

# INTERFERENCIA MODOV V OPTICKÝCH VLÁKNACH

## INTERMODAL INTERFERENCE IN OPTICAL FIBRES

*V článku sú popísané výsledky teoretickej analýzy a meraní interferencie modov v málomodových optických vláknach. Je ukázané, že interferencia modov je citlivý parameter závisiaci od profilu indexu lomu a geometrických vlastností optického vlákna. Porovnanie teoretických a experimentálnych hodnôt interferencie modov ukazuje, že meranie interferencie by mohlo byť použité na zisťovanie miery korešpondencie profilu indexu lomu vyšetrovaného vlákna a ideálneho step-indexového vlákna.*

### Úvod

Monochromatickú elektromagnetickú vlnu šíriacu sa optickým vlnovodom (vláknom) je možné popísať lineárnou kombináciou istých „vlastných“ funkcií (alebo „modov“). Parametre šírenia sa týchto modov (rýchlosť šírenia sa, koeficient absorpcie, oblasť frekvencií pre ktoré jednotlivé mody existujú) sú vo všeobecnosti odlišné. V dôsledku toho zmena fázy signálu vyvolaná prechodom vlny cez vybraný úsek vlnovodu závisí nie len od toho, akým dlhým úsekom vlna prešla a aká je jej frekvencia, ale i od toho, ktorým modom bol signál prenášaný. V prípade, že na prenose signálu sa podieľalo viacero modov, dôjde na konci vlákna k vytvoreniu optického stavu zloženého z odlišných modálnych funkcií s odlišnými fázami.

Pri zväžení rozdielnosti fáz jednotlivých modálnych funkcií signál vytvorený kvadratickým detektorom na konci vlnovodu dĺžky  $l$  môžeme vyjadriť nasledovne:

$$s = \int_S c(x,y) \cdot \sum_i \psi_i(x,y,t) \cdot \sum_i \psi_i^*(x,y,t) \cdot dx dy \quad (1)$$

kde  $c(x, y)$  je citlivosť detektora,  $\psi_i(x,y,t)$  sú funkcie popisujúce jednotlivé mody a rovnajú sa  $\psi_{i,0}(x,y) \cdot \exp(j(\omega t - \beta_i z))$ , kde  $\psi_{i,0}$  sú modálne funkcie,  $\beta_i$  sú fázové konštanty jednotlivých modov,  $x$  a  $y$  sú súradnice kolmo na os vlnovodu,  $z$  je súradnica v osi vlnovodu,  $S$  je plocha, na ktorej sú modálne funkcie  $\psi_{i,0}$  odlišné od nuly a „\*“ označuje komplexne združenú funkciu. Roznásobením naznačených súčtov a za predpokladu, že k detekcii bol použitý detektor s citlivosťou rovnou  $c_0$  na celej ploche  $S$ , dostaneme po jednoduchých úpravách:

$$S = c_0 \cdot \int_S \sum_i \psi_{i,0}(x,y) \cdot \psi_{i,0}^*(x,y) \cdot dx dy + c_0 \cdot \int_S \sum_{i \neq 0} \psi_{i,0}(x,y) \cdot \psi_{k,0}^*(x,y) \cdot \exp(j(\beta_i - \beta_k)) \cdot dx dy \quad (2)$$

*In this paper the results of a theoretical analysis and practical investigation of mode interference in single mode optical fibres are described. It is shown that inter-modal interference is a sensitive parameter depending on the quality of an index profile or geometrical parameters of optical fibre. The comparison of experimental and theoretical values of mode interference indicates that the measurement of interference could be used for testing how the real refractive index profile of investigated fibre corresponds with the refractive index profile assumed at the calculation (step-index profile).*

### Introduction

The monochrome electromagnetic wave propagating through the optic fibre can be described as a linear combination of eigenfunctions (modes) which are determined by the parameters of the fibres. The propagation parameters of such modes (propagation velocity, absorption coefficient, frequency band for which the mode exists) are in general different. So the change of the signal phase due to its passing through the fibre depends not only on the frequency of the signal and the length of the optic fibre, but also on the properties of the actual mode propagating through the fibre. If more than one mode propagates, the optical stage at the end of the fibre is a superposition of values with different phases.

Taking into account the different phase constants of the modes, we can express the output of the quadratic detector located at the end of the fibre of length  $l$  as follows:

$$s = \int_S c(x,y) \cdot \sum_i \psi_i(x,y,t) \cdot \sum_i \psi_i^*(x,y,t) \cdot dx dy \quad (1)$$

where  $c(x,y)$  is the detector sensitivity,  $\psi_i(x,y,t)$  are the functions describing the propagating modes and are equal to  $\psi_{i,0}(x,y) \cdot \exp(j(\omega t - \beta_i z))$ , where  $\psi_{i,0}$  are the modal functions,  $\beta_i$  are the phase constants of particular modes,  $x$  and  $y$  are the coordinates perpendicular to the direction of the propagation,  $z$  is the coordinate in the direction of propagation,  $S$  is an area in which the modal functions are nonzero and “\*” denotes complex conjugation. Assuming the constant sensitivity of detector  $c_0$  on whole area  $S$  after some manipulation we get:

\* <sup>1</sup>Ivan Martinček, <sup>1</sup>Ivan Turek, <sup>2</sup>Milan Dado, <sup>1</sup>Karol Grondžák, <sup>2</sup>Slavomir Černický

<sup>1</sup> Department of Physics,

<sup>2</sup> Department of Telecommunication, Faculty of Electrotechnical Engineering, University of Žilina, Moyzesova 20, SK-01026 Žilina, Slovak Republic  
E-mails: ivmar@fel.utc.sk, turek@fel.utc.sk, dado@bull.utc.sk, grondz@fel.utc.sk.

Prvý člen pravej strany rovnice (2) predstavuje signál vytvorený súčtom intenzít prenesených jednotlivými modmi, nezávisí od dĺžky vlnovodu a iba slabso závisí od vlnovej dĺžky svetla (od  $\lambda$  závisí iba v dôsledku závislosti modálnych funkcií od vlnovej dĺžky).

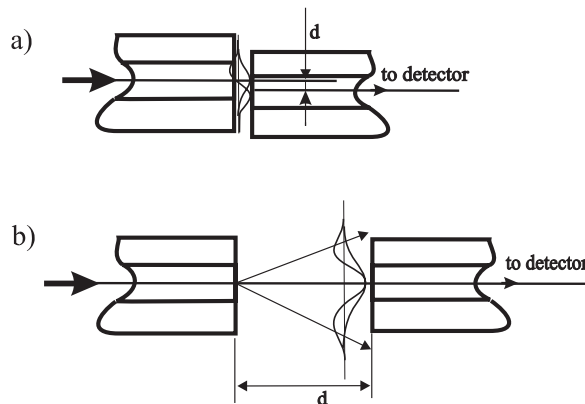
Druhý člen pravej strany rovnice (2) predstavuje „interferenčný“ člen. Ako je z jeho tvaru uvedeného v rovnici (2) vidieť, jeho hodnota je rovná nule, pretože

$$\int_S \psi_{i,0}(x,y) \cdot \psi_{k,0}^*(x,y) \cdot dx dy = 0 \quad (3)$$

pre  $i \neq k$  (pretože modálne funkcie sú ortogonálne).

V prípade, že citlivosť detektora nie je v celej oblasti  $S$  rovnaká, interferenčný člen sa nemusí rovnať nule. Jeho hodnota bude závisieť od stupňa a typu jeho symetrie a charakteru príslušnej dvojice interferujúcich modov  $\psi_{i,0}$  a  $\psi_{k,0}$  a keď fázové konštanty interferujúcich modov nie sú rovnaké, relatívne prudko bude závisieť od dĺžky vlákna a od vlnovej dĺžky svetla, ktoré vláknom prechádza. Rovnaký výsledok by sme dosiahli, keby sa ortogonalita modov narušila zaradením vhodného priestorového filtra. Ako takýto filter sa môže použiť tienidlo s malou dierkou (pinhole) [1], vhodne umiestnené medzi vyšetřované vlákno a detektor, alebo ďalšie

optické vlákno, ktorým sa signál z konca vyšetřovaného vlákna privedie na povrch detektora [2]. Nesúosovým uložením takéhoto priestorového filtra sa naruší ortogonalita symetrických a antisymetrických modov (takéto usporiadanie je vhodné pri vyšetřovaní interferencie modov  $LP_{01}$  a  $LP_{11}$ ). Uložením filtra súosovo, ale vo väčšej vzdialenosti od konca vyšetřovaného vlákna sa naruší ortogonalita symetrických modov (usporiadanie vhodné napríklad pri vyšetřovaní interferencie modov  $LP_{01}$  a  $LP_{02}$ ), ako to ilustrujú schémy uvedené na obr. 1.



Obr. 1 Schéma usporiadania pre vyšetřovanie interferencie a) symetrického a asymetrického; b) dvoch symetrických modov  
Fig. 1 The set-up of investigation of intermodal interference of a) symmetric and astisymmetric; b) two symmetric modes

## Určenie fázových konštánt

Fázovú konštantu modu pre vlákno so skokovým profilom indexu lomu možno podľa [3] vyjadriť:

$$\beta = k \left[ n_{co}^2 - \frac{U^2(V)}{V^2} (n_{co}^2 - n_{cl}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

kde  $U^2 = r^2 (n_{co}^2 k^2 - \beta^2)$ ,  $V^2 = k^2 r^2 (n_{co}^2 - n_{cl}^2)$  je normovaná frekvencia,  $k = 2\pi/\lambda$  je konštanta šírenia sa svetelnej vlny vo vákuu,  $n_{co}$  je index lomu jadra,  $n_{cl}$  je index lomu plášťa a  $r$  je polomer jadra.

Funkčná závislosť  $U(V)$  sa získa riešením charakteristickej rovnice pre step-indexové vlákno. V priblížení slabovodivého vlákna ( $n_{co} \approx n_{cl}$ ) pre step-indexové vlákno má táto charakteristická rovnica [4] tvar:

The first term on the right side of (2) represents the sum of particular mode intensities and does not depend on the length of waveguide and only weakly depends on the wavelength (the dependence is only because of the dependence of the modal functions on wavelength).

Second term on the right side of (2) is the interference term. It is clear that its value is zero, because

$$\int_S \psi_{i,0}(x,y) \cdot \psi_{k,0}^*(x,y) \cdot dx dy = 0 \quad (3)$$

for  $i \neq k$  (the modal functions are orthogonal).

In the case of non-uniform sensitivity of the detector the interference term can have non-zero value. The value will then depend on the symmetry of the interfering modes  $\psi_{i,0}$  and  $\psi_{k,0}$ . When the phase constants (propagation velocity) of interfering modes are different, then the value will depend also on the length of the fibre and on the wavelength. For the detector with uniform sensitivity the same result can be achieved when the orthogonality of the modes is disturbed using a spatial filter which influences the spatial distribution the of the optical field amplitude. A pinhole located between the fibre and detector can be used as

such a filter. A piece of another fibre transporting the signal from the end of the investigated fibre to the detector can be used for this purpose too [2].

Non axisymmetrical location of such a spatial filter will disturb the orthogonality of symmetric and anti-symmetric modes (such configuration is useful when studying the interference of  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes). When locating the spatial filter axisymmetrically, but further from the end of the fiber under study, the orthogonality of symmetric modes is disturbed (such configuration is useful for studying the interference of modes  $LP_{01}$  and  $LP_{02}$ ), as can be seen in Fig. 1.

## Mode phase constant determination

The mode phase constant for step-index optic fibre can be expressed [3]:

$$\beta = k \left[ n_{co}^2 - \frac{U^2(V)}{V^2} (n_{co}^2 - n_{cl}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

where  $U^2 = r^2 (n_{co}^2 k^2 - \beta^2)$ ,  $V^2 = k^2 r^2 (n_{co}^2 - n_{cl}^2)$  is the normalised frequency,  $n_{co}$ ,  $n_{cl}$  are the refractive indices of the core and the cladding respectively,  $r$  is the core radius and  $k = 2\pi/\lambda$  is free-space propagation constant.

Function  $U(V)$  can be obtained by solving a characteristic equation for the optic fibre. In a weakly-guided approximation ( $n_{co} \approx n_{cl}$ ) for step-index fibre it has the form [4]:

$$U \frac{J_{m+1}(U)}{J_m(U)} = W \frac{K_{m+1}(W)}{K_m(W)} \quad (5)$$

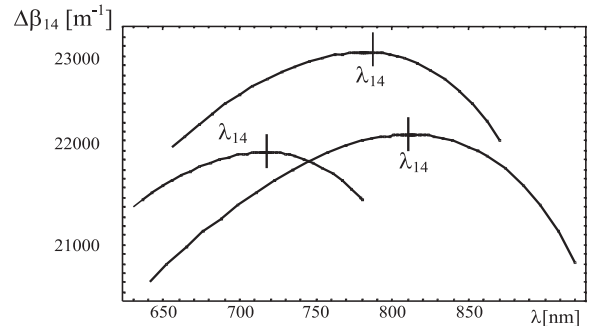
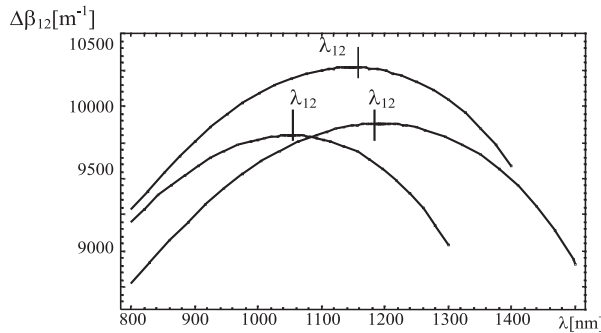
kde  $m = 0, 1, 2, \dots$ ,  $J_m$  je Besselova funkcia 1. druhu,  $K_m$  je modifikovaná Besselova funkcia 2. druhu, kde  $W^2 = r^2(\beta^2 - n_{cl}^2 k^2)$ ,  $V^2 = U^2 + W^2$ .

Ako vyplýva z rovnice (2), hodnota integrálu popisujúceho interferenčný člen dominantne závisí od rozdielu fázových konštánt jednotlivých modov  $\Delta\beta_{pq}(\lambda) = \beta_p(\lambda) - \beta_q(\lambda)$ , kde  $p, q$  sú rády modov ( $LP_{01}$  je mod 1. rádu,  $LP_{11}$  2. rádu atď.) a dĺžky vlákna, na ktorej dochádza k interferencii. Rozdiel fázových konštánt  $\Delta\beta_{12}(\lambda)$  pre mody  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$  a  $\Delta\beta_{14}(\lambda)$  pre mody  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ , vyplývajúce z rovníc (4) a (5) pre rozdielne parametre vlákien, je znázornený na obr. 2. Z tohto obrázku vidieť, že rozdiel fázových konštánt nadobúda extrém pre vlnové dĺžky  $\lambda_{pq}$ . Ako vyplýva z rovnice (4), hodnota  $\lambda_{pq}$  pre step-indexové vlákna závisí len od parametrov  $r, n_{co}, n_{cl}$  príslušného vlákna.

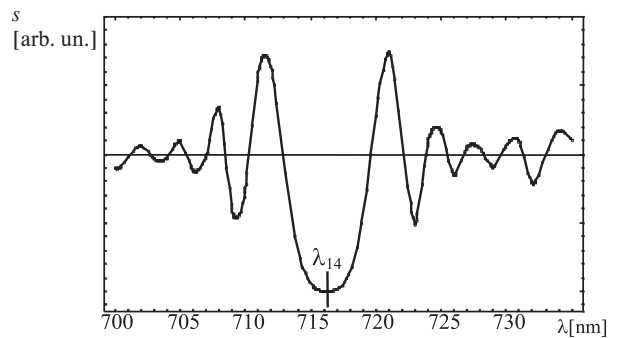
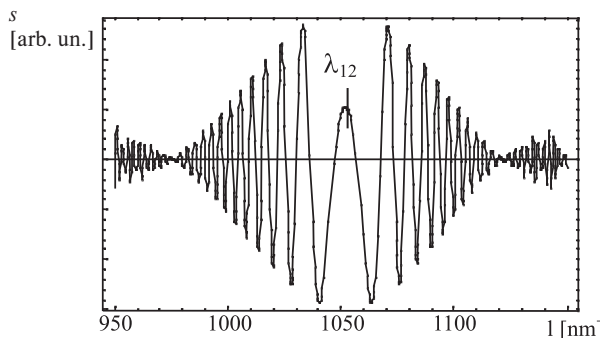
$$U \frac{J_{m+1}(U)}{J_m(U)} = W \frac{K_{m+1}(W)}{K_m(W)} \quad (5)$$

where  $m = 0, 1, 2, \dots$ ,  $J_m$  is Bessel function of the first kind,  $K_m$  is modified Bessel function of the second kind,  $W^2 = r^2(\beta^2 - n_{cl}^2 k^2)$ ,  $V^2 = U^2 + W^2$ .

According to (2), the value of the interference term depends dominantly on the difference of the phase constants of particular modes  $\Delta\beta_{pq}(\lambda) = \beta_p(\lambda) - \beta_q(\lambda)$ , ( $p, q$  are orders of the modes: 1 for  $LP_{01}$ , 2 for  $LP_{11}$ , and so on) and on the length of the fibre. The phase constant differences  $\Delta\beta_{12}(\lambda)$  and  $\Delta\beta_{14}(\lambda)$  following from a numerical solution of (4) and (5) for  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$  modes and  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$  modes respectively for different fibre parameters can be seen in Fig. 2. From this figure it is clear that there is an extreme value for wavelength  $\lambda_{pq}$ . It can be seen from (4) that this value depends only on the parameters of the fibre ( $r, n_{co}, n_{cl}$ ).



Obr. 2 Závislosť rozdielu fázových konštánt modov a)  $LP_{01}$  a  $LP_{11}$ ; b)  $LP_{01}$  a  $LP_{02}$  od vlnovej dĺžky  
Fig. 2 Wavelength dependence of the phase constant difference for a)  $LP_{01}$  a  $LP_{11}$ ; b)  $LP_{01}$  a  $LP_{02}$  modes



Obr. 3 Závislosť interferenčného člena od vlnovej dĺžky pri interferencii modov a)  $LP_{01}$  a  $LP_{11}$ ; b)  $LP_{01}$  a  $LP_{02}$   
Fig. 3 Wavelength dependence of the interference term when interfering a)  $LP_{01}$  a  $LP_{11}$ ; b)  $LP_{01}$  a  $LP_{02}$

Existencia extrémú závislosti  $\Delta\beta_{pq}(\lambda)$  sa prejaví i extrémom závislosti rozdielu fázy od vlnovej dĺžky, takže  $\lambda_{pq}$  sa dá chápať i ako interferenčný stred (obr. 3).

Pre step-indexové vlákno v priblížení slabovodivého vlákna je možné rozdiel fázových konštánt vyjadriť ako súčin dvoch funkcií. Prvá z týchto funkcií závisí len od parametrov vlákna  $r, n_{co}, n_{cl}$

The existence of an extreme of  $\Delta\beta_{pq}(\lambda)$  causes the existence of the extremal value of the phase difference as a function of wavelength so  $\lambda_{pq}$  can be taken as a centre of the interference (Fig. 3.).

In the weakly-guided approximation the phase constant difference can be expressed as a product of two functions. The

a druhá funkcia závisí iba od normovanej frekvencie  $V$ . Tak dostaneme:

$$\Delta\beta_{pq} = \left[ \frac{n_{co} - n_{cl}}{2r^2 n_{co}} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{U_q^2(V) - U_p^2(V)}{V} = K(n_{co}, n_{cl}, r) f_{pq}(V) \quad (6)$$

kde  $p, q$  sú rády modov.

Na obr. 3. je znázornená závislosť  $f_{pq}(V)$  pre mody  $LP_{01}, LP_{11}$  a  $LP_{01}, LP_{02}$ . Ako vidieť z tohto obrázku, prvá funkcia nadobúda extrém pre hodnotu  $V = 3,029$  [5] a druhá pre hodnotu  $V = 4,448$ . Ak uvážime, že tieto extrémny zodpovedajú interferenčným stredom prislúchajúcich danej dvojici modov, pomocou normovanej frekvencie pre hodnoty  $\lambda_{pq}$  dostávame:

$$\lambda_{12} = \frac{2\pi r}{3,029} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{pre } LP_{01} \text{ a } LP_{11} \quad (7)$$

$$\lambda_{14} = \frac{2\pi r}{4,448} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{pre } LP_{01}, \text{ a } LP_{02} \quad (8)$$

Porovnaním rovníc (7) a (8) dostaneme súvis medzi interferenčnými stredmi modov  $LP_{01}, LP_{11}$  a  $LP_{01}, LP_{02}$ :

$$\frac{\lambda_{12}}{\lambda_{14}} = 1,458 \quad (9)$$

Ako sme už uviedli v prvom odseku, aby sme mohli pozorovať interferenciu modov, je nutné porušiť ortogonalitu jednotlivých modov. Dá sa to urobiť viacerými spôsobmi [1, 3, 6]. Pri našich meraniach optické pole vyšetřovaného vlákna snímame ďalším optickým vláknom (detekčným), ktoré je pri vyšetřovaní interferencie modov  $LP_{01}$  a  $LP_{11}$  osovo posunuté tak, ako ukazuje obr. 1a. Pri vyšetřovaní interferencie modov  $LP_{01}$  a  $LP_{02}$  je uložené súosovo, ale vzdialené tak, ako je zakreslené na obr. 1b.

## Výsledky experimentu

Interferenciu modov optických vlákien sme experimentálne vyšetřovali v usporiadaní uvedenom v práci [3].

Výsledky získané pri vyšetřovaní interferencie prvých dvoch modov sú uvedené v prácach [2, 3], v ktorých bolo na základe nameraných priebehov poukázané na možnosť ich použitia pre určovanie homogenity optických vlákien.

Výsledky získané pri vyšetřovaní interferencie vyšších modov prezentujeme v tejto práci. Ide o výsledky získané pri vyšetřovaní interferencie dvojice modov  $LP_{01}$  a  $LP_{02}$  na telekomunikačných step-indexových vláknach firmy Pirelli a ich porovnanie s interferenciou modov  $LP_{01}$  a  $LP_{11}$ . Merania sme uskutočnili

first one depends only on the fibre parameters ( $r, n_{co}, n_{cl}$ ) the second one only on the normalised frequency ( $V$ ):

where  $p, q$  are the orders of modes.

In Fig. 3. the function  $f_{pq}(V)$  for  $LP_{01}, LP_{11}$  and  $LP_{01}, LP_{02}$  modes are presented. From this picture it can be seen, that the extremal values for the first and second function are  $V = 3,029$  [5] and  $V = 4,448$  respectively. If we assume the correspondence of these extremal values with the interference centre of the corresponding modes, we obtain:

$$\lambda_{12} = \frac{2\pi r}{3,029} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{for } LP_{01} \text{ and } LP_{11} \quad (7)$$

$$\lambda_{14} = \frac{2\pi r}{4,448} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{for } LP_{01} \text{ and } LP_{02} \quad (8)$$

Comparing the equations (7) and (8) we obtain the relation of the interference centres  $LP_{01}, LP_{11}$  and  $LP_{01}, LP_{02}$ :

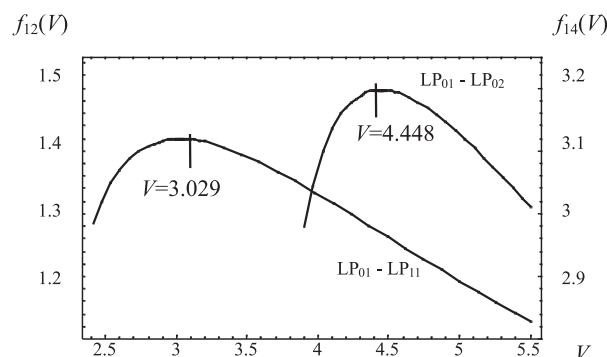
$$\frac{\lambda_{12}}{\lambda_{14}} = 1.458 \quad (9)$$

As it has been mentioned it is necessary to disturb the orthogonality of the modes so that we observe the modes interference. It can be done in different ways [1, 3, 6]. In our measurement other fibre (detecting fibre) scans the optic field of the fibre under study. When studying the  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  interference, the detecting fibre is located non-axisymmetrically (Fig. 1a) and when studying the interference of  $LP_{01}$  and  $LP_{02}$  modes, the detecting fibre is located as Fig.1b shows.

## Results of the experiment

The interference of the fibres was investigated at the experimental set up described in [3].

The results obtained when the first two modes were interfering are published in [2, 3]. It was noted there that the intermodal interference could be used for investigation of homogeneity of optic fibres. The information obtained during investigation of the interference of higher modes is illustrated by the results measured when investigating the interference of modes  $LP_{01}$  and  $LP_{02}$  on telecommunication step-index fibres of the firm Pirelli are presented in this paper together with their comparison with interference of  $LP_{01}, LP_{11}$ . The measures were



Obr. 4 K určeniú extrémú  $\Delta\beta$  pre dvojicu modov  $LP_{01} - LP_{11}$  a dvojicu  $LP_{01} - LP_{02}$

Fig. 4 On determination of extreme value of  $\Delta\beta$  for modes  $LP_{01} - LP_{11}$  and  $LP_{01} - LP_{02}$  respectively

li na ôsmich vláknach vybraných z jedného telekomunikačného kábla. Z každého vlákna sme vybrali dve vzorky dĺžky  $\approx 30$  cm, a to zo začiatku a konca kábla (ich vzdialenosť v kábli bola 6109 m), takže výsledky vypovedajú o pozdĺžnej homogenite vyšetrovaných vlákien. Namerané hodnoty stredov interferencie,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{14}$  pre jednotlivé vlákna sú uvedené v tab. 1., kde sú uvedené i hodnoty  $\lambda_{12}^T = 1,468 \lambda_{14}$ , vypočítané z nameraných hodnôt  $\lambda_{14}$ , ktoré sa podľa vzťahu (9) majú rovnať hodnotám  $\lambda_{12}$ , takže v tabuľke uvedený rozdiel  $\lambda_{12} - \lambda_{12}^T$  informuje o zhode resp. nezhode nameraných hodnôt s hodnotami vyplývajúcimi z teoretického popisu vlákien. Nepresnosť nameraných hodnôt je po riadku 1 nm, takže i hodnoty vypočítaných vlnových dĺžok uvedených v tab. 1. (pri ich vyjadrení v nanometroch) sú zaokrúhlené na celé čísla.

carried out on eight fibre samples of length  $\approx 30$  cm picked up from the beginning and the end of one telecommunication cable (the distance of the samples in the cable was 6109 m) so the results give us the information about the longitudinal homogeneity of the investigated fibres. The measured values of wavelengths  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{14}$  (centres of interference) for particular fibres are given in Tab. 1. The values  $\lambda_{12}^T = 1,468 \lambda_{14}$ , calculated from the experimentally measured values  $\lambda_{14}$ , (which, according (9), should be equal to values ( $\lambda_{12}$ )) are also presented in Tab. 1. Thus the difference  $\lambda_{12} - \lambda_{12}^T$  given in Tab.1. informs about the agreement between the measured values and the values coming from the theoretical model of fibres. Inaccuracy of the measured values is of the order of 1 nm, so even the calculated values expressed in nm are rounded to integers.

Tab. 1.

vlákno fiber	Začiatok vlákna Beginning of the fiber				Koniec vlákna End of the fiber			
	$\lambda_{14}$ [nm]	$\lambda_{12}$ [nm]	$\lambda_{12}^T$ [nm]	$\lambda_{12} - \lambda_{12}^T$ [nm]	$\lambda_{14}$ [nm]	$\lambda_{12}$ [nm]	$\lambda_{12}^T$ [nm]	$\lambda_{12} - \lambda_{12}^T$ [nm]
hnedé brown	670	1013	984	+29	669	1009	982	+27
sivé gray	666	1048	978	+70	669	1051	982	+69
oranžové orange	666	1004	978	+26	668	1009	981	+28
biele white	677	1051	994	+57	676	1051	992	+59
čierne black	658	987	966	+21	655	982	962	+20
červené red	672	1055	986	+69	668	1053	981	+72
modré blue	691	1075	1014	+61	696	1087	1022	+65
zelené green	697	997	1023	-26	700	1003	1028	-25

Ako vidieť z tabuľky, rozdiel medzi  $\lambda_{12}$  a  $\lambda_{14}$  zo začiatku a konca vlákna je rádovo niekoľko nanometrov. Maximálny rozdiel bol nameraný pre modré vlákno, kde rozdiel medzi interferenčnými stredmi prvého a štvrtého modu nameranými na vzorkách vybraných zo začiatku a z konca tohto vlákna bol 5 nm a v prípade prvého a druhého modu tento rozdiel bol až 12 nm. Svedčí to o relatívne veľkej pozdĺžnej nehomogenite tohto vlákna.

## Záver

Z matematického popisu šírenia sa svetla v step-indexovom optickom vlákne bol odvodený súvis stredov interferencie základného modu a vyšších modov.

Rozdielne hodnoty interferenčných stredov (medzi jednotlivými vláknami) sú podľa teórie popisujúcej step-indexové vlákna spôsobené rozdielnymi hodnotami  $r$ ,  $n_{co}$ ,  $n_{cl}$  vlákien. Polohy stredov interferencie ale môžu byť ovplyvnené i tým, že rôzne vlákna majú odlišné profily indexu lomu. V dôsledku toho, pri vláknach s rovnakými  $r$ ,  $n_{co}$ ,  $n_{cl}$ , rozdiel vlnovej dĺžky prislúchajúcej stredom interferencie prvých dvoch modov ( $\lambda_{12}$ ) a hodnoty  $\lambda_{12}^T$  vyplývajúcej z  $\lambda_{14}$  (t. j. hodnoty  $\lambda_{12} - \lambda_{12}^T$ ) môže poskytovať informáciu o tom, do akej miery sa profil indexu lomu prislúchajúceho vlákna odlišuje od ideálneho step-indexového profilu.

It can be seen from the table that the difference between the values  $\lambda_{12}$  and  $\lambda_{14}$  respectively measured at the beginning and the end of the fibre is several nanometers. The blue fibre shows the maximal difference: the difference between the interference centres of LP<sub>01</sub> and LP<sub>02</sub> modes at the beginning and the end of the fibre is 5 nm and for LP<sub>01</sub> and LP<sub>11</sub> modes it is 12 nm which indicates a relatively high longitudinal inhomogeneity of this fibre.

## Conclusion

The relation of the interference centres of the primary and the higher modes was derived from the mathematical description of the light propagation in the step-index fibres.

When assuming the theory of step-index fibres, different values of the interference centres for particular fibres are caused by different values of  $r$ ,  $n_{co}$ ,  $n_{cl}$  of the fibres. But the interference centres could be caused also by different refractive index profiles for particular fibres. For the fibers with the same values  $r$ ,  $n_{co}$  and  $n_{cl}$  it means that the difference of interference center of the first two modes  $\lambda_{12}$  and value  $\lambda_{12}^T$  coming from the interference center of the first and the fourth mode (i.e. the value  $\lambda_{12} - \lambda_{12}^T$  in Tab. 1.) gives information about how the refractive index profile of particular fibre differs from a step-index profile.

Experimentálne vyšetrenie interferencie modov niekoľkých optických vlákien ukázalo, že jednotlivé vlákna iba približne spĺňajú z teórie step-indexového vlákna vyplývajúci súvis  $\lambda_{12}$  a  $\lambda_{12}^T$ . Rozdiely medzi nameranými hodnotami stredov interferencie prvých dvoch modov  $\lambda_{12}$  a hodnotou  $\lambda_{12}^T$  vyplývajúcou zo stredov interferencie prvého a štvrtého modu sa líšia o hodnotu, ktorá sa pohybuje v rozpätí od -26 až do +72 nm, takže nemohla byť dôsledkom chýb merania.

Pozorované rozdiely  $\lambda_{12}$  a  $\lambda_{12}^T$  teda svedčia o tom, že meranie interferencie modov bude možné využiť na kontrolu toho, nakoľko je profil indexu lomu vyšetřovaného vlákna zhodný, alebo odlišný od priebehu so skokovou zmenou indexu lomu.

### Podakovanie

Týmto by sme chceli poďakovať Slovenským telekomunikáciám za poskytnutie vzoriek vlákien. Zároveň potvrdzujeme, že táto práca bola z väčšej časti vykonaná v rámci programu COST 265.

Recenzenti: J. Turán, J. Štelina

### Literatúra - References

- [1] HLUBINA, P.: The mutual interference of modes of a few mode fibre waveguide analysed in the frequency domain, *Journal of Modern Optics*, Vol. 42, 1995, pp. 2385-2399
- [2] TUREK, I., MARTINČEK, I., DADO, M., ČERNICKÝ, S.: Using of intermodal interference as a detector of optical fibre homogeneity, (in Slovak, resume in English) *Fine Mechanics and Optics*, 1999, pp. 223-226
- [3] TUREK, I., MARTINČEK, I., Stránsky, R.: Interference of Modes in Optical Fibres, *Optical Engineering*, Vol. 39, 2000, pp. 1304-1309
- [4] SNYDER, A., LOVE, J.: *Optical waveguide theory*, London, Chapman and Hall, 1983
- [5] BLAKE, J. N., KIM, B. Y., SHAW, H. J.: Fiber-optic modal coupler using periodic microbending, *Optic Letters*, Vol. 11, 1986, pp. 177-179
- [6] EFTIMOV, T. A., BOCK, W. J.: Sensing with a LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> intermodal interferometer, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 11, 1993, pp. 2150-2156

The experimental investigation of mode interference carried out on a series of optic fibres shows that particular fibres exhibit the accordance with the step-index theory of optic fibres only partially. The difference between the measured values  $\lambda_{12}$  and values  $\lambda_{12}^T$  range from -26nm up to +72nm, so it cannot be a measurement error. So the observed differences indicate that the telecommunication fibres exhibit a significant difference from the ideal step-index fibre.

The observed disagreement of experimental and theoretical values indicates that the measurement of interference could be used to test the agreement of the refractive index profile of investigated fibre with the refractive index profile of ideal step-index fibre.

### Acknowledgement

We would like to express our thanks to the Slovak Telecommunications which have provided us with the fibre samples. We also confirm that this work has been performed in the framework of the COST 265 programme.

Reviewed by: J. Turán, J. Štelina