

# 可见光通信中直流偏移的 ACO-OFDM 分集合并接收机

李建锋<sup>1</sup>, 刘晓爽<sup>1\*</sup>, 李建科<sup>1</sup>, 伍亚丽<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** 针对存在直流(DC)偏移的非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)系统,提出了一个只采用单次快速傅里叶变换(FFT)的分集合并接收机。在可见光通信(VLC)系统中,背景光源会不可避免地导致接收端产生 DC 偏移。通过对称恢复操作可以在时域重构 ACO-OFDM 系统的奇、偶信号,从而估计出系统的 DC 偏移量。结果表明,提出的分集合并接收机具有较低复杂度,对直流分量不敏感,同时具有与传统分集合并接收机相同的分集增益。

**关键词** 光通信; 非对称限幅光正交频分复用; 调制; 分集合并; 直流偏移

**中图分类号** TN929.12

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.190604

## ACO-OFDM Diversity Combining Receiver with Direct Current Offset in Visible Light Communications

Li Jianfeng<sup>1</sup>, Liu Xiaoshuang<sup>1\*</sup>, Li Jianke<sup>1</sup>, Wu Yali<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** Aiming at the asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) systems with direct current (DC) offset, a diversity combining receiver using single fast Fourier transform (FFT) is proposed. In a visible light communication (VLC) system, the background light source will inevitably cause a DC offset at the receiving end. Through the symmetric recovery operation, the odd and even signals of the ACO-OFDM system can be reconstructed in the time domain to estimate the DC offset of the system. The results show that the proposed diversity combining receiver has lower complexity, is insensitive to DC components, and has the same diversity gain as that of the conventional diversity combining receiver.

**Key words** optical communications; asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing; modulation; diversity combining; direct current offset

**OCIS codes** 060.4510; 060.4080

## 1 引言

基于发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)

有很多优点,如免费的频谱资源、低成本的发射和接收机设计、可获得较高的信噪比等<sup>[1-3]</sup>。因此 VLC 作为一个短距离的光无线通信技术可以很好地补充

**收稿日期:** 2020-06-24; **修回日期:** 2020-06-28; **录用日期:** 2020-07-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(61801165)、河北省自然科学基金(F2017207006)、河北省应用基础研究计划(16960314D)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2020163)、河北经贸大学教研项目(2020JYQ05, 2020JYY50)、河北经贸大学青年科技基金(2016KYQ02, 2016KYQ03)

\* **E-mail:** liuxiaoshuang55@126.com

传统无线通信的不足<sup>[4-5]</sup>。为了提升 VLC 系统的传输速率,通常采用频谱效率较高的正交频分复用(OFDM)技术<sup>[6]</sup>。OFDM 技术已经广泛应用在无线通信领域。但是在 VLC 系统中,时域的光信号必须为正实数形式。因此,研究者开发了一些应用在光通信系统的 OFDM 技术,如直流偏置光 OFDM(DCO-OFDM)技术<sup>[7]</sup>、非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)技术<sup>[8]</sup>、混合 ACO-OFDM(HACO-OFDM)技术<sup>[9]</sup>、非极性 OFDM(U-OFDM)技术<sup>[10]</sup>等。为了提升 ACO-OFDM 系统的效率,可以对接收信号进行分集合并,以获得 2~3 dB 的分集增益<sup>[11-13]</sup>。然而,这种分集合并技术对存在直流(DC)偏移的接收信号很敏感<sup>[14]</sup>。研究发现,在 VLC 系统中,由于可见光信号在自由空间传输,所以在接收光信号时,接收端不可避免地会收到太阳光或其他光源等背景光信号<sup>[15-17]</sup>。这种背景光干扰往往会在传输的光信号上叠加一个 DC 偏移信号。为了消除这个信号, Dissanayake 和 Armstrong<sup>[14]</sup>提出在时域估计 DC 偏移量并在频域将其消除的方法,从而可以解决 ACO-OFDM 系统的背景光干扰问题。但是在这个方案中,需要先通过快速傅里叶变换(FFT)将信号进行奇偶分离,然后再通过快速傅里叶逆变换(IFFT)进行 DC 偏移估计,并在频域将其去除。这个方案共需要 4 次 FFT/IFFT 操作,这无疑增加了接收机的复杂度。因此,如何消除 ACO-OFDM 系统背景光的干扰并且保证接收机的复杂度较低还需要继续研究。

针对上述问题,本文设计了一个基于单次 FFT 的分集合并接收机。在时域估计该接收机的 DC 偏移量,并在频域将其消除。对该接收机在有 DC 偏移的加性高斯白噪声(AWGN)信道下进行了数值仿真和性能分析。

## 2 接收机原理和设计

在 ACO-OFDM 系统中,发送信号只加载到奇数序号的子载波上。当在时域对信号进行非对称切除时,切除噪声会被加载到偶数序号的子载波上,不会对奇数序号的子载波产生影响。因此,通常 ACO-OFDM 系统将接收的时域信号经过 FFT 变为频域信号,然后通过提取奇数序号子载波上的信号完成解调。研究发现,偶数序号子载波上的切除噪声其实是发送信号在频域的另一种形式,相当于发送信号分别通过奇数和偶数序号子信道独立发送了两次。偶数序号子信道上的信号经过非线性操作

后,也可以转换为奇数序号子信道上的信号<sup>[11]</sup>。然后将两个独立信道上的信号进行合并,获得一定的频率分集增益。因此,这种分集方式本质是频率分集。

在 VLC 系统中,发送的电信号经过直流偏置加载到 LED 上,LED 将电信号转化为光信号。光信号经过自由空间传输后被光电二极管(PD)接收。由于光信号在自由空间传输,因此在接收光信号时,不可避免地收到太阳光或其他背景光信号<sup>[15-17]</sup>。这种背景光信号通常被看作叠加在原信号上的 DC 偏移<sup>[14]</sup>。在 VLC 中最典型的信道模型为 AWGN<sup>[7,9-14]</sup>,所以具有 DC 偏移的 VLC 系统可看作在 AWGN 信道上叠加一个直流分量。因此,如果发送的是  $N$  个子载波的 ACO-OFDM 信号,那么接收的 ACO-OFDM 信号中第  $n$  个信号( $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ )为

$$y_n = \text{floor}(x_{\text{ACO},n}) + e_n + d = x_{\text{odd},n} + x_{\text{even},n} + e_n + d, \quad (1)$$

式中: $\text{floor}(x_{\text{ACO},n})$ 为发送的非对称切除信号; $e_n$ 为高斯白噪声; $d$ 为实际 DC 偏移量; $x_{\text{odd},n}$ 为只包含奇数序列子载波的发送信号; $x_{\text{even},n}$ 为只包含偶数序列子载波的发送信号; $x_{\text{ACO},n}$ 为未被非对称切除的信号。为了方便计算 DC 偏移,给出了 DC 偏移的对数表示:

$$D = 20 \lg \frac{E\{\text{floor}(x_{\text{ACO}})\} + d}{E\{x_{\text{ACO}}\}}, \quad (2)$$

式中: $E\{\cdot\}$ 为求期望运算; $\text{floor}$ 为向下取整函数。(1)式中  $x_{\text{odd},n}$  在时域上具有半波反对称特性,而  $x_{\text{even},n}$  具有半波对称特性,因此,如果对接收信号进行前后相减运算,那么具有半波对称的  $x_{\text{even},n}$  将被去除掉,得到只包含奇数序列子载波的接收信号:

$$y_{\text{odd},n} = x_{\text{odd},n} + e_{\text{odd},n} = \begin{cases} \frac{1}{2}(y_n - y_{n+N/2}), & n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ \frac{1}{2}(y_n - y_{n-N/2}), & n = \frac{N}{2}, \frac{N}{2} + 1, \dots, N - 1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $e_{\text{odd},n}$ 为奇数序列子载波上的高斯噪声。如(3)式所示,对接收信号进行前后相减运算,则 DC 偏移量也被去除掉。同理,如果对接收信号进行前后相加运算,则具有半波反对称的  $x_{\text{odd},n}$  将被去除掉,得到只包含偶数序列子载波的接收信号:

$$y_{\text{even},n} = x_{\text{even},n} + e_{\text{even},n} + d = \begin{cases} \frac{1}{2}(y_n + y_{n+N/2}), & n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ \frac{1}{2}(y_n + y_{n-N/2}), & n = \frac{N}{2}, \frac{N}{2} + 1, \dots, N - 1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $e_{\text{even},n}$  为偶数序列子载波上的高斯噪声。从(4)式可看到,DC 偏移量只包含在  $y_{\text{even},n}$  中。(3)和(4)式被称为对称恢复操作<sup>[13,18]</sup>。经过(3)和(4)式操作后,接收信号  $y_{\text{odd},n}$  中不包含 DC 偏移量,而  $y_{\text{even},n}$  中包含 DC 偏移量,那么估计的 DC 偏移量为

$$d_0 = E\{y_{\text{even}} - |y_{\text{odd}}|\}, \quad (5)$$

式中:  $|\cdot|$  为绝对值运算;  $y_{\text{even}}$  为接收的偶数序列子载波信号;  $y_{\text{odd}}$  为接收的奇数序列子载波信号。如图 1 所示,将 DC 偏移量从  $y_{\text{even}}$  中移除,则得到了不包含 DC 偏移量的偶数序列子载波信号:

$$\bar{y}_{\text{even}} = y_{\text{even}} - d_0, \quad (6)$$

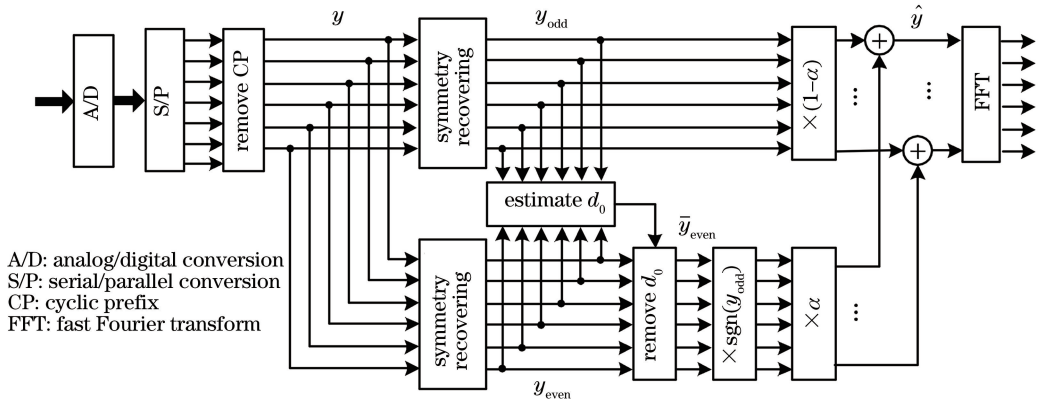


图 1 提出的 DC 偏移下 ACO-OFDM 分集合并接收机框图

Fig. 1 Block diagram of proposed diversity combining receiver for ACO-OFDM with DC offset

下面给出 DC 偏移估计的误差分析,将(3)、(4)式代入(5)式,可以得到估计的 DC 偏移量为

$$d_0 = E\{x_{\text{even}} + e_{\text{even}} + d - |x_{\text{odd}}| - |e_{\text{odd}}|\}, \quad (8)$$

式中:  $x_{\text{even}}$  为偶数序列子载波信号;  $e_{\text{even}}$  为偶数序列子载波上的高斯噪声;  $e_{\text{odd}}$  为奇数序列子载波上的高斯噪声。奇数和偶数序列子载波的发送信号满足<sup>[11]</sup>

$$x_{\text{even},n} = |x_{\text{odd},n}|. \quad (9)$$

将(9)式代入到(8)式中,可得到

$$d_0 = E\{d\} + E\{e_{\text{even}}\} - E\{|e_{\text{odd}}|\}. \quad (10)$$

由于加性高斯白噪声的期望为 0,所以  $E\{e_{\text{even}}\}$  为 0,那么(10)式可化简为

$$d_0 = d - E\{|e_{\text{odd}}|\}. \quad (11)$$

从(11)式中可以看到,DC 偏移估计误差为  $E\{|e_{\text{odd}}|\}$ ,是由奇数序列子载波上的噪声绝对值来决定的。

传统的分集合并接收机中需要 4 次 FFT/IFFT 运算<sup>[14]</sup>,合并操作还需要  $2N$  次加/减运算和  $3N$  次乘法。因此,它的复杂度约为  $4O(N\log_2 N)$ [4 倍

式中:  $d_0$  为估计的 DC 偏移量。

通过提取奇数序列子载波信号  $y_{\text{odd}}$  的极性,偶数序列子载波信号  $y_{\text{even}}$  可以转化为奇数序列子载波信号。那么两路信号可以合并为

$$\hat{y} = (1 - \alpha)y_{\text{odd}} + \alpha \text{sgn}(y_{\text{odd}})\bar{y}_{\text{even}}, \quad (7)$$

式中:  $\hat{y}$  为分集合并后的信号;  $\alpha$  为从 0 到 1 的加权系数;  $\text{sgn}(\cdot)$  为取符号运算。这种合并操作其实是将偶数序列子载波上的切除噪声变为奇数序列上的信号。如图 1 所示,通过 FFT 将经过合并后的信号转换到频域,然后对提取的奇数序列子载波上的信号进行解调。

于原始的 ACO-OFDM 接收机的复杂度  $O(N\log_2 N)$ 。而本文提出的接收机需要 1 次 FFT,对称恢复操作需要  $2N$  次加/减法运算,合并操作也需要  $2N$  次加/减运算和  $3N$  次乘法。所以本文提出的接收机的复杂度约为  $O(N\log_2 N)$ 。

### 3 结果和分析

本研究对提出的分集合并接收机在 AWGN 信道中的性能表现进行了数值仿真。在本文中 FFT 长度和子载波总数设置为 1024。为了分析所提出的接收机性能,给出了误码率(BER)随比特信噪比( $E_b/N_0$ ,其中  $E_b$  为每比特信号能量,  $N_0$  为噪声功率谱密度)的变化曲线。在本文中加权系数  $\alpha$  设置为 0.5,在 AWGN 信道中, $\alpha=0.5$  时的分集增益最大<sup>[11,16]</sup>。

为了证明 DC 偏移对分集合并的影响,图 2 中设置 DC 偏移量为 3 dB,对比了原始 ACO-OFDM 接收机和本文提出的接收机在未移除 DC 偏移量时的性能表现。可以看出,原始 ACO-OFDM 接收机对 DC 偏移不太敏感,这是因为 DC 偏移只存在于偶数序列子载波上,然而,原始 ACO-OFDM 接收

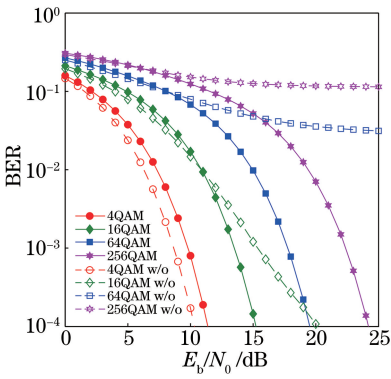


图 2 DC 偏移量为 3 dB 时的原始接收机和所提接收机(未移除 DC 偏移: w/o)的性能表现

Fig. 2 Performances of original receiver with 3 dB DC offset and proposed receiver without removing DC offset (w/o)

机在解调时只提取奇数序列子载波。当没有移除 DC 偏移时,所提出的分集合并接收机的性能明显下降,并且随着正交振幅调制(QAM)阶数的增高,系统性能变差。例如:当使用 4QAM 和 16QAM 时,系统性能明显下降,当使用更高阶的 64QAM 和 256QAM 时,系统性能更加恶化,且在文献[14]中也能看到类似的表现。

图 3 对比了在 DC 偏移为 3 dB 时的原始 ACO-OFDM 接收机、传统分集合并接收机(con)<sup>[14]</sup>和本文提出的接收机(pro)的性能。可以看到,当去除 DC 偏移时,所提出的分集合并接收机的 BER 性能将得到显著提高。当采用不同阶数的 QAM 时,获得的分集增益可达 1.5 dB ~ 3 dB。随着 QAM 阶数的增大,可获得的  $E_b/N_0$  增益越大。同时,与传统分集合并方法相比,本文提出的接收机具有相同

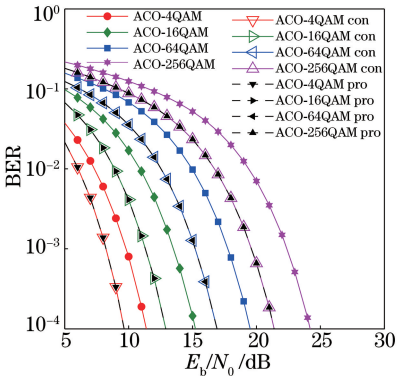


图 3 DC 偏移为 3 dB 下的原始接收机、传统分集合并接收机(con)和所提接收机(pro)的性能表现

Fig. 3 Performance of original receiver with 3 dB DC offset, conventional diversity combining receiver (con), and proposed receiver (pro)

的 BER 性能,这证明了在时域和频域进行 DC 偏移估计和移除等操作是等效的。

根据(11)式,DC 偏移估计误差与奇数序列子载波上的高斯噪声有关。为了描述 DC 偏移估计误差,给出了 DC 偏移估计误差随  $E_b/N_0$  的变化,如图 4 所示,如果信号功率固定不变,当  $E_b/N_0$  较小时,即高斯噪声较大时,DC 偏移估计误差较大。随着  $E_b/N_0$  的增大,高斯噪声逐渐变小,DC 偏移估计误差也随之减小。可以看出,DC 偏移估计误差随  $E_b/N_0$  的增大呈对数递减(这里的纵轴为对数坐标),并且随着 QAM 阶数的增加,DC 偏移估计误差变大。

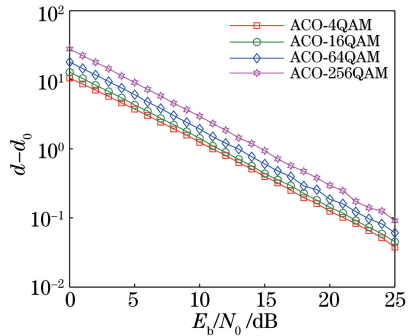


图 4 DC 偏移为 3 dB 时的估计误差表现

Fig. 4 Performance for estimation error with 3 dB DC offset

为了更直观地描述 DC 偏移估计误差对 ACO-OFDM 系统性能的影响,对本文提出的接收机在移除实际 DC 偏移量  $d$  和 DC 偏移估计量  $d_0$  后的性能进行比较。从图 5 中可以看到,移除  $d_0$  的 ACO-OFDM 系统的 BER 略微高于移除  $d$  的系统的 BER。原因在于,估计误差  $E\{|e_{\text{odd}}|\}$  为正数,估计得到的  $d_0$  略小于实际偏移量  $d$ 。根据图 5,  $d$  和  $d_0$  之间的差别很小时,BER 性能基本一致。因此,本

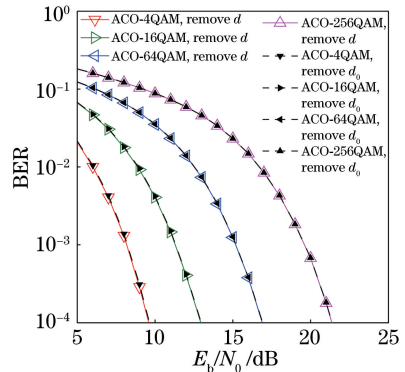


图 5 DC 偏移为 3 dB 时所提出的接收机在移除  $d$  和  $d_0$  时的性能表现

Fig. 5 Performance of proposed receiver with 3 dB DC offset and without  $d$  and  $d_0$



文所提出的接收机和 DC 偏移估计方法可以很好地解决 DC 偏移下的 ACO-OFDM 的分集合并问题。

## 4 结 论

提出了一个基于单次 FFT 的分集合并接收机来解决 ACO-OFDM 存在 DC 偏移的问题。传统的分集合并接收机中需要 4 次 FFT/IFFT 来分离奇、偶信号并对其进行分集合并,而所提出的接收机只需要一次 FFT 操作,具有更低的复杂度。仿真结果表明使用提出的接收机可以较为准确地估计出 DC 偏移,并将其在时域中去除,同时可获得 1.5~3 dB 的分集增益。因此,当要求一个 ACO-OFDM 系统的复杂度较低时,所提出的接收机将会是一个较好的选择。

## 参 考 文 献

- [1] 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(13): 1853-1888.
- [2] Jin Y C, Chen X B, Mao X R, et al. Influence of modulation degree on performances of visible light communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0506001.  
靳永超, 陈雄斌, 毛旭瑞, 等. 调制度对可见光通信系统性能的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0506001.
- [3] Li J F, Huang Z T, Zhang R Q, et al. Superposed pulse amplitude modulation for visible light communication[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31006-31011.
- [4] Liu X S, Li J F, Huang Z T, et al. Digital pre-distortion technique for orthogonal frequency division multiplexing based LED nonlinear channel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 240601.  
刘晓爽, 李建锋, 黄治同, 等. 基于正交频分复用的 LED 非线性信道下的数字预畸变技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 240601.
- [5] Jia K J, Hao L, Zhang S Q. Design and performance analysis of asymmetrically clipped optical multi-carrier code division multiple access system in visible light communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0206001.  
贾科军, 郝莉, 张守琴. 可见光通信非对称限幅光多载波码分多址系统的设计及性能分析 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0206001.
- [6] Jean A. OFDM for optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 189-204.
- [7] 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.
- [8] Armstrong J, Lowery A J. Power efficient optical OFDM[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(6): 370-372.
- [9] 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.
- [10] 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: 1-5.
- [11] Chen L, Krongold B, Evans J. Diversity combining for asymmetrically clipped optical OFDM in IM/DD channels[C] // GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference, November 30-December 4, 2009, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [12] Dang J, Zhang Z, Wu L. Frequency-domain diversity combining receiver for ACO-OFDM system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7802510.
- [13] Li J F, Liu X S, Li J K, et al. Diversity combining via symmetry recovering for asymmetrically clipped optical OFDM [J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 86-89.
- [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] Hamza T, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Investigation of solar noise impact on the performance of underwater wireless optical communication links [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25832-25845.
- [16] Tahar M, Wang T Q, Guerra Medina M F, et al. Experimental demonstration of diversity combining for asymmetrically clipped optical OFDM [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(5): 906-909.
- [17] Islim M S, Videv S, Safari M, et al. The impact of solar irradiance on visible light communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2376-2386.
- [18] Liu X S, Li J F, Li J K, et al. Analysis of the single-FFT receiver for layered ACO-OFDM in visible light [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(17): 4757-4764.