

基于 SIPM-OFDM 的全双工光纤-可见光混合系统

许启芳¹, 文 鸿^{1*}, 陈青辉¹, 耿 康¹, 宗铁柱¹, 陈 明²

(1. 湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南师范大学 物理与电子科学学院, 长沙 410081)

摘要: 子载波索引功率调制(SIPM)能够利用子载波索引信息调整所对应的功率信息, 它应用于光纤-可见光融合系统中, 可以更好地提高该系统的传输容量。提出了一种基于子载波索引功率调制-正交频分复用(SIPM-OFDM)的全双工光纤-可见光混合系统, 利用波长重用方法简化了系统的结构, 并建立了 SIPM-OFDM 信号的产生模型, 通过仿真实验验证了系统的可行性。仿真结果表明: 经过 35 km 标准单模光纤(SSMF)及 5 m 可见光双向传输之后, 系统功率代价分别小于 1 dB 和 2 dB, 星座图依然清晰。

关键词: 子载波索引功率调制; 正交频分复用; 光纤-可见光混合系统

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)04-0053-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Full-duplex fiber-visible light hybrid system based on SIPM-OFDM

XU Qifang¹, WEN Hong^{1*}, CHEN Qinghui¹, GENG Kang¹, ZONG Tiezhu¹, CHEN Ming²

(1. School of Computing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Physics and Electronic Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: Subcarrier index power modulation (SIPM) can use the subcarrier index information to adjust the corresponding power information. It is used in a fiber-visible light fusion system, which can better increase the transmission capacity of the system. A full-duplex fiber-visible hybrid system based on subcarrier index power modulation-orthogonal frequency division multiplexing (SIPM-OFDM) is proposed. The structure of the system is simplified by using the wavelength reuse method, and the SIPM-OFDM signal is established. The model is generated and the feasibility of the system is verified by simulation verification. Simulation results show that after 35 km standard single-mode fiber (SSMF) and 5 m visible light bidirectional transmission, the system power cost is less than 1 dB and 2 dB, respectively, and the constellation diagram is still clear.

Key words: subcarrier index power modulation; orthogonal frequency division multiplexing; fiber-visible hybrid system

0 引言

随着云计算、高清视频等业务的快速部署, 人们对超宽带高速率室内无线接入的需求日益增加。光载无线融合了无线通信的灵活性和光纤通信的高带宽、

低损耗等优点^[1,2], 被认为是理想的接入方式。然而, 在医院、军事基地和机场等场景, 无线电信号容易受到电磁干扰的影响。光纤-可见光混合传输系统在无线接入端采用可见光通信, 可以很好地解决上述问题^[3-5]。文献[3]提出奈奎斯特单载波频域均衡技术, 实现了 10 Gb/s 光纤信号和 500 Mb/s 可见光信号的混合传输。文献[6]提出无载波幅度相位调制, 实现了 16 Gb/s 无载波幅度相位(CAP)信号在 30 km 标准单模光纤和 8 m 可见光的混合传输。以上文献虽采用了可见光通信, 增加了光通信的灵活性, 但其系统传输容量还有待提高。

子载波索引调制-正交频分复用 (SIM-OFDM) 采用子载波分层调制以传输部分信息, 可以显著提高

收稿日期: 2019-10-25。

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(18C0520, 18B026)资助; 国家自然科学基金项目(61805079)资助; 湖南工业大学科研创新基金项目(CX1910)资助。

作者简介: 许启芳(1994—), 女, 汉族, 安徽六安人, 硕士研究生, 现就读于湖南工业大学计算机学院电子与通信工程专业, 在校期间主要研究方向为无线通信系统及可见光通信系统(包括可见光信号处理、信道编码)等。

* 通信作者: 文鸿(E-mail: wenhhut@163.com)。



OFDM 系统的频谱效率, 引起了广泛的关注^[7]。文献[8]将子载波索引调制应用于可见光通信, 提出了一种双模调制的子载波索引调制 OFDM 系统。文献[9]对可见光信号的非负性特征进行改造, 提出了一种增强型可见光载波索引-正交频分复用调制方案, 通过奇数子载波序号发送部分信息, 从而降低 OFDM 信号的峰均功率。但上述 2 种方案的接收机复杂度较高。文献[10-12]提出了子载波索引功率调制(SIPM)并应用于光纤 OFDM 系统, 通过子载波的调制功率传递信息, 在接收机只需依据功率判决进行信号解调, 从而降低了接收机的复杂性。本文在此基础上, 提出一种 SIPM-OFDM 的全双工光纤-可见光混合系统, 将 SIPM 应用于全双工光纤-可见光系统, 在增加该系统灵活性的同时提高了系统的传输容量。

1 SIPM-OFDM 原理

SIPM-OFDM 原理结构如图 1(a)所示。在发送端, 待发送的信息比特 S_i (i 位信息比特) 被分成索引比特 I_n (n 位索引比特) 和符号映射比特 B_{i-n} ($i-n$ 位符号映射比特) 两部分; I_n 用于控制 B_{i-n} 的映射方式及对应的子载波的功率大小。若 I_n 为 1, 则取其后 3 位符号比特使用 8 移相键控(8PSK)映射方式、其子载波功率为高功率; 若 I_n 为 0, 则取其后 2 位符号比特使用正交相移键

控(QPSK)映射方式, 其子载波为低功率。SIPM 后的星座图与功率判决门限值设置如图 1(b)所示, 具体映射方式如表 1 所示。

因此, 经 SIPM-OFDM 调制后的信号 $S(n)$ 可表示为:

表 1 SIPM-OFDM 映射方式

索引比特	符号映射比特	映射方式	映射符号
1	000	8PSK	$P_{8PSK}e^{j\pi/8}$
	001		$P_{8PSK}e^{j3\pi/8}$
			
	111		$P_{8PSK}e^{j5\pi/8}$
0	00	QPSK	$P_{QPSK}e^{j\pi/4}$
	01		$P_{QPSK}e^{j3\pi/4}$
			
	11		$P_{QPSK}e^{j5\pi/4}$

$$S(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A_k \times e^{j2\pi kn/N}, k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中, N 是子载波数量, A_k 为第 k 个子载波上调制的映射符号。

A_k 表达式为:

$$A_k = \begin{cases} P_{8PSK} \times e^{j\varphi_k} & \varphi_k \in \left[\pm \frac{\pi}{8}, \pm \frac{3\pi}{8}, \pm \frac{5\pi}{8}, \pm \frac{7\pi}{8} \right], I_i=1 \\ P_{QPSK} \times e^{j\varphi_k} & \varphi_k \in \left[\pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{3\pi}{4} \right], I_i=0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_{8PSK} 、 P_{QPSK} 分别为发送端经 8PSK 调制、QPSK 调制后的符号功率。

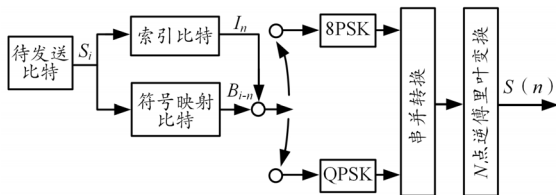
在接收端, 各子载波所对应的解调方式由该子载波的功率与功率判决门限值(P_{th})比较后决定。若子载波功率大于 P_{th} , 则采用 8PSK 解调; 若小于 P_{th} , 则采用 QPSK 解调。功率判决门限值为接收信号功率的均值^[10,11]:

$$P_{th} = \frac{P_{8PSK} + P_{QPSK}}{2} \quad (3)$$

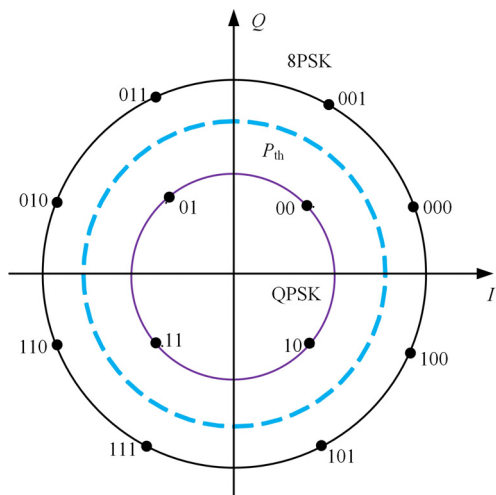
2 全双工光纤-可见光混合传输系统

基于 SIPM-OFDM 调制的全双工光纤-可见光混合传输系统如图 2 所示, 仿真参数如表 2 所示。

在发射端, 采用中心频率为 193.1 THz 且线宽为 0.1 MHz 的连续波激光器(CW Laser)作为光源。由 Matlab 离线产生 SIPM-OFDM 信号, 其过程包括 SIPM-OFDM 调制、串/并变换、傅里叶逆变换、插入训练序列、添加循环前缀和并/串变换等步骤, 其采样速



(a) SIPM-OFDM 调制结构



(b) SIPM-OFDM 星座映射

图 1 SIPM-OFDM 调制结构与星座映射

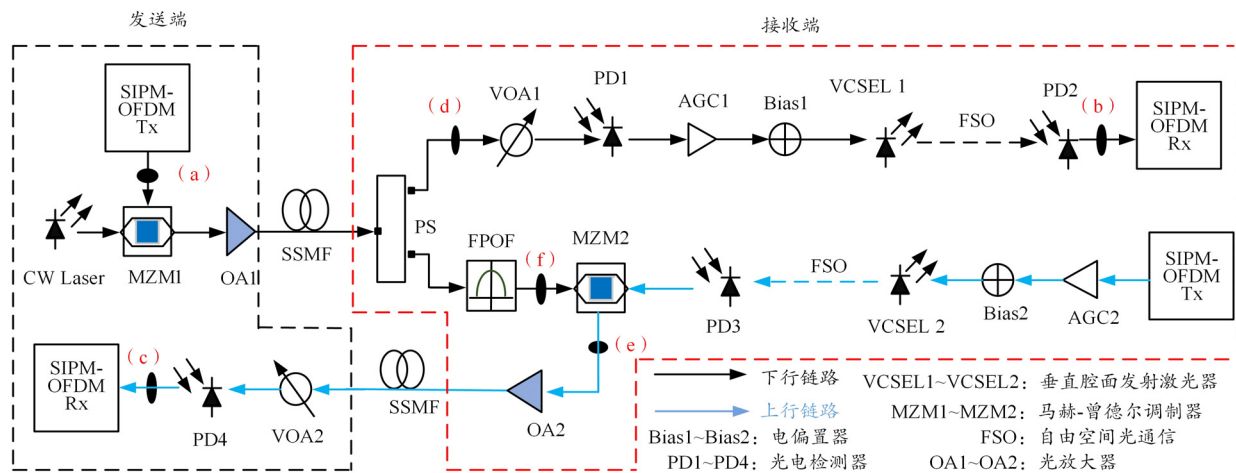


图2 基于 SIPM-OFDM 调制的全双工光纤-可见光混合传输系统

表2 系统仿真参数设置

参数类别	参数	值
SIPM 信号	IFFT/FFT 点数	2048
	调制格式	8PSK/QPSK
	伪随机序列长度	5×10^4 bits
	比特率	8 Gb/s
	子载波高功率与低功率比值	$\sqrt{5}$
外腔激光器	中心频率	193.1 THz
马赫-曾德尔调制器	消光比	30 dB
标准单模光纤 光电检测器	衰减系数	0.2 dB/km
	色散系数	10 ps/(nm·km)
	差分群时延	0.07 ps/(nm ² ·km)
	灵敏度	1 A/W
可见光信道	暗电流	10 nA
	衰减	205 dB/km
垂直腔面发射端激光器	波长	680 nm

率为 16 Gb/s、过采样因子为 4。在光发送端的 SIPM-OFDM 信号的频谱图如图 3(a)所示。SIPM-OFDM 信号驱动 MZM1,从而产生 SIPM-OFDM 光信号。SIPM-OFDM 光信号通过光放大器(OA1)放大,随后经过 35 km 标准单模光纤(SSMF)进行传输。

在接收端,分光器(PS)将 SIPM-OFDM 光信号分成完全等分的 2 路信号。在下行链路,SIPM-OFDM 光信号的光谱如图 3(d)所示。接收端采用一个可变光衰

减器(VOA1)改变 SIPM-OFDM 光信号的接收光功率。SIPM-OFDM 光信号由 PD1 转换成 SIPM-OFDM 电信号后,经 1 个自动增益控制器(AGC1)和 1 个 Bias1 将电信号调制到 VCSEL1 的线性区。经过 5 m 可见光传输后,接收到的 SIPM-OFDM 光信号被 PD2 转换到 SIPM-OFDM 电信号,其电频谱图如图 3(b)所示。与发送端电频谱图 3(a)相比,接收端的信号功率下降,但信号并未出现失真。SIPM-OFDM 电信号最后由 Matlab 离线解调,其过程包括去除循环前缀、去除训练序列、傅里叶变换、并/串变换和 SIPM-OFDM 解调等步骤。

在上行链路,中心频率为 193.1 THz 的法布里-珀罗光带通滤波器(FPOF)滤出下行链路的中心载波,作为光载波用来调制上行 SIPM-OFDM 信号,光载波频谱如图 3(e)所示。Matlab 离线产生的 SIPM-OFDM 信号,经过 AGC2 和 Bias2 后,由 680 nm 的 VCSEL2 产生 SIPM-OFDM 光信号,经过 5 m 可见光传输后,由 PD3 转换到 SIPM-OFDM 电信号,MZM2 将 SIPM-OFDM 电信号调制到滤出的光载波上用于上行传输。这种波长重用技术无需额外的激光器产生光载波^[6],因此降低了系统的复杂度和成本,光谱图如图 3(f)所示。SIPM-OFDM 光信号经 OA2 放大后,由 35 km SSMF 传输。在光发射端端,通过 VOA2 改变上行 SIPM-OFDM 光信号的接收光功率。SIPM-OFDM 光信号由 PD4 转换成电信号,经 Matlab 离线解调,其电频谱图如图 3(c)所示。与发送端电频谱图 3(a)相比,接收端的信号功率下降,但信号并未出现失真。

3 仿真结果与分析

上/下行链路的背靠背(BTB)、35 km SSMF +

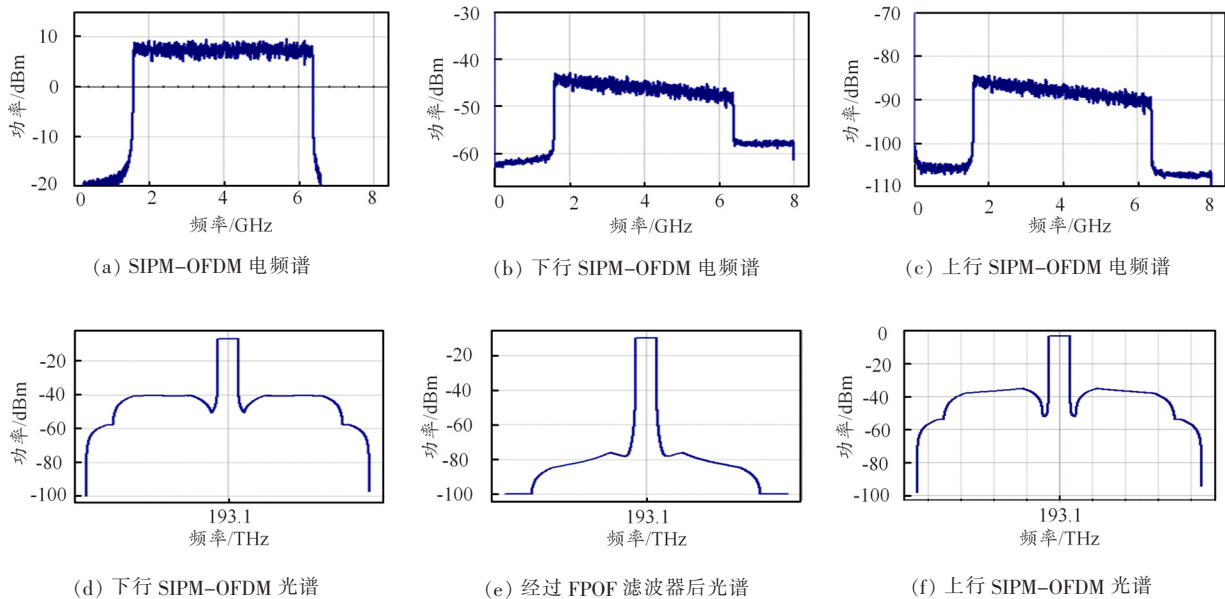


图3 系统中各测试节点的频谱图

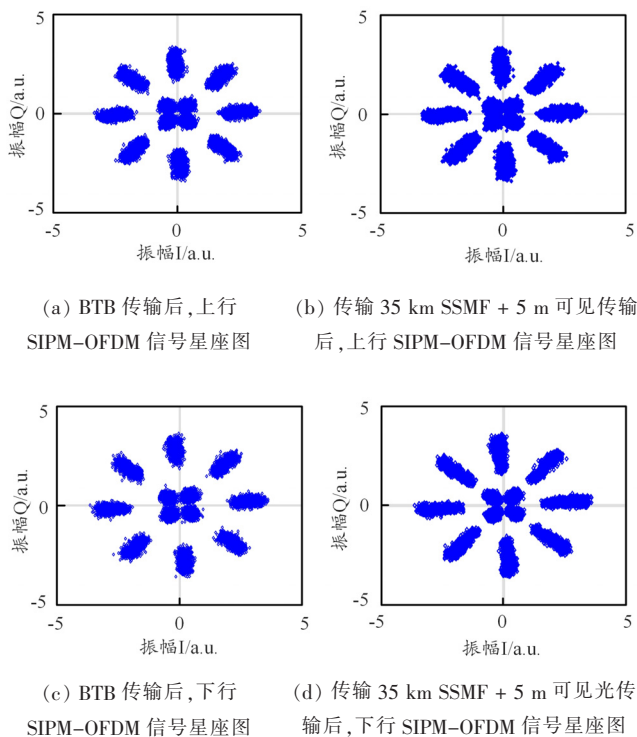
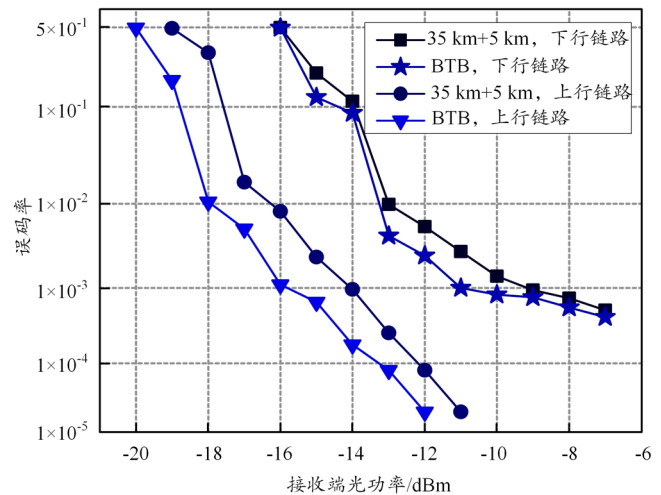


图4 上/下行链路星座图

5 m 可见光传输的星座图如图 4 所示, 星座图相邻 2 点的区分很明显且星座图的旋转都很小。上/下行链路的 SIPM-OFDM 信号误码-接收光功率曲线如图 5 所示, 误码率随接收光功率增加而降低。SIPM-OFDM 信号经 35 km SSMF 及 5 m 可见光传输后, 对于上行链路, 误码率为 10^{-4} 时的功率代价小于 1 dB; 对于下行链路, 误码率为 10^{-3} 时的功率代价小于 2 dB。下行链



路和上行链路的接收光功率分别为 -13 dBm 和 -17 dBm 时, 误码率出现跳跃式增长, 这主要是由于色散和非线性效应对信号的影响越来越大, 从而导致 8PSK 星座点与 QPSK 星座点之间发生重叠, 影响了接收端对功率门限判决的不准确而发生误判, 从而导致信号解调出错。

4 结束语

本文提出了一种基于 SIPM-OFDM 的全双工光纤-可见光混合传输系统。该系统比传统可见光系统有更高的传输容量。仿真实验结果表明: 该系统产生的 SIPM-OFDM 信号能有效抵抗光纤色散的影响, 经

35 km SMMF 和 5 m 可见光传输后信号星座仍然清晰。由于该系统采用波长重用简化系统结构, 有效地降低了该系统的成本。

参考文献:

- [1] JARRAR M, MAAMOUN K, MOUFTAH H T. An enhancement to the novel RoF-PON as a fiber-wireless services enabling technology [C] // 2015 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS), July 26–29, 2015, Chicago, IL, USA. New York: IEEE, 2015: 1–6.
- [2] PEHRAJ D. Performance Analysis of RoF PON System based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing Technique [J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 95(26): 9–12.
- [3] WANG Y, SHI J, YANG C, et al. Integrated 10 Gb/s multilevel multiband passive optical network and 500 Mb/s indoor visible light communication system based on Nyquist single carrier frequency domain equalization modulation [J]. Optics letters, 2014, 39(9): 2576–2579.
- [4] CHEN C Y, WU P Y, LU H H, et al. A bidirectional lightwave transport system based on PON integration with WDM VLC [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 405–409.
- [5] ZHONG W D, CHEN C, WU D. Seamless integration of indoor VLC with WDM-PON based on hierarchically modulated constant envelope OFDM [C]//2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks(ICON), July 5–9, 2015, Budapest, Hungary. New York: IEEE, 2015: 1–4.
- [6] HE Jing, DONG Huan, DENG Rui, et al. Low-cost bidirectional hybrid fiber-visible laser light communication system based on carrier-less amplitude phase modulation [J]. Optical Engineering, 2016, 55 (8): 086109-8–086109-15.
- [7] ABU-ALHIGA R, HAAS H. Subcarrier-index modulation OFDM[C]// Proceedings of the IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2009, September 13–16, 2009, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2009: 1–5.
- [8] MAO Tianqi, JIANG Rui, BAI Ruowen. Optical du al-mode index modulation aided OFDM for visible light communications [J]. Optics Communications, 2017, 391: 37–41.
- [9] RUI Guan, XU Wei, YANG Zhaohui, et al. Enhanced subcarrier-index modulation-based asymmetrically clipped optical OFDM using even subcarriers [J]. Optics Communications, 2017, 402: 600–605.
- [10] HALABI F, CHEN L, PARRE S, et al. Subcarrier index-power modulated optical OFDM and its Performance in IMDD PON systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(9): 2228–2234.
- [11] HALABI F, CHEN L, PARRE S, et al. Subcarrier index-power modulated optical OFDM (SIPM-OFDM) for IMDD PON systems [C]//Optical Fiber Communication Conference 2016, March 20–22, 2016, Anaheim, California United States. Anaheim: Optical Society of America, 2016: 104–106.
- [12] CHEN L, HALABI F, GIDDINGS R P, et al. Subcarrier Index-Power Modulated Optical OFDM with Superposition Multiplexing for IMDD Transmission Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 34 (22): 5284–5292.
- [13] CHEN Qinghui, HE Jing, DENG Rui, et al. Experimental Research on Adaptive 128 / 64QAM DFT-Spread IFFT / FFT Size Efficient OFDM With a High SE in VLLC System [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9 (1): 7900408-13–7900408-20.
- [14] DENG Rui, HE Jing, ZHOU Zhihua, et al. Experimental Demonstration of Software-Configurable Asynchronous Real-Time OFDM Signal Transmission in a Hybrid Fiber-VLLC System [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1–8.

征稿简则

- 1、来稿文责自负,稿件刊用后如出现泄密、侵犯他人著作权等问题,本刊概不承担连带责任。
- 2、稿件内容必须与光通信密切相关(栏目有:光网络、光器件、光传感、光传输、可见光通信、无线光通信、量子通信、光纤光缆、光通信工程),稿件内容要真实、准确,且不得抄袭或重复发表。
- 3、本刊现已与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签署《CAJ-N 网络首发学术期刊合作出版协议》,通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)正式出版我刊网络版。录用定稿网络首发之后,在后续的排版定稿、整期定稿网络版和印刷版中,不得修改论文题目、作者署名、作者单位以及其学术内容,只允许修改少量文字或少量不影响研究结果和结论的数据。由于网络首发周期短,因此凡被录用的稿件不允许撤稿。按国家有关网络连续型出版物管理规定,网络首发论文视为正式出版论文,我刊编辑部与电子杂志社共同为论文作者颁发论文网络首发证书(论文作者可以从“中国知网”下载或打印)。
- 4、来稿一经本刊录用,该文章全部版权即转归本刊所有;稿件印刷版出版后,当月赠寄当期杂志 2 册;2 个月内向作者一次性支付各版次(网络版、光盘版和印刷版)稿酬。
- 5、来稿中的标点符号格式要注意规范,英文中的逗号、冒号、句号分别用半角加一空格(“,”、“:”、“.”),中文中的标点符号一律用全角。
- 6、来稿中的圆括号不分中英文,一律用全角。

《光通信技术》编辑部