

引用:蓝海龙,许恒迎,岳耀政,等. 基于 CAZAC 序列的相干光通信系统偏振相关损耗时域监测方案[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(5): 653-660.

Citation: Lan Hailong, Xu Hengying, Yue Yaozheng, Xu Yayun, Zhou Tianshuo, Zhang Yining. Polarization-dependent loss time-domain monitoring scheme based on CAZAC sequences for coherent optical communication systems[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(5): 653-660.

文章编号 1672-6634(2026)05-0653-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2026010006

基于 CAZAC 序列的相干光通信系统 偏振相关损耗时域监测方案

蓝海龙¹, 许恒迎^{1,2}, 岳耀政¹, 许雅云¹, 周天硕¹, 张义宁^{2,3}

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 聊城市工业互联网研究与应用重点实验室, 山东 聊城 252059; 3. 聊城大学 数学科学学院, 山东 聊城 252059)

摘要 针对相干光通信系统中偏振相关损耗(PDL)在快速偏振态旋转(RSOP)条件下难以稳定监测的问题, 本文提出并验证了一种基于恒模零自相关(CAZAC)序列的 PDL 时域监测方案。该方案利用 CAZAC 序列理想的零自相关与时频域恒模特性, 在接收端偏振解复用之前提取受损 CAZAC 序列的模值, 通过构建双偏振维度的矩阵迹比值, 建立 PDL 与接收信号幅度特征之间的定量映射关系, 以实现在快速 RSOP 下 PDL 的高精度监测。32 GBaud PDM-16QAM 相干光通信系统仿真结果表明, 相较于频域导频方案, 本方案在快速 RSOP 环境下具有更高的监测精度, 即使在 5 Mrad/s 的极端 RSOP 下, 该方案的 PDL 平均监测误差仍控制在 0.26 dB 以内, 同时在低 PDL 区域平均监测误差小于 0.15 dB。

关键词 偏振相关损耗; 恒模零自相关序列; 光信道监测; 相干光通信; 偏振态旋转

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Polarization-dependent loss time-domain monitoring scheme based on CAZAC sequences for coherent optical communication systems

LAN Hailong¹, XU Hengying^{1,2}, YUE Yaozheng¹, XU Yayun¹,
ZHOU Tianshuo¹, ZHANG Yining^{2,3}

(1. School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;
2. Liaocheng Key Laboratory of Industrial-Internet Research and Application, Liaocheng 252059, China;
3. School of Mathematical Sciences, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract To address the challenge of stable polarization-dependent loss (PDL) monitoring in coherent optical communication systems under rapid rotation of state of polarization (RSOP), this paper proposes and validates a time-domain PDL monitoring scheme based on constant amplitude zero autocorrelation

收稿日期: 2026-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(62371216, 62101229); 山东省自然科学基金项目(ZR2025MS1018, ZR2022MF253); 聊城大学博士科研启动基金项目(318051834, 318051835)资助

通信作者: 许恒迎, 男, 汉族, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向: 高速相干光通信, E-mail: xuhengying@qq.com。

(CAZAC) sequences. By exploiting the ideal zero-autocorrelation and constant-modulus properties of CAZAC sequences in both the time and frequency domains, the amplitudes of the impaired CAZAC symbols are extracted prior to polarization demultiplexing at the receiver. A quantitative mapping between PDL and the received signal amplitude features is then established through the trace ratio of a dual-polarization matrix, enabling high-accuracy PDL monitoring under rapid RSOP conditions. Simulation results obtained from a 32-GBaud PDM-16QAM coherent optical communication system demonstrate that, compared with frequency-domain pilot-based schemes, the proposed approach achieves higher monitoring accuracy in RSOP environments. Even under an extreme RSOP rate of 5 Mrad/s, the average PDL monitoring error remains below 0.26 dB, and the average error is less than 0.15 dB in low-PDL regime.

Keywords polarization-dependent loss; constant-amplitude zero-autocorrelation (CAZAC) sequence; optical channel monitoring; coherent optical communication; rotation of state of polarization

0 引言

在全球数据流量持续激增、频谱资源日趋紧张背景下,发展能够满足大容量、高速率通信需求的新技术已成为提升系统性能的关键问题^[1]。随着移动通信技术从 5G 向 6G 演进,骨干通信系统对传输速率、容量及覆盖范围提出了更高要求^[2],这使得高速相干光通信系统日益凸显其核心地位^[3]。为提升频谱效率,偏振复用(Polarization-Division Multiplexing, PDM)被广泛应用,其通过利用光场的正交偏振维度实现传输容量倍增。这种系统同时受到多种偏振损伤影响^[3],主要包括偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)、偏振态旋转(Rotation of State of Polarization, RSOP)以及偏振相关损耗(Polarization-Dependent Loss, PDL)。其中, PMD 和 RSOP 主要起源于光纤的随机双折射效应,而 PDL 作为一种非幺正线性损伤,则主要由波长选择开关(Wavelength Selective Switch, WSS)、光放大器及光纤连接器等器件对正交偏振分量的非对称衰减引起^[4,5]。在传统相干光通信系统的数字信号处理流程中,通过离线数字信号处理 Digital Signal Processing, DSP)算法可以有效改善误码率性能^[1],其中 PMD 补偿和 RSOP 跟踪通常依赖基于恒模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)均衡结构^[6]。然而, PDL 的存在破坏了信道矩阵的幺正特性,使得盲均衡算法在收敛过程中易出现奇异性问题,从而导致偏振解复用失败^[7]。同时, PDL 还会引起双偏振支路间信噪比的不平衡,破坏信号正交性并诱发相干串扰,显著降低系统的传输性能^[8]。在实际光纤传输环境中, RSOP 的随机快速变化进一步加剧了 PDL 的监测难度。因此,实现对 PDL 的稳定、精准的监测具有重要的科学意义^[9]。

针对 PDL 损伤的监测问题,现有国内外研究大致可分为三类:一是基于 Stokes 空间的盲监测方法,它通过分析信号在庞加莱球上的统计分布变化来监测信道 PDL^[10],该类方法无需导频,结构简单,但对色散与带限效应鲁棒性差,监测精度受限;二是基于时频重构联合多任务卷积神经网络的 PDL 估计方法^[11],该方案在复杂信道条件下仍具有较高估计精度,但其性能高度依赖训练数据的完备性与泛化能力,模型复杂度较高,实际部署仍存在挑战;三是基于频域导频的 PDL 监测方案^[12],该类方法在数字子载波复用系统中具有较高的监测精度,但在单载波信号系统中需占用额外的频谱且在高速 RSOP 条件下监测精度显著下降。

基于以上研究,现有 PDL 监测方案在高速 RSOP 场景下面临监测精度低、稳定性不足或实现复杂度较高等挑战,难以满足实际相干光通信系统对 PDL 监测的稳定性和精确需求。针对上述问题,本文提出一种基于恒模零自相关(Constant Amplitude Zero Autocorrelation, CAZAC)序列的 PDL 时域监测方案。该方案利用 CAZAC 序列的理想零自相关特性和时频域恒模特性,在接收端偏振解复用之前实现帧同步,并通过提取 CAZAC 序列受 PDL 影响的幅度变化作为监测特征,建立 PDL 与接收信号特征之间的定量映射关系,实现对 PDL 的稳健监测,该方法无需额外硬件开销,并且在快速 RSOP 场景下仍可实现有效监测。仿真结果表明,在高达 5 Mrad/s 的 RSOP 的场景下,所提方案仍能保持较高的监测精度与鲁棒性。

1 方案原理

快速 RSOP 会导致偏振串扰, PDL 会导致双偏振信号功率失衡,破坏信道矩阵的幺正特性,从而显著增

加偏振解复用的难度。为实现偏振解复用前的稳健 PDL 监测与补偿,有必要在统一的偏振损伤信道模型下分析 RSOP 与 PDL 的联合效应,并构建一种能够适应快速动态偏振变化的监测机制。基于此,本节首先建立存在 RSOP 下的 PDL 集总式损伤模型,进而提出一种基于 CAZAC 序列的 PDL 时域监测方法。

1.1 存在 RSOP 下的 PDL 损伤模型

光纤通信系统中,PDL 主要源于光学器件的非对称衰减,而 RSOP 则由光纤的随机双折射效应引起。考虑大多数新型光纤的差分群时延(Differential Group Delay,DGD)已经很小(约 $0.01\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)^[12],本文主要聚焦于链路中的 PDL 和 RSOP 损伤,其物理模型如图 1 所示。

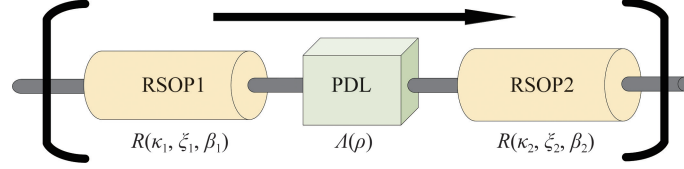


图 1 存在 RSOP 下的 PDL 损伤模型

Fig. 1 PDL impairment model in the presence of RSOP

该模型对应的数学表达式为

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}(\kappa_1, \xi_1, \beta_1) \mathbf{R}(\alpha, \delta) \mathbf{A}(\rho) \mathbf{R}(\alpha, \delta)^{-1} \mathbf{R}(\kappa_2, \xi_2, \beta_2), \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{R}(\kappa_1, \xi_1, \beta_1) = \begin{pmatrix} \cos \kappa_1 e^{j\xi_1} & -\sin \kappa_1 e^{j\beta_1} \\ \sin \kappa_1 e^{-j\beta_1} & \cos \kappa_1 e^{j\xi_1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}(\kappa_2, \xi_2, \beta_2) = \begin{pmatrix} \cos \kappa_2 e^{j\xi_2} & -\sin \kappa_2 e^{j\beta_2} \\ \sin \kappa_2 e^{-j\beta_2} & \cos \kappa_2 e^{j\xi_2} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}(\alpha, \delta) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -e^{-j\delta} \sin \alpha \\ e^{j\delta} \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}(\rho) = \begin{pmatrix} \sqrt{1+\rho} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\rho} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 ξ, β 是相位旋转角, κ 是方位旋转角, $\mathbf{R}(\kappa_1, \xi_1, \beta_1)$ 和 $\mathbf{R}(\kappa_2, \xi_2, \beta_2)$ 分别用于表示 PDL 前后的三参量 RSOP 模型^[13]; $\mathbf{R}(\alpha, \delta)$ 的列向量 $(\cos \alpha, e^{j\delta} \sin \alpha)^T$ 和 $(-e^{-j\delta} \sin \alpha, \cos \alpha)^T$ 分别表示光学器件中两个正交的本征偏振态,对应最低损耗与最高损耗偏振模式,其中 $\alpha \in (0, 2\pi)$, $\delta \in (0, 2\pi)$; 矩阵 $\mathbf{A}(\rho)$ 的对角元素分别表示 PDL 传输矩阵的最高损耗和最低损耗, ρ 为损耗系数, $\rho \in (0, 1)$ 。 P_{DL} 大小与 ρ 的关系为

$$P_{\text{DL,dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{1+\rho}}{\sqrt{1-\rho}} \right). \quad (6)$$

根据偏振损伤的简化理论^[14],经过信道传输后,接收到的双偏信号 $[R_X; R_Y]$ 可以表示为

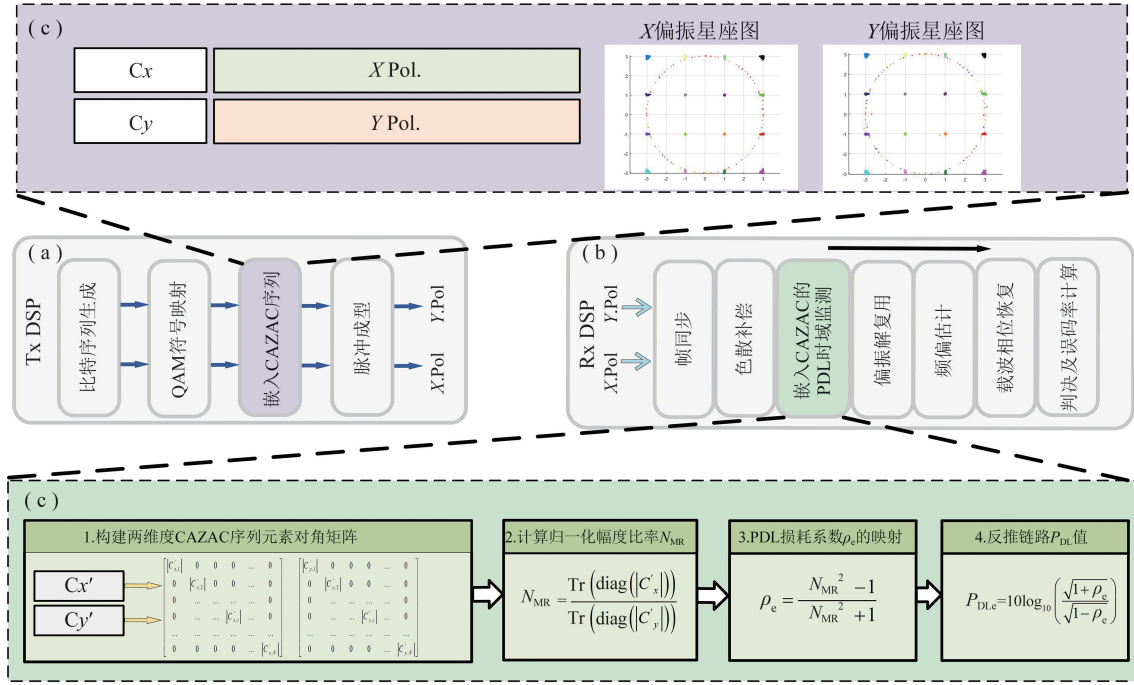
$$\begin{bmatrix} R_X \\ R_Y \end{bmatrix} = \text{FFT}^{-1} \left\{ \mathbf{H}_{\text{CD}} \cdot \text{FFT} \left\{ \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} S_X \\ S_Y \end{bmatrix} \cdot e^{j\langle 2\pi\Delta f + \theta \rangle} \right\} \right\} + \begin{bmatrix} n_X \\ n_Y \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $[S_X; S_Y]$ 为发送端双偏振信号, H_{CD} 是信道中的色散效应, Δf 代表激光器的频率偏移量, θ 为激光器相位噪声, FFT 和 FFT^{-1} 分别表示傅里叶变换与逆变换运算符, $[n_x; n_y]$ 为放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声。

1.2 CAZAC 序列设计和 PDL 时域监测

在上述偏振损伤模型的基础上,本文提出一种基于 CAZAC 序列的相干光通信系统 PDL 时域监测方案。该方案充分利用 CAZAC 序列独特的理想零自相关特性、时频域恒模特性及变换不变性三大核心优势^[15],将其嵌入到发射信号中,以实现 PDL 的高效稳健监测。基于提出方案的相干系统架构如图 2 所示,发射端在比特序列生成、QAM 符号映射之后的信号中嵌入 CAZAC 序列;接收端将 PDL 监测模块置于

色散补偿(Chromatic Dispersion Compensation, CDC)之后、偏振解复用之前,从而实现在快速 RSOP 场景下准确提取 PDL 损伤信息,为后续偏振解复用提供可靠支撑。其详细过程为:



注:(a)发射端 DSP;(b)接收端 DSP;(c)在信号中嵌入的 CAZAC 序列及信号星座图;(d)基于 CAZAC 序列的 PDL 时域监测方案的具体步骤。

图 2 基于 CAZAC 序列 PDL 时域监测原理图

Fig. 2 Principle of the proposed CAZAC-based time-domain PDL monitoring scheme.

1.2.1 发射端 DSP 处理。在发射端信号构建阶段,如图 2(a)所示,随机比特序列映射为 M-QAM 符号后,将经优化设计的特定长度 CAZAC 序列嵌入双偏振信号中,作为后续损伤估计的训练序列。为权衡系统开销与监测性能,本方案采用了一种简化的 CAZAC 序列结构,其数学形式可表述为^[16]

$$c(n) = e^{j\frac{2\pi n^2}{N}}, n = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

式中 N 表示 CAZAC 序列长度,定义为 $N = 2^P$, (P 为正整数)。为适配双偏系统,定义两个重新排列的 CAZAC 序列块 C_x, C_y 如

$$C_x = [c(1), c(2), \dots, c(N-1), c(N)], \quad (9)$$

$$C_y = [c(N/2+1), c(N/2+2), \dots, c(N), c(1), c(2), \dots, c(N/2)], \quad (10)$$

式中, C_x 与 C_y 分别表示发射端插入的 X、Y 偏振的 CAZAC 序列, C_y 为 C_x 右循环 $N/2$ 个符号的副本。图 2(c)展示了本方案将 C_x 与 C_y 分别嵌入到了 X、Y 偏振信号的前端,由 X、Y 偏振的星座图可以看出, CAZAC 序列在星座图上呈现环状分布且幅度恒定。经脉冲成型后,带有 CAZAC 序列的信号通过 IQ 调制器转换为光信号注入光纤链路。

1.2.2 接收端 DSP 处理。接收端 DSP 流程如图 2(b)所示:首先,接收信号利用 CAZAC 序列理想的零自相关特性对输入信号进行互相关运算,以实现精准帧同步;随后,对信号进行色散补偿,并基于 CAZAC 序列执行 PDL 时域监测,监测结果用于恢复信道函数的么正性;之后依次执行偏振解复用、频偏估计和载波相位恢复;最后完成信号判决与误码率计算。

由于嵌入在 X、Y 偏振上的 CAZAC 序列与有效数据信号经过相同的物理信道,其遭受的幅度损伤完全一致,因此所提 CAZAC 监测方案的核心在于利用 CAZAC 序列的时域恒模特性提取 PDL 损伤参量。具体流程如图 2(d)所示,可分为 4 个步骤。

步骤 1 构建两维度 CAZAC 序列的对角矩阵。在色散补偿后的信号中提取出两路受损伤的 CAZAC 序列 C'_x, C'_y , 计算它们的复序列元素模值,由此构建两个对角矩阵:

$$\text{diag}(|\mathbf{C}'_x|) = \begin{bmatrix} |C'_{x,1}| & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & |C'_{x,2}| & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & |C'_{x,i}| & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & |C'_{x,N}| \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{diag}(|\mathbf{C}'_y|) = \begin{bmatrix} |C'_{y,1}| & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & |C'_{y,2}| & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & |C'_{y,i}| & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & |C'_{y,N}| \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 $C'_{x,i}$ 及 $C'_{y,i}$ 分别代表 $\mathbf{C}'_x$ 和 $\mathbf{C}'_y$ 序列中的第 i 个元素。

步骤2 计算归一化幅度比率 NMR。为了量化两个偏振之间幅度失衡,本方案定义归一化幅度比率 (Normalized Magnitude Ratio, NMR) 用 N_{MR} 表示,计算公式如

$$N_{\text{MR}} = \frac{\text{Tr}(\text{diag}(|\mathbf{C}'_x|))}{\text{Tr}(\text{diag}(|\mathbf{C}'_y|))}, \quad (13)$$

式中 $\text{Tr}(\cdot)$ 为求迹运算, $\text{diag}(|\cdot|)$ 为取模值并构建对角矩阵运算。该参数仅依赖于信号的幅度信息,对相位旋转和整体增益缩放均具有不变性,因而适用于含噪环境下的稳健性评估。

步骤3 PDL 损耗系数 ρ_e 的映射。基于计算得到的 N_{MR} , 利用下述公式计算两偏振支路间的相对功率偏差

$$\rho_e = \frac{N_{\text{MR}}^2 - 1}{N_{\text{MR}}^2 + 1}. \quad (14)$$

步骤4 反推链路中的 PDL 值。根据 PDL 数学模型及 ρ_e 进行反演解析,可得链路 PDL 的监测值

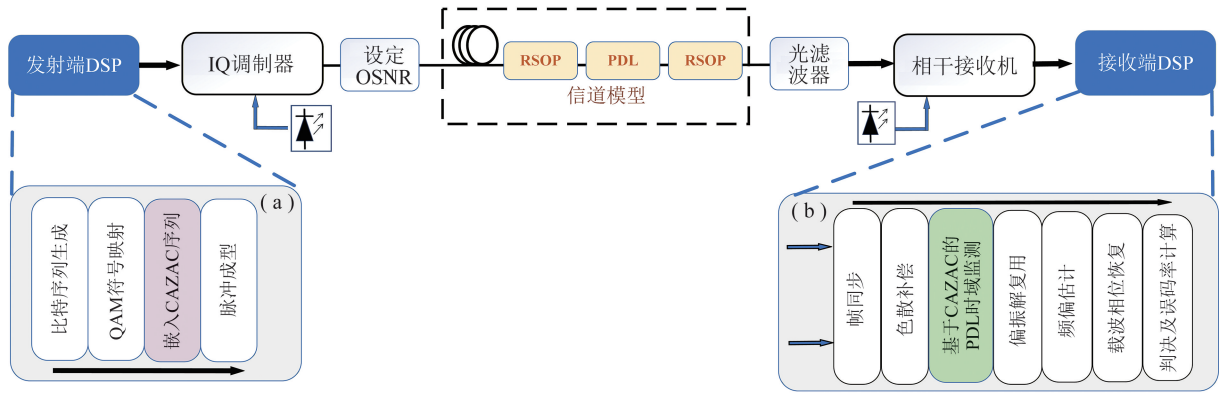
$$P_{\text{DL}_e} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{1 + \rho_e}}{\sqrt{1 - \rho_e}} \right). \quad (15)$$

2 仿真结果分析

2.1 仿真系统设计

为验证所提方案的 PDL 监测性能,本文基于 VPI TransmissionMaker 11.2 与 MATLAB 搭建了一个 32 GBaud PDM-16QAM 相干光通信仿真系统,其结构如图 3 所示。发射端如图 3(a)所示,首先,将 MATLAB 生成的伪随机比特序列 (Pseudo-Random Bit Sequence, PRBS) 映射为 16QAM 符号,同时将 CAZAC 序列嵌入至每个数据帧前端,用于实现接收端的帧同步与信道参数提取。其后,电信号经滚降系数为 0.1 的根升余弦 (Root-Raised Cosine, RRC) 滤波器完成脉冲成型后,驱动双偏 IQ 调制器加载至光载波上。发射机激光器的中心波长与线宽分别设为 1 550 nm 和 100 kHz,与本振激光器之间的频率偏移设置为 100 MHz。信道部分采用与图 1 一致的联合损伤模型,引入快速 RSOP 与不同强度的 PDL,以模拟实际光纤传输环境中的偏振相关损伤。

在接收端,首先使用一个光带通滤波器用于抑制带外 ASE 噪声。随后,经相干检测后进行离线 DSP 处理,其流程如图 3(b)所示。帧同步后,首先对信号进行色散补偿,随后执行所提 PDL 时域监测算法。由监测得到 PDL 值后对信号进行补偿以恢复信道函数幺正性,之后信号分别以 2 个样值/符号和 1 个样值/符号的采样率完成偏振解复用、频偏估计及载波相位恢复,最终进行符号判决与误码率计算。为保证统计结果的稳定性,在不同的仿真参数场景,均以 16 个样值/符号的采样率获取 50 组独立符号序列,每组包含 32 768 个符号,并计算各组结果的平均值作为最终 PDL 监测的性能指标。



注:(a) 发射端 DSP;(b) 接收端 DSP。

图 3 32 GBaud PDM-16QAM 仿真系统

Fig. 3 32-GBaud PDM-16QAM simulation system

为了衡量所提 CAZAC 方案的性能,本方案使用平均 PDL 监测误差 Δ_P 来衡量对 PDL 的监测精度,其定义为 K 次独立仿真所得 PDL 监测平均值与 PDL 预设值之间的差值

$$\Delta_P = \left| \left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_{\text{est},i} \right) - P_{\text{preset}} \right|, \quad (16)$$

式中 $P_{\text{est},i}$ 为第 i 次仿真估计得到的 PDL 值, P_{preset} 表示光纤链路中 PDL 的预设值,在仿真系统中 $K = 50$ 。

此外,为评估方案监测稳定性,并避免因估算均值偏差较大而掩盖方案不稳定性或性能误差的问题,选用每次仿真得到的监测值与 PDL 预设值来定义标准误差 STD 如

$$STD = \left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (P_{\text{est},i} - P_{\text{preset}})^2 \right)^{1/2}. \quad (17)$$

2.2 仿真结果分析

为提高在复杂信道环境下提出 PDL 监测方案的抗噪性能与估计精度,本文首先对 CAZAC 序列长度进行优化分析。图 4 展示了 R_{SOP} 为 500 krad/s 的条件下,序列长度从 64 逐渐递增至 4 096 时,所得平均 PDL 监测误差随预设 PDL(1~10 dB)的变化趋势。仿真结果表明,不同序列长度的平均监测误差均随 PDL 增大而上升;在固定 PDL 下,整体监测误差随序列长度增加而下降。当序列长度达到 1 024 个符号时,所有 PDL 值对应的最大监测误差均可限制在 0.2 dB 以内;当序列长度增加至 4 096 个符号时,监测误差稳定在 0.36 dB 以内。综合考虑训练开销和频谱效率,本方案最终选取 CAZAC 序列的长度为 1 024 个符号并进行后续仿真验证。

在确定 CAZAC 序列的最优长度后,进一步分析了所提方案对 ASE 噪声的鲁棒性。仿真遍历光信噪比 (Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR) 的值 O_{SNR} 从 16 dB 增加至 22 dB,评估不同 P_{DL} 取值下的平均监测误差。其结果如图 5 所示,在所有预设 P_{DL} 条件下的平均监测误差均随 O_{SNR} 的提升而降低;当 O_{SNR} 达到 20 dB 以上时,不同预设 P_{DL} 对应的监测误差均稳定低于 0.2 dB,且对 O_{SNR} 变化不再敏感。因此,后续仿真中将 O_{SNR} 固定为 20 dB。

基于确定的最优序列长度与系统的 O_{SNR} 条件后,进一步评估所提方案在动态偏振条件下的性能,并以基于导频的频域 P_{DL} 监测方法 (FPT)^[12] 作为对比方案。仿真设置 R_{SOP} 分别为 500 krad/s、2 Mrad/s 和 5 Mrad/s,图 6 展示了在 0~10 dB P_{DL} 范围内所提 CAZAC 方案与 FPT 方案的监测性能对比。从图 6(a) 可发现:FPT 方案(空心圆蓝色系列实线)在小 P_{DL} 区间(0~1 dB)内其 P_{DL} 监测值集中分布在 2.39 dB 到 3.09 dB 范围内,监测失效,而当预设 $P_{\text{DL}} > 1$ dB 时,随着 R_{SOP} 的提高 FPT 方案的平均 P_{DL} 监测值波动显著增强,与预设值存在明显的偏差;相比之下,CAZAC 方案在所有 R_{SOP} 条件下的监测值(空心圆红色系列实线)与预设 P_{DL} 值(黑色实线)高度贴合,特别是在 5 Mrad/s R_{SOP} 及 10 dB P_{DL} 场景下,本方案的平均监测值为 9.743 dB,而 FPT 方案的平均监测结果高达 11.40 dB。此外,图 6(b) 进一步对比了两种方案的平均监测误差。可发现:FPT 方案(三角形蓝色系列实线)的监测性能易受 O_{SNR} 及预设 P_{DL} 的影响,在 5 Mrad/s R_{SOP} 及 P_{DL} 为零时其平均 P_{DL} 监测误差最高达 3.13 dB,而当 P_{DL} 增加至 10 dB 时,它的监测误差从 500

krad/s 时的 0.91 dB 升至 5 Mrad/s 时的 1.4 dB, 监测精度差且不稳定; 相比之下, 本方案(三角形红色系列实线)在所有 R_{SOP} 条件及 0~10 dB P_{DL} 范围内的平均 P_{DL} 监测误差最大不超过 0.26 dB。随着 P_{DL} 增加至 10 dB, 监测误差仅从 500 krad/s 时的 0.198 dB 升至 5 Mrad/s 时的 0.257 dB, 表现出较高的精度和稳定性。在 5 Mrad/s R_{SOP} 与 10 dB P_{DL} 条件下, 本方案相比于 FPT 方案的 P_{DL} 监测误差降低了 1.14 dB。最后, 为了展示本方案优越的监测性能, 图 6(c) 给出了图 6(b) 中本方案平均监测误差的放大视图。可看出: 在小 P_{DL} 区间(0~1 dB)内, 即使在面对 5 Mrad/s 的快速 R_{SOP} , 本方案的平均 P_{DL} 监测误差仍控制在 0.15 dB 以内。以上仿真结果验证了本方案凭借其 CAZAC 良好的自相关特性与时频域恒模特性, 具有优异的抗偏振扰动能力, 在快速 R_{SOP} 变化下本方案具有更高的 P_{DL} 监测精度。

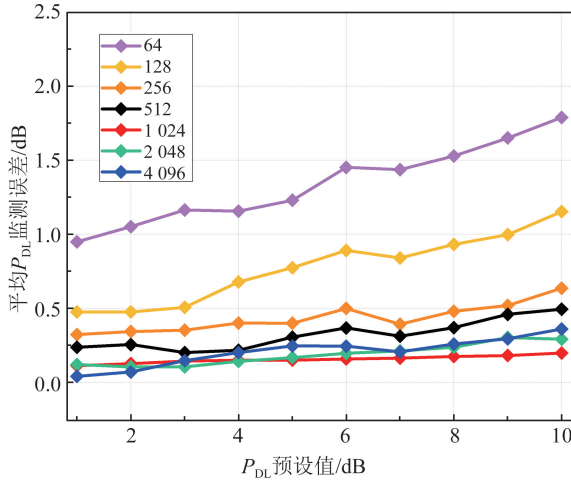


图4 $R_{\text{SOP}}=500$ Krad/s 下, 不同 CAZAC 序列长度对 0~10 dB P_{DL} 的监测性能比较

Fig. 4 Comparison of P_{DL} monitoring performance for different CAZAC sequence lengths under $R_{\text{SOP}}=500$ Krad/s

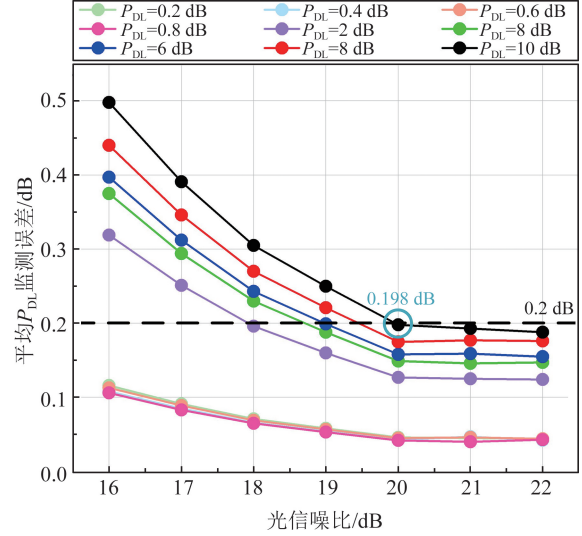
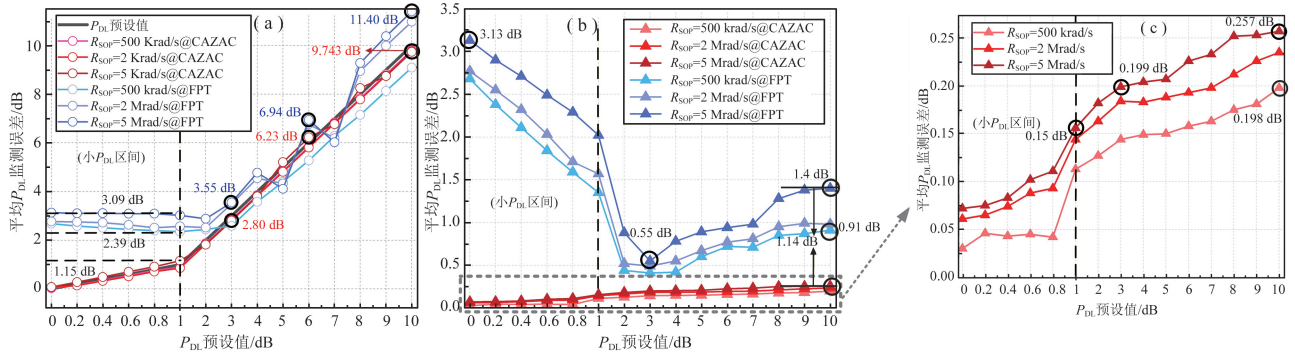


图5 不同 P_{DL} 条件下平均 P_{DL} 监测误差随 O_{SNR} 的变化关系

Fig. 5 Average P_{DL} monitoring error as a function of O_{SNR} under different P_{DL} conditions



注: (a) 平均 P_{DL} 监测值; (b) 平均 P_{DL} 监测误差; (c) 所提方案平均 P_{DL} 监测误差放大图。

图6 R_{SOP} 分别为 500 krad/s、2 Mrad/s 和 5 Mrad/s 下, P_{DL} 从 0 增加至 10 dB 时, 所提方案和 FPT 频域方案的 P_{DL} 监测性能比较

Fig. 6 Comparison of P_{DL} monitoring performance between the proposed CAZAC-based time-domain scheme and the frequency-domain pilot-tone (FPT) method as P_{DL} increases from 0 to 10 dB under R_{SOP} s of 500 krad/s, 2 Mrad/s, and 5 Mrad/s

除平均监测误差外, 监测结果的统计稳定性是评估方案实用性的关键。为此, 本研究统计了不同 R_{SOP} 条件下 P_{DL} 监测的标准误差, 结果如图 7 所示。仿真结果表明, 在 0.2 dB 至 10 dB 的宽 P_{DL} 动态范围内, 监测标准差 STD 展现出较高的平整度, 未随 P_{DL} 的增加而显著恶化。在 500 krad/s R_{SOP} 条件下, STD 稳定维持在 0.07 dB 至 0.08 dB 的低水平; 即使在 5 Mrad/s 的快速 R_{SOP} 条件下, STD 波动区间仍被严格限制在 0.16 dB 至 0.18 dB 之间(例如在 $P_{\text{DL}}=5$ dB 时, STD 仅为 0.169 dB)。这种稳定的统计特性有力地证明了所提方案在快速动态扰动场景下 P_{DL} 监测的可靠性。

3 结论

本文针对高速相干光通信系统在复杂动态偏振环境下的损伤估计难题,提出并验证了一种基于 CAZAC 序列的 P_{DL} 时域监测方案。仿真结果表明,本方案在 0~10 dB 的动态范围内表现出优异的精准度与稳定性。即使在高达 5 Mrad/s 的快速 R_{SOP} 下, P_{DL} 监测的平均误差仍低于 0.257 dB,标准差控制在 0.18 dB 以内。该方案充分利用 CAZAC 序列理想的零自相关特性与时频域恒模特性,在低 P_{DL} (小于 1 dB 时)区域依然保持了较低的监测误差,有效克服了传统监测算法的失效问题,实现了快速 R_{SOP} 环境下 P_{DL} 的高精度监测。验证了本方案在复杂信道条件下的优越监测性能。综上所述,本研究提出的 P_{DL} 监测方案兼具低复杂度、高精度与强鲁棒性等显著优势,为相干光通信传输系统的偏振损伤性能监测提供了一种可靠的技术途径。

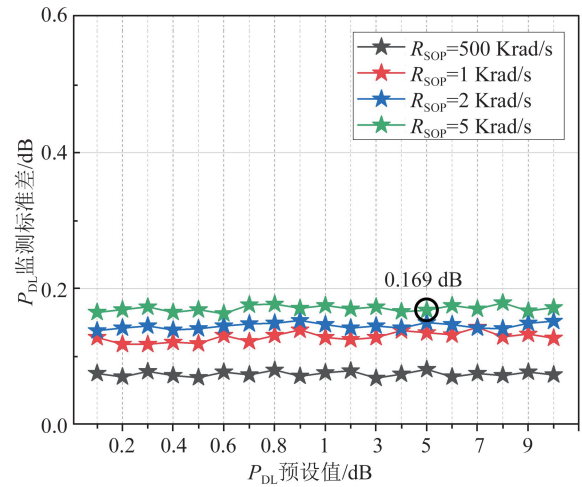


图7 CAZAC 时域监测 P_{DL} 从 0~10 dB 的标准差

Fig. 7 Standard deviation of the P_{DL} estimated by the CAZAC-based time-domain monitoring scheme versus P_{DL} (0~10 dB)

参 考 文 献

- [1] Akyildizif, Kak, A, Nie S 6G and beyond: the future of wiress communications systems[J]. IEEE Acess, 2020, 8:133995-134030.
- [2] 王志勤, 魏克军. 6G 总体原景与潜在关键技术探讨[J]. 通信学报, 2020, 41(1):1-10.
- [3] Kikuchi K. Fundamentals of coherent optical fiber communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 157-179.
- [4] Benyahya K, Simonneau C, Ghazisaeidi A, et al. Analysis of impact of polarization dependent loss in point to multi-point subsea communication systems[C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022. San Diego, California: Optica Publishing Group, 2022: M2C. 2.
- [5] Chin H M, Charlton D, Borowiec A, et al. Probabilistic design of optical transmission systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 931-940.
- [6] Ribeiro V B, Oliveira J C R F, Diniz J C M, et al. Enhanced digital polarization demultiplexation via CMA step size adaptation for PM-QPSK coherent receivers[C]// Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California: OSA, 2012; OW3H. 4.
- [7] Fan Y, Chen X, Zhou W, et al. The comparison of CMA and LMS equalization algorithms in optical coherent receivers[C]// 2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering. Chengdu City, China: IEEE, 2010; 1-4.
- [8] Cui N, Zhang X, Zhang N, et al. True equalization of P_{DL} in presence of fast R_{SOP} [C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. San Diego, California: Optica Publishing Group, 2020: Th1I. 3.
- [9] Dumenil A. Polarization dependent loss in next-generation optical networks: Challenges and solutions[D]. Palaiseau, Paris, France: Institut Polytechnique de Paris, 2020.
- [10] Muga N J, Pinto A N. Digital P_{DL} compensation in 3D Stokes space[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2122-2130.
- [11] Jiang T, Xiang Y, Wang L, et al. Joint CD, DGD, and P_{DL} estimation enabled by FrFT based time-frequency reconstruction[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023: 1-9.
- [12] 李玉芳, 王锴, 张力良, 等. 一种基于 FL-TransCNN 神经网络的水声智能频谱感知算法[J]. 电讯技术, 2026, 66(1): 11-20.
- [13] 廖希, 蔺瑞甲, 郑相全, 等. 基于成本敏感 CNN-BiLSTM 网络的目标可见性预测方法[J]. 通信学报, 2026, 47(3): 112-122
- [14] Xie C. Polarization-dependent loss induced penalties in PDM-QPSK coherent optical communication systems[C]// Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California: OSA, 2010; OWE6.
- [15] Pittala F, Slim I, Mezghani A, et al. Training-aided frequency-domain channel estimation and equalization for single-carrier coherent optical transmission systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(24): 4849-4863.
- [16] Sun Y, Jiang H, Xu Y, et al. Preamble design for joint frame synchronization, frequency offset estimation, and channel estimation in up-stream burst-mode detection of coherent PON[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(9): 4127-4138.

(责任编辑:赵海军)