

少模光纤中折射率微扰对模式消光比的影响

谢艳秋, 武保剑*, 文峰

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 根据时域微扰波动方程, 推导了少模光纤中存在折射率微扰时的模式耦合方程, 分析了少模光纤连接时模式的耦合特性及其对信号模式消光比的影响。以两模光纤为例, 研究了最大模式耦合效率与微扰/非微扰光纤间连接损耗系数之间的关系, 当模间耦合很小时前者约为后者的 4 倍。给出了存在折射率微扰时少模光纤的模式消光比公式, 计算表明, 当两个模式之间的有效相位失配因子与模式耦合系数之比大于 10, 或者模式耦合系数与模式耦合长度之积小于 0.2 时, 信号模式消光比可达 20 dB 以上。

关键词 光纤光学; 模式耦合; 折射率微扰; 模式消光比

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2306005

Influence of Refractive Index Perturbation on Mode Extinction Ratio in Few-Mode Fibers

Xie Yanqiu, Wu Baojian*, Wen Feng

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, 611731, China

Abstract According to the time-domain perturbation wave equation, we derived the mode-coupled equation with the refractive index perturbation in the few-mode fibers. Then, the equation was used to analyze the mode coupling characteristics and their influence on the mode extinction ratio of signals in the case of few-mode fiber connection. Taking a two-mode fiber as an example, we investigated the relationship between the maximum mode coupling efficiency and the connection loss coefficient of perturbative/non-perturbative fibers. It is found that the maximum mode coupling efficiency is about 4 times the connection loss coefficient when the inter-mode coupling is very small. Furthermore, we put forward a formula of mode extinction ratio in the presence of refractive index perturbation in few-mode fibers. The calculation results show that the mode extinction ratio of the signals can be higher than 20 dB when the ratio of the effective phase mismatch factor to the mode coupling coefficient is greater than 10 or the product of mode coupling coefficient and length is less than 0.2.

Key words fiber optics; mode coupling; refractive index perturbation; mode extinction ratio

OCIS codes 060.2330; 060.2310; 060.2340

1 引 言

单模光纤通信系统通过密集波分复用和多阶调制格式可使传输容量超过 100 Tbit/s, 这一传输容量已逼近非线性香农极限^[1]。采用空分复用(SDM)技术可将光纤容量进一步提升至 Pbit/s^[2], 其中模分复用(MDM)器件主要有支持几个模式传输的少模光纤、用于长距离中继传输的少模光纤放大器、模式复用/解复用器等^[3-5]。模分复用传输系统中, 相互正交的不同模式携带有不同信息, 因此要

求相应的模式光器件必须有足够高的模式消光比(ER, E_R)^[6-8]。基于不对称平面波导(PLC)且支持模式转换功能的模式复用/解复用器, 拥有 1.3 dB 的插入损耗, 其信号消光比超过 15 dB^[6]。文献[7]中提出了可以容纳多个模式信号的片上模式复用方案, 可以支持两通道模式复用信号并避免模式竞争现象, 实验证明在 C 波段上消光比可达 18 dB。文献[8]提出一种支持四通道模式复用信号的集成可重构光分插复用器, 在 C 波段上消光比为 15 dB~20 dB。此外, 具有不同折射率分布

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-08-11; 录用日期: 2020-08-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)

* E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

的少模光纤间对接、少模光纤弯曲或扭转、系统中各种模式处理器件内部模式耦合等都会导致信号模式消光比劣化。

导致信号模式消光比降低的根本原因在于模式的正交性遭受到了不同程度的破坏,模式之间出现了串扰现象。在模式耦合理论中,通常将破坏模式正交性的物理因素视为微扰^[9]。此前有研究学者为了分析由光纤弯曲引起的模式耦合现象^[10],引入了截面未对准的光纤接头耦合模型。但其主要分析了单模式输入情况下光纤弯曲引起的模式损耗现象,关于折射率微扰对信号模式消光比的影响未作相关说明。文献[11]基于背向瑞利散射原理,利用光子灯笼和光纤环形器实验测量了两段少模光纤熔接点处的模式耦合,为测量模式耦合大小提供了一种可行性思路,但其在理论模型中认为简并模式之间相互正交,模式耦合近似为零。实际上,光纤熔接可能已经破坏了简并模式之间的正交性。

本文主要分析折射率微扰不随光纤长度变化时模式串扰对于信号模式消光比的影响,特别是针对光纤连接时纤芯未对准或光纤结构不相同的情形。具体处理过程是:将光纤折射率变化视为微扰,对应于附加相对介电系数张量的实部,利用耦合模理论和微扰处理方法推导出完整的耦合模方程;然后,以两模光纤为例对耦合模方程进行了简化,给出各个模式的复包络解析表达式;最后,给出光纤微扰情形

下模式消光比的解析表达式,分析模式耦合系数 κ_{12} 、光纤长度 L_c 、有效相位失配因子 $\Delta\beta_e$ 等对信号消光比的影响。研究表明,当 $|\Delta\beta_e/\kappa_{12}| \geq 10$ 或者 $\kappa_{12}L_c \leq 0.2$ 时,模式消光比均不低于20 dB。另外,给出了最大模式耦合效率与微扰/非微扰光纤间连接损耗系数的关系。

2 模式耦合方程

少模传输系统中导致信号模式消光比劣化的因素有很多,主要包括具有不同折射率分布的少模光纤之间的对接、少模光纤弯曲或扭转、系统中各种模式处理器件的串扰等,其本质都是改变原来本征模式的正交性。总体而言,可以按两种折射率微扰方法进行分析。一种是折射率微扰不沿光传播方向改变,如少模光纤之间对接的情形;另一种是折射率微扰沿光传播方向不断改变,如光纤光栅情形。对于第二种情形,可将微扰光纤分成若干个小段,每个小段均按第一种情形处理。因此,本研究仅针对第一种折射率微扰的情形进行分析,典型的场景如图1所示。图1(a)表示两个少模光纤的中心轴未对准的情形,常见于光纤对接的场景。图1(b)表示两个少模光纤的结构不相同的情形,如少模掺铒光纤放大器(EDFA)系统中少模传输光纤与掺铒光纤通常有不同的纤芯尺寸,或者模分复用传输系统中少模光纤因厂家不同而存在差异等。

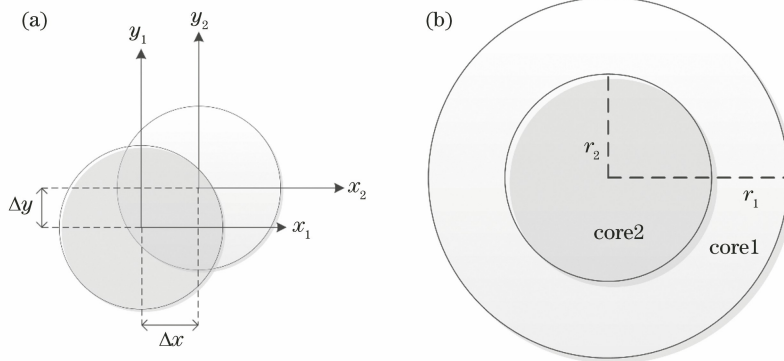


图1 折射率微扰不随光传播方向变化的微扰情形。(a)纤芯未对准;(b)结构不匹配

Fig. 1 Cases with the refractive index perturbation independent of the propagation direction.

(a) Core misalignment; (b) structure mismatching

假设导波光在少模光纤中沿 $+z$ 方向传播,折射率微扰引起的附加相对介电系数张量为 $\Delta\epsilon_r(x, y)$,所有模式的总光场 \mathbf{E} 满足如下时域微扰波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{r0} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta\epsilon_r \cdot \mathbf{E}), \quad (1)$$

式中, μ_0 和 ϵ_0 分别为真空磁导率和真空介电常数, ϵ_{r0} 为无微扰的相对介电系数。

忽略导波光沿 $+z$ 传播方向上的耦合作用,考虑单一线偏振(x 或 y 偏振)模式下的耦合情形,总光场可用无微扰时的本征模场展开,表达式为

$$E(x, y, z, t) = \sum_m \frac{1}{2} A_m(z) F_m(x, y) \cdot \exp[j(\omega t - \beta_m z)] + \text{c. c.}, \quad (2)$$

式中, $A_m(z)$ 、 $F_m(x, y)$ 和 β_m 分别为本征模的复振幅、横向电场分布及传播常数, 下标 m 表示模数, ω

为信号光的角频率; c. c. 表示前项的复共轭, \sum_m 表示对所有模式求和。

在慢变包络近似条件下, $A_m(z)$ 沿 z 方向变化十分缓慢, 将(2)式代入(1)式, 并忽略二次微分项, 可得

$$\sum_m \left\{ -j\beta_m \frac{dA_m(z)}{dz} F_m(x, y) \exp[j(\omega t - \beta_m z)] \right\} + \text{c. c.} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left\{ \Delta\epsilon_r \left\{ \sum_m \frac{1}{2} A_m(z) F_m(x, y) \exp[j(\omega t - \beta_m z)] + \text{c. c.} \right\} \right\}, \quad (3)$$

式中, 附加相对介电系数元 $\Delta\epsilon_r = n^2 - n_0^2 \approx 2n_0 \Delta n$, 其中 n 和 n_0 分别为微扰和无微扰光纤的折射率分布, 它们的差值为 $\Delta n = n - n_0$ 。

用 $F_n^*(x, y)$ 同时乘以(3)式等号两边, 并对横截面积分, 可得

$$\sum_m \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_m(x, y) F_n^*(x, y) dx dy \frac{dA_m(z)}{dz} \exp[j(\omega t - \beta_m z)] = \sum_m \frac{1}{2} \left[-j \frac{\mu_0 \epsilon_0 \omega^2}{\beta_m} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n^2 - n_0^2) F_m(x, y) F_n^*(x, y) dx dy \right] A_m(z) \exp[j(\omega t - \beta_m z)], \quad (4)$$

利用模式的正交归一化条件 $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_m(x, y) f_n^*(x, y) dx dy = \delta_{mn}$, 其中 $f_m(x, y) = F_m(x, y) / \sqrt{2\eta_m}$ 为归一化电场横向分布, η_m 为模式的波阻抗, 化简(4)式可得

$$\frac{dA_n(z)}{dz} = \sum_m \frac{1}{2} A_m(z) \left[-j \frac{k_0^2}{\beta_m} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n^2 - n_0^2) f_m(x, y) f_n^*(x, y) dx dy \right] \exp(j\Delta\beta_{nm} z), \quad (5)$$

式中, k_0 为真空中波数, $\Delta\beta_{nm} = \beta_n - \beta_m$ 为相位失配因子。

令 $\kappa_{nm} = \frac{k_0^2}{\beta_m} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n^2 - n_0^2) f_n^*(x, y) f_m(x, y) dx dy$, 则各模式的光场复振幅满足如下模式耦合方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{dA_1}{dz} \\ \frac{dA_2}{dz} \\ \vdots \\ \frac{dA_n}{dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} \exp(j\Delta\beta_{11} z) & c_{12} \exp(j\Delta\beta_{12} z) & \cdots & c_{1n} \exp(j\Delta\beta_{1n} z) \\ c_{21} \exp(j\Delta\beta_{21} z) & c_{22} \exp(j\Delta\beta_{22} z) & \cdots & c_{2n} \exp(j\Delta\beta_{2n} z) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} \exp(j\Delta\beta_{n1} z) & c_{n2} \exp(j\Delta\beta_{n2} z) & \cdots & c_{nn} \exp(j\Delta\beta_{nn} z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, $c_{mm} = -j\kappa_{mm}/2$, $\Delta\beta_{ii} = 0, i \in [1, n]$ 。由(6)式可知, 系数矩阵的非对角项与折射率微扰引起的耦合相对应。需指出的是, (6)式也适用于折射率微扰随光纤长度变化的情形, 此时 c_{nm} 或 κ_{nm} 依赖于坐标 z 。

3 模式耦合效率

一般情形下, 模式耦合方程(6)式需采用数值方法求解。当 c_{nm} 或 κ_{nm} 为常数时, 对于同向传输的两模式情形, 其通解形式为

$$\begin{cases} A_1(z) = \exp[(c_{11} + \alpha)z] \{ A_1(0) \cos(sz) + [A_2(0)c_{12} - A_1(0)\alpha] \sin(sz)/s \} \\ A_2(z) = \exp[(c_{22} - \alpha)z] \{ A_2(0) \cos(sz) + [A_1(0)c_{21} + A_2(0)\alpha] \sin(sz)/s \} \end{cases}, \quad (7)$$

式中, $c_{21} = c_{12} = -j\kappa_{12}/2$, $\alpha = j\Delta\beta_{\kappa}/2$, $s = \frac{1}{2} \cdot$

$\sqrt{\kappa_{12}^2 + (\Delta\beta_{\kappa})^2}$, $\Delta\beta_{\kappa} = \Delta\beta + \Delta\kappa$ 为有效相位失配因子, $\Delta\kappa = (\kappa_{11} - \kappa_{22})/2$ 。显然, κ_{mm} 的作用相当于修正了模式传播常数。

不妨考虑在输入端只有模式 1 的情形,并定义模式 2 的输出光功率与模式 1 的输入光功率的比值为模式耦合效率,即

$$\rho = \frac{|A_2(z)|^2}{|A_1(0)|^2} = \frac{\kappa_{12}^2}{\kappa_{12}^2 + (\Delta\beta_\kappa)^2} \sin^2 \left[\frac{1}{2} \sqrt{\kappa_{12}^2 + (\Delta\beta_\kappa)^2} z \right]. \quad (8)$$

由(8)式可知,模式耦合效率依赖于光纤的长度。只有当 $\Delta\beta_\kappa = 0$ 时耦合效率才可达到 100%,对应的最小光纤长度为 $z_{\min} = \pi/\kappa_{12}$,此时可实现完全

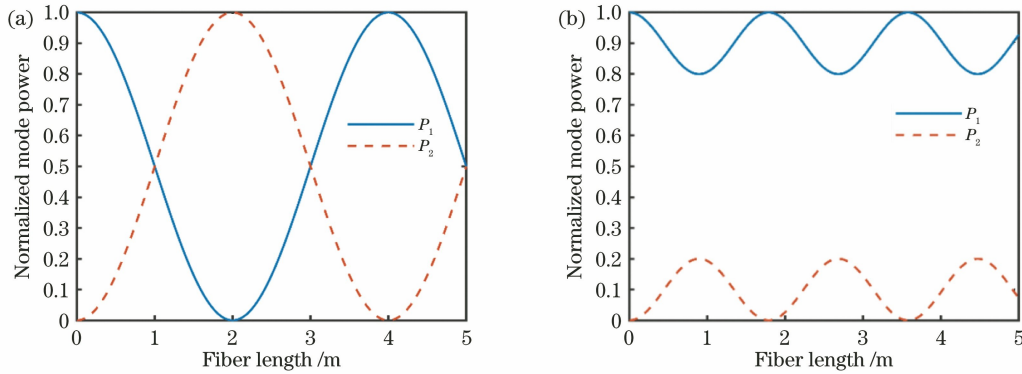


图 2 单一模式输入时两个模式的光功率演化曲线。(a) $\gamma=0$;(b) $\gamma=2$

Fig. 2 Optical power evolution of two modes for the single mode input. (a) $\gamma=0$; (b) $\gamma=2$

另外,从模场适配的角度分析了耦合效率与光纤连接损耗系数之间的关系。将微扰光纤和非微扰光纤视为两种不同的光纤,当它们对接时,模式 m 到模式 n 的连接损耗系数可表示为^[12]

$$T_{mn} = \frac{\left| \iint F_m^*(x,y) G_n(x,y) dx dy \right|^2}{\iint |F_m(x,y)|^2 dx dy \iint |G_n(x,y)|^2 dx dy}, \quad (9)$$

式中, $F_m(x,y)$ 和 $G_n(x,y)$ 分别为无微扰光纤中第 m 个模式和微扰光纤中第 n 个模式的模场分布。 $G_n(x,y)$ 可视为无微扰时第 n 个模式的模场分布 $F_n(x,y)$ 与折射率微扰导致的模场变化量 $\delta F_n(x,y)$ 的叠加,故折射率微扰导致的模场变化量可通过微扰方法进行计算^[13]。

对于两模光纤微扰情形,当折射率微扰对各模式传播常数的修正可以忽略时,(9)式可具体表示为

$$T_{12} = 1 - T_{11} = \frac{1}{4(\Delta\beta/\kappa_{12})^2 + 1}. \quad (10)$$

进一步地,由(8)式可知,若有 $\Delta\beta \gg \Delta\kappa$,则 $\rho_{\max} = \frac{1}{1 + (\Delta\beta/\kappa_{12})^2}$,此时最大模式耦合效率也可用光纤

的模式转换。当 $\Delta\beta_\kappa \neq 0$ 时,可获得的最大模式耦合效率为 $\rho_{\max} = 1/(1 + \gamma^2)$,其中 $\gamma = \Delta\beta_\kappa/\kappa_{12}$,当 $|\gamma| \geq 10$ 时, $\rho_{\max} < 1\%$,模式耦合强度很小。

图 2(a)和(b)分别给出了仅有模式 1 输入时 $\gamma=0$ 和 $\gamma=2$ 两种情形下模式的光功率演化曲线,其中 $\kappa_{12} = \pi/2$ 。当 $P_1(0) = |A_1(0)|^2 = 1$ W 时,模式 2 的光功率在数值上等于模式耦合效率。对于 $\gamma=0$ 情形,当耦合效率达到 100%时对应的最小光纤长度为 $z_{\min} = 2$ m;对于 $\gamma=2$ 情形,模式耦合效率 $\rho_{\max} = 20\%$ 。

连接损耗系数表示为

$$\rho_{\max} = \frac{4T_{12}}{3T_{12} + 1}. \quad (11)$$

通常情况下,不同模式之间的光纤连接损耗很大(T_{12} 很小)。当 $T_{12} \ll 1/3$ 时,由(11)式可知 $\rho_{\max} \approx 4T_{12}$,即最大模式耦合效率约为光纤连接损耗系数的 4 倍。

4 少模信号的消光比

在模分复用通信系统中,不同模式对应不同信道,模式耦合必然导致信道间串扰,从而劣化了信号消光比。光纤输出端的模式消光比可定义为给定模式单独输入时该模式的输出光功率与其他模式输入时转换到该模式的输出光功率之比。具体来讲,由于模式耦合作用,在输出端某个模式中,除了想要的分量(携带有原本的用户信息)外,还有一部分是从其他模式(携带有不想要的用户信息)转换过来的分量(被视为串扰),两者的功率之比即为消光比。

对于两模微扰光纤情形,由(7)式可知两模式的消光比相等,即

$$E_R = \frac{|A_1(L)|^2_{A_1(0)=1, A_2(0)=0}}{|A_1(L)|^2_{A_1(0)=0, A_2(0)=1}} = \frac{|A_2(L)|^2_{A_1(0)=0, A_2(0)=1}}{|A_2(L)|^2_{A_1(0)=1, A_2(0)=0}} = (1 + \gamma^2) \cot^2 \left(\sqrt{1 + \gamma^2} \frac{\kappa_{12} z}{2} \right) + \gamma^2. \quad (12)$$

由(12)式可知,模式消光比依赖于 $\Delta\beta_\kappa$ 、 κ_{12} 以及耦合长度 z 。

在少模传输系统中,实际所用的模式复用/解复用器的消光比约在 15 dB~20 dB 范围内。为了不使传输光纤成为模分复用系统消光比性能的制约因素,模式消光比应大于 20 dB。图 3 给出了模式消光比随 $\kappa_{12}z$ 和 $|\gamma|$ 的变化,重点关注消光比大于 20 dB 的区域。由图 3 可知,当 $|\gamma| \geq 10$ 时, $E_R \geq 20$ dB,此时 $\rho_{\max} < 1\%$; 否则,只有在一些特定长度才满足 $E_R \geq 20$ dB。另一方面,对于 $\gamma=0$ 或 $\Delta\beta_\kappa=0$ 情形,当 $\kappa_{12}L_c \leq 0.2$ 时,也满足 $E_R \geq 20$ dB,此时 $\rho = \sin^2(\kappa_{12}L_c/2) \leq 1\%$, L_c 为耦合长度。换句话说,即使对于两个简并模式($\Delta\beta=0$),仍需传输一定的距离后才会有较大的耦合。值得注意的是,折射率微扰可能会使原来简并的两个模式发生解简并。

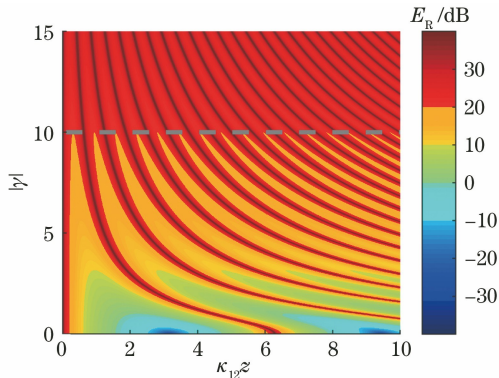


图 3 折射率微扰对模式消光比的影响

Fig. 3 Effect of refractive index perturbation on modal extinction ratio

对于支持更多模式的少模光纤折射率微扰情形,可作类似分析。此时,若需要精确的数值解,需根据具体的光纤参数求解(6)式,得到各模式复包络的演化曲线,进而利用(12)式计算得到各模式的消光比。

5 分析与讨论

利用两模式情形的解析表达式,分析了模式消光比与有效相位失配因子、折射率微扰的模式耦合系数、光纤长度的关系。针对更多模式的情况,无法给出消光比的解析表达式,但可以通过计算不同模式组合情形的模式消光比加以定性分析。为此,考虑支持 6 模式 (LP_{01} , LP_{11e} , LP_{11o} , LP_{21e} , LP_{21o} ,

LP_{02}) 的少模光纤,其参数如表 1 所示。

作为例子,先根据表 1 中的参数简单估算一下 LP_{01} 与 LP_{02} 之间的耦合系数大小。在 1550 nm 信号波长,对于数值孔径 $NA=0.161$ 的阶跃型光纤,当折射率微扰取 $\Delta\epsilon_r = 5.06 \times 10^{-6}$ 时^[14],根据

$$\kappa_{nm} = \frac{k_0^2}{\beta_m} \iint (n^2 - n_0^2) f_n^*(x, y) f_m(x, y) dx dy$$

计算得到的耦合系数 $\kappa_{12} = 1.219 \text{ m}^{-1}$ 。进而,在给定长度条件下,计算出模式之间的消光比,见图 4。

表 1 存在折射率微扰时的少模光纤参数

Table 1 Parameters of few-mode fiber with the refractive index perturbation

Parameter	Value
Refractive index of fiber core n_1	1.4468
Refractive index of cladding n_2	1.4378
Radius of fiber core $r/\mu\text{m}$	7
Refractive index perturbation $\delta n^2/10^{-6}$	5.06
Wavelength of signal light λ_s/nm	1550

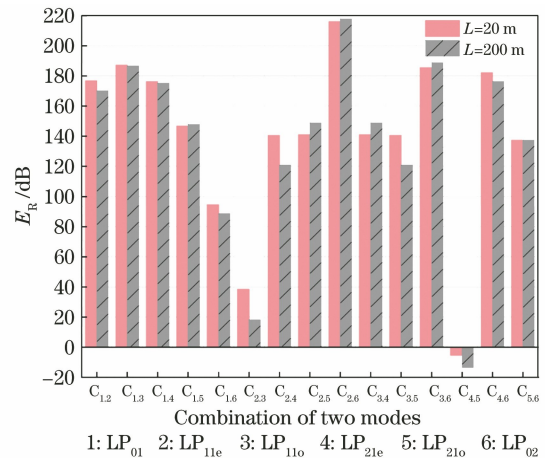


图 4 不同长度下多模光纤中两模式的模式消光比,其中 $C_{m,n}$ 代表模式 m 与 n 的模式组合情形

Fig. 4 Mode extinction ratio of mode combination $C_{m,n}$ in the multimode fiber at different lengths, in which $C_{m,n}$ represents the pattern combination of patterns m and n

图 4 给出了两个光纤长度情形下各模式之间的消光比大小。由图 4 可知,在给定的折射率微扰下,多模光纤中不同模式组合的模式消光比大小不同,且模式消光比具有长度依赖性。两种长度情形下, LP_{21} 简并模 $C_{4,5}$ 之间的消光比均出现为负值;当

$L=200$ m 时, LP_{11} 简并模式 $C_{2,3}$ 之间的消光比也不足 20 dB, 其他模式组合远大于 20 dB。可见, 模式消光比主要受限于简并模之间的耦合。更精确地说, 可根据光纤参数计算耦合系数以及相位失配因子, 在给定初始条件下, 可联合求解方程(6)式进行计算。

6 结 论

推导了少模光纤中折射率微扰引起的不同模式之间的模式耦合方程, 可用于分析少模光纤中折射率微扰对模式耦合和模式消光比的影响, 特别适用于少模光纤连接时纤芯未对准或折射率分布不相同的情形。以两模光纤为例, 给出了模式复包络的解析表达式和消光比公式, 分析了最大模式耦合效率与微扰/非微扰光纤间连接损耗系数的关系。折射率微扰可能会使原来简并的两个模式发生解简并, 分析表明, 无论是简并模式还是非简并模式, 只要模式之间满足 $|\Delta\beta_c/\kappa_{12}| \geq 10$ 或者 $\kappa_{12}L_c \leq 0.2$, 均可获得不低于 20 dB 的模式消光比。该结论对少模光纤器件设计和光纤系统互连具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1035-1055.
- [2] Chen J, Huang Q Q, Zhang Q W, et al. Orthogonal frequency division/mode division multiplexing IM-DD multimode fiber transmission system based on photonic lanterns[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606008.
陈健, 黄青青, 张倩武, 等. 基于光子灯笼的正交频分/模分复用 IM-DD 多模光纤传输系统[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606008.
- [3] Li A, Chen X, Al Amin A, et al. Space-division multiplexed high-speed superchannel transmission over few-mode fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3953-3964.
- [4] Zhang Z Z, Guo C, Zhang Y C, et al. Gain-equalized remotely pumped few-mode fiber amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006004.
张振振, 郭骋, 张一弛, 等. 增益均衡的远程遥泵少模光纤放大器 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006004.
- [5] Chen J, Wang F, Li Z X, et al. Reducing signal crosstalk in IM-DD-mode-division multiplexing transmission via digital orthogonal filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806005.
陈健, 王芳, 李正璇, 等. 利用数字正交滤波降低 IM-DD 模分复用传输中的信号串扰[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0806005.
- [6] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Two-mode PLC-based mode multi/demultiplexer for mode and wavelength division multiplexed transmission[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 25752-25760.
- [7] Sun C, Yu Y, Chen G, et al. Silicon mode multiplexer processing dual-path mode-division multiplexing signals [J]. Optics Letters, 2016, 41(23): 5511-5514.
- [8] Wang S, Wu H, Tsang H K, et al. Monolithically integrated reconfigurable add-drop multiplexer for mode-division-multiplexing systems [J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5298-5301.
- [9] Huang S Y, Blake J N, Kim B Y, et al. Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(1): 23-33.
- [10] Juarez A A, Krune E, Warm S, et al. Modeling of mode coupling in multimode fibers with respect to bandwidth and loss [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1549-1558.
- [11] Chen W C, Hu G J, Liu F, et al. Measurement of mode coupling at a splice point between few-mode fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1206005.
陈威成, 胡贵军, 刘峰, 等. 少模光纤熔接点处模式耦合测量[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1206005.
- [12] Zeng S G, Dan Y Q, Zhang B, et al. Describing spatiotemporal couplings in ultrashort pulses using amplitude coupling coefficients[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics, June 19-21, 2010, Chengdu, China. New York: IEEE, 2010: 1-4.
- [13] Yariv A, Yeh P. Optical electronics in modern communications[M]//Chen H M, Shi W H, Wang J L, et al, Transl. 6th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 546-547.
阿曼·亚里夫, 波奇·耶赫. 光子学: 现代通信光电子学[M]. 陈鹤鸣, 施伟华, 汪静丽, 等, 译. 6 版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 546-547.
- [14] Jacques B. Guided optics: optical fibers and all-fiber components[M]. Berlin: Wiley-VCH, 2009: 179.