

文章编号: 0258-7025(2004)12-1500-03

偏振模色散及偏振相关损耗对光传输链路 相关特性的影响

周赢武^{1,2}, 郭凌伟¹, 黄 锐¹, 瞿荣辉¹, 方祖捷¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 福州大学电子系, 福建 福州 350002)

摘要 在同时考虑偏振模色散(PMD)及偏振相关损耗(PDL)情况下,分别通过理论和蒙特-卡罗方法研究了光传输链路的输出信号偏振态相关函数。首先,从理论上得到了光传输链路的输出信号偏振态相关函数的解析表达式,而后,利用蒙特-卡罗方法进行了模拟研究,理论和模拟的结果能很好地吻合。研究表明,当光传输链路的偏振模色散值不变时,随着传输链路偏振相关损耗的增大,输出偏振态归一化自相关函数的线宽变宽;而在光传输链路的偏振相关损耗一定的情况下,随着光传输链路的偏振模色散的增大输出偏振态归一化自相关函数的线宽变窄。

关键词 光通信;偏振模色散;偏振相关损耗;蒙特-卡罗方法;自相关函数

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Impacts of Polarization Dependent Loss and Polarization Mode Dispersion on the Autocorrelation Function of the Output Polarization States of Optical Transmission Link

ZHOU Ying-wu^{1,2}, GUO Ling-wei¹, HUANG Rui¹, QU Rong-hui¹, FANG Zu-jie¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² Electronics Department of Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract The autocorrelation function of the output polarization states of the optical transmission links in presence of polarization mode dispersion (PMD) and polarization dependent loss (PDL) was investigated by theory and Monte-Carlo simulation method. An analytical expression for the autocorrelation function was obtained by theory, and it is fit well with the result of the simulation. The results show that the bandwidth of the normalized autocorrelation function increases with increasing the polarization dependent loss, and the bandwidth decreases with increasing the polarization mode dispersion.

Key words optical communication; polarization mode dispersion; polarization dependent loss; Monte-Carlo simulation; autocorrelation function

1 引 言

随着高速光通信的发展,光传输链路的偏振模色散(PMD)成为限制系统传输容量和距离的关键因素。而光传输链路总是存在偏振相关损耗(PDL),它不仅降低了有关光器件和系统的性能,也使系统的偏振模色散特性发生了不可忽视的变化。因此,光传输链路的偏振模色散、偏振相关损耗及其

相互作用成为近年来研究的热点问题之一^[1~6]。

在高速光通信系统中,偏振模色散会引起所传输的信号产生消偏现象。因此光信号的输出偏振态随频率的变化特性是一个十分重要的研究课题。为此,人们在考虑偏振模色散存在的情况下,对输出偏振态的频域相关函数的特性进行了研究。这一相关特性反映了偏振模色散引起的偏振态的方向随频率

收稿日期:2003-07-28;收到修改稿日期:2003-09-29

作者简介:周赢武(1968—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,福州大学电子系讲师,主要从事光通信系统的偏振效应及光纤光栅的应用研究。E-mail: ywzhou1073@sina.com

的变化特性,反映了信道光谱线宽与系统偏振模色散的关系,也反映了偏振模色散特性对信道间串扰的影响,以及其他重要特性^[7]。但这些工作都是在不考虑偏振相关损耗的情况下进行的,而实际的光通信系统总是存在偏振相关损耗。

N. Gisin 等^[2]在研究偏振模色散及偏振相关损耗联合作用时,提出了这样一个模型:一根长的通信光纤可以认为是由许多小段的光纤级联而成,在每段光纤中,光分为两个正交的偏振模,这两个模式只有在每段光纤的连接处才发生耦合,第 i 段光纤双折射大小用 β_i 表示,偏振相关损耗为 α_i 。利用这一模型,在偏振模色散和偏振相关损耗共同作用下,光纤的两个主偏振态已不再垂直。通过理论和实验,发现了脉冲的异常展宽现象^[6]。之后,许多研究者利用这一模型,作了大量的理论和实验工作,并得到了许多有意义的结果^[7~9]。本工作采用 Gisin 模型,通过理论和模拟方法,研究存在偏振模色散和偏振相关损耗情况下的输出偏振态自相关特性。

2 输出偏振态相关函数

在 Gisin 模型中,假设每段光纤的偏振模色散矢量和偏振相关损耗矢量平行,这样,每段光纤可以由一个复传输矩阵来表示

$$M_i = \exp\left[(-i\beta_i\omega + \alpha_i)e_i^{\tilde{}} \cdot \frac{\sigma^{\omega}}{2}\right] \quad (1)$$

其中, β_i 和 α_i 分别为第 i 段光纤的群时延差和偏振相关损耗, $e_i^{\tilde{}}$ 为该段光纤偏振模色散矢量的方向,而 σ^{ω} 为 Pauli 矩阵。设光纤由 N 段短光纤段级联而成,这样,光纤总的传输矩阵可以表示为

$$T(\omega) = A_n M_n \cdot M_{n-1} \cdot M_{n-2} \cdots M_i \cdots M_2 \cdot M_1 \quad (2)$$

其中, $A_n = \exp(-\alpha_0 + \sum_{j=1}^N \alpha_j/2)$ 为系统的总损耗。而 α_0 为两个偏振模所共有的损耗。

对于一定的人射偏振态 $s_{in}^{\tilde{}}$, 输出的斯托克斯矢量可以通过迭代得到^[10]

$$s_n^{\tilde{}}(\omega) = A_n^2 \langle s_{n-1}^{\tilde{}}(\omega) | M_n^{\dagger} \sigma^{\omega} M_n | s_{n-1}^{\tilde{}}(\omega) \rangle \quad (3)$$

将式(1)和(2)代入式(3)可得

$$\begin{aligned} s_n^{\tilde{}}(\omega) &= A_n^2 \cos(\beta\omega) s_{n-1}^{\tilde{}} + \sin(\beta\omega) (e_n^{\tilde{}} \times s_{n-1}^{\tilde{}}) + \\ &A_n^2 [\cosh(\alpha) - \cos(\beta\omega)] \times \\ &[(e_n^{\tilde{}} \cdot s_{n-1}^{\tilde{}}) e_n^{\tilde{}} + \sinh(\alpha) e_n^{\tilde{}}] \end{aligned} \quad (4)$$

这是个关于 $s_n^{\tilde{}}(\omega)$ 的迭代方程。设各段光纤的 β_i 相等(并记为 β), α_i 也相等(记为 α), 这样, 相应于频率为 ω_1 和 ω_2 的两个输出偏振态的相关函数可表示为 $E[s_n^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_n^{\tilde{}}(\omega_2)] = A_n^2 [s_{in}^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_{in}^{\tilde{}}(\omega_2)] p^n +$

$$A_n^2 \sinh(\alpha) \left(\frac{1-p^n}{1-p} \right) \quad (5)$$

式中, $p = 1 + \frac{1}{3}(\alpha^2 - \beta^2 \Delta\omega^2)$, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ 。

由文献[2,11]可知, $\alpha = \sqrt{E(\Gamma^{\tilde{}})}/n$, $\beta = \sqrt{E(\tau^{\tilde{}})}/n$ (Γ, τ 分别为整段光纤的偏振相关损耗和偏振模色散的大小,而 $E(\tau^{\tilde{}})$ 为偏振模色散的均方值, $E(\Gamma^{\tilde{}})$ 为偏振相关损耗的均方值)。将这两个关系式代入式(5),并设 $n \rightarrow \infty$, 可得

$$\begin{aligned} \text{ACF}[s_n^{\tilde{}}(\omega_1), s_n^{\tilde{}}(\omega_2)] &= E[s_n^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_n^{\tilde{}}(\omega_2)] = \\ &A_n^2 \frac{3E(\Gamma^{\tilde{}})}{E(\tau^{\tilde{}})\Delta\omega^2 - E(\Gamma^{\tilde{}})} \times \\ &\left\{ 1 - \exp\left\{\frac{1}{3}[E(\Gamma^{\tilde{}}) - E(\tau^{\tilde{}})\Delta\omega^2]\right\}\right\} + \\ &s_{in}^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_{in}^{\tilde{}}(\omega_2) A_n^2 \exp\left\{\frac{1}{3}[E(\Gamma^{\tilde{}}) - E(\tau^{\tilde{}})\Delta\omega^2]\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\text{ACF}[s_n^{\tilde{}}(\omega_1), s_n^{\tilde{}}(\omega_2)]$ 表示 $s_n^{\tilde{}}(\omega_1), s_n^{\tilde{}}(\omega_2)$ 的自相关函数。

当系统不存在偏振相关损耗时,可以得到文献[7]的结论

$$\begin{aligned} \text{ACF}[s_n^{\tilde{}}(\omega_1), s_n^{\tilde{}}(\omega_2)] &= \\ &s_{in}^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_{in}^{\tilde{}}(\omega_2) \exp\left[-\frac{1}{3}E(\tau^{\tilde{}})\Delta\omega^2\right] \end{aligned}$$

由(6)式可见,系统的偏振模色散及偏振相关损耗都会影响输出偏振态的相关特性。在现有的光通信模式下,在斯托克斯空间,对应于不同光频的输入偏振态 $s_{in}^{\tilde{}}(\omega_1)$ 和 $s_{in}^{\tilde{}}(\omega_2)$ 可能是:1) 反平行的,即 $s_{in}^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_{in}^{\tilde{}}(\omega_2) = -1$, 这对应于相邻信道偏振复用波分复用(WDM)情形;2) 平行的,即 $s_{in}^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_{in}^{\tilde{}}(\omega_2) = 1$, 这对应于非偏振复用波分复用情形或是同一信道内不同的光频分量。

3 数值模拟与理论的分析

由文献[9]可知,Gisin 模型中每段光纤复传输矩阵也可以等效地表示为

$$M_i = R(-\theta_i) D_i(\omega) R(\theta_i) \quad (7)$$

其中 $R(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵, θ_i 为第 i 段光纤快轴与参考坐标轴的夹角。 $D_i(\omega)$ 为一描述第 i 段光纤偏振模色散和偏振相关损耗的对角矩阵

$$D_i(\omega) = \begin{bmatrix} e^{(-i\omega\beta_i + \alpha_i)/2} & 0 \\ 0 & e^{(i\omega\beta_i - \alpha_i)/2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于一定的人射偏振态 V_{in} , 输出的 Jones 矢量为

$$\mathbf{V}_n(\omega) = T(\omega)V_{in} \quad (9)$$

其相应的 Stokes 矢量可以通过下列公式得到

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= V_x V_x^* - V_y V_y^* & \mathbf{S}_2 &= V_x V_y^* + V_x^* V_y \\ \mathbf{S}_3 &= i(V_x V_y^* - V_x^* V_y) \end{aligned} \quad (10)$$

根据(7)~(10)式,可以利用蒙特-卡罗方法模拟研究输出偏振态的相关函数 $E[s_n^{\tilde{}}(\omega_1) \cdot s_n^{\tilde{}}(\omega_2)]$ 的特性。在模拟时,取光波的中心波长为 1550 nm,相应的角频率为 1215.3 rad/ps;步长为 0.1 rad/ps;光纤段数 $n = 200$ 。假设各段光纤的 β_i 及 α_i 相同,而令光纤段之间偏振方向随机变化,但是分布几率均匀,即 θ_i 是在 0 到 2π 之间均匀分布。计算次数为 100000 次,并对计算的结果作了归一化处理。

图 1(a)给出了在 $\beta_i = 2$ ps 情况下,光传输链路的输出偏振态自相关函数(ACF)随 α_i 的变化情形,而图 1(b)给出了 $\alpha_i = 0.0163$,光传输链路的输出偏振态的自相关函数(ACF)随 β_i 的变化情形。图中,点为数值模拟的结果,而实线为根据式(6)所得的归一化理论曲线,由图可见理论和模拟结果吻合得很好。在图 1(a)中 B,C,D 线分别相当于整个传输光纤具有 10 dB,5 dB 及 0.5 dB 的偏振相关损耗^[9]。由该图可知,当光传输链路的偏振模色散的值不变时,输出偏振态的相关函数的线宽随着偏振相关损

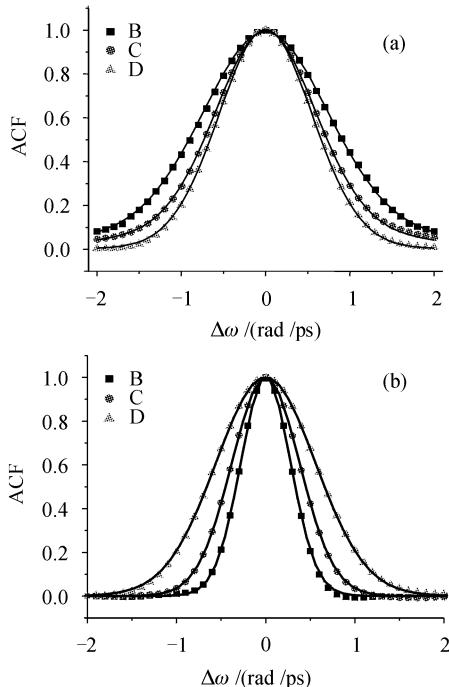


图 1 归一化输出偏振态的自相关函数特性

Fig. 1 Normalized autocorrelation function of the output polarization states

(a) $\beta_i = 2$ ps, $\alpha_i = 0.0814$ (B), 0.0407(C), 0.0041(D);
(b) $\alpha_i = 0.0163$, $\beta_i = 4$ ps(B), 3 ps(C), 2 ps(D)

耗的增大而增大,这意味着随着系统偏振相关损耗的增大,传输信号输出偏振态的方向随频率的变化变慢。

由图 1(b)可见,在光传输链路的偏振相关损耗一定的情况下,其输出偏振态的相关函数的线宽随着偏振模色散增大而变窄,它表明随着系统偏振模色散的增大,传输信号输出偏振态的方向随频率的变化变快。

4 结 论

从理论上得到了光传输链路的输出信号偏振态相关函数的解析表达式,而后,利用蒙特-卡罗法进行了模拟研究,理论和数值模拟的结果相一致。结果表明,随着偏振相关损耗的增大,输出偏振态归一化自相关函数的线宽变宽;而随着光传输链路的偏振模色散的增大输出偏振态相关函数的线宽也变窄,即输出偏振态的方向随频率的变化也变快。

利用理论公式(6),还可以研究波分复用系统不同信道间的相互作用与系统偏振模色散及偏振相关损耗的关系。

参 考 文 献

- Patrick C. Chou, John M. Fini, Hermann A. Haus. Demonstration of a feed-forward PMD compensation technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(2):161~163
- N. Gisin, B. Hutter. Combined effects of polarization mode dispersion and polarization dependent losses in optical fibers[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **142**:119~125
- Nobuhiko Kikuchi. Analysis of signal degree of polarization degradation used as control signal for optical polarization mode dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4):480~486
- Zheng Yuan, Li Chaoyang, Liu Xiumin *et al.*. Impacts of polarization mode dispersion on the pulse width in linear systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):900~904
郑 远,李朝阳,刘秀敏 等. 偏振模色散对线性系统脉宽的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):900~904
- Cai Ju, Xu Ming, Yang Xianglin. Analysis of statistical characteristics of first- and second-order polarization mode dispersion [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
- B. Hutter, N. Gisin. Anomalous pulse spreading in birefringent optical fibers with polarization-dependent losses [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(8):504~506
- J. Hansryd, H. Sunnerud, P. A. Andrekson. Impact of PMD on four-wave-mixing-induced crosstalk in WDM systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9):1261~1263
- Y. Li, A. Yariv. Solutions to the dynamical equation of polarization-mode dispersion and polarization-dependent losses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(11):1821~1827
- P. Lu, L. Chen, X. Bao. Statistical distribution of polarization-dependent loss in presence of the polarization-mode dispersion in single-mode fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5):451~453
- J. P. Gordon, H. Kogelnik. PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers [J]. *Natl. Acad. Sci. USA*, 2000, **97**(9):4541~4550
- A. Meccozzi, M. Shataif. The statistics of polarization-dependent loss in optical communication systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3):313~315