

单模光纤偏振模色散统计特性的分析*

蔡 炬 徐 铭 杨祥林

(南京邮电学院光信息技术系, 南京 210003)

摘要: 用琼斯矩阵本征分析法对偏振模色散各参量的统计特性进行了分析, 得到了一阶和二阶偏振模色散的统计规律, 并给出了二阶偏振模色散各参量与一阶偏振模色散各参量之间的比例关系, 对二阶偏振模色散的获取、补偿和系统设计均有指导意义。

关键词: 光纤光学; 偏振模色散; 统计特性; 琼斯矩阵; 庞加莱球

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

随着光纤通信系统码速的提高和色散补偿技术应用的发展, 光纤偏振模色散(PMD)对系统性能的限制已不容忽视, 并变得愈来愈严重^[1,2]。受当时制造技术的限制, 20 世纪 90 年代中期前铺设的光纤, 其偏振模色散值均较高, 其值在 1~10 ps/km^{1/2} 之间^[3], 已成为已建系统提速的主要限制。因此研究偏振模色散对系统性能的影响具有重要意义。通常光缆制造商只提供一阶偏振模色散参量, 但是二阶偏振模色散对光脉冲传输仍有影响, 而用实验方法测量偏振模色散的其它特性需要复杂的测试系统。本文将采用分析方法, 由已知的一阶偏振模色散参量求得偏振模色散的其它参量, 为偏振模色散的补偿和高速系统的设计提供参考。

2 偏振模色散的理论数值模型

2.1 偏振模色散的几何模型及特性

光纤的随机双折射是引起偏振模色散的主要原因, 它导致光的偏振态随频率 ω 和光纤长度 l 而变, 常用庞加莱球矢量模型来进行分析。设输入光纤的初始脉冲各频率成分的偏振态均相同, 则输出偏振态可表示为 $s(l, \omega)$, 且有^[4]

$$\frac{\partial s(l, \omega)}{\partial l} = \mathbf{W}(l, \omega) \times s(l, \omega), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial s(l, \omega)}{\partial \omega} = \mathbf{\Omega}(l, \omega) \times s(l, \omega), \quad (1b)$$

式中 $\mathbf{W}(l, \omega)$ 为本地光纤双折射矢量, 代表光纤不同长度处的双折射程度; $\mathbf{\Omega}(l, \omega)$ 为输出偏振模色散矢量, 代表输出偏振态随频率而变化的速率和方向, 称为一阶偏振模色散矢量, 其对角频率的微商 $\mathbf{\Omega}_\omega(l, \omega)$ 称为二阶偏振模色散矢量, 可分别表示为^[5]

$$\mathbf{\Omega}(l, \omega) = \Delta\tau(l, \omega)\mathbf{q}(l, \omega), \quad (2)$$

$$\mathbf{\Omega}_\omega(l, \omega) = \Delta\tau_\omega(l, \omega)\mathbf{q}(l, \omega) + \Delta\tau(l, \omega)\mathbf{q}_\omega(l, \omega), \quad (3)$$

式中 $\mathbf{\Omega}(l, \omega)$ 、 $\mathbf{\Omega}_\omega(l, \omega)$ 、 $\mathbf{q}(l, \omega)$ 和 $\mathbf{q}_\omega(l, \omega)$ 均为斯托克斯矢量, 下标 ω 表示该变量对角频率的微商。 $\Delta\tau(l, \omega)$ 为微分群时延(DGD), $\mathbf{q}(l, \omega)$ 是平行于较快偏振主态(PSP)的单位斯托克斯矢量。(3)式右边第一项 $\Delta\tau_\omega(l, \omega)\mathbf{q}(l, \omega)$ 平行于一阶偏振模色散矢量 $\mathbf{\Omega}(l, \omega)$, 记为 $\mathbf{\Omega}_{\omega//}(l, \omega)$, 其模为 $\Delta\tau_\omega(l, \omega)$ 。 $\mathbf{\Omega}_{\omega//}(l, \omega)$ 导致偏振相关色散 d :

$$d = -\frac{\pi c}{\lambda^2} \Delta\tau_\omega(l, \omega). \quad (4)$$

偏振相关色散是在较快偏振主态下传输的信号脉冲展宽和压缩的原因之一, 其单位是 ps/nm。(3)式右边第二项 $\Delta\tau(l, \omega)\mathbf{q}_\omega(l, \omega)$ 垂直于一阶偏振模色散矢量 $\mathbf{\Omega}(l, \omega)$, 记为 $\mathbf{\Omega}_{\omega\perp}(l, \omega)$ 。 $\mathbf{\Omega}_{\omega\perp}(l, \omega)$ 导致解偏振, 即较快偏振主态方向随频率的改变。文献[6]表明, $\mathbf{\Omega}_{\omega\perp}^2(l, \omega)$ 为 $\mathbf{\Omega}_{\omega//}^2(l, \omega)$ 的 8 倍, 即较快偏振主态方向的频率相关性对二阶偏振模色散的作用比较快偏振主态大小的频率相关性对二阶偏振模色散的作用更大。因此, 不能简单认为二阶偏振模色散仅是对 $\Delta\tau(l, \omega)$ 的微商, 同时还必须考虑对较快偏振主态方向的微分。

在光纤长度远大于平均耦合长度时, 一阶、二阶

* 国家自然科学基金(60072046)资助课题。

E-mail: caiju01@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-01-04; 收到修改稿日期: 2002-04-19

偏振模色散系数的定义分别为

$$D_{\text{PMD}}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{l}} \sqrt{\langle \Omega^2(l, \omega) \rangle} = \frac{\Delta\tau(l, \omega)}{\sqrt{l}}, \quad (5a)$$

$$D_{\text{PMD}}^{(2)} = \frac{2\pi c}{\lambda^2 l} \sqrt{\langle \Omega_\omega^2(l, \omega) \rangle}, \quad (5b)$$

单位分别为 ps/km^{1/2} 和 ps/(nm · km), 式中角括号代表均值。(5) 式表示各阶偏振模色散系数分别与其相应的偏振模色散矢量的方均根成正比。从(5)式可知, 二阶偏振模色散值 $\sqrt{\langle \Omega_\omega^2(l, \omega) \rangle}$ 与光纤长度 l 成正比, 而一阶偏振模色散值 $\Delta\tau(l, \omega)$ 与光纤长度的平方根成正比。为了确定一阶与二阶偏振模色散系数之间的关系, 需要知道偏振模色散的动力学方程。而偏振模色散的动力学方程不难由(1a)式和(1b)式推导出来:

$$\frac{\partial \Omega(l, \omega)}{\partial l} = \frac{\partial \mathbf{W}(l, \omega)}{\partial \omega} + \mathbf{W}(l, \omega) \times \Omega(l, \omega), \quad (6a)$$

上式对频率的微商为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega_\omega(l, \omega)}{\partial l} &= \frac{\partial^2 \mathbf{W}(l, \omega)}{\partial \omega^2} + \\ &\frac{\partial \mathbf{W}(l, \omega)}{\partial \omega} \times \Omega(l, \omega) + \\ &\mathbf{W}(l, \omega) \times \Omega_\omega(l, \omega). \end{aligned} \quad (6b)$$

(6a)式和(6b)式是一对耦合微分方程, 它们确定了一阶和二阶偏振模色散的动力学特性。为考察偏振模色散矢量的统计性质, 我们将 $\mathbf{W}(l, \omega)$ 分解为与频率 ω 相关和与长度 l 相关的两部分:

$$\mathbf{W}(l, \omega) = \mathbf{W}_0(\omega) + \mathbf{v}(l),$$

$\mathbf{W}_0(\omega)$ 是只与频率相关的线性双折射, 在庞加莱球上可表示为

$$\mathbf{W}_0(\omega) = (\Delta\beta, 0, 0),$$

其中 $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$ 为两较快偏振主态方向传输常量之差, 代表双折射强度。因此

$$\partial \mathbf{W}_0(\omega) / \partial \omega = (\Delta\beta_1, 0, 0),$$

其中

$$\Delta\beta_1 = d(\Delta\beta) / d\omega.$$

由 $\mathbf{W}_0(\omega)$ 的线性性质, 有

$$\partial \mathbf{W}^2(l, \omega) / \partial \omega^2 = 0.$$

而 $\mathbf{v}(l)$ 只与长度相关, 代表在光纤不同长度处较快偏振主态的随机旋转引起的两较快偏振主态分量之间的耦合对双折射的影响。它相对于 $\mathbf{W}_0(\omega)$ 而言较小, 可看成一个扰动, 用一个均值为 0, 方差为 σ^2 的白高斯噪声来表示。在庞加莱球上则为

$$\mathbf{v}(l) = [v_1(l), v_2(l), v_3(l)].$$

从而方程(6a)式、(6b)式可表示为如下的矩阵形式:

$$\frac{\partial \Omega(l, \omega)}{\partial l} = -\sigma \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{v} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta\beta \\ 0 & \Delta\beta & 0 \end{bmatrix} \Omega + \begin{bmatrix} \Delta\beta_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7a)$$

$$\frac{\partial \Omega_\omega(l, \omega)}{\partial l} = -\sigma \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{v} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta\beta \\ 0 & \Delta\beta & 0 \end{bmatrix} \Omega + \begin{bmatrix} \Delta\beta_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \Omega. \quad (7b)$$

由于偏振模色散矢量的统计特性, 需要反复运用随机过程中鞅微分方程的解法来解此二方程。经过复杂的推导运算, 得到如下结果:

$$\langle \Omega^2(l, \omega) \rangle = 2 \left(\frac{\Delta\beta_1}{\sigma^2} \right)^2 (\sigma^2 l + e^{-\sigma^2 l} - 1), \quad (8a)$$

$$\langle \Omega_\omega^2(l, \omega) \rangle = \frac{4}{3} \left(\frac{\Delta\beta_1}{\sigma} \right)^4 l^2 + \sigma(l^2), \quad (8b)$$

其中 $\sigma(l^2)$ 为小量。将(8a)式平方后与(8b)式相除并将其比值取 $l \rightarrow \infty$ 时的极限, 可得

$$[\langle \Omega^2(l, \omega) \rangle]^2 / \langle \Omega_\omega^2(l, \omega) \rangle = 3. \quad (9)$$

此式表示在光纤长度足够长时, 一阶和二阶偏振模色散参量可由一个简单的比例关系联系起来。

如前所述, $\Omega_{\perp}^2(l, \omega)$ 为 $\Omega_{\parallel}^2(l, \omega)$ 的 8 倍, 结合(3)式可得

$$\begin{aligned} \langle |\Omega_\omega(l, \omega)|^2 \rangle &= 9 \langle |\Omega_{\omega//}(l, \omega)|^2 \rangle = \\ &9 \langle \Delta\tau_\omega^2(l, \omega) \rangle, \end{aligned} \quad (10)$$

而 $\Omega(l, \omega)$ 和 $\Omega_\omega(l, \omega)$ 模的比例关系则可由(9)式、(10)式推出:

$$\begin{aligned} [\langle \Delta\tau^2(l, \omega) \rangle]^2 &= [\langle \Omega^2(l, \omega) \rangle]^2 = \\ &27 \langle |\Omega_{\omega//}(l, \omega)|^2 \rangle = 27 \langle \Delta\tau_\omega^2 \rangle. \end{aligned} \quad (11)$$

由(4)式和(11)式可见, $\Delta\tau_\omega(l, \omega)$ 和偏振相关色散都正比于 $\Delta\tau(l, \omega)$ 的平方。而由(5a)式、(5b)式和(9)式可知一阶和二阶偏振模色散系数的关系:

$$D_{\text{PMD}}^{(2)} = \frac{2\pi c}{\sqrt{3}\lambda^2} [D_{\text{PMD}}^{(1)}]^2. \quad (12)$$

可见, 二阶偏振模色散系数与一阶偏振模色散系数的平方成正比。根据一阶偏振模色散系数, 可以得到二阶偏振模色散矢量各分量相应的统计分布规

律及其方均根值。

2.2 双折射光纤传输函数中的琼斯矩阵

为了分析光脉冲信号的传输特性,必须知道光纤的传输函数,它由光纤链路的微分群延迟和较快偏振主态共同决定。从矩阵光学可知,光纤可以由一个 2×2 的复传输矩阵

$$\mathbf{M}(l, \omega) = \mathbf{R}^{-1}(\omega) \mathbf{D}(l, \omega) \mathbf{R}(\omega) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \exp(-j\phi/2) & 0 \\ 0 & \exp(j\phi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 $\det \mathbf{M}(l, \omega) = 1$, $\mathbf{M}(l, \omega) \mathbf{M}^+(l, \omega) = 1$, $\mathbf{R}(\omega)$ 为表示较快偏振主态随频率旋转的旋转矩阵, $\theta = \theta(\omega)$ 是较快偏振主态在频率 ω 处的方位角, 而对角矩阵 $\mathbf{D}(l, \omega)$ 与两较快偏振主态之间的群时延相关, 其中 $\phi = \phi(l, \omega)$ 是 $\Omega(l, \omega)$ 随频率变化而改变的角度。

由于光纤中脉冲两偏振分量之间的耦合随波长、距离和时间等因素随机变化, 因此须用统计方法来分析偏振模色散的特性。在用计算机对光纤的偏

$$\mathbf{T}(l, \omega) = \exp\{-[\alpha + j\bar{\beta}(\omega)]z\} \mathbf{M}(l, \omega)$$

来描述, 其中 α 是光纤的衰减常量, $\bar{\beta}$ 是平均传输常量, z 是传输距离, $\mathbf{M}(l, \omega)$ 为琼斯矩阵, 是一个 2×2 的酉阵, 光纤双折射效应即包含在琼斯矩阵 $\mathbf{M}(l, \omega)$ 中:

振模色散的统计特性进行分析时, 我们将光纤视为 N 段短光纤的级联, 各段光纤的长度均大于光纤的双折射的拍长 $2\pi/(\beta_x - \beta_y)$, 而且短光纤段的长度分布满足高斯分布。各段光纤内的双折射大小相等, 方向固定; 而相邻光纤段连接处的双折射方向则不相关地随机改变, 且总体上在 $(0, 2\pi)$ 内满足均匀分布。二偏振分量的耦合只发生在光纤连接处, 而在各光纤段内不会发生。则总的琼斯矩阵 $\mathbf{M}(l, \omega)$ 就是各短光纤段的琼斯矩阵 $\mathbf{M}_i(l, \omega)$ 的积:

$$\mathbf{M}(l, \omega) = \prod_{i=1}^N \mathbf{M}_i(l, \omega) = \prod_{i=1}^N \mathbf{R}_i^{-1}(\omega) \mathbf{D}_i(l, \omega) \mathbf{R}_i(\omega) = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \exp(-j\phi_i/2) & 0 \\ 0 & \exp(j\phi_i/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}. \quad (14)$$

由 $d\phi(l, \omega) = \Delta\tau(l, \omega) d\omega$, 同时结合(5a)式, 并考虑到光纤温度的随机扰动等环境因素, 可将 $\phi(l, \omega)$ 表示为 $\sqrt{3\pi l_i/8\omega} D_{\text{PMD}}^{(1)} + \varphi_i$ 。式中 l_i 是各光纤段的长

度, 相位 φ_i 表示光纤温度等随机因素的扰动, 在 $(0, 2\pi)$ 范围内均匀分布。因此(14)式的琼斯矩阵可改写为

$$\mathbf{M}(l, \omega) = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \exp[-j(\sqrt{3\pi l_i/32\omega} D_{\text{PMD}}^{(1)} + \varphi_i/2)] & 0 \\ 0 & \exp[j(\sqrt{3\pi l_i/32\omega} D_{\text{PMD}}^{(1)} + \varphi_i/2)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}, \quad (15)$$

由此式即可分析光纤传输函数中双折射的影响。从此琼斯矩阵出发可以得到一阶和二阶偏振模色散各参量的统计特性及方均根值等各种信息。

3 偏振模色散特性的数值分析

下面我们利用琼斯矩阵本征分析法(JME)对光纤的偏振模色散统计特性进行数值分析。设光纤总长 $l=200$ km, $N=1000$, 波长 λ 的范围为 $1500 \sim 1580$ nm, 各段光纤长度 l_i 的均值为 200 m, 而其偏离

均值的方差 σ^2 则控制在 0.09 的范围内。 $D_{\text{PMD}}^{(1)}$ 先后分别取值为 3 ps/km^{1/2}、 1 ps/km^{1/2}、 0.5 ps/km^{1/2}、 0.3 ps/km^{1/2} 和 0.1 ps/km^{1/2}。计算时步长设为 0.04 nm。在求二阶分量 $\Delta\tau_\omega(l, \omega)$ 和 $q_\omega(l, \omega)$ 时, 为了保证足够的精度, 将波长间距设为 0.01 nm。首先分别对由(15)式给出的琼斯矩阵 $\mathbf{M}(l, \omega)$ 求导和求逆, 得到 $\mathbf{M}_\omega(l, \omega)$ 和 $\mathbf{M}^{-1}(l, \omega)$, 然后再计算矩阵 $\mathbf{M}_\omega(l, \omega) \mathbf{M}^{-1}(l, \omega)$ 的本征值及其本征矢量, 所得两个本征值的虚部(绝对值相等, 但符号为一正一负)就是

两较快偏振主态的群时延, 两本征值虚部之差则是与一阶偏振模色散相关的微分群时延 $\Delta\tau(l, \omega)$; 而虚部值为负的本征值所对应的本征矢量的方向即是较快偏振主态的方向, 也即 $\mathbf{q}(l, \omega)$ 所指的方向(另一个本征矢量的方向在庞加莱球上与此方向相反)。然后将 $\Delta\tau(l, \omega)$ 和较快偏振主态分别对频率进行微分, 即可

得出二阶偏振模色散各参量的数据, 如表 1 所示。由于偏振模色散的统计特性, 计算时每一组数据的获得均需要进行多达数十次的反复运算, 以下分析均是在 20 ~ 60 次的反复运算结果的均值基础上得到的(误差未示出)。

Table 1 The acquired parameter values through compute with the different PMD coefficients

$D_{PMD}^{(1)} / (\text{ps}/\text{km}^{1/2})$	3	1	0.5	0.3	0.1
$\langle \Delta\tau \rangle / \text{ps}$	42.4770	14.1780	6.0145	4.2576	1.4072
$\langle \langle \Omega^2 \rangle \rangle^2 / \text{ps}^4$	4.4519×10^6	5.7406×10^4	1.6991×10^3	489.4506	5.2439
$\langle \Delta\tau \rangle^2 / \text{ps}^2$	1.8043×10^3	2.0101×10^2	36.1742	18.1272	1.9802
$\langle \Omega_{\omega}^{\perp} ^2 \rangle / \text{ps}^2$	1.6577×10^5	2.0896×10^3	63.1326	17.9259	0.1959
$\sqrt{\langle \Omega_{\omega//}^2 \rangle} / \text{ps}^2$	4.0715×10^2	45.7121	7.9456	4.0750	0.4426
$\sqrt{\langle \mathbf{q}_{\omega}^{\perp} ^2 \rangle} / \text{ps}$	29.8276	10.2053	4.2613	3.0250	0.9988
$\sqrt{\langle \Omega_{\omega-}^2 \rangle} / \text{ps}^2$	1.1863×10^3	1.2553×10^2	23.0936	12.0473	1.2406
$\sqrt{\langle d^2 \rangle} / (\text{ps}/\text{nm})$	1.6184×10^2	18.2915	3.1357	1.6218	0.1758

图 1 为微分群时延 $\Delta\tau$ 的统计直方图, 其横轴代表微分群延迟值 $\Delta\tau(l, \omega)$, 纵轴代表各 $\Delta\tau(l, \omega)$ 值的统计数量, 图中的曲线表示麦克斯韦概率密度函数。从图可知满足麦克斯韦分布, 且其均值为 42.4770 ps。

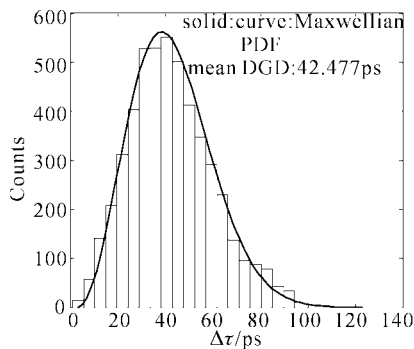


Fig. 1 Statistical distribution of differential group dispersion

图 2~图 3 分别为在 1500~1580 nm 内计算所得的微分群延迟和偏振相关色散(PCD)随波长随机

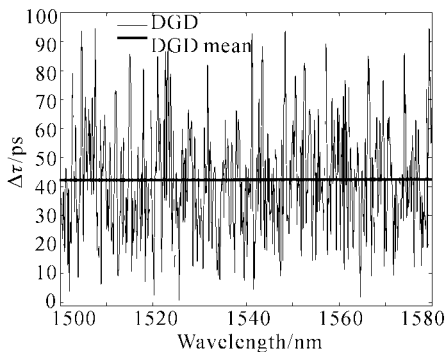


Fig. 2 Wavelength dependence of differential group dispersion

变化的情形, 图 2 中很多地方的微分群延迟峰值超过了 75 ps。如 2.1 中所述, 偏振相关色散正比于微分群延迟的平方。对 42.4770 ps 的微分群延迟均值, 由(4)式、(11)式计算出对应偏振相关色散的理论峰值为 429 ps/nm。而从图 3 可明显看出很多波长处所对应的偏振相关色散峰值超过了 430 ps/nm, 与理论值相符。而且可以看出, 偏振相关色散峰值约比微分群延迟值大 10 倍。因此, 在对偏振模色散进行补偿时, 仅仅补偿一阶效应是不够的。在系统传输速率达到比较高的值时(如 40 Gb/s), 必须考虑对二阶偏振模色散的补偿。

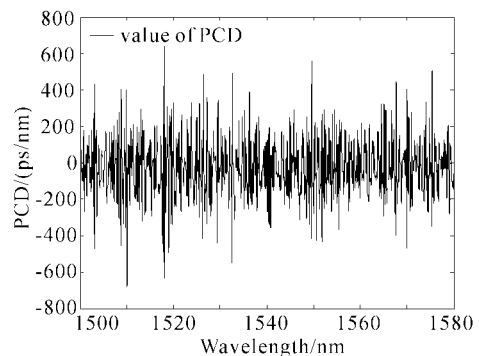


Fig. 3 Wavelength dependence of polarization correlation dispersion

图 4、图 5 和图 6 分别是计算得出的偏振相关色散、 $|\mathbf{q}_{\omega}^{\perp}|$ 和 $\Omega_{\omega\perp}$ 的统计分布直方图, 由表 1 可知, 其方均根值分别为 161.8 ps/nm、29.8276 ps 和 1186.3 ps²。 $\Omega_{\omega//}$ 的均值为零, 方均根值为 407.15 ps², 其概率密度分布与偏振相关色散相似, 在此不再给出。图中的曲线表示相应的理论概率密

度分布函数曲线,由图可见数值计算结果和理论分布是相当吻合的。从图4可看出偏振相关色散满足双曲正割函数的平方的分布,即有一阶经典孤子能量密度的形式。至此给出了一阶偏振模色散和二阶偏振模色散各分量的统计分布直方图。

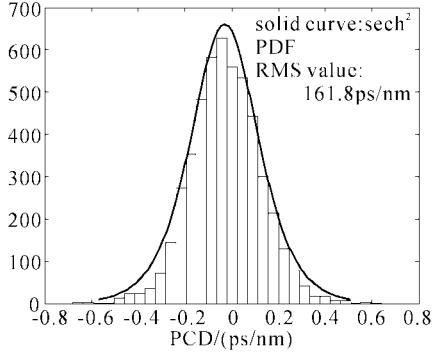


Fig. 4 Statistical distribution of polarization correlation dispersion

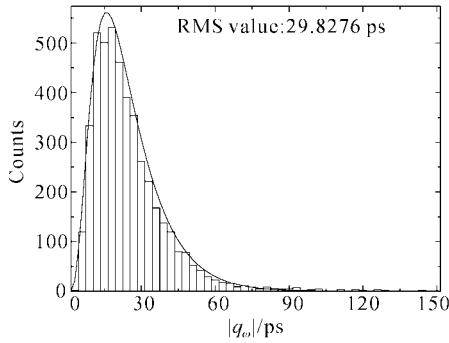


Fig. 5 Statistical distribution of $|q_\omega|$

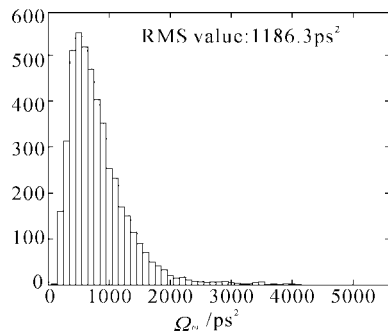


Fig. 6 Statistical distribution of $\Omega_{\omega\perp}$

从表1列出的五个 D_{PMD}^{Ω} 值下的 $\langle \Omega^2(l, \omega) \rangle^2$ 及 $\langle |\Omega_\omega(l, \omega)|^2 \rangle$ 的数据中可以求出比值 $[\langle \Omega^2(l, \omega) \rangle]^2 / \langle |\Omega_\omega(l, \omega)|^2 \rangle$ 分别为 26.8557 ± 0.1657 (其中“ \pm ”后所示数据为标准差,下同), 27.4723 ± 0.4821 , 26.9132 ± 0.1365 , 27.3041 ± 0.3321 , 26.7685 ± 0.2651 , 均值为 27.0628 ± 0.2432 , 与(11)式相当一致。这也证明了我们仿真结果的正确。

根据表1列出的相应数据发现, $\Omega_{\omega\perp}$ 、 $\Omega_{\omega\parallel}$ 、偏振相关色散和 q_ω 等二阶偏振模色散参量与微分群延迟值 $\langle \Delta\tau \rangle$ 之间存在如下比例关系:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta\tau q_\omega)^2 \rangle}}{\langle \Delta\tau \rangle^2} = \frac{\sqrt{\langle \Omega_{\omega\perp}^2 \rangle}}{\langle \Delta\tau \rangle^2} = 0.6423 \pm 0.0053, \quad (16)$$

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta\tau q_\omega)^2 \rangle}}{\langle \Delta\tau \rangle^2} = \frac{\sqrt{\langle \Omega_{\omega\parallel}^2 \rangle}}{\langle \Delta\tau \rangle^2} = 0.2242 \pm 0.0041, \quad (17)$$

$$\frac{\sqrt{\langle d^2 \rangle}}{\langle \Delta\tau \rangle^2} = 0.0891 \pm 0.0022, \quad (18)$$

$$\frac{\sqrt{\langle |q_\omega|^2 \rangle}}{\langle \Delta\tau \rangle} = 0.7102 \pm 0.0089. \quad (19)$$

图7即为上述四个二阶偏振模色散参量随微分群延迟值而变化的关系图。图中两坐标轴均为对数坐标轴,直线根据(16)式到(19)式的比例关系画出。可见,当在仅知道光纤的一阶偏振模色散参量时,按上述关系可求得二阶偏振模色散各参量,从而为二阶偏振模色散的测量、补偿和系统设计提供了理论依据,对高速光纤通信系统的设计具有指导意义。

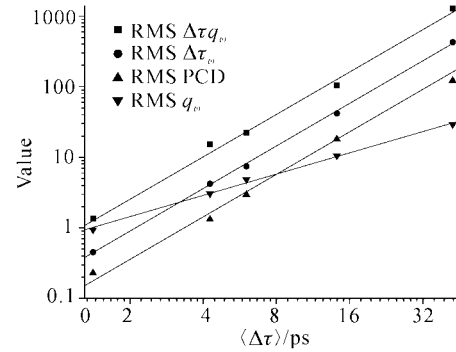


Fig. 7 The scales of the parameters of second-order PMD to $\langle \Delta\tau \rangle$

结论 偏振模色散是实现高速传输的最终限制。本文研究了偏振模色散的统计特性,导出了一阶偏振模色散和二阶偏振模色散各参量之间的比例关系,因此在高速光纤通信系统设计时,当仅知道一阶偏振模色散的微分群时延时,不一定要通过复杂的测量,而可利用本文方法通过计算直接求得二阶偏振模色散各相关参量,为偏振模色散的补偿和系统设计提供了简易的方法。

参 考 文 献

- 1 Sunnerud H, Karlsson M, Andreckson P A. Analytical theory for PMD-compensation. *Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1):50~52
- 2 Xie C, Karlsson M, Andreckson P A *et al.*. Robustness of

- dispersion-managed solitons to the polarization-mode dispersion in optical fibers. *Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(2):121~123
- 3 Lee S, Willner A E. All-optical remote location of high polarization mode dispersion fiber spans using stimulated Brillouin scattering. *Opt. Fiber Commun. Conf.*, 2000, Baltimore, Maryland, TuG2.1~2.3
- 4 Frigo N J. A geometrical model of polarization mode dispersion. *Opt. Fiber Conf.*, 2000, Baltimore, Maryland, WL1.1~WL1.3
- 5 Kogelnik H, Nelson L E, Jopson R M *et al.*. Jones matrix for second-order polarization mode dispersion. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):19~21
- 6 Francia C, Bruyere F, Penninckx D *et al.*. PMD second-order effects on pulse propagation in single-mode optical fibers. *Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(12):1739~1741

Analysis of Statistical Characteristics of First- and Second-Order Polarization Mode Dispersion

Cai Ju Xu Ming Yang Xianglin

(Department of Optical Information Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003)

(Received 4 January 2002; revised 19 April 2002)

Abstract: The statistical characteristics of the first- and second-order polarization mode dispersion (PMD) is analyzed by using Jones Matrix (JME) method, and the statistical regularity of PMD is derived. The scales of second-order PMD parameters to first-order PMD parameter are derived. It is instructive to simplify the measurement and compensation of second-order PMD.

Key words: optical fiber optics; polarization mode dispersion; statistical characteristics; first-order PMD; second-order PMD