

# 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展

宋小庆\*, 王慕煜, 邢松, 赵梓旭

陆军装甲兵学院兵器与控制系, 北京 100072

**摘要** 调制技术是提高可见光通信(VLC)系统通信性能的关键技术之一。高速 LED 可见光通信链路的脆弱性以及多径效应带来的码间串扰极大影响了 VLC 系统通信性能。为了解决这个问题,提出了光正交频分复用(O-OFDM)调制技术。总结了 O-OFDM 调制技术的研究进展,从调制策略上对近年来提出的调制技术进行了分类,分别对不同调制技术进行了机理分析以及对 VLC 通信性能的影响进行了分析,并对下一步工作进行了展望。

**关键词** 光通信; 正交频分复用; 码间串扰; 频带利用率; 误码率

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.120008

## Progress of Orthogonal Frequency Division Multiplexing Based on Visible Light Communication

Song Xiaoqing\*, Wang Muyu, Xing Song, Zhao Zixu

Department of Weaponry and Control, Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China

**Abstract** Modulation technology is a key technology to improve the performance of visible light communication (VLC) system. The fragility of high-speed LED visible light communication links and inter-symbol interference caused by multipath effect seriously affect the VLC system performance. To solve this problem, the various optical orthogonal frequency division multiplexing (O-OFDM) modulation technologies are proposed. An overview of O-OFDM modulation technologies is summarized and the proposed modulation technologies are classified into four types according to their modulation strategies. Taking different modulation technologies as examples, these strategies are used to analyze the mechanism and the VLC communication performance. In the end, the next step of work is prospected.

**Key words** optical communication; orthogonal frequency division multiplexing; inter-symbol interference; frequency utilization; bit error rate

**OCIS codes** 060.2605; 060.4080; 060.4230; 060.4510

## 1 引言

LED 可见光通信(VLC)技术利用可见光作为媒介进行信息传输,兼具照明和通信的双重功能,具有免电磁干扰、无需许可验证、绿色环保、保密性高、兼容性好等优点<sup>[1]</sup>,受到了研究者的广泛关注。由于 VLC 系统中的 LED 调制带宽有限以及通信链路的脆弱性,除了选用均衡技术拓宽 LED 带宽外<sup>[2]</sup>,选择合适的调制技术是提高 VLC 通信性能的关键。

VLC 系统调制技术主要分为单载波调制和多

载波调制<sup>[3]</sup>,单载波调制电路相对简单,适用于通信速率和成本需求不高的通信场合<sup>[4]</sup>。常见的单载波调制技术有关键控制技术(OOK)、脉冲位置调制技术(PPM)、差分脉冲位置调制(DPPM)、数字脉冲间隔调制(DPIM)和定长数字脉冲间隔调制(FDPIM)<sup>[5-9]</sup>等。但在高速 VLC 中,当信号带宽接近于信道带宽时,信号中前后码元会产生波形畸变和时域展宽,造成脉冲信号的重叠,产生码间串扰(ISI)<sup>[10]</sup>。为进一步提升系统通信性能,研究者提出了不需要复杂信道均衡技术的多载波调制技术。

正交频分复用(OFDM)技术是一种典型多载波

收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2018-06-30; 录用日期: 2018-08-02

基金项目: 军队重点实验室建设基金项目(SQDQ09)

\* E-mail: swxq@vip.sina.com

调制技术。该技术最早应用于无线电通信领域,并随着数字信号处理技术的发展而不断推进。1966年,Chang<sup>[11]</sup>首次提出利用子信道频谱部分重叠但又互不影响的策略实现数据传输,奠定了 OFDM 系统原型。1971年,Weinstein等<sup>[12]</sup>提出将离散傅里叶变换(DFT)和离散傅里叶逆变换(IDFT)应用到 OFDM 系统中,降低了系统复杂度。1980年,Peled等<sup>[13]</sup>引入了循环前缀(CP)的概念,能够消除信号码间串扰。20世纪90年代,快速傅里叶变换(FFT)技术引入使得 OFDM 调制和解调复杂度大幅降低。和单载波调制技术相比,OFDM 通过拓展子载波符号周期、减少子信道带宽、循环前缀以及正交选择等策略,提高了系统频带利用率、减少了码间串扰,受到了学术界和产业界的极大关注和广泛研究。

由于 VLC 系统采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式,双极性 OFDM 信号不能直接加载到 LED 上,为保证传输信号非负性,研究者们提出了基于 VLC 的非对称限幅直流偏置光 OFDM(ADO-OFDM)、增强单极性 OFDM(eU-OFDM)、基于哈特利的单极性 OFDM(HU-OFDM)、离散余弦变换 OFDM(DCT-OFDM)、非对称与对称限幅光 OFDM(ASCO-OFDM)<sup>[14-19]</sup>等光 OFDM(O-OFDM)调制技术。如2012年,Kottke等<sup>[20]</sup>在实验室利用波分复用技术(WDM)实现了误码率(BER)低于  $2 \times 10^{-3}$ 、10 cm 下基于 RGB-LED 的 1.25 Gbps 数据传输。2014年,复旦大学徐宪莹<sup>[21]</sup>利用任意波形发生器(AWG)产生的 ACO-OFDM 信号加载到 LED 芯片上进行传输,传输速率可达 750 Mbps。2016年,Figueiredo等<sup>[22]</sup>利用直流偏置光 OFDM(DCO-OFDM)技术在 50 cm 内实现 BER 低于  $3.8 \times 10^{-3}$ 、速率达到 50 Mbit/s 的 VLC 通信。同年,复旦大学迟楠教授团队<sup>[23]</sup>在室内 1 m 自由空间下采用 DCO-OFDM 调制技术实现了最大通信速率达到 9.51 Gb/s 的 VLC 系统,BER 低于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。2017年,Hussein等<sup>[24]</sup>实现了基于 DCO-OFDM 的 VLC 系统,通信距离 4 m,通信速率 172 Mbit/s,BER 小于  $1.9 \times 10^{-3}$ 。同年,英国爱丁堡大学 Islim 等<sup>[25]</sup>采用 DCO-OFDM 调制技术,实现了最高速率为 11.12 Gb/s 的 VLC 系统。2018年,复旦大学团队<sup>[26]</sup>在已有基础上,实现了室内 1 m 自由空间下基于 DCO-OFDM 调制的 VLC 系统,其最大通信速率达到 10.72 Gb/s,BER 低于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。

本文对近年来出现的 O-OFDM 调制技术进行了总结梳理,从调制策略角度对调制技术进行了分

类,以 4 种调制策略为例,将其对 VLC 系统性能的影响进行了分析对比,论文最后对 O-OFDM 技术在 VLC 中应用进行了展望。

## 2 OFDM 技术基本原理

OFDM 技术将信道划分为若干相互正交子信道,再将高速串行数据流转换成低速并行子数据流发送到子信道上。每个子信道上信号带宽小于信道的带宽,因此每个子信道上可以看成平坦性衰落,从而降低和消除码间串扰。如图 1 所示,OFDM 传输系统中子载波频谱虽部分相互重叠,但在接收端利用子载波的正交性可以对数据进行分离提取,因此 OFDM 调制能节省较多的频谱资源。

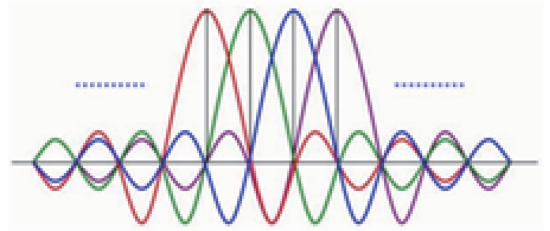


图 1 OFDM 信号频谱图

Fig. 1 OFDM signal spectrum

如图 2 所示,OFDM 系统的工作原理是通过发送端将传输信息加载到  $k$  路调制子载波并进行叠加,之后通过无线信道传输,最后接收端对信号接收解调。原始信号  $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_k)$  经过发送端调制后生成的叠加信号  $s(t)$  及第  $k$  路调制子载波  $s_k(t)$  为<sup>[27]</sup>

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^N a_{ki} s_k(t - iT_s), \quad (1)$$

$$s_k(t) = \prod(t) \exp(j2\pi f_k t),$$

$$\prod(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $a_{ki}$  为第  $k$  路子载波上的第  $i$  个信息符号,  $f_k$  为第  $k$  路子载波频率,  $T_s$  为符号周期,  $\prod(t)$  为脉冲形成函数。接收端解调后的信号  $a'_{ki}$  可表示为

$$a'_{ki} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s_k^*(t - iT_s) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) \exp(-j2\pi f_k t) dt, \quad (3)$$

式中  $s_k^*(t) = \prod(t) \exp(-j2\pi f_k t)$  为第  $k$  路解调子载波,  $r(t)$  为接收的时域信号。

两个子载波间  $s_k(t)$  和  $s_i^*(t)$  的相关性可表示为

$$\delta_{kl} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_k(t - iT_s) s_l^*(t - iT_s) dt = \exp [j\pi(f_k - f_l)T_s] \frac{\sin [\pi(f_k - f_l)T_s]}{\pi(f_k - f_l)T_s} \quad (4)$$

可以得出,当  $f_k - f_l = m/T_s$  时,则该两个子载波正交,接收端通过(2)式匹配相应的滤波器恢复原始信号,即可实现可见光系统的高速通信。

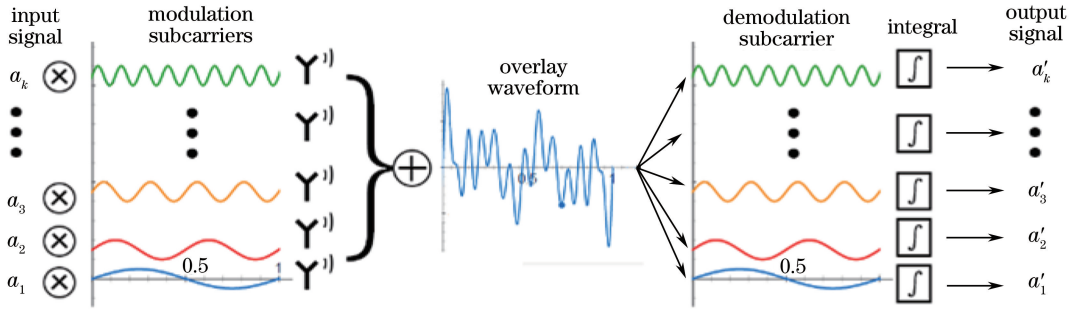


图2 OFDM 系统原理示意图

Fig. 2 Schematic of OFDM system

### 3 基于 VLC 的 O-OFDM 调制策略

近年来学者们提出了多种 O-OFDM 技术,本文按照调制策略将这些调制技术分为 4 类:DCO-OFDM 调制技术为代表的直流偏置调制策略、ACO-OFDM 调制技术为代表的负值取零调制策略、翻转光 OFDM(Flip-OFDM)调制技术为代表的负信号翻转调制策略和单极性 OFDM(U-OFDM)调制技术为代表的极性编码调制策略。

#### 3.1 基于直流偏置调制策略的 O-OFDM 技术

1996 年,Carruthers 等<sup>[28]</sup>针对红外通信首次提出了 DCO-OFDM 调制技术;2013 年,Dissanayake 等<sup>[14]</sup>提出了 ADO-OFDM 调制技术;2016 年,Narmanlioglu 等<sup>[18]</sup>进一步提出了 DCT-OFDM 调制技术。这些 O-OFDM 调制技术都运用了基于直流偏置的控制策略。

直流偏置调制策略的核心思想是,通过在发送端对双极性 OFDM 信号叠加正向直流偏置来确保

发送信号的非负性,在接收端将非负信号中的直流分量去除后进行解调。因此,以 DCO-OFDM 调制技术为例对该策略进行分析。

图 3 为基于 DCO-OFDM 调制策略的 VLC 原理框图。高速数据流经过串并转换、正交幅度调制(QAM)映射和共轭对称后,得到 IFFT 输入信号数组  $\mathbf{X}$  为

$$\mathbf{X} = [X_0, X_1, X_2, \dots, X_{2N-2}, X_{2N-1}], \quad (5)$$

$\mathbf{X}$  满足共轭对称特性: $X_k = X_{2N-k}^*$ ,且  $X_0 = X_N = 0, k=1,2,3, \dots, N-1$ 。经过 IFFT 变换后得离散时域信号  $x(k)$  为

$$x(k) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{n=0}^{2N-1} X_n \exp\left(j2\pi \frac{nk}{2N}\right), \quad k=1,2,3, \dots, N-1. \quad (6)$$

离散的时域信号经并串转换、加 CP 以及数字模拟(D/A)转换后,生成双极性实信号  $x(t)$ 。为获得能直接驱动 LED 发光的非负信号,该策略将直流偏置信号叠加到双极性实信号  $x(t)$  中,其数学表

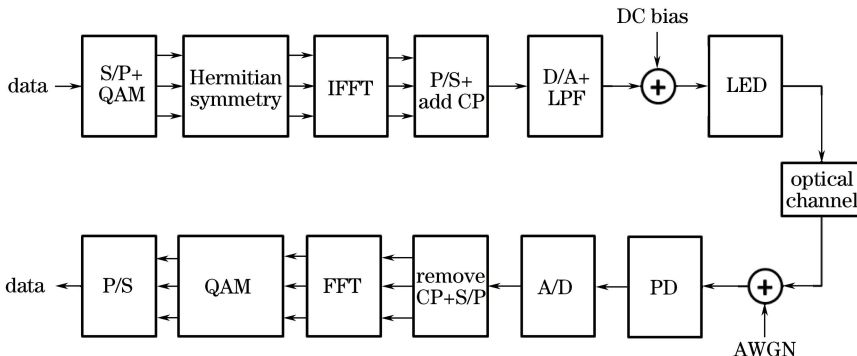


图3 DCO-OFDM 系统原理框图

Fig. 3 Diagram of DCO-OFDM system

述为

$$x_{\text{DCO}}(t) = x(t) + D, D \geq \max\{|x(t)|\}, \quad (7)$$

可以看出,DCO-OFDM 调制策略简洁,易于实现。但是,直流偏置的引入,增加了系统功率损耗。尤其是子载波数较大时,调制信号幅值增大导致偏置电流信号增加,从而降低了系统的功率利用率。针对这一问题,提出了基于负值置零调制策略的 O-OFDM 调制技术。

### 3.2 基于负值置零调制策略的 O-OFDM 技术

2006 年,Armstrong 等<sup>[29]</sup>首次提出了 ACO-OFDM 调制技术,2013 年,又提出 ADO-OFDM 调制技术;2015 年,Wu 等<sup>[19]</sup>进一步提出了 ASCO-OFDM 调制技术。这些 O-OFDM 调制技术都运用了基于负值置零的调制策略。

负值置零调制策略的核心思想是将传输数据加载奇数子载波上,而偶数子载波空置为零。经过 IFFT 变换后得到具有半波对称的双极性实信号。在驱动 LED 之前,将所有负信号幅值置零,而非负信号幅值保持不变。在接收端,根据信号的半波对称性,将置零的负信号进行恢复。下面以 ACO-OFDM 调制技术为例对该策略进行分析。

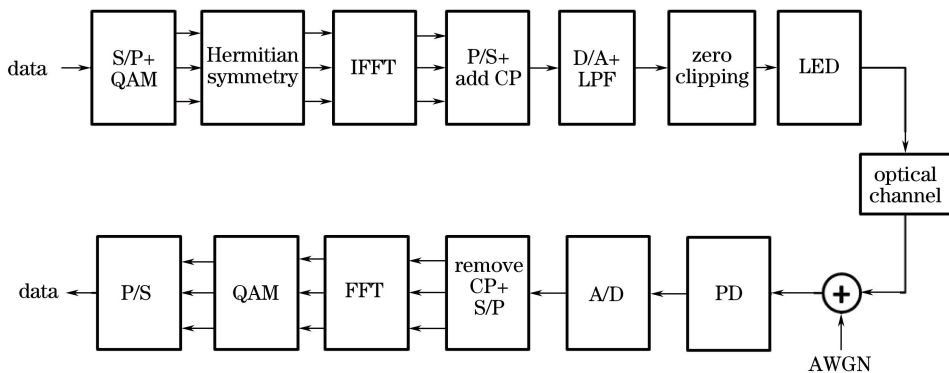


图 4 ACO-OFDM 系统原理框图

Fig. 4 Diagram of ACO-OFDM system

### 3.3 基于负信号翻转调制策略的 O-OFDM 技术

2011 年,Fernando 等<sup>[30]</sup>首次提出了 Flip-OFDM 调制策略;2017 年,东南大学郑伊翎<sup>[31]</sup>在 Flip-OFDM 调制策略基础上利用预编码技术进行了优化设计。这些 O-OFDM 调制技术都运用了基于负信号翻转的调制策略。

负信号翻转调制策略的核心思想是从双极性 OFDM 实信号中提取出正、负信号组成两个传输子块。将负信号构成的传输子块进行翻转后和正信号的传输子块重新组合,驱动 LED 进行信息传输。在接收端,将被翻转的负信号恢复解调。以 Flip-

图 4 为基于 ACO-OFDM 调制策略的 VLC 原理框图。在信号映射的过程中,根据策略要求,将数据分配到奇载波上,偶载波全部置零,因此 IFFT 变换的输入信号表示为

$$\mathbf{X} = [0, X_1, 0, X_3, \dots, X_{2N-1}], \quad (8)$$

式中  $\mathbf{X}$  满足共轭对称特性:  $X_k = X_{2N-k}^*$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, N-1$ 。经过 IFFT 变换之后得到的离散时域信号  $x(k)$  具有反对称性,即

$$x(k) = -x(k + N), 0 < k < N, \quad (9)$$

该时域信号经并串转换、加 CP 及 D/A 转换后生成连续双极性信号  $x(t)$ ,并依据下式生成可直接驱动 LED 的非负信号  $x_{\text{ACO}}(t)$ ,即

$$x_{\text{ACO}}(t) = \begin{cases} x(t), & x(t) \geq 0 \\ 0, & x(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

由于时域信号  $x(k)$  具有反对称特性,在接收端可以将置零后的信号恢复成原始信号,所以不会造成有效信息丢失。

可以看出,为实现 ACO-OFDM 调制,VLC 系统中接收端进行解调的硬件复杂度高,对系统实现带来一定的困难。为了进一步降低其硬件复杂度,提出了基于负信号翻转调制策略的 O-OFDM 调制技术。

OFDM 调制技术为例,对该策略进行分析。

图 5 为基于 Flip-OFDM 调制策略的 VLC 原理框图。将快速傅里叶逆变换生成的离散时域信号  $x(k)$  拆解成正负两个部分,即

$$x(k) = x^+(k) + x^-(k), \quad (11)$$

其中,正信号  $x^+(k)$  和负信号  $x^-(k)$  分别为

$$x^+(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) \geq 0 \\ 0, & x(k) < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

$$x^-(k) = \begin{cases} x(k), & x(k) \leq 0 \\ 0, & x(k) > 0 \end{cases}$$

式中  $k = 1, 2, 3, \dots, N-1$ 。当正信号和负信号为连

续两帧的 OFDM 信号进行传输时,正信号  $x^+(k)$  在第一个通道中进行传输,而翻转后的负信号  $-x^-(k)$  在第二个通道中进行传输。将正信号和翻

转负信号重新拼接后,经并串转换、加 CP 及 D/A 转换后,加载到 LED 上实现信息的传输。

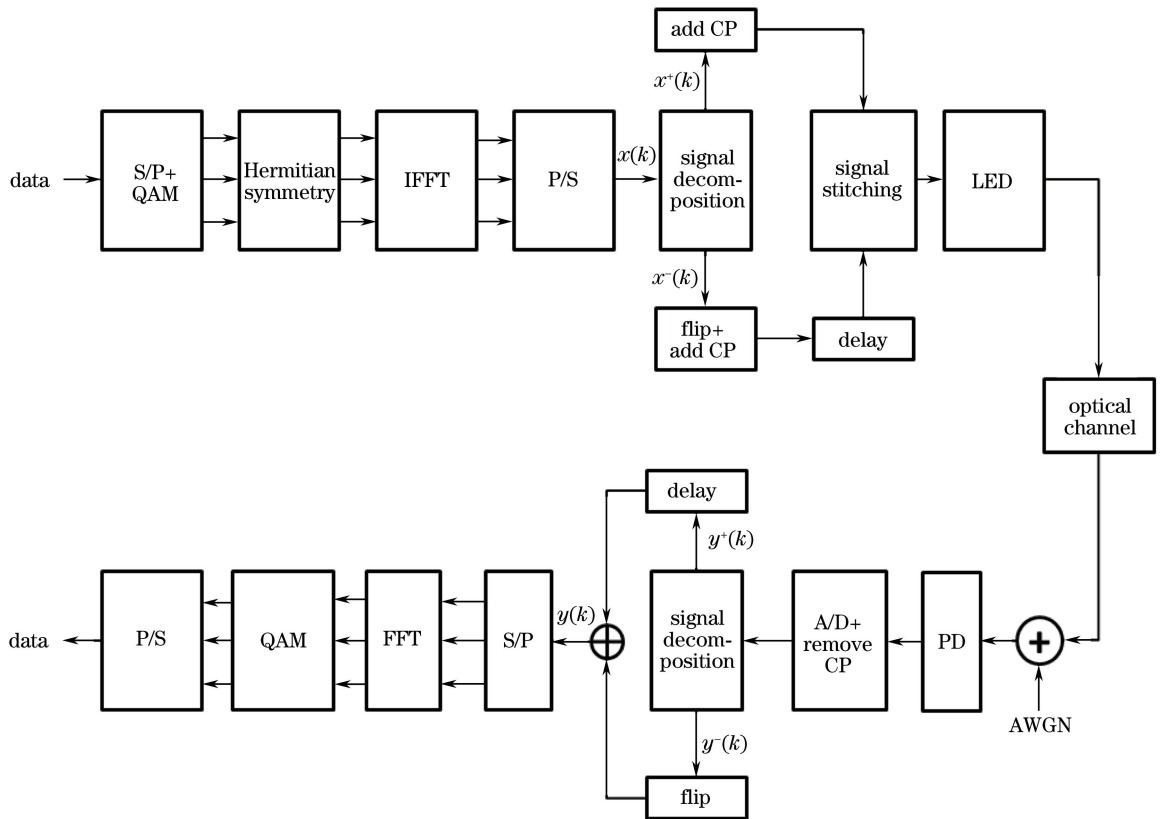


图5 Flip-OFDM 系统原理框图

Fig. 5 Diagram of Flip-OFDM system

针对 Flip-OFDM 调制策略必须通过两个 OFDM 子块进行传输,为了降低系统的复杂程度,有学者在此基础上进一步提出了基于极性编码策略的 O-OFDM 调制技术。

### 3.4 基于极性编码调制策略的 O-OFDM 技术

2012年, Tsonev 等<sup>[32]</sup>首次提出了 U-OFDM 调制技术;2016年, Djengomemgogo 等<sup>[15]</sup>提出了 eU-OFDM 调制技术;2017年, Wang 等<sup>[17]</sup>提出了 HU-OFDM 调制技术。这些 O-OFDM 调制技术都运用了基于极性编码的调制策略。

U-OFDM 调制策略的核心思想是将 IFFT 生成的双极性 OFDM 实信号按照极性编码的原则进行重新编码,从而得到单极性信号。在接收端根据对应的解码原则将信号恢复。下面以 U-OFDM 调制技术为例对该策略进行分析。

图6为基于 U-OFDM 调制策略的 VLC 原理框图。信号极性编码的原则是将原本一位的时域数据编码成为一个两位的数据,其中一位保留原来数

据值的绝对值,表示数据的大小;另外一位置零,用它的前后位置来表示数据的正负符号。当“0”位在数值位之前时,表示该数据的值是负的;当“0”位在数值位之后时,表示该数据的值是正的。在接收端,通过对检测的方法对接收到的时域信号进行极性判别,恢复出原始数据即可。极性编码处理前后的信号如图7所示,可以看出,该策略和负信号翻转策略相比,在不降低信号资源利用率基础上,简化了单极性算法,降低了复杂度。

## 4 调制策略对 VLC 性能影响的对比分析

从以上分析可以看出,4种 O-OFDM 调制技术的目的都是将双极性信号转换成可以直接加载到 VLC 系统上的单极性信号。因此,从频带利用率、BER、功率峰均比(PAPR)及硬件计算复杂度等方面,分析比较4种调制策略对 VLC 系统性能的影响。

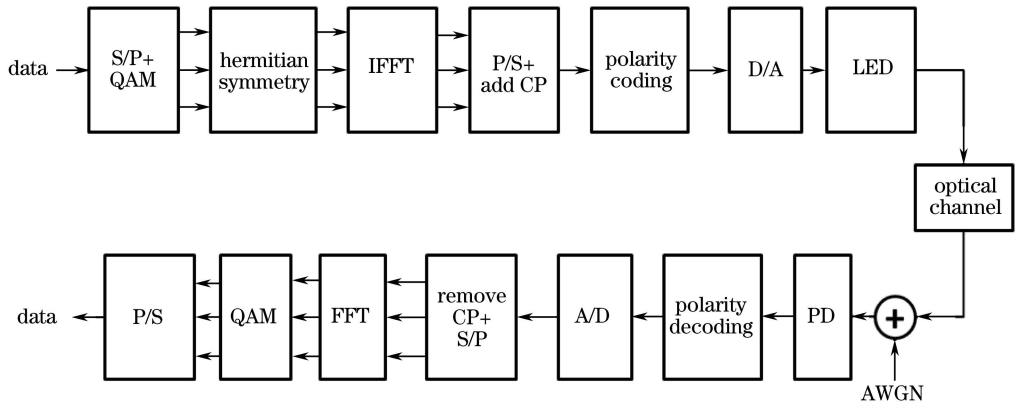


图 6 U-OFDM 系统框图

Fig. 6 Diagram of U-OFDM system

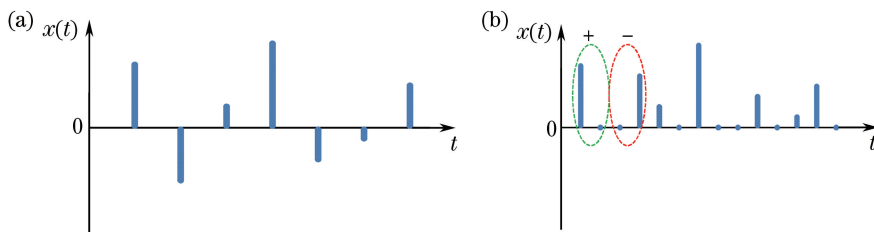


图 7 U-OFDM 单极性编码示意图。(a)双极性 OFDM 信号;(b)单极性 OFDM 信号

Fig. 7 Schematic of U-OFDM unipolar coding. (a) Bipolar OFDM signal; (b) unipolar OFDM signal

#### 4.1 频带利用率

频带利用率是单位频带内所能实现的信息速率,它是描述数据传输速率和带宽之间关系的一个指标,也是衡量数据通信系统有效性的指标<sup>[33]</sup>。由于各种 O-OFDM 系统的原理不一样,因此其频带利用率也不一样。文献[33]给出了调制策略频带利用率的计算公式为

$$\eta_{\text{DCO}} = \frac{N \log_2 M}{2(N + N_{\text{CP}})},$$

$$\eta_{\text{ACO}} = \eta_{\text{Flip}} = \eta_{\text{U}} = \frac{N \log_2 M}{4(N + N_{\text{CP}})}, \quad (13)$$

式中  $N$  表示 OFDM 系统中的子载波个数,CP 长度均为  $N_{\text{CP}}$ , $M$  表示对应的 M-QAM 映射数。

可以看出,在相同的子载波数目  $N$  下,DCO-OFDM 系统有  $N/2$  的子载波用来携带信息数据,而 ACO-OFDM 系统只有  $N/4$  的子载波携带信息,因此 ACO-OFDM 的频带利用率是 DCO-OFDM 系统的  $1/2$ 。Flip-OFDM 虽然也有  $N/2$  的子载波用来携带信息,但是需要两个连续的子块来生成单极性信号,因此,Flip-OFDM 的频带利用率也为 DCO-OFDM 的  $1/2$ 。而 U-OFDM 的每个时域采样值被重新编码成两个新采样值,故其频带利用率也为 DCO-OFDM 的  $1/2$ 。

#### 4.2 BER

由于 DCO-OFDM 的频带利用率是其他三种 O-OFDM 的两倍,为了保证系统的传输速率相同,这里将 4QAM、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM 的 DCO-OFDM 和对应的 16QAM、64QAM、256QAM、1024QAM、4096QAM 的其他 O-OFDM 进行比较<sup>[14]</sup>。在 Matlab 中搭建了 O-OFDM 通信系统仿真模型,设置系统都在 AWGN 信道,一共传输 600 个 OFDM 符号,每一个 OFDM 符号的 CP 长度为 16 位,子载波数为 1024,设置不同的 QAM 值,得到了系统的 BER 和信噪比(SNR)之间的关系曲线<sup>[34-35]</sup>,如图 8 所示。

从仿真结果可以看出,随着系统的 SNR 不断增加,4 种 O-OFDM 调制策略的 BER 逐渐减小;随着 QAM 阶数的增加,系统的 BER 随之增加。这是因为 QAM 阶数越高,星座图上的星座点越密,星座点之间的距离越小,判决时越容易被判定成别的符号,导致 BER 越高。在 4QAM 的 DCO-OFDM 和 16QAM 的 ACO-OFDM、Flip-OFDM 和 U-OFDM 中,当系统的 BER 为  $10^{-4}$  时,DCO-OFDM 的 SNR 高于 U-OFDM 约 8 dB,ACO-OFDM 和 Flip-OFDM 比 U-OFDM 高出了约 2 dB。随着 QAM 阶数的增加,DCO-OFDM 的 BER 与其他三种 OFDM

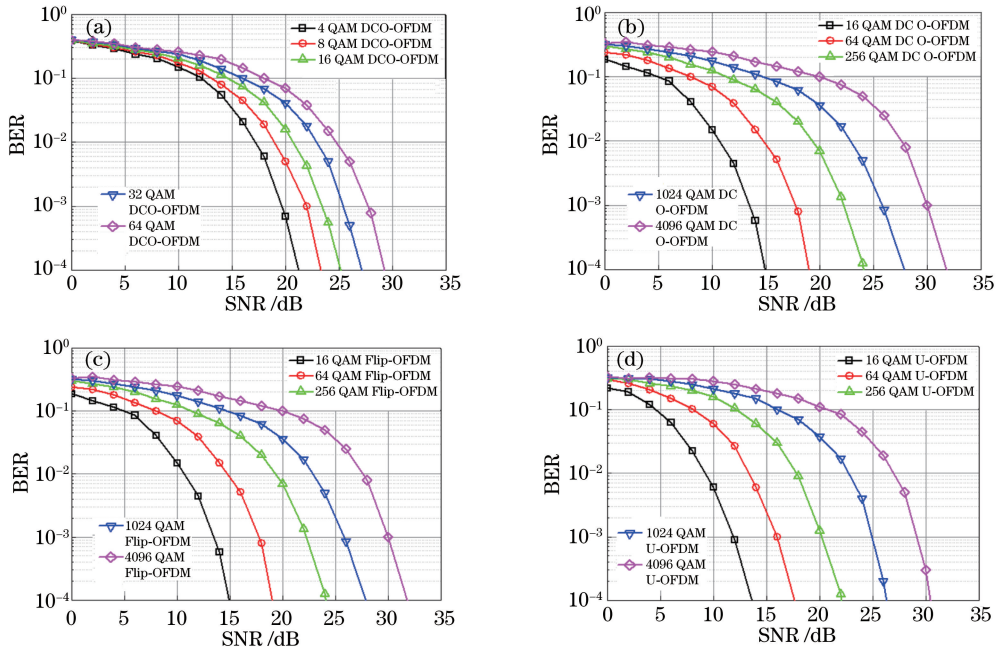


图 8 4 种 O-OFDM 的 BER 与 SNR 关系曲线。(a) DCO-OFDM; (b) ACO-OFDM; (c) Flip-OFDM; (d) U-OFDM

Fig. 8 Relation curves of BER and SNR for four kinds of O-OFDM. (a) DCO-OFDM; (b) ACO-OFDM; (c) Flip-OFDM; (d) U-OFDM

的 BER 之间的差距逐渐缩小。当 ACO-OFDM 的 QAM 阶数上升到 1024 时,对应的 DCO-OFDM 的 BER 低于 ACO-OFDM 和 Flip-OFDM,但是稍高于 U-OFDM。当 ACO-OFDM 的 QAM 阶数上升到 4096 时,DCO-OFDM 的 BER 性能虽然进一步变差,但是其 BER 低于 U-OFDM、ACO-OFDM 和 Flip-OFDM。考虑到过高的调制阶数会对削波失真非常敏感,对通信系统性能会产生一定的影响<sup>[36]</sup>,一般情况下 QAM 阶数不超过 1024。

### 4.3 PAPR

功率峰均比简称峰均比,定义为<sup>[37]</sup>

$$C_{\text{PAPR}} = 10 \lg \left\{ \frac{\max(|x(t)|^2)}{E\{|x(t)|^2\}} \right\}. \quad (14)$$

O-OFDM 信号子载波信号叠加容易产生较大的 PAPR。当 O-OFDM 信号  $x(t)$  峰值超过一定范围时,LED 进入非线性工作区域,产生信号失真,从而影响系统通信的可靠性。

通常采用互补累积分布函数 (CCDF) 来评估 PAPR。DCO-OFDM 和 ACO-OFDM 系统在奈奎斯特采样频率下的 PAPR 的 CCDF 的近似表达式为<sup>[38]</sup>

$$F_{\text{DCO}}(\lambda) = 1 - \{1 - Q[\sqrt{\lambda(1 + \mu^2)} - \mu] - Q[\sqrt{\lambda(1 + \mu^2)} + \mu]\}^{\alpha N}, \quad (15)$$

$$F_{\text{ACO}}(\lambda) = 1 - \left[1 - 2Q\left(\sqrt{\frac{\lambda}{2}}\right)\right]^{\alpha N/2}, \quad (16)$$

式中  $\lambda$  为 (14) 式中的 PAPR,  $N$  是子载波数目,  $\mu$  是正态分布常量,  $\alpha$  是采样系数,通常情况下取 2.8,  $Q(x)$  是累积分布函数。

由于在 ACO-OFDM、Flip-OFDM 和 U-OFDM 系统中,奈奎斯特采样得到的离散随机变量都满足独立同分布,且对于奈奎斯特抽样信号,一共有  $N/2$  对这样的采样值。所以,ACO-OFDM、Flip-OFDM 和 U-OFDM 系统具有相同的 PAPR 的 CCDF,即

$$F_{\text{ACO}}(\lambda) = F_{\text{Flip}}(\lambda) = F_{\text{U}}(\lambda) = 1 - \left[1 - 2Q\left(\sqrt{\frac{\lambda}{2}}\right)\right]^{\alpha N/2}. \quad (17)$$

根据 (17) 式,在 Matlab 中对 OFDM 的 PAPR 与 CCDF 进行了仿真,如图 9 所示。由图 9 可以看出,DCO-OFDM 的 PAPR 要远小于 ACO-OFDM、Flip-OFDM 和 U-OFDM 的 PAPR 值。这是因为 DCO-OFDM 引入了直流偏置,很大程度上提高了系统的平均功率,虽然峰值功率也增加了,但是峰值功率和平均功率的比值却减少,因此 PAPR 值下降。

### 4.4 硬件计算复杂度

通信系统的硬件计算复杂度是衡量系统好坏的重要指标之一,在 VLC 系统中,硬件计算复杂度可以定义为发射端或接收端中的 FFT/IFFT 进行计算操作的数量<sup>[29]</sup>。在发射端,ACO-OFDM 系统、

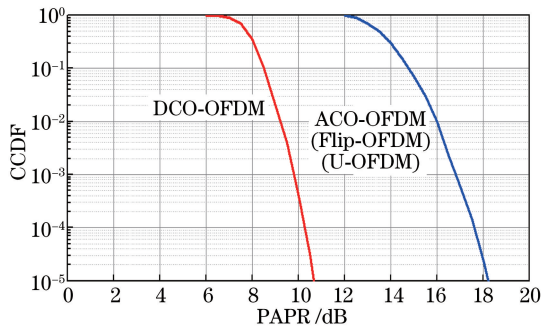


图9 连续时间 OFDM 信号 PAPR 的 CCDF

Fig. 9 CCDF of PAPR of continuous-time OFDM signal

Flip-OFDM 系统和 U-OFDM 具有相同的硬件计算复杂度,均为  $N \lg(N)$ ;在接收端,ACO-OFDM 系统的计算复杂度为  $2N \lg(N)$ ,接收端 Flip-OFDM 系统和 U-OFDM 系统的计算复杂度为  $N \lg(N)$ 。因此,ACO-OFDM 系统的硬件计算复杂度高于 Flip-OFDM 系统和 U-OFDM 系统。在传输等量数据时,由于 DCO-OFDM 系统并未将奇载波和偶载

波分开,故在 4 种 O-OFDM 技术中,DCO-OFDM 的硬件计算复杂度最低。

#### 4.5 小结

表 1 为 4 种 O-OFDM 调制策略性能分析对比结果。从表 1 可以看出,由于 DCO-OFDM 频带利用率且硬件计算复杂度低,因此其成为目前应用最为广泛的调制技术之一,但是低阶调制时的 BER 过高是在应用中需要考虑的问题。ACO-OFDM 和 Flip-OFDM 性能基本一致,且在较低的调制阶数下,其 BER 小于 DCO-OFDM,功率利用率相对较高,但是其频带利用率相对较低,PAPR 和硬件计算复杂度有所提高,因此 ACO-OFDM 和 Flip-OFDM 可应用于带宽和可靠性要求不高的场合。当调制阶数较低时,U-OFDM 误码性能最好,适合与通信速率要求不高但是可靠要求较高的传输场合,但同时要考虑如何抑制 PAPR,以保证高质量的通信性能。因此,在应用中可以根据不同的应用需求来选择相应的 O-OFDM 调制技术,优化系统的通信性能。

表 1 4 种 O-OFDM 调制策略性能分析对比

Table 1 Performance analysis of 4 types of O-OFDM adjustment strategies

O-OFDM type	Band efficiency	BER			PAPR	Hardware calculation complexity
		(Based on the QAM of ACO-OFDM)				
		QAM $\leq 256$	QAM = 1024	QAM $\geq 4096$		
DCO-OFDM	$\frac{N \log_2 M}{2(N + N_{CP})}$	Middle	High	High	Low	Low
ACO-OFDM	$\frac{N \log_2 M}{4(N + N_{CP})}$	Low	Higher	Highest	High	High
Flip-OFDM	$\frac{N \log_2 M}{4(N + N_{CP})}$	Low	Higher	Highest	High	Middle
U-OFDM	$\frac{N \log_2 M}{4(N + N_{CP})}$	Lower	Middle	Higher	High	Middle

## 5 结束语

随着 LED 照明技术的飞速发展,基于 O-OFDM 的高速 VLC 技术必将成为无线通信的一个重要技术。在梳理了近年来提出的 O-OFDM 技术的基础上,从调制策略角度将研究者们提出的 O-OFDM 调制技术划分为 4 类:直流偏置调制策略、负值置零策略、负信号翻转策略和极性编码策略。从频带利用率、功率利用率、PAPR、BER 和硬件复杂度等角度对调制策略机理和对 VLC 通信系统性能的影响进行了对比分析。可以看出,直流偏置调制策略的优势在于调制策略简单、频带利用率高,但直流偏置的引入增加了 LED 的功率损耗,功率利用率不高;其他三种调制策略虽然避免了直流偏置的

引入,但是 PAPR 较高,容易导致信号失真,所以对 LED 器件工作特性要求较高,硬件实现也相对困难。

既能提高频带利用率和功率利用率,又能降低 PAPR 的 O-OFDM 技术是进一步研究的重点。此外,虽然 O-OFDM 调制技术大幅提升了 VLC 系统的性能,OFDM 系统中各个子载波之间的正交性保证了相邻信道之间不会带来符号干扰,但是在实际应用中,频谱的略微偏移,会造成载波之间的相互串扰,降低 SNR,影响整个系统的通信性能。为进一步提高高速 VLC 系统稳健性,多载波同步技术以及多载波自适应编码调制技术也将是下一步总结梳理和分析研究的内容。



## 参 考 文 献

- [1] Song X Q, Zhao Z X, Chen K W, *et al.* Visible light communication: potential applications and challenges [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080004.  
宋小庆, 赵梓旭, 陈克伟, 等. 可见光通信应用前景与发展挑战 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080004.
- [2] Song X Q, Wei Y C, Zhao Z X, *et al.* Research progress on hardware pre-equalization technology for high-speed visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080003.  
宋小庆, 魏有财, 赵梓旭, 等. 高速可见光通信硬件预均衡技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 080003.
- [3] Chi N. LED visible light communication technologies [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.  
迟楠. LED 可见光通信技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [4] Song X Q, Jia S J, Zhao Z X, *et al.* Fixed length dual duration digital pulse interval modulation for visible light communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 110601.  
宋小庆, 贾胜杰, 赵梓旭, 等. 可见光通信中的定长双宽数字脉冲间隔调制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 110601.
- [5] Yang F, Gao J N, Liu S C. Novel visible light communication approach based on hybrid OOK and ACO-OFDM [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1585-1588.
- [6] Ozaki T, Kozawa Y, Umeda Y. Improved error performance of variable PPM for visible light communication [C] // 2014 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2014: 259-264.
- [7] Assabir A, Elmhamdi J, Hammouch A, *et al.* Application of Li-Fi technology in the transmission of the sound at the base of the PWM [C] // 2016 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2016: 260-265.
- [8] Maivan L. A low complexity of PAPR reduction scheme in the IM-DD optical OFDM system based on fast Hartley transform [C] // Asia Communications and Photonics Conference, 2015: AM2F.3.
- [9] Zhang T, Ghassemlooy Z, Ma C Y, *et al.* PAPR reduction scheme for ACO-OFDM based visible light communication systems [J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 75-80.
- [10] Yu B Y. Research on key technologies of lighting LED based indoor high speed visible light communication [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.  
余冰雁. 基于照明 LED 的室内高速可见光通信关键技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [11] Chang R W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission [J]. *Bell System Technical Journal*, 1966, 45(10): 1775-1796.
- [12] Weinstein S, Ebert P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 1971, 19(5): 628-634.
- [13] Peled A, Ruiz A. Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms [C] // ICASSP '80. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1980: 964-967.
- [14] Dissanayake S D, Armstrong J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(7): 1063-1072.
- [15] Djengomemgogo G, Narmanlioglu O, Kizilirmak R C, *et al.* eU-OFDM based multiple access for visible light communication networks [C] // 2016 IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2016: 1-4.
- [16] Mulinde R, Nguyen K D, Cowley W G. BER analysis of optical eU-OFDM transmission over AWGN [C] // 2015 9th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2015: 1-6.
- [17] Wang X D, Bao T, Wu N, *et al.* A novel Hartley-based U-OFDM dimming control approach [C] // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), 2017.
- [18] Narmanlioglu Ö, Uysal M. DCT-OFDM based visible light communications [C] // 2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), 2016: 521-524.
- [19] Wu N, Bar-Ness Y. Lower bounds on the channel capacity of ASCO-OFDM and ADO-OFDM [C] // 2015 49th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), 2015: 1-5.
- [20] Kottke C, Hilt J, Habel K, *et al.* 1.25 Gbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of

- a single RGB LED luminary [C] // European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012.
- [21] Xu X Y. Research on OFDM based indoor optical wireless transmission technology[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.  
徐宪莹. 基于 OFDM 的室内光无线传输技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [22] Figueiredo M, Ribeiro C, Alves L N. Live demonstration: 150 Mbps DCO-OFDM VLC [C] // 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2016: 457-457.
- [23] Chi N, Shi J Y, Zhou Y J, *et al.* High speed LED based visible light communication for 5G wireless backhaul[C] // 2016 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), 2016: 4-5.
- [24] Hussein A F, Elgala H, Fahs B, *et al.* Experimental investigation of DCO-OFDM adaptive loading using Si PN-based receiver [C] // 2017 26th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2017: 1-5.
- [25] Islim M S, Ferreira R X, He X Y, *et al.* Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): A35-A43.
- [26] Zhu X, Wang F M, Shi M, *et al.* 10.72 Gb/s visible light communication system based on single packaged RGBYC LED utilizing QAM-DMT modulation with hardware pre-equalization [C] // Optical Fiber Communication Conference, 2018.
- [27] Shieh W, Djordjevic I. OFDM for optical communications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2010: 31-52.
- [28] Carruthers J B, Kahn J M. Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(3): 538-546.
- [29] Armstrong J, Lowery A J. Power efficient optical OFDM[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(6): 370-372.
- [30] Fernando N, Hong Y, Viterbo E. Flip-OFDM for optical wireless communications [C] // 2011 IEEE Information Theory Workshop, 2011: 5-9.
- [31] Zhen Y L. Optimized design of optical wireless communication system based on Flip-OFDM [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.  
郑伊翎. 基于 Flip-OFDM 的光无线通信系统优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [32] Tsonev D, Sinanovic S, Haas H. Novel unipolar orthogonal frequency division multiplexing (U-OFDM) for optical wireless [C] // 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012: 1-5.
- [33] Feng H Y. Research on O-OFDM technology for indoor visible optical communication systems [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.  
冯海燕. 室内可见光通信系统 O-OFDM 技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [34] Islam R, Choudhury P, Islam M A. Analysis of DCO-OFDM and flip-OFDM for IM/DD optical-wireless system[C] // 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering, 2014: 32-35.
- [35] Aly B. Performance analysis of adaptive channel estimation for U-OFDM indoor visible light communication [C] // 2016 33rd National Radio Science Conference (NRSC), 2016: 217-222.
- [36] Mesleh R, Elgala H, Haas H. On the performance of different OFDM based optical wireless communication systems [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(8): 620-628.
- [37] Zeng F L. Research on OFDM modulation for visible light communication [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2014.  
曾福来. 可见光通信 OFDM 调制技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- [38] Tang Y. Research on peak-to-average ratio suppression method in OFDM visible light communication system [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.  
唐洋. OFDM 可见光通信系统峰均比抑制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.