第 52 卷 第 11 期 2003 年 11 月
1000-3290/2003/52(11)/2818-07

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.52,No.11,November,2003

光纤偏振模色散对信号偏振度的影响*

王目光† 李唐军 简水生

(北方交通大学光波技术研究所,北京 100044)

(2002 年 10 月 23 日收到;2003 年 1 月 10 日收到修改稿)

采用一种简化的线路传输模型,详细讨论了在高速光纤通信系统中,线路偏振模色散(PMD),尤其是二阶 PMD、输入信号偏振态等对信号偏振度(DOP)的影响,并指出以信号 DOP 做反馈控制信号适合于一阶 PMD 优化补偿系统,但在较大二阶 PMD 的影响下,将增加控制算法的复杂性,使系统可能陷入局部最优解.

关键词:信号偏振度,偏振模色散,信号偏振态

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

1. 引　　言

在高速、长距离光纤通信系统中,尤其当传输速率大于 10Gb/s 时,光纤偏振模色散(PMD)作为限制系统发展的一个重要因素,越来越受到人们的关注[1,2].PMD 主要是由于光纤在成纤时的非圆性及内部应变和成缆时外部应力造成的.在理想圆的单模光纤中,只传输一个模式,即基模 LP_{01} 模.然而由于实际光纤的非对称性,简并模 LP_{01} 裂化为两个正交的偏振模 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y,它们分别以不同的速率传输,从而导致脉冲展宽和分裂,降低系统质量.

光纤放大器、色散补偿光纤和光纤光栅等技术的出现,成功地解决了损耗和色散问题,然而 PMD 由于其随波长、温度和应变等周围环境的变化所表现出来的复杂的动态统计特性,使其补偿技术较普通色散补偿显著困难.由于光纤 PMD 具有随机变化的特点,所以一个具有自适应反馈控制的动态 PMD 补偿系统是必须的.这就需要选择一个合适的反馈信号,该信号不仅能实时地反映光纤线路中 PMD 的变化,而且要有效地表征系统的传输质量.目前 PMD 补偿系统中常用的反馈信号为[3]:a)电 Q 值或眼图开启度;b)固定偏振方向的输出功率;c)基带射频(RF)信号谱;d)信号偏振度(DOP).第一种由于检测设备昂贵,一般很少使用;第二种不具有良好的系统误码率相关特性,应用也较少;RF 信号在较高的传输速率下其检测响应和 PMD 检测范围都将受到电子瓶颈的限制,尽管增加带通滤波器可以克服 PMD 检测范围受限的缺点,但是电路和控制算法变得异常复杂,缩小了其实用范围.而信号 DOP 作为反馈控制信号具有以上方式所无法比拟的优势:可对线路 PMD 变化实时做出响应,具有良好的误码率相关性,并且不受系统传输速率的限制,从而将具有广泛的应用前景[4,5].

因此,分析信号 DOP 在线路中光纤 PMD 影响下的变化情况具有重要意义.文献[6]采用波片模型分析并实验验证了信号 DOP 与一阶 PMD 等之间的关系,但未涉及高阶 PMD.可目前在高速光纤通信系统中,二阶 PMD 对系统性能的影响亦越来越不容忽视:现今的 PMD 补偿系统基本上可有效地抑制一阶 PMD,而残留二阶 PMD 未得到补偿,反而级联一阶 PMD 补偿系统,有可能增大系统二阶 PMD[7];而且在较大的光纤色散下,二阶 PMD 会成为降低系统性能的主要因素[8],甚至在某些情况下超过一阶 PMD[9].所以二阶 PMD 对信号 DOP 的影响直接决定着自适应系统的补偿性能、反馈控制算法的优化和系统的最终功率代价,讨论二阶 PMD 与信号 DOP 的关系是必要的.本文从理论上详细讨论了一阶和二阶 PMD 对传输信号 DOP 的劣化影响,该理论分析模型简单直观,具有明确的物理意义,且可以推广到高阶 PMD.同时讨论了信号 DOP 与输入偏振态(SOP)之间的关系,得出了一些有意义的重要结论.

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2001AA120204)资助的课题.

† E-mail:wangmuguang@263.net

2．信号 DOP 与线路传输模型

信号 DOP 是指在某一段时间或频率范围内(一般是信号周期倍数或对应频谱)平均偏振光功率与平均信号总功率的比值,即

$$\mathrm{DOP}=\frac{<P_{\mathrm{polarized}}>}{<P_{\mathrm{polarized}}+P_{\mathrm{unpolarized}}>},\tag{1}$$

式中 $<\ >$ 表示时域或频域平均,$P_{\mathrm{polarized}}$ 和 $P_{\mathrm{unpolarized}}$ 分别表示偏振光和非偏振光功率值.如果采用 Stokes 矢量表示,信号 DOP 可写为[10]

$$\mathrm{DOP}=\frac{\sqrt{S_1^2+S_2^2+S_3^2}}{S_0^2},\tag{2}$$

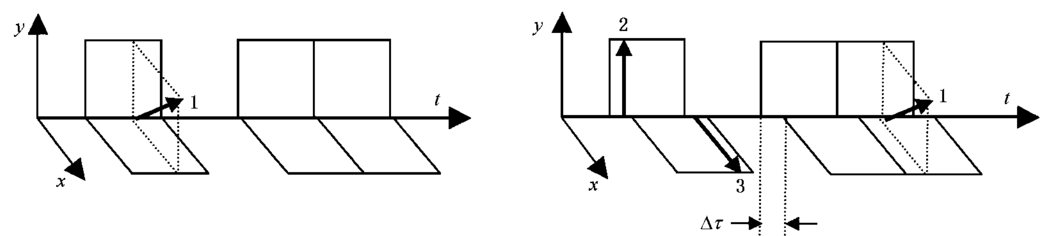
式中 Stokes 各分量与 Jones 矩阵矢量的关系和物理意义为

$$\begin{aligned}
S_0&=<|E_x|^2+|E_y|^2>=<P_{\mathrm{total}}>,\\
S_1&=<|E_x|^2-|E_y|^2>=< P_x >-< P_y >,\\
S_2&=<2\mathrm{Re}(E_xE_y^*)>\\
&=2<P_{45^\circ}>-(< P_x >+< P_y >),\\
S_3&=<2\mathrm{Im}(E_xE_y^*)>\\
&=2<P_{rc}>-(< P_x >+< P_y >).
\end{aligned}\tag{3}$$

这里需要指出的是 Jones 矩阵矢量相对于单一频率,表示完全偏振光,Stokes 矢量则相对于所有信号频率分量,具有功率量纲.根据以上定义,采用分束器、1/4 波片、线偏器和探测器可以很方便地实现快速 DOP 测量.

在非圆对称性光纤中传输的光信号,可以沿光纤的两个输入主偏振态(PSP)分解成两个互相垂直的偏振分量,由于其分别具有不同的传输速度和随机特性,将会导致偏振走离和偏振扰乱,从而使信号 DOP 减小.图 1 为理想矩形脉冲不归零(NRZ)码由一阶 PMD 导致的信号 DOP 劣化示意图.在发送端,信号保持唯一的 SOP 1 不变;而在接受端,由于群时延差(DGD)$\Delta\tau$ 的影响,信号在不同时刻具有不同的三个 SOP:1,2,3,其中 2 和 3 分别为两个互相正交的 PSP.信号 SOP 随时间的变化从而导致 DOP 劣化,具体解析关系式可以表示为[6]

$$\mathrm{DOP}=\begin{cases}\sqrt{1-4\gamma(1-\gamma)\Delta\tau/T(1-\Delta\tau/(4T))} & (\Delta\tau<T),\\ \sqrt{1-3\gamma(1-\gamma)} & (\Delta\tau\geqslant T),\end{cases}\tag{4}$$



(a)发送端(DGD = 0)　　(b)接受端(DGD = $\Delta\tau$)

图 1　一阶 PMD 对理想矩形脉冲信号 NRZ 码 DOP 的影响

式中 γ 表示两个 PSP 方向分光比,T 表示信号 NRZ 码比特周期.可以看出:在相同 DGD 值影响下,当分光比 $\gamma=0.5$ 时,信号 DOP 劣化最严重;当 $\Delta\tau\geqslant T$ 时,信号 DOP 只与分光比 γ 有关,最小值为 0.5.

然而,实际线路传输中 NRZ 码并不是理想的矩形脉冲序列,而是超高斯脉冲或者升余弦形状,具有一定的升降沿.这样在一阶 PMD 的影响下,在整个信号时间范围内,不同时刻会出现各种偏振态,并且二阶 PMD 导致 PSP 方向的变化,会进一步恶化信号 DOP,难以给出精确的解析表达式.下面借助传输矩阵理论分别讨论一阶和二阶 PMD 对信号 DOP 的影响.

忽略光纤非线性和偏振依赖损耗,光纤的传输矩阵可表示为

$$T(\omega)=\mathrm{e}^{-(aL+\mathrm{j}\beta L)}U(\omega),$$

式中 a,L,β 分别为光纤损耗系数、长度和传输常数,单位矩阵 $U(\omega)=R(\omega)^{-1}D(\omega)R(\omega)$[11],$R(\omega)$ 和 $D(\omega)$ 分别考虑了 PSP 的旋转和相对传输速率:

$$R(\omega)=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\varepsilon & \mathrm{j}\sin\varepsilon\\ \mathrm{j}\sin\varepsilon & \cos\varepsilon\end{bmatrix},$$

$$D(\omega) = \begin{bmatrix} e^{j(\Delta\tau\omega/2)} & 0 \\ 0 & e^{-j(\Delta\tau\omega/2)} \end{bmatrix},$$

式中 $\theta(\omega)$，$\varepsilon(\omega)$ 分别为信号频率 ω 分量的 PSP 方向的方位角和椭圆率角. 考虑到二阶 PMD，$\theta(\omega)$，$\varepsilon(\omega)$ 可近似为 $\theta = k_1\omega$，$\varepsilon = k_2\omega$ 这里认为在中心频率处两个 PSP 方向为 x 轴和 y 轴，k_1，k_2 表示 PSP 方位角和椭圆率角方向旋转因子. DGD 近似为 $\Delta\tau = \Delta\tau_0 + \Delta\tau_\omega\omega$，$\Delta\tau_\omega$ 表示对频率 ω 求导. 设输入信号为 $\hat{E}_{\text{in}}(t) = A(t)\hat{e}_{\text{in}} = A(t)(c_+\hat{\varepsilon}_{\text{in}+} + c_-\hat{\varepsilon}_{\text{in}-})$，$A(t)$ 为输入场复振幅，$\hat{\varepsilon}_{\text{in}}$，$\hat{\varepsilon}_{\text{in}\pm}$ 为输入 SOP，PSP，$c_\pm = \hat{\varepsilon}_{\text{in}} \cdot \hat{\varepsilon}_{\text{in}\pm}$，且 $|c_+|^2 + |c_-|^2 = 1$，则输出信号可以表示为

$$\begin{aligned}\hat{E}_{\text{out}}(\omega) &= T(\omega)A_{\text{in}}(\omega)(c_+\hat{\varepsilon}_{\text{in}+} + c_-\hat{\varepsilon}_{\text{in}-}) \\ &= A_{\text{out}}(\omega)(c_+\hat{\varepsilon}_{\text{out}+} + c_-\hat{\varepsilon}_{\text{out}-}),\end{aligned} \quad (5)$$

式中 $A_{\text{in}}(\omega)$ 为 $A_{\text{in}}(t)$ 的 Fourier 变换，$A_{\text{out}}(\omega) = e^{-(aL+j\beta L)}A_{\text{in}}(\omega)$，而 $\hat{\varepsilon}_{\text{out}\pm} = T(\omega)\hat{\varepsilon}_{\text{in}\pm}$ 为输出 PSP. 所以利用(5)式可以计算出输出光场，从而求出 DOP. 而根据偏振色散矢量(PDV)的定义，考虑二阶近似，有

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Omega}(\omega) &= \boldsymbol{\Omega}_{\text{fir}} + \boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}}\omega, \\ \boldsymbol{\Omega}_{\text{fir}} &= \Delta\tau_0\boldsymbol{s}, \\ \boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}} &= \Delta\tau_\omega\boldsymbol{s} + 2\sqrt{k_1^2 + k_2^2}\Delta\tau \cdot \boldsymbol{s}_\omega,\end{aligned}$$

式中 $\boldsymbol{s}$ 为 $\hat{\varepsilon}_{\text{out}+}$ 的 Stokes 表示，$\boldsymbol{s}_\omega = \frac{\partial\boldsymbol{s}}{\partial\omega}\Big/\left|\frac{\partial\boldsymbol{s}}{\partial\omega}\right|$ 为 PSP 旋转方向的单位矢量，这里有 $\boldsymbol{s}\cdot\boldsymbol{s}_\omega = 0$. $\boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}\parallel} = \Delta\tau_\omega\boldsymbol{s}$ 称为偏振依赖色散(PCD)，可以认为相当于普通的模内色散，将 $\boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}\perp} = 2\sqrt{k_1^2 + k_2^2}\Delta\tau \cdot \boldsymbol{s}_\omega$ 记为失偏，它是 PSP 方向的旋转引起的. 因此，通过上面的分析，可以分别讨论输出信号 DOP 与 $\boldsymbol{\Omega}_{\text{fir}}$，$\boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}\parallel}$，$\boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}\perp}$ 之间的关系.

利用方程(5)，可以讨论任意波形的输入信号在 PMD 影响下其 DOP 的变化情况. 下面采用通信中常用的以速率 10Gb/s 传输的 NRZ 码为输入信号，详细讨论信号 DOP 在系统传输中的劣化，考虑计算时间，选其为 2^6 位伪随机序列超高斯脉冲(高斯阶数为 2，信号消光比为 20dB).

3. PMD 影响下 DOP 与输入 SOP 的关系

理论统计结果表明[12]，在长距离随机双折射光纤中二阶 PMD 与一阶 PMD 具有一定的统计相关性，其关系可表示为 $\langle \boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}}^2 \rangle = \frac{1}{3} \cdot \langle \boldsymbol{\Omega}^2 \rangle^2$，且有 $\langle \boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}\perp}^2 \rangle = \frac{8}{27} \cdot \langle \boldsymbol{\Omega}^2 \rangle^2 = 8 \cdot \langle \boldsymbol{\Omega}_{\text{sec}\parallel}^2 \rangle$. 因此，为仿真实际光纤传输系统 DOP 的劣化情况，选择参数如下：$\Delta\tau_0 = 80\text{ps}$，$\Delta\tau_\omega = 400\text{ps}^2$，$2\sqrt{k_1^2 + k_2^2} = 40\text{ps}$. 图 2 为输出 SOP 随输入信号偏振态的变化情况. DOP 即对应点与球心之间的距离，仿真中采用在球面上均匀分布的 2500 个输入 SOP.

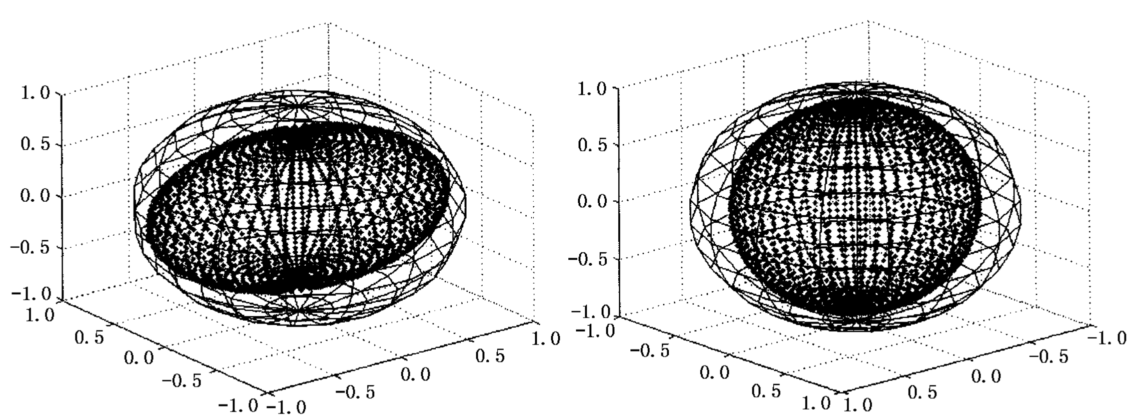


图 2 输出 SOP 在随机输入 SOP 下的分布情况 (a)为仅考虑一阶 PMD，$\Delta\tau_0 = 80\text{ps}$；(b)为考虑到二阶 PMD，$\Delta\tau_0 = 80\text{ps}$，$\Delta\tau_\omega = 400\text{ps}^2$，$2\sqrt{k_1^2 + k_2^2} = 40\text{ps}$

由仿真结果可以看出，输出 SOP 呈椭圆球状分布，椭球长轴和短轴分别对应最优 DOP 和最差 DOP. 在仅考虑一阶 PMD 时，椭球长轴为 1，说明以 PSP 输入时，信号未发生畸变，其 DOP 保持为 1；而

考虑二阶 PMD 后发现，椭圆球整体向球心收缩，平均信号 DOP 明显劣化，无论以何偏振态输入，信号 DOP 都不可能为 1，图 2 中椭球长轴即对应偏振度最大值为 $\mathrm{DOP}_{\max} = 0.8879$. 部分实验结果[5,13]验证了此结论.

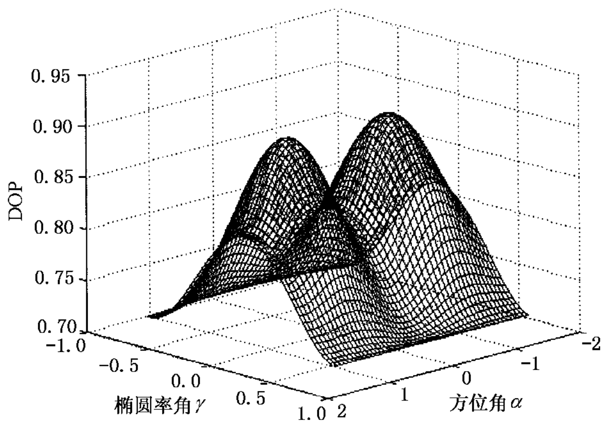


图 3　输出信号 DOP 在二阶 PMD 下与任意输入 SOP 的关系

利用图 2(b) 相同参数，图 3 示出输出信号 DOP 在二阶 PMD 影响下与任意输入 SOP 的关系. 结果表明：在综合考虑一阶和二阶 PMD 时，DOP 劣化最小的对应最佳输入 SOP，不再是 PSP 方向，而是稍有偏移，其偏移量与二阶 PMD 的大小和方向有关. 这说明在二阶 PMD 较大时，PSP 方向不再占优势，导致偏振主态模型失效，采用 PSP 输入法补偿 PMD 不再是最优补偿方案. 另外，考虑二阶 PMD 后，信号 DOP 出现多个极大值现象，这对以信号 DOP 为反馈信号的自适应 PMD 补偿系统优化是不利的：简单地采用尝试 — 成功 — 失败试探性控制算法将有可能使系统陷入局部最优解，降低补偿器性能.

4. 不同 SOP 输入下信号 DOP 与二阶 PMD 的关系

下面以输入 SOP 为 $\hat{\varepsilon}_{\mathrm{in}} = [1\quad 0]^{\mathrm{T}}$ 即 PSP 方向，定量讨论二阶 PMD 项 $\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{sec}\parallel}$，$\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{sec}\perp}$ 对信号 DOP 的影响. 由于 $\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{sec}\parallel}$，$\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{sec}\perp}$ 的不同物理意义，其对信号 DOP 的影响也不同，有必要对它们分开讨论.

随机双折射光纤二阶 PMD 中，虽然二阶 PMD$\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{sec}}$ 与一阶 $\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{fir}}$ 具有一定的统计相关特性，然而由于 PSP 旋转因子 k_1，k_2 的不确定性，在瞬时两者之间也是随机的[14]. 图 4(a) 和 (b) 分别为 k_1，k_2 在不同取值情况下信号 DOP 随 DGD($\Delta\tau_0$) 的变化情况，这里先不考虑 PCD，即 $\Delta\tau_\omega = 0\mathrm{ps}^2$.

由图 4 可以看出，随旋转因子 k_i 的增大，在相同的 DGD 值下，信号 DOP 随之变小，尤其在大 DGD 值时，劣化较明显，在 $\Delta\tau_0 = 100\mathrm{ps}$，$k_1 = 30\mathrm{ps}$，即使以 PSP 输入，输出信号 DOP 也劣化至 0.7197. 这是因为其对应二阶 PMD 项 $|\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{sec}\perp}| = 2\sqrt{k_1^2 + k_2^2}\Delta\tau$ 与 DGD 呈线性关系，增加较快的原因. 对比图 4(a) 和 (b) 可知，PSP 方向沿经向方位角 θ 和纬向椭圆率角 ε 旋转对信号 DOP 的影响一致. 大量的计算结果进一步表明：在以偏振主态输入时，信号 DOP 只与 PSP 旋转幅度 $2\sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ 有关，而与旋转方向 s_ω 无关. 然而该结论仅适合于 PSP 方向输入，在以任意其他 SOP 输入时，将发现，PSP 旋转幅度和方向同时影响输出信号 DOP 的大小，下面讨论输入 SOP 为 $\hat{\varepsilon}_{\mathrm{im}} = [\cos(\pi/4)\quad \sin(\pi/4)]^{\mathrm{T}}$ 的情况.

由上面分析知，仅考虑一阶 PMD 时，以该偏振

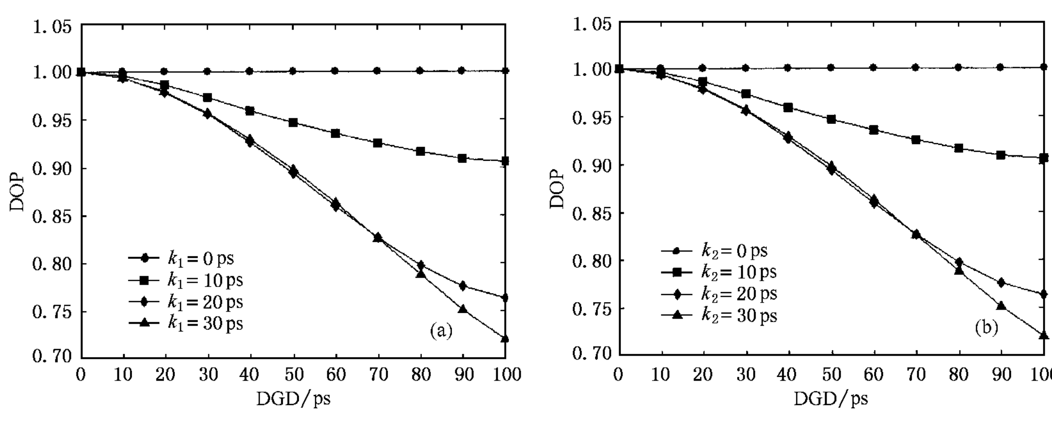


图 4　以 $\hat{\varepsilon}_{\mathrm{in}} = [1\quad 0]^{\mathrm{T}}$ 即 PSP 方向入射信号 DOP 在不同旋转因子下随 DGD 的变化情况　(a) 为 $\Delta\tau_\omega = 0\mathrm{ps}^2$，$k_2 = 0\mathrm{ps}$；(b) 为 $\Delta\tau_\omega = 0\mathrm{ps}^2$，$k_1 = 0\mathrm{ps}$

态输入,由于其在两相互垂直的 PSP 功率的均匀分布,信号 DOP 劣化最严重.图 5 示出在二阶 PMD 影响下信号 DOP 的变化情况.这里同样不考虑 PCD,即 $\Delta\tau_\omega = 0\mathrm{ps}^2$.

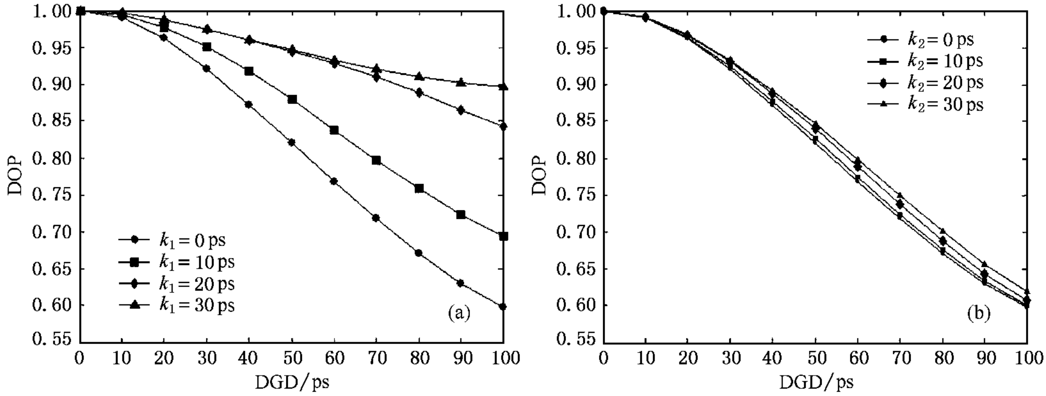


图 5 以 $\hat{\varepsilon}_{\mathrm{in}} = [\cos(\pi/4) \quad \sin(\pi/4)]^{\mathrm{T}}$ 方向入射信号 DOP 在不同旋转因子下随 DGD 的变化情况 (a)为 $\Delta\tau_\omega = 0\mathrm{ps}^2$, $k_2 = 0\mathrm{ps}$;(b)为 $\Delta\tau_\omega = 0\mathrm{ps}^2$, $k_1 = 0\mathrm{ps}$

令人惊奇的是,在此固定 SOP 输入和 DGD 值一定的条件下,随二阶 PMD 的增大,输出信号 DOP 未进一步劣化,相反呈现变好的趋势!高阶 PMD 反而有抑制信号 DOP 在一阶 PMD 作用下继续劣化的作用!这主要是由于 PSP 方向旋转造成的.图 6 为固定 DGD 下归一化 Stokes 分量 S_i ($i = 0,1,2,3$)随旋转因子 k_1 的变化情况.可以发现,随 PSP 方向旋转因子 k_1 的增大,分量 S_2 变大,而其余分量保持不变,进而使信号 DOP 增强.具体的 Stokes 分量 S_i ($i = 0,1,2,3$)变化情况应视输入 SOP 和 PSP 旋转方向而定.对比图 5(a)和(b)可以发现不同的 PSP 旋转方向对信号 DOP 的影响差别很大:PSP 以 k_1 旋转相对是在 PSP 与输入 SOP 所在平面内旋转,使信号各频率量在两个 PSP 方向的分量相对相位变化较大,从而使信号 DOP 变化较剧烈;而以 k_2 椭圆率角方向旋转,与 PSP 和输入 SOP 所在的平面相垂直,对信号 DOP 的影响相对弱得多,其变化关系如图 5(b)所示.

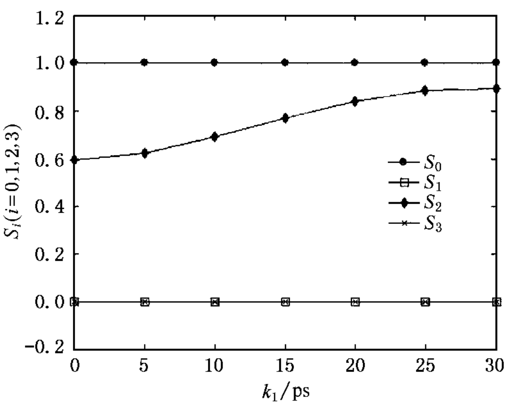


图 6 以 $\hat{\varepsilon}_{\mathrm{in}} = [\cos(\pi/4) \quad \sin(\pi/4)]^{\mathrm{T}}$ 方向入射信号各 Stokes 分量随旋转因子 k_1 的变化情况 $\Delta\tau_0 = 100\mathrm{ps}$, $\Delta\tau_\omega = 0\mathrm{ps}^2$, $k_2 = 0\mathrm{ps}$

这里以固定的输入 SOP 为 $\hat{\varepsilon}_{\mathrm{in}} = [1 \quad 0]^{\mathrm{T}}$ 即 PSP 方向,讨论信号 DOP 与 PCD$\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{sec}\parallel}$ 的变化关系.选定参数 $k_1 = 10\mathrm{ps}$, $k_2 = 0\mathrm{ps}$.图 7 为信号 DOP 在不同 PCD $\Delta\tau_\omega$(0,200,400,600ps^2)值随 DGD 的变化曲线.PCD 对信号 DOP 的影响相对小,而在 DGD 较小或较大时影响较大,即使在一阶 PMD 为零时信号 DOP 也有明显劣化,尤其是在 DGD 约大于 90ps 后信号 DOP 随 PCD 的增加反而有变好的趋势.这可以解释为:在 DGD 较小时,两个 PSP 方向的脉冲分量基本重合,PCD 使各脉冲分量相对展宽,在旋转因子 k_1

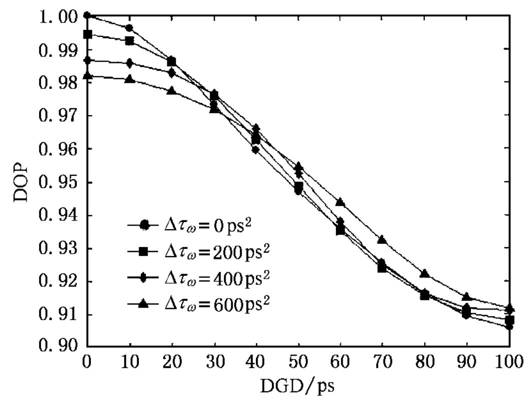


图 7 以 $\hat{\varepsilon}_{\mathrm{in}} = [1 \quad 0]^{\mathrm{T}}$ 即 PSP 方向输入信号 DOP 在不同 $\Delta\tau_\omega$ 值下随 DGD 的变化曲线 $k_1 = 10\mathrm{ps}$, $k_2 = 0\mathrm{ps}$

的作用下，信号偏振态混乱，DOP 从而劣化；而当 DGD 较大时，信号比特周期又为 100ps，本已经完全走离的两个 PSP 脉冲分量在 PCD 展宽作用下又重新在各频率量上具有了相关性，而使信号 DOP 增大.

5. 结　　论

信号 DOP 与信号码型、信号消光比、放大器自发辐射噪声、非线性、PMD 等有关[6]. 本文采用一种简化的线路传输模型，详细讨论了 PMD 尤其是二阶 PMD 对信号 DOP 的影响，指出在一阶 PMD 作用下，信号 DOP 可以较好地反映线路 PMD 的大小，从而利用 DOP 做反馈信号，可以有效地实现一阶 PMD 补偿；二阶 PMD 使平均信号 DOP 整体进一步劣化，但二阶 PMD 与 DOP 的关系相对较复杂，输出信号 DOP 不仅与二阶 PMD 的大小和方向有关，而且也与输入信号 SOP 相对方向有关，在部分固定 SOP 输入下，信号 DOP 甚至有随之变好的现象！从而使信号 DOP 随二阶 PMD 的变化可能出现多个极点. 这样，在系统二阶 PMD 较大时，信号 DOP 难以反映线路 PMD 的变化情况，以信号 DOP 做反馈信号进行系统 PMD 补偿优化时，有可能陷入局部最优解，给控制算法增加复杂性.

[1] Poole C D，Tkach R W，Chraplyvy A R and Fishman D A 1991 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **3** 68

[2] Bulow H 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 696

[3] Karlsson M 2002 *Optical Fiber Communication Conference* (Optical Society of America，Washington DC) WI1

[4] Francia C，Bruyere F，Thiery J P and Penninckx D 1999 *Electron. Lett.* **35** 414

[5] Rosenfeldt H，Knothe C and Ulrich R 2001 *Optical Fiber Communication Conference* (Optical Society of America，Washington DC)，Post Deadline Paper PD27

[6] Kikuchi N 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 480

[7] Fini J M and Haus H A 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 124

[8] Buyere F 1996 *Opt. Fiber Technol.* **2** 269

[9] Nelson L E，Jopson R M and Kogelnik H 2000 *Optical Fiber Communication Conference* (Optical Society of America，Washington DC) **3** 25

[10] Shintani R，Fan A Y，Kang C H 1994 *Polarized Light* (Beijing：Atomic Energy Press) p62 (in Chinese) [新谷隆一、范爱英、康昌鹤 1994 偏振光（北京：原子能出版社）第 62 页]

[11] Kogelnik H，Nelson L E，Gordon J P and Jopson R M 2000 *Opt. Lett.* **25** 19

[12] Foschini G J，Nelson L E，Jopson R M and Kogelnik H 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 1882

[13] Chou P C，Fini J M and Haus H A 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 568

[14] Nelson L E，Jopson R M，Kogelnik H and Foschini G J 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1614

Impact on the signal degree of polarization due to polarization mode dispersion in optical fibres *

Wang Mu-Guang† Li Tang-Jun Jian Shui-Sheng
(*Institute of Light-Wave Technology*, *Northern Jiaotong University*, *Beijing* 100044, *China*)
(Received 23 October 2002; revised manuscript received 10 January 2003)

Abstract

Using a compact optical link transmission model, the degradation of signal degree of polarization (DOP) induced by polarization mode dispersion (PMD), especially the second-order PMD, and the input signal state of polarization in high-speed optical fibre communication systems is studied in detail. It is pointed out that the signal DOP can be used as the feedback control signal in the optical adaptive first-order PMD optimal compensation systems compatibly. However, if the second-order PMD is considered, the control algorithm will be complicated, and there will be the possibility that the system is trapped in a local optimum which would downgrade compensator the performance.

Keywords: signal degree of polarization, polarization mode dispersion, signal state of polarization
PACC: 4281, 4281F, 4281D, 4280W

---

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2001AA120204).

† E-mail: wangmuguang@263.net