

引用格式: ZHAO Li, DONG Hanghang, ZHANG Feng. Visible DCO-OFDM System Based on LWT[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0506002

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):0506002

基于LWT的可见光DCO-OFDM系统

赵黎,董航航,张峰

(西安工业大学 电子信息工程学院,西安 710021)

摘要:为了解决传统正交频分复用技术峰均比过高、复值型信号结构无法直接应用于强度调制直接检测系统等问题,将提升小波变换(LWT)应用于正交频分复用(OFDM)中,选择正交小波基作为子载波,通过对信号的预测与更新,将信号的高低频分离,并结合可见光通信(VLC)多次反射信道模型,建立了DCO-LWT-OFDM系统模型,推导了LWT-OFDM信号迭代分解与更新重构公式,对其性能分别进行了仿真分析与实验验证。模拟仿真实验表明,在 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ 室内空间中,当系统误码率为 10^{-4} 时,DCO-LWT-OFDM系统较DCO-FFT-OFDM系统的性能大约提高了5 dB,综合效率提高了70%,当系统峰均比为10dB时,DCO-FFT-OFDM系统的互补累积分布函数值接近 10^{-1} ,DCO-LWT-OFDM系统的互补累积分布函数值为0。实验验证中,选择1 W LED灯珠在光学导轨上搭建点到点DCO-LWT-OFDM VLC系统,传输距离为20 cm,系统调制误差率为11.4 dB,可靠性可达 10^{-4} 。本研究为提高可见光通信的传输速率,降低系统误码率,抑制系统峰均比提供了一种有效途径。

关键词:可见光通信;正交频分复用;提升小波变换;误码率;通信效率

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215005.0506002

Visible DCO-OFDM System Based on LWT

ZHAO Li, DONG Hanghang, ZHANG Feng

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

Abstract: In order to solve the problems of high peak-to-average ratio of traditional orthogonal frequency division multiplexing technology, complex-valued signal structure cannot be directly applied to intensity modulation direct detection system, Lifting Wavelet Transform (LWT) is applied to Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). The orthogonal wavelet basis is selected as the subcarrier. By predicting and updating the signal, the high and low frequencies of the signal are separated. Combined with the multiple reflection channel model of Visible Light Communication (VLC), the DCO-LWT-OFDM system model was established, and the iterative decomposition and renewal reconstruction formulas of LWT-OFDM signals were deduced. The performance of the DCO-LWT-OFDM system was simulated and verified by experiments. Simulation results show that in a $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ indoor space, when the bit error rate of the system is 10^{-4} , the performance of the DCO-LWT-OFDM system is about 5 dB higher than that of the DCO-FFT-OFDM system, and the overall efficiency is improved by 70%. When the system peak-to-average ratio is 10 dB, the value of complementary cumulative distribution function of DCO-FFT-OFDM system is close to 10^{-1} , and the value of complementary cumulative distribution function of DCO-LWT-OFDM system is 0. In the experimental verification, 1 W LED lamp beads were

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61271362),陕西省科技厅一般项目-工业领域(No.2020GY-054),西安市科技计划项目(No.2020KJRC0040)

第一作者:赵黎(1981-),女,教授,博士,主要研究方向为无线光通信关键技术研究。Email:pilly_lily@126.com

通讯作者:董航航(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为无线光通信关键技术研究。Email:1337136827@qq.com

收稿日期:2021-01-07; **录用日期:**2021-02-07

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

selected to build the point-to-point DCO-LWT-OFDM VLC system on the optical guide, the transmission distance was 20 cm, the system modulation error rate was 11.4 dB, and the reliability could reach 10^{-4} . This paper provides an effective way to improve the transmission rate of visible light communication, reduce the bit error rate and restrain the system PAPR.

Key words: Visible light communication; Orthogonal frequency division multiplexing; Wavelet lifting transform; Bit error rate; The efficiency of communication

OCIS Codes: 060.4510; 060.2605; 070.1170; 070.2465

0 引言

可见光通信(Visible Light Communication, VLC)具有宽阔的频谱资源、通信保密性好、绿色低功耗等优点,与传统无线射频通信形成优势互补,目前已成为高速无线通信和短距离接入技术的研究热点^[1-2]。由于发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的物理结构,VLC系统在信息传输时常常选择强度调制/直接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD),这便使得加载到LED两端的调制信号必须是实数信号^[3-4]。单极性的脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)和脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)可以满足上述条件,但是在系统符号速率较高时,会产生码间干扰(Inter Symbol Interference, ISI),这会使系统的性能降低。除此以外,室内非通信光源和荧光灯产生的窄带干扰,也会对PAM和PPM产生一定影响^[5-6]。

针对上述问题,文献[7]提出直流偏置的光正交频分复用(DC-bias Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, DCO-OFDM),虽然通过厄米尔对称方法,确保了输出信号为正实数,但使得平均光功率增大,峰均比(Peak-to-average Power Ratio, PAPR)过高,导致系统功率降低;文献[8]与[9]分别采用非对称裁剪的光OFDM(Asymmetrically Clipped Optical-OFDM, ACO-OFDM)与自适应OFDM符号分解串行传输,虽然可降低峰均比,但由于只有有效应用了奇载波且同时需要对调制信号进行厄米尔对称处理,效率较DCO-OFDM下降了一半。文献[10]提出基于离散小波变换的光OFDM(DCO-Discrete Wavelet Transform-OFDM, DCO-DWT-OFDM)系统,该方法有效性与基于快速傅里叶变换的光OFDM(DCO-Fast Fourier Transform-OFDM, DCO-FFT-OFDM)相易的前提下,可有效降低峰均比,提高可靠性,但基函数复杂且不能实现整数化处理,因此效率较低,难以工程化实现。而提升小波变换(Lifting Wavelet Transform, LWT)具有多分辨率分析特性,以及小波基函数的尺度正交和平移正交特性,通过对信号的预测与更新,将信号的高低频分离^[11-13]。本文在可见光传输信道下,经小波提升逆变换后合成DCO-LWT-OFDM信号,在接收端通过小波提升变换恢复出原始信号,起到调制解调的作用,提高可见光通信的传输速率,降低系统误码率,抑制系统峰均比。

1 VLC信道模型

单光源的室内可见光系统模型如图1所示,在长 L ,宽 W ,高 H 的室内空间,以地面一角为坐标原点,屋顶中心为兼顾照明和通信的发光二极管,坐标为 $(L/2, W/2, H)$,光电探测器(Photoelectric Detector, PD)位于距地面0.75高度平面上任意一点 $(x, y, 0.75)$,PD经过直射和反射传播接收到光信号。任意点的光强定义为

$$I(\phi) = I_0 \cos\phi \quad (1)$$

式中, I_0 是LED的中心发光强度, ϕ 是发射角。

PD与LED之间的距离 d 可表示为

$$d = \sqrt{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{W}{2}\right)^2 + (H - 0.75)^2} \quad (2)$$

得到该点的直射水平照度 E

$$E = I_0 \cos^m\phi \cos\varphi / d^2 \quad (3)$$

式中, φ 是入射角, m 为光源的辐射模式^[14]。 $P(x_1, 0, z_1)$ 点位于墙壁的反射点,同时可作为一次反射光路中的次级光源, S_1 表示LED直射向PD的光路, S_2 是LED直射到墙壁上的光路, S_3 表示的是经墙壁一次反射后

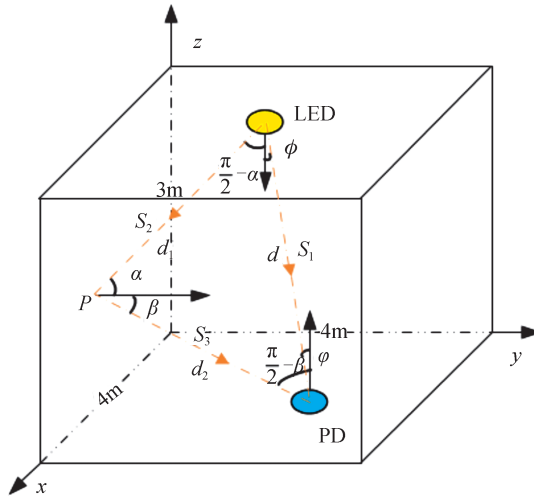


图1 单光源室内可见光系统模型
Fig.1 Single light source indoor visible light system model

照射到PD的反射光路。

P 作为次级点光源的光照强度 I_2 为

$$I_2 = kI_1 \cos(\beta) \quad (4)$$

式中, I_1 是LED光源直射到 P 点的光照强度, k 为墙面的反射系数。 P 点经过墙面的一次反射后在PD处的一次反射光照度

$$E' = \frac{I_2 \cos^{m-1} \beta \sin \beta}{(x_1 - x)^2 + y^2 + (z_1 - z)^2} \quad (5)$$

式中, β 是反射点照射到PD的发射角,则整个墙面在PD点的一次反射光照度为每一个 P 点到PD的光照度求和。

2 LWT-OFDM 系统模型

基于提升小波变换的OFDM系统如图2所示,是利用小波多分辨率分析的特点,将传统OFDM系统中

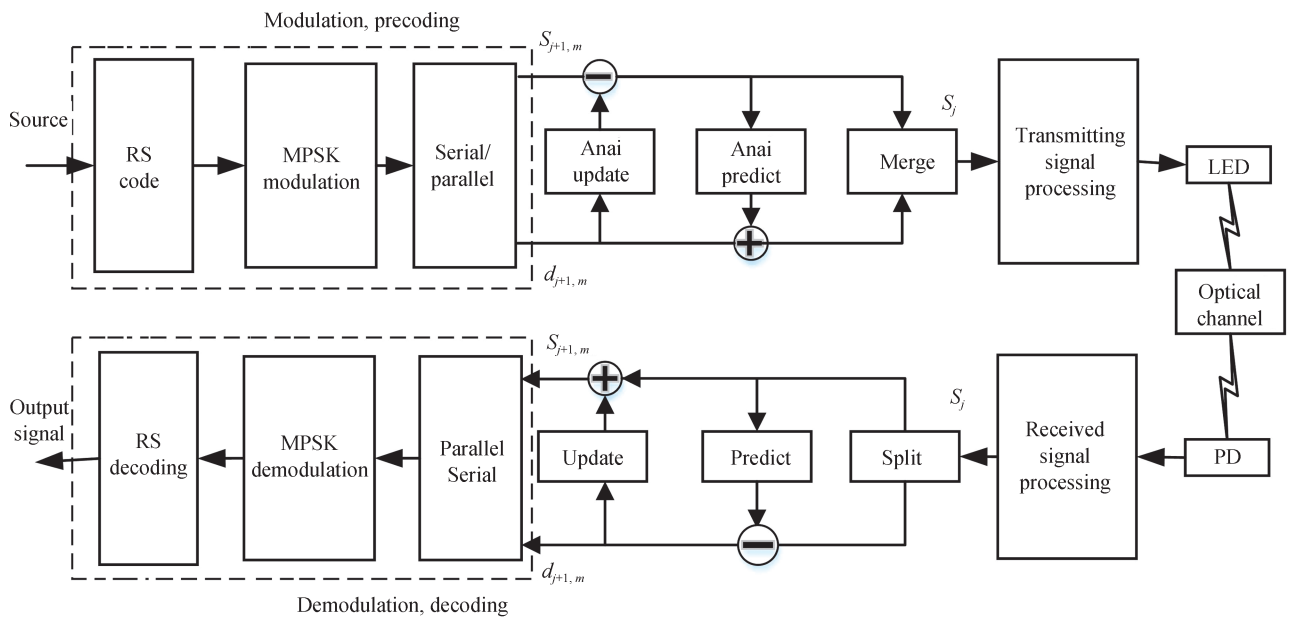


图2 可见光LWT-OFDM系统框图
Fig.2 Visible light LWT-OFDM system block diagram

的傅里叶变换替换为小波提升变换,用变换后的低频信息和高频信息来传输信号,确定合适的小波基函数,满足时域和频域的紧支撑特性,将调制信号经过处理通过光路传输。利用小波重构合成LWT-OFDM时域信号,在接收端通过小波分解恢复出原始信号,起到调制解调的作用。

假设经过MPSK调制后的数据符号 $X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$,由于加载到LED上的信号必须为正实数,因此需要对数据进行调制预编码,满足VLC的强度调制要求。基于FFT-OFDM系统需要厄米尔对称处理如式(6)、(7)所示。

$$X_{\text{DCO-FFT-mapping}} = \left[0, X_1, \dots, X_{\frac{N}{2}-1}, 0, X_{\frac{N}{2}-1}^*, \dots, X_1^* \right] \quad (6)$$

$$X_{\text{ACO-FFT-mapping}} = \left[0, X_1, 0, X_3, \dots, X_{\frac{N}{2}-1}, 0, X_{\frac{N}{2}-1}^*, \dots, X_1^* \right] \quad (7)$$

LWT-OFDM系统不需要,其调制预编码后的信号表示为

$$X_{\text{DCO-LWT-mapping}} = \left[X_0, X_1, \dots, X_{\frac{N}{2}-1}, X_{\frac{N}{2}}, X_{\frac{N}{2}+1}, \dots, X_{N-1} \right] \quad (8)$$

2.1 LWT-OFDM 信号迭代分解原理

原始数据序列 $X_j = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$,对该序列进行分裂处理,将其分为两部分,偶数序列 s_{j+1} 与奇数序列 d_{j+1} 。

$$\begin{cases} s_{j+1} = X_{j,2n} \\ d_{j+1} = X_{j,2n+1} \end{cases} \quad (9)$$

利用数据的局部相关性,选取一个预测算子 P

$$P(s_{j+1,k}) = (s_{j+1,k} + s_{j+1,k+1})/2 \quad k \in N \quad (10)$$

式中, N 是数据序列长度。

用偶数序列 s_{j+1} 去预测奇数序列 d_{j+1} ,得到的预测误差 $d_{j+1,m}$,将这个误差称为小波系数,是信号的高频成分,体现了信号的细节部分。

$$d_{j+1,m} = d_{j+1} - P(s_{j+1}) \quad (11)$$

选取一个更新算子 U

$$U(d_{j+1,k}) = (d_{j+1,k} + d_{j+1,k+1})/4 \quad k \in N \quad (12)$$

对偶数序列 s_{j+1} 进行更新,得到一个更新的结果 $s_{j+1,m}$,将其称为尺度系数,是信号小波变换后的低频部分,即信号的轮廓。将得到的更新结果作为下一步提升的输入,然后依次进行下一尺度的分裂、预测、以及更新,实现迭代处理。

$$s_{j+1,m} = s_{j+1} + U(d_{j+1,m}) \quad (13)$$

2.2 LWT-OFDM 信号更新重构原理

已知上述尺度系数 $s_{j+1,m}$ 和小波系数 $d_{j+1,m}$,选择上述更新算子 U 重构出偶数序列 s_{j+1}

$$s_{j+1} = s_{j+1,m} - U(d_{j+1,m}) \quad (14)$$

用上述预测算子 P 重构出奇数序列 d_{j+1}

$$d_{j+1} = d_{j+1,m} + p(s_{j+1,m}) \quad (15)$$

经过上述步骤,对得到的偶数序列 s_{j+1} 与奇数序列 d_{j+1} 合并,便可以重构出原始序列 X_j 。

$$X_j = \text{Merge}(s_{j+1}, d_{j+1}) \quad (16)$$

3 仿真分析

为了验证DCO-LWT-OFDM系统的可靠性、有效性和峰均比,以 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的室内房间为模型,首先对VLC室内多径干扰进行建模,在屋顶中心位置安装LED,PD位于距离地面 0.75 m 的平台上,将墙面划分为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 的反射小单元,在实验中仅考虑直射和一次反射光亮度。设置PD为三个位置 $(2, 2, 0.75)$ 、 $(1, 1, 0.75)$ 、 $(0.5, 0.5, 0.75)$,对LED和PD之间的多径信道模型进行分析,仿真参数如表1所示。

表1 点光源仿真参数
Table 1 Simulation parameters of point light source

Parameter	Value
Room size	4 m×4 m×3 m
Central luminous intensity of LED/lx	21
Reflectivity of walls ρ_i	0.8
Unit reflected area $\Delta A/cm^2$	0.01
LED FOV/(°)	90
Radiation mode of light source	1
Point light location	(2,2,3)

从图3可以看出,当PD位于房间坐标(2,2,0.75)时,直射光照度最大,离墙角越近,直射光照度逐渐减小,一次反射光照度逐渐增大。在(2,2,0.75)处的一次反射光照度约占直射光照度的2.2%,在(0.5,0.5,0.75)处的一次反射光照度约占直射光照度的20%,表明室内反射信道对系统有一定的影响。

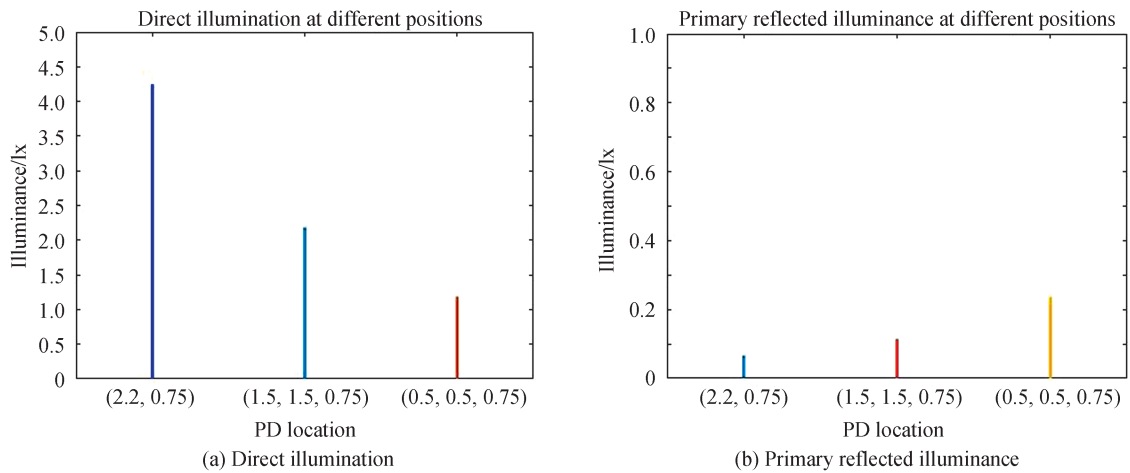


图3 PD位于不同位置的光照度
Fig.3 The illumination of PD at different locations

分别对DCO-FFT-OFDM和DCO-LWT-OFDM系统分别采用BPSK、QPSK、8PSK调制,在LWT-OFDM系统中小波基函数选择haar小波基。仿真参数为OFDM符号个数为2048,子载波个数为64,信道为可见光多径信道,设置信噪比范围为0到30 dB。如图4所示。可以得到在相同PSK调制阶数的情况下,LWT-OFDM系统可靠性能都优于FFT-OFDM系统,在BPSK调制的条件下,当误码率为 10^{-4} 时,LWT-

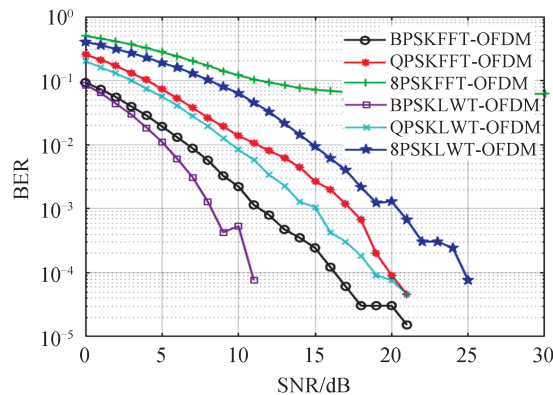


图4 FFT-OFDM与LWT-OFDM可靠性对比
Fig.4 Reliability comparison between FFT-OFDM and LWT-OFDM

OFDM相比于FFT-OFDM系统约提高了5 dB,当系统信噪比为12 dB时,LWT-OFDM系统的误码率达到 10^{-4} 。

结合式(6)~(8),可以得到ACO-FFT-OFDM和DCO-FFT-OFDM系统的信号频域结构相似,子载波总个数为 N ,采用M-PSK调制方式,DCO-FFT-OFDM系统能携带的信息量是 $\log M \cdot \frac{N}{2}$,ACO-FFT-OFDM系统能携带的信息量是 $\frac{1}{2} \log M \cdot \frac{N}{2}$,采用DCO-LWT-OFDM系统携带的信息量为 $\log M \cdot N$,效率较DCO-FFT-OFDM系统提高了50%。

在低载波利用率的前提下,为了降低系统的信道干扰,FFT-OFDM系统通常选择加载循环前缀(Cyclic Prefix,CP),其效率会进一步降低 $\frac{CP}{N+CP}$ 。如图5所示,在DCO-FFT-OFDM系统中分别加入0 CP、4 CP和8 CP,当信噪比为10 dB时,加载8 CP时的误码性能和DCO-LWT-OFDM系统加入0CP时相近,以 $N=64$ 个子载波为例,在保证可靠性的前提下,系统效率进一步提高了11%。

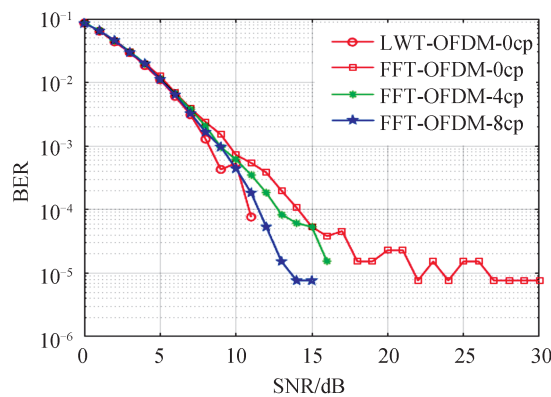


图5 不同循环前缀对比

Fig.5 Comparison of different cyclic prefixes

提升算法是一种快速有效的小波变换方法,经过小波变换后的系数是整数,容易重构并能实现原位运算,不依赖于傅里叶变换,因此不用计算卷积,减少了处理时间。表2为每一帧OFDM符号在不同的信噪比下处理所需要的时间,当信噪比为20 dB时,LWT-OFDM的时间是0.017 s,FFT-OFDM的时间是0.02 s,处理时间提高了15%。因此本文设计的DCO-LWT-OFDM系统较传统OFDM系统综合效率可提高70%以上。

表2 时间结果对比

Table 2 Comparison of time and results

Frame	LWT-OFDM time	FFT-OFDM time	LWT-OFDM BER	FFT-OFDM BER	SNR
1	0.094	0.077	$2.003\ 784 \times 10^{-1}$	$2.562\ 103 \times 10^{-1}$	0
1	0.051	0.028	$1.322\ 937 \times 10^{-1}$	$1.702\ 271 \times 10^{-1}$	2
1	0.05	0.032	$7.548\ 523 \times 10^{-2}$	$1.009\ 521 \times 10^{-1}$	4
1	0.018	0.016	$4.150\ 391 \times 10^{-2}$	$5.096\ 436 \times 10^{-2}$	6
1	0.016	0.017	$1.992\ 798 \times 10^{-2}$	$2.622\ 986 \times 10^{-2}$	8
1	0.022	0.015	$7.965\ 088 \times 10^{-3}$	$1.426\ 697 \times 10^{-2}$	10
1	0.025	0.017	$3.433\ 228 \times 10^{-3}$	$8.544\ 922 \times 10^{-3}$	12
1	0.017	0.016	$1.525\ 879 \times 10^{-3}$	$4.058\ 838 \times 10^{-3}$	14
1	0.017	0.016	$6.561\ 279 \times 10^{-4}$	$1.922\ 607 \times 10^{-3}$	16
1	0.017	0.018	$2.593\ 994 \times 10^{-4}$	$5.493\ 164 \times 10^{-4}$	18
1	0.017	0.02	$6.103\ 516 \times 10^{-5}$	$9.155\ 273 \times 10^{-5}$	20

对 DCO-FFT-OFDM 和 DCO-LWT-OFDM 进行峰均比特性验证,如图 6 所示。可以发现,相较于 DCO-FFT-OFDM 系统,基于 DCO-LWT-OFDM 系统峰均比特性更好,这是因为在时域的 DCO-FFT-OFDM 系统中,不同的子载波之间互相叠加,如果不同子载波加载相同的相位信息,会导致非常高的峰均比,但是在 DCO-LWT-OFDM 中,LWT 可以满足不同正交子空间中基函数的正交性,又能满足相同正交子空间中基函数的不同平移间的正交性,所以在不同子空间中不会得到较高的峰均比,而在相同的子空间,子载波不但具有正交性,并且之间存在相位差,因此也会形成较低的峰均比。

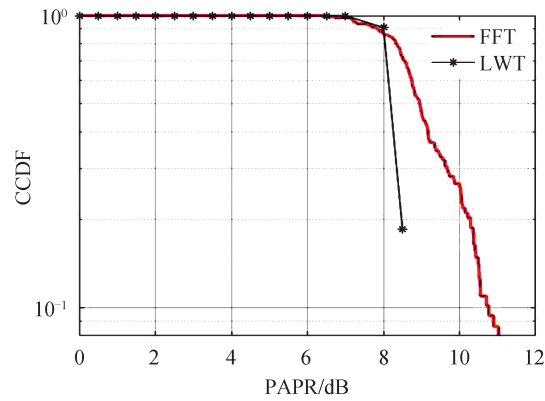


图 6 FFT-OFDM 与 LWT-OFDM 系统峰均比特性
Fig.6 Peak ratio characteristics of FFT-OFDM and LWT-OFDM systems

4 实验验证

针对本文提出的 LWT-OFDM 系统,将其在硬件实现,图 7 是搭建的实验平台,主要包括发射模块和接收模块,将 LED 和 PD 安装在导轨上,传输距离为 20 cm,在光路上加入聚光片,可以提高光信号的传输能力。LED 型号 4.8 mm LISUNG,光电探测器选择雪崩光电二极管 LSSAPD9-500,聚光片选择凸透镜。

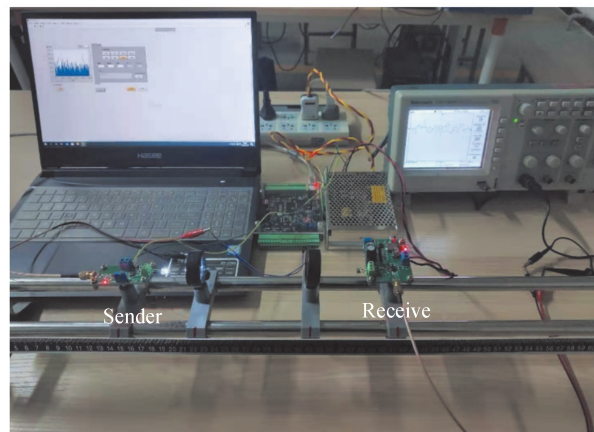


图 7 LWT-OFDM 实验环境
Fig.7 LWT-OFDM experimental environment

在上述实验环境下,发射端分别选择 BPSK 和 QPSK 调制,发送与接收的星座图如图 8 所示,其中红色是发送端的星座图,绿色是经过信道后接收端的星座图,对其星座图采用调制误差率 (Modulation Error Rate, MER) 分析,接收端 BPSK 星座图的 MER 值为 11.4 dB,可以保证 99.97% 被正确解调;接收端 QPSK 星座图的 MER 值为 10.2 dB,可以保证 99.88% 符号被正确解调。

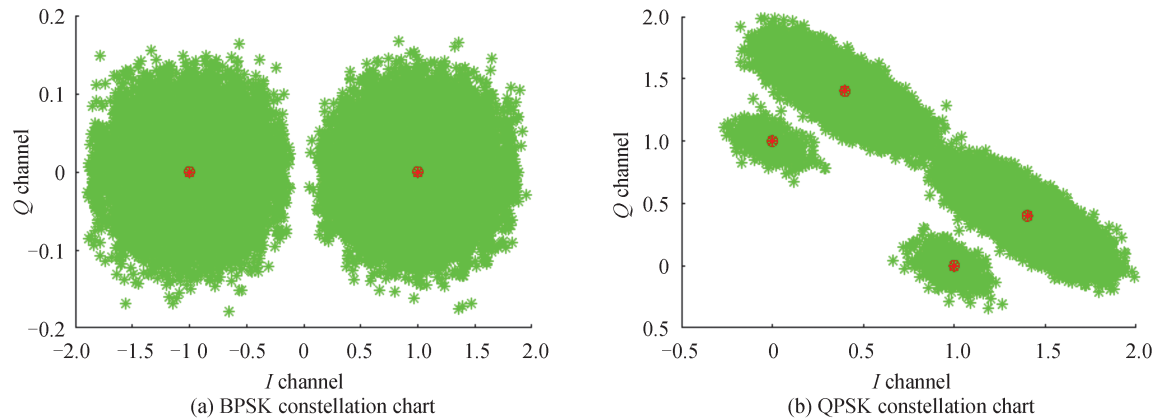


图8 不同调制方式的星座图
Fig.8 Constellation with different modulation modes

5 结论

采用LWT的多分辨率分析及实值化特征,提出了一种基于LWT的DCO-LWT-OFDM系统,相比于传统DCO-FFT-OFDM系统,本文所提系统在有效性、可靠性及峰均比等方面均具有较大优势,具有更广泛的适用性。本文搭建了NLOS信道模型,数值计算与仿真分析表明室内一次反射光照度在室内中心点占直射光照度2.2%,影响较小,而在室内周边点高达20%,对VLC通信可靠性影响较大。在室内多径信道环境下,子载波数为64,小波基函数为haar小波基,调制方式为M-PSK,通过仿真分析和实验验证,在BPSK调制方式下,当系统误码率为 10^{-4} 时,DCO-LWT-OFDM系统相比DCO-FFT-OFDM系统可获得5 dB增益,综合效率提高了70%,在峰均比特性方面,DCO-LWT-OFDM系统相比DCO-FFT-OFDM系统的峰均比性能更好,可有效减小信号峰值超出非线性器件的线性范围概率。在实验室环境,选择1W LED灯珠在光学导轨上搭建点到点DCO-LWT-OFDM VLC系统实验平台,传输距离为20 cm,测试结果表明系统通信稳定,分别采用BPSK与QPSK时系统的调制误差率MER分别为11.4 dB和10.2 dB,可分别保证99.97%和99.88%符号被正确解调,确保了信号的有效传输。本文提出的VLC通信系统具有较高的有效性及可靠性,可有效增强VLC通信系统的应用前景。

参考文献

- [1] DING Deqiang, KE Xizheng. Visible light communication and its key technologies [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(2):114-117.
丁德强,柯熙政. 可见光通信及其关键技术研究[J]. 半导体光电, 2006, 27(2):114-117.
- [2] WANG Y Q, WANG Y G, CHI N, et al. Demonstration of 575-Mb/suplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB led and phosphor-based LED [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1203-1208.
- [3] ZHANG Yuanying, WANG Jikang, ZHANG Wuhong, et al. LED-based visible light communication for color image and audio transmission utilizing orbital angular momentum superposition modes [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17300-17311.
- [4] CHEN Quanrun, ZHANG Tao. Light source layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0406003.
陈泉润,张涛. 室内可见光通信系统的光源布局优化及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0406003.
- [5] MA X, YANG F, LIU S, et al. Channel estimation for wideband underwater visible light communication: a compressive sensing perspective[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 311-321.
- [6] MESLEH R, ELGALA H, HAAS H. LED nonlinearity mitigation techniques in optical wireless OFDM communication systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(11): 865-875.
- [7] DENG Lijun, FAN Yangyu. Research on the performance of indoor visible light Non-DC-Biased OFDM system based on color/frequency/space three-dimension resources multiplexing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 190-199.
邓莉君,樊养余. 色/频/空三维资源复用的室内可见光非直流偏置OFDM系统性能研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 190-199.
- [8] AZIM A W, GUENNEC Y L, MAURY G. Performance analysis of precoded layered ACO-OFDM for visible light communication systems[J]. Optics Communications, 2019, 440: 49-60.

- [9] JIA Kejun, YANG Boran, et al. Design and research of adaptive O-OFDM symbol decomposing with serial transmission system in visible light communication[J]. Journal on Communications, 2020, 41(9): 179-189.
贾科军, 杨博然, 等. 可见光通信自适应 O-OFDM 符号分解串行传输系统设计与研究[J]. 通信学报, 2020, 41(9): 179-189.
- [10] GAO Haiyue, PAN Wei. Analysis of phase noise induced by four-wave mixing in long-haul optical orthogonal frequency-division multiplexing based on wavelet transforms[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1106006.
高海越, 潘炜. 基于小波变换的长距离光正交频分复用系统中四波混频引起的相位噪声分析[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1106006.
- [11] ZHANG Su, FU Qiang, DUAN Jin, et al. Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211002.
张肃, 付强, 段锦, 等. 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211002.
- [12] ABBAS A S. A new post-coding approach for PAPR reduction in DC-biased optical OFDM systems[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(4): 302-305.
- [13] ZHANG Tong, LIN Chun, CHEN Honglei, et al. A method of improving IRFPA imaging bad pixel detection accuracy based on multi-direction wavelet[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 78-83.
张瞳, 林春, 陈洪雷, 等. 基于多方向小波提升 IRFPA 盲元检测精度方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 78-83.
- [14] ZHAO Li, PENG Kai. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706001 .
赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0706001.