

引用本文:曹明华,韩生春,张悦,等.离散小波变换的超奈奎斯特速率无线光FBMC通信系统性能[J].光通信技术,2025,49(5):21-26.

离散小波变换的超奈奎斯特速率无线光FBMC通信系统性能

曹明华¹,韩生春¹,张悦¹,张霞^{2,3},陈轩¹,张凌云¹

(1.兰州理工大学 计算机与通信学院,兰州 730050;

2.聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252000;3.山东省光通信科学与技术重点实验室,山东 聊城 252000)

摘要:为消除厄米特对称(Hermitian Symmetry)对滤波器组多载波(FBMC)在无线光通信(WOC)系统中的限制问题,提出了一种将离散小波变换(DWT)应用到光FBMC的新方案,并引入超奈奎斯特(FTN)技术提高系统频谱效率。采用蒙特卡洛法对系统的误码率、峰均比(PAPR)、频谱效率和复杂度进行了分析,并与传统方案进行了对比。仿真结果表明:与直流偏置光(DCO)-FBMC和非对称限幅光(ACO)-FBMC相比,DWT-FBMC系统在误码率为 10^{-4} 时信噪比提升约5.2 dB,频谱效率分别提高了1.5、1 bit·s⁻¹·Hz⁻¹;引入FTN后,FTN-DWT-FBMC系统能大幅提升频谱效率。

关键词:无线光通信;滤波器组多载波;小波变换;超奈奎斯特

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2025)05-0021-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.004

Performance of discrete wavelet transform based fast-than-Nyquist rate wireless optical FBMC communication system

CAO Minghua¹, HAN Shengchun¹, ZHANG Yue¹, ZHANG Xia^{2,3}, CHEN Xuan¹, ZHANG Lingyun¹

(1. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng Shandong 252000, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communications Science and Technology, Liaocheng Shandong 252000, China)

Abstract: To address the limitations imposed by Hermitian symmetry on filter bank multicarrier(FBMC) in wireless optical communication(WOC) systems, a novel scheme applying discrete wavelet transform(DWT) to optical FBMC is proposed, and faster-than-Nyquist(FTN) technology is introduced to enhance the spectral efficiency. The bit error rate(BER), peak-to-average power ratio(PAPR), spectral efficiency, and complexity of the system are analyzed using the Monte Carlo method and compared with conventional schemes. Simulation results show that, compared with direct current biased optical(DCO)-FBMC and asymmetrically clipped optical(ACO)-FBMC, the DWT-FBMC system achieves approximately 5 dB and 2 dB SNR improvement at a BER of 10^{-4} , and increases spectral efficiency by 1.5 bit·s⁻¹·Hz⁻¹ and 1 bit·s⁻¹·Hz⁻¹, respectively. With the introduction of FTN, the FTN-DWT-FBMC system significantly enhances spectral efficiency.

Key words: wireless optical communication, filter bank multi-carrier, wavelet transform, faster-than-Nyquist

0 引言

无线光通信(WOC)因其带宽不受限、安全性高和

通信容量充足等优势,成为当前研究的热点领域之一^[1-2]。多载波技术凭借其优异的抗多径干扰能力,在WOC系统中得到了广泛应用。其中,光正交频分复用(O-OFDM)通过并行子载波传输,有效抑制了符号间干扰(ISI),提升了系统的传输效率和可靠性,成为WOC中最具潜力的关键技术之一^[3]。然而,O-OFDM仍存在循环前缀(CP)导致的频谱效率降低和高峰均功率比(PAPR)等问题^[4]。作为替代方案,滤波器组多载波(FBMC)技术因其更低的带外辐射、更强的频偏鲁棒性以及无需CP等优势,逐渐成为光多载波系统的研究重点^[5]。目前,研究人员已提出多种FBMC在WOC

收稿日期:2025-04-28。

基金项目:国家自然科学基金项目(62265010)资助;甘肃省自然科学基金项目(24JRRA183)资助;山东省自然科学基金项目(ZR2022MF284)资助。

作者简介:曹明华(1979—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线光通信理论、光无线融合技术等。主持国家自然科学基金面上项目1项,地区项目1项,主持或参与完成了国家自然科学基金、“863”课题、甘肃省自然科学基金、甘肃省教育厅高等学校科研项目及横向项目共计10余项。



中的应用方案,如直流偏置光(DCO)-FBMC、非对称限幅光(ACO)-FBMC和Flip-FBMC等^[6-8]。然而,由于强度调制/直接检测(IM/DD)系统要求信号为非负实数,通常需采用厄米特对称方式,导致实际用于数据传输的子载波数量大幅减少,限制了系统的频谱效率和传输速率。

针对上述问题,现有研究主要采用2种方案:一种是混合调制方案,如将ACO-FBMC与脉冲幅度调制-离散多音调制(PAM-DMT)相结合,虽能提升频谱效率,但计算复杂度较高^[9];另一种是基于实数变换的方法,如离散小波变换(DWT),其不仅能够实现信号的正实数化,还能在误比特性能和计算复杂度上优于传统FBMC方案^[10-13]。此外,超奈奎斯特(FTN)技术的引入可在不增加带宽的情况下进一步提升系统传输速率^[14-15]。因此,本文提出一种结合DWT与FTN速率无线光FBMC(FTN-DWT-FBMC)系统,旨在优化系统的误比特性能、频谱效率和PAPR,同时降低计算复杂度,为WOC多载波技术的发展提供新的解决方案。

1 FTN-DWT-FBMC 系统模型

FTN-DWT-FBMC系统通过小波变换的多分辨率分析特性,优化了传统FBMC系统的性能,同时利用FTN技术提升了频谱效率。图1为FTN-DWT-FBMC系统的原理图。

1.1 核心模块与关键技术

1.1.1 FBMC/偏移正交幅度调制(OQAM)

FBMC系统采用OQAM,将输入的二进制比特流映射为QAM符号,并通过交错处理实部和虚部数据(间隔 $T/2$, T 为符号周期)来降低符号间干扰(ISI)。相较于传统OFDM系统,FBMC/OQAM在实数域满足正交性条件,进一步减少了干扰。

1.1.2 小波变换替换傅里叶变换(FFT)

传统FBMC系统使用逆傅里叶变换(IFFT)/FFT模块进行频域转换,而本系统采用逆离散小波变换(IDWT)和DWT模块。具体过程如下:

在发送端,将信号的实部和虚部分别通过低通和高通重构滤波器(构成综合滤波器组,SFB),合并后生成实数信号。这一过程避免了传统方案中厄米特对称操作的需求,简化了系统结构。

在接收端,通过分析滤波器组(AFB)恢复原始信号。小波变换的多分辨率特性使得信号能够更高效地分解为高频和低频分量,提升了系统的抗干扰能力。

1.1.3 FTN技术

为了进一步提高频谱效率,系统引入了FTN技术,通过升余弦滤波器对信号进行成型。FTN技术通过时间加速因子压缩符号间隔,从而在相同带宽内传输更多数据。然而,FTN会引入额外的干扰,系统通过优化设计将这种干扰控制在可接受范围内。

1.2 信号传输过程

1.2.1 信号成型与调制

在发送端,经过IDWT和FTN成型^[16]后的时域信号可表示为

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_{m,n} \underbrace{g\left(t - \frac{n\tau T}{2}\right)}_{\tilde{g}_{m,n}} e^{\frac{j2\pi m t}{T}} \quad (1)$$

其中, M 为载波个数, m 为子载波索引, n 为符号索引, $x_{m,n}$ 为经过IDWT后的正实数信号, τ 为时间加速因子, t 为时间, T 为符号周期。

成型后的信号通过并/串转换为串行数据流,再经过数/模转换生成模拟电信号。该电信号驱动激光器(LD),将电信号转换为光信号,并通过光学天线发射至自由空间光信道(大气信道)。

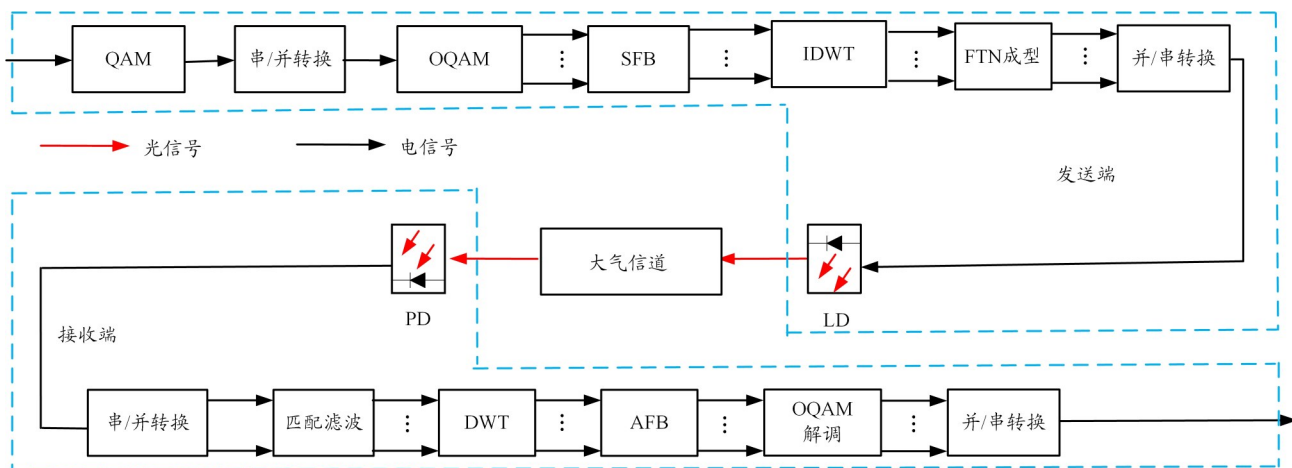


图1 FTN-DWT-FBMC系统模型

1.2.2 大气湍流信道模型

光信号在大气传输过程中会受到湍流效应的影响,导致光强随机起伏。该信道的衰落特性通常采用Gamma-Gamma分布建模,其概率密度函数^[17]可表示为

$$f(h) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}h) \quad (2)$$

其中, h 为信道的光强衰落系数($h > 0$), $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为修正的 $\alpha-\beta$ 阶第二类贝塞尔函数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数, α 和 β 为大尺度和小尺度散射系数,分别表示为

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma^2}{(1 + 1.11\sigma^{6/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma^2}{(1 + 0.69\sigma^{6/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (4)$$

其中, $\sigma^2 = 1.23C_n^2 \varphi^{7/6} L^{11/6}$ 为Rytov方差, φ 为波数($\varphi = 2\pi/\lambda$), L 为光线路径长度, λ 为波长, C_n^2 为大气折射率结构常数。

1.3 信号接收与恢复

1.3.1 光电检测

在接收端,光学天线收集光信号,并由光电探测器(PD,如雪崩光电二极管或PIN二极管)转换为电信号。接收信号可表示为

$$Y(t) = \gamma h s(t) + \omega(t) \quad (5)$$

其中, $\omega(t)$ 是加性高斯白噪声, γ 是光/电转换系数。

1.3.2 小波域信号恢复

均衡后的信号经过模/数转换和串/并转换,送入DWT模块进行分解。DWT通过Mallat算法^[18]将信号分解为高频(细节系数)和低频(近似系数)分量,如式(6)、式(7)所示。

$$c_{m,n}^R = \sum_n x_{m,n} h_1(2k-n) \quad (6)$$

$$d_{m,n}^I = \sum_n x_{m,n} g_1(2k-n) \quad (7)$$

其中, $h(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 为矩形窗函数, k 为符号索引。

1.3.3 OQAM解调与数据恢复

DWT输出的2路信号分别进行下采样,恢复出OQAM符号的实部和虚部。通过正交幅度调制(QAM)解映射和并/串转换,最终还原出原始二进制比特流。

2 仿真分析

本文采用蒙特卡洛仿真方法,对Gamma-Gamma信道环境下所提方案的关键性能指标进行综合评估。

仿真分为两部分:首先,在未引入FTN技术(符号间隔压缩因子 $\tau=1$)的条件下,评估DWT-FBMC方案的基本性能,并传统的DCO-FBMC和ACO-FBMC方案进行对比;其次,在DWT-FBMC方案的基础上引入FTN技术,构成FTN-DWT-FBMC系统,重点分析不同时间加速因子 τ 对系统性能的影响。仿真时,假定系统处于理想同步状态。系统星座映射采用40QAM。仿真参数如表2所示。

表2 仿真参数

参数	值
子载波数 M	16
符号数 n	1 000
升余弦滤波器滚降系数 ^[19] ε	0.3
湍流信道模型	Gamma-Gamma
波长 ^[20] λ/nm	1 550
大气折射率结构常数 ^[21] $C_n^2/m^{-2/3}$	弱湍流: $C_n^2 = 1 \times 10^{-17}$ 中湍流: $C_n^2 = 1 \times 10^{-15}$ 强湍流: $C_n^2 = 1 \times 10^{-13}$

2.1 系统误码率(BER)性能

系统BER与归一化信噪比关系^[22]可以表示为

$$B \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{3E}}{\sqrt{1 + 2\sigma_1^2 3E}} \right) \quad (8)$$

其中, E 为信噪比, B 为误码率, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数, σ_1^2 为零均值高斯分布的方差^[23]。

为验证所提基础方案(DWT-FBMC)在不同信道条件下的鲁棒性,图2展示了未引入FTN技术($\tau=1$)时,该系统在强、中、弱3种湍流强度下的BER性能。

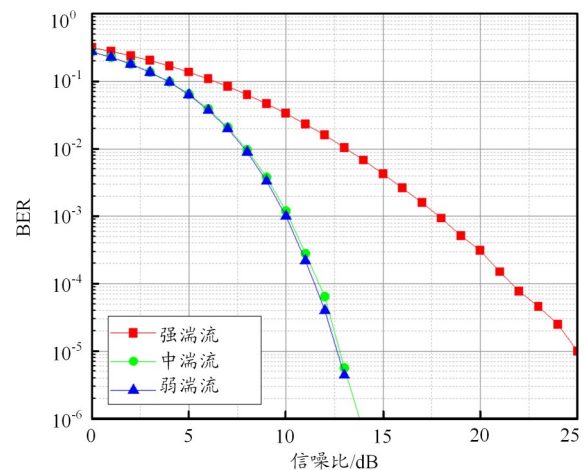


图2 不同湍流强度的DWT-FBMC BER性能

可以看出,当BER为 10^{-4} 时,强湍流条件下系统所需的信噪比约为22 dB,而中、弱湍流条件下的信噪比需求降低约10 dB。由此可见,湍流强度越低,DWT-FBMC系统的通信性能越优。此外,对比中、弱湍流下的BER性能可知,两者差异较小,因此后续仿真分析将基于中湍流强度展开。

在未引入FTN技术($\tau=1$)及中湍流强度下,不同方案的BER性能对比如图3所示。得益于小波变换的尺度正交性与平移正交性,DWT-FBMC系统展现出卓越的抗干扰能力。可以看出,当BER为 10^{-4} 时,该方案较DCO-FBMC和ACO-FBMC系统分别获得约5 dB和2 dB的信噪比增益;相较于CP-ACO-OFDM与CP-DCO-OFDM系统,其优势进一步扩大至3.5 dB和8 dB。这一显著改进源于DWT优异的时频局部化特性,能够有效抑制复杂信道环境下的多径干扰和噪声影响,这表明DWT-FBMC系统在湍流信道中具有更优的鲁棒性和传输可靠性。

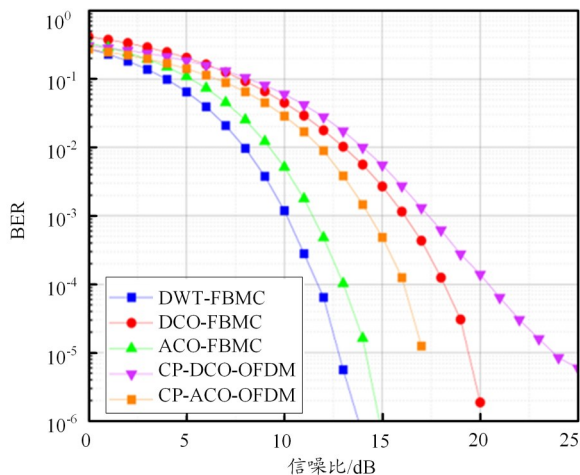


图3 中湍流强度下不同方案的BER性能

为了评估FTN技术在所提系统中的应用效果,引入FTN技术后,降低了ISI,得到不同加速因子下FTN-DWT-FBMC系统的BER性能如图4所示。可以看出,随着 τ 值的减小,ISI加剧,导致BER性能呈现渐进式劣化。具体而言,当BER为 10^{-4} 时,时间加速因子 $\tau=1$ 下降到 $\tau=0.8$,系统信噪比需求仅增加约4 dB;当 τ 进一步降至0.7时,相较 $\tau=0.8$ 时劣化约7.5 dB。尽管 τ 值降低会劣化系统性能,但BER仍能维持在 3.8×10^{-3} 的前向纠错(FEC)阈值之下,满足无失真传输要求。然而,当 $\tau < 0.6$ 时,系统误码率呈现指数级劣化。这表明时间加速因子 τ 的设置存在临界阈值,需在频谱效率与通信可靠性之间进行优化权衡。

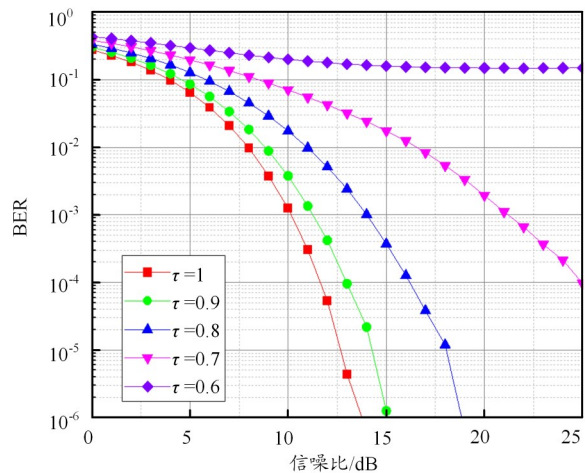


图4 不同加速因子 τ 下FTN-DWT-FBMC系统的BER性能

2.2 系统频谱效率

根据频谱效率的计算公式^[24],FTN-DWT-FBMC系统频谱效率可表示为

$$\eta = \frac{\log_2 p (1 - B)}{\tau} \quad (9)$$

其中, p 为调制阶数。

在DCO-FBMC与ACO-FBMC系统中,厄米特对称的约束保证了信号的实值特性,但由此产生的频谱效率损失不可忽视:DCO-FBMC系统损失了50%的子载波资源,ACO-FBMC系统则损失了75%。相比之下,DWT-FBMC系统通过小波变换的固有特性,实现了全部子载波的有效利用。未引入FTN技术($\tau=1$)时频谱效率性能如图5所示。可以看出,DWT-FBMC系统达到 $2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的理论峰值,分别是ACO-FBMC系统($0.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$)的4倍和DCO-FBMC系统($1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$)的2倍。传统CP-DCO-OFDM和CP-

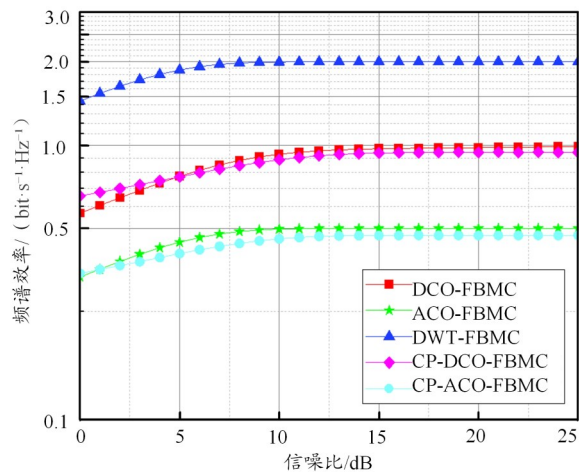


图5 频谱效率性能

ACO-OFDM 系统因 CP 开销的固有缺陷, 其频谱效率较对应 FBMC 系统降低约 7%~12%。

不同时间加速因子 τ 对 FTN-DWT-FBMC 系统频谱效率如图 6 所示。可以看出, 当 τ 从 1 降至 0.7、信噪比为 20 dB 时, 系统频谱效率由 $2.0 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 快速增长到 $2.85 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$; 而当 τ 继续降至 0.6 以下时, 效率提升幅度收敛至不足 3%。通过联合分析图 4 与图 6 的测试结果可知, 在 $\tau \in [0.7, 0.9]$ 的优化区间内, 系统既可实现约 28.5% 的频谱效率增益, 又能将 BER 维持在 10^{-3} 量级以下, 达成通信质量与频谱利用的最佳平衡。

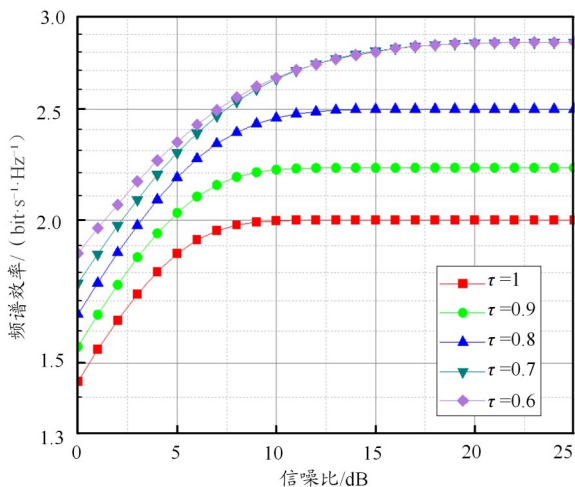


图6 不同时间加速因子 τ 下的 FTN-DWT-FBMC 系统频谱效率

2.3 系统 PAPR 性能

PAPR 过高是多载波系统普遍存在的技术难题^[25], 该参数是评估系统性能的关键指标之一, 其数学定义为

$$P = 10 \lg \frac{\max(|S(t)|^2)}{E(|S(t)|^2)} \quad (10)$$

其中, P 为系统的 PAPR, $E(|S(t)|^2)$ 表示信号的期望功率, $\max(|S(t)|^2)$ 分子表示信号的峰值功率。在 DCO-FBMC 和 ACO-FBMC 系统中, 当各子载波的信号峰值在时域同步叠加时, 会产生最大 PAPR 值; 即使部分子载波非同步叠加, 仍会导致 PAPR 显著升高。

未引入 FTN 技术 ($\tau=1$) 情况下, 不同 FBMC 系统的 PAPR 累积分布特性 (P_r 表示累积概率) 如图 7 所示。可以看出, DWT-FBMC 系统的 PAPR 性能较 DCO-FBMC 和 ACO-FBMC 系统有显著改善。这种优势源于 DWT 的两大特性: 子空间正交性 (不同尺度子空间之间的正交性避免了跨子空间的峰值叠加) 和相位离

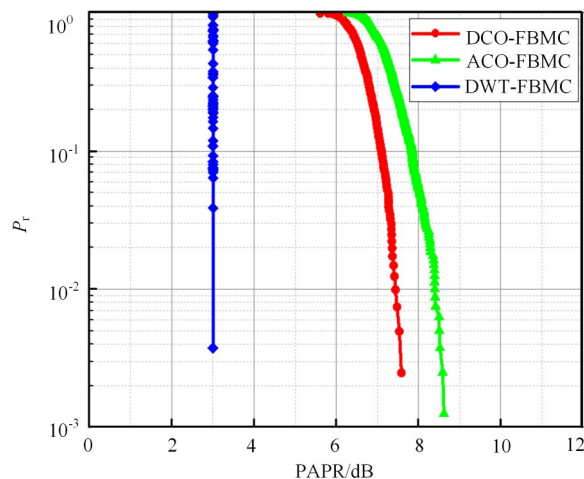


图7 系统 PAPR 性能

散性 (同一子空间内子载波间的固有相位差, 有效抑制了信号包络的峰值累积)。

2.4 系统计算复杂度分析

在计算复杂度方面, 基于滤波器组结构的 FBMC 系统通常高于传统 OFDM 系统。对于采用多相网络 (PPN) 实现的 FBMC 系统, 其计算复杂度主要来源于 2 个方面: 1) FFT 运算; 2) 由重叠因子 K 引入的额外处理开销^[26-27]。尽管复杂度较高, 但 FBMC 系统在抗干扰能力和系统灵活性方面具有显著优势。本文所有方案均采用 PPN 实现架构, 因此计算复杂度主要体现在 FFT 运算和小波变换 (Mallat 算法) 2 个核心模块。

理论分析表明, 若设 DWT 的计算复杂度为 $O(M)$, 则相同点数下 FFT 运算的复杂度为 $O(M \log_2 M)$ 。由于 DCO 和 ACO 方案必须满足厄米特对称条件, 其所需的 FFT 点数将增加至 $2N$ (DCO) 或 $4N$ (ACO), 导致计算复杂度相应倍增。相比之下, DWT-FBMC 方案通过直接采用小波变换, 避免了这种点数扩展, 从而显著降低了系统复杂度。各方案的计算复杂度如表 3 所示。可以看出, 本文提出的 DWT-FBMC 系统架构算法复杂度最低。

表3 计算复杂度对比

系统	计算复杂度
DWT-FBMC	$O(M)$
DCO-FBMC	$2O(M \log_2 M)$
ACO-FBMC	$4O(M \log_2 M)$

3 结束语

本文提出了一种 FTN-DWT-FBMC 系统架构。该

曹明华, 韩生春, 张悦, 等: 离散小波变换的超奈奎斯特速率无线光FBMC通信系统性能

方案通过采用IDWT/DWT模块替代传统的IFFT/FFT处理单元,从根本上消除了厄米特对称约束对系统性能的限制,实现了系统结构的优化升级。仿真实验结果表明,相较于传统DCO-FBMC和ACO-FBMC方案,DWT-FBMC方案展现出以下技术优势:在相同传输条件下,系统信噪比分别改善5、2 dB;频谱效率分别提升了1.5、1 bit·s⁻¹·Hz⁻¹。此外,系统PAPR和计算复杂度得到了有效降低。研究进一步将FTN技术与DWT-FBMC系统相结合,在保持传输可靠性的同时显著提升了频谱利用率,为下一代高速光通信系统提供了有效的技术解决方案。

参考文献:

- [1] SOLTANI M D, KAZEMI H, SARBAZI E, et al. High-speed imaging receiver design for 6G optical wireless communications: a rate-FOV trade-off[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(2): 1024–1043.
- [2] HUANG Y, HUANG H, CHEN H, et al. Free-space optics communications employing elliptical-aperture multimode diversity reception under anisotropic turbulence[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 40(5): 1502–1508.
- [3] LOWERY A J. Spectrally efficient optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2020, 378(2169): 20190180–1–20190180–17.
- [4] 石楠, 刘潇然, 熊俊, 等. 混合参数集多载波系统的峰均比抑制方法研究[J]. 电信科学, 2023, 39(10): 1–14.
- [5] FARHANG-BOROUJENY B. OFDM versus filter bank multicarrier[J]. IEEE signal processing magazine, 2011, 28(3): 92–112.
- [6] DENG Q, DANG J, ZHANG Z, et al. Performance analysis of DCO-FBMC with signal compression[C]//IEEE. Proceedings of 2023 11th International Conference on Intelligent Computing and Wireless Optical Communications (ICWOC). Chongqing: IEEE, 2023: 7–13.
- [7] HESHAM H, ISMAIL T. Hybrid NOMA-based ACO-FBMC/OQAM for next-generation indoor optical wireless communications using LiFi technology[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(3): 201–211.
- [8] BAHAAELDEN M S B, ORTEGA B, PEREZ-JIMENEZ R. Non-coherent optical FBMC signals based on extended gaussian function well time-frequency localized filters[C]//IEEE. Proceedings of 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Marrakesh: IEEE, 2023: 1418–1423.
- [9] KUMAR S, SINGH P. Spectral efficient asymmetrically clipped hybrid FBMC for visible light communication[J]. International Journal of Optics, 2021(1): 1–8.
- [10] WILS M, SHARMA M, MOONEN M. Per-Wavelet equalization for discrete wavelet transform based multi-carrier modulation systems[J]. IEEE Open Journal of Signal Processing, 2023, 4: 52–60.
- [11] DING J, WANG Y. A WiFi-based smart home fall detection system using recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2020, 66(4): 308–317.
- [12] KHALID A, RASHID F, TAHIR U, et al. Multi-carrier visible light communication system using enhanced sub-carrier index modulation and discrete wavelet transform[J]. Wireless Personal Communications, 2022, 127(1): 187–215.
- [13] 柯熙政, 张棋雯. FSO-WOFDM系统的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 247–253.
- [14] 曹明华, 孙沁雪, 姚瑞芳, 等. 指数Weibull信道下FTN无线光通信盲均衡优化算法[J]. 光学学报, 2024, 44(12): 195–204.
- [15] CAO M, QIU Y, ZHOU H, et al. Spectrum efficient faster-than-nyquist DCO-FBMC for optical wireless communications[C]//IEEE. Proceedings of 2022 IEEE 10th International Conference on Information, Communication and Networks (ICIN). Zhangye: IEEE, 2022: 178–182.
- [16] HAMA Y, OCHIAI H. On the achievable spectral efficiency of non-orthogonal frequency division multiplexing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(11): 6246–6257.
- [17] LI X, GENG T, MA S, et al. Performance improvement of coherent free-space optical communication with quadrature phase-shift keying modulation using digital phase estimation[J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4695–4701.
- [18] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674–693.
- [19] 李双洋, 白宝明, 马啸. 超奈奎斯特传输技术: 现状与挑战[J]. 电子学报, 2020, 48(1): 189–197.
- [20] YEH C H, LUO C M, XIE Y R, et al. Demonstration of 1-Gbps real-time optical wireless communication by simple transmission scheme[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52: 1–7.
- [21] AMIRABADI M A, KAHAEI M H, NEZAMALHOSENI S A. Low complexity deep learning algorithms for compensating atmospheric turbulence in the free space optical communication system[J]. IET Optoelectronics, 2022, 16(3): 93–105.
- [22] ANDRADE I G, LERUYET D, DECAMPOS M L R, et al. Bit error probability expressions for QAM-FBMC systems[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(5): 994–998.
- [23] ROSTOM Z, LERUYET D. SER analysis by Gaussian interference approximation for FBMC system in the presence of phase error[C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London: IEEE, 2015: 2662–2667.
- [24] KIM H, JUNG I, PARK Y, et al. Time spread-windowed OFDM for spectral efficiency improvement[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(5): 696–699.
- [25] LIU X, GE X, ZHOU H, et al. PAPR reduction for FBMC-OQAM system with laplace-based linear companding transform[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(1): 183–187.
- [26] AL-AMAIH H, KOLLÁR Z. Low complexity PPN-FBMC receivers with improved sliding window equalizers[J]. Physical Communication, 2022, 54: 101795–1–101795–9.
- [27] 朱寿乔. 多载波超奈奎斯特传输技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.