

引用格式: GUO Yao, ZHANG Xia, DU Qiuping, et al. Joint Compensation Scheme for Polarization Impairment Based on Density Matrix Formalism[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0806003

郭瑶,张霞,杜秋萍,等.基于密度矩阵理论的偏振损伤联合补偿方案[J].光子学报,2023,52(8):0806003

基于密度矩阵理论的偏振损伤联合补偿方案

郭瑶¹,张霞¹,杜秋萍²,杨震山¹,张晓光³

(1 聊城大学 物理科学与信息工程学院,聊城 252000)

(2 山东省光通信科学与技术重点实验室,聊城 252000)

(3 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室,北京 100876)

摘要:利用密度矩阵理论构建的损伤模型结构简单,无需任何辅助矩阵,因此分析复杂度较低,在对光通信系统中光信号的损伤进行分析与补偿时凸显出巨大优势。将该理论初步应用至模式数目为 2 的偏分复用系统中,建立偏振模色散与偏振态旋转并存时的损伤模型,搭建了 28 GBaud 偏分复用正交相移键控相干光通信仿真传输系统,实现了 30~170 ps 大范围差分群时延与 300 krad/s~2 Mrad/s 快速偏振态旋转的联合补偿,验证了基于密度矩阵理论的损伤模型以及联合补偿方案在光通信系统中的有效性。该研究为下一步推广至 N 维模分复用系统中光信号的损伤分析与补偿提供了有效的途径。

关键词:相干光通信;密度矩阵理论;偏振模色散;偏振态旋转;信号损伤补偿

中图分类号:TN913.7

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235208.0806003

0 引言

偏分复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)技术在有效提高目前商用的单模光纤通信系统传输容量的同时,也带来了一系列亟需解决的偏振损伤问题^[1-3],尤其是具有时变性和随机性的偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)与偏振态旋转(Rotation of State of Polarization, RSOP)。PMD 会引起光脉冲的展宽、变形^[4-6],导致信号发生串扰和失真,使系统的误码率(Bit Error Rate, BER)大大增加,RSOP 则会使光信号偏振状态产生高达几百 krad/s 的快速变化^[7-8],导致两路偏振信号在接收端无法被正确分离。另外,在实际光纤链路中,PMD 与 RSOP 损伤通常是并存的^[9-13],偏振损伤的联合效应将会对传输系统造成更为复杂的影响。因此,构建 PMD 和 RSOP 损伤模型,并完成偏振损伤的联合监测补偿对保证光纤通信系统的传输性能至关重要。

在研究方法方面,“单模”传输系统中通常采用 Stokes 理论来分析光纤中光场状态的演化^[14]。一般“单模”光纤实际上存在两个正交的偏振模式,光场模式数为 2(即模式空间的维数为 2)。对于这种二维的偏振模式空间,相应的 Stokes 矢量为 (2^2-1) 维实数矢量,能够直观地通过庞加莱球上的三维几何矢量来表示^[15],其物理意义比较明确,因此在 PMD 的研究中被广泛使用。但是在采用 Stokes 理论分析法时需要借助 3 个泡利辅助矩阵,其形式较为复杂,尤其是将 Stokes 理论推广到模式数目为 N 的模分复用(Mode Division Multiplexing, MDM)系统,即 N 维模式空间时,则需要借助 (N^2-1) 个 $N \times N$ 的盖尔曼辅助矩阵来建立 (N^2-1) 维 Stokes 矢量^[16-17]。随着模式数目 N 的增加,Stokes 矢量不仅形式愈加复杂,而且物理意义也变得模糊。因此在模式数目 $N > 2$ 的 MDM 系统中,使用 Stokes 理论分析模式色散(Modal Dispersion, MD)等损伤将变得非常困难。为了解决这个问题,前期本课题组借鉴量子力学中的方法,提出了一种可描述任意 N 维模式空间中光场传输性质的密度矩阵(Density Matrix, DM)理论^[18],该理论无需任何辅助矩阵,结构简单、形式简洁、物理意义明确,且光场中的所有相关信息都能够方便地提取,因此在分析任意 N 维光通信系

基金项目:山东省自然科学基金(Nos. ZR2022MF284, ZR2018MA044),国家自然科学基金(No. 61501214)

第一作者:郭瑶,1574535015@qq.com

通讯作者:张霞,wenezhang2002@163.com;杨震山,yangzhenshan@lcu.edu.cn

收稿日期:2022-12-19;录用日期:2023-03-15

<http://www.photon.ac.cn>

统中的光信号损伤时具有极大优势。

本文将DM理论应用至二维模式空间中,提出了一种基于DM理论的偏振损伤联合补偿方案。通过Stokes理论与DM理论的分析与对比,构建了基于DM理论的PMD与RSOP的损伤模型,并搭建了28 GBaud偏分复用正交相移键控(Polarization Division Multiplexing Quadrature Phase-Shift Keying, PDM-QPSK)相干光通信仿真传输系统,实现了PMD与RSOP的联合监测补偿,从而验证了PDM系统中基于DM理论的偏振损伤的分析、联合监测补偿方案的有效性。

1 原理

在给出基于DM理论的偏振损伤联合补偿方案的核心原理之前,首先简要介绍Stokes形式的PMD与RSOP的分析补偿方法。PMD由Stokes空间中的三维PMD矢量 $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)^T$ 来描述,该矢量的模值 $\Delta\tau$ 表示两个模式间差分群时延(Differential Group Delay, DGD),单位矢量 \boldsymbol{p} 代表慢主态的Stokes矢量^[14]。在频率 ω 处,PMD所对应的传输矩阵 U_{S-PMD} 与矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 之间的关系需借助 2^2-1 个泡利辅助矩阵来表示,即

$$U_{S-PMD} = \exp\left(-i\frac{\delta\omega}{2}\boldsymbol{\tau}\cdot\boldsymbol{\sigma}\right) \quad (1)$$

式中, $\delta\omega = \omega - \omega_0$, ω_0 为中心频率, $\boldsymbol{\sigma} = (\boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2, \boldsymbol{\sigma}_3)^T$,其分量 $\boldsymbol{\sigma}_j$ ($j=1, 2, 3$)为琼斯空间中的 2×2 泡利矩阵,它们在量子力学中用来描述电子自旋,此处用来建立斯托克斯矢量与琼斯矢量之间的联系,表示为

$$\boldsymbol{\sigma}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

文献^[11-12]中更常见的是式(1)的指数展开形式,即

$$U_{S-PMD} = \cos\left(\frac{\delta\omega\Delta\tau}{2}\right)I - i\frac{(\boldsymbol{\tau}\cdot\boldsymbol{\sigma})}{\Delta\tau}\sin\left(\frac{\delta\omega\Delta\tau}{2}\right) \quad (3)$$

式中, I 为 2×2 单位矩阵。RSOP通常采用三参量幺正矩阵描述^[13],即

$$R_{S-RSOP} = \begin{bmatrix} \exp(i\alpha)\cos\kappa & -\exp(i\beta)\sin\kappa \\ \exp(-i\beta)\sin\kappa & \exp(-i\alpha)\cos\kappa \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, κ 为方位角旋转角度, α, β 为相位旋转角。

为方便对PMD与RSOP进行分析处理,通常采用PMD+RSOP的模型^[11-12]

$$U_{S-PMD+RSOP} = U_{S-PMD}R_{S-RSOP} \quad (5)$$

通过追踪模型(3)、(4)中的独立参数 $(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \kappa, \alpha, \beta)^T$,并将其应用至模型(5)来实现PMD与RSOP损伤的监测补偿。但是在此过程中需要如式(2)所示的 2^2-1 个泡利辅助矩阵,增加了分析复杂度。若要将该模型推广至 $N>2$ 维的模式空间中,则需要 N^2-1 个盖尔曼辅助矩阵^[16-17],其分析与补偿过程将更为复杂。

而在利用DM理论对PMD与RSOP进行分析补偿时,PMD直接由群时延矩阵 $\boldsymbol{\Omega}$ 表示,即

$$\boldsymbol{\Omega}(z, z'; \omega) = iU_\omega(z, z'; \omega)U^\dagger(z, z'; \omega), \quad U_\omega(z, z'; \omega) \equiv \frac{\partial U(z, z'; \omega)}{\partial \omega} \quad (6)$$

式中, z' 为初始位置, z 为输出位置,“ \dagger ”表示厄米共轭, U 为从 z' 到 z 的传输矩阵, U_ω 为传输矩阵对频率的一阶导数,即传输矩阵 U 随频率 ω 的变化率。不考虑光纤中的损耗时, U 为行列式为1的幺正矩阵,

$$UU^\dagger = U^\dagger U = I, \quad \det(U) = 1 \quad (7)$$

在频率 ω_0 附近将传输矩阵 U 进行泰勒级数展开,并保留至一阶项(即忽略高阶色散)

$$U(\omega_0 + \delta\omega) = U(\omega_0) + U_\omega(\omega_0)\delta\omega \quad (8)$$

再利用式(6)以及矩阵 U 的幺正性质,可进一步得到

$$U(\omega_0 + \delta\omega) = (I + U_\omega(\omega_0)U^\dagger(\omega_0)\delta\omega)U(\omega_0) = (I - i\boldsymbol{\Omega}(\omega_0)\delta\omega)U(\omega_0) = \exp(-i\boldsymbol{\Omega}(\omega_0)\delta\omega)U(\omega_0) \quad (9)$$

其中最后一步用到了 $\delta\omega$ 的一阶近似。式(9)表明,在忽略高阶色散的情况下, ω_0 附近所有频率处的传输矩阵 U 均可用 ω_0 处的 $\boldsymbol{\Omega}$ 和 U 两个矩阵表示: $\exp(-i\boldsymbol{\Omega}(\omega_0)\delta\omega)$ 表征PMD, $U(\omega_0)$ 表征RSOP。考虑时变RSOP的情况时,将 $U(\omega_0)$ 用行列式为1的含时幺正矩阵 $U_{RSOP}(t)$ 代替,从而有

$$U = \exp(-i\boldsymbol{\Omega}(\omega_0)\delta\omega)U_{\text{RSOP}}(t) \quad (10)$$

而 $U_{\text{RSOP}}(t)$ 可进一步写为

$$U_{\text{RSOP}} = \exp(-iR) \quad (11)$$

式(10)中的矩阵 $\boldsymbol{\Omega}$ 和式(11)中的 R 均是零迹厄米矩阵,其一般形式为

$$\boldsymbol{\Omega}(\omega_0) = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{12} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $\Omega_{22} = -\Omega_{11}$ 及 $r_{22} = -r_{11}$ 为实数,而 $\Omega_{21} = \Omega_{12}^*$, $r_{21} = r_{12}^*$, 上标“*”表示复数共轭。显然, $\boldsymbol{\Omega}(\omega_0)$ 与 R 中的独立参数为 Ω_{11} , r_{11} 和 Ω_{12} , r_{12} 的实部与虚部。为了方便讨论,将独立参数记为 $(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, r_1, r_2, r_3)^T$, 其中 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ 分别等于 Ω_{11}, Ω_{12} 的实部和 Ω_{12} 的虚部,且另外三个独立参数与矩阵 R 中元素的关系类似。通过追踪这些独立参数,并将其应用至模型(10)和(11),便可实现 PMD 与 RSOP 损伤的追踪补偿。对独立参数的追踪采用扩展卡尔曼滤波器算法,其迭代更新过程包含时间更新和测量更新两个步骤。在第 k 时刻的时间更新过程中,首先对由独立参数组成的状态向量 $x = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, r_1, r_2, r_3)^T$ 进行预测,然后借助 PMD+RSOP 损伤模型对偏振损伤进行联合补偿,接下来基于测量的更新过程对预测值进行校正,以提高独立参数的预测精度,且将当前时刻状态向量的值作为下一时刻的输入,依次对 $k+1, k+2, \dots$ 时刻的状态向量进行递归计算与迭代更新,直至完成所有时刻 QPSK 信号的偏振损伤补偿。

基于 DM 理论的损伤补偿方案结构简洁、无需任何辅助矩阵,且能够以完全相同的形式应用至任意 N 维模式空间中,因此具有高度的灵活性和统一性。在实际应用中对光信号的性能损伤进行补偿时,能够降低数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)的复杂度,而且光纤中的模式数目越多,该补偿方案优势越明显。即使应用在二维模式空间中对与偏振相关的损伤进行补偿时,以上优势仍然存在,比如,无需通过 3 个辅助泡利矩阵进行斯托克斯矢量与琼斯矢量之间的转换,且如果要进一步考虑偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss, PDL)时,只需将 $\boldsymbol{\Omega}$ 与 R 矩阵加上反厄米项,就能用于对 PMD+RSOP+PDL 损伤的联合补偿(这种做法同样能够直接推广至 N 维空间实现模式耦合+模式色散+模式相关损耗的联合补偿)。鉴于以上优势,接下来将该方案应用至目前商用的单模偏复用传输系统(即二维模式空间)中对 PMD+RSOP 进行补偿。

2 仿真验证与结果分析

根据光纤通信传输系统中各组成部分的工作原理及其相应参数,采用 MATLAB 自行编程,搭建了如图 1 所示的由发射端、光纤信道、接收端与 DSP 等模块组成的 28 GBaud PDM-QPSK 相干光通信系统仿真平台,以验证提出的基于 DM 理论的 PMD 与 RSOP 联合监测补偿方案的有效性。平台发射端由信号产生部分、中心波长为 1 550 nm 的激光源以及将信号从电域调制到光域的同相正交调制器(In-phase and Quadrature-Phase Modulator, IQM)等组成。光纤信道长度为 1 000 km,信号在其中传输时会受到偏振模色散、色度色散以及非线性效应等多种损伤,这些损伤均可在接收端的数字处理模块中由相关算法独立完成均衡补偿,因此在处理由偏振引起的损伤时不考虑其它损伤。但是,光纤传输链路中的 EDFA 会不可避免地引入放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声,从而影响偏振损伤补偿过程中的关键性

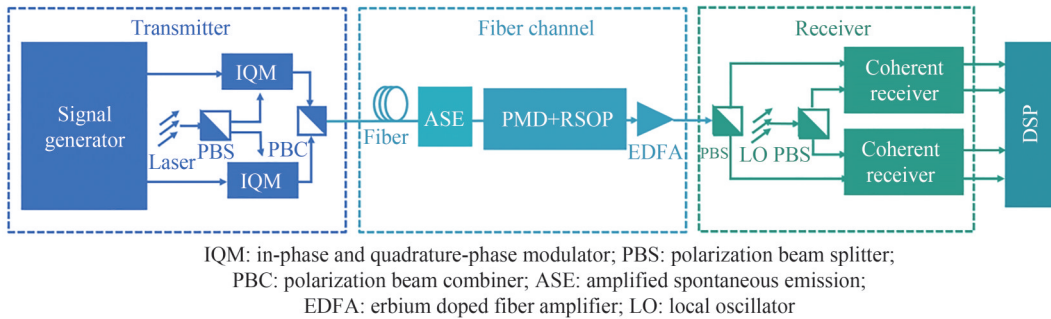


图 1 PDM-QPSK 相干光传输系统仿真框图

Fig.1 Simulation diagram of PDM-QPSK coherent optical transmission system

能指标光信噪比(Optical Signal to Noise Ratio, OSNR),因此在仿真过程中仍然考虑了ASE噪声的影响。在接收端,借助中心波长为1550 nm的本地振荡激光源对信号进行相干接收,然后送入DSP模块中进行光信号的损伤恢复与均衡,通过采用扩展卡尔曼滤波器算法对构建的矩阵 Ω 与 R 中的独立参数 $(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, r_1, r_2, r_3)^T$ 进行追踪,再利用联合补偿模型(10)即可实现PMD与RSOP补偿,补偿效果可通过表征信号传输质量的BER和星座图等指标来衡量。

图2给出了DGD=100 ps、RSOP=1 Mrad/s的损伤条件下,实时追踪到的PMD与RSOP参数曲线,其中图2(a)为 Ω 矩阵中独立参数 $(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)^T$ 的追踪曲线,通过求解每次迭代更新后 Ω 的特征值和特征矢量,即可得到实时追踪到的每一模式的群时延,进而算出相应的DGD数值,如图2(b)。图2(b)中插图则给出了0~300次迭代的局部放大图,可知,经过约100次迭代后,所追踪的DGD数值即达到了100 ps左右的相对稳定状态,说明了基于DM理论的偏振损伤监测方法的快速收敛性。图2(c)给出了 R 中各独立参数 $(r_1, r_2, r_3)^T$ 的追踪曲线,由每次迭代更新得到的 R 结合模型(11)即可实现对RSOP损伤的补偿。

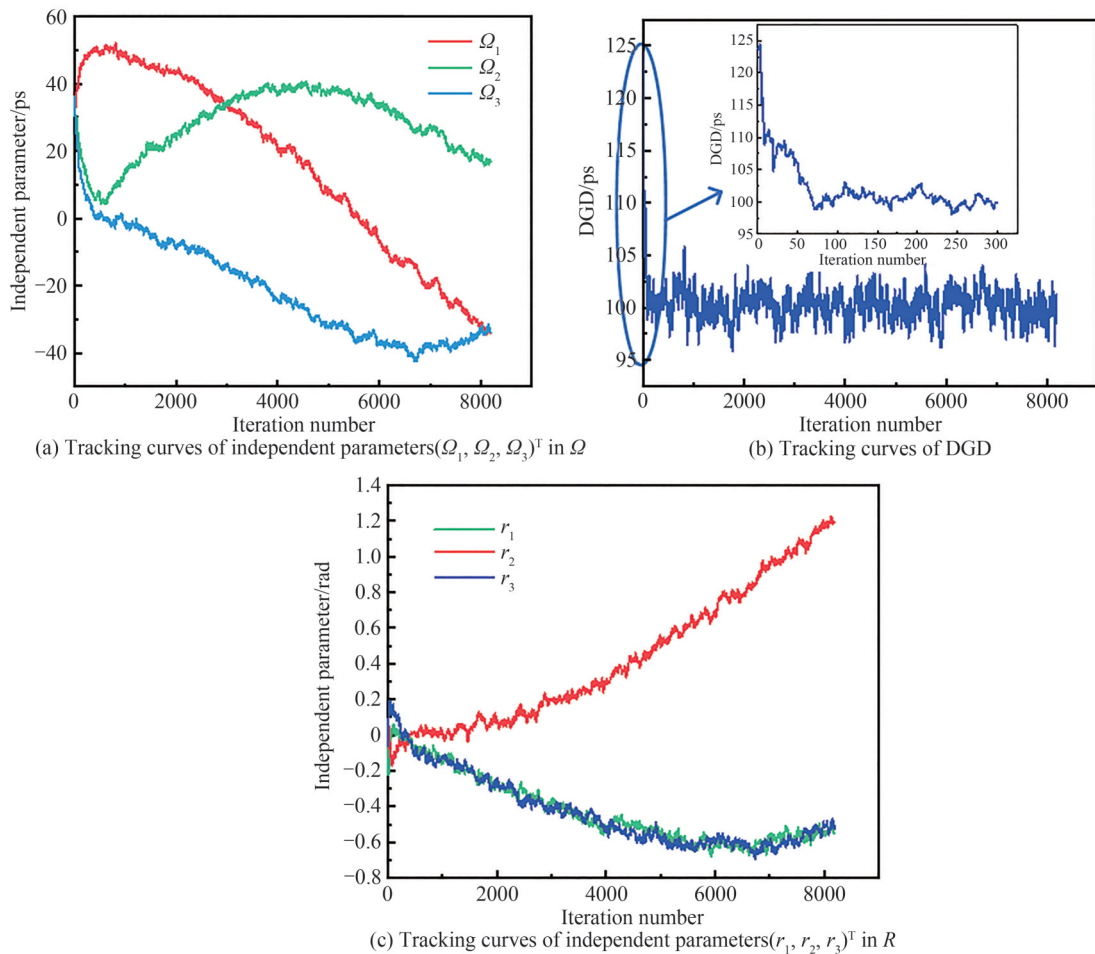


图2 PMD+RSOP 损伤条件下参数的追踪曲线

Fig.2 Tracking curves of parameters with impairment of PMD+RSOP

接下来验证基于DM理论的PMD与RSOP联合监测补偿方案的有效性。图3给出了不同损伤情况下的BER性能评估曲线及信号恢复前后的星座图示例。图3(a)给出了DGD=100 ps时,PDM-QPSK信号在不同RSOP损伤条件下BER与OSNR的变化曲线(图中还提供了信号不经历任何损伤的理想情况下BER vs OSNR的参考曲线,标记为“Ideal”)。可以看出,理想情况时,在可控制无差错传输的7%前向纠错(Forward Error Correction, FEC)门限(即 $BER=3.8 \times 10^{-3}$)下,QPSK信号所需的OSNR为12.5 dB;当系统

中仅存在 100 ps 的 DGD 损伤而没有 RSOP 损伤时,基于 DM 理论的偏振损伤监测补偿方案仅需 0.5 dB 的 OSNR 代价,即 $\text{OSNR}=13$ dB 时便有效实现了 DGD 的有效补偿。进一步地,当系统存在约 600 krad/s RSOP 的一般损伤时,基于 DM 理论的偏振损伤监测补偿方案无需额外的 OSNR 代价,且实现极端条件下高达 2 Mrad/s 的 RSOP 损伤补偿时,也仅需再增加 0.2 dB 的 OSNR 代价,即该方案分别在 13 dB 和 13.2 dB 时便有效实现了这两种情况下的偏振损伤联合补偿。图 3(b) 给出了 $\text{OSNR}=14$ dB 时,在 $\text{RSOP}=2$ Mrad/s 的极端条件下 QPSK 信号恢复前后的星座图,由图可知,受 DGD 与 RSOP 损伤的信号经过补偿后,星座点被完美区分,说明受损信号得到了较好恢复。图 3(c) 给出了 $\text{OSNR}=14$ dB 时,在大范围 DGD (30~180 ps) 和快速旋转 RSOP (300 krad/s~2 Mrad/s) 共同存在时联合补偿的 BER 性能曲线图。由图可知,当 RSOP 损伤在 300 krad/s~2 Mrad/s 范围内变化时,基于 DM 理论的偏振损伤模型对 DGD 的补偿容忍度可达 170 ps,完全能够应对一般光纤中几十 ps 的 DGD^[14]。当处于 $\text{RSOP}=2$ Mrad/s,且 $\text{DGD}=170$ ps 的极端条件时,对应的 BER 为 3.22×10^{-3} ,仍满足信号无差错传输的 FEC 门限要求,显现了极端条件下稳定的 BER 性能。以上结果表明,在 FEC 门限要求下,基于 DM 理论的偏振损伤补偿方案与文献[11, 19, 20]中传统的基于 Stokes 理论的偏振损伤联合补偿方案性能相契合,说明了该方案在二维模式空间中是切实有效的。

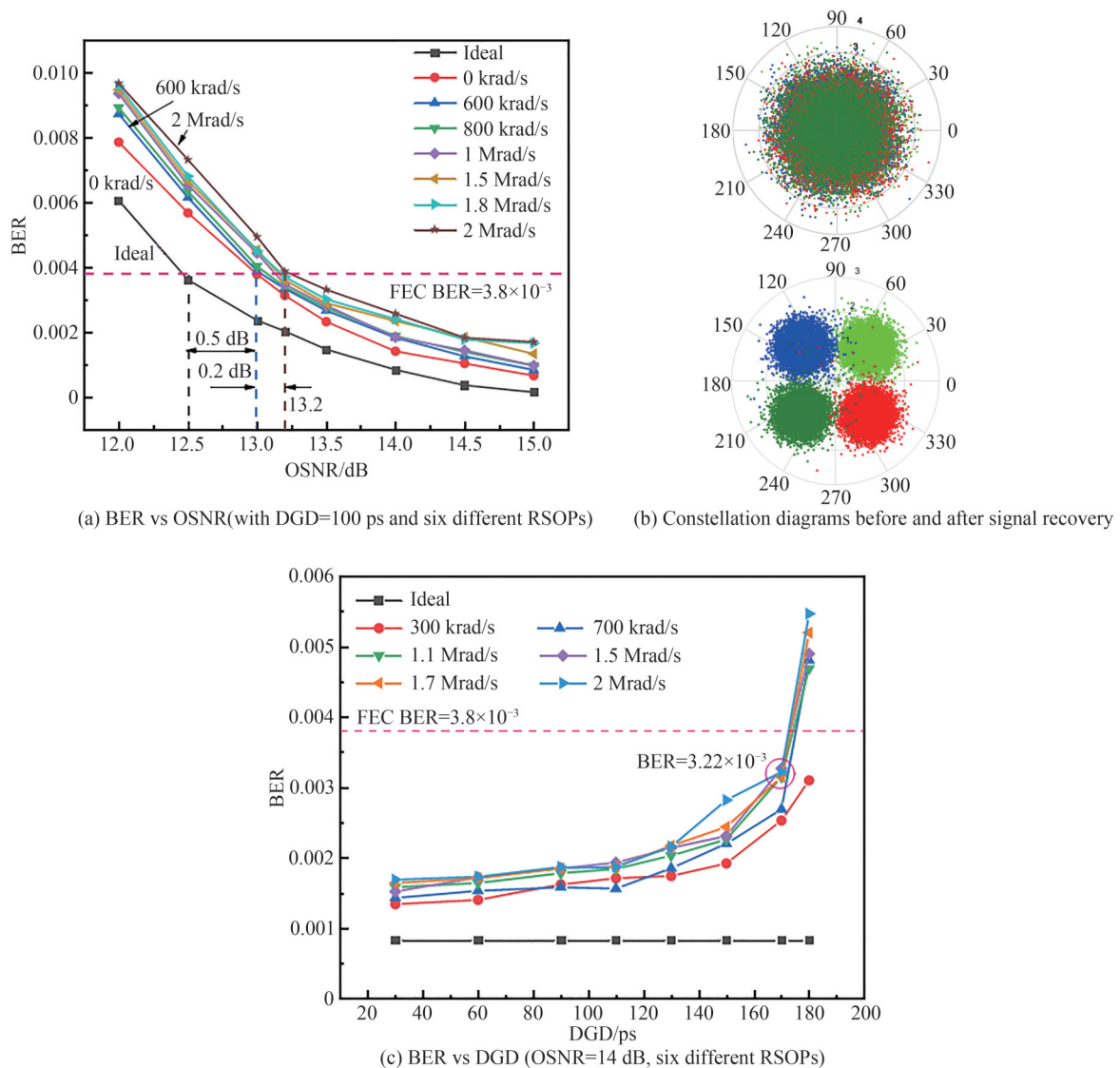


图3 BER性能评估曲线及星座图示例

Fig.3 BER performance evaluation curves and constellation diagrams

3 结论

本文提出了一种基于DM理论的偏振损伤联合补偿方案,首先利用DM理论构建表征PMD和RSOP的零迹厄米矩阵 Ω 与 R 来分析系统中的损伤,并通过追踪相应矩阵中的独立参数及建立偏振损伤模型来实现PMD与RSOP的联合监测补偿,最后搭建了28 GBaud PDM-QPSK相干光通信仿真传输系统对该方案进行了验证。结果表明,该方案可实现30~170 ps大范围DGD与300 krad/s~2 Mrad/s快速旋转RSOP的联合补偿,并且,约100次迭代的快速收敛性能、0.5 dB~0.7 dB较小的OSNR代价以及极端条件(DGD=170 ps、RSOP=2 Mrad/s)下稳定的BER性能均证实了基于DM理论的PMD与RSOP偏振损伤联合监测补偿方案是切实有效的。同时,基于DM理论的损伤模型构建简单,无需任何辅助矩阵,因此分析复杂度较低,而且仅需将相关矩阵扩展至 N 维即可将其推广至 N 维模式空间,这将为下一步将该方案应用至多维MDM传输系统中,建立基于DM理论的MC和MD等模式损伤的联合监测补偿方案提供理论指导。

参考文献

- [1] ZHANG Xiaoguang, YU Li, ZHENG Yuan, et al. Adaptive PMD compensation using PSO algorithm[C]. Optical Fiber Communication Conference, IEEE, 2004, 2: 2-3.
- [2] ZHANG Xiaoguang, ZHENG Yuan, SHEN Yu, et al. Particle swarm optimization used as a control algorithm for adaptive PMD compensation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 17(1): 85-87.
- [3] KIKUCHI K. Performance analyses of polarization demultiplexing based on constant-modulus algorithm in digital coherent optical receivers[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9868-9880.
- [4] BRUYERE F. Impact of first-and second-order PMD in optical digital transmission systems[J]. Optical Fiber Technology, 1996, 2(3): 269-280.
- [5] TAVAKKOLNIA I, SAFARI M. The impact of PMD on single-polarization nonlinear frequency division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1264-1272.
- [6] SULIMAN M, EYADEH A A, AIKOFABI I S, et al. Theoretical and experimental investigation of fiber loss and dispersion effects in optical networks[J]. Journal of Electron Devices, 2013, 18: 1524-1530.
- [7] PIETRALUNGA S M, COLOMBELLI J, FELLEGARA A, et al. Fast polarization effects in optical aerial cables caused by lightning and impulse current[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2583-2585.
- [8] KRUMMRICH P M, RONNENBERG D, SCHAIRER W, et al. Demanding response time requirements on coherent receivers due to fast polarization rotations caused by lightning events[J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12442-12457.
- [9] FOSCHINI G J, POOLE C D. Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(11): 1439-1456.
- [10] FOSCHINI G J, JOPSON R M, NELSON L E, et al. The statistics of PMD-induced chromatic fiber dispersion[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(9): 1560.
- [11] ZHENG Zibo, CUI Nan, XU Hengying, et al. Window-split structured frequency domain Kalman equalization scheme for large PMD and ultra-fast RSOP in an optical coherent PDM-QPSK system[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7211-7226.
- [12] YI Wei, ZHENG Zibo, CUI Nan, et al. Joint equalization scheme of ultra-fast RSOP and large PMD compensation in presence of residual chromatic dispersion[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21896-21913.
- [13] CUI Nan, ZHANG Xiaoguang, ZHENG Zibo, et al. Two-parameter-SOP and three-parameter-RSOP fiber channels: problem and solution for polarization demultiplexing using Stokes space[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 21170-21183.
- [14] GORDON J P, KOGELNIK H. PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, 97(9): 4541-4550.
- [15] 张晓光, 唐先锋. 光纤偏振模色散原理、测量与自适应补偿技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 14-17.
- [16] ANTONELLI C, MECOZZI A, SHTAIF M, et al. Stokes-space analysis of modal dispersion in fibers with multiple mode transmission[J]. Optics Express, 2012, 20(11): 11718-11733.
- [17] ROUDAS I, KWAPISZ J. Stokes space representation of modal dispersion[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-15.
- [18] YANG Zhenshan, ZHANG Xiaoguang, ZHANG Bin, et al. Density-matrix formalism for modal coupling and dispersion in mode-division multiplexing communications systems[J]. Optics Express, 2020, 28(13): 18658-18680.
- [19] QIU Liyuan, ZHENG Zibo, ZHANG Xiaoguang, et al. An adaptive Kalman filter for extreme polarization effects equalization in coherent optical communication system[J]. Optics Communications, 2019, 445: 125-135.

- [20] ZHANG Nannan, YI Wei, ZHENG Zibo, et al. Joint equalization of linear impairments using two-stage cascade Kalman filter structure in coherent optical communication systems[J]. Optics Communications, 2019, 453: 124398.

Joint Compensation Scheme for Polarization Impairment Based on Density Matrix Formalism

GUO Yao¹, ZHANG Xia¹, DU Qiuping², YANG Zhenshan¹, ZHANG Xiaoguang³

(1 School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

(2 Shandong Provincial key Laboratory of Optical Communications Science and Technology, Liaocheng 252000, China)

(3 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: While effectively enhancing the transmission capacity of current commercial single-mode optical fiber communication systems, Polarization Division Multiplexing (PDM) technology also faces serious challenges from Polarization Mode Dispersion (PMD) and Rotation of State of Polarization (RSOP). PMD causes the broadening of optical pulses, resulting in crosstalk and distortion of the signals, which may significantly increase the Bit Error Rate (BER) of the system. Also, RSOP might cause rapid change in the polarization state of optical signals up to several hundred krad/s, preventing the two polarization signals from being correctly separated at the receiver. In practical optical fiber links, PMD and RSOP usually coexist and impose significant impairments on the system performance. The main work of this paper is to build an impairment model of PMD and RSOP and to conduct a joint compensation of the polarization-relevant impairments.

Traditionally, the Stokes formalism is employed to analyze the PMD and RSOP in commercial single-mode fibers that actually support two orthogonal polarization modes. The corresponding Stokes vector is a 3-dimensional real vector with clear physical meaning, and can be intuitively represented in the geometrical Poincare sphere. However, the Stokes formalism requires 3 auxiliary 2×2 Pauli matrices, and when extended to the treatment of Modal Dispersion (MD) and Mode Coupling (MC) in an N -mode optical fiber (i.e., a modal space of dimension N), a number of $N^2 - 1$ auxiliary $N \times N$ Gell-Mann matrices are required, which can drastically complicate the analysis of MD and MC effects as N increases. Recently, borrowing methodology from quantum mechanics, we proposed and developed the Density Matrix (DM) formalism for the MD and MC in a modal space of arbitrary dimension $N \geq 2$. Without requiring any auxiliary matrices, the DM formalism is simple and straightforward in formulation and application, and is thus particularly suitable for the study of modal properties and signal compensations in the optical communication system.

In this paper, we apply the DM formalism in the PDM system to construct a joint polarization-impairment compensation scheme. We establish a polarization impairment model for coexisting PMD and RSOP based on traceless Hermitian impairment matrices. By tracking the corresponding independent parameters in the matrices, we achieve the joint impairment compensation of PMD and RSOP. To verify the proposed scheme, we build a 28 GBaud PDM quadrature phase-shift keying coherent optical communication transmission simulation system, and implement a joint impairment-compensation for Differential Group Delay (DGD) over a wide range of 30~170 ps and fast RSOP over 300 krad/s~2 Mrad/s. In simulations, with about 100 iterations, the tracking and compensation have already converged for the impairment of 100 ps Differential Group Delay (DGD), and with only 0.5 dB and 0.7 dB optical Signal-to-noise Ratio (OSNR) cost, joint compensation of RSOP can be achieved in typical (600 krad/s) and extreme conditions (2 Mrad/s), respectively, both in the presence of 100 ps DGD. When 170 ps DGD and 2 Mrad/s fast RSOP coexist, the BER is 3.22×10^{-3} , which still meets the criterion for error-free transmission of signals. The fast convergence, the small OSNR cost, and the stable BER performance verify the validity and efficacy of our polarization impairment model and the corresponding joint compensation scheme in optical communication systems.

Furthermore, taking advantage of the DM formalism, our joint compensation scheme can be readily generalized to modal spaces of arbitrary dimension N for the impairment analysis and signal compensation of MD and MC, simply by the extending the relevant matrices from 2×2 to $N \times N$. Therefore, our work potentially provide a simple and effective theoretical approach for the impairment analysis and compensation of optical-signals in more general mode-division multiplexing communication systems.

Key words: Coherent optical communication; Density matrix formalism; Polarization mode dispersion; Rotation of state of polarization; Signal impairment compensation

OCIS Codes: 060.1660; 060.2330; 060.4510