

可见光通信中正交频分复用调制技术

徐宪莹 岳殿武

Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication

XU Xian-ying, YUE Dian-wu

引用本文:

徐宪莹, 岳殿武. 可见光通信中正交频分复用调制技术[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 516–527. doi: 10.37188/CO.2020–0051

XU Xian-ying, YUE Dian-wu. Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 516–527. doi: 10.37188/CO.2020–0051

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载激光通信技术研究进展

Progress of research on satellite-borne laser communication technology

中国光学. 2019, 12(6): 1260 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1260>

基于数字相位恢复算法的正交相移键控自由空间相干光通信系统

Coherent free-space optical communication system with quadrature phase-shift keying modulation using a digital phase recovery algorithm

中国光学. 2019, 12(5): 1131 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1131>

大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view

中国光学. 2019, 12(3): 678 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0678>

离焦对激光通信接收视场的影响分析

Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception

中国光学. 2018, 11(5): 822 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0822>

空间激光通信最新进展与发展趋势

Latest developments and trends of space laser communication

中国光学. 2018, 11(6): 901 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0901>

二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术

Coarse tracking technology of secondary imaging Coude-type laser communication terminal

中国光学. 2018, 11(4): 644 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0644>

可见光通信中正交频分复用调制技术

徐宪莹^{1,2}, 岳殿武^{1*}

(1. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;
2. 大连科技学院 电气工程学院, 辽宁 大连 116052)

摘要:可见光通信(VLC)由于可以弥补射频通信的不足而成为研究热点,正交频分复用(OFDM)技术因其高数据速率和抗频率选择性衰落被广泛应用在VLC中。本文从能量效率、频谱效率、误码率、计算复杂度等方面对可见光通信系统中OFDM调制技术进行研究和比较,主要包括基于离散傅立叶变换的单极性方案、改进或增强型方案和混合型方案,基于哈特莱变换的光OFDM,以及基于LED索引调制的光OFDM。文中介绍了多种光OFDM调制技术的工作原理综合对比了频谱效率等性能;研究了光OFDM系统接收机改进方案;总结了可见光OFDM系统存在的问题和未来研究方向。本文对可见光OFDM系统进行归纳和总结,为提出更加高效的单极化调制技术、进一步提高系统频谱效率及可靠性提供了参考。

关键词:可见光通信;正交频分复用;频谱效率;接收机;索引调制

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2020-0051

Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication

XU Xian-ying^{1,2}, YUE Dian-wu^{1*}

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. College of Electrical Engineering, Dalian University of Science and Technology, Dalian 116052, China)

* Corresponding author, E-mail: dwyue@dlnu.edu.cn

Abstract: With its unique advantages, Visible Light Communication (VLC) can compensate for limitations in radio frequency communication, allowing it to become a recent avid topic of research. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has been widely used in VLC due to its high rate of data transfer and frequency selective fading resistance. We compare the performance of several OFDM modulation techniques in VLC, including unipolar schemes, enhanced schemes and hybrid schemes based on discrete Fourier transformation, as well as optical OFDM systems based on Hartley transform and LED index modulation. We perform these comparisons in terms of energy efficiency, spectral efficiency, bit error rate, and algorithm complexity. The principles of some kinds of optical OFDM systems are firstly illustrated and their spectrum efficiencies are theoretically analyzed and compared. We also research and analysis the improved design of re-

收稿日期:2020-03-30; 修订日期:2020-05-26

基金项目:国家自然科学基金(No. 61371091); 大连海事大学研究生教育教学改革研究项目(No. YJG2019205)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61371091); Research Project on Postgraduate Education and Teaching Reform of Dalian Maritime University (No. YJG2019205)

ceivers in optical OFDM systems. The challenges and upcoming research of OFDM systems in VLC are summarized. The research in this paper can provide a research reference and propose more efficient unipolar modulation schemes to further improve the spectral efficiency and reliability of optical OFDM systems.

Key words: visible light communication; orthogonal frequency division multiplexing; spectrum efficiency; improved receiver; index modulation

1 引言

由于光信号不受电磁干扰和辐射的影响,因此光通信可以代替射频通信应用在电磁污染严重的环境下。传统的光通信包括激光、红外通信和光纤通信等^[1]。发光二极管(LED)作为第4代照明光源,具有高效节能、绿色环保等优点^[2-3],白光LED已逐渐成为照明领域最具市场竞争力的光源,近几年,白光LED的性能也在不断提升^[4-5]。可见光通信(VLC)是无线光通信的新兴领域,基于白光LED的VLC技术能够兼顾照明和通信的双重作用,近些年已成为了研究热点^[6]。经过几年的发展,VLC已经能够实现非常高的数据速率,与现有的无线通信形式相比,可见光通信具有独特的优势^[7]。

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一种高效的多载波调制技术,能有效对抗多径干扰并提高系统的频带利用率。现代OFDM系统采用数字信号处理技术产生正交的子载波,系统结构简单、硬件便于设计且实现成本低^[8]。单个LED的调制带宽仅有几MHz,这成为限制系统传输速率的主要因素,为满足室内可见光通信高速数据传输的需求,可在可见光通信系统中引入OFDM^[9]。但是传统的OFDM符号是双极性的复数信号,对于采用强度调制/直接检测(Intensity Modulation/ Direct Detection, IM/DD)技术的VLC系统,要求OFDM符号满足“实、正”性,需要对OFDM符号进行单极化处理,因此对可见光通信中OFDM单极化调制技术的研究十分有必要。

国内外学者针对适用于VLC系统的单极性OFDM调制技术进行了大量的研究,主流方案是基于离散傅立叶变换(DFT)实现OFDM,具有代表性的包括加直流偏置光OFDM(DC-biased Optical OFDM, DCO-OFDM)^[10]、非对称限幅光OFDM(Asymmetrically Clipped Optical OFDM, ACO-OFDM)^[11]、单极性OFDM(Unipolar-OF-

DM, U-OFDM)^[12]、翻转OFDM(Flip-OFDM)^[13]、脉冲幅度调制离散多音频(Pulse Amplitude Modulated Discrete Multitone, PAM-DMT)^[14]和改进型ACO-OFDM(Modified ACO-OFDM)^[15]。此外,一些学者在原单极化方案的基础上进行了改进,提出增强型光OFDM,可获取更高的频谱效率,主要包括增强型U-OFDM(enhanced U-OFDM, eU-OFDM)^[16]、分层ACO-OFDM(Layered ACO-OFDM, LACO-OFDM)^[17]等。混合调制方案是利用两种或两种以上单极性光OFDM进行调制,其可充分利用子载波的调制信息,获得更加高效的频谱效率或功率效率,混合调制方案有非对称限幅直流偏置光OFDM(Asymmetrically clipped DC-biased optical OFDM, ADO-OFDM)^[18]、混合ACO-OFDM(Hybrid ACO-OFDM, HACO-OFDM)^[19]、增强型混合ACO-OFDM(Enhanced HACO-OFDM, EHACO-OFDM)^[20]、非对称限幅绝对值光OFDM(Asymmetrically clipped Absolute Value optical OFDM, AAO-OFDM)^[21]等。

然而,以上调制方案都需要对子载波数据进行厄米特对称设置,不需要厄米特对称的单极化方案有位置调制OFDM(Position Modulating OFDM, PM-OFDM)^[22]、极化OFDM(Polar OFDM, P-OFDM)^[23]等。

采用离散哈特莱变换(DHT)代替离散傅立叶变换,也可以避免厄米特对称,但限制调制符号为实星座映射,目前已有一些文献对基于哈特莱变换的光OFDM调制方案进行了论述,包括基于DHT的ACO、DCO、U-OFDM、LACO-OFDM等^[24-31]。

通过调研,考虑到利用LED空间资源可以避免上述方法中的一些限制,实现光信号“实、正”性要求。基于此,本文对基于LED索引调制的光OFDM进行了研究分析。在光OFDM调制方案的基础上,分析比较了接收机改进方案,以在保证系统频谱效率的同时提高系统可靠性。最后,对光OFDM系统中的峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)抑制技术、基于子载

波索引调制的光 OFDM(O-OFDM-IM)、以及光 OFDM 与调光控制技术和可重构智能反射面结合的应用进行了总结,并提出未来的研究方向。

2 基于离散傅立叶变换的光 OFDM

1971 年, Weinstein 和 Eben 提出使用离散傅

立叶逆/正变换实现 OFDM 系统调制/解调功能,解决了 OFDM 系统中子载波严格正交的问题,而快速傅立叶变换,可进一步简化硬件实现复杂度,降低实现成本,所以实际应用中,通常采用 IFFT/FFT(快速离散傅立叶逆/正变换)实现 OFDM 的调制/解调。图 1 所示为基于 IFFT/FFT 的光 OFDM 系统框图。

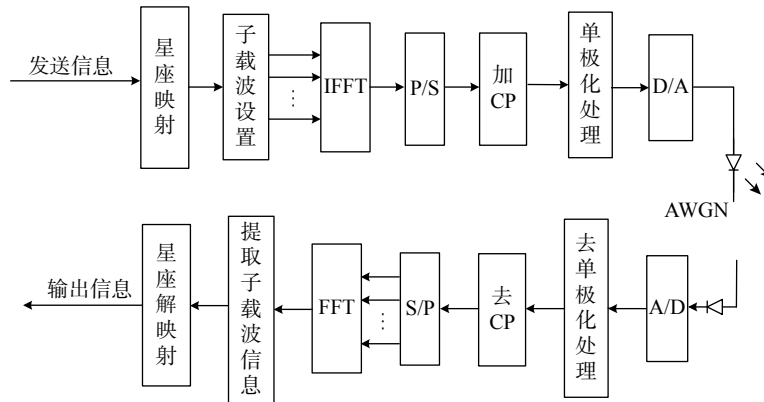


图 1 基于离散傅立叶变换的光 OFDM 系统框图

Fig. 1 Block diagram of an optical OFDM system based on discrete Fourier transformation

可见光系统采用 IM/DD,且经 LED 发送前的信号必须满足“实、正”性。为了得到实信号,通常需要对子载波信息进行厄米特对称设置,这会浪费一半的子载波资源。无需厄米特对称设置的方案中,又需要帧长加倍,也会对系统的有效性造成一定的影响。下面将针对是否需要厄米特对称两部分介绍基于傅立叶变换的光 OFDM 调制方案。

2.1 需要厄米特对称的光 OFDM

本节首先介绍初期出现的典型单极化方案;

在此基础上,介绍增强型方案,即通过并行传输或分层叠加方法,提高频谱利用率;最后介绍混合调制方案,即同时使用两种或两种以上的典型方案,更加充分利用子载波资源,能以相对小的系统复杂度提高频带利用率。

2.1.1 典型单极性光 OFDM

表 1 对几种典型单极性光 OFDM 的调制原理进行对比,其中 N 为 IFFT 点数, k 为子载波序号, n 为时域信号序列号。

表 1 典型单极性光 OFDM 调制原理对比

Tab. 1 Comparison of modulation principles of typical optical OFDM

典型单极性光 OFDM	频域子载波设置	时域信号极性	单极化处理
DCO-OFDM ^[10]	$X_k = X_{N-k}^*, 0 < k < \frac{N}{2}$	双极性实数	添加直流偏置
ACO-OFDM ^[11]	$X = (0, X_1, 0, X_3, \dots, X_{\frac{N}{2}-1}, 0, X_{\frac{N}{2}-1}^*, \dots, X_3^*, 0, X_1^*)$	双极性实数, 具有特殊对称性: $x_n = -x_{n+\frac{N}{2}} (0 \leq n < N/2)$	负值限幅
U-OFDM ^[12]	$X_k = X_{N-k}^*, 0 < k < \frac{N}{2}$	双极性实数	极性编码
Flip-OFDM ^[13]	$X_k = X_{N-k}^*, 0 < k < \frac{N}{2}$	双极性实数	“正”、“负”模块分别传输
PAM-DMT ^[14]	$X = (0, jX_{PAM,1}, jX_{PAM,2}, \dots, jX_{PAM, \frac{N}{2}-1}, 0, -jX_{PAM, \frac{N}{2}-1}, \dots, -jX_{PAM,2}, -jX_{PAM,1})$	双极性实数, 具有特殊对称性: $x_{N-n} = -x_n, 1 \leq n \leq \frac{N}{2} - 1$	负值限幅
MACO-OFDM ^[15]	$X = (0, X_1, 0, X_3, \dots, X_{\frac{N}{2}-1}, 0, X_{\frac{N}{2}-1}^*, \dots, X_3^*, 0, X_1^*)$	双极性实数具有特殊对称性: $x_n = -x_{n+\frac{N}{2}} (0 \leq n < \frac{N}{2})$	极性编码

对表1中单极化方案的频谱效率和功率效率性能进行仿真对比, 在误码率 $BER=10^{-3}$ 的情况下, 仿真得到发射端所需光信噪比 $E_{b(opt)}/N_0$ 的大

小, 绘制系统频带利用率与 $E_{b(opt)}/N_0$ 的关系图, 结果如图2所示。其中 DCO-OFDM 系统的直流偏置量取功耗最小情况^[18]。

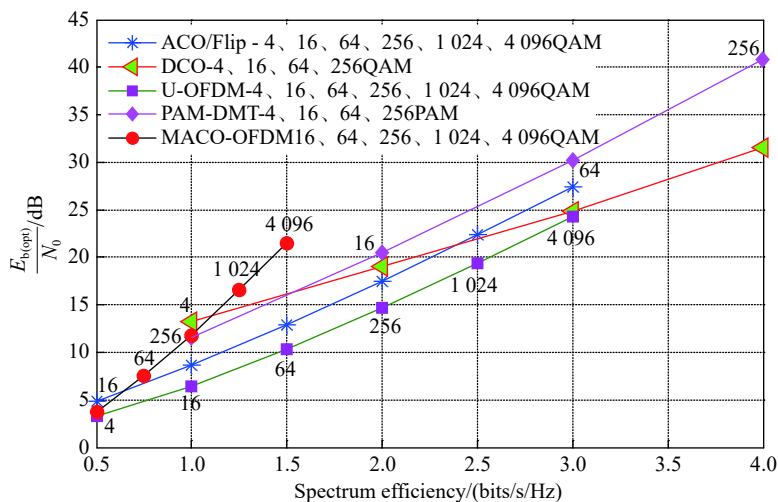


图2 光 OFDM 系统 $BER=10^{-3}$ 时光功耗与频带利用率的关系

Fig. 2 The relationship between optical power and spectral efficiency in the optical OFDM system under $BER=10^{-3}$

由图2可分析得出: (1)U-OFDM 是能效、频效双优方案; (2)DCO-OFDM 与 PAM-DMT 频谱效率较高, 而 DCO-OFDM 功率效率更优; (3)ACO-OFDM 与 DCO-OFDM 相比, 星座映射尺寸较小时, ACO-OFDM 功耗更小, 星座映射尺寸较大时, DCO-OFDM 能效更优; (4)MACO-OFDM 频谱效率最差, 但是功耗最小, 在对光功率限制严格的调光系统中, 可考虑选择 MACO-OFDM。

2.1.2 增强型光 OFDM

增强型光 OFDM 利用多路并行传输或分层叠加传输的思想, 更加充分利用频谱资源。eU-OFDM 系统中每路 U-OFDM 信号按照特定的帧格式排列, 各路信号叠加后传输, 其频谱利用率可提高近一倍, 在保留功率效率优势的同时提高了频谱效率^[16]。在此基础上, 文献^[32]提出了广义增强型 U-OFDM (GeneRalizEd EnhaNcEd unipolar OFDM, GREENER-OFDM)。将上述多路并行叠加思想进行泛化, 消除 eU-OFDM 与 DCO-OFDM 的频谱差距。同样, 调制方法可分别得到 ePAM-DMT^[33] 和 eACO-OFDM^[34]。上述几种多路并行叠加传输方案虽可获得与 DCO-OFDM 相同的频谱效率, 但以系统复杂度为代价。

LACO-OFDM 利用分层概念, 对子载波进行分层使用, 多层信息叠加同时进行传输, 相较于 ACO-OFDM 频谱效率可提高近一倍, 且由于无需

引入直流偏置, 功率效率高于 DCO-OFDM, 又由于帧长无需加倍, 信息速率高于 eU-OFDM^[17]。文献^[35]提出三层混合光 OFDM (Triple-layer Hybrid Optical OFDM, THO-OFDM), 该方案能以较低的运算复杂度获得与 LACO-OFDM 相同的频谱效率; 与层数相同的 LACO-OFDM 相比, 可以获得 3 dB 的 PAPR 增益。

2.1.3 混合光 OFDM

以 ACO-OFDM 为基础, 利用偶载波进行 DCO-OFDM 调制, 可以得到混合调制方案 ADO-OFDM。相较于 DCO-OFDM 系统, 其功率效率有所提高, 相较于 ACO-OFDM 系统, 其频谱效率有所提高, 同时可以通过最优化能量分配、直流偏置和星座尺寸获得最优的系统性能^[18]。然而, 由于 ADO-OFDM 中仍然需要引入直流偏置, 所以仍然存在能量损耗。针对此问题, 文献^[19]提出了 HACO-OFDM, 其可同时传输 ACO-OFDM 和 PAM-DMT 符号, 避免直流偏置的加入, 可实现较高的功率效率。在此基础上, 对偶数子载波的实部进行 DCO-OFDM 调制, 得到 EHACO-OFDM, 能进一步提高频谱效率和功率效率, 在高阶调制时, 可以获得更好的 BER 性能^[20]。文献^[21]提出的 AAO-OFDM 系统无需添加直流偏置, 功率效率高于 ADO-OFDM, 但是由于双极性 OFDM 的符号信息占据了 ACO-OFDM 部分子载波资源,

使得 AAO-OFDM 系统的频谱效率低于 ADO-OFDM 及 HACO-OFDM。

2.2 无需厄米特对称的光 OFDM

文献 [22] 提出将复数 OFDM 符号的实部、虚部及正、负极性分离, 以去除厄米特对称性的约束, 得到单极性 OFDM 符号, 并通过仿真验证了相同频谱效率下, PM-OFDM 系统的误码性能和计算复杂度优于 ACO-OFDM、U-OFDM 和 Flip-OFDM。

文献 [23] 提出的 P-OFDM, 利用极坐标系分别传输复信号的幅值和相位, 实现单极化处理, 其频谱效率是 ACO-OFDM 的 2 倍, 且 PAPR 性能和误码性能更优。文献 [36] 提出基于星座协作

映射的改进 P-OFDM 方法, 可在不牺牲 PAPR 的同时获得更好的平均误符号率性能, 在功率分配方案中, 能取得更好的结果。

对以上几种光 OFDM 调制方案从功率效率、频谱效率和计算复杂度方面进行比较, 见表 2。为了简化结果忽略循环前缀, 接收机为传统接收机(非分集接收或迭代接收)。表中, M 为子载波信号调制阶数; D 为并行传输叠加的总路数; d 为路数序号; L 为分层算法中子载波总层数; l 为层数序号。接收机复杂度判断依据为包含 FFT/IFFT 操作的次数, 一次 N 点 FFT/IFFT 操作的计算复杂度为 $O(N \log_2 N)$ 。部分结果参考文献 [37]。

表 2 光 OFDM 性能比较

Tab. 2 Performance comparison of optical OFDM schemes

光 OFDM	频谱效率 (bits·s ⁻¹ ·Hz ⁻¹)	功率效率	接收机复杂度
DCO-OFDM ^[10]	$\frac{N-2}{2N} \log_2 M$	低	$O(N \log_2 N)$
ACO-OFDM ^[11]	$\frac{1}{4} \log_2 M$	高	$O(N \log_2 N)$
U-OFDM ^[12]	$\frac{N-2}{4N} \log_2 M$	高	$O(N \log_2 N)$
Flip-OFDM ^[13]	$\frac{N-2}{4N} \log_2 M$	高	$O(N \log_2 N)$
PAM-DMT ^[14]	$\frac{N-2}{2N} \log_2 M$	低	$O(N \log_2 N)$
MACO-OFDM ^[15]	$\frac{1}{8} \log_2 M$	高	$O(N \log_2 N)$
eU-OFDM ^[16]	$\left(1 - \frac{1}{2^D}\right) \frac{N-2}{2N} \log_2 M$	高	$O[(2D-1)(N \log_2 N)]$
GREENER-OFDM ^[32]	$\frac{N-2}{4N} \sum_{d=1}^D \frac{\log_2 M_d}{2^{d-1}}$	高	$O[(2D-1)(N \log_2 N)]$
ePAM-DMT ^[33]	$\sum_{d=1}^D \frac{(N-2d) \log_2 M_d}{2^d N}$	高	$O\left(2 \sum_{d=1}^D N_d \log_2 N_d - N_D \log_2 N_D\right)$
eACO-OFDM ^[34]	$\sum_{d=1}^D \frac{\log_2 M_d}{2^{d+1}}$	高	$O\left(\sum_{l=1}^L \frac{N}{2^{l-2}} \log_2 \left(\frac{N}{2^{l-1}}\right) - \frac{N}{2^{L-1}} \log_2 \left(\frac{N}{2^{L-1}}\right)\right)$
LACO-OFDM ^[17]	$\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2^{L+1}}\right) \log_2 M$	高	$O\left(\sum_{l=1}^L \frac{N}{2^{l-2}} \log_2 \left(\frac{N}{2^{l-1}}\right) - \frac{N}{2^{L-1}} \log_2 \left(\frac{N}{2^{L-1}}\right)\right)$
THO-OFDM ^[35]	$\frac{1}{4} \log_2 M_{ACO}^1 + \frac{1}{8} \log_2 M_{ACO}^2 + \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{N}\right) \log_2 M_{PAM}$	高	TD: $O\left[N \left(\log_2 N + \log_2 \left(\frac{N}{2}\right)\right)\right]$ FD: $O\left[N \left(3 \log_2 N + \log_2 \left(\frac{N}{2}\right)\right)\right]$
ADO-OFDM ^[18]	$\frac{1}{4} \log_2 M_{ACO} + \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{N}\right) \log_2 M_{DCO}$	中	$O(4N \log_2 N)$
HACO-OFDM ^[19]	$\frac{1}{4} \log_2 M_{ACO} + \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{N}\right) \log_2 M_{PAM}$	高	$O(3N \log_2 N)$
EHACO-OFDM ^[20]	$\frac{1}{4} \log_2 M_{ACO} + \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{N}\right) (\log_2 M_{DCO} + \log_2 M_{PAM})$	高	$O(5N \log_2 N)$
AAO-OFDM ^[21]	$\frac{1}{4} (\log_2 M_{AVO} + \log_2 M_{ACO}) - \frac{1}{N} \log_2 M_{AVO} - \frac{1}{2}$	高	$O(4N \log_2 N)$
PM-OFDM ^[22]	$\frac{1}{4} \log_2 M$	高	PM-1: $O(M \log_2 N)$ PM-2: $O(9N \log_2 N)$
P-OFDM ^[23]	$\frac{1}{2} \log_2 M$	高	$O(N \log_2 N)$

3 基于离散哈特莱变换的光 OFDM

对于基于离散傅立叶变换的光 OFDM, 为使发送信号为实信号, 频域传输序列需要满足厄米特对称性或时域符号帧长需要加倍, 这都会损失一半的频谱效率。哈特莱变换可以保证子载波的正交性且核函数是实函数, 且无需厄米特对称即可得到实信号, 可有效提高频谱效率, 且哈特莱变换及其逆变换形式一样, 发送端和接收端的调制与解调可以由同一发生器实现, 节约硬件成本, 同时无虚部计算可以提高运算速度, 降低计算复杂

度^[38]。因此, 可以采用哈特莱变换代替傅立叶变换实现光 OFDM。

2010 年, Moreolo 首次提出基于离散哈特莱变换(DHT)实现 ACO-OFDM 和 DCO-OFDM, 与离散傅立叶变换(DFT)相比, 在相同信息速率下, DHT 能以更小尺寸的星座映射实现光 OFDM 系统, 同时不损失误码性能^[24], 且可以不受厄米特限制, 采用更加有效的 PAPR 抑制技术, 在高阶星座调制时, 能够显著提高系统的误码性能^[25], FHT(快速 DHT)计算成本相较于 FFT 可节省约 36%^[26]。在相同频谱效率下, 归纳比较了同一光 OFDM 系统基于 FFT 与 FHT 的性能, 见表 3。

表 3 基于 FFT 与 FHT 的光 OFDM 对比
Tab. 3 Comparison of optical OFDM with FFT and FHT

	FFT-OFDM	FHT-OFDM
定义式	$\text{FFT} : X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right), 0 \leq k \leq N-1$ $\text{IFFT} : x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp\left(j \frac{2\pi nk}{N}\right), 0 \leq n \leq N-1$	$\text{FHT} : X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}(2\pi kn/N), 0 \leq k \leq N-1$ $\text{IFHT} : x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \text{cas}(2\pi kn/N), 0 \leq n \leq N-1$ $\text{cas}(2\pi kn/N) = \cos(2\pi kn/N) + \sin(2\pi kn/N)$
调制方式	复星座(m-QAM)	实星座(BPSK, M-PAM)
星座尺寸	m	$M = \sqrt{m}$
厄米特对称	需要	不需要
计算复杂度	有复数计算附加共轭运算	无复数计算无附加共轭运算
有用载波	$N/2$	N

鉴于哈特莱变换与光 OFDM 结合的性能优势, 文献 [27-31] 分别在 ACO-OFDM、U-OFDM、P-OFDM、CSK 及 LACO-OFDM 系统中应用哈特莱变换, 能以更简单的系统设计、更低的计算复杂度, 使频谱效率增加一倍, 且系统在功率效率和 PAPR 性能上更具优势。

4 基于 LED 索引调制的光 OFDM

前文所介绍的光 OFDM 调制方案中, 为得到实信号, 基于 FFT 的调制方案中限制子载波具有厄米特对称性, 基于 FHT 的调制方案中限制频域调制符号为实星座映射。为满足正极性, 二者均需要进行单极化特殊处理, 如奇载波调制、添加直流偏置、分层叠加等, 通常会牺牲频谱效率或功率效率, 增加系统复杂度。基于 LED 索引调制的光 OFDM, 利用 LED 空间维度, 得到实信号或

满足正极性的要求, 在频谱效率、功率效率或系统复杂度上有明显优势。

文献 [39] 提出一种非直流偏置的光 OFDM (NDC-OFDM), 在得到实数 OFDM 信号后, 使用两个 LED 分别传输正信号和负信号的绝对值, 满足正极性传输要求, 但为了得到实数 OFDM 信号, 子载波序列仍然需要满足厄米特对称。为此, 文献 [40] 提出广义 LED 索引调制的光 OFDM (GLIM-OFDM), 子载波序列不再需要进行厄米特对称, 使用 4 个 LED 分别传输复数符号的实部和虚部的正、负极性部分, 将频谱效率提高一倍。文献 [41] 提出非厄米特对称的光 OFDM (NHS-OFDM), 以两个 LED 分别传输复数 OFDM 信号的实部和虚部, 分别添加直流偏置实现正极性, 与 DCO-OFDM 相比, NHS-OFDM 大幅降低了计算复杂度及能量消耗。而无直流偏置的 OFDM (SH-OFDM), 采用离散哈特莱变换得到实信号

后,利用两个 LED 分别传输正信号和负信号的绝对值,以更低的计算复杂度获得与 GLIM-OFDM 相同的频谱效率,与 NDC-OFDM 相比,去除了厄米特对称的限制,与 NHS-OFDM 相比,去除了直流偏置的限制^[42]。文献 [43] 使用最大后验概率和 LED 选择技术,将 GLIM-OFDM 中 LED 数目泛化,应用场景扩展到 LED 数目多于 4 个的任意偶数个 LED 场景。

5 光 OFDM 系统接收机改进方案研究

国内外学者在上述光 OFDM 系统传统接收方案的基础上,对接收机改进方法进行了大量的研究,以提高系统可靠性。由于 ACO-OFDM 出色的性能和独特的调制原理,其接收机改进方案应运而生,主要包含噪声消除^[44]、分集合并^[45]和迭代接收^[46]3 种方法。噪声消除法即成对裁剪,利用正零关系判别信号,在恢复信号的同时去除一半采样点的噪声,在 ACO 系统中可以获得至少 1.3 dB 的光功率增益。分集合并法利用偶载波上限幅噪声恢复数据,与奇载波恢复数据进行合并,可详细划分为时域分集合并法(TDDC)与频域分集合并法(FDDC),经验证在视距(Line of Sight, LOS)信道中,TDDC 与 FDDC 的误码性能非常接近;在非视距(None Line of Sight, NLOS)信道中 FDDC 的误码性能相较于 TDDC 改善了 1.1 dB。迭代接收机是在噪声消除和分集合并的基础上提出的一种误码性能更优的迭代处理方法,在 4×4 MIMO 系统的 NLOS 传输信道中最多可获得近 10 dB 的误码性能增益。将噪声消除和分集合并两种方法联合使用,并不会带来额外增益^[47],由于噪声消除不能应用于频域,所以频域分集合并是频率选择性信道的首选。迭代接收方法性能虽好,但是系统复杂度较高。

除上述基于 ACO-OFDM 符号特殊性提出的接收机改进方案,文献 [48] 针对可见光 MIMO (16QAM-ACO)系统提出基于不同视场角检测器和角度分集的接收机设计,降低了信道相关性,室内 97% 的位置最小信噪比在 45 dB 以上,提高了系统可靠性。

除 ACO-OFDM 系统外,分集合并接收方法

应用在 PAM-DMT 系统上,可获得至少 2.3 dB 的误码性能增益^[49];将迭代接收机分别应用在 PAM-DMT、Flip-OFDM 和 eU-OFDM 系统上,均可获得显著的误码性能改善^[50-52]。LACO-OFDM 作为 ACO-OFDM 的增强方案,其接收机改进方案也备受关注。应用噪声消除法加迭代处理可获得 2.25 dB 的误码性能增益($L=3$, 16QAM, $BER=10^{-4}$)^[53];采用分集合并接收方法,误码性能可以改善 2 dB^[54];在分集合并中采用连续干扰抵消,并从限幅噪声中提取分集成分,误码性能在分集合并基础上改善了 2 dB^[55]。

混合光 OFDM 接收解调时由支路解调错误带来的干扰会严重影响接收机性能。利用混合光 OFDM 中每一路信号的特殊对称性,可以在时域分离各路信号,采用成对裁剪或成对平均技术减小信道噪声对支路信号的干扰,重构时域信号,减小对其他支路信号的干扰,迭代处理上述操作,可以显著提高接收机性能,且迭代次数越多,误码性能提高越大^[56],但迭代接收计算复杂度较高。为此文献 [57] 针对 HACO-OFDM 提出一种新型接收机,充分利用时域信号的结构特殊性,消除 ACO 支路限幅噪声的影响,计算复杂度下降 58.3%,且误码性能更具优势。文献 [35] 采用相同方法对 THO-OFDM 进行解调,这种利用时域信号结构特殊性的接收机改进方法是混合光 OFDM 的高效检测方案。

6 未来研究方向

尽管可见光 OFDM 单极化调制技术的研究已经比较成熟,频谱效率已经可以达到与射频 OFDM 系统相同的水平,光 OFDM 系统仍然存在很多挑战和值得研究的地方,总结如下:

6.1 光 OFDM 优化方案

目前光 OFDM 调制技术大致分为 3 类,其中基于离散傅立叶变换的方案中,多数需要厄米特对称设置,会浪费频谱资源;基于离散哈特莱变换的方案中,限制使用实星座映射;基于 LED 索引调制的方案中,会占用更多的 LED 资源且存在信道相关性问题。因此结合各类方案的优势、避免限制、提出更加优化的光 OFDM 方案是未来主要研究方向。如在哈特莱变换前引入复-实转换函

数,使得复星座映射符号也可以应用于哈特莱系统中,在不损失误码率的情况下,计算复杂度相较于傅立叶变换可下降一半^[58]。未来,提出频谱、功率更加高效、计算复杂度更低的光 OFDM 调制方案仍然具有很大的研究空间。

6.2 PAPR 抑制技术

影响可见光通信传输质量的一大因素就是白光 LED 的非线性特性^[59],OFDM 信号通常具有较高的 PAPR,会造成非线性失真,因此 PAPR 抑制技术是光 OFDM 的一个重要研究方向。关于可见光 OFDM 信号 PAPR 抑制的研究,主要包括预失真技术(限幅类和压扩类)和无失真技术(编码类和概率类),其中预失真技术可能会使系统的误码性能变差。还有一些与传统抑制技术不同的新方法,如利用导频插入^[60]、LED 阵列^[61]及自动编码器^[62]的方法也取得了不错的 PAPR 抑制效果。

在可见光 OFDM 系统中应用传统的 PAPR 抑制技术,需要针对光信号的特殊性做出调整与改进,往往会增加系统实现复杂度,甚至使系统误码性能优势消失。此外,受可见光 OFDM 调制过程中子载波数据厄米特对称性等的限制,一些在射频 OFDM 中高效的 PAPR 无法在可见光学系统中应用。因此,适用于可见光 OFDM 的可靠性高、复杂度低的 PAPR 抑制技术仍有很大的研究空间。

6.3 基于子载波索引调制的光 OFDM

光 OFDM 调制技术致力于更加充分地利用子载波调制映射符号,不断提升频谱效率,而子载波除了可以调制映射符号,自身的空间资源也包含丰富的信息量。O-OFDM-IM 通过星座映射符号和子载波序号共同传输信息,合理选择激活子载波数目可以实现比传统光 OFDM 更高的频谱效率和误码性能;同时由于未激活子载波并不发送信息,因此可以有效克服符号间干扰^[63]。

目前 O-OFDM-IM 的研究限于典型单极化光 OFDM 系统与索引调制的结合,如 ACO、DCO、Flip,采用更加高效的光 OFDM 与索引调制结合,或在子载波索引调制过程中巧妙实现 OFDM 符号“实、正”性,仍有很大的研究空间。此外,O-OFDM-IM 的解调除了需要解星座映射,还需要估计每个子块的激活子载波组合,因此其接收机复杂度更高,当子载波数增大时,计算复杂度呈指

数倍增长,因此研究 O-OFDM-IM 的低复杂度检测算法,降低接收机实现复杂度是很有必要的。

6.4 光 OFDM 与其他技术结合的应用

6.4.1 与调光控制技术结合

VLC 利用室内照明设备进行通信,应同时兼顾通信与照明的双重作用,在保证可靠的通信链路的同时满足高效安全的照明状态。因此,调光控制技术是 VLC 的一个重要研究方向。可见光 OFDM 系统中常用的调光技术主要分为模拟调光^[64]和数字调光^[65-66],两种技术分别通过调节 LED 驱动电流的幅度和占空比来实现。这两种技术往往会牺牲通信速率,尤其在白天的楼梯间、会议室等场景下,希望以尽可能低的照明实现通信需求,需要进行信号削峰或降低占空比及调制阶数,会极大地限制通信速率,造成频谱资源的浪费。在光 OFDM 系统中引入空间调光(Spatial Dimming, SD)技术实现照明控制,利用 LED 的空间维度,通过改变激活 LED 的数目实现光功率调节,对 LED 集合进行优化,可以提升系统在特定亮度下的通信性能^[67]。

而现有空间调光均是与模拟调光相结合,虽然实现简单,但需要根据不同的照明需求不断调整信号幅度,且现有调光控制未考虑 PAPR 抑制技术,高 PAPR 引起的性能恶化没有得到抑制。此外,现有研究大部分集中于下行通信场景且仅考虑 LED 激活数目,未来可结合上行链路的需求,综合考虑 LED 布局优化对单极化实现和调光控制的影响。

6.4.2 可重构智能反射面的应用

室内可见光通信系统信道包括视距路径和反射路径,由于视场角的限制和墙面等对信号的吸收作用,反射路径对信号的衰减较大,通常到达接收端的能量很有限,因此,相关研究大多数以视距信道为主,这也限制了可见光通信的应用,必须具有视距路径,否则无法保证通信质量。可重构智能反射面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)可以有效解决这一限制^[68-69],RIS 是一种新型的数字编码超材料,能够实时地对电磁波和光波进行反射、计算以及编程控制,通过编程来调节电磁波的强度、相位、频率和极性,精确地调整出射光束的方向以跟随使用者,在室内光通信环境中设置多个光学可重构智能反射面,以使被障碍物遮

挡的、无视距传播路径的用户接收来自智能反射面的信号,从而提高能量利用效率,降低中断概率,进而改善系统性能。

智能反射面是在有障碍物的环境中实现稳定光通信的解决方案,拓宽了光通信的应用场景。系统中的 RIS 节点并不接收和转发信号,仅对光信号进行物理反射,从而降低了通信成本和通信延迟。而且不仅可以通过对接收信号的智能反射来提高接收效果,还可巧妙地利用多接收天线进行索引调制来提高频谱效率^[70]。因此,未来智能反射面在可见光通信领域的应用极具吸引力。

7 结束语

可见光通信系统采用 IM/DD,传输的 OFDM 信号必须满足“实、正”性,本文针对光 OFDM 单极化调制技术展开研究,分析了实现光 OFDM 单极化的 3 类方法,分别为基于离散傅立

叶变换的光 OFDM、基于离散哈特莱变换的光 OFDM,以及基于 LED 索引调制的光 OFDM。研究初期出现的方案中,频域子载波信号需要满足厄米特对称等特殊要求,造成部分子载波资源浪费,因此频谱效率较低,同时,本文对频谱效率的改善方案进行了研究,包含并行传输或分层叠加的增强型方案、混合方案以及基于哈特莱变换的方案,以更加充分地利用子载波资源,并对多种光 OFDM 系统的性能进行综合比较。鉴于基于 FFT 或 FHT 的方案中,对子载波设置或星座映射存在限制,本文对基于 LED 索引调制的光 OFDM 进行了研究与分析,利用 LED 的空间维度,实现单极化的光 OFDM。为提高系统的可靠性、减小解调错误,文中对接收机改进方案进行研究与分析,主要包含噪声消除、分集合并和迭代接收 3 种方案。最后本文总结了光 OFDM 调制技术存在的问题和未来的研究方向。

参考文献:

- [1] 杨秀清,陈海燕.光通信技术在物联网中的应用[J].中国光学,2014,7(6):889-896.
YANG X Q, CHEN H Y. Application of optical communication technique in the internet of things[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 889-896. (in Chinese)
- [2] 周青超,柏泽龙,鲁路,等.白光LED远程荧光粉技术研究进展与展望[J].中国光学,2015,8(3):313-328.
ZHOU Q CH, BAI Z L, LU L, et al.. Remote phosphor technology for white LED applications: advances and prospects[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 313-328. (in Chinese)
- [3] 侯启真,薛荣荣,王浩宁.LED阵列发光特性仿真和对比分析[J].液晶与显示,2017,32(12):961-967.
HOU Q ZH, XUE R R, WANG J N. Simulation and comparative analysis of LED arrays in light-emitting characteristics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(12): 961-967. (in Chinese)
- [4] 李炳乾,罗明浩,俞理云,等.COB封装全光谱LED光源及其光电特性[J].液晶与显示,2018,33(11):931-935.
LI B Q, LUO M H, YU L Y, et al.. Full spectrum LED light in COB package and its characteristics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(11): 931-935. (in Chinese)
- [5] 武文杰,阿木古楞,刘文全,等.氮(氧)化物荧光粉的合成与发光性能[J].液晶与显示,2017,32(9):663-676.
WU W J, AMUGULEN, LIU W Q, et al.. Synthesis and luminescence of nitride and oxynitride luminescent materials[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(9): 663-676. (in Chinese)
- [6] KARUNATILAKA D, ZAFAR F, KALAVALLY V, et al.. LED based indoor visible light communications: state of the art[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [7] KUMAR S, SINGH P. A comprehensive survey of visible light communication: potential and challenges[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 109(2): 1357-1375.
- [8] 曹婷,陈华敏.基于正交频分复用技术的低压电力线通信系统模型[J].液晶与显示,2019,34(9):928-934.
CAO T, CHEN H M. Low voltage power line communication system model based on orthogonal frequency division multiplexing technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(9): 928-934. (in Chinese)
- [9] 王旭东,崔玉,吴楠,等.室内可见光多维CAP空间调制[J].发光学报,2018,39(2):227-235.
WANG X D, CUI Y, WU N, et al.. Spatial modulation based on multi-dimensional carrierless amplitude and phase for indoor visible light communication system[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 227-235. (in Chinese)
- [10] GONZALEZ O, PEREZ-JIMENEZ R, RODRIGUEZ S, et al.. OFDM over indoor wireless optical channel[J]. *IEE*

- Proceedings-Optoelectronics*, 2005, 152(4): 199-204.
- [11] ARMSTRONG J, LOWERY A J. Power efficient optical OFDM[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(6): 370-372.
- [12] TSONEV D, SINANOVIC S, HAAS H. Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for optical wireless[C]. *Proceedings of the 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference, IEEE*, 2012: 1-5.
- [13] FERNANDO N, HONG Y, VITERBO E. Flip-OFDM for optical wireless communications[C]. *Proceedings of 2011 IEEE Information Theory Workshop, IEEE*, 2011: 5-9.
- [14] LEE S C J, RANDEL S, BREYER F, *et al.*. PAM-DMT for intensity-modulated and direct-detection optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(23): 1749-1751.
- [15] MOHAMED S D, ANDONOVIC I, SHALABY H, *et al.*. Modified asymmetrically-clipped optical orthogonal frequency-division multiplexing system performance[C]. *Proceedings of 2013 IEEE Photonics Conference, IEEE*, 2013: 289-290.
- [16] TSONEV D, HAAS H. Avoiding spectral efficiency loss in unipolar OFDM for optical wireless communication[C]. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications, IEEE*, 2014: 3336-3341.
- [17] WANG Q, QIAN CH, GUO X H, *et al.*. Layered ACO-OFDM for intensity-modulated direct-detection optical wireless transmission[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12382-12393.
- [18] 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): 1063-1172.
- [19] RANJHA B, KAVEHRAD M. Hybrid asymmetrically clipped OFDM-based IM/DD optical wireless system[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(4): 387-396.
- [20] GUAN R, HUANG N, WANG J Y, *et al.*. Enhanced hybrid asymmetrically clipped orthogonal frequency division multiplexing for optical wireless communications[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(5): 056111.
- [21] BAI R W, WANG Q, WANG ZH CH. Asymmetrically clipped absolute value optical OFDM for intensity-modulated direct-detection systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(17): 3680-3691.
- [22] NUWANPRIYA A, GRANT A, HO S W, *et al.*. Position modulating OFDM for optical wireless communications[C]. *Proceedings of 2012 IEEE Globecom Workshops, IEEE*, 2012: 1219-1223.
- [23] ELGALA H, LITTLE T D C. Polar-based OFDM and SC-FDE links toward energy-efficient Gbps transmission under IM-DD optical system constraints [Invited][J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(2): A277-A284.
- [24] MOREOLO M S. Power efficient and cost-effective solutions for optical OFDM systems using direct detection[C]. *Proceedings of the 2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks, IEEE*, 2010: 1-4.
- [25] NADAL L, MOREOLO M S, FABREGA J M, *et al.*. Comparison of peak power reduction techniques in optical OFDM systems based on FFT and FHT[C]. *Proceedings of the 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks, IEEE*, 2011: 1-4.
- [26] AVERCHENKO A P, ZHENATOV B D. Comparison of computational costs of Hartley transform and Fourier transform[C]. *Proceedings of the 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering, IEEE*, 2016: 436-438.
- [27] ZHOU J, QIAO Y J. Low-PAPR asymmetrically clipped optical OFDM for intensity-modulation/direct-detection systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 7101608.
- [28] 冯海燕, 王旭东, 吴楠, 等. 一种基于哈特莱变换的改进U-OFDM方法[J]. *光通信技术*, 2016, 40(7): 25-28.
FENG H Y, WANG X D, WU N, *et al.*. Modified U-OFDM scheme based on Hartley transform[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(7): 25-28. (in Chinese)
- [29] 冯海燕, 王旭东, 吴楠, 等. 一种新的可见光通信光OFDM方法[J]. *光通信研究*, 2016, 42(3): 58-61.
FENG H Y, WANG X D, WU N, *et al.*. A novel optical-OFDM for visible light communication[J]. *Study on Optical Communications*, 2016, 42(3): 58-61. (in Chinese)
- [30] TANG J, ZHANG L. Efficient real-Fourier domain-based color shift keying OFDM implemented with Hartley transform for visible light communication system[C]. *Proceedings of the 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference, IEEE*, 2017: 1-5.
- [31] AZIM A W, LE GUENNEC Y, MAURY G. Spectrally augmented Hartley transform precoded asymmetrically clipped optical OFDM for VLC[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(23): 2029-2032.
- [32] ISLIM M S, TSONEV D, HAAS H. A generalized solution to the spectral efficiency loss in unipolar optical OFDM-

- based systems[C]. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications, IEEE*, 2015: 5126-5131.
- [33] ISLIM M S, TSONEV D, HAAS H. Spectrally enhanced PAM-DMT for IM/DD optical wireless communications[C]. *Proceedings of the 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, IEEE*, 2015: 877-882.
- [34] ISLIM M S, TSONEV D, HAAS H. On the superposition modulation for OFDM-based optical wireless communication[C]. *Proceedings of 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, IEEE*, 2015: 1022-1026.
- [35] ZHANG T, JI H, GHASSEMLOOY Z, *et al.*. Spectrum-efficient triple-layer hybrid optical OFDM for IM/DD-based optical wireless communications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 10352-10362.
- [36] 暴桐, 王旭东, 吴楠, 等. 一种基于星座协作映射的改进P-OFDM方法[J]. *半导体光电*, 2018, 39(1): 129-133.
BAO T, WANG X D, WU N, *et al.*. A modified P-OFDM scheme based on constellation collaborated mapping[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(1): 129-133. (in Chinese)
- [37] WANG ZH CH, MAO T Q, WANG Q. Optical OFDM for visible light communications[C]. *Proceedings of the 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IEEE*, 2017: 1190-1194.
- [38] BRACEWELL R N. *The Hartley Transform*[M]. New York: Oxford University Press, 1986.
- [39] LI Y CH, TSONEV D, HAAS H. Non-DC-biased OFDM with optical spatial modulation[C]. *Proceedings of the 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, IEEE*, 2013: 486-490.
- [40] BAŞAR E, PANAYIRCI E, UYSAL M, *et al.*. Generalized LED index modulation optical OFDM for MIMO visible light communications systems[C]. *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications, IEEE*, 2016: 1-5.
- [41] ZHONG W D, CHEN CH, WU D H. Non-hermitian symmetry OFDM for indoor space division multiplexing visible light communications[C]. *Proceedings of the 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks, IEEE*, 2016: 1-4.
- [42] CAO Y L, ZHOU X T, SUN J, *et al.*. Optical spatial modulation with DHT-based OFDM in visible light communication systems[C]. *Proceedings of the 2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, IEEE*, 2017: 1-5.
- [43] LE TRAN M, KIM S, KETSEOGLOU T, *et al.*. LED selection and MAP detection for generalized LED index modulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(19): 1695-1698.
- [44] ASADZADEH K, DABBO A, HRANILOVIC S. Receiver design for asymmetrically clipped optical OFDM[C]. *Proceedings of 2011 IEEE GLOBECOM Workshops, IEEE*, 2011: 777-781.
- [45] DANG J, ZHANG Z, WU L. Frequency-domain diversity combining receiver for ACO-OFDM system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7802510.
- [46] DANG J, ZHANG Z CH, WU L. A novel receiver for ACO-OFDM in visible light communication[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(12): 2320-2323.
- [47] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J, HRANILOVIC S. Performance analysis of noise cancellation in a diversity Combined ACO-OFDM system[C]. *Proceedings of the 2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks, IEEE*, 2012: 1-4.
- [48] 张琦, 岳殿武. 室内MIMO ACO-OFDM可见光通信系统接收机设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0106001.
ZHANG Q, YUE D W. Design of indoor receiver using multiple-input and multiple-output ACO-OFDM visible light communication system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0106001. (in Chinese)
- [49] XIANG N, ZHANG Z CH, DANG J, *et al.*. A novel receiver design for PAM-DMT in optical wireless communication systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(18): 1919-1922.
- [50] HUANG N, WANG J B, WANG J ZH, *et al.*. Receiver design for PAM-DMT in indoor optical wireless links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(2): 161-164.
- [51] HUANG N, WANG J B, PAN C H, *et al.*. Iterative receiver for flip-OFDM in optical wireless communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1729-1732.
- [52] DANG J, ZHANG Z CH, WU L. Improving the power efficiency of enhanced unipolar OFDM for optical wireless communication[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(21): 1681-1683.
- [53] WANG Q, WANG ZH CH, GUO X H, *et al.*. Improved receiver design for layered ACO-OFDM in optical wireless

- communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 319-322.
- [54] MOHAMMED M M A, HE C W, ARMSTRONG J. Diversity combining in layered asymmetrically clipped optical OFDM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2078-2085.
- [55] WANG T Q, LI H, HUANG X J. Diversity combining for layered asymmetrically clipped optical OFDM using soft successive interference cancellation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(6): 1309-1312.
- [56] BAI R W, JIANG R, MAO T Q, *et al.*. Iterative receiver for ADO-OFDM with near-optimal optical power allocation[J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 350-356.
- [57] WANG T, HOU Y H, MA M D. A novel receiver design for HACO-OFDM by time-domain clipping noise elimination[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(9): 1862-1865.
- [58] ZHOU J, YAN Y, CAI ZH, *et al.*. A cost-effective and efficient scheme for optical OFDM in short-range IM/DD systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(13): 1372-1374.
- [59] 王志斌, 董伟, 任英, 等. 可见光通信中的白光LED非线性噪声分析[J]. *发光学报*, 2018, 39(5): 745-750.
WANG ZH B, DONG W, REN Y, *et al.*. Nonlinear noise analysis about white LED in visible light communication[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(5): 745-750. (in Chinese)
- [60] 唐芳, 徐智勇, 汪井源, 等. DCO-OFDM系统中导频辅助峰均比抑制技术[J]. *光电子·激光*, 2019, 30(10): 1116-1122.
TANG F, XU ZH Y, WANG J Y, *et al.*. Pilot-assisted PAPR reduction technique for DCO-OFDM systems[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2019, 30(10): 1116-1122. (in Chinese)
- [61] MOSSAAD M S A, HRANILOVIC S, LAMPE L. Visible light communications using OFDM and multiple LEDs[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(11): 4304-4313.
- [62] SHI L N, ZHANG X, WANG W X, *et al.*. PAPR reduction based on deep autoencoder for VLC DCO-OFDM system[C]. *Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, IEEE*, 2019: 1-4.
- [63] BAŞAR E, PANAYIRCI E. Optical OFDM with index modulation for visible light communications[C]. *Proceedings of the 2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications, IEEE*, 2015: 11-15.
- [64] YANG Y, ZENG ZH M, CHENG J L, *et al.*. An enhanced DCO-OFDM scheme for dimming control in visible light communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 7904813.
- [65] 徐宪莹, 王旭东, 吴楠. 基于U-OFDM的室内可见光通信系统调光控制方法[J]. *半导体光电*, 2015, 36(3): 455-460.
XU X Y, WANG X D, WU N. A scheme of U-OFDM based dimming control for indoor visible light communication systems[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 455-460. (in Chinese)
- [66] 王旭东, 徐宪莹, 吴楠, 等. 室内可见光OFDM通信系统调光控制技术[J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 1106002.
WANG X D, XU X Y, WU N, *et al.*. Dimming control technique for OFDM based indoor visible light communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 1106002. (in Chinese)
- [67] WANG C C, YANG Y, CHENG J L, *et al.*. A dimmable OFDM scheme with dynamic subcarrier activation for VLC[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(1): 7900112.
- [68] NAJAFI M, SCHOBER R. Intelligent reflecting surfaces for free space optical communications[C]. *Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference, IEEE*, 2019: 1-7.
- [69] WANG H B, ZHANG Z CH, ZHU B CH, *et al.*. Performance of wireless optical communication with reconfigurable intelligent surfaces and random obstacles[EB/OL]. (2020-01-16)[2020-01-17]. <https://arxiv.org/abs/2001.05715>.
- [70] BASAR E. Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: a new beyond MIMO paradigm for 6G[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(5): 3187-3196.

作者简介:



徐宪莹(1988—),女,山东莒县人,讲师,大连海事大学博士研究生,2011年、2014年于大连海事大学分别获得学士、硕士学位,主要从事可见光通信研究。E-mail: xuxianying@dlnu.edu.cn



岳殿武(1966—),男,吉林四平人,博士,教授,博士生导师,1986年,1989年于南开大学分别获得学士、硕士学位,1996年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事无线通信方面的研究。E-mail: dwyue@dlnu.edu.cn