

引用本文:邓昊,李一飞,赵建等.超奈奎斯特相干光通信系统中的盲载波相位恢复方法[J].光通信技术,2026,50(4):110-114.

超奈奎斯特相干光通信系统中的盲载波相位恢复方法

邓昊,李一飞,赵建*

(华南理工大学 电子与信息学院,广州 510641)

摘要:针对超奈奎斯特(FTN)技术引入的可控码间串扰影响载波相位恢复(CPR)性能的问题,系统比较了修正盲相位搜索、修正Kullback-Leibler散度、卡尔曼滤波及主成分相位估计(PCPE)4种方法在FTN系统中的适用性,重点分析了PCPE无需修正即可适配FTN信号的机理;搭建50 GBaud FTN数字多频带系统进行仿真与实验验证。结果表明:PCPE方法在存在FTN码间串扰时性能最优,最佳压缩因子为0.91;在带宽受限场景下,基于PCPE的FTN系统误码率(BER)为 1×10^{-2} 时所需光信噪比(OSNR)较传统奈奎斯特系统降低约2 dB。

关键词:超奈奎斯特;码间串扰;数字多频带;载波相位恢复;主成分相位估计

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0110-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.017

Blind carrier phase recovery methods for Faster-than-Nyquist coherent optical communication systems

DENG Hao, LI Yifei, ZHAO Jian*

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: To address the issue where controlled inter-symbol interference introduced by Faster-than-Nyquist (FTN) technology degrades carrier phase recovery (CPR) performance, this paper systematically compares the applicability of four methods in FTN systems: modified blind phase search, modified Kullback-Leibler divergence, Kalman filtering, and principal component phase estimation (PCPE). It focuses on analyzing the mechanism by which PCPE adapts to FTN signals without requiring modification. A 50 GBaud FTN digital multi-band system is established for simulation and experimental verification. The results indicate that PCPE achieves optimal performance in the presence of FTN-induced ISI, with an optimal compression factor of 0.91. In bandwidth-limited scenarios, the FTN system based on PCPE requires approximately 2 dB less optical signal-to-noise ratio (OSNR) than the traditional Nyquist system to achieve bit error rate (BER) of 1×10^{-2} .

Key words: Faster-than-Nyquist, intersymbol interference, digital multi-band, carrier phase recovery, principal component phase estimation

0 引言

随着第六代移动通信(6G)网络、云计算等技术的迅猛发展,光纤通信系统急需突破器件带宽限制,实

收稿日期:2025-07-25。

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2903002)资助;国家自然科学基金项目(U23A20282)资助;广东省自然科学基金项目(2024A1515010384)资助;广东省“珠江人才计划”青年拔尖人才项目(2019QN01X165)资助。

作者简介:邓昊(2000—),男,博士研究生,就读于华南理工大学,主要研究方向为光纤通信与信号处理,包括时钟同步算法、线性均衡算法等,发表OFC会议论文1篇。

***通信作者:**赵建(1980—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤与无线光通信。



现传输性能与频谱效率的同步提升。超奈奎斯特(FTN)技术通过突破正交化准则约束,允许可控码间串扰(ISI)的存在,将信号带宽压缩至奈奎斯特带宽以下^[1-2],从而更好地平衡带宽受限系统的性能与频谱利用率。数字多频带(DMB)技术将信号频谱划分为多个不重叠子带,可降低接收机数字信号处理(DSP)复杂度并提高系统颗粒度^[3]。FTN-DMB无缝集成了这2种技术的优势。

然而,FTN调制引入的强ISI严重影响了传统相干DSP算法的适用性^[4]。其中,蝶形自适应滤波器(BAF)与最大似然序列检测(MLSE)/Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv (BCJR)算法常用于消除FTN固有的ISI^[5-7]。文

献[8]提出了一种新型判决辅助检测方法,无需改变BAF结构,采用基于判决辅助的有限冲击响应(FIR)滤波器消除FTN-ISI,进一步提升了性能并降低了复杂度。

除BAF外,FTN导致的ISI还严重影响载波相位恢复(CPR)算法的性能,造成估计精度下降和相位周跳概率增加。传统CPR方法主要分为2类:一类是基于数据辅助的CPR,其通过插入导频实现相位估计^[9],但需要额外开销且不适用于频谱压缩因子较小的情况;另一类是盲CPR方法,盲相位搜索(BPS)在传统Nyquist系统中广泛应用^[10],但现有研究表明其不适合FTN系统,需修正判决步骤以适配FTN-ISI^[11]。Kullback-Leibler(KL)散度方法通过拟合接收星座图概率分布实现相位估计^[12],但传统方法未考虑FTN-ISI效应,文献[13]提出了改进的KL散度方法,利用查找表获得含静态ISI的星座图概率分布。此外,卡尔曼滤波(KF)^[14]和主成分相位估计(PCPE)^[15]等方法已在传统Nyquist系统中提出,但其在FTN系统中的适用性尚不清晰。

针对FTN-ISI导致传统CPR性能下降的问题,本文系统比较修正盲相位搜索(M-BPS)^[11]、修正KL散度(M-KL)^[13]、KF和PCPE这4种CPR方法在FTN系统中的性能,重点分析PCPE方法无需修正即可适配FTN-ISI的机理。

1 盲载CPR方法原理

本文简要介绍M-BPS、M-KL、KF和PCPE这4种CPR方法在FTN系统中的适用性。其中M-BPS和M-KL需针对FTN-ISI进行修正,而KF和PCPE无需修正即可直接应用。重点分析PCPE方法适用于FTN系统的内在机理。

1.1 M-BPS方法

M-BPS方法将接收信号分块,每块包含 N 个符号,在 $[-\pi/4, \pi/4]$ 范围内划分 M 个候选相位值。对于候选相位 φ_m ,将块内信号旋转后硬判决,得到估计符号 $c_{m,n}$ 为

$$c_{m,n} = \arg \min_{q_i \in S} |r_n e^{-j\varphi_m} - q_i|^2 \quad (1)$$

式中: q_i 表示判决的目标点; n 表示在 k 时刻的信号块的块内符号索引, $n = k - N/2 + 1, k - N/2 + 2, \dots, k + N/2$; $|\cdot|$ 表示欧氏距离。

区别于传统Nyquist系统,在FTN系统中,判决集合 S 为含静态ISI的信号 s_k 的星座点集合($q_i \in S$),而非原始发送符号 a_k 的集合。在实际应用中,为降低复杂度,仅考虑 a_k 周围若干符号引入的静态ISI。然后,计算信号块内经相位旋转后的信号与其判决符号 $c_{m,n}$ 之间的欧

氏距离之和,并选择使此欧氏距离之和最小的相位 φ_m 作为在 k 时刻的信号块的相位估计值。

1.2 M-KL方法

M-KL方法通过最小化接收星座图概率分布与目标分布之间的KL散度来估计相位,估计的相位^[12]可表示为

$$\begin{aligned} \theta_{k, \text{est}} &= \arg \min_{\varphi_i} (D(f_{r_i, \varphi_i}(x, y) \| f(x, y))) \\ &= \arg \min_{\varphi_i} \left(- \sum_{n=k-N/2+1}^{k+N/2} \log f(R\{r_n w_k\}, I\{r_n w_k\}) \right) \\ &= \arg \min_{\varphi_i} (F(w_k)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $D(\cdot)$ 表示2个概率分布之间的KL散度; $R\{\cdot\}$ 和 $I\{\cdot\}$ 分别代表实部和虚部; w_k 为相位补偿因子, $w_k = \exp(-j\varphi_k)$; $f(x, y)$ 为概率密度函数; φ_k 表示相位噪声的估计值。当 φ_k 和真实相位噪声 θ_k 的差异最小时, $F(w_k)$ 达到最小值。因此,可通过递归算法寻找使 $F(w_k)$ 达到最小化的 φ_k ,即为 θ_k 的估计值。

在传统Nyquist系统中,目标概率密度函数 $f(x, y)$ 对应原始符号 a_k 的星座点分布,其表达式为

$$f(x, y) = \sum_{q_i \in A} p(q_i) f_{q_i}(x, y) \quad (3)$$

式中: A 是 a_k 的星座点集合, $q_i \in A$, $p(q_i)$ 是 q_i 出现的概率。

然而,在FTN系统中,目标分布需修正为含静态ISI的信号 s_k 的星座点集合 S ,其概率密度函数 $f_{\text{FTN}}(x, y)$ 表达式为

$$f_{\text{FTN}}(x, y) = \sum_{q_i \in S} p(q_i) f_{q_i}(x, y) \quad (4)$$

式中: S 为 s_k 的星座点集合,即包含了静态ISI的信号集合。

因此,M-KL方法需预先建立 $a_k \rightarrow s_k$ 的查找表,获得含ISI的星座图概率分布作为目标分布,方可适配FTN系统。

1.3 KF方法

KF方法在传统Nyquist系统中的原理与实现已较为成熟^[14]。由于其状态空间模型具有通用性,可直接应用于FTN系统而无需针对ISI进行结构性修正。KF通过递归估计相位噪声的状态变量,利用“预测-更新”框架实现相位跟踪。

1.4 PCPE方法

1.4.1 传统Nyquist系统中的PCPE原理

PCPE方法通过对接收星座点进行平方操作,消除调制相位,并计算其第一个主成分的角度以估计相位噪声。对于传统Nyquist信号,星座点平方后的第一个主成分角度的相位噪声的估计值 φ_k 与相位噪声 θ_k 的关系为

$$\varphi_k = 2\theta_k + \pi/2 \quad (5)$$

邓昊,李一飞,赵建等:超奈奎斯特相干光通信系统中的盲载波相位恢复方法

因此,通过估计 φ_k 可反推相位噪声 θ_k 。

1.4.2 FTN系统中的适用性分析

为验证PCPE对FTN信号的适用性,分析FTN调制后的星座图特征。设FTN压缩因子 $\varepsilon=0.95$,调制格式为正交相移(QPSK),得到FTN信号及其平方信号在无相位旋转和有 $\pi/6$ 相位旋转下的星座图如图1所示。

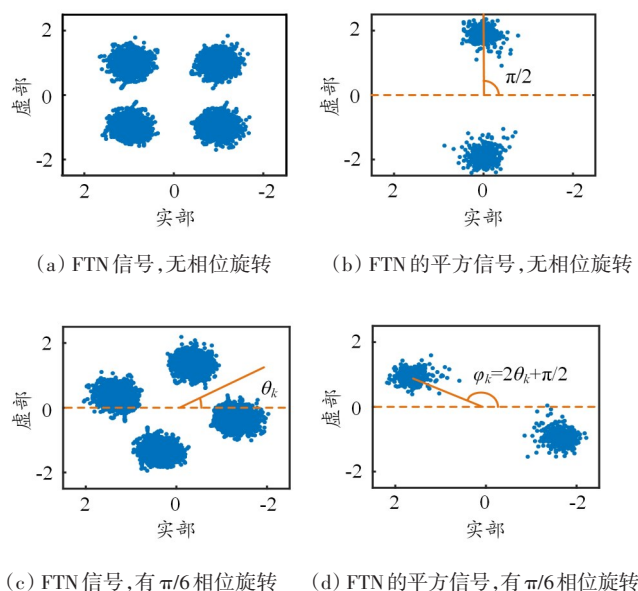


图1 FTN信号及其平方信号在无相位旋转和有 $\pi/6$ 相位旋转下的星座图

由图1可知,QPSK信号经FTN调制后,虽然星座点因ISI形成类似噪声的扩散,但其整体仍保持方形对称结构,如图1(a)和图1(c)所示。即使存在相位旋转 θ_k ,星座点仍保持对称分布。此时,平方信号的第一个主成分角度与相位噪声 θ_k 的关系仍满足式(5),如图1(b)和图1(d)所示。这是PCPE方法无需针对FTN-ISI进行修正即可直接适用的关键原因,即FTN-ISI主要改变星座点的幅度分布及离散程度,而未破坏其相位统计特性的主成分结构对称性。

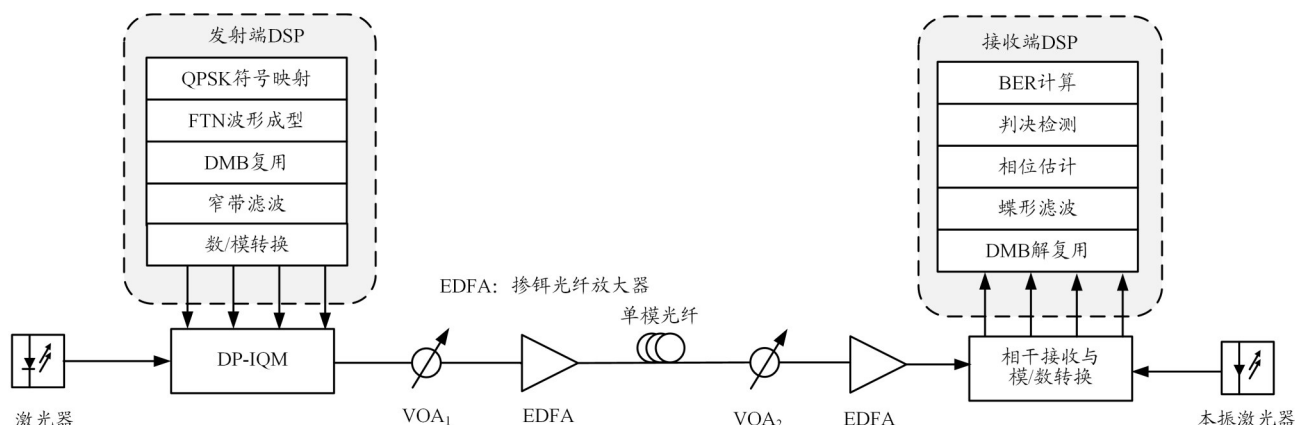


图2 仿真结构框图

2 仿真与实验验证

2.1 仿真设置与结果

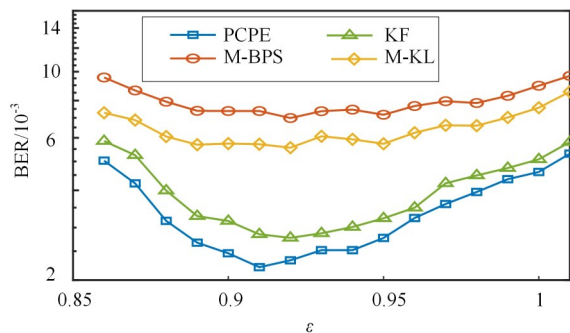
本文通过仿真研究不同CPR方法在FTN系统中的性能。图2为50 GBaud FTN-DMB系统的仿真结构框图,主要系统参数如表1所示。

表1 仿真系统参数

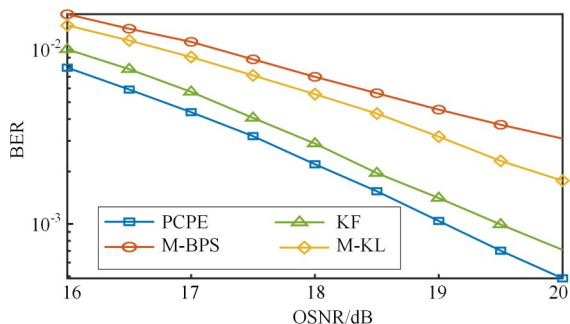
参数名称	数值
波特率/GBaud	50
调制格式	QPSK
滚降系数	0.01
频带数/个	4
窄带滤波器3 dB带宽/GHz	19
激光器线宽/kHz	100
光信噪比(OSNR)/dB	18

在仿真系统中,发射端首先将随机比特流映射为QPSK符号,经FTN波形成型生成4路FTN-DMB信号;随后通过窄带滤波与数/模转换,由双偏振IQ调制器(DP-IQM)将其调制至1 550 nm连续光载波。接收端光信号经相干接收及模/数转换后,依次进行DMB解复用、蝶形均衡、载波相位估计、判决检测及误码率(BER)计算。

本文首先研究系统性能随FTN频谱压缩因子 ε 的变化规律。图3(a)为不同CPR方法在窄带滤波器3 dB带宽19 GHz、OSNR 18 dB条件下的BER仿真结果。可以看出,所有方法的BER均随 ε 减小呈先降后升趋势; ε 较大时带宽受限效应显著致性能劣化; ε 降低缓解带宽受限使性能提升;但 ε 过小引入强ISI且DSP难以完全补偿,导致性能恶化回升。仿真表明,PCPE与KF方法的最优 $\varepsilon=0.91$,性能优于M-BPS与M-KL,其中PCPE最优,证明其在ISI条件下相位噪声补偿能力最强。图3(b)为不同CPR方法下BER随



(a) BER随 ε 变化的曲线



(b) BER随OSNR变化的曲线

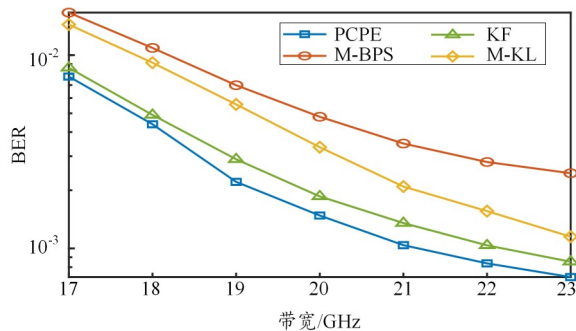
图3 不同CPR方法的BER随压缩因子和OSNR变化的曲线

OSNR变化的仿真曲线。可以看出,随着OSNR提升,各方法BER均单调下降,且PCPE在相同OSNR下始终保持最优性能。

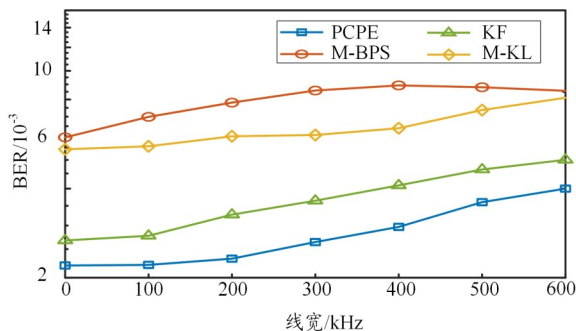
本文进一步调节窄带滤波器3 dB带宽,以对比不同带宽受限条件下4种CPR方法的BER差异,FTN压缩因子 ε 固定为0.91,结果如图4所示。由图4(a)可知,BER随带宽增大而单调下降;当窄带滤波器3 dB带宽在17~23 GHz时,PCPE方法的性能均优于其余3种CPR方法。图4(b)展示了系统BER随激光器线宽的变化曲线,其中窄带滤波器3 dB带宽设为19 GHz,OSNR固定为18 dB。由图4(b)可知,在0~600 kHz线宽范围内,4种CPR方法在FTN系统中均表现出良好的线宽鲁棒性;且PCPE方法在全线宽范围内始终保持最优BER性能。

2.2 实验设置与结果

本文在QPSK-FTN-DMB系统中开展实验验证,实验设置仅在图2的基础上在接收端DSP模块的DMB解复用前额外增加了基础的同步与频偏补偿模块,其余发射端与接收端DSP处理流程与图2设置一致。Matlab生成的基带信号经任意波形发生器(AWG)转换为模拟电信号,再通过DP-IQM调制至1 550 nm光载波。DP-IQM带宽为40 GHz。光信号经40 km单模光纤SMF传输后,通过可变光衰减器VOA₁调节



(a) BER随系统带宽变化的曲线

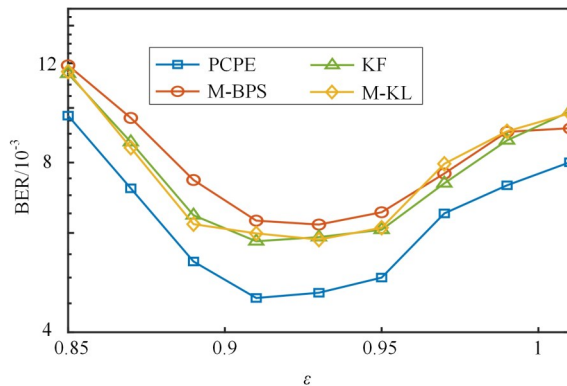


(b) BER随激光器线宽变化的曲线

图4 不同CPR方法BER随系统带宽和激光器线宽变化的曲线

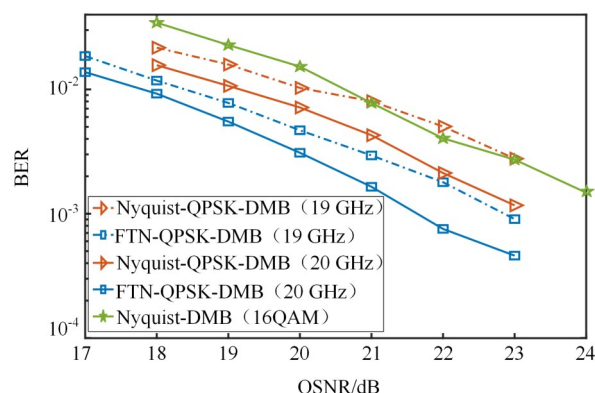
进入EDFA的输入功率,以控制OSNR。接收端采用带宽为40 GHz的相干接收机检测光信号,进入经相干接收机的光功率经VOA₂设定为-7 dBm。本振激光器功率为9.5 dBm,线宽约100 kHz。接收信号经80 GS/s实时示波器采样转换为数字信号后,送入接收端DSP完成后续处理。

图5(a)为系统BER随FTN压缩因子 ε 变化的实验结果(OSNR=20 dB,窄带滤波器3 dB,带宽19 GHz)。实验证实4种CPR方法的BER均随 ε 减小呈先降后升趋势,与仿真一致;其中PCPE方法最优压缩因子 ε 约为0.91,且在4种方法中性能最佳。FTN-QPSK-DMB、Nyquist-QPSK-DMB与Nyquist-DMB(16QAM)这3种系统的BER随OSNR变化的实验对比曲线如



(a) BER随 ε 变化的曲线

邓昊,李一飞,赵建等:超奈奎斯特相干光通信系统中的盲载波相位恢复方法



(b) BER随OSNR变化的曲线

图5 不同CPR方法BER随 ε 的曲线及不同系统在统一传输速率下BER随OSNR变化的曲线

图5(b)所示。图中QPSK系统后的括号数值表示窄带滤波器3 dB带宽(19 GHz或20 GHz),而16QAM系统后的括号表示其调制格式。三者速率均为200 Gbit/s,均采用PCPE方法,FTN-QPSK-DMB系统 ε 设为0.91。实验结果表明:在19 GHz和20 GHz带宽受限场景下,FTN-QPSK-DMB系统性能均优于传统Nyquist-QPSK-DMB系统;当BER为 1×10^{-2} 时,FTN-QPSK-DMB系统所需OSNR较Nyquist-QPSK-DMB系统降低约2 dB,且较Nyquist-DMB(16QAM)系统的优势更为显著。

3 结束语

本文针对FTN系统引入的ISI对传统CPR方法性能的影响,系统对比分析了M-BPS、M-KL、KF和PCPE 4种方法在FTN系统中的适用性。理论分析表明,PCPE方法无需针对FTN-ISI进行修正即可直接适用,这是其区别于M-BPS与M-KL需预先建立ISI查找表的关键优势。50 GBaud FTN-QPSK-DMB系统的仿真与实验结果验证了PCPE方法在存在FTN-ISI条件下性能最优。在带宽受限场景下,基于PCPE的FTN-QPSK-DMB系统相较于传统Nyquist-QPSK-DMB系统,在BER为 1×10^{-2} 时所需OSNR降低约2 dB。

参考文献:

- [1] Wang Ke, Liu Aijun, Liang Xiaohu, et al. A faster-than-Nyquist (FTN)-based multicarrier system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 947-951.
- [2] Ishihara T, Sugiura S, Hanzo L. The evolution of faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Access, 2021, 9: 86535-86564.
- [3] Guo Wanzhen, Zhang Ziheng, Fan Zhaoquan, et al. A novel pilot-aided timing recovery algorithm with high tolerance to impairments for OQAM-

based digital multi-band systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3539-3550.

[4] Zhu Yixiao, Jiang Mingxuan, Chen Zeyu, et al. Terabit faster-than-Nyquist PDM 16-QAM WDM transmission with a net spectral efficiency of 7.96 b/s/Hz[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(14): 2912-2919.

[5] Bahl L, Cocke J, Jelinek F, et al. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate (Corresp.)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(2): 284-287.

[6] Cai Yi, Chen Hungchang, Xiang Meng, et al. Adaptive pattern-dependent equalization for coherent optical fiber communication systems[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, USA. Washington: Optica Publishing Group, 2021: 1-3.

[7] Cai Yi, Chien Hungchang, Xiang Meng, et al. Combined symbol-pattern-dependent adaptive equalization and sequence detection for coherent optical fiber communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(5): 1320-1329.

[8] Deng Hao, Cai Yi, Zhao Jian. A novel decision-aided detection algorithm for performance enhancement in bandwidth-limited FTN-DMB systems[C]// IEEE. Proceedings of European Conference on Optical Communication. Copenhagen: IEEE, 2025: 1-4.

[9] Pan Dongwei, Li Chengcheng, Feng Yiqiao, et al. Carrier phase estimation using digital pilot-tone in a faster than Nyquist WDM transmission system[C]// Optica Publishing Group. Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference. Hong Kong: Optica Publishing Group, 2015: AS4F.4.

[10] Barbosa F A, Rossi S M, Mello D A A. Phase and frequency recovery algorithms for probabilistically shaped transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(7): 1827-1835.

[11] Sun Peng, Zhang Xiaoguang, Pan Dongwei, et al. A effective carrier phase recovery method in tight time-packing fast than Nyquist optical communication system[C]// Optica Publishing Group. Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). Sydney: Optica Publishing Group, 2020: C11G_2.

[12] Zhao Jian, Chen Liankuan. Carrier phase recovery based on KL divergence in probabilistically shaped coherent systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(9): 2684-2695.

[13] Li Yifei, Deng Hao, Zhao Jian. An improved KL divergence-based carrier phase recovery algorithm for FTN-DMB systems[C]// China Computer Federation. Proceedings of The 23rd International Conference on Optical Communications and Networks. Zhangjiajie: China Computer Federation, 2025: 1-3.

[14] Nguyen T H, Peucheret C. Kalman filtering for carrier phase recovery in optical offset-QAM Nyquist WDM systems[J]. Photonic Technology Letter, 2017, 29(12): 1019-1022.

[15] Diniz J C M, Fan Qirui, Ranzini S M, et al. Low-complexity carrier phase recovery based on principal component analysis for square-QAM modulation formats[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15617-15626.