

环状光纤椭圆双折射对一阶 OAM-PMD 的影响

史丙鑫^{1,2}, 张霞^{1,2}, 白成林^{1,2}

¹聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059;

²山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059

摘要 基于环状光纤的 OAM-PMD 动态方程和固定双折射级联模型, 推导了 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数方程, 并仿真了环状光纤具有一定椭圆度时, 几何双折射对 OAM 模式对应的本征奇-偶模的有效折射率差的影响, 以及一阶 OAM-PMD 系数随角频率的变化。结果表明, OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数不仅与 OAM 模式对应的奇-偶模的有效折射率差有关, 还会随角频率变化而变化, 并且环状光纤椭圆度的增大会导致 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数增大, 且对相对低阶的 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数影响更明显, 从而严重影响 OAM 模式复用系统的性能和传输距离。

关键词 光通信; 椭圆双折射; 轨道角动量; 偏振模色散

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.070601

Influence of Elliptical Birefringence on First-Order OAM-PMD in Ring Fibers

Shi Bingxin^{1,2}, Zhang Xia^{1,2}, Bai Chenglin^{1,2}

¹School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China;

²Key Laboratory of Optical Communications Science and Technology in Shandong Province, Liaocheng, Shandong 252059, China

Abstract We derive the coefficient equation for the first-order orbital angular momentum-polarization mode dispersion (OAM-PMD) of OAM mode in a ring fiber by using the OAM-PMD dynamic equation and the fixed birefringence cascaded model. We also numerically calculate the influences of geometrical birefringence on the effective refractive index difference between the odd and even modes that constitute the OAM mode and calculate the variation of first-order OAM-PMD coefficient with the angular frequency under different ellipticities of ring fibers. The results show that the first-order OAM-PMD coefficient is determined not just by the effective refractive index difference between the odd and even modes that constitute the OAM mode, but also by its variation with the angular frequency. We find that the ellipticity of the ring fiber increases the first-order OAM-PMD coefficient, particularly for relative lower-order OAM modes, and thus severely limit the property and propagation distance of the OAM modes.

Key words optical communications; elliptical birefringence; orbital angular momentum; polarization mode dispersion

OCIS codes 060.4510; 060.2330; 060.2310; 060.2400; 060.2420

收稿日期: 2017-12-04; 收到修改稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(61501214)

作者简介: 史丙鑫(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信复用技术中偏振模色散的研究。

E-mail: 503638532@qq.com

导师简介: 白成林(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信技术研究。

E-mail: baichenglin@lcu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

随着大数据、云计算、物联网等新兴技术的飞速发展,光纤主干网需要承载大量的信息,然而由于非线性香农极限,目前商用的单模光纤通信系统将不再满足人们对通信容量逐年增长的需求^[1]。因此,利用空间相位和空间幅度分布的空分复用(SDM)技术应运而生,其中基于轨道角动量(OAM)的模式复用作为空分复用技术的一种备受关注^[2]。环状光纤的环形结构与 OAM 模式的模场强度分布形状相符,且具有加工工艺简单、成本低等优点,是 OAM 模式最理想的信息传输载体^[3]。当 OAM 模式在理想对称的环状光纤中传输时,在输入端可分解成两个相互垂直的偏振方向(x 方向和 y 方向),并以相同的传播速度进行传输,同时到达光纤输出端后叠加在一起重现出输入端时的偏振状态。但是由于加工工艺的不足,实际生产的环状光纤会具有一定的椭圆度,即在 x 和 y 方向上的折射率不同,使得组成同一 OAM 模式对应的矢量本征奇模和偶模在 x 和 y 偏振方向上产生双折射,从而导致两种模在光纤中的传输速度不同,最终导致承载 OAM 模式的光脉冲展宽,这种效应被称为 OAM 模式的偏振模色散(PMD),即 OAM-PMD^[4]。OAM-PMD 效应会使得 OAM 模式在光纤中传输时产生码间干扰,最终严重限制 OAM 模式复用传输系统的性能和传输距离^[5]。

尽管目前国内外已有部分关于 OAM 模式的产生以及在光纤中传输的报道,但是关于 OAM-PMD 的研究还很少^[6-9]。2015 年,加拿大拉瓦尔大学的 Wang 等^[10]使用固定分析法测量了特定波长 1550 nm 下环状光纤中由 HE_{21} 模矢量叠加而成的 $OAM_{\pm 1,m}$ 模式的一阶 OAM-PMD 均值。本文借鉴单模光纤中偏振模色散的分析方法,建立了 OAM

模式的固定双折射级联模型,并基于 OAM-PMD 的动态方程,推导出非理想环状光纤中适用于任意阶 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数。理论推导的结果表明,OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数大小主要取决于 OAM 模式对应本征奇-偶模之间的有效折射率差及其随角频率的变化。最后利用 COMSOL 仿真软件定量分析了非理想环状光纤椭圆度对一阶 OAM-PMD 系数的影响,其结果可为下一步对 OAM 复用光纤传输系统中 OAM-PMD 的监测与补偿提供理论指导。

2 非理想环状光纤中的 OAM-PMD

2.1 环状光纤中 OAM 基本理论与固定双折射级联模型

OAM 模式可以由本征奇模和偶模矢量叠加而成^[11],即 OAM 模式中 $OAM_{\pm l,m}$ 可以由本征奇模 $HE_{l+1,m}^{\text{odd}}$ 和偶模 $HE_{l+1,m}^{\text{even}}$ 矢量叠加而成, $OAM_{\pm l,m}$ 可以由本征奇模 $EH_{l,m}^{\text{odd}}$ 和偶模 $EH_{l,m}^{\text{even}}$ 矢量叠加而成,其中 l 为正整数,表示 OAM 模式的拓扑荷, m 为模场强度在径向上极大值的个数,上标“ \pm ”分别对应 OAM 模式的右旋和左旋圆偏振态,而下标“ \pm ”则对应拓扑荷分别为正负 l 的 OAM 模式。

为了推导一阶 OAM-PMD 系数,首先建立 OAM 模式在非理想环状光纤中传输时的固定双折射级联模型,如图 1 所示。假设 OAM 模式沿光纤轴线 z 轴方向传播, x 和 y 分别表示 OAM 模式在非理想环状光纤输入端的双折射方向。当 OAM 模式在环状光纤中传输时,可以把光纤看作是由多个小段光纤组成,每一小段光纤的双折射大小是固定的,但是其双折射方向相对于坐标轴(x, y)会发生随机变化。基于以上固定双折射级联模型,从 OAM-PMD 动态方程出发,即可推导出非理想环状光纤中的一阶 OAM-PMD 系数方程。

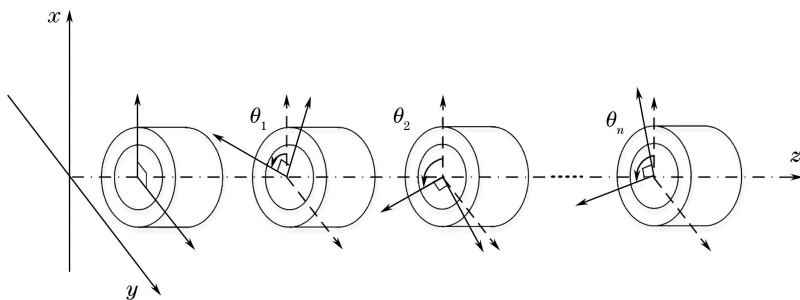


图 1 非理想环状光纤的固定双折射级联模型

Fig. 1 Fixed birefringence cascade model of nonideal ring fiber

2.2 非理想环状光纤中的一阶 OAM-PMD 系数

首先定义一阶 OAM-PMD 系数为 $\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm}$ (或 $\text{OAM}_{\pm l, m}^{\mp}$) 模对应的本征奇-偶模 $\text{HE}_{l+1, m}^{\text{even}}$ 和 $\text{HE}_{l+1, m}^{\text{odd}}$ (或 $\text{EH}_{l+1, m}^{\text{even}}$ 和 $\text{EH}_{l+1, m}^{\text{odd}}$) 之间差模群时延的方均根, 其物理意义为单位长度的环状光纤产生的 OAM-PMD 的大小, 而非理想环状光纤中的 OAM-PMD 动态方程可以写为^[12-15]

$$\frac{d\boldsymbol{\tau}^{\pm l}}{dz} = \boldsymbol{\beta}_{\omega}^{\pm l} + (\boldsymbol{\beta}^{\pm l} \times \boldsymbol{\tau}^{\pm l}), \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}^{\pm l} = (\tau_1^{\pm l}, \tau_2^{\pm l}, \tau_3^{\pm l})$ 表示 OAM 模式在 Stokes 空间中的一阶 OAM-PMD 矢量, 其大小 $|\boldsymbol{\tau}^{\pm l}|$ 即为差模群时延; $\boldsymbol{\beta}^{\pm l} = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ 表示对应的双折射矢量, 其大小 $\beta^{\pm l} = |\boldsymbol{\beta}^{\pm l}| = \Delta n^{\pm l} \omega / c$, $\Delta n^{\pm l}$ 为本征奇-偶模 $\text{HE}_{l+1, m}^{\text{even}}$ 和 $\text{HE}_{l+1, m}^{\text{odd}}$ (或 $\text{EH}_{l+1, m}^{\text{even}}$ 和 $\text{EH}_{l+1, m}^{\text{odd}}$) 之间有效折射率差的绝对值, ω 为光的角频率, 它与波长的关系为 $\omega = 2\pi c / \lambda$, λ 为真空中的波长, c 为光速; 而 $\beta_{\omega}^{\pm l} = d\beta^{\pm l} / d\omega = 1 / c (\Delta n^{\pm l} + \omega \Delta n_{\omega}^{\pm l})$, $\Delta n_{\omega}^{\pm l} = d\Delta n / d\omega$.

定义斯托克斯空间的旋转矩阵 $\mathbf{R}(z) = \begin{bmatrix} \cos \theta(z) & \sin \theta(z) & 0 \\ -\sin \theta(z) & \cos \theta(z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 对 $\boldsymbol{\tau}^{\pm l}$ 进行旋转, 可将动态方程转换成局部演化方程^[16]:

$$\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{\tau}^{\pm l}}{dz} &= \mathbf{R}(z) \boldsymbol{\beta}_{\omega}^{\pm l} + \mathbf{R}(z) \boldsymbol{\beta}^{\pm l} \times \\ &\mathbf{R}^{-1}(z) \boldsymbol{\tau}^{\pm l} - \mathbf{R}(z) \mathbf{R}_z^{-1}(z) \boldsymbol{\tau}^{\pm l} = \\ &\begin{bmatrix} \beta_{\omega}^{\pm l} \\ -\beta^{\pm l} \bar{\tau}_3^{\pm l} \\ \beta^{\pm l} \bar{\tau}_2^{\pm l} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\tau}_2^{\pm l} \\ -\bar{\tau}_1^{\pm l} \\ 0 \end{bmatrix} g_{\theta}(z), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\theta(z)$ 为在 Stokes 空间里 $\boldsymbol{\beta}^{\pm l}$ 和 $s_1^{\pm l}$ 轴的夹角; $\boldsymbol{\tau}^{\pm l} = (\bar{\tau}_1^{\pm l}, \bar{\tau}_2^{\pm l}, \bar{\tau}_3^{\pm l})$ 为旋转后的一阶 OAM-PMD 矢量; $\mathbf{R}^{-1}(z)$ 为旋转矩阵 $\mathbf{R}(z)$ 的逆矩阵; $\mathbf{R}_z^{-1}(z) = d\mathbf{R}^{-1}(z) / dz$; g_{θ} 用于描述 θ 在传播过程中的白噪声随机变化。

由(2)式可以推导出^[16]

$$\frac{d\langle \bar{\tau}_1^{\pm l} \rangle}{dz} = -\frac{1}{L_c^{\pm l}} \langle \bar{\tau}_1^{\pm l} \rangle + \beta_{\omega}^{\pm l}, \quad (3)$$

$$\frac{d\langle |\boldsymbol{\tau}^{\pm l}|^2 \rangle}{dz} = \frac{d\langle (\boldsymbol{\tau}^{\pm l})^2 \rangle}{dz} = 2\beta_{\omega}^{\pm l} \langle \bar{\tau}_1^{\pm l} \rangle, \quad (4)$$

式中: $L_c^{\pm l}$ 为 $\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm}$ 模式的双折射关联长度^[17], 分别代入初始条件

$$\langle \bar{\tau}_1^{\pm l}(0) \rangle = 0, \quad (5)$$

$$\langle |\boldsymbol{\tau}^{\pm l}|^2(0) \rangle = 0, \quad (6)$$

即可得到差模群时延 $|\boldsymbol{\tau}^{\pm l}|$ 的方均根:

$$\sqrt{\langle |\boldsymbol{\tau}^{\pm l}|^2 \rangle} =$$

$$\sqrt{2 (\beta_{\omega}^{\pm l} L_c^{\pm l})^2 \left[\exp\left(\frac{-z}{L_c^{\pm l}}\right) + \frac{z}{L_c^{\pm l}} - 1 \right]}. \quad (7)$$

当光纤的长度 z 远大于 $L_c^{\pm l}$ 时, 即 $z / L_c^{\pm l} \rightarrow \infty$, 则 $\exp(-z / L_c^{\pm l}) \rightarrow 0$, 因此(7)式可化简为

$$\sqrt{\langle |\boldsymbol{\tau}^{\pm l}|^2 \rangle} = \sqrt{2 (\beta_{\omega}^{\pm l} L_c^{\pm l})^2 \left(\frac{z}{L_c^{\pm l}}\right)} = |\beta_{\omega}^{\pm l}| \sqrt{2L_c^{\pm l}} \times \sqrt{z}, \quad (8)$$

因此一阶 OAM-PMD 系数为

$$D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l} = \sqrt{\frac{\langle |\boldsymbol{\tau}^{\pm l}|^2 \rangle}{z}} = |\beta_{\omega}^{\pm l}| \sqrt{2L_c^{\pm l}} = \left| \frac{\Delta n^{\pm l} + \Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega}{c} \right| \times \sqrt{2L_c^{\pm l}}, \quad (9)$$

其单位为 $\text{ps} / \sqrt{\text{km}}$ 。由(9)式可以看出, 与文献[4]中(14)式给出的一阶 OAM-PMD 均值 $\langle |\boldsymbol{\tau}^{\pm l}| \rangle = \sqrt{\frac{16}{3\pi} \left(\frac{|\Delta n^{\pm l}|}{c}\right)^2 (L_c^{\pm l})^2 \left[\exp\left(\frac{-z}{L_c^{\pm l}}\right) + \frac{z}{L_c^{\pm l}} - 1 \right]}$ 相比, 一阶 OAM-PMD 系数分别由与 $\Delta n^{\pm l}$ 相关的项, 以及与波长特性相关的项 $\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 组成。当 $\Delta n^{\pm l}$ 随波长变化不大时, 即当 $|\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega|$ 远小于 $\Delta n^{\pm l}$ (比如 $\left| \frac{\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega}{\Delta n^{\pm l}} \right| \leq 1\%$) 时, 通常可将 $\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 项忽略, 这时一阶 OAM-PMD 系数正比于 $|\Delta n^{\pm l}|$ (与文献[4]一致), 反之则需要考虑该项的影响。

3 非理想环状光纤中椭圆双折射对 OAM-PMD 的影响

3.1 环状光纤的结构参数及其折射率分布

图 2(a) 为理想光纤的横截面及其折射率分布图。已知环状光纤环层的内外圆及外包层半径分别为 $r_1 = 2.75 \mu\text{m}$, $r_2 = 5 \mu\text{m}$, $r_3 = 62.5 \mu\text{m}$, 环层及内、外包层的折射率均匀分布且分别为 $n_0 = 1.494$, $n_1 = 1$ 和 $n_2 = 1.444$ 。利用专业的光学仿真软件 COMSOL 计算可知, 该环状光纤在 $1300 \sim 1700 \text{ nm}$ 波长范围内均能支持分别由 HE_{21} 模、 HE_{31} 模、 EH_{11} 模、 HE_{41} 模、 EH_{21} 模矢量合成的 $\text{OAM}_{\pm 1}^{\pm}$ 、 $\text{OAM}_{\pm 2}^{\pm}$ 、 $\text{OAM}_{\pm 2}^{\mp}$ 、 $\text{OAM}_{\pm 3}^{\pm}$ 、 $\text{OAM}_{\pm 3}^{\mp}$ 共 10 种 OAM 模式稳定传输。理想环状光纤的结构和折射率分布呈圆对称, 所以不会产生双折射现象, 组成 OAM 模式的同一矢量本征奇偶模 $\text{HE}_{l+1, m}^{\text{odd}} / \text{HE}_{l+1, m}^{\text{even}}$ (或 $\text{EH}_{l+1, m}^{\text{odd}} / \text{EH}_{l+1, m}^{\text{even}}$) 之间不存在有效折射率差, 因此 OAM 模式在光纤中传输时不会产生 OAM-PMD。但是实际的环状光纤会存在一定的椭圆度, 导致双折射进

而产生 OAM-PMD, 最终使 OAM 光信号的传输性能受到影响。

3.2 非理想环状光纤椭圆度对一阶 OAM-PMD 的影响

图 2(b) 为非理想环状光纤的横截面及其折射率分布, 环层内外圆的长轴分别为 a_1 和 a_2 , 短

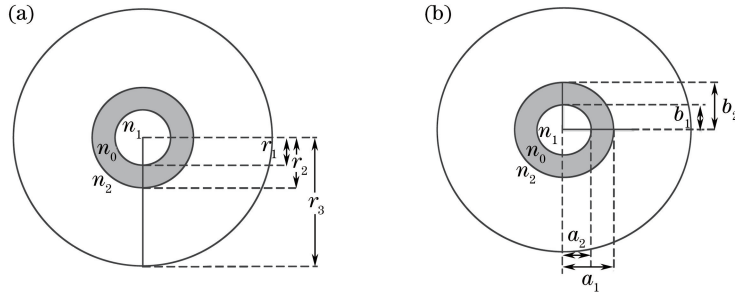


图 2 光纤的横截面及其折射率分布。(a)理想环状光纤;(b)具有一定椭圆度的非理想环状光纤

Fig. 2 Cross section and refractive index distribution of fiber. (a) Ideal ring fiber; (b) nonideal ring fiber with fixed ellipticity

由图 3 可以明显地看出, HE 模式中 l 最小的低阶模式 $HE_{21}^{\text{odd}}/HE_{21}^{\text{even}}$ 和 EH 模式中 l 最小的低阶模式 $EH_{11}^{\text{odd}}/EH_{11}^{\text{even}}$ 之间的有效折射率差 $\Delta n^{\pm l}$ 随着椭圆度的增加越来越大, 当椭圆度 ϵ 从 2% 增加到 3% 时, $HE_{21}^{\text{odd}}/HE_{21}^{\text{even}}$ 之间的 $\Delta n^{\pm l}$ 已经从 10^{-5} 增大到 10^{-4} 量级。同时, 椭圆度对相对高阶(即 l 较大)的模式 HE_{31} 、 HE_{41} 和 EH_{21} 影响较小, 随着椭圆度的增加, 这三种模式的有效折射率差一直都保持在 10^{-6} 量级及以下。为了进一步分析双折射效应对一阶 OAM-PMD 系数 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 的影响, 还分析了各模式的 $\Delta n^{\pm l}$, $-\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 以及 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 的值随角频率 ω 的变化趋势, 如图 4 所示。

轴分别为 b_1 和 b_2 , 并定义非理想环状光纤的椭圆度 $\epsilon = \frac{a_1 - b_1}{a_1} = \frac{a_2 - b_2}{a_2}$ 。首先利用 COMSOL 计算得到不同椭圆度下各本征奇偶模的有效折射率差 $\Delta n^{\pm l}$ 随波长的变化, 如图 3 所示。

$\Delta n^{\pm l}$ 项。由图 4(a) 和 (b) 还可以看出, EH_{11} 模的有效折射率差 $\Delta n^{\pm l}$ 随 ω 的增加变化显著, 所以 $-\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 的值较大, 而由图 4(c) 中 EH_{11} 模对应的 $\Delta n^{\pm l}$ 和 $-\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 随角频率 ω 的变化曲线(椭圆度 $\epsilon = 1\%$, 2% , 3%) 可以明显地看出, $-\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 的值变化较大, 并且在 $\omega = 1.28 \times 10^{15} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近, 其大小已经超过 $\Delta n^{\pm l}$, 此时一阶 OAM-PMD 系数 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 受到 $\Delta n^{\pm l}$ 与 $-\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 项的共同作用。图 4(d) 给出的各模式的一阶 OAM-PMD 系数 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 随角频率 ω 的变化曲线, 进一步证明了该结论的正确性。其中, HE_{21} 模的一阶 OAM-PMD 系数 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 主要取决于 $\Delta n^{\pm l}$ 项, 变化幅度较小, 而 EH_{11} 模由于受到 $-\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 项的影响, 对应的 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 呈先减小后增大的趋势, 且最小值出现在 $\omega = 1.28 \times 10^{15} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近。同时, 相对高阶的模式 HE_{31} 模、 HE_{41} 模和 EH_{21} 模的一阶 OAM-PMD 系数 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 的值较小。

光纤通信系统对于不同传输速率光信号的 OAM-PMD 容忍度是不一样的, 传输速率为 100 Gbit/s 的传输系统的光脉冲宽度为 10 ps, 系统所允许的最大的 OAM-PMD 为其脉冲宽度的 10%, 即 1 ps。图 5(a) 和 (b) 给出了 1550 nm 工作波长下, 不同椭圆度的 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 的绝对值随传输距离的变化。由图 5(a) 可以看出, 即使将椭圆度控制在 1% 以下, 相对低阶的模式 EH_{11} 和 HE_{21} 对应的 OAM 模式在光纤中传输极短距离后, 其一阶 OAM-PMD 已经超过 1 ps。而对于如图 5(b) 所示的相对高阶的模式 HE_{31} 和 HE_{41} , 在椭圆度为 2% 时, 传输 100 km 后其一阶 OAM-PMD 仍小于 1 ps。

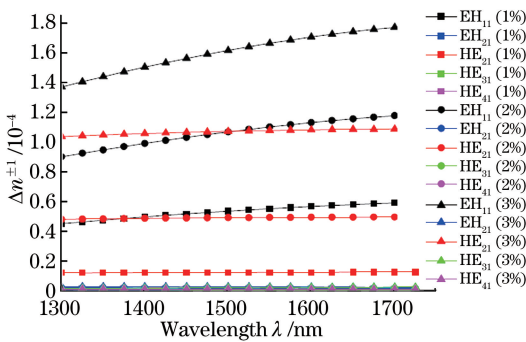


图 3 不同椭圆度下各本征模式的奇-偶模的有效折射率差随波长的变化

Fig. 3 Changes of effective refractive index difference between odd and even modes of each eigenmodes with the wavelength under different ellipticities

由图 4(a) 可以看出, 当 ϵ 一定时, HE_{21} 模的有效折射率差 $\Delta n^{\pm l}$ 随角频率 ω 变化不大, 对应 $-\Delta n_{\omega}^{\pm l} \times \omega$ 的值也较小, 见图 4(b)。根据 (9) 式可知, 此时一阶 OAM-PMD 系数 $D_{\text{OAM-PMD}}^{\pm l}$ 主要取决于

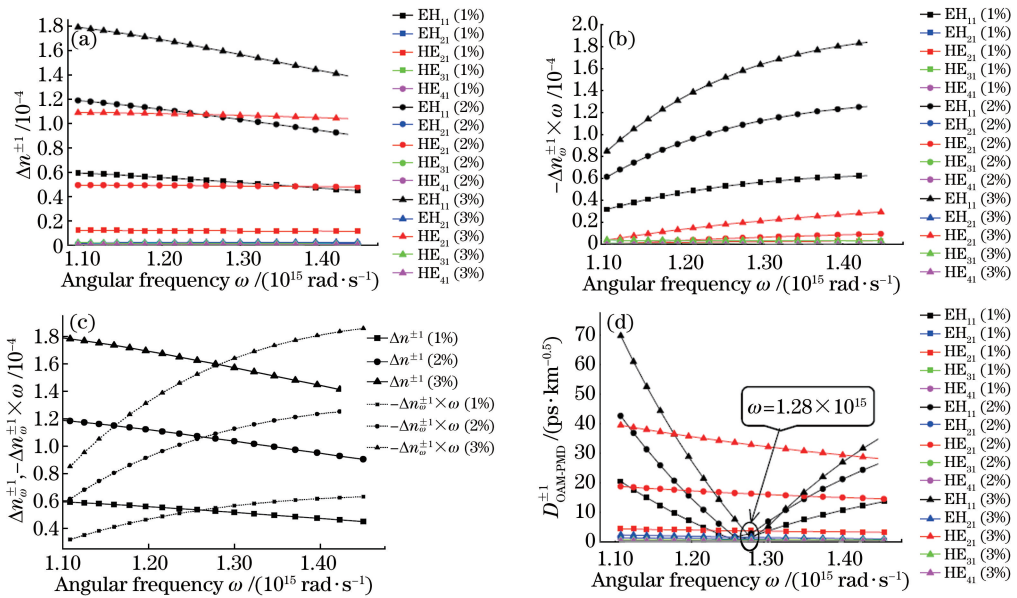


图4 不同椭圆度下影响 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 的参数随 ω 的变化。(a) Δn^{\pm} ; (b) $-\Delta n^{\pm} \times \omega$; (c) EH_{11} 模对应的 Δn^{\pm} 和 $-\Delta n^{\pm} \times \omega$; (d) 不同椭圆度下各 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数随 ω 的变化

Fig. 4 Variation of parameters that influence the first-order OAM-PMD with the angular frequency under different ellipticities. (a) Δn^{\pm} ; (b) $-\Delta n^{\pm} \times \omega$; (c) Δn^{\pm} and $-\Delta n^{\pm} \times \omega$ for EH_{11} mode; (d) variation of first-order OAM-PMD coefficient with angular frequency for different OAM modes under different ellipticities

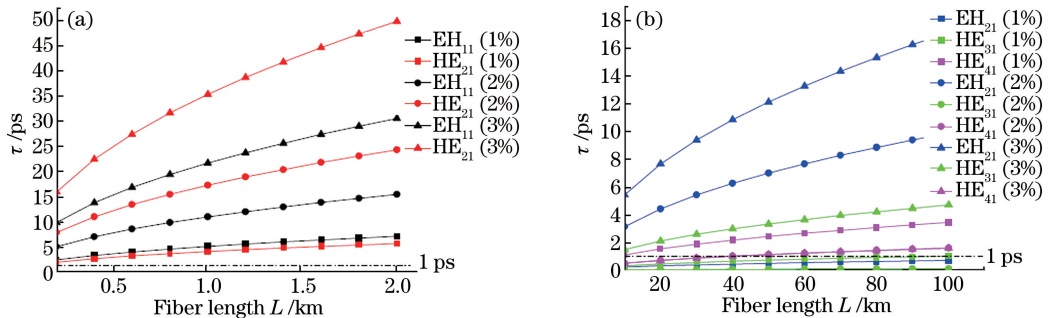


图5 不同椭圆度下 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 随光纤长度的变化。

(a) EH_{11} 、 HE_{21} 模对应的 OAM 模式; (b) EH_{21} 、 HE_{31} 、 HE_{41} 模对应的 OAM 模式

Fig. 5 Variation of first-order OAM-PMD of OAM mode with fiber length under different ellipticities.

(a) OAM mode corresponding to EH_{11} , HE_{21} modes; (b) OAM mode corresponding to EH_{21} , HE_{31} , HE_{41} modes

4 结 论

建立了非理想环状光纤中 OAM 模式的固定双折射级联模型,并结合 OAM-PMD 的动态方程,推导了适用于任意阶 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数,最后利用专业软件 COMSOL 仿真分析了非理想环状光纤椭圆度对 OAM 模式对应本征奇-偶模之间的有效折射率差及一阶 OAM-PMD 系数的影响。理论和仿真的结果表明,在特定波长或角频率下,椭圆度的增大会导致 OAM 模式对应本征奇-偶模的有效折射率差增大,从而使 OAM 模式的一阶 OAM-PMD 系数增大,并且对相对低阶的 OAM

模式的影响较大。对于有效折射率差随角频率变化不大的 OAM 模式,其一阶 OAM-PMD 系数的大小可以仅考虑奇-偶模的有效折射率差的影响,反之还需要考虑有效折射率差随角频率变化的影响。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. [J]. Science, 2013, 340(6140): 1545-1548.

- [3] Brunet C, Vaity P, Ung B, *et al.* Design of a family of ring-core fiber for OAM [C] // Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, California. IEEE, 2015: 15216432.
- [4] Wang L, Vaity P, Messaddeq Y, *et al.* Orbital-angular-momentum polarization mode dispersion in optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(8): 1661-1670.
- [5] Zhu Q L, Chen G X. Combined effect of polarization mode dispersion and polarization dependent loss on optical pulse broadening and jittering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(5): 59-62.
朱巧玲, 陈根祥. 光纤偏振模色散和偏振相关损耗对超短光脉冲传输的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(5): 59-62.
- [6] Wang A, Cheng D, Jian W, *et al.* Characterization of LDPC-coded orbital angular momentum modes transmission and multiplexing over a 50-km fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(11): 11716-11726.
- [7] Dai M C, Fan D H, Wang Y, *et al.* Generation of high quality helical beam based on spatial light modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0905004.
戴茂春, 樊代和, 王尧, 等. 基于空间光调制器的高质量螺旋光束制备[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0905004.
- [8] Ke X Z, Xu J Y. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0905003
柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0905003.
- [9] Qiao W, Gao S C, Lei T, *et al.* Transmission of orbital angular momentum modes in grapefruit-type microstructured fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0406002.
乔文, 高社成, 雷霆, 等. 轨道角动量模式在柚子型微结构光纤中的传输[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0406002.
- [10] Wang L, Vaity P, Messaddeq Y, *et al.* Orbital-angular-momentum polarization mode dispersion in optical fibers and its measurement technique [C] // European Conference on Optical Communication (ECOC), Sep. 27- Oct. 1, 2015, Valencia, Spain. IEEE, 2015: 15648180.
- [11] Yue Y, Yan Y, Ahmed N, *et al.* Mode properties and propagation effects of optical orbital angular momentum (OAM) modes in a ring fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(2): 535-543.
- [12] Poole C D, Winters J H, Nagel J A. Dynamical equation for polarization dispersion [J]. Optics Letters, 1991, 16(6): 372-374.
- [13] Foschini G J, Poole C D. Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(11): 1439-1456.
- [14] Zheng Y, Li C Y, Liu X M, *et al.* Investigation on the statistical characteristics of polarization mode dispersion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(8): 687-690.
郑远, 李朝阳, 刘秀敏, 等. 偏振模色散统计特性的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(8): 687-690.
- [15] Cai J, Xu M, Yang X L. Analysis of statistical properties of polarization mode dispersion in single-mode optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 170-175.
蔡炬, 徐铭, 杨祥林. 单模光纤偏振模色散统计特性的分析[J]. 光学学报, 2003, 23(2): 170-175.
- [16] Wanner T, Marks B S, Menyuk C R, *et al.* Polarization mode dispersion, decorrelation, and diffusion in optical fibers with randomly varying elliptical birefringence [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(2): 148-157.
- [17] Gordon J P, Kogelnik H. PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, 97(9): 4541-4550.