

## 可见光通信中融合VOOK和分层OFDM的高效频谱混合调制方法

李宝龙<sup>①</sup> 施建锋<sup>①②</sup> 吴勤勤<sup>①</sup> 冯斯梦<sup>\*③</sup>

<sup>①</sup>(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

<sup>②</sup>(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

<sup>③</sup>(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)

**摘要:** 为了满足可见光通信(VLC)的照明和高速率数据传输的双重需求, 该文提出一种融合可变开关键控(VOOK)和分层正交频分复用(OFDM)的高效频谱混合调制。首先针对分层OFDM调制方法设计了相应的VOOK信号, 避免了VOOK对分层OFDM信息传输的干扰。然后, 为了保证混合调制信号工作在发光二极管(LED)的线性区间, 提出一种全新的重构分层光OFDM(RLO-OFDM), 并构建VOOK-RLO-OFDM混合调制方法, 实现了调光控制和高效频谱数据传输的双重功能。混合调制能够并行地进行VOOK和RLO-OFDM的信号检测, 同时, RLO-OFDM的信号检测可以采用标准的OFDM接收机, 无须依赖串行干扰消除方式, 显著地降低了接收复杂度和处理时延。仿真结果表明, 所提方法能够实现线性调光控制, 且具有高效的频谱效率。

**关键词:** 可见光通信; 正交频谱复用; 调光控制; 可变开关键控

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)08-2639-10

DOI: [10.11999/JEIT220368](https://doi.org/10.11999/JEIT220368)

## Spectrum-Efficient Hybrid Modulation Based on VOOK and Layered OFDM for Visible Light Communications

LI Baolong<sup>①</sup> SHI Jianfeng<sup>①②</sup> WU Qinqin<sup>①</sup> FENG Simeng<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

<sup>②</sup>(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>③</sup>(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirements of illumination and high-speed transmission in Visible Light Communications (VLC), a novel spectrum-efficient hybrid modulation based on Variable On-Off Keying (VOOK) and layered Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is proposed in this paper. First, the VOOK signal is designed to avoid the interference with the layered OFDM transmission. In order to ensure that the hybrid signal operates in the linear dynamic range of Light-Emitting Diode (LED), a novel Reconstructed Layered Optical OFDM (RLO-OFDM) is further conceived. Then, the RLO-OFDM and VOOK signals are combined for simultaneous transmission to realize the dual functionalities of dimming control and spectrum-efficient data transmission. At the receiver side, the VOOK and RLO-OFDM signals are detected in parallel. Moreover, a standard OFDM receiver can be directly employed to detect the RLO-OFDM signal without requiring successive interference cancellation, which reduces notably the receiver complexity and processing latency. Simulation results show that the proposed scheme is capable of supporting the linear dimming control, and achieving high spectrum efficiency.

收稿日期: 2022-03-31; 改回日期: 2022-07-11; 网络出版: 2022-07-14

\*通信作者: 冯斯梦 simeng-feng@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62001219), 江苏省自然科学基金(BK20190582、BK20210641), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2021D11), 江苏省高层次创新创业人才引进计划(JSSCBS20210159), 江苏省高等学校自然科学基金(20KJB510037)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62001219), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20190582, BK20210641), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2021D11), The Shuangchuang Talent Program of Jiangsu Province (JSSCBS20210159), The Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (20KJB510037)

**Key words:** Visible Light Communication (VLC); Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Dimming control; Variable On-Off Keying (VOOK)

## 1 引言

随着信息技术的迅猛发展,各式新终端和新应用催生了爆炸式增长的数据量,这对未来移动通信网络提出了超高速率的传输要求,但现有的射频(Radio Frequency, RF)通信技术由于频谱资源的匮乏面临瓶颈,亟需开拓新频谱以解决频谱资源匮乏与超高速率传输的矛盾。这种背景下,可见光通信(Visible Light Communication, VLC)凭借丰富的频谱资源备受关注,成为无线通信领域的研究热点,且被列为6G的潜在关键技术之一<sup>[1]</sup>。VLC是一种构建于发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)照明系统之上的通信技术,具有无电磁辐射、无须频谱许可、成本低、保密性高等优势,结合当前广泛普及、密集覆盖的LED照明设施,VLC能够实现泛在绿色通信,具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

不同于其他通信方式,VLC需要兼顾通信和照明的双重功能<sup>[3]</sup>。在照明方面,调光控制能够根据照明需求调整LED的亮度,在调节环境气氛、节约能量方面发挥重要的作用,被视为VLC系统的一项重要功能,且纳入VLC的IEEE 802.15.7标准之中<sup>[4]</sup>。为了满足VLC调光控制和数据传输的双重需求,可调光调制方法在VLC中被广泛地研究,根据调制方式可以分为单载波和多载波的可调光调制方法。在单载波调制方面,文献<sup>[5]</sup>研究了可变开关键控(Variable On-Off Keying, VOOK)、可变脉冲位置调制(Variable Pulse Position Modulation, VPPM)等,实现了线性调光控制。由于系统的传输容量受制于码间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI),文献<sup>[6]</sup>针对VOOK和VPPM调制,提出了ISI的抑制方法。VOOK等单载波调制方法具有实现简单、调光精度高等优势,成为IEEE 802.15.7推荐使用的调制方法<sup>[4,7]</sup>。但这些单载波调制的频谱效率被限制在1 bit/(s·Hz)之内,在LED有限的调制带宽下,难以满足未来超高速率传输的需求。

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一种能够有效对抗ISI的多载波调制,其传输速率及带宽利用率是其他调制方式所无法比拟的,成为超高速率VLC的主流选择<sup>[8]</sup>。目前,VLC中存在多种OFDM调制方法,包括直流偏置光OFDM(Direct Current biased Optical OFDM, DCO-OFDM)、非对称限幅光OFDM(Asymmetrically Clipped Optical OFDM, ACO-OFDM)等。为了兼顾LED照明,针对这些

OFDM方案的调光控制方法被研究。文献<sup>[9]</sup>提出了一种采用分段变换方式的增强型DCO-OFDM,分段变换的参数根据调光水平调整。文献<sup>[10]</sup>采用DCO-OFDM,研究了一种基于时域采样索引调制的调光方法。在ACO-OFDM方面,文献<sup>[11]</sup>提出一种兼容脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)的反极性光OFDM(Reverse Polarity Optical OFDM, RPO-OFDM)方法。这些可调光OFDM相较单载波调制有效地提升了传输速率,但受制于DCO-OFDM和ACO-OFDM低效的能量或频谱效率,这些方法难以充分地利用VLC的传输潜力。

为了解决DCO-OFDM等常规方法的不足,分层OFDM调制被提出,该方法将子载波按序号进行分层调制,并生成多层OFDM信号进行叠加传输。相比常规OFDM,分层OFDM提升了频谱效率,同时,无须直流偏置,保持了能量高效的优势<sup>[12]</sup>。目前,存在多种分层OFDM方法,包括分层ACO-OFDM(Layered ACO-OFDM, LACO-OFDM)、增强频谱效率型-离散多音、绝对值LACO-OFDM等<sup>[12-15]</sup>。鉴于分层OFDM在频谱和能量效率方面的优势,多种可调光分层OFDM被研究。文献<sup>[16]</sup>采用连续电流降低的调光方法,提出了一种可调光多层ACO-OFDM。文献<sup>[17]</sup>基于LACO-OFDM方法,研究了一种分数反转极性光OFDM。在文献<sup>[18]</sup>中,一种负极性LACO-OFDM方法被提出,并与正极性LACO-OFDM形成可调光混合LACO-OFDM(Hybrid LACO-OFDM, HLACO-OFDM)方法。这些研究表明分层OFDM相较常规OFDM具有更高的频谱效率,特别在一些低调光水平的区域,频谱效率是DCO-OFDM的1倍。但这些可调光方法的信号检测依赖于准确的调光信息,实际场景中通常存在多个LED光源,准确地获取调光信息较为困难。此外,现有分层OFDM需采用串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)的方式实现逐层信号检测,造成较高的接收复杂度和处理时延<sup>[19]</sup>。

针对VOOK频谱效率低下和现有可调光分层OFDM接收复杂度、处理时延高的问题,本文提出了一种全新的融合VOOK和分层OFDM的混合调制方法,满足VLC的调光控制和高效频谱传输的双重需求。本文的主要贡献包括以下方面:

(1) 针对子载波分层调制设计了VOOK信号,避免了VOOK信号对分层OFDM信息传输的干扰,

实现了分层OFDM的信号检测不依赖于VOOK的调光水平。

(2) 为了确保混合调制信号工作在LED的线性区间, 同时, 有效地降低接收复杂度和处理时延, 提出了一种全新的重构分层光OFDM(Reconstructed Layered Optical OFDM, RLO-OFDM), 在此基础上, 构建了VOOK和RLO-OFDM的融合传输方法, 实现了调光控制, 且有效地提升了频谱效率。同时, 提出方法相比现有分层OFDM方法, 具有更优的误比特率(Bit Error Ratio, BER)性能。

(3) 混合调制中VOOK和RLO-OFDM可以并行地完成信号检测, 且在RLO-OFDM信号检测的同时, 实现了VOOK信号的频域均衡。更为重要的, RLO-OFDM可以采用标准的OFDM接收机, 无须依赖SIC方式, 相比现有分层OFDM方法, 显著地降低了接收复杂度和处理时延。

本文的其余部分结构如下: 第2节给出了高效频谱混合调制方法; 第3节给出了混合调制信号的接收方法; 第4节提供了混合调制的复杂度分析; 第5节为仿真结果与分析; 最后, 第6节对本文进行总结。

## 2 高效频谱混合调制方法

### 2.1 VOOK信号设计

VOOK是一种融合PWM和开关键控(On-Off Keying, OOK)的调制方法, 其中, PWM能够实现调光控制, OOK提供数据传输, 因此, VOOK能够实现调光控制和数据传输的双重功能。将VOOK的码字表示为

$$c = \underbrace{[d_1, d_2, \dots, d_{D_1}]}_{D_1 \text{ 个}} \underbrace{[b, b, \dots, b]}_{D_2 \text{ 个}} \quad (1)$$

其中,  $d_i \in \{0, 1\}$  表示发送的信息比特, 在调光水平  $\gamma \leq 50\%$  的情况下,  $b$  为调光控制符号, 取值为 0, 当调光水平  $\gamma > 50\%$  时,  $b$  取值为 1, 将VOOK码字的长度表示为  $D$ ,  $D_1$  表示信息比特占用的长度,  $D_2$  表示调光控制符号占用的长度, 则  $D = D_1 + D_2$ 。VOOK的数据占空比定义为数据脉冲在整个码字的时间占比, 可以表示为  $\delta_d = D_1/D$ , 当  $\delta_d = 0$  时, VOOK不能承载信息。根据调光水平的定义, 在发送的信息比特“0”和“1”等概率的情况下, VOOK信号能够提供的调光水平可以计算为

$$\gamma_{\text{vook}} = \begin{cases} \frac{1}{2}\delta_d, & 0 < \gamma_{\text{vook}} \leq 0.5 \\ 1 - \frac{1}{2}\delta_d, & 0.5 < \gamma_{\text{vook}} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

可以看到, 调光水平  $\gamma_{\text{vook}}$  由VOOK的数据占空比  $\delta_d$  决定, 通过改变  $\delta_d$ , 能够实现LED亮度调整。

VOOK实现了兼容调光控制的数据传输, 但其调制的频谱效率低于  $1 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ , 难以满足未来6G高速率传输的需求, 因此, 需要进一步地研究频谱更高效的调制方法。

针对VOOK频谱效率低下的问题, 本文采用VOOK和分层OFDM混合传输的方式提升频谱效率。为了避免VOOK信号干扰分层OFDM, 需要对VOOK信号进行设计。对于一个具有  $N$  个子载波的OFDM系统, 根据子载波序号进行分层, 第  $l$  层包含第  $2^{l-1}(2i+1)$  个子载波, 其中,  $i = 0, 1, \dots, N/2^l - 1$ 。在分层OFDM中, 前  $L$  层用于信息传输, 后续分层不会承担信息传输任务。为了避免干扰, 可以将VOOK信号落入未承载信息的分层, 其中, 未承载信息的分层包含第  $i2^L, i = 0, 1, \dots, N/2^L - 1$  个子载波, 则VOOK的频域信号  $V_k^{\text{OFDM}}$  具有形式

$$V_k^{\text{OFDM}} = \begin{cases} V_k^{\text{OFDM}}, & k = i2^L \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

进一步地, 将VOOK的时域信号表示为  $v_n^{\text{OFDM}}, n = 0, 1, \dots, N-1$ , 为了保证VOOK的频域满足式(3)的形式, VOOK的时域信号必须满足对称性

$$v_n^{\text{OFDM}} = v_{n+N/2^L}^{\text{OFDM}}, n = 0, 1, \dots, N - N/2^L - 1 \quad (4)$$

下面, 介绍式(4)的证明过程, 依据FFT的定义, 频域信号  $V_k^{\text{OFDM}}$  可以表示为

$$V_k^{\text{OFDM}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} v_n^{\text{OFDM}} e^{j\frac{2\pi nk}{N}}$$

根据式(4)中的时域对称性, 频域信号  $V_k^{\text{OFDM}}$  可以进一步表示为

$$\begin{aligned} V_k^{\text{OFDM}} &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N/2^L-1} v_n^{\text{OFDM}} \left( \sum_{m=0}^{2^L-1} e^{j\frac{2\pi(n+mN/2^L)k}{N}} \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N/2^L-1} v_n^{\text{OFDM}} e^{j\frac{2\pi nk}{N}} \left( \sum_{m=0}^{2^L-1} e^{j\frac{2\pi mk}{2^L}} \right) \end{aligned}$$

由于存在关系

$$\sum_{m=0}^{2^L-1} e^{j\frac{2\pi mk}{2^L}} = \begin{cases} 2^L, & k = i2^L \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

因此,  $V_k^{\text{OFDM}}$  可以计算为

$$V_k^{\text{OFDM}} = \begin{cases} \frac{2^L}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N/2^L-1} v_n^{\text{OFDM}} e^{j\frac{2\pi nk}{N}}, & k = i2^L \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

从而证明了当重构信号的时域结构满足式(4)的对称性时, 其频域信号满足式(3)的形式, 不会干扰RLO-OFDM的信息传输。

根据式(4)中时域信号的对称性,可以设计叠加于分层OFDM的VOOK信号。具体地,将VOOK的码字 $c$ 的长度设置为 $D = N/2^L$ ,进一步地,针对分层OFDM的VOOK的码字采用形式

$$\mathbf{c}^{\text{OFDM}} = \underbrace{[c, c, \dots, c]}_{2^L \uparrow} \quad (5)$$

根据码字 $\mathbf{c}^{\text{OFDM}}$ ,可以产生叠加于分层OFDM的VOOK信号,表示为

$$v_n^{\text{OFDM}} = \begin{cases} I_H, & c_n^{\text{OFDM}} = 1 \\ I_L, & c_n^{\text{OFDM}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $I_H$ 和 $I_L$ 分别表示LED允许的最大和最小电流值, $v_n^{\text{OFDM}} = I_H$ 和 $v_n^{\text{OFDM}} = I_L$ 分别对应VOOK的开启和关闭状态<sup>[1]</sup>, $c_n^{\text{OFDM}}$ 表示码字 $\mathbf{c}^{\text{OFDM}}$ 的第 $n$ 个元素。由于VOOK信号的频域结构满足式(3),不会干扰前 $L$ 层的信息传输,能够保证分层OFDM的信号检测不受VOOK调光控制的影响。

## 2.2 重构分层光OFDM(RLO-OFDM)方法

在VLC中,分层OFDM方法具有高效的频谱效率,但现有分层OFDM方法采用限幅的方式生成信号,由于各层OFDM信号的限幅操作导致限幅失真干扰后续分层,接收端依赖于SIC方式,导致较高的接收复杂度和处理时延。此外,VOOK存在开启状态和关闭状态,针对不同的状态需叠加不同极性的分层OFDM信号,才能保证混合调制信号工作在LED的线性动态区间,从而避免非线性失真。为此,本文将进一步地针对VOOK设计新型的RLO-OFDM方法,采用全新的方式生成分层OFDM信号,避免采用限幅操作导致的分层间干扰,并通过引入分层OFDM的重构过程,消除VOOK和分层OFDM混合传输时存在的非线性失真。同时,在设计重构信号时,确保重构信号落入未承载信息的分层,避免对分层OFDM传输的干扰,提出的RLO-OFDM可以采用标准的OFDM接收机完成信号检测,显著地降低接收复杂度和处理时延。

为了解决传统分层OFDM方法中分层间干扰问

题,本文将采用全新的思路产生分层OFDM信号,首先将分层后的子载波划分为用于承载信息和未承载信息的子载波集合,当采用前 $L$ 层的子载波进行信息传输,用于承载信息的子载波集合可以表示为

$$Q = \{k | k = 2^{l-1}(2i+1), i = 0, 1, \dots, N/2^l - 1, l = 1, 2, \dots, L\} \quad (7)$$

进一步地,后续分层未用于信息传输,未承载信息的子载波集合可以表示为

$$\tilde{Q} = \{k | k = i2^L, i = 0, 1, \dots, N/2^L - 1\} \quad (8)$$

将发送信息加载在集合 $Q$ 的子载波上,集合 $\tilde{Q}$ 的子载波上取值设置为零,从而产生分层OFDM的频域信号,将第 $k$ 个子载波的频域信号表示为 $X_k, k = 0, \dots, N-1$ , $X_k$ 的频域结构可以表示为

$$X_k = \begin{cases} B_k, & k \in Q \\ 0, & k \in \tilde{Q} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $B_k$ 表示加载至第 $k$ 个子载波的正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)符号,图1给出了采用 $L = 2, 3, 4$ 的频域结构示意图。对频域信号 $X_k, k = 0, 1, \dots, N-1$ 执行快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)操作,生成分层OFDM的时域信号,将第 $n$ 个采样时刻的时域信号表示为 $x_n, n = 0, 1, \dots, N-1$ ,可以看到,根据式(9)产生的分层OFDM信号避免了限幅操作导致的层间干扰。

由于LED的非线性,传输信号需工作在线性区间 $[I_L, I_H]$ 中,但如式(6)所示,VOOK信号存在开启和关闭状态,即 $v_n^{\text{OFDM}} = I_H$ 和 $v_n^{\text{OFDM}} = I_L$ 。当VOOK信号和分层OFDM直接叠加传输时,会导致分层OFDM信号超出LED的线性区间,造成非线性失真。为此,本文进一步地提出RLO-OFDM方法,RLO-OFDM通过引入重构信号,对分层OFDM信号进行重构,确保混合信号工作在LED的线性区间。将第 $n$ 个采样时刻的分层OFDM的重构信号表示为 $r_n, n = 0, 1, \dots, N-1$ ,则RLO-OFDM信号可以表示为

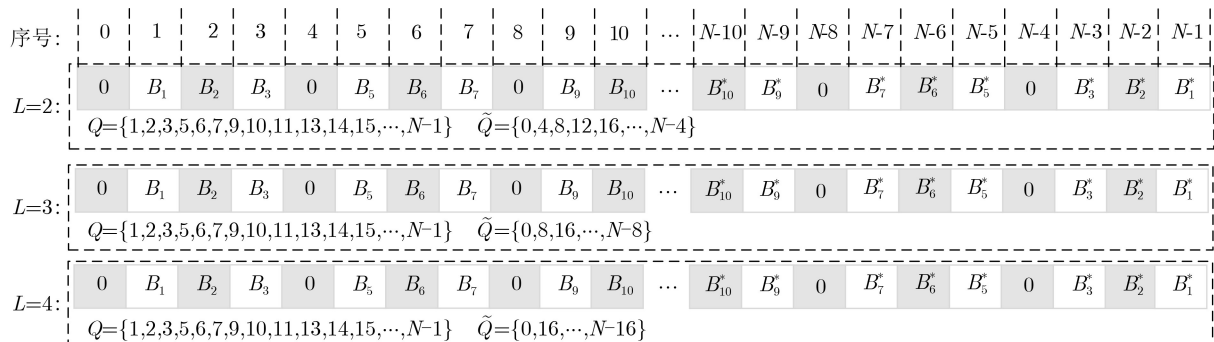


图1 采用 $L = 2, 3, 4$ 层的频域结构示意图



$$y_n = x_n + r_n, n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (10)$$

其中,  $y_n$ 表示RLO-OFDM信号。下面将讨论重构信号 $r_n$ 的计算, 首先, 重构信号不能干扰分层OFDM的信息传输, 由于发送信息加载在集合 $Q$ 的子载波上, 因此, 重构信号 $r_n$ 在集合 $Q$ 的子载波上取值为零, 此时,  $r_n$ 的频域信号满足

$$R_k = \begin{cases} 0, & k \in Q \\ R_k, & k \in \tilde{Q} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $R_k$ 表示第 $k$ 个子载波的频域信号。进一步地, 可以采用类似式(4)的证明方法, 推导获得重构信号需满足对称性

$$r_n = r_{n+N/2^L}, n = 0, 1, \dots, N/2^L - 1 \quad (12)$$

此外, 重构信号应保证混合信号工作在LED的线性区间, 当VOOK处于开启状态时, 即 $v_n^{\text{OFDM}} = I_H$ 时, RLO-OFDM信号需为负极性, 而当VOOK处于关闭状态时, 即 $v_n^{\text{OFDM}} = I_L$ 时, RLO-OFDM信号应为正极性。考虑 $n = 0, 1, \dots, N/2^L - 1$ 的情况, 当 $v_n^{\text{OFDM}}$ 取值为最大允许电流 $I_H$ 时, 即 $c_n = 1$ , 根据式(4)的对称性, VOOK的采样信号 $v_{n+mN/2^L}^{\text{OFDM}}$ ,  $m = 0, 1, \dots, 2^L - 1$ 均处于开启状态, 则RLO-OFDM的采样信号 $y_{n+mN/2^L}$ ,  $m = 0, 1, \dots, 2^L - 1$ 均为负极性, 即

$$\left. \begin{aligned} x_n + r_n &\leq 0, \\ x_{n+N/2^L} + r_{n+N/2^L} &\leq 0, \\ &\vdots \\ x_{n+N-N/2^L} + r_{n+N-N/2^L} &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

结合 $r_n$ 的时域对称性,  $r_n$ 需满足

$$r_n \leq \min\{-x_n, -x_{n+N/2^L}, \dots, -x_{n+N-N/2^L}\} \quad (14)$$

同理, 当 $v_n^{\text{OFDM}}$ 为低电平信号 $I_L$ 时,  $r_n$ 需满足

$$\begin{aligned} r_n &\geq \max\{-x_n, -x_{n+N/2^L}, \dots, -x_{n+N-N/2^L}\} \\ &= -\min\{x_n, x_{n+N/2^L}, \dots, x_{n+N-N/2^L}\} \end{aligned} \quad (15)$$

因此, 为了保证混合调制信号工作在LED的线性区间内, 重构信号 $r_n$ 可以设置为

$$r_n = s_n \min\{-s_n x_n, -s_n x_{n+N/2^L}, \dots, -s_n x_{n+N-N/2^L}\}, n = 0, 1, \dots, N/2^L - 1 \quad (16)$$

其中,  $s_n \triangleq 2c_n^{\text{OFDM}} - 1$ ,  $c_n^{\text{OFDM}}$ 表示 $c^{\text{OFDM}}$ 第 $n$ 个元素。进一步地, 将计算出的 $r_n$ ,  $n = 0, 1, \dots, N/2^L - 1$ 重复 $2^L$ 次, 可以生成一个OFDM符号时间的重构信号, 叠加于分层OFDM信号 $x_n$ 生成RLO-OFDM信号。

### 2.3 融合VOOK和RLO-OFDM的混合调制方法

在混合调制中, VOOK和RLO-OFDM信号叠加传输, 实现调光控制和高效频谱信息传输的双重功能, 可以表示为

$$y_n^{\text{hybrid}} = y_n + v_n^{\text{OFDM}}, n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (17)$$

其中,  $y_n^{\text{hybrid}}$ 表示混合调制信号。最终, 提出的混合调制方法的发送流程如图2所示, 分为VOOK和RLO-OFDM两路调制过程。其中, VOOK调制根据输入比特产生VOOK码字, 并重复 $2^L$ 次后, 进一步地生成叠加于RLO-OFDM的VOOK信号。在RLO-OFDM调制中, 输入比特进行QAM调制后, 分配至前 $L$ 层的子载波上。与传统分层OFDM采用多路IFFT模块不同, 提出方法只需采用单个IFFT模块, 即可生成分层OFDM信号。进一步地对分层OFDM信号进行重构, 获得RLO-OFDM信号, 与VOOK叠加完成混合调制。

下面将分析混合调制方法的调光控制性能。首先, 将OFDM信号的比例因子定义为 $\alpha = (I_H - I_L)/\sigma$ , 其中,  $\sigma^2$ 为OFDM信号的功率。当VOOK处于开启状态时, 将功率归一化情况下的重构信号 $r_n$ 的均值表示为 $I_r$ , 则对于采用比例因子 $\alpha$ 的分层OFDM, 其重构信号 $r_n$ 的均值为 $(I_H - I_L) I_r/\alpha$ 。此外, 根据信号的对称性, 当VOOK处于关闭状态时, 重构信号 $r_n$ 的均值为 $-(I_H - I_L) I_r/\alpha$ 。进一步地, 当调光控制符号 $b$ 取值为0时, 混合调制信号的均值可以表示为

$$I_A = \frac{I_H + I_L}{2} \delta_d + (1 - \delta_d) [I_L + (I_H - I_L) I_r/\alpha] \quad (18)$$

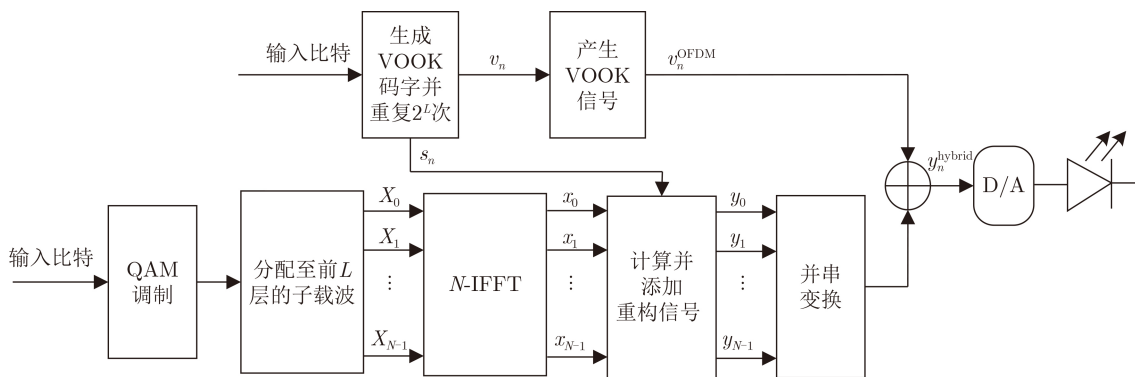


图2 提出的混合调制流程框图

此外, 当调光控制符号 $b$ 取值为1时, 混合调制信号的均值可以表示为

$$I_A = \frac{I_H + I_L}{2} \delta_d + (1 - \delta_d) [I_H - (I_H - I_L) I_r / \alpha] \quad (19)$$

因此, 根据调光水平的定义, 混合调制信号能够实现的调光水平可以计算为

$$\gamma_{\text{hybrid}} = \frac{I_A - I_L}{I_H - I_L} = \begin{cases} \frac{1}{2} \delta_d + \frac{I_r}{\alpha} (1 - \delta_d), & b = 0, \\ 1 - \frac{1}{2} \delta_d - \frac{I_r}{\alpha} (1 - \delta_d), & b = 1 \end{cases} \quad (20)$$

通过上式可以观察到, 混合调制信号的调光水平与数据占空比 $\delta_d$ 的关系为线性的, 因此, 可以通过调节 $\delta_d$ , 实现调光水平的线性调节。此外, 由于数据占空比的取值范围为 $0 \leq \delta_d \leq 1$ , 通过调节 $\delta_d$ , 可以实现的调光范围为

$$\frac{I_r}{\alpha} \leq \gamma_{\text{hybrid}} \leq 1 - \frac{I_r}{\alpha} \quad (21)$$

因此, 针对相对较低或较高的调光水平, 可以通过增大比例因子 $\alpha$ 的方式实现。当调光控制符号取值为0时, 较大的比例因子 $\alpha$ , 对应较低的调光水平, 在调光控制符号取值为1的情况下, 较大的比例因子 $\alpha$ , 对应较高的调光水平。

### 3 混合调制的接收方法

本节主要讨论混合调制的信号检测, 可见光信号通过光电检测器件后, 转化为电信号, 进一步地经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)生成频域信号, 可以表示为

$$Z_k = H_k Y_k^{\text{hybrid}} + U_k, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (22)$$

其中,  $Z_k$ 表示频域接收信号,  $H_k$ 表示第 $k$ 个子载波的信道增益,  $Y_k^{\text{hybrid}}$ 表示混合调制的频域信号,  $U_k$ 为第 $k$ 个子载波的噪声, 包括散粒噪声和热噪声等, 可以建模为均值为零的高斯白噪声。针对接收信号, 可以采用单抽头频域均衡方式消除ISI, 表示为

$$\hat{Z}_k = \frac{Z_k}{H_k} = Y_k^{\text{hybrid}} + \frac{U_k}{H_k} \triangleq Y_k^{\text{hybrid}} + \hat{U}_k, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (23)$$

其中,  $\hat{Z}_k$ 表示均衡后的频域信号。根据式(17), 频域信号 $Y_k^{\text{hybrid}}$ 由RLO-OFDM和VOOK信号构成, 其中, RLO-OFDM的QAM传输符号加载在前 $L$ 层的子载波上, RLO-OFDM的重构信号和VOOK信号落入后续分层, 即

$$\hat{Z}_k = \begin{cases} B_k + \hat{U}_k, & k \in Q \\ R_k + V_k^{\text{OFDM}} + \hat{U}_k, & k \in \tilde{Q} \end{cases} \quad (24)$$

RLO-OFDM的传输信息不会受到VOOK和重构信号的干扰, 可以采用以下准则直接进行符号的检测

$$\hat{B}_k = \arg \min_{B \in \Omega_B} |\hat{Z}_k - B|^2, k \in Q \quad (25)$$

其中,  $\hat{B}_k$ 表示检测出的QAM符号,  $\Omega_B$ 表示QAM的符号集合。

进一步地进行VOOK的信号检测, 由于需要基于VOOK时域信号进行比特判决, 因此, 可以将频域均衡后的信号变换为时域信号, 由于VOOK信号只落入集合 $\tilde{Q}$ 的子载波上, 可以提取出集合 $\tilde{Q}$ 的子载波对应的频域信号 $\hat{Z}_k$ , 集合 $\tilde{Q}$ 包含 $N/2^L$ 个子载波, 因此, 只需执行 $N/2^L$ 点IFFT操作即可还原包含VOOK的时域信号, 将集合 $\tilde{Q}$ 的子载波对应的时域信号表示为 $\hat{z}_n, n = 0, 1, \dots, N/2^L$ 。在信号 $\hat{z}_n$ 中, VOOK存在重构信号的干扰, 但由于VOOK信号的功率大于重构信号的功率, 因此, 可以将重构信号作为噪声处理。当采用多个采样点传输同一个比特时, 可以对多个采样点取均值操作, 并利用以下规则进行比特判决, 完成VOOK信号的检测

$$\hat{d}_n = \begin{cases} 1, & \hat{z}_n \geq \frac{I_H + I_L}{2} \\ 0, & \hat{z}_n < \frac{I_H + I_L}{2} \end{cases} \quad (26)$$

其中,  $\hat{d}_n$ 表示判决出的VOOK的比特信息。

最终, 混合调制的接收流程如图3所示, 接收到的可见光信号通过光电检测器件转化为电信号, 在执行IFFT操作和频域均衡后, 并行地进行VOOK和RLO-OFDM的信号检测, 无须采用SIC方式, 两种信号检测过程不会相互影响。更为重要的, RLO-OFDM中各分层不存在层间干扰, 可以直接采用标准的OFDM接收机结构, 利用单个IFFT模块完成信号检测, 避免了SIC方式导致的复杂度和处理时延的急剧提升。此外, 接收机充分地利用RLO-OFDM的IFFT操作, 实现了VOOK信号的频域均衡。

### 4 混合调制的复杂度分析

针对提出的混合调制方法, 本文进一步地分析计算复杂度和处理时延。与VLC中传统OFDM方法相比, 混合调制的主要区别在于重构信号和所采用的IFFT/FFT操作。重构信号的计算过程主要是求取最大和最小值, 由于传统OFDM方法中的限幅操作等价于求取信号幅值与零的最大值, 重构信号的计算复杂度接近限幅操作的复杂度, 且明显低于IFFT/FFT中乘法操作的复杂度。因此, 本文主要分析调制方法中涉及的IFFT/FFT操作的计算复杂度。

混合调制的接收端需执行 $N$ 点复值IFFT操作, 当采用 $L$ 层传输时,  $N/2^L$ 个子载波的取值为零, 将

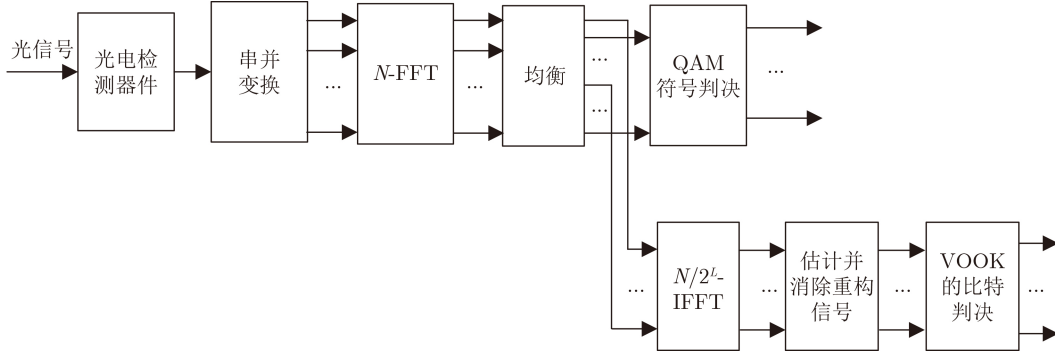


图3 混合调制的接收流程框图

取值为零的子载波排除在外, 其计算复杂度可以近似地表示为 $(2 - 1/2^{L-1}) O(N \log_2 N)$ , 与传统的LACO-OFDM的计算复杂度相同。虽然两种方法的计算复杂度相近, 但提出的混合调制只需1个IFFT模块, 而LACO-OFDM需依赖于 $L$ 个IFFT模块, 耗费了更多的硬件资源。此外, DCO-OFDM的计算复杂度为 $2O(N \log_2 N)$ , 因此, 提出的混合调制的发送端复杂度低于DCO-OFDM, 随着采用层数的增大, 其计算复杂度逐渐趋近于DCO-OFDM的复杂度。

在接收端, 提出的混合调制方法需执行 $N$ 点实值FFT, 以及 $N/2^L$ 点复值IFFT操作, 其中,  $N$ 点的实值FFT操作的复杂度为 $O(N \log_2 N)$ ,  $N/2^L$ 点复值IFFT操作的计算复杂度可以近似地表示为 $1/2^{L-1} O(N \log_2 N)$ , 因此, 提出方法接收端的计算复杂度表示为 $(1 + 1/2^{L-1}) O(N \log_2 N)$ 。相比之下, DCO-OFDM和LACO-OFDM接收端的计算复杂度分别为 $O(N \log_2 N)$ 和 $(5 - 1/2^{L-3}) O(N \log_2 N)$ , 可以看到, 虽然提出方法接收端的复杂度略高于DCO-OFDM, 但相比同类型的分层调制方法, 显著地降低了接收端的计算复杂度。

在处理时延方面, 当采用基2-IFFT/FFT算法时, 提出方法发送端的 $N$ 点复值IFFT操作需经过 $\log_2 N$ 级蝶形运算, 同样, DCO-OFDM的发送端经历的蝶形运算级数为 $\log_2 N$ 。对于LACO-OFDM, 其发送端需要 $L$ 个IFFT操作, 但由于这些IFFT操作均为并行执行, 因此, LACO-OFDM的发送端的处理时延由最大的蝶形级数决定, 即 $\log_2 N$ 级蝶形运算。可以看到, 提出方法发送端具有与DCO-OFDM和LACO-OFDM接近的处理时延。对于接收端, 提出方法需经过 $N$ 点实值FFT, 以及 $N/2^L$ 点复值IFFT操作, 由于FFT和IFFT操作是串行执行的, 因此, 提出方法的接收端经历的蝶形运算级数为 $2 \log_2 N - L$ 。相比之下, DCO-OFDM的接收端需经历 $\log_2 N$ 级蝶形运算, LACO-OFDM经历的蝶形运算级数为 $\log_2 N + 2 \sum_{l=1}^{L-1} \log_2(N/2^{l-1})$ 。可

以看出, 传统分层OFDM方法接收端的处理时延随着层数 $L$ 的增大显著增加, 而提出方法接收端的处理时延保持稳定, 且明显低于传统分层OFDM方法。

## 5 仿真结果与分析

本节针对提出的方法, 给出仿真结果和性能分析。与文献[18]采用相同的仿真设置, LED的最小和最大电流值分别设置为 $I_L = 0$  A和 $I_H = 1$  A, 即LED的线性动态区间为 $[0, 1]$ , 超出该线性区间的信号将被限幅。同时, 在仿真中, 考虑平坦信道的情况, 并不失一般性地将信道增益设置为 $H_k = 1, \forall k$ 。此外, RLO-OFDM的子载波数目设定为256个。本文首先给出了提出方法的调光性能, 然后分析了其峰均比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)情况, 进一步地, 给出了在LED有限的线性动态区间下的BER性能, 最后, 研究了提出方法的频谱效率。

通过改变数据占空比 $\delta_a$ , VOOK能够线性地调节调光水平, 提出的混合调制方法融合了VOOK, 因此, 能够实现线性调光控制。为了验证这一点, 图4描述了提出的VOOK-RLO-OFDM方法实现的调光水平与数据占空比 $\delta_a$ 的关系, 可以看到, 提出的混合调制的调光水平随数据占空比 $\delta_a$ 线性地变化, 保持了VOOK调光控制的优势。此外, 图4给出了不同比例因子下的调光水平, 可以观察到, 随着比例因子 $\alpha$ 的增大, 实现的调光水平范围逐渐增大。因此, 当需要相对较低或者较高的调光水平时, 可以通过增大比例因子 $\alpha$ 的方式实现。

PAPR是衡量OFDM对抗非线性能力的一项重要指标, 在非线性情况下, 过高的PAPR会导致严重失真, 降低传输性能。图5给出了各种OFDM方法PAPR的互补累积分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)。通过图5可以看到, 相比传统ACO-OFDM和LACO-



OFDM, 提出方法在PAPR方面具有显著的性能优势, 在 $L = 4$ 的情况下, 分别实现了近6 dB和3 dB的PAPR降低。因此, 提出方法具有更优的对抗非线性失真的能力, 能够在LED非线性下, 获得更好的传输性能。此外, 类似于LACO-OFDM, 随着采用的分层数目 $L$ 增加, 更多的子载波用于信息传输, OFDM信号平均功率随之增大, 因此, 从图5可以观察到, PAPR随着分层数目 $L$ 增加而逐渐降低。

图6进一步地研究了在LED有限的线性动态区间下, 提出的VOOK-RLO-OFDM调制方法的BER性能随比例因子 $\alpha$ 的变化趋势, 同时给出了基于LACO-OFDM的可调光HLACO-OFDM方法的BER性能。在仿真中, 各层均采用32-QAM调制, VOOK利用两个OFDM采样时刻传输一个比特信息, 噪声的功率设置为 $-5$  dBm。比例因子 $\alpha$ 能够衡量OFDM信号在LED有限的线性区间下的非线性失真情况, 比例因子 $\alpha$ 取值越小, 表示OFDM信号的功率越大, 非线性失真程度越严重, 反之, OFDM信号的功率越小, 非线性失真程度越轻。从图6可以看到, RLO-OFDM的性能随比例因子 $\alpha$ 的增大, BER性能首先变好, 随后逐渐恶化。这是因

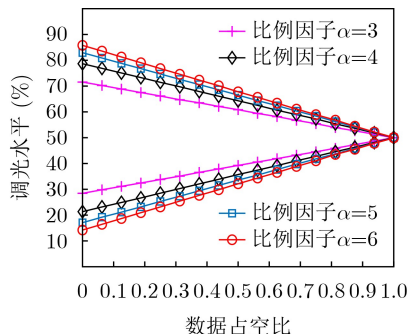


图4 提出混合调制方法实现的调光水平与数据占空比 $\delta_d$ 的关系

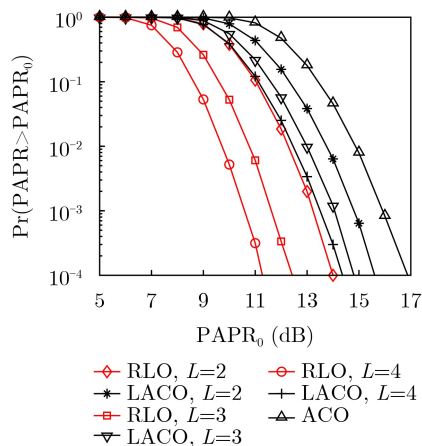


图5 提出的RLO-OFDM方法的PAPR性能

为在比例因子 $\alpha$ 取值较小的区间, 非线性失真是影响传输性能的主要因素, 而随着比例因子 $\alpha$ 的增大, 非线性失真程度逐渐变轻, 因而传输性能逐渐变好。但随着比例因子 $\alpha$ 进一步的增大, OFDM信号的有效传输功率也逐渐变小, 因此, BER性能又逐渐恶化。对于VOOK的信号检测, 由于将RLO-OFDM作为干扰进行处理, 随着比例因子 $\alpha$ 的增大, RLO-OFDM对VOOK信号的干扰逐渐降低, 因此, 通过图6可以观察到, VOOK的BER随着 $\alpha$ 的增大逐渐下降。此外, 鉴于其更低的PAPR, RLO-OFDM具有更好的对抗LED非线性的能力, 因此, 在采用相同的层数情况下, RLO-OFDM相比HLACO-OFDM表现出更优的BER性能。

图7展示了在不同的调光水平下, 提出的VOOK-RLO-OFDM调制方法达到目标BER的可达频谱效率, 类似于文献[18], BER目标设定为 $2 \times 10^{-3}$ , 同时, 考虑 $-15$  dBm和 $-5$  dBm的噪声功率。为了比较, 同时给出了基于ACO-OFDM的可调光RPO-OFDM和基于LACO-OFDM的HLACO-OFDM方法的频谱效率, 其中, 相关研究已经表明HLACO-OFDM相比DCO-OFDM等常规方法具有更高的频谱效率, 是目前已知的频谱高效的可调光OFDM传输方案。通过图7可以观察到, 在频谱效率方面, 提出的VOOK-RLO-OFDM可调光传输方法相比于RPO-OFDM具有明显的性能优势。同时, 与现有的频谱高效的HLACO-OFDM方法相比, 在较宽的调光范围内, 取得了更高的频谱效率, 从而验证了提出方法的频谱高效性。此外, 噪声功率较大的情况下, 在相对较低和较高的调光水平区间, 提出的混合调制方法具有略微的频谱效率损失, 但提出方法在接收机复杂度和处理时延方面, 显著低于HLACO-OFDM。

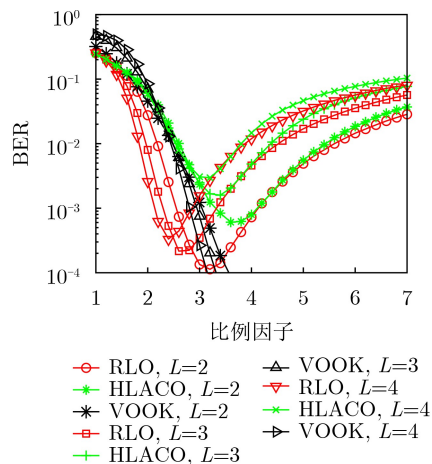


图6 在不同比例因子 $\alpha$ 下, 提出的混合调制方法的BER性能



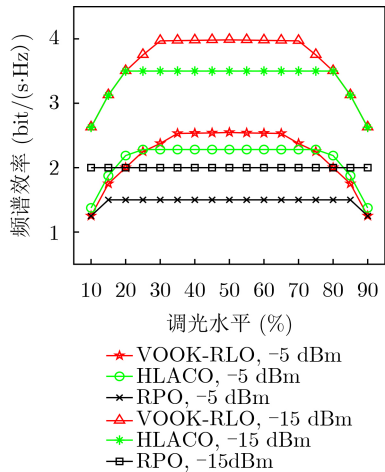


图7 不同调光水平下可调光调制方法的频谱效率

## 6 结束语

为了满足VLC的照明和高速率传输的双重需求, 本文提出了一种融合VOOK和RLO-OFDM的混合调制方法, 同时实现了调光控制和高效频谱通信的功能。相比传统的VOOK和其他可调光O-OFDM方法, 本文提出的VOOK-RLO-OFDM混合调制方法具有更高的频谱效率, 且相较传统的分层O-OFDM方法, 显著地降低了接收复杂度和处理时延。相关仿真结果表明, 本文提出混合调制方法能够保持VOOK线性调光控制的优势, 同时, 具有更低的PAPR, 提升了对抗LED非线性的能力, 在LED有限的线性工作区间下, 具有更好的BER传输性能。本文提出方法在接收复杂度、频谱效率、BER性能等方面的显著优势, 使其成为一种具有竞争力的高效调制方法, 能够满足未来6G中VLC的高速率传输需求。

## 参考文献

- [1] 迟楠, 贾俊连. 面向6G的可见光通信[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(2): 11–19. doi: [10.12142/ZTETJ.202002003](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202002003).  
CHI Nan and JIA Junlian. Visible light communication towards 6G[J]. *ZTE Technology Journal*, 2020, 26(2): 11–19. doi: [10.12142/ZTETJ.202002003](https://doi.org/10.12142/ZTETJ.202002003).
- [2] 商建东, 孙浩博, 王法松. 基于SVM的广义空移键控可见光通信系统信号检测算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2894–2901. doi: [10.11999/JEIT200711](https://doi.org/10.11999/JEIT200711).  
SHANG Jiandong, SUN Haobo, and WANG Fasong. SVM-aided signal detection in generalized space shift keying visible light communication system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(10): 2894–2901. doi: [10.11999/JEIT200711](https://doi.org/10.11999/JEIT200711).
- [3] LE PRIOL R, HÉLARD M, HAESE S, *et al.* Experimental comparison of PAM and CAP modulation for visible light communication under illumination constraints[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 7315811. doi: [10.1109/JPHOT.2022.3148467](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3148467).
- [4] IEEE. IEEE Standard 802.15. 7<sup>TM</sup>-2018 IEEE standard for local and metropolitan area networks—Part 15.7: Short-range optical wireless communications[S]. New York: IEEE, 2019. doi: [10.1109/IEEESTD.2019.8697198](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8697198).
- [5] LEE K and PARK H. Modulations for visible light communications with dimming control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(16): 1136–1138. doi: [10.1109/LPT.2011.2157676](https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2157676).
- [6] RAJ R, JAISWAL S, and DIXIT A. Dimming-based modulation schemes for visible light communication: Spectral analysis and ISI mitigation[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 1777–1798. doi: [10.1109/OJCOMS.2021.3098105](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3098105).
- [7] WANG Tengjiao, YANG Fang, SONG Jian, *et al.* Dimming techniques of visible light communications for human-centric illumination networks: State-of-the-art, challenges, and trends[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(4): 88–95. doi: [10.1109/MWC.001.1900388](https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900388).
- [8] LI Baolong, FENG Simeng, and XU Wei. Spectrum-efficient hybrid PAM-DMT for intensity-modulated optical wireless communication[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12621–12637. doi: [10.1364/OE.392127](https://doi.org/10.1364/OE.392127).
- [9] YANG Yang, ZENG Zhimin, CHENG Julian, *et al.* An enhanced DCO-OFDM scheme for dimming control in visible light communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 7904813. doi: [10.1109/JPHOT.2016.2570019](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2570019).
- [10] NGUYEN T, ISLIM M S, CHEN Cheng, *et al.* iDim: Practical implementation of index modulation for LiFi dimming[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(4): 1880–1891. doi: [10.1109/TGCN.2021.3089758](https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3089758).
- [11] ELGALA H and LITTLE T D C. Reverse polarity optical-OFDM (RPO-OFDM): Dimming compatible OFDM for gigabit VLC links[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 24288–24299. doi: [10.1364/OE.21.024288](https://doi.org/10.1364/OE.21.024288).
- [12] ZHANG Xiaoyu, BABAR Z, PETROPOULOS P, *et al.* The evolution of optical OFDM[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(3): 1430–1457. doi: [10.1109/COMST.2021.3065907](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3065907).
- [13] WANG Qi, QIAN Chen, GUO Xuhan, *et al.* Layered ACO-OFDM for intensity-modulated direct-detection optical wireless transmission[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12382–12393. doi: [10.1364/OE.23.012382](https://doi.org/10.1364/OE.23.012382).
- [14] ISLIM M S and HAAS H. Augmenting the spectral efficiency of enhanced PAM-DMT-based optical wireless communications[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11):

- 11932–11949. doi: [10.1364/OE.24.011932](https://doi.org/10.1364/OE.24.011932).
- [15] BAI Ruowen and HRANILOVIC S. Absolute value layered ACO-OFDM for intensity-modulated optical wireless channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(11): 7098–7110. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3010986](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3010986).
- [16] WANG Qi, WANG Zhaocheng, DAI Linglong, *et al.* Dimmable visible light communications based on multilayer ACO-OFDM[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 7905011. doi: [10.1109/JPHOT.2016.2573040](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2573040).
- [17] WANG T Q and HUANG Xiaojing. Fractional reverse polarity optical OFDM for high speed dimmable visible light communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(4): 1565–1578. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2787706](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2787706).
- [18] SUN Yaqi, YANG Fang, and GAO Junnan. Novel dimmable visible light communication approach based on hybrid LACO-OFDM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(20): 4942–4951. doi: [10.1109/JLT.2018.2866825](https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2866825).
- [19] LI Baolong, XU Wei, FENG Simeng, *et al.* Spectral-efficient reconstructed LACO-OFDM transmission for dimming compatible visible light communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 7900714. doi: [10.1109/JPHOT.2019.2892849](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2892849).
- 李宝龙: 男, 1989年生, 博士, 讲师, 研究方向为可见光通信、无线通信.
- 施建锋: 男, 1994年生, 博士, 讲师, 研究方向为无线通信.
- 吴勤勤: 男, 1991年生, 博士, 讲师, 研究方向为光通信器件.
- 冯斯梦: 女, 1993年生, 博士, 副研究员, 研究方向为可见光通信、无线光通信.
- 责任编辑: 马秀强