

偏振模色散模拟器的特性*

曾 丽¹⁾ 姜采云²⁾ 章恩耀¹⁾

¹⁾ 清华大学精密仪器与机械学系, 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

²⁾ 清华大学电子工程系, 北京 100084)

(2004 年 4 月 16 日收到, 2004 年 8 月 9 日收到修改稿)

通过对微分群时延差(DGD)统计特性和偏振模色散(PMD)矢量自相关函数的数值模拟, 分析比较了目前常用的三种 PMD 模拟器的性能. 结果表明, 在 DGD 分布方面, 由 DGD 发生器构成的模拟器, 一个 DGD 发生器就可与实际光纤 PMD 的统计特性相符合, 而由保偏光纤和可旋转的连接器构成的模拟器则至少需要 15 段. 在自相关函数方面, 基于保偏光纤的模拟器取决于各段光纤的延时量, 而基于 DGD 发生器的模拟器在中心频带外的自相关值很平稳, 可视为常数.

关键词: 光纤通信; 偏振模色散; 偏振模色散模拟器; 自相关函数

PACC: 4281, 4281F, 4281D, 4280W

1. 引 言

随着光通信系统传输速率的不断提高, 偏振模色散(PMD)问题已成为高速、长距离光通信的主要障碍之一^[1]. PMD 的产生主要是由于光纤中传输的两个相互垂直的偏振模, 在光纤随机双折射的影响下, 具有了不同的传播常数, 从而导致脉冲的分裂和展宽. 要正确估计 PMD 对于光纤通信系统的影响, 以及评价各种 PMD 补偿器的效果, 最直接的方法是对光纤系统进行研究, 但一般光纤 PMD 变化速度慢, 需要的时间长(几个月甚至一年), 各类光纤有差异, 一般用 PMD 模拟器(PMDE)代替光纤. 模拟器可以在较短的时间内产生较大的 PMD 变化, 且可以方便地模拟实际光纤中可能出现的各种状态, 具有可控性和普遍性, 因而有利于考察补偿系统的反馈速度和补偿能力.

PMD 模拟器的基本组成方式是将若干段双折射元件级联在一起, 不同方案的区别只在于双折射元件种类和相邻段连接的方式. 最简单的模拟器是将多段保偏光纤(PMF)以固定角度熔接在一起而构成, 由于它必须通过改变光波波长以得到正确的微分群时延差(DGD)统计值, 不仅使控制极不灵活, 也

难以运用到波分复用(WDM)系统的研究中^[2], 故目前常用的 PMD 模拟器主要有以下三种: 1) 多段 PMF 以可旋转的连接器(RC)级联起来^[3](见图 1(a)), 其中 RC 的作用是使相邻两段偏振主轴之间的夹角在 $0-2\pi$ 范围内随机变化; 2) 多段 PMF 间用偏振态随机分布的偏振控制器(PC)连接^[3](见图 1(b)); 3) 多个 DGD 发生器^[4]之间用 PC 连接^[5](见图 1(c)), 其中每个 DGD 发生器内含 6 段高双折射晶体和 6 个开关型磁光晶体, 可编程输出符合一定统计分布的 DGD 序列值. PC 的作用同前.

能够模拟实际光纤 PMD 的 PMD 模拟器必须满足两个基本要求^[7]: 1) 对每一波长, 模拟器输出的 DGD 都必须符合 Maxwell 分布; 2) PMD 矢量的自相关函数(ACF)应在有限频带外以二次曲线趋势趋近于零. 这是因为在 WDM 系统中, 各信道的 PMD 统计特性相互独立, 即它们的 PMD 矢量是不相关的. 本文推导了上述三种 PMD 模拟器中 DGD 和 ACF 的表达式, 通过数值模拟, 比较了它们对这两个要求的满足情况, 并指出了各方案的优势和局限性.

2. 理论分析

在三维 Stokes 域中, 用 PMD 矢量 $\Omega(\omega)$ 来分析 PMD 的特性, 定义式为

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2003AA10316X)资助的课题.

† E-mail: zlj98@mails.tsinghua.edu.cn

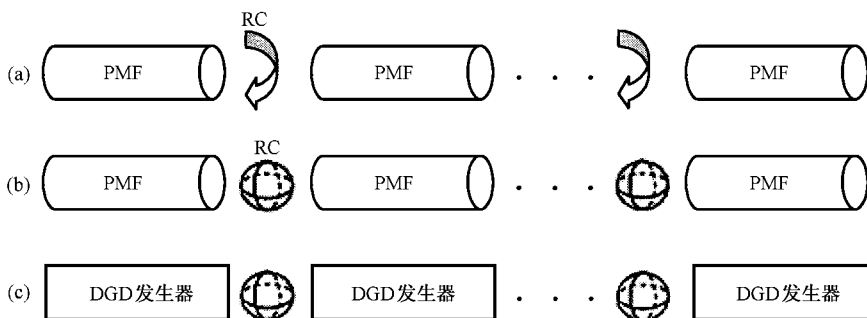


图 1 三种 PMDE 的示意图

$$\frac{dS(\omega)}{d\omega} = \Omega(\omega) \times S(\omega), \quad (1)$$

其中 ω 为光波频率, $S(\omega)$ 为在邦加球上代表输出光偏振态的 Stokes 矢量. PMD 矢量还可表示为

$$\Omega(\omega) = \Delta\tau(\omega) \cdot q(\omega), \quad (2)$$

其中 $q(\omega)$ 为两偏振主态(PSP)中快轴方向的单位矢量, $\Delta\tau(\omega)$ 即快慢轴之间的 DGD. 而一个系统中总的 DGD 与总的 PMD 矢量 $\Omega(\omega)$ 的关系为

$$\Delta T = \langle |\Omega(\omega)| \rangle, \quad (3)$$

$\langle \rangle$ 为取统计平均值.

不同的模拟器因其结构不同,使 PMD 矢量具有不同的表达式,同时也决定了 PMD 矢量 ACF 呈现出不同的规律,以下就这两方面对图 1 所示三种模拟器(分别称作模拟器 1、模拟器 2 和模拟器 3)的情况进行推导.

2.1. PMD 矢量的递推公式

设模拟器中 PMF 或 DGD 发生器的段数为 N , 其中 $n-1$ 段总的 PMD 矢量为 $\Omega_{n-1}(\omega)$, 第 n 段的本地 PMD 矢量为 $\Delta\Omega_n(\omega)$, 对应的 Müller 矩阵为

$R_n(\omega)$ 则 n 段之后的 PMD 矢量为^[6]

$$\Omega_n(\omega) = \Delta\Omega_n(\omega) + R_n(\omega)\Omega_{n-1}(\omega), \quad (4)$$

$n = 2, 3, \dots, N,$

初始条件为

$$\Omega_1(\omega) = \Delta\Omega_1(\omega). \quad (5)$$

(3) 和 (4) 式组成了 PMD 矢量递推公式的一般表达式. 若每段双折射元件的偏振快轴方向都与 $+x$ 方向(用单位矢量 \hat{x} 表示)一致, 各段的 DGD 分别为 $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_N$, 则第 n 段的本地 PMD 矢量为

$$\Delta\Omega_n(\omega) = \Delta\tau_n \hat{x} = [\Delta\tau_n, 0, 0], \quad (6)$$

代表第 n 段的相位延迟作用的 Müller 矩阵^[7]为

$$R_n(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_n(\omega) & -\sin\phi_n(\omega) \\ 0 & \sin\phi_n(\omega) & \cos\phi_n(\omega) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $\phi_n(\omega) = \Delta\tau_n \omega$ 为第 n 段引起的相位延迟量. 以上是对三种模拟器共有情况的分析, 所不同的只是在图 1(a) 和 (b) 的由 PMF 构成的模拟器中, 每段的 DGD 固定不变, 而在图 1(c) 由 DGD 发生器构成的模拟器中, 每段的 DGD 是满足特定统计分布的序

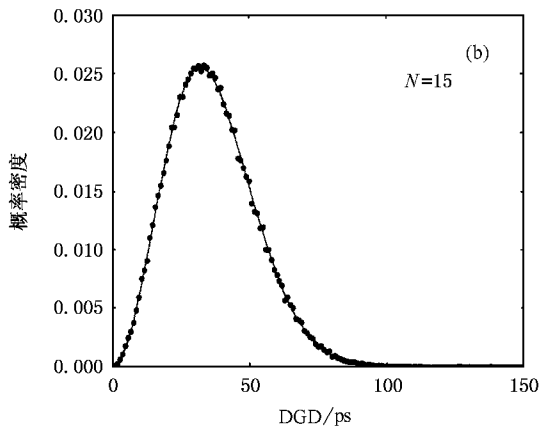
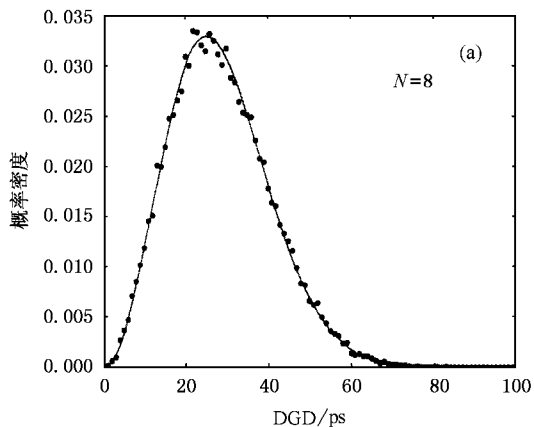


图 2 模拟器 1 中 DGD 统计分布曲线 实线为理论 Maxwell 概率密度曲线, 虚线为模拟结果

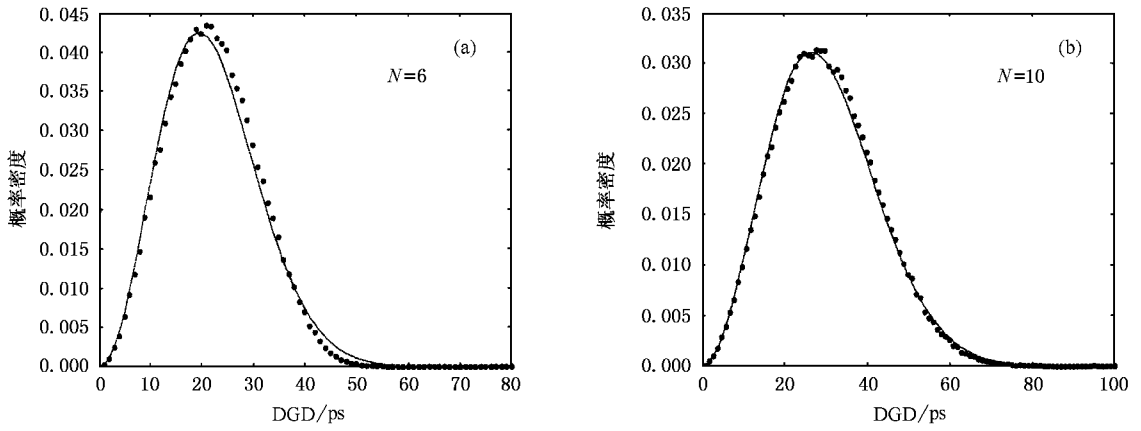


图 3 模拟器 2 中 DGD 统计分布曲线

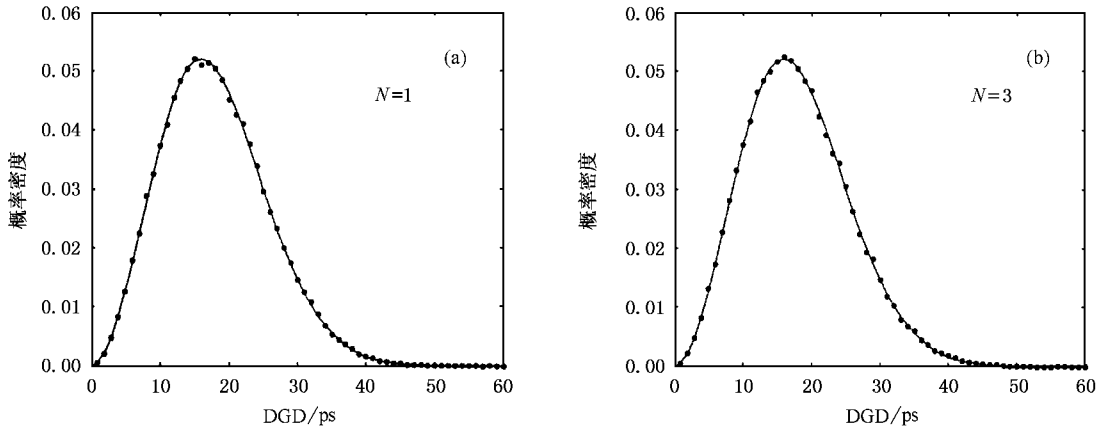


图 4 模拟器 3 中 DGD 统计分布曲线

列值.

对模拟器 1, N 段光纤间共含有 $N - 1$ 个 RC, 为方便表达, 设其旋转角分别为 $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N$, 各转角均为 0 到 2π 之间均匀分布的随机变量, 并记作 $\theta = (\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N)$, 则代表第 n 个连接器的随机旋转的 Müller 矩阵为

$$R_{2n}^{(a)}(\omega) = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_n & \sin 2\theta_n & 0 \\ -\sin 2\theta_n & \cos 2\theta_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在这种情况下 (4) 式中

$$R_n(\omega) = R_{1n}(\omega) R_{2n}^{(a)}(\omega).$$

对模拟器 2, 代表第 n 个 PC 的 Müller 矩阵为

$$R_{2n}^{(b)}(\omega) = \begin{bmatrix} \xi_n & -\sqrt{1 - \xi_n^2} & 0 \\ \sqrt{1 - \xi_n^2} \cos \varphi_n & \xi_n \cos \varphi_n & -\sin \varphi_n \\ \sqrt{1 - \xi_n^2} \sin \varphi_n & \xi_n \sin \varphi_n & \cos \varphi_n \end{bmatrix}. \quad (9)$$

其中 ξ_n 和 φ_n 分别在 $[-1, 1]$ 和 $[0, 2\pi]$ 中均匀随机分布, 并记 $\xi = (\xi_2, \xi_3, \dots, \xi_N), \varphi = (\varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N)$. 在这种情况下 (4) 式中

$$R_n(\omega) = R_{1n}(\omega) R_{2n}^{(b)}(\omega).$$

模拟器 3 中相邻 DGD 发生器间也是以 PC 连接, 故情况同模拟器 2.

2.2. PMD 矢量的 ACF

PMD 矢量的 ACF 表示为^[8]

$$f(\omega, \omega_0) = \langle \Omega(\omega) \cdot \Omega(\omega_0) \rangle, \quad (10)$$

ω_0 为光波的中心频率. 由于 PMD 的统计特性, 系统中的 PMD 矢量是随时间和频率不断变化的, 因而研究其平均值才具有实际意义.

将 PMD 矢量的递推公式 (4) 代入 (10) 式, 并对 RC 和 PC 的参数取平均值, 再对 (10) 式化简, 可得到 ACF 的具体表达式.

对模拟器 1, 有如下递推关系^[9]:

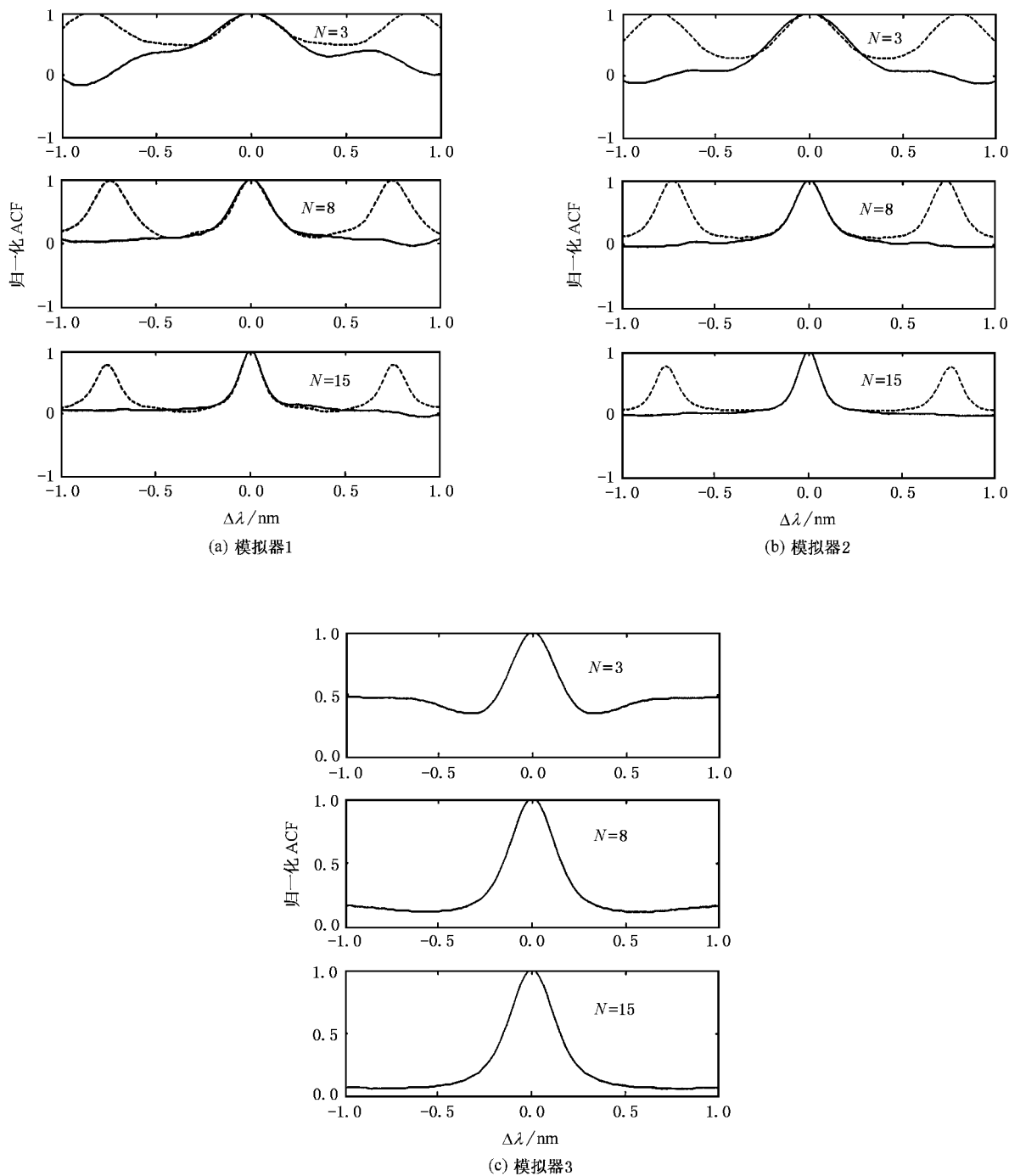


图 5 三种模拟器 PMD 矢量的归一化 ACF

$$\left\{ \begin{aligned}
 f_n(\omega, \omega_0) &= \langle \mathbf{\Omega}_n(\omega) \cdot \mathbf{\Omega}_n(\omega_0) \rangle \\
 &= \Delta\tau_n^2 + \alpha_n f_{n-1}(\omega, \omega_0) \\
 &\quad + \beta_n g_{n-1}(\omega, \omega_0), \\
 g_n(\omega, \omega_0) &= \langle \mathbf{\Omega}_n^z(\omega) \cdot \mathbf{\Omega}_n^z(\omega_0) \rangle_\theta \quad (11) \\
 &= \gamma_n f_{n-1}(\omega, \omega_0) \\
 &\quad + \epsilon_n g_{n-1}(\omega, \omega_0), \\
 f_1(\omega, \omega_0) &= \Delta\tau_1^2, \quad g_1(\omega, \omega_0) = 0,
 \end{aligned} \right.$$

其中 $f_n(\omega, \omega_0)$ 为 n 段 PMF 总的 PMD 矢量的 ACF, $\mathbf{\Omega}_n^z(\omega)$ 为 $\mathbf{\Omega}_n(\omega)$ 的 Z 分量, $g_n(\omega, \omega_0)$ 为 PMD 矢量 Z 分量的 ACF, $\langle \cdot \rangle_\theta$ 为对组成 θ 的随机变量序列取平均. 系数

$$\alpha_n = \frac{1 + \cos(\Delta\tau_n \Delta\omega)}{2}, \quad \beta_n = \frac{\cos(\Delta\tau_n \Delta\omega) - 1}{2},$$

$$\gamma_n = \frac{\cos(\Delta\tau_n \Delta\omega) - \cos(\Delta\tau_n \overline{\Delta\omega})}{4},$$

$$\epsilon_n = \frac{\cos(\Delta\tau_n \Delta\omega) + 3\cos\Delta\tau_n \overline{\Delta\omega}}{4},$$

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0, \quad \overline{\Delta\omega} = \omega + \omega_0.$$

对模拟器 2 其 ACF 的递推公式为

$$\begin{cases} f_n(\omega, \omega_0) = \langle \Omega_n(\omega) \cdot \Omega_n(\omega_0) \rangle_{\xi, \varphi} \\ \quad = \Delta\tau_n^2 + A_n f_{n-1}(\omega, \omega_0), \\ f_1(\omega, \omega_0) = \Delta\tau_1^2, \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\langle \rangle_{\xi, \varphi}$ 指对组成 ξ 和 φ 的随机变量序列取平均值,

$$A_n = \frac{1 + 2\cos(\Delta\tau_n \Delta\omega)}{3}.$$

模拟器 3 与其他不同处是每个 DGD 发生器中产生的 DGD 值是随机变量,故最终得到的 ACF $F_N(\omega, \omega_0)$ 应该是 (12) 式中计算出来的 $f_N(\omega, \omega_0)$ 对随机变量序列 $\Delta\tau = (\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_N)$ 取统计平均的结果,表示为

$$F_N(\omega, \omega_0) = \langle f_N(\omega, \omega_0) \rangle_{\Delta\tau}. \quad (13)$$

由 (11) (12) 和 (13) 式可求出三种模拟器中 PMD 矢量 ACF 随 $\Delta\lambda$ 的变化曲线.

3. 模拟结果与讨论

利用 Monte-Carlo 方法对三种模拟器中的 DGD 统计分布和 PMD 矢量 ACF 进行计算,波长为 1550nm,统计次数为 10^5 . 在本文的数值模拟中,模拟器 1 和 2 的各段光纤延时量取值方式为各段光纤的延时量均值 10ps,标准偏差 σ 取为均值的 20%. 对于模拟器 3,总的 DGD 为 18ps,每个 DGD 发生器输出的 DGD 满足均值为 $18/\sqrt{N}$ ps 的 Maxwell 分布,输出值范围为 1—63ps,步长为 1ps.

图 2 示出模拟器 1 中 DGD 统计分布曲线.从图 2 看出,当 $N = 8$ 时,DGD 统计分布就很接近理论分布, $N = 15$ 时二者基本一致.图 3 表明,对模拟器 2,仅需 10 段就可以与理论分布相符合.图 4 为模拟器 3 的情况.它仅需一段就可以满足 Maxwell 分布.但是用三个 DGD 发生器来组成的 PMD 模拟器,不仅 DGD 值符合光纤的统计分布,还可通过控制一阶 PMD 矢量的变化,得到纯二阶或多阶混合的 PMD^[10],或者输出值符合的统计规律进行重点

采样.

图 5(a)(b)(c)分别为三个模拟器的归一化 PMD 矢量 ACF 在 $\Delta\lambda = \pm 1\text{nm}$ 范围内的分布.图 5(a)(b)中的虚线为 $N = 3, 8, 15$ 时,各段光纤的延时量接近相等,而实线为各段光纤的延时量满足正态分布.由图 5(a)(b)可见,模拟器 1 和 2 在各段光纤的延时量接近相同时,归一化 ACF 曲线在中心频带外仍有很高的旁瓣,且所有频率相关特性均会呈现出周期性,无法满足引言中所述的要求 2);而当各段光纤延时量的分布为随机时,随着光纤段数的增加,旁瓣会消失,中心频带外的 ACF 变得趋近于零.对这一特征的解释是:各段光纤延时量的分布的随机性越强,模拟器便越接近实际光纤时 PMD 特性.而图 5(c)模拟器 3 的 ACF 则大为不同,它在中心频带外的 ACF 非常平稳,无旁瓣,可视作常数,且随着级联段数的增加而迅速降低.计算表明,中心频带外的 ACF 维持在 0.3 以下所需的最少级联段数为 5.

4. 结 论

推导了三种模拟器中 DGD 和 PMD 矢量 ACF 的表达式,利用 Monte-Carlo 方法对三种 PMD 模拟器特性进行了数值模拟.结果表明:在 DGD 分布方面,一个 DGD 发生器的统计特性可以与真实光纤相符,而由 PMF 和 RC 构成的模拟器则至少需要 15 段.在 ACF 方面,基于 PMF 的模拟器取决于各段光纤的延时量,若选择的时延组合不当,则无法满足 PMD 矢量的 ACF 在有限频带外的二次曲线趋近于零的条件,且各段光纤延时量的分布表现出的随机性越强,模拟器的 ACF 趋近于零的特性越好.而基于 DGD 发生器的模拟器在中心频带外的 ACF 非常平稳,仅用 5 段,归一化 ACF 值便可降低至 0.3 以下.因此,基于 DGD 发生器的 PMD 模拟器虽然造价比 PMF 高,但它用最少的段数便可同时满足 DGD 分布和 ACF 两方面的要求,更重要的是它具有可编程性,能满足多种研究意图的需要,因而是目前最理想的 PMD 模拟器方案.对于各种模拟器,RC 的效果比 PC 略差,但却能极大地降低成本和控制的复杂性,所以在 PMF 构成的模拟器中,采用 RC 作为连接装置,比采用 PC 更具实用价值.

- [1] Poole C D and Nagel J 1997 *Optical Fiber Telecommunications* (San Diego , CA : Academic) p114
- [2] Lima I T Jr *et al* 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 1872
- [3] Djupsjöbacka A 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 285
- [4] Yao H J *et al* 2004 *Acta Photon. Sin.* **33** 326 (in Chinese [姚和军等 2004 光子学报 **33** 326])
- [5] Lee J H , Kim M S and Chung Y C 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 54
- [6] Gordon J P and Kogelnik H 2000 *Proceedings of the National Academy of Sciences* **97** 4541
- [7] Leminger O and Leppla R 2001 *Optical Fiber Communication Conference* (Washington , DC :Optical Society of America) **3** 344
- [8] Karlsson M and Brentel J 1999 *Opt. Lett.* **24** 939
- [9] Brian S M , Lima I T Jr and Curtis R M 2002 *Opt. Lett.* **27** 1150
- [10] Möller L *et al* 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 230

Theoretical study of polarization mode dispersion emulators^{*}

Zeng Li^{1)†} Lou Cai-Yun²⁾ Zhang En-Yao¹⁾

¹⁾*Department of Precision Instruments & Mechanology , State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)*

²⁾*Department of Electronic Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)*

(Received 16 April 2004 ; revised manuscript received 9 August 2004)

Abstract

The performances of the three polarization mode dispersion (PMD) emulators commonly used today are analyzed and compared among them through numerical simulation of their differential group delay (DGD) statistical characteristics and PMD vector autocorrelation function . The results demonstrate that to produce DGD that can match theoretical distribution , one DGD generator is adequate , while at least 15 sections are necessary in the emulator built by polarization maintaining fibers and rotatable connectors . And the autocorrelation function of the emulator based on polarization maintaining fibers depends on DGD of every section , while that of the emulator based on DGD generators is smooth and can be regarded as constant outside the central frequency range .

Keywords optical fiber communication , polarization mode dispersion , polarization mode dispersion emulator , autocorrelation function

PACC : 4281 , 4281F , 4281D , 4280W

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No.2003AA10316X).

[†]E-mail : z198@mails.tsinghua.edu.cn