

引用本文: 樊欣, 张峰, 赵黎. 基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统[J]. 光通信技术, 2023, 47(6): 6-10.

基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统

樊欣, 张峰*, 赵黎

(西安工业大学 电子信息工程学院, 西安 710021)

摘要: 针对基于傅里叶变换光正交频分复用 (FFT-OFDM) 的非正交多址可见光通信 (NOMA-VLC) 系统存在可靠性低、用户公平性差等问题, 提出将提升小波变换 (LWT) 作为载波调制方式, 建立基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统, 介绍了系统中的信号处理过程, 构建了 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的室内空间实验环境。实验结果表明: 与基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统相比, 随着正交幅度调制方式的阶次由 4 增大到 64, 所提系统的平均误码率达到阈值 3.8×10^{-3} 时, 所需的信噪比 (SNR) 值较低, 至少低 4.4 dB; 用户性能差异变化不明显甚至不变。

关键词: 光通信; 非正交多址; 提升小波变换; 可靠性; 用户公平性

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-0006-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



NOMA-VLC system based on LWT-OFDM

FAN Xin, ZHANG Feng*, ZHAO Li

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Aiming at the problems of low reliability and poor user fairness in non orthogonal multiple access visible light communication (NOMA-VLC) system based on Fourier transform optical orthogonal frequency division multiplexing (FFT-OFDM), a carrier modulation method called lifting wavelet transform (LWT) is proposed to establish a NOMA-VLC system based on LWT-OFDM. The signal processing process in the system is introduced, and an indoor space experiment environment of $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ is constructed. The experimental results show that compared with the NOMA-VLC system based on FFT-OFDM, when the order of orthogonal amplitude modulation increases from 4 to 64, the required signal to noise ratio (SNR) value is lower, at least 4.4 dB lower, when the average bit error rate of the proposed system reaches the threshold of 3.8×10^{-3} . User performance differences do not change significantly or even remain unchanged.

Key words: optical communications, non-orthogonal multiple access, lifting wavelet transform, reliability, user fairness

0 引言

近年来,可见光通信(VLC)^[1-2]在多用户场景下的组网通信技术成为研究热点。在非正交多址 VLC (NOMA-VLC) 系统中,信号调制技术是影响通信系统可靠性的重要因素^[3-4]。目前,NOMA-VLC 系统中一般采用傅里叶变换光正交频分复用(FFT-OFDM)技术实

收稿日期: 2023-03-15。

基金项目: 国家自然科学基金(12004292)资助;陕西省科技厅一般项目-工业领域(2022GY-072)资助;西安市科技计划项目(2020KJRC0040)资助。

作者简介: 樊欣(1999—),女,硕士研究生,现就读于西安工业大学电子信息工程学院控制理论与控制工程专业,主要研究方向为室内可见光通信系统中非正交多址技术、非正交多址技术中的功率分配方法,曾荣获第十七届中国研究生电子设计竞赛省级二等奖。

***通信作者:** 张峰(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为现代通信技术,可见光通信。



现调制,但使用 FFT 增加了系统复杂度,同时 FFT-OFDM 通过加入循环前缀(CP)和保护间隔来减少载波间干扰,降低了传输效率^[6-7]。文献[8-10]采用离散小波变换(DWT)实现调制,与 FFT-OFDM 调制方式相比,系统性能虽然有所提升,但由于使用小波基函数,增加了系统的计算复杂度,不适用于多用户场景。文献[11]提出将提升小波变换 OFDM(LWT-OFDM)应用于 VLC 中,系统性能虽然优于基于 FFT-OFDM 的 VLC 系统,但未考虑系统中用户间的公平性。因此,本文提出一种基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统,在多用户场景下保证可靠性的同时,又能降低用户间的差异。

1 基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统

1.1 系统组成

在 OFDM 系统中,与 FFT 相比,LWT 不需进行卷

积和添加 CP,因此结构简单,计算复杂度低。LWT 通过提升小波算法中的预测算子与更新算子,对初始信号进行正变换与反变换。正变换分为分裂、预测、更新,反变换分为反更新、反预测及合并。因此,本文采用 LWT 实现 OFDM,无需进行卷积,实现过程简单,进而实现对基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统性能的优化。基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统框图如图 1 所示。

在发送端采用小波函数作为子载波,信号经 NOMA 调制、串/并转换得到多路信号,经逆提升小波变换(ILWT)调制后将多路信号转为一路 LWT-OFDM 信号,通过可见光信道传输。在接收端,经 LWT-OFDM 解调^[1]后,将采集到的单路信号转换为多路信号,通过并/串转换、NOMA 解调输出。

1.2 系统信号模型

在发送端,基于 LWT-OFDM 系统的待传输信号 X 为

$$X=[0, X_0, X_1, \dots, X_{i/2-1}, \dots, X_{i-1}] \quad (1)$$

其中, i 为子载波总个数。当选取 M 阶正交幅度调制(M-QAM)方式时,与基于 FFT-OFDM 的系统带有的信息量($\log_2 \frac{i}{2}$)相比,基于 LWT-OFDM 的系统带有的信息量是 $\log_2 i$,系统传输效率提高了 50%。本文结合 LWT 正变换公式^[11-14]对 X 做如下处理:

1)分裂。将信号 X 分为偶数序列 o_{i+1} 和奇数序列 d_{i+1} ,即

$$\begin{cases} o_{i+1}=X_{2n} \\ d_{i+1}=X_{2n+1} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $2n$ 表示偶数, $2n+1$ 表示奇数。

2)预测。选取策略 P ,用 o_{i+1} 预测 d_{i+1} ,即

$$d_{i+1,m}=d_{i+1}-P(o_{i+1}) \quad (3)$$

其中, $d_{i+1,m}$ 为预测误差,即高频小波系数, m 为进行预测和更新后得到的新序列。

3)更新。选取策略 U ,用 U 更新 $d_{i+1,m}$,即

$$o_{i+1,m}=o_{i+1}+U(d_{i+1,m}) \quad (4)$$

其中, $o_{i+1,m}$ 为尺度系数,即低频小波系数。策略 P 和策略 U 的选取计算过程^[11]如式(5)所示。

$$\begin{cases} P(o_{i+1,k})=(o_{i+1,k}+o_{i+1,k+1})/2 \\ U(d_{i+1,k})=(d_{i+1,k}+d_{i+1,k+1})/4 \end{cases} \quad (5)$$

其中, k 表示选取的小波分解层数。

根据上述原理,基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统在信道上传输的小波符号是高频系数和低频系数的组合。结合文献[10]推导可得,经过 ILWT 调制后形成的最终待传输信号 $\hat{X}(i)$ 表达式为

$$\hat{X}(i)=\frac{1}{\sqrt{s}} \times \left\{ \sum_{r=1}^r \tilde{x} o_{i+1,m} 2^{\frac{j}{2}} \phi[2^j m-r] + \sum_{r=1}^r \tilde{x} d_{i+1,m} 2^{\frac{j}{2}} \psi[2^j m-j] \right\} \quad (6)$$

其中, s 可以是任意整数或有理数。在分辨率分析中, $s=2^j$, j 为分辨率分析的分辨率级别, r 为小波分解尺度, $\tilde{x}$ 为经过星座映射和功率分配后的信号, $\phi[2^j m-i]$ 、 $\psi[2^j m-j]$ 分别表示过尺度函数和小波函数得到的信号。

与发送端相比,接收端对信号进行逆向操作。信号经过可见光信道传输后,接收端得到的基于

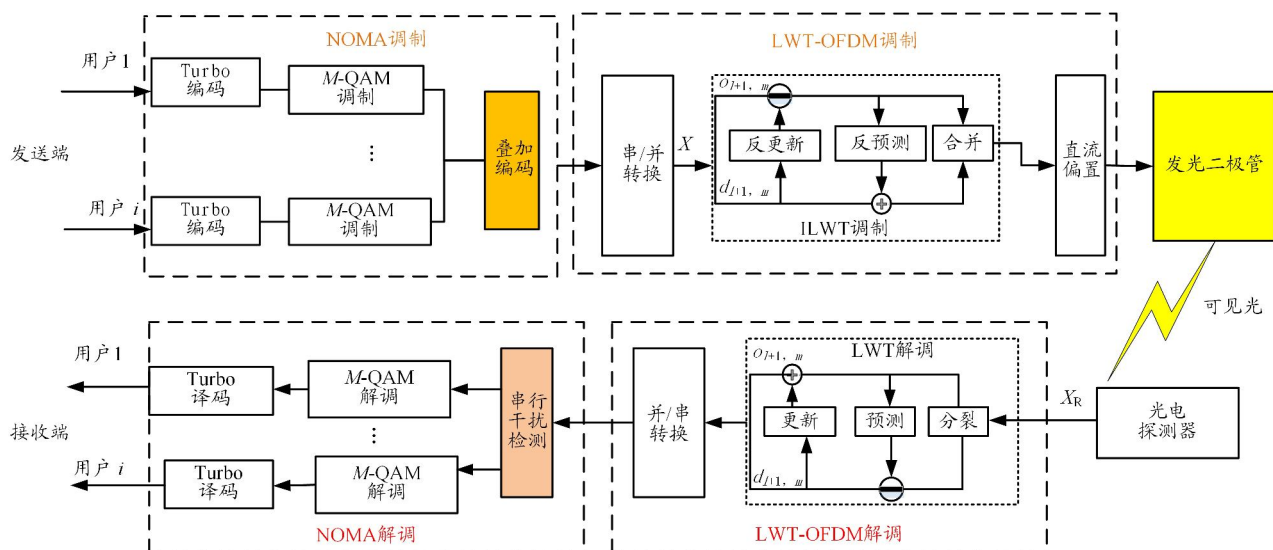


图1 基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统框图

樊欣,张峰,赵黎: 基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统

LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统的接收信号 X_R 为

$$X_R = \sum_{i=1}^r \sqrt{p_i} H_i + w_i \quad (7)$$

其中, p_i 为用户 i 的功率, H_i 表示用户的信道增益, w_i 表示第 i 个用户的噪声。

2 实验及性能对比

2.1 系统实验及参数设置

本文构建了一个 5 m×5 m×3 m 室内空间实验环境,用户 1(光电探测器 1)设置在室内空间的中心处,用户 2(光电探测器 2)设置在边缘处(边缘用户的信道增益比中心处用户的信道增益值小),通过光电探测器检测用户 1 和用户 2 的信号。实验系统实物图如图 2 所示,实验参数如表 1 所示。

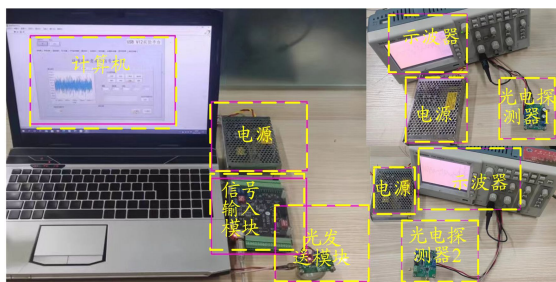


图 2 实验系统实物图

表 1 实验参数

参数	数值
LED 发光功率/W	1
LED 照明强度/cd	60
LED 调制带宽/Hz	5×10^7
子载波带宽/Hz	1.56×10^6
光电转换因子	1
LED FOV/(°)	70
探测器表面积/cm ²	1
墙面反射面积/cm ²	0.25
墙面的反射率	0.8
小区域反射面积 /cm ²	0.01
功率分配方式	固定功率分配

2.2 2 种系统性能对比实验分析

在 3 种不同的 QAM 方式(4/16/64QAM)下,本文实验对比了基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统、基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统的信噪比(SNR)性能,实验结果如图 3~图 5 所示。其中, haar、db2、sym4 为基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统采用的 3 种不同小波基时的误码率(BER)曲线, FFT-NOMA

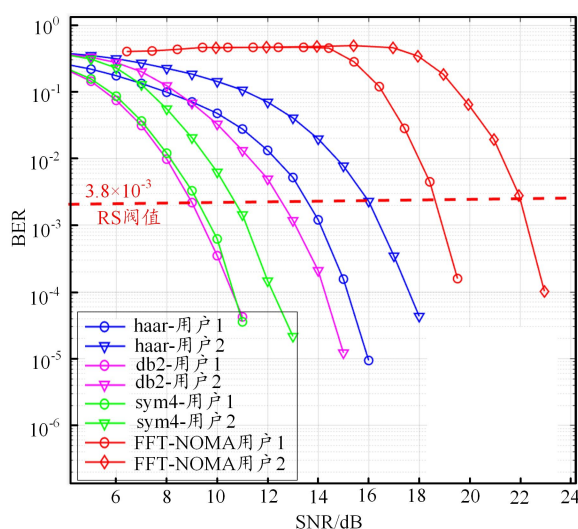


图 3 4QAM 的 SNR 性能

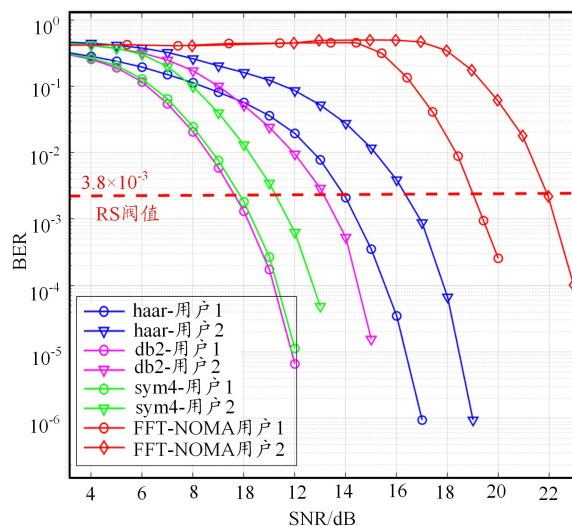


图 4 16QAM 的 SNR 性能

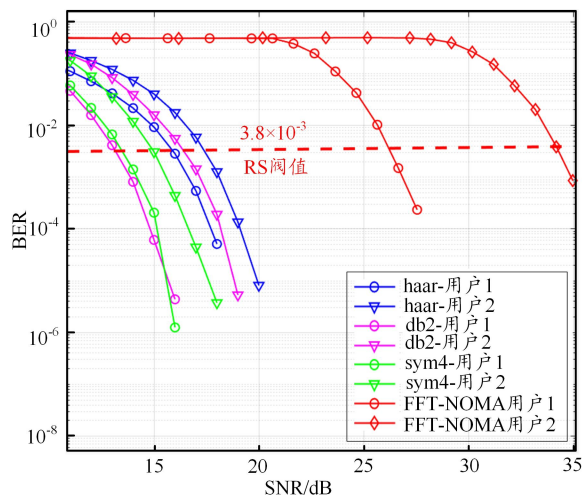


图 5 64QAM 的 SNR 性能

表 2 不同调制方式的 SNR 性能

调制方式	用户 1 达到 RS 阈值所需的 SNR/dB				用户 2 达到 RS 阈值所需的 SNR/dB				用户性能差异/dB			
	基于 FFT-OFDM 的系统		本文所提系统		基于 FFT-OFDM 的系统		本文所提系统		基于 FFT-OFDM 的系统		本文所提系统	
	FFT-NOMA	haar	db2	sym4	FFT-NOMA	haar	db2	sym4	FFT-NOMA	haar	db2	sym4
4QAM	18.1	13.7	9.3	9.3	22.1	16	12.6	10.8	4	2.3	3.3	1.5
16QAM	18.5	14.1	9.6	9.7	22.6	16.4	13.1	11.5	4.1	2.3	3.5	1.8
64QAM	26.7	15.6	13.5	13.6	34.2	17.9	17	15.4	7.5	2.3	3.5	1.8

为基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统的 BER 曲线。根据图 3~图 5 可得不同调制方式下用户 1 和用户 2 达到 RS 阈值所需的 SNR 值,如表 2 所示。可以看出,当 M -QAM 调制方式中的阶次 M 由 4 增大到 64 时,2 种系统在 SNR 性能和用户公平性性能的具体表现如下:

1) 基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统,用户 1、用户 2 的 SNR 分别增加了 8.6、12.1 dB。本文所提系统选取 haar 小波时,用户 1、用户 2 的 SNR 均只增加了 1.9 dB 性能;选取 db2 小波时,用户 1、用户 2 的 SNR 分别只增加了 4.2、4.4 dB;选取 sym4 小波时,用户 1、用户 2 的 SNR 分别只增加了 4.3、4.6 dB。

2) 本文所提系统达到 RS 阈值所需的 SNR 值均比基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统低,至少低 4.4 dB(用户 1 采用 4QAM 和 haar 小波时)。因此,本文所提系统的可靠性较好。

3) 基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统用户性能差异由 4 dB 增大到了 7.5 dB;而本文系统采取 3 种不同小波基,随着调制阶次增大,用户性能差异变化不明显甚至不变。因此,本文所提系统的用户公平性能较好。

3 结束语

本文提出了一种基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统,实现对系统的性能优化,并进行了实验验证。理论分析及实验结果表明:当 M -QAM 调制方式中的阶次 M 由 4 增大到 64,且 BER 达到 RS 阈值时,本文所提系统达到 RS 阈值所需的 SNR 值均比基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统低,因此系统可靠性较好;基于 FFT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统用户性能差异变化为 3.5 dB,而本文所提系统在 3 种调制阶次(4、16、64)情况下,采用 3 种不同小波基时的用户性能差异变化不明显甚至不变。因此,本文所提系统有效提高了 OFDM-VLC 系统性能。

参考文献:

- [1] ARFAOUI M A, GHAYEB A, ASSI C, et al. Comp-assisted NOMA and cooperative NOMA in indoor VLC cellular systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(9): 6020–6034.
- [2] ZHANG L, FANG F, WU Z. Energy efficient power allocation for OFDM-NOMA visible light communication systems with statistical channel state information[C]//International Symposium on Medical Information and Communication Technology, April 14–16, 2021, Xiamen, China. New York: IEEE, 2021: 110–115.
- [3] DIXIT V, KUMAR A. Error analysis of L-PPM modulated MIMO based multi-user NOMA-VLC system with perfect and imperfect SIC[J]. Applied optics, 2022, 61(4): 858–867.
- [4] 宋小庆,王慕煜,邢松,等. 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 106–115.
- [5] ASSAIDAH A, LIU Y, CHOW C W, et al. Demonstration of non-hermitian symmetry (NHS) IFFT/FFT size efficient OFDM non-orthogonal multiple access (NOMA) for visible light communication [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 1–5.
- [6] LEVENT V E, UYSAL M, SAGLAM G, et al. FPGA based DCO-OFDM PHY transceiver for VLC systems [C]// 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), November 28–30, 2019, Bursa, Turkey. New York: IEEE, 2019: 418–421.
- [7] AYKIRI G, AVCI B, ZEN A, et al. M-CSK and M-QAM modulated DCO-OFDM for visible light communication systems [C]//2022 30th signal processing and communications applications conference (SIU), May15–18, 2022, Safranbolu, Turkey. New York: IEEE, 2022: 1–4.
- [8] PANG J, NI S, WANG F, et al. Performance analysis of FSO system using FFT-OFDM and DWT-OFDM [C]//Optoelectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 7–11, 2019, Fukuoka, Japan. New York: IEEE, 2019: 1–3.
- [9] HARIPRASAD N, SUNDARI G. Comparative analysis of the BER performance of DWT OFDM over that of FFT OFDM in presence of phase noise [C]//International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE), February18–20, 2015, Chennai, India. New York: IEEE, 2015: 1–4.
- [10] KHAN A, KHAN S, BAIG S, et al. Wavelet OFDM with overlap FDE for non-Gaussian channels in precoded NOMA based systems [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97(4): 165–179.
- [11] 赵黎,董航航,张峰. 基于 LWT 的可见光 DCO-OFDM 系统[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 121–129.

樊欣,张峰,赵黎: 基于 LWT-OFDM 的 NOMA-VLC 系统

[12] AVCIB, AYKIRI G, SAVASCIHABES A, et al. A novel asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing system based on lifting wavelet transform for visible light communications [J]. International Journal of Communication Systems, 2022, 35(6): e5082-1-e5082-21.

[13] 丁莉,陈玮青. 提升小波变换算法的分析与研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2016, 14(4): 179-180.

[14] GAO J B, ZHAO E Y. A new OFDM system based lifting wavelet transform for wireless channel[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2005, 12(3): 21-25.

[15] AYVAZ E N, MARAS M, GOMEZ M, et al. A novel waveform design based on lifting wavelet transform for the 5G beyond[C]//IEEE 42th Interna-

tional Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2019), July 1-3, 2019, Budapest, Hungary. New York: IEEE, 2019: 660-663.

[16] 贾科军,郝莉,余彩虹. 室内可见光通信多径信道建模及 MIMO-ACO-OFDM 系统性能分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 57-68.

[17] 张峰,梁渊博,赵黎,等. 基于非正交多址的室内可见光通信系统性能优化方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 311-317.

[18] NGENE C, ETHAKUR P, SINGH G. Analysis of power allocation in visible light-NOMA communication using uniform probability distribution function[C]//2021 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (ICABCD), August 5-6, 2021, Durban, South Africa. New York: IEEE, 2021: 1-5.