

STUDIUM SENZORICKÝCH VLASTNOSTÍ KVAZI-JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN

Petr KOUDELKA¹, Jan LÁTAL¹, Petr ŠIŠKA¹, František HANÁČEK¹, Jan SKAPA¹,
Vladimír VAŠINEK¹

¹Katedra telekomunikační techniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava, 17. Listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

petr.koudelka@vsb.cz, jan.latal@vsb.cz, petr.siska.fe@vsb.cz

Abstrakt. Kvazi-jednovidová optická vlákna jsou optická vlákna s unikátními vlastnostmi, jejichž atypická profilová struktura umožňuje současné využití optického vlákna jako přenosového média a současně jako senzoru založeného na přerozdělování optického výkonu mezi několika vidů. Ve spolupráci s ÚFE AVČR byl vyvinut speciální typ kvazi-jednovidového vlákna SG1005, který je podroben experimentálnímu ověření jeho teoretických vlastností v optické laboratoři na Katedře telekomunikační techniky VŠB-TU Ostrava. Článek je zaměřen na posouzení vlivu mechanického napětí v podobě tahového zatížení vlákna na přerozdělení optického výkonu mezi jednotlivými vidy.

Klíčová slova

Kvazi-jednovidová optická vlákna, Optifiber, mechanické napětí, tahové zatížení, atypický profil vlákna, redistribuce výkonu.

1. Úvod

Vláknově optických senzorů existuje v dnešní době obrovská škála. Jako kvazi-jednovidové optické vlákno je označováno takové vlákno, které pracuje za hranicí jednovidovosti, respektive podporuje šíření více vidů, typicky 2-6. Příčinou je speciální atypický profil vlákna, který je výsledkem výzkumu na Katedře telekomunikací VŠB-TU Ostrava ve spolupráci s ÚFE AVČR. Kvazi-jednovidová vlákna lze využít jako přenosového média pro optickou komunikaci a zároveň i jako optického senzoru. V tomto případě se jedná o optovláknové senzory založené na přerozdělování optického výkonu mezi několika vidy. Myšlenkou při vývoji kvazi-jednovidových vláken bylo jejich použití v přístupových, pasivně optických sítích. Zde by tento nový typ optických

vláken převzal funkci konvenčních jednovidových vláken jako přenosového média a navíc by umožňovali poskytovateli přístupové sítě mít přehled o stavu z hlediska působení vnějších vlivů, jako je například teplota nebo mechanické napětí. Tento článek je zaměřen na posouzení vlivu mechanického napětí v podobě tahového zatížení vlákna na přerozdělení optického výkonu mezi jednotlivými vidy a pro sestavení výsledného matematického modelu [1].

2. Kvazi-jednovidová optická vlákna

Speciální atypický profil kvazi-jednovidových optických vláken byl v rámci výzkumu modelován pomocí metody konečných diferencí (FDM). Výsledný tvar rovnice LP vidů je ve tvaru [2]:

$$f''(r) + \frac{f'(r)}{r} + \left(k_0^2 \varepsilon(r) - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) f(r) = 0, \quad (1)$$

kde l je úhlové vlnové číslo, r je radiální souřadnice, k_0 je velikost vlnového vektoru ve vakuu, β je fázová konstanta a f je radiální funkce vycházející z rovnice (2). Protože ve vrstvě s konstantním indexem lomu nemá vektorová rovnice vazební členy a může tak být použita lineární polarizace, elektrické složky pole jsou pak řešením skalární Helmholtzovy rovnice:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} + \nabla \left(\mathbf{E} \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) = 0. \quad (2)$$

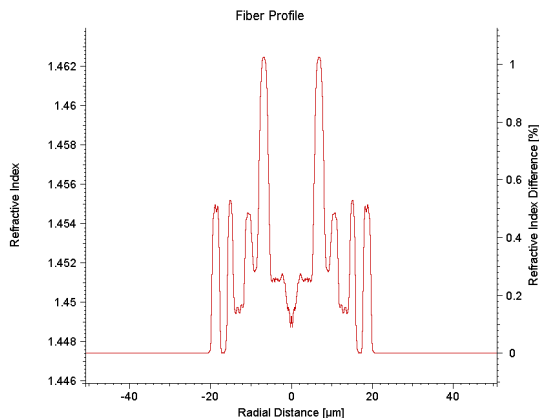
Pokud se použijí cylindrické souřadnice, řešení je nalezeno pomocí separace proměnných, kde f je radiální funkce této separace:

$$E_x(r, \phi, z) = f(r) \exp[j(l\phi - \beta z)]. \quad (3)$$

Výsledné vidy jsou nalezeny vyšetřením hodnot β ,

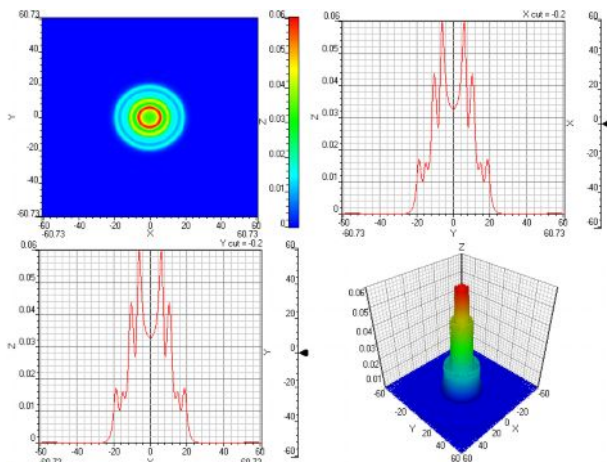
kteřá mají konečná řešení. Jednou z možností, jak zvýšit citlivost kvazi-jednovidových vláken v distribuovaných systémech, je zakřivení vlákna. Jeho teoretický popis vychází z řešení Maxwellových rovnic v zakřivených souřadnicích [3].

Profil kvazi-jednovidového optického vlákna byl na základě matematických výpočtů navrhnout programem Optifiber a následně vyroben ve spolupráci s AVČR. Profil vyrobeného kvazi-jednovidového optického vlákna je uveden na Obr. 1. Grafický výstup vypočítaného vidového pole ve vzdálenosti 10 m pro vlnovou délku 850 nm v programu Optifiber je uveden na Obr. 2. Výše uvedené optické vlákno bylo navrženo tak, aby na vlnové délce 1550 nm umožňovalo datovou komunikaci a vlnová délka 850 nm umožňovala využití pro senzorická měření.



Obr. 1: Profil kvazi-jednovidového optického vlákna SG1005.

Program Optifiber je silným nástrojem i pro řešení polí v optických vláknech, neboť v sobě kombinuje numerické výpočetní zařízení pro určení vidů ve vláknech s výpočetními modely pro grupové zpoždění, grupovou rychlost disperze, efektivní průměr vidového pole, ztráty, polarizační vidovou disperzi, efektivní nelinearity a další.



Obr. 2: Optického vlákna SG1005 (Optifiber) – vypočítané vidové pole (vzdálenost 10 m) v upravené struktuře pro 850 nm (metoda FDM).

3. Vlákno optické senzory založené na redistribuci výkonu

V případě vláknových senzorů, jednovidové vlákno, které by bylo uvedeno do kvazi-jednovidového režimu a umožnilo by šíření více vidů, ztrácí uplatnění v interferometrických a polarizačních senzorech. Na druhou stranu však vlákno s omezeným počtem vidů umožní vyhodnocovat jemné vlivy v optickém vlákne, které vedou k vidové vazbě a diferenciálnímu vidovému útlumu a lze ho vyhodnocovat na výstupu. Mimo výše uvedené parametry lze vyhodnocovat také změny v energetické distribuci po průřezu vlákna.

Jako vhodný nástroj pro metodu redistribuce výkonu se ukazuje být analýza vázaných výkonů. Tato analýza je vhodná v případě vícevidových vláken, protože umožňuje sledovat střední hodnoty výkonu všech vidů jako celku, na rozdíl od analýzy vázaných vidů, která řeší šíření jednotlivých vidů. Rovnice analýzy vázaných výkonů jsou souborem konečného počtu diferenciálních rovnic prvního řádu se symetrickými konstantními koeficienty. Mají důležité omezení, neboť platí pouze pro relativně slabé vazby. Rovnice pro vázané výkony pak v konečné podobě vypadají následovně [4]:

$$\frac{dP_\mu}{dz} = -2\alpha_\mu P_\mu + \sum_{v=1}^N h_{\mu v} (P_v - P_\mu), \quad (4)$$

kde vazební koeficienty:

$$h_{\mu v} = \left| \hat{K}_{\mu v} \right|^2 \left\langle \left| F(\beta_\mu - \beta_v) \right|^2 \right\rangle, \quad (5)$$

kde pro vazební koeficienty dále z rovnic vyplývá, že jsou symetrické,

$$h_{\mu v} = h_{v \mu}. \quad (6)$$

Koeficient výkonových ztrát $2\alpha_\mu$ představuje ztráty způsobené vyzařováním a také tepelné ztráty. Jestliže předpokládáme, že v jistém bodě z je veškerý výkon nesen pouze videm μ , pak:

$$\frac{dP_\mu}{dz} = - \left(2\alpha_\mu + \sum_{v=1}^N h_{\mu v} \right) P_\mu. \quad (7)$$

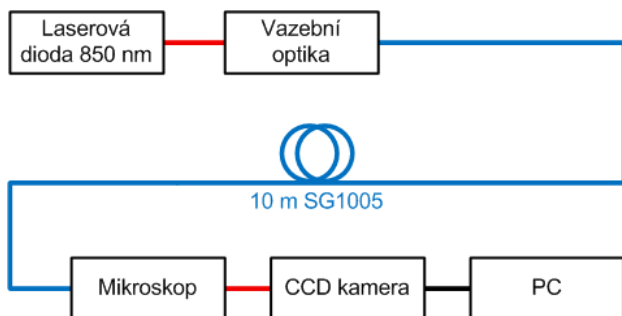
Ztrátový člen je rozšířen sumou přes všechny vazební koeficienty, z čehož plyne, že vedený vid μ ztrácí výkon do všech dalších vedených vidů. Jestliže naopak předpokládáme, že v jistém bodě z vid μ nese nulový výkon, pak:

$$\frac{dP_\mu}{dz} = \sum_{v=1}^N h_{\mu v} P_v. \quad (8)$$

Kladná derivace dP_μ / dz zde říká, že vid μ získává výkon vazbou se všemi dalšími vidy.

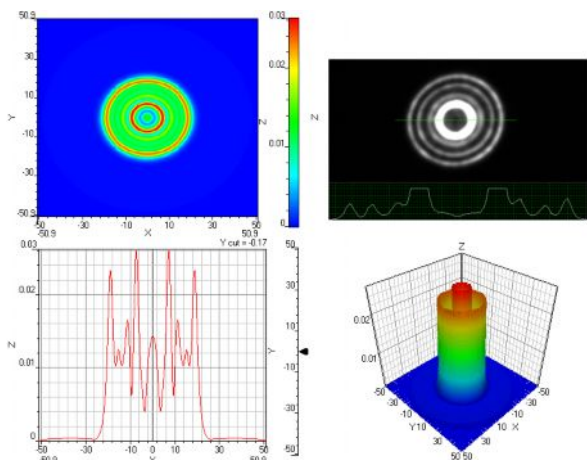
4. Skutečné vidové pole kvazi-jednovidového vlákna SG1005

Aby bylo možné srovnat teoretické, vypočítané vidové pole vlákna se skutečným vidovým polem na konci vlákna, bylo nezbytné sestavit měřící sestavu, která získání těchto obrazců umožní (viz Obr. 3).



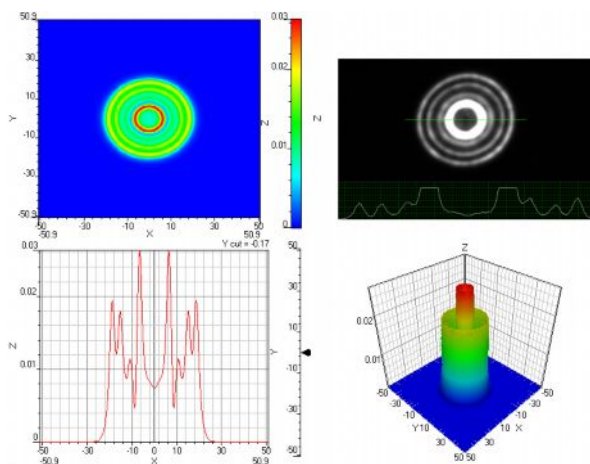
Obr. 3: Blokové schéma sestavy složená pro měření vidového pole na konci optického vlákna.

Měřící sestava složená v laboratoři optických komunikačních technologií Katedry telekomunikační techniky měla následující prvky [7]. Regulátor laserové diody LCD 202C, teplotní regulátor TED 200C, které byly napojeny na vlastní teplotní regulátor TCLDM9. V tomto regulátoru byla upevněna laserová dioda PH85-F1P1S2 o vlnové délce 850 nm. Laserový paprsek byl následně pomocí objektivu zaměřen na čelo vlákna, které se nacházelo v jeho ohniskové vzdálenosti. Vlákno SG1005 použité při tomto experimentu mělo délku 10 m. Konec vlákna byl upevněn na stolici mikroskopu s 80ti násobným zvětšením a pomocí monochromatické kamery Basler A361f, která dokáže zobrazit světlo o vlnové délce 850 nm. Přes rozhraní firewire byl obraz sejmutý kamerou vyveden na monitor počítače. Výsledek srovnání naměřených a vypočítaných vidových struktur je uveden na Obr. 4 a 5.



Obr. 4: Srovnání vidových polí - metoda výpočtu FDM a experimentálně naměřené hodnoty.

Pro výpočet vidové struktury byly použity technologie TMM (metodě transferu matic) a FDM (metoda konečných diferencí) [5].



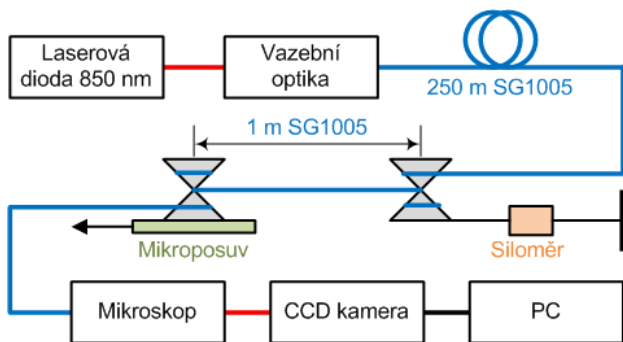
Obr. 5: Srovnání vidových polí - metoda výpočtu TMM a experimentálně naměřené hodnoty.

Metoda TMM se i zde ukázala být přesnější vůči skutečně změřeným hodnotám. Počet maxim i minim lze považovat za shodný. Relativní polohy maxim se liší do hodnoty 15 %, minim do 7,5 %. Relativní hodnoty intenzit polí se v hodnotách pro maxima liší do 14 % a v případě minim v rozmezí 3 – 38 %.

Z porovnání výsledků měření vyplývá, že metoda TMM není vhodná pro výpočty struktur obsahujících rozhraní hluboko v plášti, neboť pak dochází k dramatickému nárůstu chyby numerického řešení. Metoda FDM ukázala svoji slabinu naopak při výpočtech v ose struktury, kde se objevují maxima v rozporu se skutečně změřenými hodnotami. Obě metody lze bez problémů využít při řešení klasických jednodušších struktur, pro řešení komplikovaných struktur je nezbytné provést úplnou vektorovou analýzu pole vycházející přímo ze základních Maxwellových rovnic.

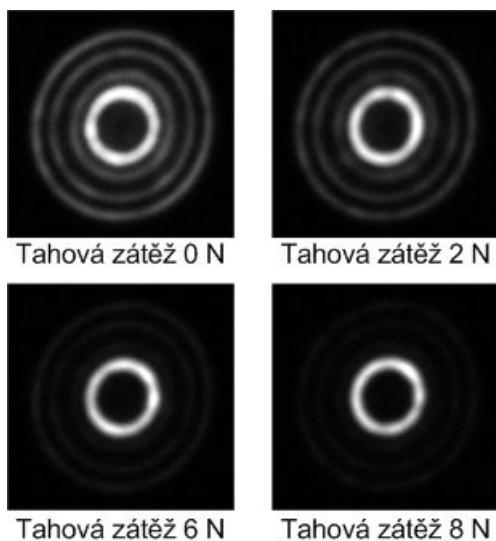
5. Vliv mechanického napětí v podobě tahu na optické vlákno SG1005

Pro posouzení vlivu mechanického napětí v podobě tahové zátěže na kvazi-jednovidové optické vlákno SG1005 bylo sestaveno v laboratoři optických komunikačních technologií Katedry telekomunikační techniky speciální zapojení, které je v blokové podobě znázorněno na Obr. 6. Použité přístroje odpovídají přístrojům, které byly použité při měření vidového pole (Obr. 3).



Obr. 6: Blokové schéma zapojení pro posouzení vlivu tahového zatížení (mechanické napětí) na vlákno SG1005.

První měření bylo provedeno pro mechanické napětí v podobě tahu při 0 N, tedy bez zatížení. Pro další měření s nastavením tahového zatížení byl použitý mikroposuv od společnosti Edmund Optics (125 mm Travel Metric Long Travel Rack & Pinion Track) s přesností 0,1 mm a samotné tahové zatížení na vlákno bylo odečítáno na siloměru STO-50 (výrobce NATIS, s. r. o. Kroměříž) s přesností $0,1 \text{ N} \pm 0,5 \%$ z rozsahu. Tahové zatížení bylo v rozsahu od 0 N do 8 N. Vybrané výsledky měření (záznamy z CCD kamery) pro vzájemné porovnání vlivu jsou zobrazeny na Obr. 7. V tomto případě se jedná o zátěže v úrovních 0 N, 2 N, 6 N a 8 N.



Obr. 7: Vybrané výsledky měření (záznamy z CCD kamery) dle tahové zátěže 0 N, 2 N, 6 N a 8 N.

Z naměřených výsledků dle Obr. 7. je patrné, že při zvyšující se tahové zátěži dochází k přerozdělení výkonů čtyř významných vedených energetických vidů do jednoho dominantního vidu. Pro tyto uvažované čtyři energetické vidy lze tuto problematiku zapsat do čtyř diferenciálních rovnic, které platí za předpokladu, že prostředí je bezztrátové a nedochází ke ztrátě energie jinak než pouze vazbou mezi vidy [5]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dz} &= h_{11}P_1 + h_{12}P_2 + h_{13}P_3 + h_{14}P_4 \\ \frac{dP_2}{dz} &= h_{21}P_1 + h_{22}P_2 + h_{23}P_3 + h_{24}P_4 \\ \frac{dP_3}{dz} &= h_{31}P_1 + h_{32}P_2 + h_{33}P_3 + h_{34}P_4 \\ \frac{dP_4}{dz} &= h_{41}P_1 + h_{42}P_2 + h_{43}P_3 + h_{44}P_4 \end{aligned} \quad (9)$$

Když se pak výše uvedená soustava diferenciálních rovnic (9) aplikujeme na optické vlákno se čtyřmi vidy, jak je naznačeno na Obr. 8, přechází tato soustava do tvaru:

$$\begin{aligned} P_1' &= k_{11}P_1 + k_{12}P_2 + k_{13}P_3 + k_{14}P_4 \\ P_2' &= k_{21}P_1 + k_{22}P_2 + k_{23}P_3 + k_{24}P_4 \\ P_3' &= k_{31}P_1 + k_{32}P_2 + k_{33}P_3 + k_{34}P_4 \\ P_4' &= k_{41}P_1 + k_{42}P_2 + k_{43}P_3 + k_{44}P_4 \end{aligned} \quad (10)$$

kde P_1 až P_4 odpovídá výkonům jednotlivých vidů na začátku vlákna, respektive P_1' až P_4' odpovídá výkonům jednotlivých vidů na konci vlákna. Tato soustava rovnic má šestnáct neznámých, které představují jednotlivé vazební koeficienty. Tyto koeficienty lze experimentálně určit pomocí selektivního buzení jednotlivých vidů, za podmínky lineárního přenosového prostředí (pomocí holografických mřížek) [8].



Obr. 8: Naznačení čtveřice výkonů na začátku a na konci kvazi-jednovidového optického vlákna SG1005 při vlnové délce 850 nm.

6. Závěr

Základní myšlenkou tohoto experimentálního měření bylo ověření vlivu mechanického napětí v podobě tahového zatížení kvazi-jednovidového vlákna SG1005 na hodnoty výkonů čtyř významných vedených energetických vidů. Z výsledků je patrné přerozdělení výkonů do jednoho dominantního vidu vlivem zvětšující se zátěže. Tyto výsledky poslouží pro další matematické vyhodnocení s využitím teorie nelineární optiky. Pro další vyhodnocení výsledků je nutné použití selektivního buzení jednotlivých vidů za použití holografických mřížek.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za aktivní podpory Grantové agentury ČR GA 102/07/1399 s názvem Kvazi-jednovidová optická vlákna pro telekomunikace a distribuované vláknové optické senzory a GA 102/09/0550, SP/2010185.

Použitá literatura

- [1] ŠIŠKA, P. *Studium a modelování módové vazby v optických vláknech v blízkosti normalizované frekvence*. Ostrava, 2009. Disertační práce. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc., VŠB-TU Ostrava.
- [2] FLORJANCZYK, M. K. *Technical documentation*, OptiFiber – Optical Fiber Design Software, Ottawa, Canada, 2006.
- [3] GLOGE, D. Weakly guiding fibers. *Applied Optics*. 10, 1971, p.2252-2258. Dostupné z WWW: <<http://dx.doi.org/10.1364/AO.10.002252>>.
- [4] MARCUSE, D. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. 2nd. edition, Academic Press, Inc., 1991, ISBN 0-12-470951-6.
- [5] DODS, S. R. A. Fiber Vector Modesolver - Improvements to the Efficient 4x4 Matrix Method. OSA Topical Meeting, In: *Integrated Photonics Research and Applications*, USA, 2006.
- [6] SISKA, P.; SKAPA, J.; KASIK, I.; MATEJEC, V.; VASINEK, V. A new area of optical fiber sensors: Novel multifunctional structures based on redistribution of optical power. *Optical Microsystems 2007*, 30th September – 3rd October, 2007, Capri, Italy, ISBN 978-3-00-022066-1.
- [7] MARSALEK, L.; SISKA, P.; VASINEK, V. Vizualizace módových polí v blízkosti normalizované frekvence. In: *Sborník VII. Seminář katedry telekomunikační techniky*. 13.4.2007, Ostrava, ISBN 978-80-248-1370-7.

- [8] BOUCHAL, Z.; HADERKA, O.; ČELECHOVSKÝ, R. Selective excitation of vortex fibre modes using a spatial light modulator. *New J. Phys.* 7 125, 2005, Dostupné z WWW: <<http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/7/1/125>>.

O autorech

Petr KOUDELKA, narozen v roce 1984 v Prostějově. V roce 2006 získal titul Bc. na VŠB-TU Ostrava, Fakultě elektroniky a informatiky, Katedře Telekomunikací. O dva roky později získal na tomtéž pracovišti titul Ing. v zaměření optoelektronika. V současné době v rámci doktorského studia se věnuje optickým bezdrátovým spojům a optovláknovým distribuovaným systémům.

Jan LÁTAL, narozen v roce 1983 v Prostějově. V roce 2006 získal titul Bc. na VŠB-TU Ostrava, Fakultě elektroniky a informatiky, Katedře Telekomunikací. O dva roky později získal na tomtéž pracovišti titul Ing. v zaměření optoelektronika. V současné době v rámci doktorského studia se věnuje optickým bezdrátovým spojům a optovláknovým distribuovaným systémům.

Petr ŠIŠKA, narozen v roce 1979 v Kroměříži. V roce 2005 získal titul Ing. na VŠB-TU Ostrava, Fakultě elektroniky a informatiky, Katedře Telekomunikací. O tři roky později získal na tomtéž pracovišti titul Ph.D. v zaměření telekomunikační technika. V současné době je zaměstnán na výše uvedené katedře jako odborný asistent. Náplní jeho vědecké činnosti jsou optické komunikace, vláknově optické senzory, optovláknové distribuované systémy.