

# 激光与光电子学进展

## 可见光通信中翻转/单极性正交频分复用 对偶最大似然接收机

李建锋<sup>1</sup>, 刘晓爽<sup>1\*</sup>, 任亚浩<sup>1</sup>, 黄治同<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河北经贸大学信息技术学院, 河北 石家庄 050061;

<sup>2</sup>北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

**摘要** 针对可见光通信(VLC)中的翻转/单极性正交频分复用(Flip/U-OFDM)系统,提出了对偶最大似然(ML)接收机。对偶ML在时域对Flip/U-OFDM部分信号进行置0操作,可获得一些信噪比(SNR)增益。并且对偶ML是一种简单的信号处理方法,不会增加接收机的复杂度。仿真结果表明:在加性高斯白噪声(AWGN)信道下,对偶ML接收机可提升约2 dB的SNR增益;在限幅信道和发光二极管(LED)非线性信道下,对偶ML接收机可以获得2 dB~3 dB的增益。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 翻转/单极性正交频分复用; 解调; 对偶最大似然

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2306008

## Pairwise Maximum Likelihood Receiver for Flip/Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing in Visible Light Communication

Li Jianfeng<sup>1</sup>, Liu Xiaoshuang<sup>1\*</sup>, Ren Yahao<sup>1</sup>, Huang Zhitong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Information Technology College, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** A pairwise maximum likelihood (ML) receiver is proposed for flip/unipolar orthogonal frequency division multiplexing (Flip/U-OFDM) system in visible light communication (VLC). Parts of Flip/U-OFDM signal are set at zero by pairwise ML in time domain, which can get some signal to noise ratio (SNR) gain. And the pairwise ML is a simple signal processing method, which will not increase the complexity for the receiver. Simulation results show that SNR gain of 2 dB can be available for the pairwise ML receiver in additive white Gaussian noise (AWGN) channel. SNR gain of 2 dB-3 dB will be achieved for the pairwise ML receiver in amplitude clipping channel and light emitting diode (LED) nonlinearity channel.

**Key words** optical communications; visible light communication; flip/unipolar orthogonal frequency division multiplexing; demodulation; pairwise maximum likelihood

**OCIS codes** 060.4510; 060.4080

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-05-15; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61801165)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2020163, ZD2021044)、河北经贸大学基金(2020JYQ05, 2020JYY50)

通信作者: liuxiaoshuang55@126.com

# 1 引言

目前,传统的射频频谱资源几乎耗尽。研究人员发现可见光波段有较宽的、免授权的频谱资源<sup>[1-2]</sup>。因此,近年来基于发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)技术越来越受到关注<sup>[3-4]</sup>。然而,由于LED的物理带宽较小,正交频分复用(OFDM)调制技术常被用来提高频谱利用率<sup>[5]</sup>。在VLC系统中,发射机LED发出的信号需为正实数形式,这是一个典型的强度调制/直接检测(IM/DD)系统<sup>[6]</sup>。为此,研究者提出了一些针对IM/DD系统的OFDM技术<sup>[7-9]</sup>。Fernando等<sup>[10]</sup>提出了基于信号翻转的OFDM(Flip-OFDM)技术。几乎在同一时间,Tsonev等<sup>[11]</sup>也提出了单极性OFDM(U-OFDM)。Flip-OFDM和U-OFDM的原理是一样的:时域信号的正值部分保持不变,对负值部分进行取反操作,然后拼接成正值信号后面,这样就得到了正实数形式的时域信号。经验证,Flip/U-OFDM系统性能与非对称切除光OFDM(ACO-OFDM)的性能一致<sup>[10]</sup>。在传输速率相同的情况下,Flip/U-OFDM需要的快速傅里叶变换(FFT)长度仅为ACO-OFDM的一半。ACO-OFDM系统可通过分集合并或者对偶最大似然(ML)提升接收性能<sup>[12-14]</sup>。李建锋等<sup>[15]</sup>使用分集合并技术来提升ACO-OFDM系统性能。然而,在Flip/U-OFDM系统中,很难利用传统的分集合并技术。Huang等<sup>[16]</sup>针对Flip/U-OFDM,提出了迭代接收机。虽然迭代接收机可以提升系统

的接收性能,但是迭代接收方法会增加系统的复杂度。Tsonev等<sup>[17]</sup>提出了增强的U-OFDM(eU-OFDM)技术来改善频谱效率。但是在此方法中,多个U-OFDM信号在时域叠加,接收机在分离各U-OFDM信号时,需要复杂的迭代操作。Liu等<sup>[18]</sup>提出了迭代对偶ML方法来改进ACO-OFDM的接收性能。对偶ML是一种较为简单的信号处理方法<sup>[13]</sup>。能否利用对偶ML或其他技术来提升Flip/U-OFDM系统性能,还需要进一步研究。

本文将对偶ML技术引入Flip/U-OFDM系统中。首先,在所提对偶ML接收机中,对Flip/U-OFDM的时域信号进行对偶ML检测;然后,将一半的信号置为0,该操作理论上可将噪声功率降低一半;最后,分别对对偶ML接收机在加性高斯白噪声(AWGN)信道、限幅信道和LED非线性信道下进行蒙特卡罗仿真和性能分析。

# 2 对偶ML接收机设计

在Flip/U-OFDM系统中,发射机先对二进制信息进行数字调制,然后将调制后的数据映射到频域子载波序列上,如图1所示。对于一个具有N个子载波的Flip/U-OFDM系统来说,频域子载波序列可由一个向量来描述。

$$\mathbf{X} = [0, X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_{N-1}], \quad (1)$$

式中: $X_k$ 为第k个子载波上的数据。子载波序列还要满足共轭对称: $X_k = X_{N-k}^*$ 。对子载波序列进行长度为N的快速傅里叶逆变换(IFFT),变换后的第n个时域信号<sup>[19]</sup>为

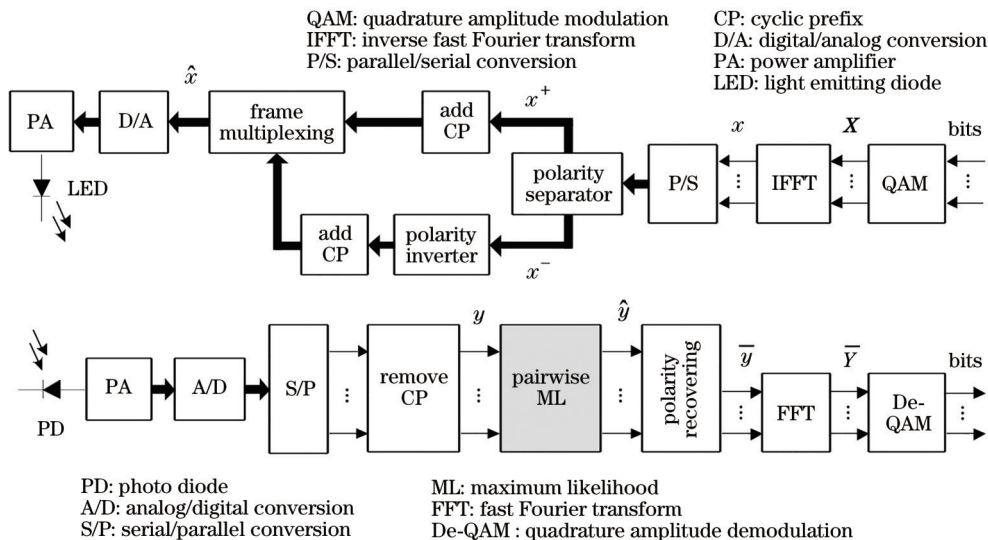


图1 所提用于Flip/U-OFDM的对偶ML接收机

Fig. 1 Proposed pairwise ML receiver for Flip/U-OFDM

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), n=0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2)$$

式中:  $x_n$  为带有极性的实数形式信号。在 Flip/U-OFDM 系统中, 为了避免使用直流偏置信号, 对时域信号  $x_n$  进行极性分离操作。首先,  $x_n$  中的正值信号保持不变, 将负值信号置为 0, 可得到正极性信号<sup>[10]</sup>:

$$x_n^+ = \begin{cases} x_n, & x_n \geq 0 \\ 0, & x_n < 0 \end{cases}, n=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3)$$

然后,  $x_n$  中的负值信号保持不变, 将正值信号置为 0, 可得到负极性信号:

$$x_n^- = \begin{cases} x_n, & x_n < 0 \\ 0, & x_n \geq 0 \end{cases}, n=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4)$$

最后, 对  $x_n^-$  进行取反, 并拼接接到  $x_n^+$  后面, 得到正实数形式的信号:

$$\hat{x}_n = \begin{cases} x_n^+, & n=0, 1, 2, \dots, N-1 \\ -x_n^-, & n=N, N+1, \dots, 2N-1 \end{cases}. \quad (5)$$

式中:  $\hat{x}_n$  为拼接后的 Flip/U-OFDM 时域符号中第  $n$  点的信号。经过时域信号拼接后, 时域信号序列长度变为了  $2N$ 。  $\hat{x}_n$  为正实数信号, 经过数模(D/A)转换、功率放大(PA)后, 就可以驱动 LED 发射光信号。

光信号经过信道传输后, 在接收端光电二极管(PD)将其转换为电信号, 然后依次经过 PA、模数转换(A/D)、串并变换(S/P)和移除循环前缀(CP)后, 就得到了 Flip/U-OFDM 信号  $y_n$ 。如果传输信道为 AWGN,  $y_n$  的表达式为

$$y_n = \hat{x}_n + e_n, \quad n=0, 1, 2, \dots, 2N-1, \quad (6)$$

式中:  $e_n$  为第  $n$  点上的高斯噪声。在所提接收机中, 先对  $y_n$  进行对偶 ML 检测。首先, 对比拼接信号的正极性部分和负极性部分的大小, 如果前者大就将检测器置为 1, 如果前者小就置为 0。对偶 ML 检测器的输出为

$$H_n = \begin{cases} 1, & y_n \geq y_{n+N} \\ 0, & y_n < y_{n+N} \end{cases}, n=0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (7)$$

$$H_{n+N} = 1 - H_n, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (8)$$

式中:  $H_n$  为对偶 ML 检测器的第  $n$  个值。其次, 对接收信号  $y_n$  进行对偶 ML 切除操作, 经过对偶 ML 后输出的信号  $\hat{y}_n$  可表示为

$$\hat{y}_n = y_n H_n, \quad n=0, 1, 2, \dots, 2N-1. \quad (9)$$

然后, 对  $\hat{y}_n$  进行极性恢复操作:

$$\bar{y}_n = \hat{y}_n - \hat{y}_{n+N}, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (10)$$

式中:  $\bar{y}_n$  为极性恢复后的信号。对  $\bar{y}_n$  进行长度为  $N$  的 FFT 操作, 就可以得到频域信号  $\bar{Y}_k$ :

$$\bar{Y}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{y}_n \exp\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right), \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (11)$$

最后, 对  $\bar{Y}_k$  进行数字解调, 就可恢复二进制数据。

在传统的 Flip/U-OFDM 接收机中, (10) 式需要 1 次长度为  $N$  的减法运算, (11) 式需要 1 次长度为  $N$  的 FFT 运算<sup>[10]</sup>, 因此传统 Flip/U-OFDM 接收机的复杂度为  $O(N \log_2 N)$ 。在所提对偶 ML 接收机中, (7) 式和 (8) 式需要  $2N$  次比较运算, (9) 式需要  $2N$  次乘法运算, (10) 式需要长度为  $N$  的减法运算, (11) 式也需要 1 次长度为  $N$  的 FFT 操作, 因此所提对偶 ML 接收机的复杂度仍为  $O(N \log_2 N)$ 。

### 3 结果和分析

对对偶 ML 接收机进行了蒙特卡罗仿真, 给出了在 AWGN 信道、限幅信道和 LED 非线性信道下的数值结果。为分析对偶 ML 接收机的性能, 给出了误码率(BER)和每比特光信噪比( $E_{b(\text{opt})}/N_0$ )<sup>[8]</sup>之间的关系,  $E_{b(\text{opt})}$  为每比特的光能量,  $N_0$  为噪声功率谱密度。将总子载波数和 IFFT/FFT 长度  $N$  设置为 1024, LED 调制带宽设定为 100 MHz。仿真中共传输 5000 个 Flip/U-OFDM 符号, 通过对比发送和接收的二进制数据来计算 BER。在仿真过程中, 将 PA、PD、A/D 和 D/A 看作理想的线性模型<sup>[8-10]</sup>。数字调制格式选用了正交幅度调制(QAM), 分别对 4QAM、16QAM 和 64QAM 的 Flip/U-OFDM 系统进行了性能分析。

#### 3.1 AWGN 信道

图 2 为原始 Flip/U-OFDM 接收机<sup>[10]</sup>和对偶 ML 接收机在 AWGN 信道下 BER 性能对比。与原始 Flip/U-OFDM 接收机不同, 对偶 ML 接收机在移除 CP 后进行对偶 ML 检测, 可以提升 Flip/U-OFDM 系统性能。从图 2 可以明显看出: 采用对偶 ML 技术后, Flip/U-OFDM 系统 BER 性能得到较大改善; 并且随着 QAM 阶数增大, 对偶 ML 带来的 SNR 增益变高。例如: 当 BER 门限值为  $3.8 \times 10^{-3}$ <sup>[18]</sup> [7% 开销的前向纠错编码(FEC)限制] 时, 对于 4QAM, 对偶 ML 能提升 1.5 dB 的 SNR 增益; 对于 16QAM, 对偶 ML 可提供的 SNR 增益达到 2 dB; 对于 64QAM, 对偶 ML 可提供的 SNR 增益可达 2.5 dB。

#### 3.2 限幅信道

在 OFDM 系统中, 时域信号往往具有较高的峰均比(PAPR), 而较高的 PAPR 会导致时域信号占据较大的动态范围。为了降低 PAPR, 最简单的方法是在发射端对时域信号进行限幅切除操作:

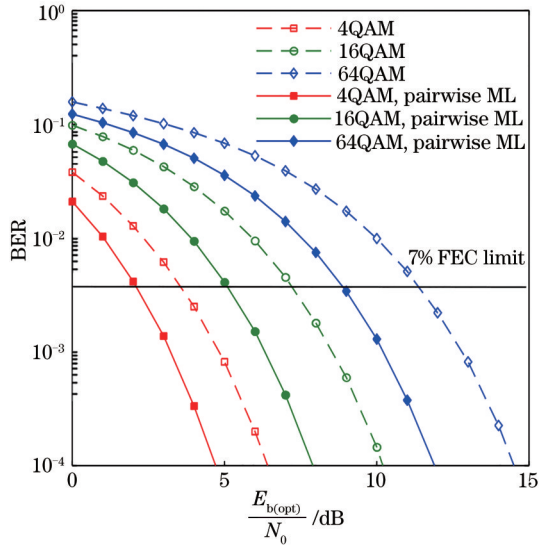


图 2 AWGN 信道下的原始接收机和对偶 ML 接收机的 BER 性能对比

Fig. 2 BER performance comparison between original receiver and pairwise ML receiver in AWGN channel

$$\bar{x}_n = \begin{cases} \hat{x}_n, & \hat{x}_n < A \\ A, & \hat{x}_n \leq A \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $\bar{x}_n$  为限幅后的 Flip/U-OFDM 信号;  $A$  为  $\bar{x}_n$  中最大振幅值。那么限幅切除率(CR)<sup>[19]</sup>为

$$R_{CR} = 20 \lg \left( \frac{A}{\delta} \right), \quad (13)$$

式中:  $\delta^2$  表示  $\hat{x}_n$  的功率值。

图 3 为在不同 CR 下的原始 Flip/U-OFDM 接

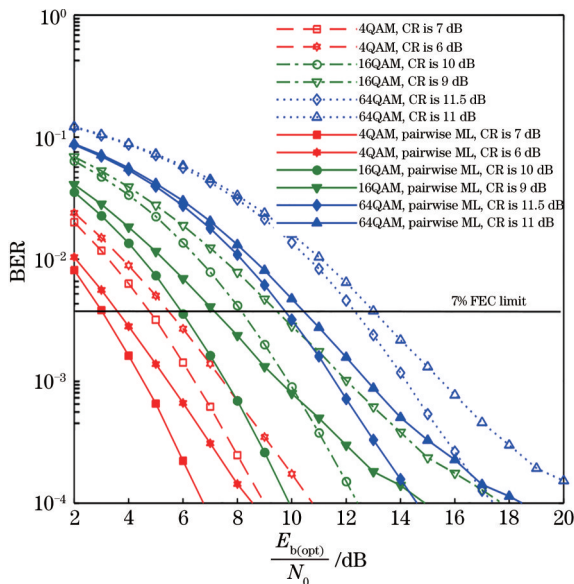


图 3 限幅信道下的原始接收机和对偶 ML 接收机的 BER 性能对比

Fig. 3 BER performance comparison between original receiver and pairwise ML receiver in amplitude clipping channel

收机和对偶 ML 接收机的性能对比。对于 4QAM, 当 CR 为 7 dB 时, 对偶 ML 技术可提升 1.8 dB 的 SNR 增益; 随着 CR 降低为 6 dB (CR 越低表示限幅失真越大), 对偶 ML 接收机的增益可达 2 dB。对于 16QAM, CR 为 10 dB 时, 对偶 ML 可获得 2.2 dB 的增益; 当 CR 降为 9 dB, 所提接收机增益可达 2.4 dB。CR 越小, 所提接收机的增益越大。并且随着 QAM 阶数增加, 对偶 ML 可获得更大的 SNR 增益。对于 64QAM, CR 为 11 dB 时, 对偶 ML 的增益高达 2.7 dB。显然, 对偶 ML 接收机在限幅信道下具有更高的 SNR 增益。

### 3.3 LED 非线性信道

在可见光通信系统中, 发射端 LED 一般具有较高的非线性。LED 非线性可以用 Rapps 模型<sup>[20]</sup>来描述。

$$I_n = \begin{cases} \frac{f(\hat{x}_n)}{\left\{1 + [f(\hat{x}_n)/I_{\max}]^{2a}\right\}^{1/2a}}, & \hat{x}_n > 0 \\ 0, & \hat{x}_n \leq 0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $I_n$  为通过 LED 的电流;  $I_{\max}$  为 LED 的最大电流;  $f(\hat{x}_n) = \hat{x}_n/R$ ,  $R$  表示归一化阻抗值,  $R=1$ ;  $a$  为非线性因子,  $a=2$ 。那么非线性系数  $\beta$  为

$$\beta = 20 \lg \left( \frac{I_{\max}}{\delta} \right). \quad (15)$$

图 4 为在不同  $\beta$  下的原始 Flip/U-OFDM 接收机

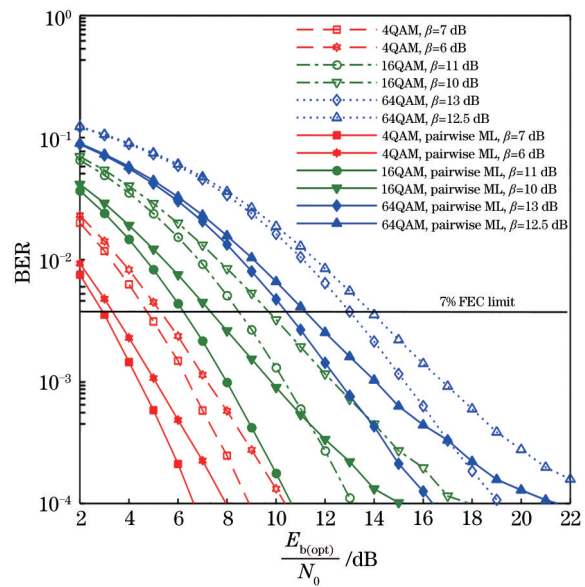


图 4 LED 非线性信道下的原始接收机和对偶 ML 接收机的 BER 性能对比

Fig. 4 BER performance comparison between original receiver and pairwise ML receiver in LED nonlinearity channel

和对偶 ML 接收机的性能对比。对于 4QAM, 当 LED 非线性系数  $\beta=7$  dB 时, 对偶 ML 可提升 1.8 dB 的增益; 当  $\beta$  降低为 6 dB 时 ( $\beta$  越低, LED 非线性越大), 所提接收机的增益达到 1.9 dB。对于 16QAM, 当  $\beta=11$  dB 时, 所提接收机可得 2.2 dB 增益; 当  $\beta=10$  dB 时, SNR 增益可达 2.5 dB。与限幅信道类似, 随着  $\beta$  越小, 对偶 ML 接收机的增益越大。增大调制阶数到 64QAM,  $\beta=12.5$  dB 时, 所提接收机可获得 2.9 dB 的 SNR 增益。与 AWGN 信道相比, 所提接收机在 LED 非线性信道下具有更好的 BER 性能。

## 4 结 论

提出了对偶 ML 接收机来改善 Flip/U-OFDM 系统的性能。在对偶 ML 接收机中, 通过对比 Flip/U-OFDM 中的正极性和负极性信号, 并将一半的信号置为 0 的操作来降低噪声的功率。仿真数值结果表明: 在 AWGN 信道下, 对偶 ML 可获得约 2 dB 的 SNR 增益, 且随着 QAM 阶数增大, SNR 增益越高; 与 AWGN 信道相比, 在限幅信道和 LED 非线性信道下, 对偶 ML 带来的 SNR 增益会更高, 且采用更高阶的 QAM 技术时, 所提接收机可获得接近 3 dB 的增益。

## 参 考 文 献

- [1] Elgala H, Mesleh R, Haas H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(9): 56-62.
- [2] Hanzo L, Haas H, Imre S, et al. Wireless myths, realities, and futures: from 3G/4G to optical and quantum wireless[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100: 1853-1888.
- [3] Ding J P, Yi Z L, Wang J T, et al. Recent advances of UAV airborne optical wireless communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230003. 丁举鹏, 易芝玲, 王劲涛, 等. 无人机机载光无线通信研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230003.
- [4] Rong X C, Wang C, Ren J W, et al. Visible light communication system based on embedded hard drive indicator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806004. 荣新驰, 王超, 任嘉伟, 等. 基于嵌入式硬盘指示灯的可见光通信系统[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1806004.
- [5] Jia K J, Yang B R, Lu H, et al. LED nonlinearity mitigation for visible light communication optical-orthogonal frequency division multiplexing system with symbol decomposing techniques[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0406002. 贾科军, 杨博然, 陆皓, 等. 可见光通信光正交频分复用系统符号分解技术抑制 LED 非线性失真研究[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0406002.
- [6] Zou P, Zhao Y H, Hu F C, et al. Research status of machine learning based signal processing in visible light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 010001. 邹鹏, 赵一衡, 胡昉辰, 等. 基于机器学习的可见光通信信号处理研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 010001.
- [7] Armstrong J, Lowery A J. Power efficient optical OFDM[J]. Electronics Letters, 2006, 42(6): 370-372.
- [8] Armstrong J, Schmidt B J C. Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(5): 343-345.
- [9] 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.
- [10] Fernando N, Hong Y, Viterbo E. Flip-OFDM for unipolar communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(12): 3726-3733.
- [11] 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), May 6-9, 2012, Yokohama, Japan. New York: IEEE Press, 2012: 12865904.
- [12] Chen L, Krongold B, Evans J. Diversity combining for asymmetrically clipped optical OFDM in IM/DD channels[C]//2009 IEEE Global Telecommunications Conference, November 30-December 4, 2009, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2009: 11170530.
- [13] Asadzadeh K, Dabbo A, Hranilovic S. Receiver design for asymmetrically clipped optical OFDM [C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Workshops), December 5-9, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE Press, 2011: 777-781.
- [14] Dissanayake S D, Armstrong J. Novel techniques for combating DC offset in diversity combined ACO-OFDM[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15

- (11): 1237-1239.
- [15] Li J F, Liu X S, Li J K, et al. ACO-OFDM diversity combining receiver with direct current offset in visible light communications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190604.  
李建锋, 刘晓爽, 李建科, 等. 可见光通信中直流偏移的 ACO-OFDM 分集合并接收机[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190604.
- [16] 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.
- [17] Tsonev D, Videv S, Haas H. Unlocking spectral efficiency in intensity modulation and direct detection systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(9): 1758-1770.
- [18] Liu X S, Li J F, Ren Y H, et al. Iterative pairwise maximum likelihood receiver for ACO-OFDM in visible light communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 1-7.
- [19] Jean A. OFDM for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 189-204.
- [20] Elgala H, Mesleh R, Haas H. An LED model for intensity-modulated optical communication systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 835-837.