

光纤偏振效应导致脉冲展宽的解析模型*

王目光 李唐军 简水生

(北京市北京交通大学光波所, 北京 100044)

摘要: 在 10 Gb/s, 尤其是 40 Gb/s 以上高速光纤通信系统中, 光纤的偏振特性已成为限制系统传输距离的主要因素之一。光纤的偏振效应主要包括偏振模色散和偏振依赖损耗。而脉冲均方根展宽是判断信号传输性能的一个主要物理量。本文讨论了光纤线路偏振模色散与偏振相关损耗的相互作用及对信号脉宽的影响。给出了线路偏振模色散矢量和偏振相关损耗矢量之间的关系式, 并基于严格的数学方法, 导出了在光纤偏振模色散和偏振相关损耗共同作用下的信号均方根脉宽变化的解析形式, 同时考虑了光纤色散, 啁啾等。该模型可用于分析高阶偏振模色散和偏振相关损耗, 任意线性光纤通信系统脉冲展宽分析。

关键词: 光纤通信技术; 偏振模色散; 偏振依赖损耗; 均方根脉宽

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

Analytical Theory of Pulse Broadening Due to Polarization Effects in Optical Fibers

Wang Muguang Li Tangjun Jian Shuisheng

(*Lightwave Technology Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044*)

(Received 10 December 2002; revised 12 May 2003)

Abstract: As the transmission bit rate increases to 10 Gb/s, especially 40 Gb/s and beyond, polarization effects in optical fibers have become one of the significant limiting factors for long-haul transmission. The polarization characteristics of fiber are mainly polarization mode dispersion (PMD) and polarization dependent loss (PDL). While the pulse root mean square (RMS) broadening is a main physical variable to judge signal transmission performance. The interaction between PMD and PDL and their combined effects on pulse broadening are investigated in detail. The relation between PMD vector and PDL vector in fiber links is described analytically. In presence of PMD and PDL, analytical expression of pulse broadening in optical fibers is derived, and chromatic dispersion, chirping are also considered simultaneously. The model can be used to analyze higher order PMD, PDL and pulse broadening in any linear fiber communication system.

Key words: optical fiber communication technology; polarization mode dispersion; polarization dependent loss; RMS pulse width

1 引 言

近年来,随着光纤通信系统传输速率和传输距离不断提升,光纤非圆性和应变导致的偏振效应对传输系统的影响引起了广泛的重视^[1~3]。光纤的偏振特性分为偏振模色散(PMD)和偏振依赖损耗(PDL),由于其受光载波频率、周围环境(温度,应

变)等的影响,表现出复杂的动态统计特性,因而以往文献中大部分是基于波片模型数值分析光纤偏振对系统性能的影响。尽管这种方法可以定量地讨论偏振模色散和偏振相关损耗对信号的劣化程度,然而不能给出直观的物理表现形式,因此研究偏振效应导致信号劣化的解析理论是非常有意义的。

信号均方根(RMS)脉宽是表征传输信号质量的一个物理量,光纤偏振模色散致均方根展宽的解析理论研究引起关注^[4~7],然而主要限于低阶偏振模色散,并且考虑二阶偏振模色散时为近似解。文

* 国家 863(2001AA120204)资助课题。

E-mail: wangmuguang@263.net

收稿日期:2002-12-10;收到修改稿日期:2003-05-12

献[7]利用矩量法给出了信号在偏振模色散的影响下信号均方根脉宽变化的解析表达式,可惜其忽略了光纤偏振相关损耗。Eriksson 等^[8]进一步考虑了在系统终端加一部分偏振器对信号脉宽的影响,此偏振器即偏振相关损耗单元对信号频率无关。该解析理论可以用来分析附有偏振器的偏振模色散补偿系统,但仍有相当大的局限性。因为实际的光纤通信系统偏振模色散和偏振相关损耗不是完全分离的,而是同时存在于整个传输线路上,不仅偏振模色散具有频率相关特性,偏振相关损耗也是信号频率的函数。本文在以上理论研究的基础上,基于严格的数学方法,给出了在光纤线路中分布的偏振模色散和偏振相关损耗相互作用下信号均方根脉宽的解析形式,以及线路偏振模色散矢量与偏振相关损耗矢量的关系方程。并与以往结论相比较,分别讨论了偏振模色散和偏振相关损耗对脉冲展宽的影响。

2 信号均方根脉宽

光纤线路的偏振效应可以用一与信号频率 ω 有关的琼斯(Jones)矩阵 $\mathbf{T}(\omega)$ 来表示^[4],在仅考虑偏振模色散时, $\mathbf{T}(\omega)$ 为单位酉矩阵,因而信号均方根脉宽具有比较简单的表达形式,但考虑偏振相关损耗后, $\mathbf{T}(\omega)$ 为普通矩阵,导致信号均方根脉宽变化相对复杂,下面是简化的推导过程。

考虑输入光信号为 $\Psi_{\text{in}}(t) = f(t)\mathbf{J}$, $f(t)$ 为输入光场复振幅, \mathbf{J} 为输入琼斯偏振矢量,忽略光纤非线性

性和偏振无关损耗,输出光场可表示为

$$\Psi_o(\omega) = \exp(-i\beta L)\mathbf{T}(\omega)\tilde{\Psi}_{\text{in}}(\omega) = |\tilde{f}| \exp(i\phi)\mathbf{T}(\omega)\mathbf{J}, \quad (1)$$

其中 β, L 表示光纤传输常数和长度, $\tilde{\Psi}_{\text{in}}(\omega)$ 、 \tilde{f} 分别为 $\Psi_{\text{in}}(t)$ 、 $f(t)$ 的傅里叶变换。 ϕ 表示 $\tilde{f} \exp(-i\beta L)$ 的相位,即 $\tilde{f} \exp(-i\beta L) = |\tilde{f}| \exp(i\phi)$ 。因此输出光功率可以表示为

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_o^+(\omega) \cdot \Psi_o(\omega) d\omega = \mathbf{J}^+ \cdot P_0 \cdot \mathbf{J}, \quad (2)$$

这里 $P_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{T}^+(\omega) \cdot \mathbf{T}(\omega) \cdot |\tilde{f}|^2 d\omega$ 为一 2×2 厄米矩阵。上标“+”表示厄米算符。时间 t 一阶矩即输出脉冲平均群时延为

$$\tau_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_o^+(\omega) \cdot i\Psi_o'(\omega) d\omega / W = \frac{\mathbf{J}^+ \cdot P_1 \cdot \mathbf{J}}{W}, \quad (3)$$

式中二阶厄米矩阵

$$P_1 = i \int_{-\infty}^{+\infty} [(\mathbf{T}^+ \mathbf{T}^- + i\mathbf{T}^+ \mathbf{T} \cdot \phi') \cdot |\tilde{f}|^2 + \mathbf{T}^+ \mathbf{T} \cdot |\tilde{f}| |\tilde{f}'|] d\omega,$$

上标“'”表示对 ω 求导。脉冲时间 t 的二阶矩表示为

$$\tau_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_o'(\omega)|^2 d\omega / W = \frac{\mathbf{J}^+ \cdot P_2 \cdot \mathbf{J}}{W}, \quad (4)$$

这里矩阵表示为

$$P_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \left[\left(\frac{|\tilde{f}'|}{|\tilde{f}|} \right)^2 + (\phi')^2 \right] \mathbf{T}^+ \mathbf{T} + (\mathbf{T}')^+ \mathbf{T}' + i\phi' [(\mathbf{T}')^+ \mathbf{T} - \mathbf{T} - \mathbf{T}^+ \mathbf{T}'] \right\} \cdot |\tilde{f}|^2 d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} [\mathbf{T}^+ \mathbf{T}' + (\mathbf{T}')^+ \mathbf{T}] |\tilde{f}| |\tilde{f}'| d\omega,$$

根据输入信号偏振模色散矢量 Ω 和偏振相关损耗矢量 t 的定义,我们有如下关系式:

$$\begin{cases} \mathbf{T}^{-1}(\omega) \cdot \mathbf{T}'(\omega) = -\frac{i}{2} \Omega \cdot \sigma, \\ \mathbf{T}^+(\omega) \cdot \mathbf{T}(\omega) = t_0 \cdot \mathbf{I} + t \cdot \sigma, \end{cases} \quad (5)$$

Ω, t 方向分别为快轴偏振主态方向和最小衰减偏振态方向, t_0 为一标量, \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{T}^{-1} 是 \mathbf{T} 的逆矩阵。仅有偏振模色散时,矩阵 $i\mathbf{T}^{-1}\mathbf{T}'$ 为厄米矩阵,其本征向量即偏振模色散矢量 Ω 为一实矢量;而存在偏振相关损耗后,矩阵 $i\mathbf{T}^{-1}\mathbf{T}'$ 不再是厄米矩阵,此时 Ω 为一复矢量,可以表示为 $\Omega = \text{Re}\Omega + i \cdot \text{Im}\Omega$,

$\text{Re}\Omega, \text{Im}\Omega$ 分别表示复矢量 Ω 的实部和虚部。根据矩阵理论,由(5)式可以得到:

$$\begin{cases} \mathbf{T}^+ \mathbf{T}' = -\frac{i}{2} (t_0 \Omega \cdot \sigma + \Omega \cdot t + it \times \Omega \cdot \sigma), \\ (\mathbf{T}')^+ \mathbf{T} = \frac{i}{2} (\Omega \cdot \sigma) (t_0 + t \cdot \sigma), \\ (\mathbf{T}')^+ \mathbf{T}' = \frac{1}{4} (\Omega^+ \cdot \sigma) (t_0 + t \cdot \sigma) (\Omega \cdot \sigma), \end{cases} \quad (6)$$

将(5)式、(6)式代入(3)式、(4)式,可以得出脉冲时刻 t 一阶矩、二阶矩与 Ω, t 的关系如下:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{1}{W} \langle \frac{1}{2} [t_0 \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{j} + \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{t} + i(t, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{j}) - i(t'_0 + \mathbf{t}' \cdot \mathbf{j})] - \phi'(t_0 + \mathbf{t} \cdot \mathbf{j}) \rangle, \\ \tau_2 &= \frac{1}{W} \langle (t_0 + \mathbf{i} \cdot \mathbf{j}) \left(\frac{|\tilde{f}|'^2}{|\tilde{f}|^2} + \phi^2 \right) - \frac{1}{2} (t_0 + \mathbf{i} \cdot \mathbf{j})'' - \phi' [\operatorname{Re} \boldsymbol{\Omega} (t_0 \mathbf{j} + \mathbf{t}) + (\operatorname{Im} \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{i}, \mathbf{j})] + \\ &\quad \frac{1}{4} [t_0 |\boldsymbol{\Omega}|^2 + (\boldsymbol{\Omega}^+ \mathbf{t}) (\boldsymbol{\Omega} \mathbf{j}) + i(\boldsymbol{\Omega}^+, \mathbf{t}, \boldsymbol{\Omega}) - (\boldsymbol{\Omega}^+ \times \mathbf{t} \times \boldsymbol{\Omega}) \mathbf{j}] \rangle,\end{aligned}\quad (7)$$

上面关系式中,符号 $\langle \rangle$ 表示在整个脉冲功率谱上 $|\tilde{f}|^2$ 积分, \mathbf{j} 为输入信号琼斯矢量对应的斯托克斯矢量,输出功率 $W = \langle t_0 + \mathbf{t} \cdot \mathbf{j} \rangle$, $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ 表示三向量的混合积,即 $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c}$ 。至此,根据均方根脉宽 σ 定义,可得其为: $\sigma = \sqrt{\tau_2 - \tau_1^2}$ 。以上过程,未做任何近似,皆是经过严格的数学变换,最后得到输出信号均方根脉宽的数学表达形式。基于上式可以求出任意信号在光纤任意阶偏振模色散和偏振相关损耗的相互作用下均方根脉宽的变化情况,并且同时考虑了信号初始啁啾和任意阶光纤色散。

3 偏振模色散和偏振相关损耗关系

根据波片模型,整个光纤线路可以分成 N 段双折射和偏振相关损耗单元,它们之间是相互独立的,偏振模耦合仅发生在两段间的分界面处。然而考虑整个线路的偏振模色散和偏振相关损耗,也就是可直接测量的线路特性,它们之间是相互作用的:偏振模色散使线路偏振相关损耗具有频率依赖性质^[9];偏振相关损耗使脉冲展宽出现大于 N 段光纤微分群时延(DGD)之和或小于 N 段微分群时延最小差等反常现象^[10]。这里,通过简单推导,我们给出线路偏振模色散和偏振相关损耗相互关系。

考虑矩阵 \mathbf{T}^+ 对频率 ω 的依赖特性,由(5)式可得

$$t'_0 = \operatorname{Im} \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{t}, \quad \mathbf{t}' = t_0 \operatorname{Im} \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{t} \times \operatorname{Re} \boldsymbol{\Omega}, \quad (8)$$

定义归一化线路偏振相关损耗矢量为: $\boldsymbol{\Gamma} = \mathbf{t}/t_0$,所以有偏振模色散矢量 $\boldsymbol{\Omega}$ 和偏振相关损耗矢量 $\boldsymbol{\Gamma}$ 的关系式

$$\boldsymbol{\Gamma}'(\omega) = -\operatorname{Re} \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{\Gamma} + \operatorname{Im} \boldsymbol{\Omega} - (\operatorname{Im} \boldsymbol{\Omega} \cdot \boldsymbol{\Gamma}) \boldsymbol{\Gamma}, \quad (9)$$

可以看出, $\operatorname{Im} \boldsymbol{\Omega}$ 是一个部分表征 $\boldsymbol{\Gamma}$ 对频率依赖特性的量。(9)式与偏振相关损耗的动态方程^[9]有近似的表达形式,但两者具有明确不同的物理意义:偏振相关损耗动态方程是描述偏振相关损耗矢量沿光纤传输方向随光纤本地双折射和偏振相关损耗的变化情况,而上式是描述整个线路偏振相关损耗矢量在不同信号频率下的变化情况。

4 应用与验证

根据矩阵分解理论,传输矩阵 $\mathbf{T}(t)$ 可以分解为厄米正定矩阵 $\mathbf{A}(\omega)$ 和单位酉矩阵 $\mathbf{U}(\omega)$ 之积,即

$$\mathbf{T}(\omega) = \mathbf{U}(\omega) \cdot \mathbf{A}(\omega), \quad (10)$$

一般 $\mathbf{A}(\omega), \mathbf{U}(\omega)$ 可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{A}(\omega) = \exp[a(\omega) \cdot \mathbf{e}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}/2], \\ \mathbf{U}(\omega) = \exp[-ib(\omega) \cdot \mathbf{e}_2 \cdot \boldsymbol{\sigma}/2], \end{cases} \quad (11)$$

这里 $a(\omega), b(\omega)/\omega$ 分别为线路的有效偏振相关损耗和双折射, $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 分别对应各自单位矢量。联合(5)式、(10)式和(11)式,可以获得线路输入偏振模色散与偏振相关损耗矢量如下

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Omega} = b'(\cosh a) \mathbf{e}_2 + (1 - \cosh a)(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \mathbf{e}_1 + \\ \quad i(\sinh a)(\mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_1) + ia' \mathbf{e}_1, \\ t_0 = \cosh a, \quad \mathbf{t} = (\sinh a) \mathbf{e}_1. \end{cases} \quad (12)$$

将其代入(2)式和(7)式,即可求出在任意输入偏振态 \mathbf{j} 下输出光功率和信号均方根脉宽。这里我们只考虑一阶 $a = a_0 \omega, b = b_0 \omega$,常数 a_0, b_0 分别表示微分损耗斜率和双折射。假设输入信号为高斯脉冲: $f = \exp(-t^2/4\sigma_0^2)$ (σ_0 为初始均方根脉宽),并且忽略啁啾和线路色散,则可以得到

$$\begin{cases} W = \cosh x + (\sinh x) \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{j}, & \tau_1 = \frac{b_0}{2W} \{ \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{j} + [(\cosh x - 1) \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{j} + \sinh x] \cos \gamma \}, \\ \tau_2 = \sigma_0^2 + \frac{1}{4} b_0^2 + \frac{b_0^2}{W} \left\{ \sinh 4x (\cos \gamma) \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{j} - \frac{a_0}{b_0} (\cosh 4x - 1) (\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2) \cdot \mathbf{j} - \right. \\ \quad \left. \left[\frac{1}{2} (\sinh 9x + \sinh x) \sin^2 \gamma - \sinh 4x \cos^2 \gamma \right] \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{j} \right\}, \end{cases} \quad (13)$$

这里 $x = a_0^2/8\sigma_0^2$, γ 为矢量 \mathbf{e}_1 和 \mathbf{e}_2 的夹角。通过上式, 可以详细讨论偏振模色散和偏振相关损耗对脉冲展宽的影响, 作为一特殊情况, 令 $\gamma = 0$, 即 $\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2 = 1$ 。这样, 输入偏振模色散矢量和偏振相关损耗矢量可以简化为: $\boldsymbol{\Omega} = (b_0 + ia_0)\mathbf{e}$, $t_0 = \cosh(\alpha_0\omega)$, $t = \sinh(\alpha_0\omega)\mathbf{e}$, 并且输出信号均方根脉宽为

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \frac{1}{4}b_0^2 - \frac{b_0^2}{4W^2}[(\cosh x)\mathbf{e} \cdot \mathbf{j} + \sinh x]^2, \quad (14)$$

从上式可以看出, 当输入信号偏振态 \mathbf{j} 与偏振主态 \mathbf{e} 夹角 θ (庞加莱球表示) 满足条件 $\cos\theta = \tanh x$ 时, 输出脉冲展宽最大。在无偏振相关损耗时, $\theta = \pi/2$, 即输入偏振态 \mathbf{j} 与偏振主态 \mathbf{e} 垂直, 与以往结论相符^[7]。

作为所得结果的一个应用, 我们分析一个三段级联线路^[11]: 一偏振相关损耗单元位于两段偏振模色散单元之间, 其结构如图 1 所示。各单元主轴方向单位矢量为 \mathbf{e}_k ($k = 1, 2, 3$), 这里假设 $\mathbf{e}_3 \parallel \mathbf{e}_1$ 且 $\mathbf{e}_2 \perp \mathbf{e}_1$ 。通过偏振模色散和偏振相关损耗动态方程, 可得到该模型的偏振模色散和偏振相关损耗矢量分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Omega} = (\beta_3 \cosh \alpha + \beta_1)\mathbf{e}_1 - \\ \quad i\beta_3 \sinh \alpha \cos(\beta_2\omega)\mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_1 + \\ \quad i\beta_3 \sinh \alpha \sin(\beta_1\omega)\mathbf{e}_2, \\ t = \sinh \alpha [\cos(\beta_1\omega)\mathbf{e}_2 - \sin(\beta_1\omega)\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2], \\ t_0 = \cosh \alpha, \end{cases} \quad (15)$$

其中 β_1, β_3 分别为两双折射单元的微分群时延, α 表示第二单元的偏振相关损耗。将其代入(7)式, 则可计算出输出信号均方根脉宽。

假设输入高斯脉冲初始均方根脉宽为 $\sigma_0 = 10$ ps, 两双折射单元微分群时延分别为 $\beta_1 = -\beta_3 = 15$ ps, 以使整个线路微分群时延为零。则在不同输入偏振态方向: $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 和 $\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2$ 下, 脉冲展宽因子 B ($B = \sigma/\sigma_0$) 与偏振相关损耗的关系如图 1 所示。我们知道, 当第二段偏振相关损耗为零时, 由第一段双折射单元微分群时延所引起的脉冲分裂, 将在第三段得到完全补偿, 脉冲未发生任何展宽或畸变。但是当偏振相关损耗增加时, 图中结果表明, 输出信号均方根脉宽随之增加。起始, 脉冲展宽因子随偏振相关损耗增加相当快, 文献[11]已试图给出了该现象一个物理解释。但是当偏振相关损耗相当大(约大于 20 dB)时, 展宽因子增加逐渐变缓而趋于一常数, 这是因为在此种情况下, 偏振相关损耗单元可看作是一完全偏振器, 其输出脉冲仅包括最小衰减项, 而与之垂直

方向的最大衰减项可以忽略不计。

5 与他人结果比较

不考虑光纤偏振相关损耗偏振效应, Karlsson^[7]推导出脉冲展宽与光纤偏振模色散的解析关系, 进而, Eriksson 等^[8]考虑了这样一种线路模型: 在光纤偏振模色散基础上, 加一偏振相关损耗单元, 偏振相关损耗与偏振模色散分离, 且与频率无关, 并求出信号均方根脉宽的解析解。而我们考虑信号在光纤线路的实际传输情况: 偏振模色散与偏振相关损耗是同时存在且相互作用的, 给出了在光纤线路中偏振模色散和偏振相关损耗联合效应下信号均方根脉宽的解析表达式。该结论是对文献[7, 8]工作的延伸和总结, 具有一般性, 在忽略光纤非线性的条件下它适用于任意信号在光纤中传输的变化情况。

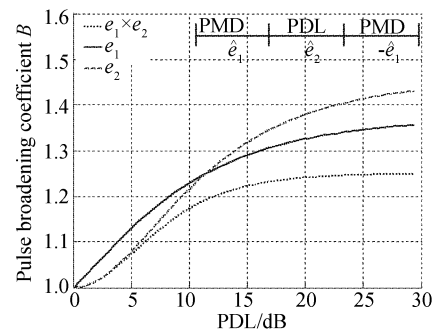


Fig. 1 Pulse broadening versus the PDL of second element with three input SOPs: $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ and $\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2$

下面分析一下本文和文献[7, 8]的结果的区别与内在联系。如果不考虑光纤偏振相关损耗效应, 即 $t_0 = 1, t = 0$, 有 $\mathbf{T}^+(\omega) \cdot \mathbf{T}(\omega) = \mathbf{I}$, 所以此时 $\boldsymbol{\Omega}$ 为实向量: $\text{Re}\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Omega}, \text{Im}\boldsymbol{\Omega} = 0$ 。将其代入(6)式可得偏振模色散致脉冲展宽效应

$$\begin{cases} \tau_1 = \langle \frac{1}{2}(\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{j}) - \phi' \rangle, \\ \tau_2 = \langle \left| \mathbf{j}\phi' - \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega} \right|^2 + \left(\frac{|\mathcal{F}'|}{|f|} \right)^2 \rangle, \end{cases} \quad (16)$$

同文献[7]中(7)式、(8)式一致(符号差异, 是因为所选偏振模色散矢量 $\boldsymbol{\Omega}$ 方向相反)。

考虑简单情况, 偏振相关损耗矢量和偏振模色散矢量均与频率无关, 同时令 $\phi' = 0$, 即忽略啁啾和色散, 则输出信号均方根脉宽

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \frac{|\boldsymbol{\Omega}|^2}{4} - \frac{\langle t_0 \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{j} + \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{t} \rangle^2}{4W^2}, \quad (17)$$

式中 σ_0 表示信号初始均方根脉宽。文献[8]中偏振模色散单元后加一段偏振相关损耗的光纤线路可用

上式描述,但两者的偏振模色散矢量与偏振相关损耗矢量的定义是不同的。文献[8]中定义的偏振模色散和偏振相关损耗矢量是局部的,未曾考虑光纤偏振模色散与偏振相关损耗的相互作用,其偏振模色散矢量相当于线路有效偏振模色散矢量,(17)式表示的是整个线路的偏振模色散和偏振相关损耗矢量。实际标准的光纤偏振测量方法是获得系统线路中的全部信息:全局偏振模色散和偏振相关损耗矢量,因此文献[8]的解析模型存在着较大的局限性。

结束语 本文讨论了光纤线路偏振模色散与偏振相关损耗的相互作用及对信号脉宽的影响。给出了线路偏振模色散矢量和偏振相关损耗矢量之间的关系式,并基于严格的数学方法,推导出了在光纤偏振模色散和偏振相关损耗共同作用下的信号均方根脉宽变化的数学表达形式。基于该式可分析至任意高阶偏振模色散和偏振相关损耗,且同时考虑了啁啾和光纤色散。

参 考 文 献

- 1 Liu Jianfei, Yu Jinlong, Wan Jian *et al.*. Study on effect of PMD-induced pulse broadening on sensitivity and frequency spectrum. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(2):188~192 (in Chinese)
- 2 Pei Li, Jian Shuisheng, Ning Tigang *et al.*. PMD measurement and compensation of optical fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):462~464 (in Chinese)
- 3 Zheng Yuan, Li Chaoyang, Liu Xiumin *et al.*. Impacts of polarization mode dispersion on the pulse width in linear systems. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(10):900~904 (in Chinese)
- 4 Poole C D, Tkach R W, Chraplyvy A R *et al.*. Fading in lightwave systems due to polarization-mode dispersion. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(1):68~70
- 5 Vassallo C. PMD pulse deformation. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(18):1597~1598
- 6 Buyere F. Impact of first and second order PMD in optical digital transmission systems. *Opt. Fiber Technol.*, 1996, **2**(3):269~280
- 7 Karlsson M. Polarization mode dispersion-induced pulse broadening in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(9):588~590
- 8 Eriksson K, Karlsson M, Sunnerud H. Pulse broadening in systems with PMD and a polarizer. *28th European Conference on Optical Communication*, Copenhagen, Denmark, 2002, 4: 9.3.6
- 9 Huttner B, Geiser C, Gisin N. Polarization-induced distortions in optical fiber networks with polarization-mode dispersion and polarization-dependent losses. *Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(2):317~329
- 10 Lu Ping, Chen Liang, Bao Xiaoyi. Polarization mode dispersion and polarization dependent loss for a pulse in single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(6):856~860
- 11 Hutter B, de Barros C, Gisin B *et al.*. Polarization-induced pulse spreading in birefringent optical fibers with zero differential group delay. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(6):370~372