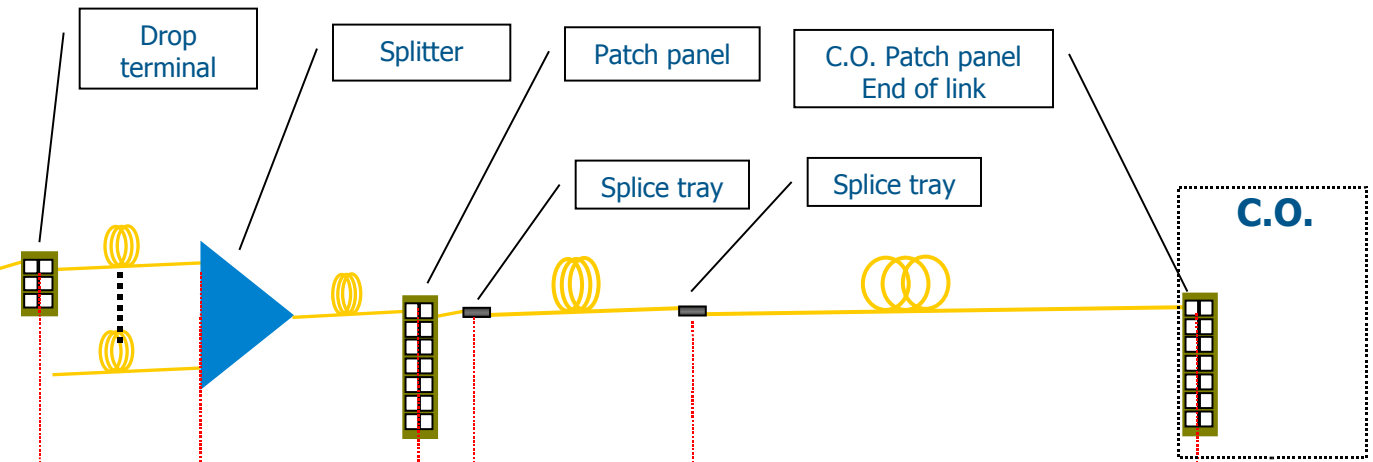
Měření při výstavbě optické sítě FTTx

- měření po segmentech (krátký pulz)
- měření celé trasy ONT→OLT přes splitterry



OTDR – PON

Měření celé trasy přes splitterry ve směru upstream



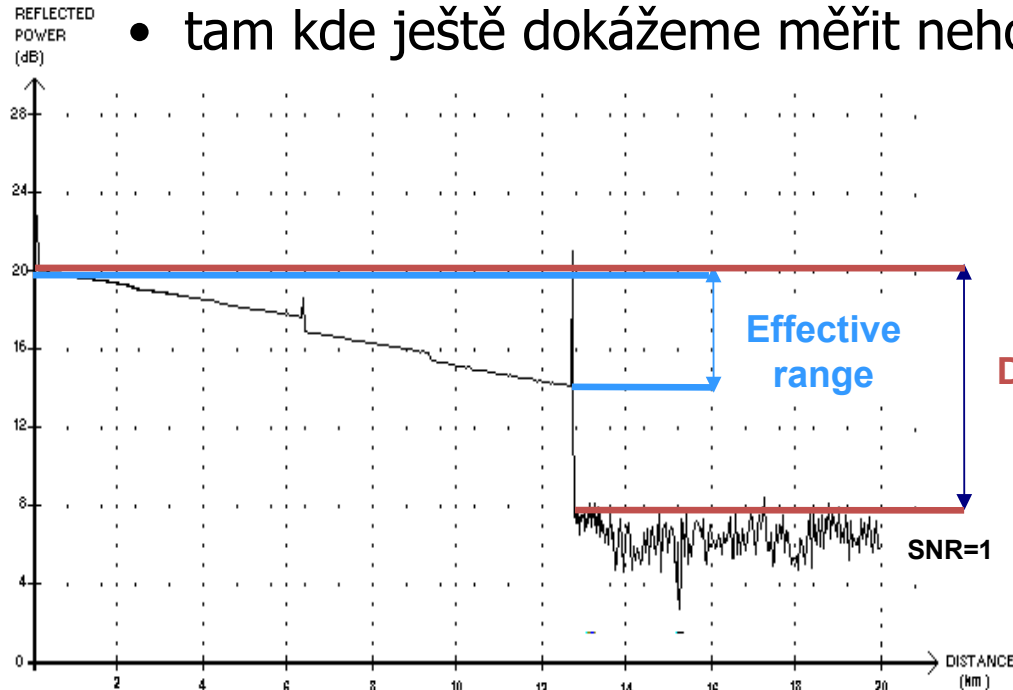
Dynamický rozsah, efektivní dynamický rozsah

Dynamický rozsah (dB)

- rozdíl mezi navázanou úrovní signálu a úrovní šumu

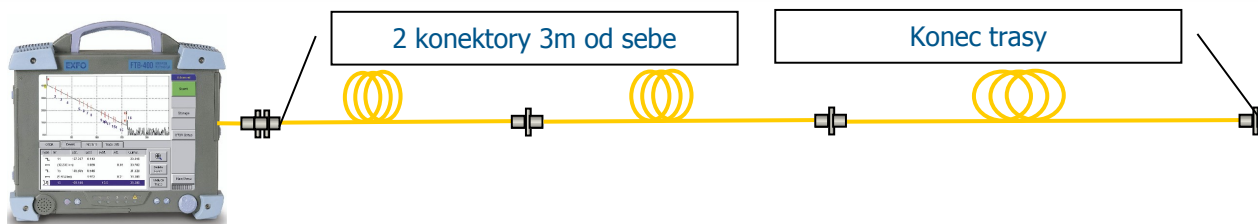
Efektivní dynamický rozsah (dB)

- tam kde ještě dokážeme měřit nehomogenity na reflektogramu

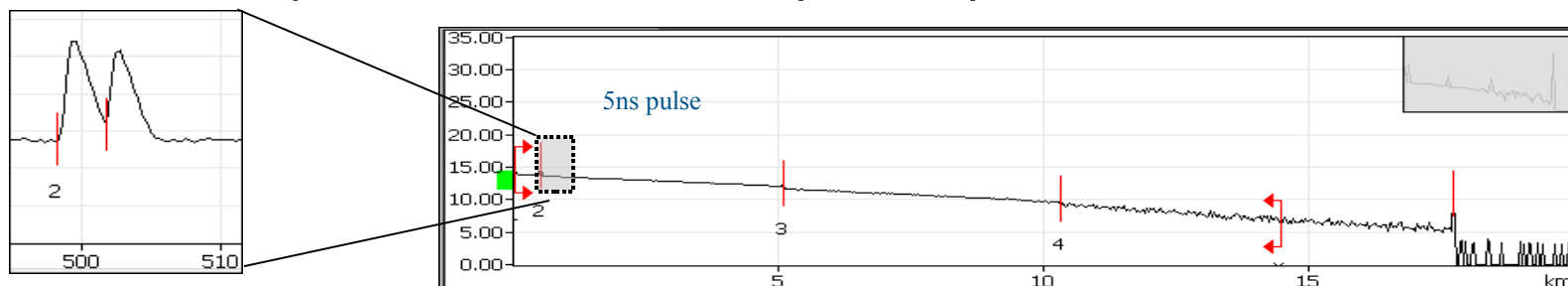


**Effective dynamic range
= Dynamic range – 8dB**

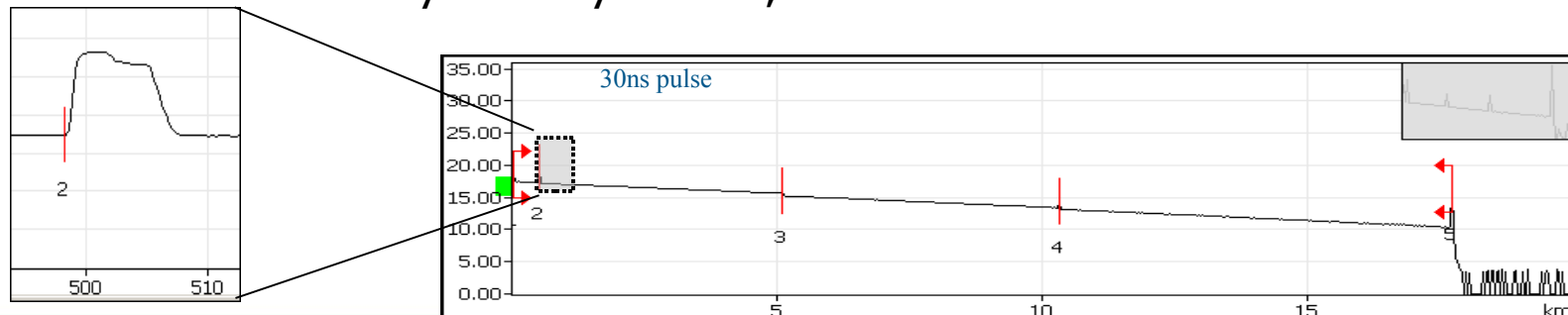
Jakou šířku pulsu zvolit?



Puls 5ns – lepší mrtvá zóna, menší dynamický rozsah

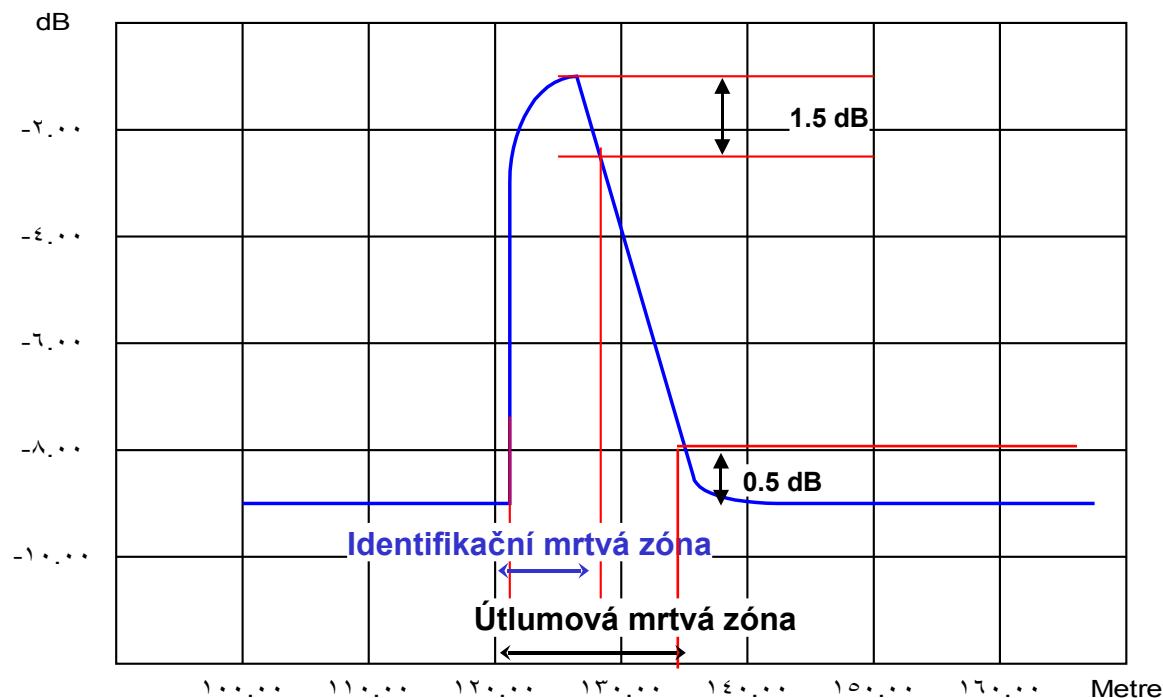


Puls 30 ns – větší dynamický rozsah, horší mrtvá zóna



Mrtvá zóna OTDR

- Mrtvá zóna vzniká u odrazných nehomogenit na trase
- Zpět odražené světlo způsobí saturaci detektoru – „částečné oslepení“
- Nehomogenity umístěné bezprostředně za odraznou nehomogenitou nejsou detekovány
- Velká mrtvá zóna vzniká v místě připojení OTDR → použití předřadného vlákna



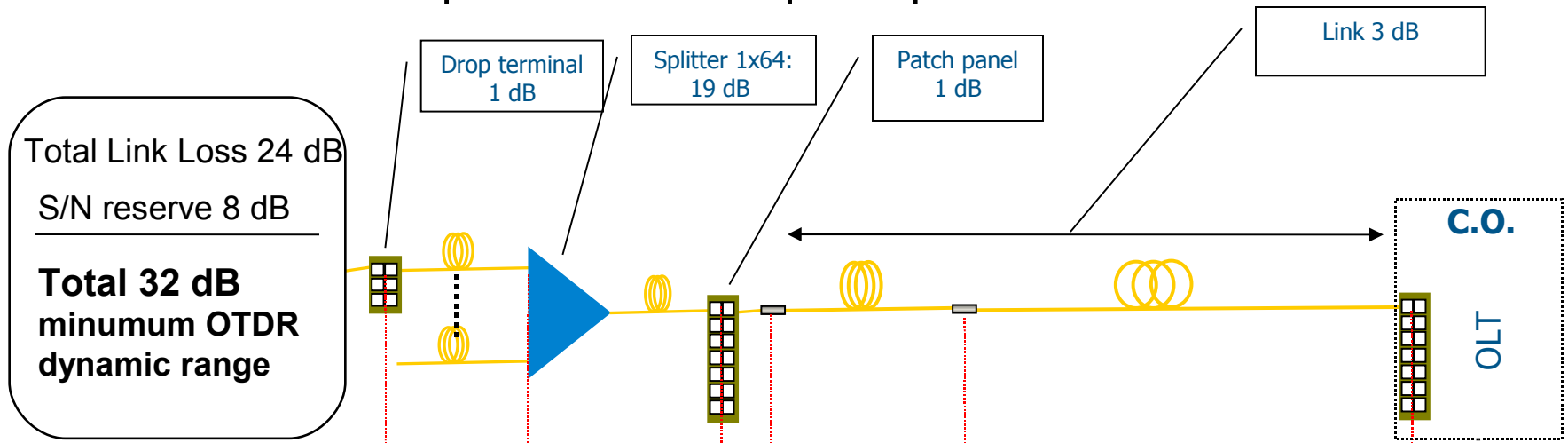
Jakou šířku pulsu zvolit?

– příklad OTDR 42dB@1310nm

délka měřicího impulsu [ns]	délka mrtvé zóny v místě připojení přístroje [m]	dynamický rozsah [dB]	doporučená délka předřadného vlákna [m]
10	30	9,7	100 m
30	50	12,1	200 m
100	70	21,0	
275	100	24,1	500 m
1 000	200	27,3	
2 500	400	30,0	1 000 m
10 000	1 200	40,0	2 000 m
20 000	2 300	42,9	3 000 m

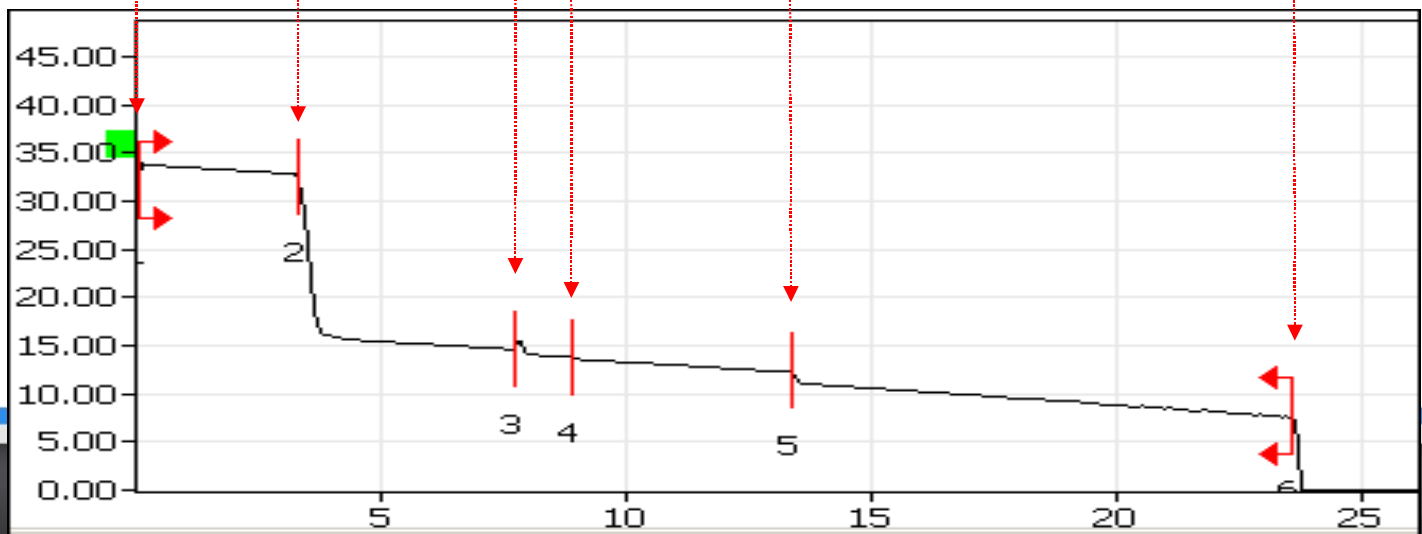
Jaký dynamický rozsah musí mít PON OTDR ?

Upstream měření přes splitter 1 x 64:



Total Link Loss 24 dB
 S/N reserve 8 dB

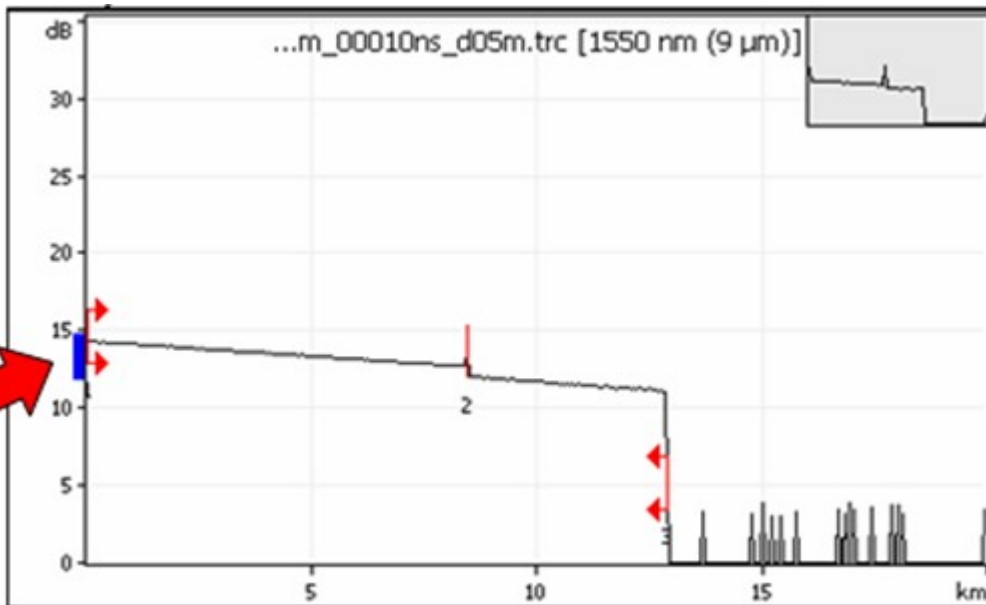
Total 32 dB
 minimum OTDR
 dynamic range



Poškozený / špinavý konektor snižuje dynamický rozsah

Indikace navázaného výkonu OTDR

- Při špatném navázání
 - vizuálně zkontrolovat konektor (videomikroskopem)
 - Vyčistit nasucho (1-2 krát)
 - Vyčistit isopropylem (3. pokus)



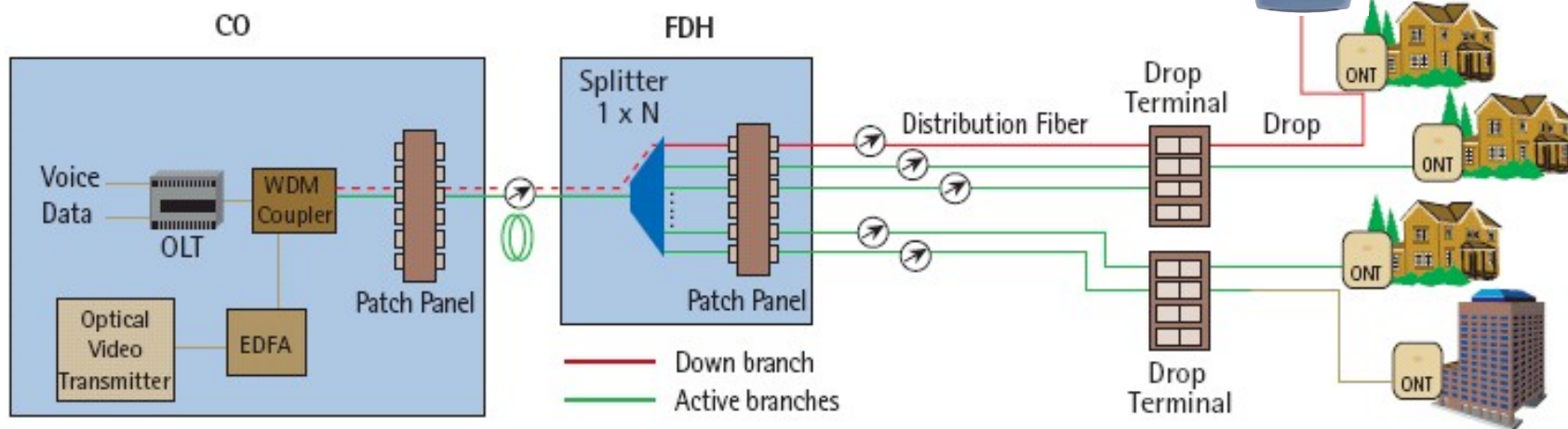
FTB-200

Zaměřování poruch na síti za provozu

Měření OTDR 1625 nm (1650 nm) na živém vlákně

Lokalizace:

- *zlomených vláken*
- *ohybů, mikroohybů*
- *špatných svarů, konektorů*



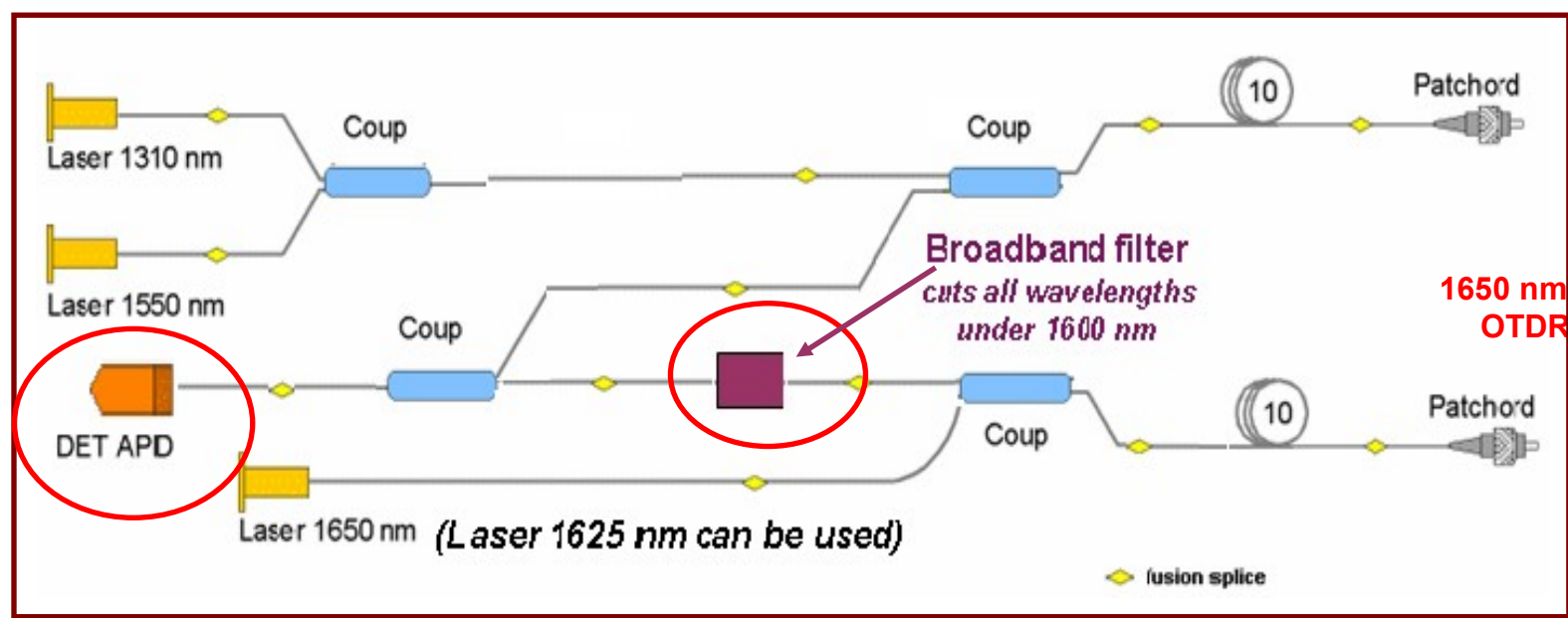
"In-Service" PON troubleshooting using filtered 1625nm

Měření OTDR 1625 nm s filtrem

OTDR 1310/1550 + OTDR s filtrem 1625 nm (nebo 1650 nm)

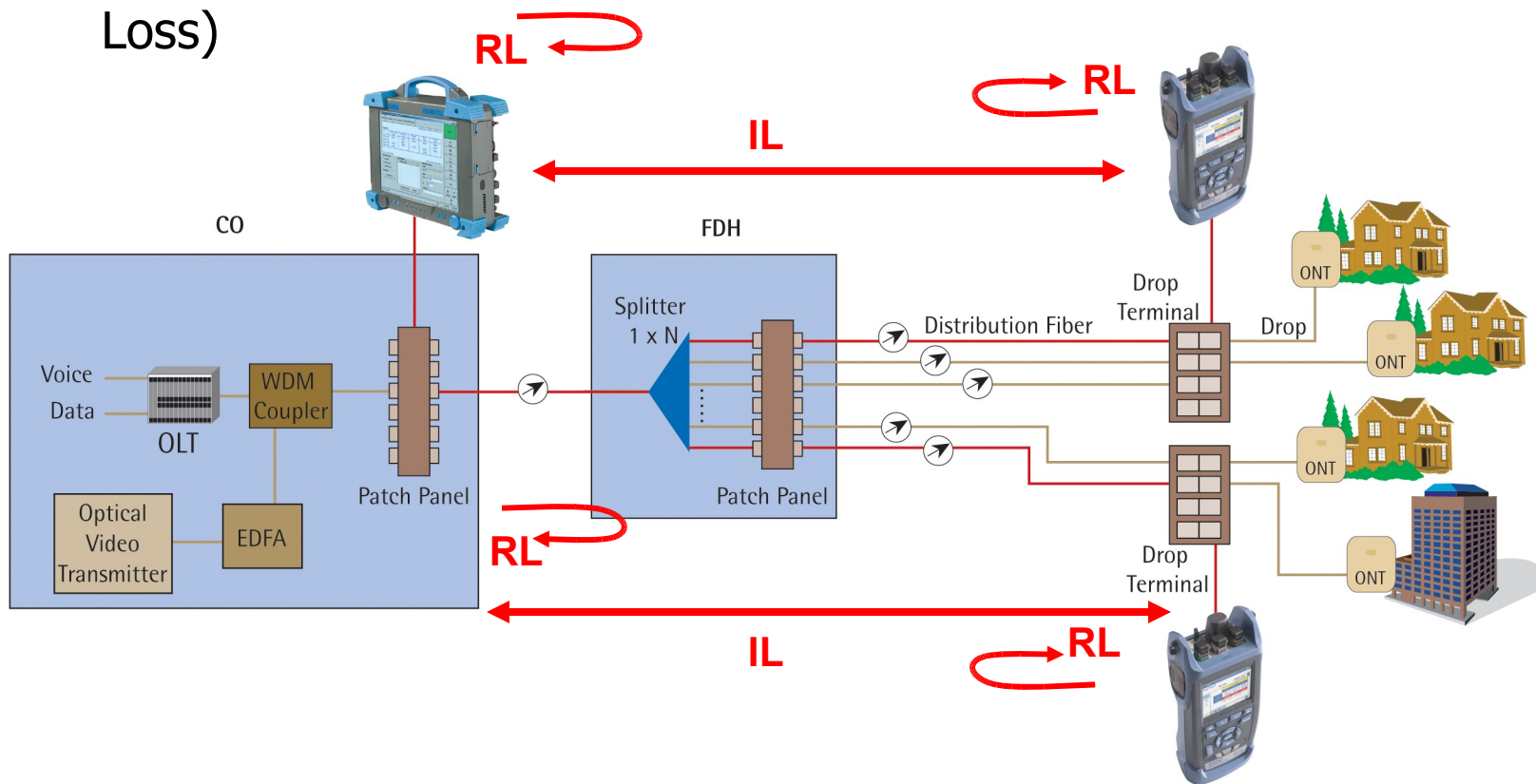
- vestavěný nebo externí filtr s propustným pásmem >> 1600 nm

1310/1550 nm OTDR port



OLTS měření Point to Multi-Point

Měření přímou metodou OLTS (Optical Loss Test Set) 1310/1490/1550 nm Vložného útlumu IL (Insertion Loss) + Útlumu odrazu RL (Return Loss)



Výsledky z FOT-930 OLTS

PM Source Off VFL | 2004-11-10 | 14:54 | 2

FasTest



BigCable



BCFiber015



Loss	Upstream Loss (dB)	Pr -> CO	CO -> Pr	AVG
	1310	9.72	10.11	9.91
ORL				
ID	Downstream Loss (dB)	CO -> Pr	Pr -> CO	AVG
	1490	15.44	12.55	13.76
	1550	18.57	15.56	16.81

Fiber Length: 39405.970 ft



Next Tab

Store



FasTest Power Meter ORL Source/VFL Talk set/Messages Results



Delete



Copy All



Edit Job Information



Edit Cable Information



Select Threshold

Job Information FasTest FasTest FTTx Power Meter (dBm) Power Meter (dB) Manual ORL Thresholds

FasTest FTTx

Fiber ID	Wavelength (nm)	Loss	Ref.	Loss	Ref.	Average (dB)	ORL	ORL	Length (km)
		CO->Pr. (dB)	CO->Pr. (dB)	Pr.->CO (dB)	Pr.->CO (dB)		CO->Pr. (dB)	Pr.->CO (dB)	
<input type="checkbox"/> Fiber 001	1310 Up	2.53	0.57	2.65	0.10	2.59	36.51	36.17	4.472
	1490 Down	1.82	0.47	1.88	0.12	1.85	37.06	36.86	
	1550 Down	1.75	0.52	1.65	0.27	1.70	37.55	37.34	
(11/10/2004 2:53:56 PM) <<Click here to edit.>>									
<input type="checkbox"/> Fiber 002	1310 Up	2.53	0.57	2.65	0.10	2.59	36.51	36.19	4.474
	1490 Down	1.82	0.47	1.88	0.12	1.85	37.05	36.86	
	1550 Down	1.75	0.52	1.65	0.27	1.70	37.55	37.34	
(11/10/2004 2:54:13 PM) <<Click here to edit.>>									
<input type="checkbox"/> Fiber 003	1310 Up	2.53	0.57	2.65	0.10	2.59	36.51	36.18	4.478
	1490 Down	1.82	0.47	1.88	0.12	1.85	37.06	36.86	
	1550 Down	1.75	0.52	1.65	0.27	1.70	37.55	37.34	
(11/10/2004 2:54:29 PM) <<Click here to edit.>>									



Start



Open



Save



Save As...



Close



Setup



Print



Help



About

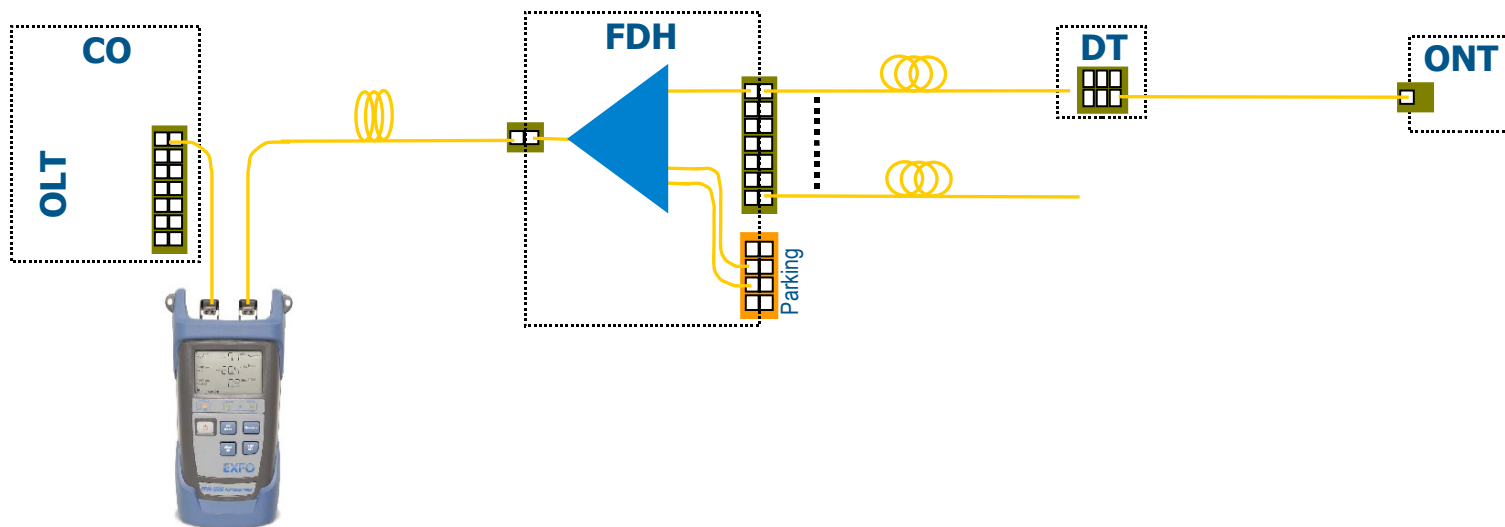


Exit

Aktivní prvky - uvedení do provozu

CO aktivace OLT – měření úrovní PON měřidlem výkonu

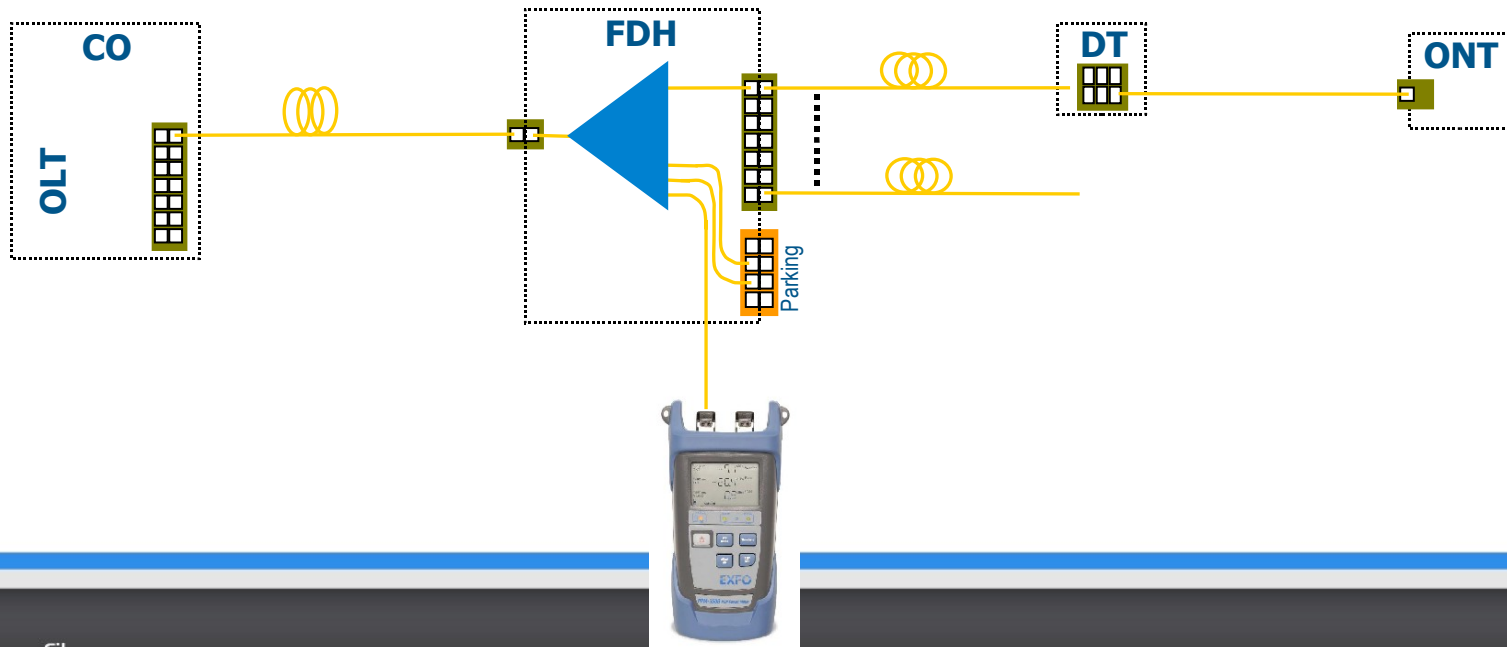
- vysílací úroveň data downstream 1490 nm
- vysílací úroveň video downstream 1550 nm
- měřit na všech výstupních portech splitterů



Aktivní prvky – měření úrovní

Měření úrovní v distribučním bodě FDH (Fiber Distribution Hub)

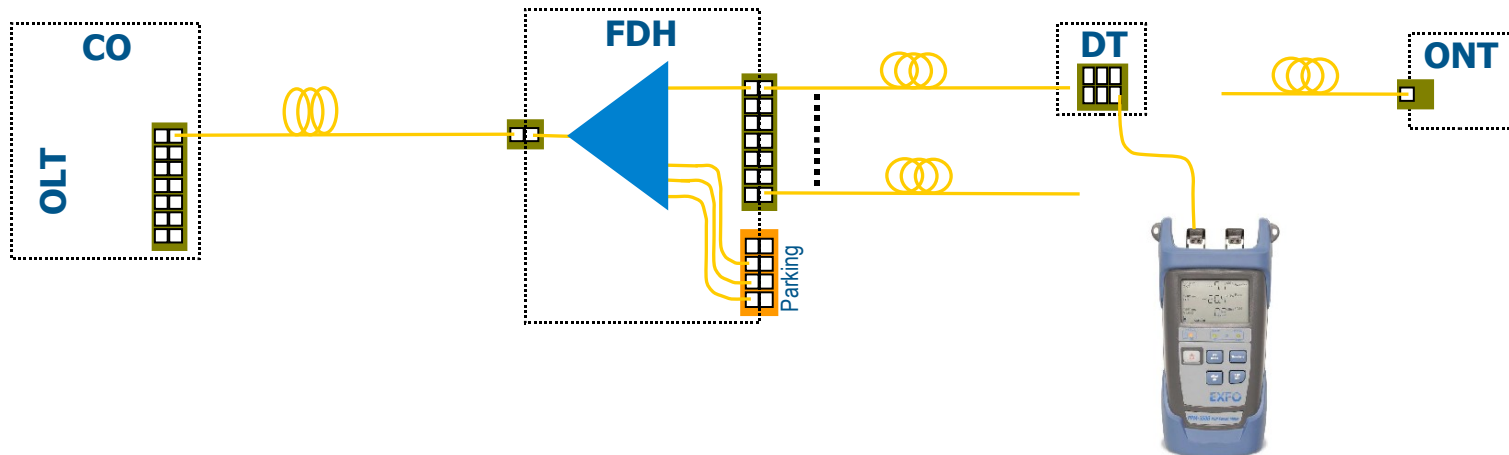
- vysílací úroveň data downstream 1490 nm
- vysílací úroveň video downstream 1550 nm
- měřit na všech výstupních portech splitteru



Aktivní prvky – měření úrovně

Měření úrovně v odbočovacím bodě DT (Drop Terminal)

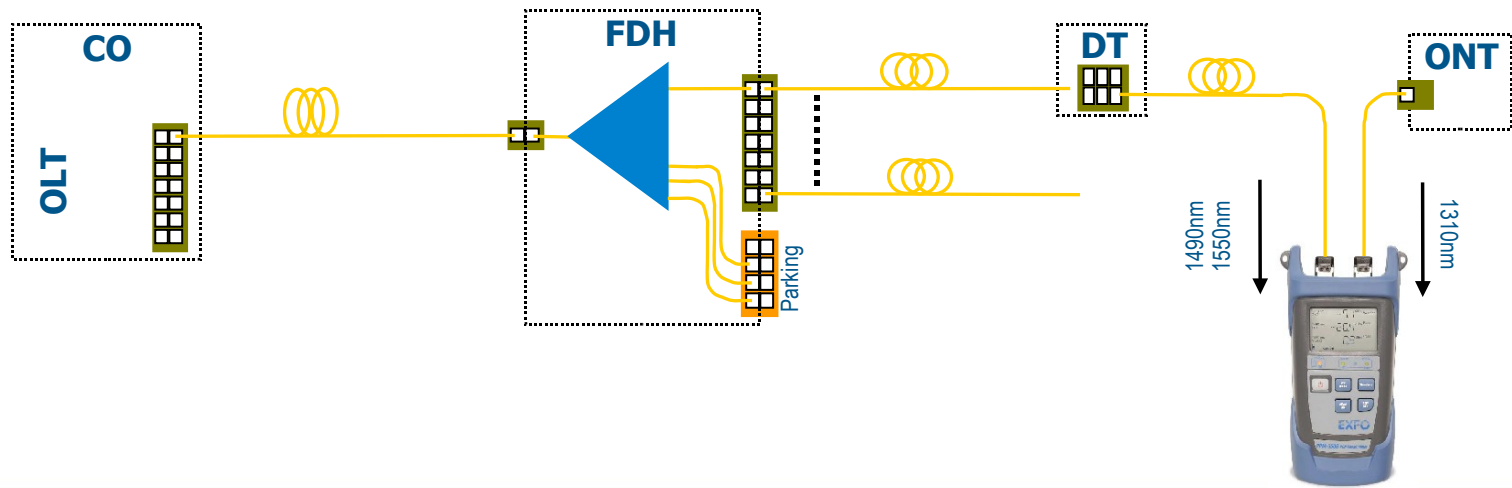
- vysílací úroveň data downstream 1490 nm
- vysílací úroveň video downstream 1550 nm
- měřit na všech výstupních portech splitteru



Aktivní prvky – měření úrovní

Měření úrovní při aktivaci ONT/ONU

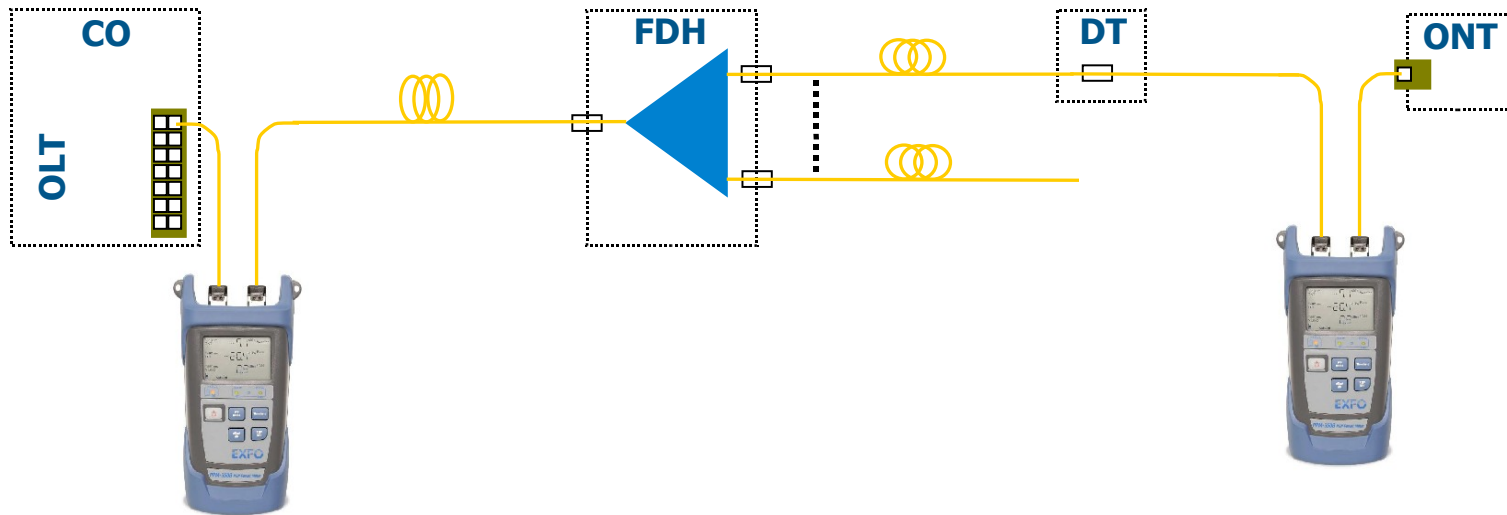
- vysílací úroveň data downstream 1490 nm
- vysílací úroveň video downstream 1550 nm
- vysílací úroveň data upstream 1310 nm



Aktivní prvky – měření úrovně

při provařených vláknech v síti bez konektorů jsou jen dva měřicí body:

2. CO
3. ONT



Měřicí technika – využití při výstavbě a servisu

přístroj	vlnová délka	funkce	Využití		
			výstavba	aktivace služby	trouble shooting
videomikroskop		inspekce konektorů	✓	✓	✓
OTDR	1310 nm	•testy pro 1310 upstr	✓		
	1550 nm	•testy pro 1550 dwnstr	✓		
	1383 nm	•detekce OH peaku	?		
	1490 nm	•testy pro 1490 dwnstr	?		
	1625 nm	•testy za provozu			✓
	1650 nm	•testy za provozu (ITU)			?
OLTS	1310 nm	•testy pro 1310 upstr	✓		
	1550 nm	•testy pro 1550 dwnstr	✓		
	1490 nm	•testy pro 1490 dwnstr	✓		
	1625 nm	•detekce ohybů			
PON power meter	1310/1490/1550 nm	měření signálu 1310/1490/1550nm		✓	✓
měřič výkonu		měření signálu 1490/1550nm		?	?

Realita měření EPON, GPON

Závěr:

- nutné měřit při výstavbě (OTDR 1310/1550nm, OLTS 1310/1490/1550nm)
- pozor na ohyby ! (útlum 1310nm vs 1550 nm)
- pozor na optické konektory (čistota, videomikroskop)
- pozor na odrazy (kontrola OTDR, OLTS, videomikroskop)
- PON měřidlo výkonu – základ pro aktivaci/servis
- nižší kvalita výstavby a nižší kvalifikace dodavatelů pro vnitřní FTTH instalace
- servisní měření OTDR 1625nm s filtrem na síti za provozu
- vizuální zaměřovač poruch (červený laser) – přítel pro vnitřní instalace
- jak si usnadnit orientaci ve svazcích vláken (č. laser, propísknutí vlákna, ohybový identifikátor živého vlákna)
- zvykněte si na splitter



PROFiber[®]
N E T W O R K I N G

Děkujeme za pozornost

děkujeme našim kolegům z oboru za odbornou pomoc,
zejména kolegům z fy EXFO



jan.broucek@profiber.cz
pavel.kosour@profiber.c



OPTICKÉ KOMUNIKACE 2007

xDSL versus optika

Patrik Jalamudis

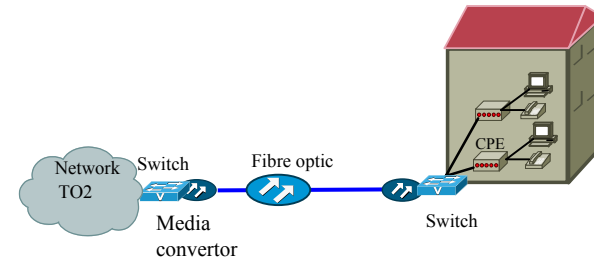
patrik.jalamudis@o2.com

Obsah

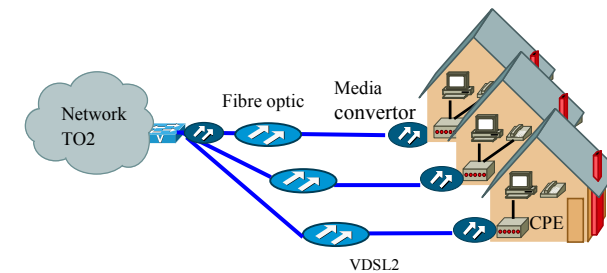
1. Úvod – rozvoj BB trhu
2. Terminologie optických sítí
3. Popis sítí s technologií GPON
4. Výhody a nevýhody sítí GPON
5. Popis sítí s technologií L2
6. Výhody a nevýhody sítí L2
7. Dostupné technologie a jejich teoretické možnosti – xDSL 1
8. Dostupné technologie a jejich teoretické možnosti – xDSL 2
9. Rozsah investiční náročnosti
 - Sítě FTTN s vysunutými DSLAMy
 - Sítě FTTx, FTTB s technologií L2
 - Sítě FTTx, FTTB s technologií GPON
 - Shrnutí
10. Závěr

Terminologie optických sítí

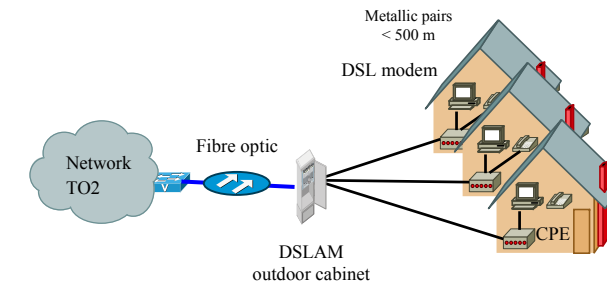
1. FTTB (Fibre to the Building)
 - Pro vícebytové objekty, optika končí ve sklepě objektu



- 2.a FTTH (Fibre to the Home)
 - Pro lokality s individuální zástavbou (rodinné domy)



- 2.b FTTA (Fibre to the Appartement)
 - Pro vícebytové objekty, optika končí v jednotlivých bytech



3. FTTN (Fibre to the Node)
 - Vysunuté DSLAMy

Popis sítí s technologií GPON

Podstatou je jednovláknový provoz na síti s optickými rozbočovači/slučovači

Lze realizovat jako síť FTTA / FTTH

S použitím víceportových jednotek ONU lze realizovat FTTB architekturu

(počet rozbočení a počet portů na ONU ovlivňuje garantovanou přenosovou rychlost)

Další vývojové trendy – SuperPON

DS=10 Gbit/s US= 5 Gbit/s

Nutná výměna všech aktivních komponent

WDM PON – namísto rozbočovačů použity WDM filtry, co zákazník to separátní lambda logická topologie hvězda

GPON

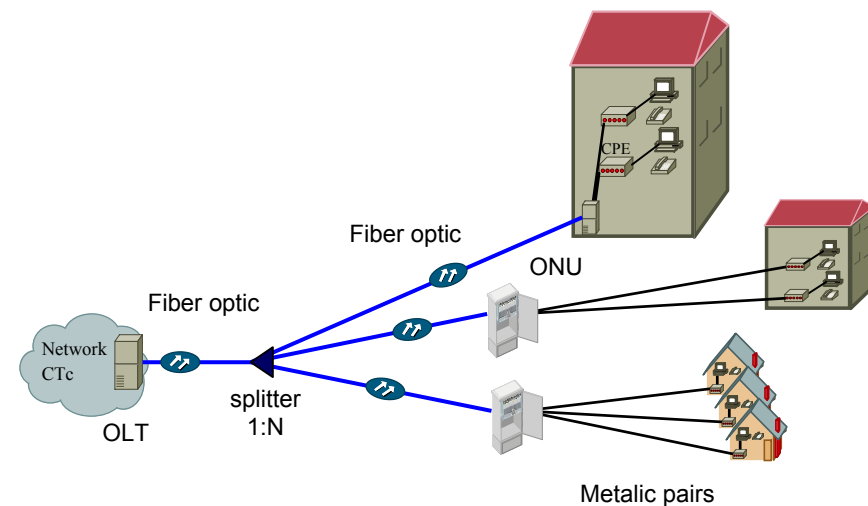
DS = 2,50 Gbit/s

Možné dynamické přerozdělení přenosových kapacit

Garantováno 40 / 20 Mbit/s

rozbočení 1:64

US = 1,25 Gbit/s



Výhody a nevýhody sítí GPON

Výhody sítí GPON

Minimalizuje počet vláken v ústředně

Snižuje nároky na údržbu sítě – čistě pasivní infrastruktura mezi zákazníkem a OLT

Vhodným návrhem může snížit počet aktivních uzlů v síti (dosah 15-20 km, snížení počtu RSU)

Nevýhody sítí GPON

Snižuje flexibilitu sítě (rekonfigurace, navyšování přenosových kapacit)

Vyžaduje budovat infrastrukturu plošně

Zvyšuje nároky na přenosové kapacity mezi RSU (v případě eliminace jejich počtu)

Neumožňuje zálohované připojení

Komplikovanější lokalizace poruchy

V případě servisního zásahu vyšší nároky na know-how

Neexistuje interoperabilita mezi dodavateli

Upgrade sítě na vyšší rychlosti pouze výměnou všech aktivních prvků

Vyžaduje vybudování optické kabeláže uvnitř bytových objektů

Popis sítí s technologií L2

Podstatou je propojení L2 přepínačů a realizace sítě MAN s technologií pro LAN síť (standardní rozhraní FE/GE/10GE)

Optimální technologie pro realizaci sítí FTTB s využitím strukturovaných kabeláží Cat5+ v zákaznických objektech

Pro podporu služeb Triple play implementovány L3 funkcionality

Vyžaduje přímé hvězdicové nebo kruhové připojení přepínačů

- kruhování umožňuje redundanci
- navyšování kapacity dělením kruhů na menší celky
- navyšování kapacity změnou rozhraní (redistribuce aktivních prvků v síti)

technologie L2

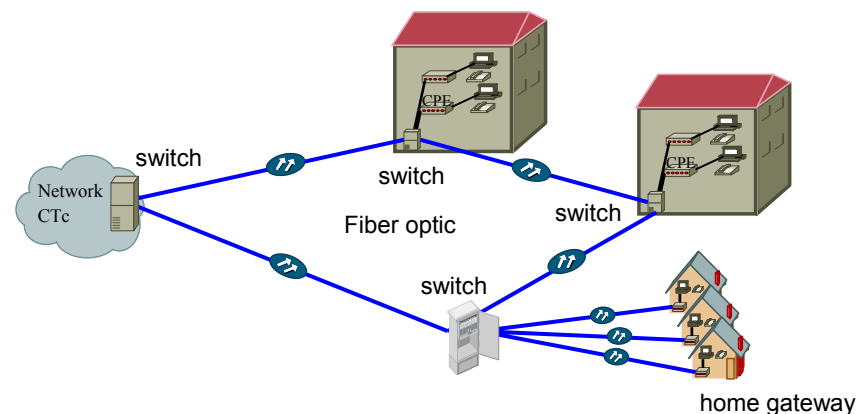
portů 24

DS = 2x 1,0 Gbit/s

US = 2x 1,0 GBit/s

Možné dynamické přerozdělení přenosových kapacit

Garantováno 40 / 40 Mbit/s



Výhody a nevýhody sítí L2

Výhody sítí s technologií L2

Při kruhové topologii minimalizuje počet vláken v ústředně

Založeno na standardní technologii používané v masovém měřítku

Vysoká flexibilita optické sítě

Vhodné pro vybudování plošného pokrytí (cena FE rozhraní) a automatické dálkové aktivace/změny/deaktivace služby

Umožňuje zálohování služby díky kruhovým topologiím

Umožňuje řešit individuální požadavky na vyšší přenosové rychlosti použitím GE rozhraní k zákazníkům

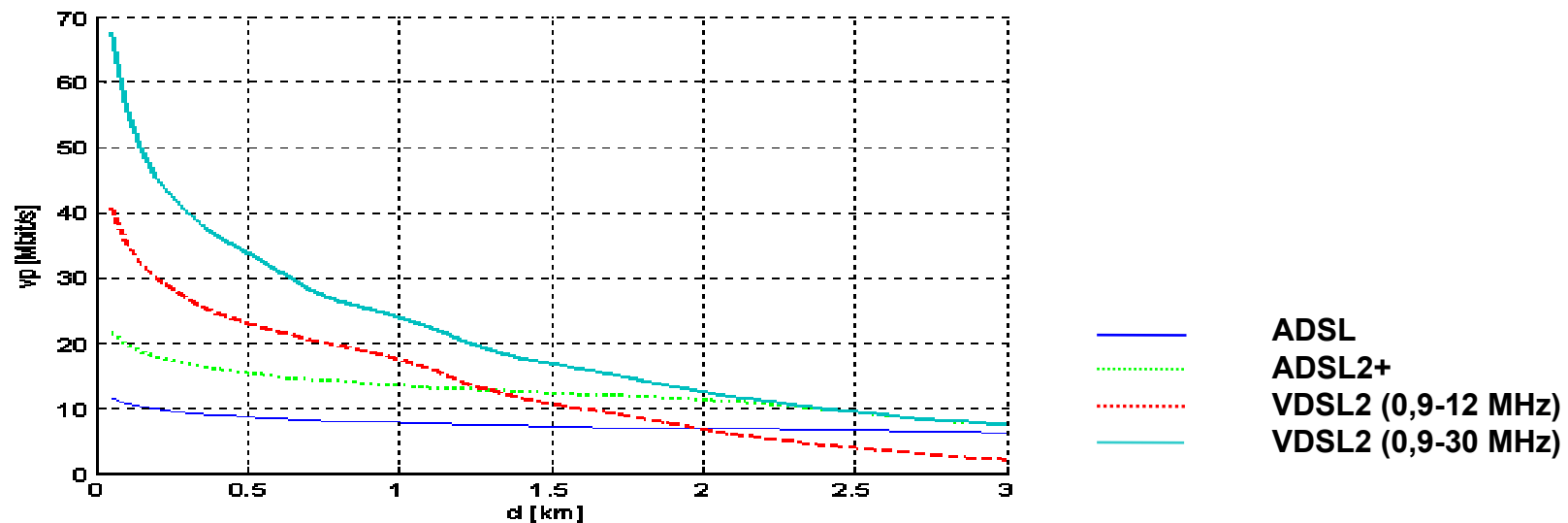
Nevýhody sítí s technologií L2

Zvyšuje počet aktivních uzlů v síti (věcná břemena, přívody napájení, spotřeba energie)

Vyžaduje vybudování strukturovaných kabeláží Cat 5+ uvnitř bytových objektů

Dostupné technologie a jejich teoretické možnosti – xDSL 1

ADSL	8,0 / 0,8 Mbit/s	kmitočtové spektrum do 1,1 MHz
ADSL2+	25,0 / 1,3 Mbit/s	kmitočtové spektrum do 2,2 MHz
VDSL2	vychází z VDSL , které nebylo koordinováno s ADSL	
	několik kmitočtových plánů (997, 998) a pásem (8, 12, 17, 30 MHz) s různými dosahy, dosažitelnými rychlostmi, výsílacími výkony	
	Celé spektrum rozděleno do několika pásem určených pro DS, US	



Modulace G.dmt, kmitočtová koordinace standardizována, ale ...

Dostupné technologie a jejich teoretické možnosti – xDSL 2

SHDSL	modulace PAM 16	2,3 / 2,3 Mbit/s
SHDSL	modulace PAM 32	5,4 / 5,4 Mbit/s
multipárové SHDSL	až 8 sdružených párů	40,0 /40,0 Mbit/s

modulace PAM 128 ve vývojových laboratořích

Výrazně nižší kmitočtové pásmo => větší dosah

S výhodou se používá pro připojení korporátních zákazníků

Možnost nasazení opakovačů pro prodloužení dosahu

LLU – regulovaná cena za Cu pár – vliv na cenu služeb u multipárových okruhů

Na přenosové parametry na konkrétní přípojce mají vliv:

Vzájemné ovlivňování G.dmt, PAM, případně jiné modulace starších systémů

Současný provoz ADSL2+ z ústředny s VDSL2 z vysunutých DSLAM

Počet paralelně provozovaných BB přípojek (penetrace služeb => přeslechy)

Kvalita metalických kabelů (vložený útlum, přeslechy)

Zdroje vnějšího rušení (impulsní rušení, RF)

Zapínání a vypínání modemů, přechody do úsporného režimu (nestacionární přeslechy)

Rozsah investiční náročnosti – síť FTTN s vysunutými DSLAMy

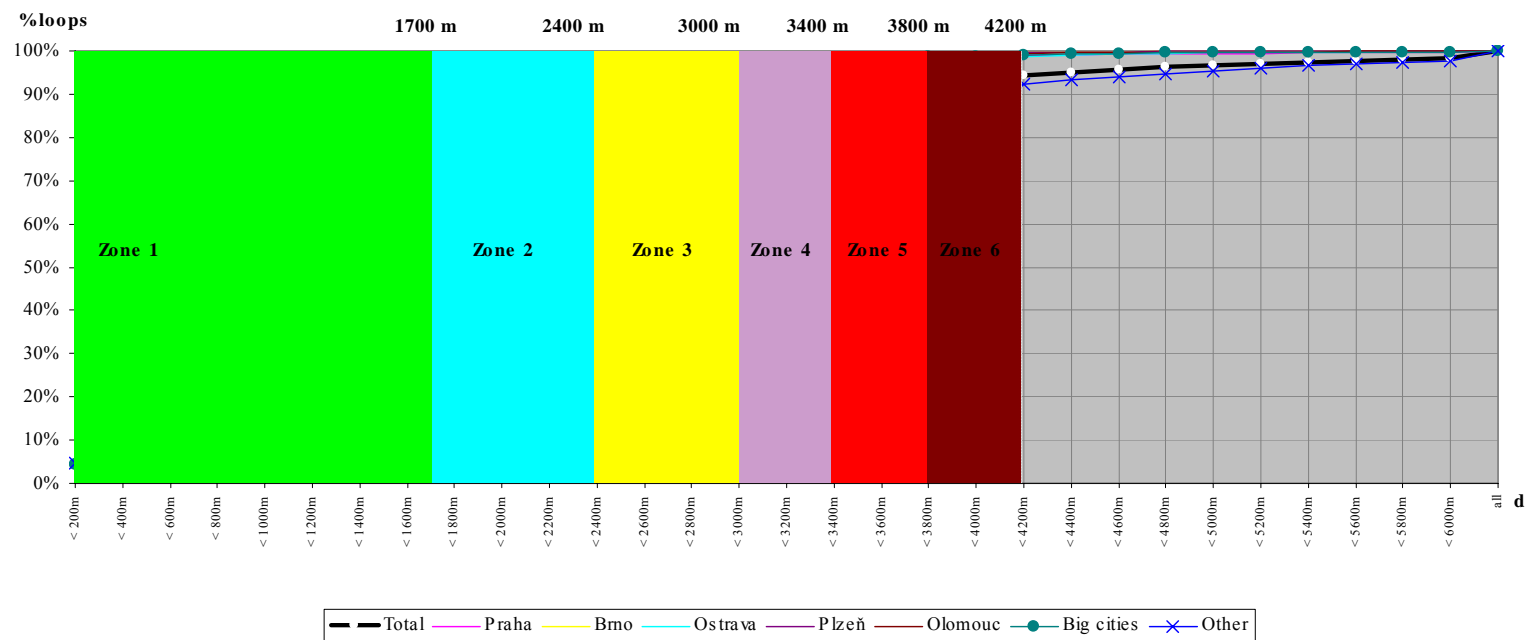
VDSL2 v reálných podmínkách přenese 30 Mbit/s na cca 500m

Z ústředny je do 500m pouze cca 17% všech linek.

Všechny ostatní by musely být připojeny vysunutými DSLAMy, odhad >5000 vysunutých DSLAM pro 90% pokrytí

Věcná břemena, přívody napájení, záборы pozemku pro venkovní skříně, rekonfigurace přístupové sítě, optické kabely k vysunutým DSLAM, VDSL2 se zpětnou kompatibilitou k ADSL2+ (ADSL2+ modemy proti VDSL2 DSLAM)

Loop lenght distribution in Telefonica O2 CR Copper Access Network



Rozsah investiční náročnosti – sítě FTTx, FTTB s technologií GPON

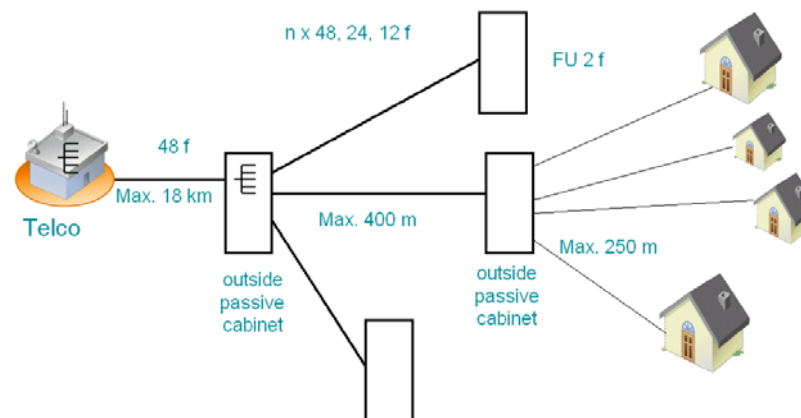
Řešení GPON znamená v podstatě úplnou změnu přístupové sítě. Lze dopustit úplné přepojení všech služeb z metalické sítě včetně hlasových, případně provozovat paralelně metalickou i optickou síť.

Technologie GPON vyžaduje instalaci plně optické infrastruktury do všech zákaznických objektů.

V terénu musí být instalovány ve spojkách nebo rozvaděčích (dle charakteru zástavby ve vnitřních nebo vnějších prostorách) optické rozbočnice.

U vícebytových objektů je nutná v aplikaci FTTH optická vnitřní kabeláž, v aplikaci FTTB pak strukturovaná kabeláž Cat5+ nebo VDSL2 řešení po stávajících vnitřních rozvodech, což může přinášet další problémy s přeslechly a impulsním rušením.

Díky nízké flexibilitě sítě je nezbytné síť navrhovat tak, aby v ní nemusely být ani do budoucna realizovány žádné zásahy a rekonfigurace



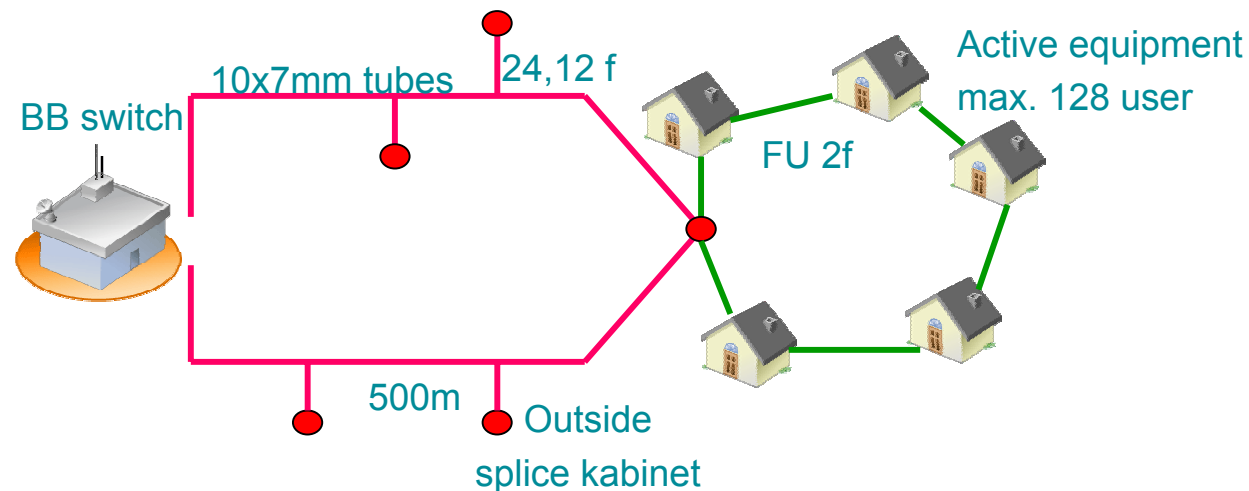
Rozsah investiční náročnosti – síť FTTx, FTTB s technologií L2

Řešení s technologií L2 znamená v podstatě úplnou změnu přístupové sítě. Lze dopustit úplné přepojení všech služeb z metalické sítě včetně hlasových, případně provozovat paralelně metalickou i optickou síť.

Technologie L2 vyžaduje instalaci plně optické infrastruktury do všech zákaznických objektů. Infrastrukturu se doporučuje instalovat v kruhové topologii – úspora vláken, redundance.

Technologie L2 je vhodná zejména pro aplikace typu FTTB. Uvnitř objektů je nutné instalovat strukturovanou kabeláž Cat5+. Kromě strukturované kabeláže je nezbytné instalovat do sklepů objektů také aktivní technologii, což s sebou přináší problémy s umístěním a věcnými břemeny a připojením napájení.

Výhodou sítí s technologií L2 je její flexibilita. V případě kruhových topologií je možné navyšování kapacit jak počtu portů, tak i přenosových rychlostí pouhým přepojováním optických vláken



Rozsah investiční náročnosti – shrnutí

Na předcházejících snímcích nejsou uvedeny konkrétní finanční analýzy,

U vysunutých DSLAM je poměrně velká část investic vložena do venkovních skříní s aktivními prvky a snaha maximálně využít dříve realizované investice do metalické přístupové sítě.

U technologií L2 a GPON je vidět, že se jedná vlastně o kompletní náhradu přístupové sítě včetně staničních vedení ve vícebytových objektech – domovních rozvodů.

Bylo realizováno několik finančních analýz, ze kterých vyplývá, že investiční náročnost je závislá nejen na technickém řešení, ale v mnoha případech také na konkrétním typu zástavby a stávajících výchozích podmínkách (kvalita a kapacita metalické přístupové sítě, rezervní HDPE trubky)

Další faktory, které mají zásadní vliv na rozhodnutí, jakou technologii použít jsou:

- předpokládaná úspěšnost prodeje služeb (penetrace zákazníků)
- nabízené produkty (přenosové rychlosti, agregace)
- stanovisko regulátora k LLU na optické infrastruktuře
- časové hledisko, neboť vybudování přístupové sítě lze realizovat za minimálně 6 měsíců

Závěr

Bez ohledu na to, jakou technologii se provozovatel sítě rozhodne pro poskytování BB služeb používat, má výstavba optiky v přístupových sítích zajištěnu budoucnost.

Je velmi pravděpodobné, že s rozvojem portfolia služeb typu videokonferencing, ostraha objektů s video obsahem, telemedicine a další dojde k takovému nárůstu požadavků na přenosové rychlosti, že role optiky v přístupové síti se bude neustále zvyšovat.

Právě proto je velmi důležité zvážit nejen momentální investiční náročnost vybudování infrastruktury pro dnešní dostupné technologie, ale také minimalizovat budoucí investice pro přechod na plně optické přístupové sítě.

Každý ze světových operátorů k tomu zaujímá jiné stanovisko, které se projevuje v implementaci všech popisovaných technologických platforem, např.

Vysunuté VDSL2 DSLAMy – Swisscom, KPN

Technologie L2 – Fastweb, skandinávské země

GPON – Orange, Telefonica LATAM, Verizon

Telefonica O2 analyzuje všechny možnosti dalšího rozvoje BB technologií, prozatím bez rozhodnutí, kterou z technologií nasazovat plošně.

Optická přístupová síť v reálných číslech



PROFiber[®]
N E T W O R K I N G

Trendy v přístupových sítích; síť PON - jaké a kdy?; působící faktory na ceny prvků pro přístupové sítě FTTx z pohledu investora, řešené příklady.

Situace na trhu, trendy

Česká republika, Slovensko

- **Slovensko** : projekt ORANGE (FTTH) -> boom FTTx
- **Česká republika** : rostoucí tendence ("vyčkávání velkých operátorů ?") – postupný vývoj; pronikání optiky stále více do firem zabývajících se dříve strukturovanými rozvody; o návratnosti investic svědčí častější topologie FTTB (FTTC) v kombinaci s metalickými rozvody CATx, xDSL; projekty čistě FTTH zatím spíše piloty menšího charakteru a nebo dotované z různých fondů
- I přes rostoucí nabídku služeb je pro většinu uživatelů dostatečná šířka pásma řádově Mbit/s

Rozvoj sítí FTTx:

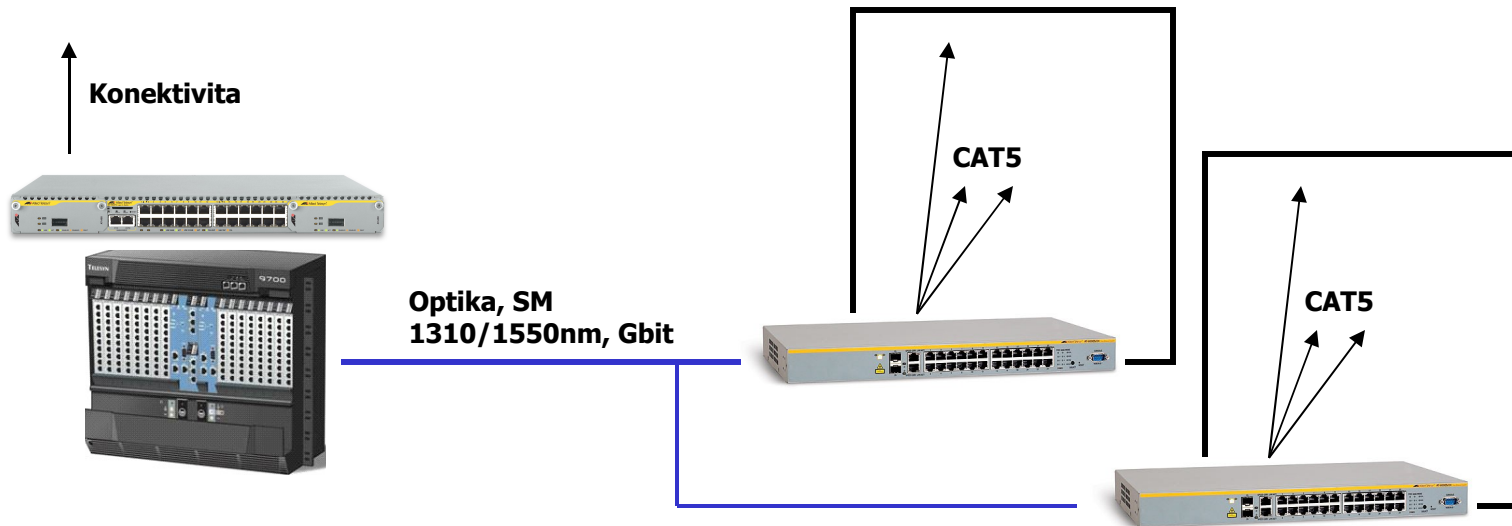
- 1) stále klesající ceny technologií (aktivních-pasivních) s rostoucím používáním a tlaky výrobců na efektivnější využití zařízení (např. zvyšováním počtů portů)
- 2) zvyšující se požadavek na kvalitní (garantované) připojení, rostoucí nabídka služeb (VoIP, IPTV aj.)
- 3) "menší strach" z optiky (stále častější pronikání optických technologií od renomovaných montážních firem a velkých TELCO operátorů k menším firmám a ISP

"cesta od propojů k přístupovým sítím"

Nárůst poptávky po montážní technice, měřicí technice a aktivních prvcích.

Řešení optických přístupových sítí FTTx

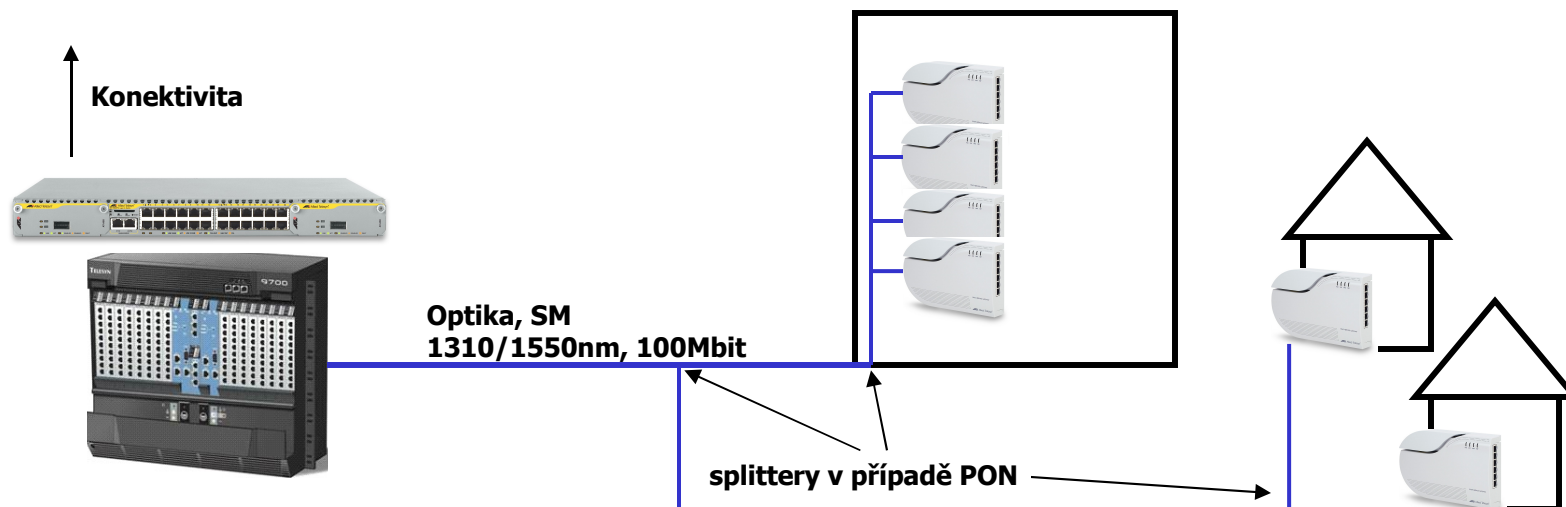
FTTB v kombinaci s CAT5 – **nejčastější**, nejlepší poměr cena/výkon
 -> vhodné pro městské oblasti, bytové domy



Klíčová slova: STP – EPRS (možnosti řazení switchů-kruhová topologie); FTTB switch L2 nebo L3 popř. celá přístupová síť; jednovláknová-dvouvláknová technologie (SFP moduly); vláknová rezerva

Řešení optických přístupových sítí FTTx

FTTH – technicky nejlepší varianta – každý zákazník končí na centrálním prvku bez slabého článku na trase (aktivní prvek), ekonomicky náročné



Klíčová slova: kdy aktivní technologie P2P a kdy PON; jednovláknová nebo dvouvláknová technologie; typ koncového zařízení (služby, zajištění ukončení optiky-L2, L3); typ vlákna (snížená citlivost na ohyby); dimenzování vláken

Sítě FTTH (aktivní sítě vs. pasivní sítě)

Aktivní sítě

- používanější, široké portfolio aktivních prvků ve většině případů se vzájemnou kompatibilitou výrobců; v případě větších sítí technologicky náročné

Pasivní sítě PON

- nejčastěji :

(G)EPON – I3E, splitrování 1:32

GPON – ITU, splitrování 1:64

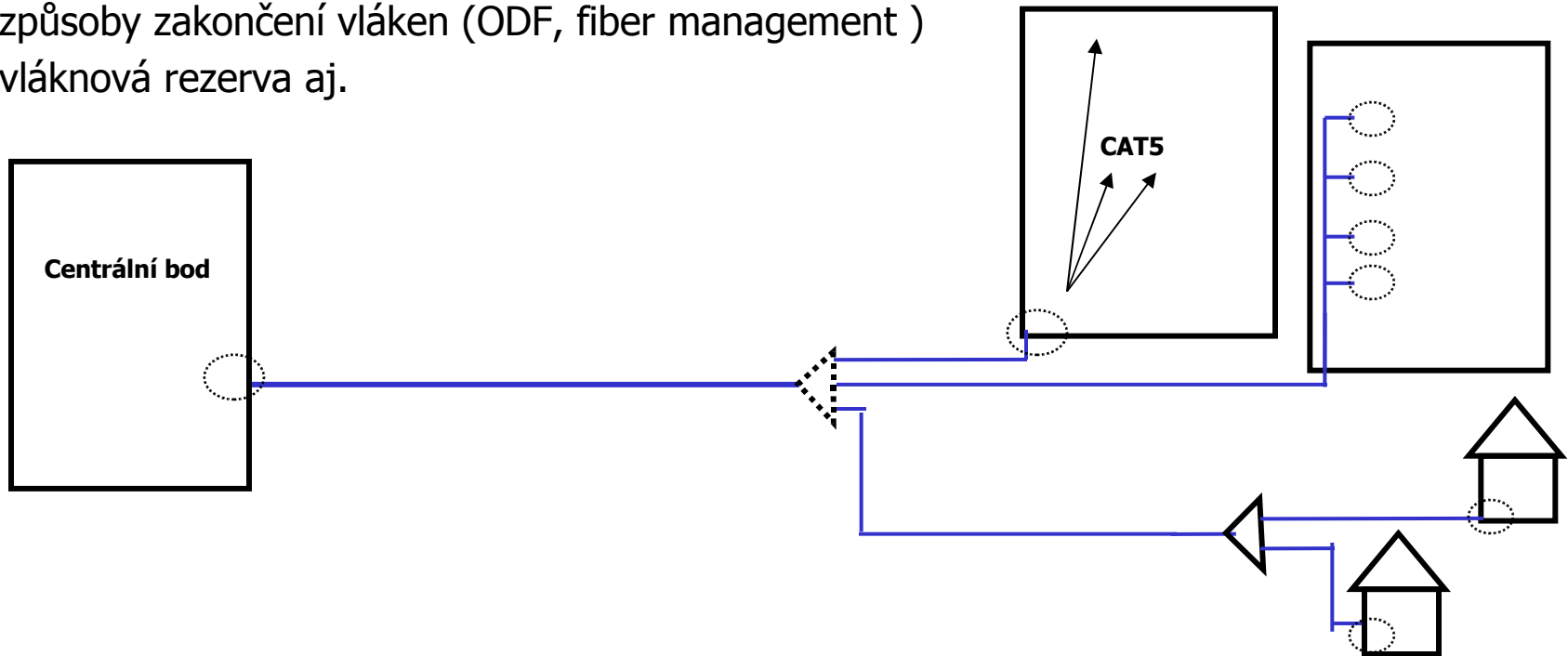
- výhodné v případě větších sítí
- nevýhodou je sdílené vlákno, nekompatibilita výrobců, úzké spektrum aktivních prvků

Náklady na přístupové sítě

Pasivní infrastruktura

Cena variantně dle

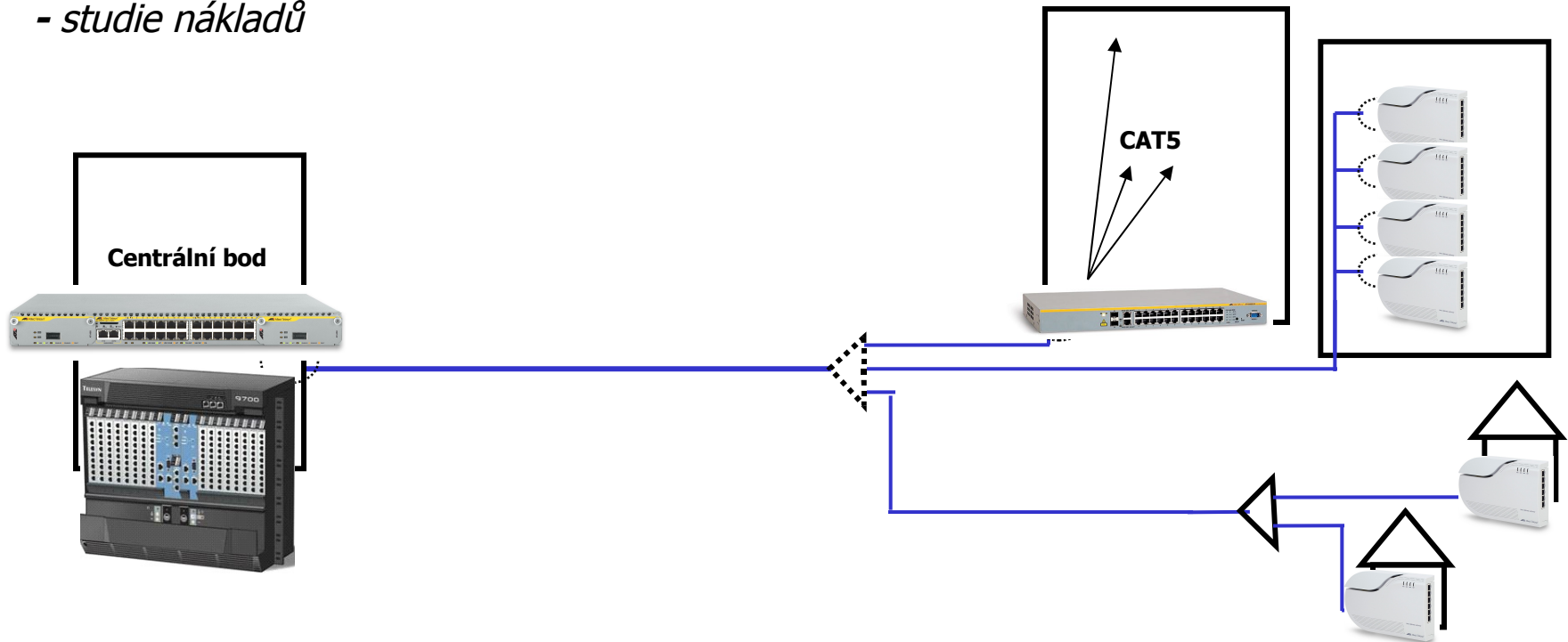
- topologie (FTTB, FTTH; bod-bod, PON...)
- technologie montáže (trubičky, zafukování, závěsné kabely atd.)
- způsoby zakončení vláken (ODF, fiber management)
- vláknová rezerva aj.



Náklady na přístupové síť

Aktivní prvky

- *FTTB, FTTH (bod-bod vs. PON)*
- *studie nákladů*



Náklady na přístupové sítě

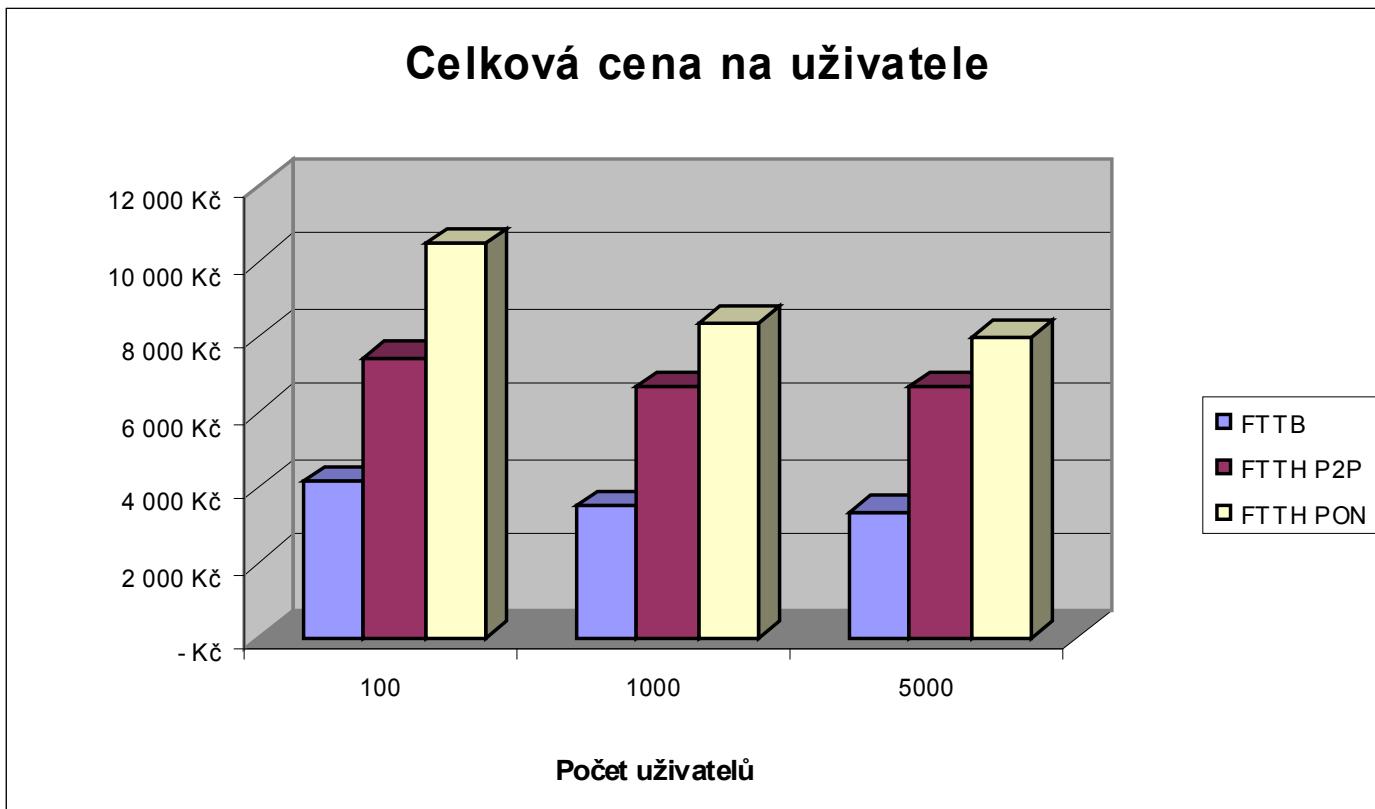
Aktivní prvky – cena na uživatele

- FTTB
- FTTH bod-bod
- FTTH PON (GEPON)

Předpoklady:

- kalkulace pro 100, 1000, 5000 uživatelů
- jednovláknová technologie
- koncový uživatel – přípojka 10/100Mbit RJ45
- centrální prvky – srovnatelný výkon, optický port přímo v zařízení (SFP modul)

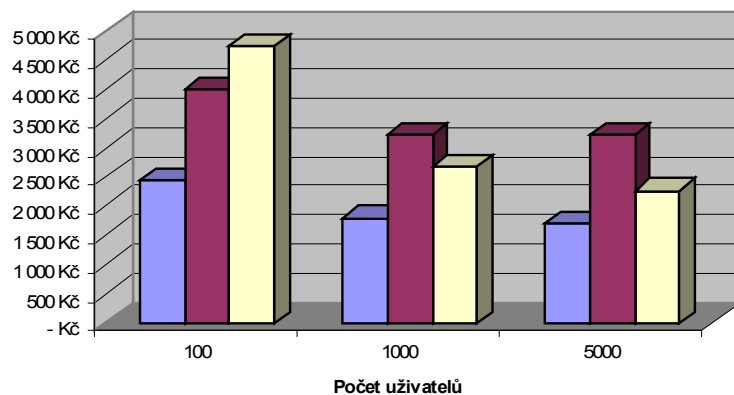
Náklady na přístupové sítě, cena na uživatele



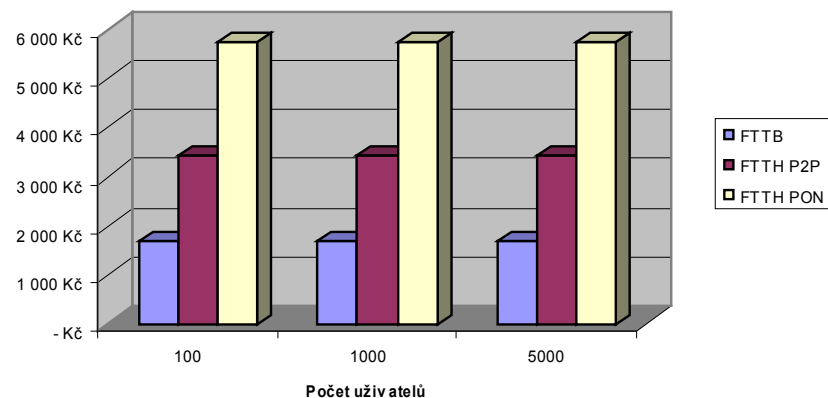
	100	1000	5000	10000
FTTB	4 129 Kč	3 471 Kč	3 366 Kč	3 366 Kč
FTTH P2P	7 442 Kč	6 666 Kč	6 666 Kč	6 658 Kč
FTTH PON	10 470 Kč	8 388 Kč	7 988 Kč	7 977 Kč

Náklady na přístupové sítě, cena na uživatele

Centrální prvky na uživatele



Koncové zařízení na uživatele



Výběr vhodné technologie

Nejpoužívanější - nejlepší poměr cena/výkon – **FTTB**

- v případě městských lokalit plně postačující z pohledu šířky pásma a garance služeb, menší spolehlivost

FTTH

- technologicky nejlepší varianta s největší spolehlivostí (žádný aktivní prvek na trase), vše řízeno z centrálního bodu
- pro větší sítě (řádově tisíce FTTH) vhodnější topologie PON z důvodu menšího počtu vláken a technického řešení v centrálním bodě

Děkuji za pozornost

Rostislav Kotas, rostislav.kotas@profiber.cz

Název publikace **Optické komunikace 2007**
Druh publikace: Sborník příspěvků
Typ publikace: CD
Zpracoval: Kolektiv autorů
Počet stran: 192 stran
Rok vydání: 2007
Vydání: první

Vydal: Zeithamlová Milena, ing. - Agentura Action M
 Vršovická 68
 101 00 Praha 10
 actionm@action-m.com
 <http://www.action-m.com>

Vyrobeno: COPIER CENTRUM DOMINO
 Wenzigova 1
 120 00 Praha 2

Bez jazykové a redakční úpravy.

ISBN 978-80-86742-21-2