

基于信号分布非均匀量化的 IMDD-FBMC 系统性能提升

林嘉芊¹, 毕美华^{1,2*}, 杨晖¹, 周豪¹, 黄天成², 杨国伟¹, 肖石林²

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018;

2. 上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 针对强度调制直接检测-滤波器组多载波(IMDD-FBMC)系统中低比特位数数字模拟转换器(DAC)量化性能较差的问题, 提出一种基于信号分布估计的非均匀量化方案。该方案采用基于 FBMC 信号分布的非线性规划方法获得量化误差最小时的量化阶距, 进而提升基于低比特位数 DAC 的 IMDD-FBMC 系统性能。仿真结果表明: 与均匀量化方式相比, 该方案在 3~5 位量化比特位数的情况下可以使 IMDD-FBMC 系统的误码率(BER)性能提升 15.9~60.7 倍, 且在保证系统性能的情况下, 基于信号分布的量化方案可以减少 1~2 位量化比特位数, 降低系统成本。

关键词: 光滤波器组多载波; 信号分布估计; 数字模拟转换器 / 模拟数字转换器; 非均匀量化

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)11-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

IMDD-FBMC system performance improvement based on nonuniform quantization of signal distribution

LIN Jiaqian¹, BI Meihua^{1,2*}, YANG Xuan¹,ZHOU Hao¹, HUANG Tiancheng², YANG Guowei¹, XIAO Shilin²

(1. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the poor quantization performance of low bit digital analog converter (DAC) in intensity modulation direct detection-filter bank multi-carrier (IMDD-FBMC) system, a non-uniform quantization scheme based on signal distribution estimation is proposed. The scheme uses the non-linear programming method based on FBMC signal distribution to obtain the quantitative step when the quantization error is minimum, and then improves the performance of IMDD-FBMC system based on low bit DAC. The simulation results show that the proposed scheme can improve the BER performance of the IMDD-FBMC system by 15.9~60.7 times under the condition of 3~5 bit quantization number compared with the uniform quantization scheme, and the quantization scheme based on signal distribution can reduce 1~2 bit quantization number and reduce the system cost under the condition of ensuring the system performance.

Key words: O-FBMC; signal distribution estimation; ADC/DAC; nonuniform quantization

0 引言

近年来,随着机器学习、社交网络和云计算等新

兴技术的出现,人们对流量吞吐量和带宽的需求也在快速增长^[1]。而多载波调制波形能满足人们高容量、异步传输和可观的频谱效率的要求,特别是滤波器组多载波(FBMC)波形,由于其具有的旁瓣抑制比高、异步传输特性好、不需要循环前缀、频谱效率高、提高系统对载波间干扰(ICI)的鲁棒性和降低带外功率泄露等优点^[2-4],在基于强度调制直接检测(IMDD)的光纤传输系统中得到了广泛的应用。光 FBMC 信号产生过程中通常需要使用高分辨率的数字模拟转换器(DAC)和模拟数字转换器(ADC)来对信号进行转换以获得好的

收稿日期: 2019-05-13。

基金项目: 国家自然科学基金(61501157、61571291、61705055)资助; 浙江省自然科学基金(LY17F050012)资助。

作者简介: 林嘉芊(1996-),男,硕士研究生,就读于杭州电子科技大学通信工程学院,主要从事光通信系统性能提升的研究,当前研究方向为基于非均匀量化的多载波调制系统性能提升。

* 通信作者: 毕美华(E-mail: bmhua@hdu.edu.cn)。



系统性能。然而, 高分辨率 DAC/ADC 的使用一方面增加了系统的成本; 另一方面也会带来系统的功耗问题。为了解决该问题, Christian R 等人提出使用限幅和编码的方案来提升光-正交频分复用 (O-OFDM) 和交错正交幅度调制-正交频分复用 (OQAM-OFDM) 系统中 DAC/ADC 量化性能^[5-7]。Milton N. Tipán 等人对比了不同剪切方法对通用滤波器多载波 (UFMC) 峰均比 (PAPR) 性能的影响^[8]。但是, 这些方案仅带来了有限的量化比特数降低和系统性能优化, 而且还引入了额外的限幅噪声。同时, 由于多载波信号中小幅值信号占绝大多数, 多载波调制系统的量化性能很大程度上也取决于小信号的量化比特位。为此, J. Peng 和俞嘉生等人针对正交频分复用 (OFDM) 和通用滤波多载波 (UFMC) 系统提出了基于高斯分布假设下的非均匀量化方案^[9,10], 该方案在系统信号量化噪声比 (SQNR)、误码率 (BER) 和误差向量幅度 (EVM) 性能的提升方面获得了较好的效果。然而, 由于 FBMC 系统使用了滤波器组, 导致信号频谱上出现了尖峰, 不是完全的高斯分布。因此, 基于高斯分布假设下的非均匀量化并非 FBMC 信号的最佳量化方案选择。

为了进一步提升基于低量化比特位数 DAC/ADC 的 IMDD-FBMC 系统的量化性能, 本文提出一种基于信号分布估计的非均匀量化方案。

1 基于信号分布估计的非均匀量化方案

为简化 DAC/ADC 的设计, 本文在考虑 DAC 对系统性能的影响时只关注限幅和量化带来的噪声。因此, 基于信号分布估计的量化方案主要分为限幅和量化 2 个部分。

1.1 基于 FBMC 信号的限幅操作

本方案采用限幅操作来防止 FBMC 信号过高的 PAPR, 假设 FBMC 离散基带时域信号为 $x(n)$, 限幅操作可以表示为:

$$f(x[n]) = \begin{cases} x(n), & |x(n)| \leq A \\ A, & |x(n)| > A \end{cases} \quad (1)$$

其中, A 为由限幅比率 (CR) 决定的限幅值, CR 定义为相对于样本标准差 σ 的比率 ($CR = \frac{A}{\sigma}$)。

为验证限幅操作对 FBMC 信号的作用, 本文对 FBMC 信号使用 CR 值为 3 的限幅操作, 限幅前后互补累积分布函数 (CCDF) 值与 PAPR 的关系图如图 1 所示。通过图中 2 条曲线最低点在横坐标上的位置可

以得到: 牺牲 0.3% 的幅值缺失可以降低约 2.3 dB 的 PAPR; 当 CCDF 值为 0.01 时, 限幅后 PAPR 减少了约 1.5 dB。所以, 限幅操作对降低 FBMC 信号过高的 PAPR 是非常有必要且有效的。

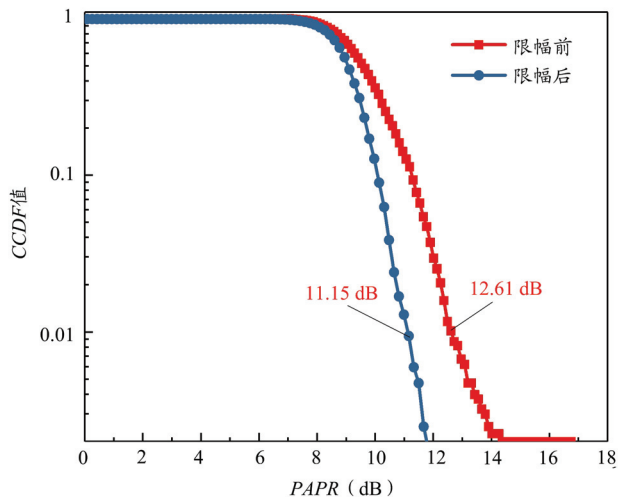


图 1 限幅前后 PAPR 关系图

1.2 基于限幅后 FBMC 信号的量化操作

量化操作的过程就是用规定好的 $M=2^n$ (n 为 DAC/ADC 的位数) 个量化电平 M 来对原先的信号幅值进行映射。与均匀量化不同, 基于信号分布估计的量化方案属于非均匀量化方式, 该方案根据信号幅度的分布情况计算量化噪声最小时的量化电平, 所取得的每个量化阶距 (即量化后离散输出电平间的距离) 都不相等, 量化过程可以分为 2 个步骤:

步骤一: 使用非参数直方图估计法对信号幅度的分布情况 $f(x)$ 进行估计拟合得到 FBMC 信号分布函数。非参数直方图估计法将信号范围划分为 k 个等距离的区间, 统计每个区间内信号样本的个数, 计算每个区间的概率密度即可得到 FBMC 的信号分布直方图, 最后经过拟合即可得到 FBMC 信号的概率密度函数 $f(x)$ 。

步骤二: 首先使用非线性规划函数求解量化噪声最小时的量化电平。量化噪声 e_q 与信号的概率密度函数 $f(x)$ 相关, 其计算公式为:

$$e_q = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_q)^2 f(x) dx \approx 2 \int_0^{+\infty} (x - x_q)^2 f(x) dx \quad (2)$$

其中, x_q 是数字采样点 x 的离散输出, $[q_{-(2^{n-1}-1)}, \dots, q_{-2}, q_{-1}, 0, q_1, q_2, \dots, q_{2^{n-1}-1}]$ 是信号量化间隔的端点。

$$x_q(x) = \begin{cases} \frac{q_{2^{n-1}-1} + q_{2^{n-1}}}{2}, & x \geq q_{2^{n-1}-1} \\ \vdots & \\ \frac{q_1}{2}, & q_1 > x \geq 0 \\ \frac{q_{-1}}{2}, & q_{-1} \leq x < 0 \\ \vdots & \\ \frac{q_{-(2^{n-1}-1)} + q_{-2^{n-1}}}{2}, & x \leq q_{-(2^{n-1}-1)} \end{cases} \quad (3)$$

由于信号正电平和负电平的振幅是对称的, 即 $q_{-(2^{n-1}-1)} = -q_{2^{n-1}-1}$, 因此推导式(2)可以得到:

$$e_q \propto \frac{(0-q_2) \times (0+q_2+2q_1)}{4} g(q_1) + \frac{(q_1-q_3) \times (q_1+q_3+2q_2)}{4} g(q_2) + \dots + \frac{(q_{2^{n-1}-2}-q_{2^{n-1}}) \times (q_{2^{n-1}-2}+q_{2^{n-1}}+2q_{2^{n-1}-1})}{4} g(q_{2^{n-1}-1}) + \frac{(q_{2^{n-1}-1}+q_{2^{n-1}})^2}{4} g(+\infty) - [(0-q_2)h(q_1) + (q_1-q_3)h(q_2) + \dots + (q_{2^{n-1}-2}-q_{2^{n-1}})h(q_{2^{n-1}-1}) + (q_{2^{n-1}}+q_{2^{n-1}-1})h(+\infty)] \quad (4)$$

其中, $g(x) = \int_0^x f(t)dt$, $h(x) = \int_0^x tf(t)dt$.

然后使用非线性规划函数求出最小量化误差目标下的最佳量化间隔。由于限幅操作, 最后一位量化离散电平与 A 的值相等, 具体非线性规划方法为:

$$\begin{aligned} \min e_q \\ \text{s.t. } q_{j+1} > q_j, j=1, \dots, 2^{n-1}-1 \\ q_j > 0, j=1, \dots, 2^{n-1} \\ q_{2^{n-1}} = A \end{aligned} \quad (5)$$

2 基于信号分布估计量化方案的系统仿真实现

2.1 系统结构框图

基于信号分布估计量化的 IMDD-FBMC 系统框图如图 2 所示。根据信号传输方向, 系统主要由光 FBMC 发射机、光纤传输链路和光 FBMC 接收机 3 部分组成。在光 FBMC 发射机中, 输入的二进制数据先经过 QAM 映射模块映射为 M -QAM 复数符号后, OQAM 预处理模块将复数符号的实、虚部交错半个 FBMC 符号周期, 并与调整相位 $\theta_{m,n}$ 相乘, 保证了系统的正交性; 快速傅里叶逆变换(IFFT)模块和滤波器组将 OQAM 预处理后的信号分别调制到不同频带的子载波上, 再通过并/串模块并/串转换为宽带信号 $X(n)$, 最后由 k bit DAC 将数字信号转换成模拟信号 $X(t)$ 。其中, 由时域波形 $X(n)$ 和概率密度函数(PDF)(图 2

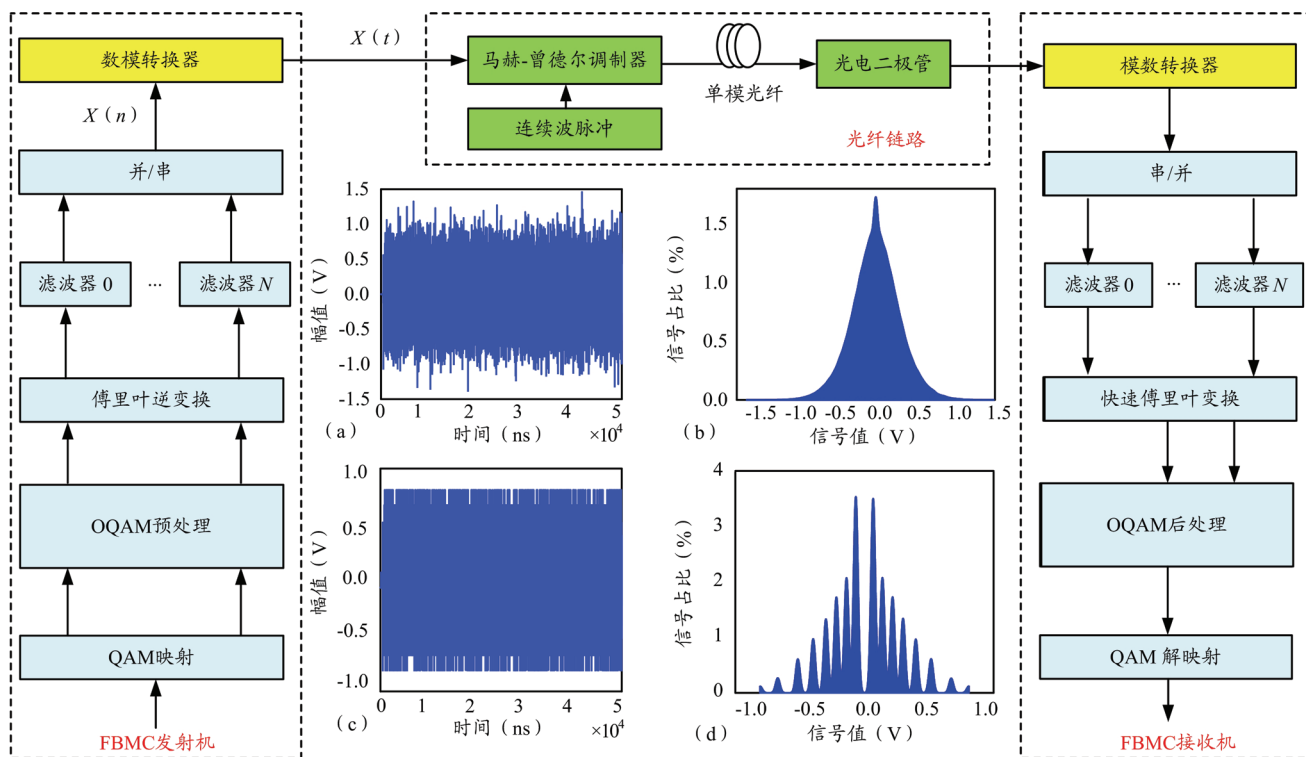


图 2 基于信号分布估计量化的 IMDD-FBMC 系统框图

中插图(a)和(b))可知,FBMC 信号由于滤波器组的作用,信号出现了尖顶。使用 4 位非均匀量化 DAC 产生信号的时域波形图和 PDF 图(图 2 中插图(c)和(d))。发射机产生信号经过由马赫-曾德尔调制器(MZM)将电信号转化成适合驱动光源的信号,连续波激光器(CW Laser)作驱动光源,单模光纤(SMF)、光电二极管(PIN)将光信号转换成电信号组成的光纤链路传输到接收机进行解调操作。在接收机中,ADC 模块将电信号转换成时域数字信号,串/并模块将数字信号重新分配到不同的子载波上,再经滤波器组和快速傅里叶变换(FFT)模块解调出子载波信号,最后经过 OQAM 后处理模块和 QAM 解映射模块解析出原始信号。

2.2 系统仿真参数设计

为了比较分析 IMDD-FBMC 系统在相同接收光功率情况下的性能,本文利用 Optisystem13 搭建了 10 Gb/s、16-QAM 的 IMDD-FBMC 系统(光纤传输距离为 20 km),仿真实现了系统使用 3~5 位基于信号分布量化 DAC 和 3~8 位均匀量化 DAC 的过程;同时,验证基于信号分布估计量化方案的可行性。Optisystem 参数如表 1 所示。

表 1 Optisystem 器件参数设置

配置	参数	配置	参数
采样率	10 GSa/s	序列长度	524288 bit
激光频率	192.1 THz	激光功率	4 dBm
激光线宽	100 MHz	光纤衰减	0.2 dB/km
光纤色散	16.25 ps/(nm·km)	正弦信号源 频率和相位	0.1 GHz, 90°
光纤长度	20 km	低通滤波器 截止频率	7.5×10^9 Hz

3 仿真实验结果及分析

3.1 IMDD-FBMC 系统发射信号的 SQNR 性能对比

不同量化比特位数的均匀量化方式和基于信号分布量化方式的 SQNR 曲线如图 3 所示。3~5 位量化比特位数的基于信号分布估计量化的 DAC 信号最佳 SQNR 分别为 13.5 dB、18.4 dB 和 24.6 dB,比相同位数下的均匀量化 DAC 产生信号的最佳 SQNR 分别高了约 1.97 dB、1.85 dB 和 2.75 dB。当 CR 值较小时,基于信号分布估计的量化方式可以被看作是一种伪均匀量化方式,2 种量化方式获得的 SQNR 性能大致相同;随着 CR 值的增加,SQNR 呈现先增加后减小的趋

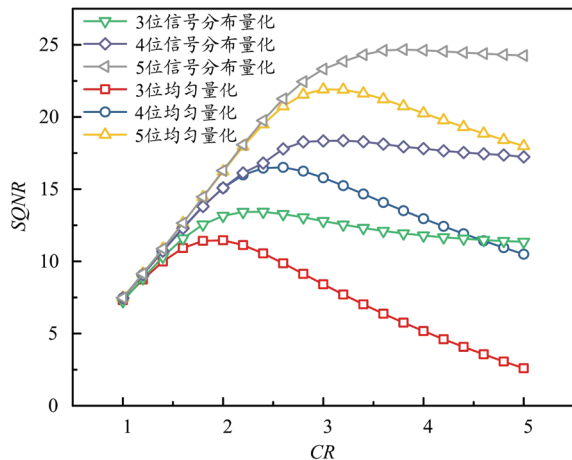


图 3 IMDD-FBMC 系统 SQNR 性能对比曲线图

势,当达到最佳 SQNR 点后,基于信号分布估计量化方式的 SQNR 下降速度远低于均匀量化方式。相比于均匀量化方式,使用基于信号分布估计量化方式可以使 IMDD-FBMC 系统发射信号的 SQNR 性能得到比较大的提升,且在较大的限幅范围内保持相对较高的量化性能水平。

3.2 IMDD-FBMC 系统在相同接收光功率下的性能对比

为了进一步验证基于信号分布的量化方式对系统性能的影响,本文分别给出了系统的 BER 和 EVM 曲线对比图,如图 4、图 5 所示。可以看出,无论量化比特位数为多少位,2 种量化方式的 BER 和 EVM 趋势都是先减小后增大。图 4 中,3~5 位基于信号分布量化的最佳 BER 分别为 4.4×10^{-3} 、 4.4×10^{-4} 和 4.8×10^{-5} ,与同等位数的均匀量化方式相比,最佳 BER 分别提高了 15.9、43.5 和 60.7 倍;同时,可以看到 6 位和 8 位均匀量化的 BER 分别为 2.1×10^{-4} 、 2.5×10^{-5} ,与 5 位基于信

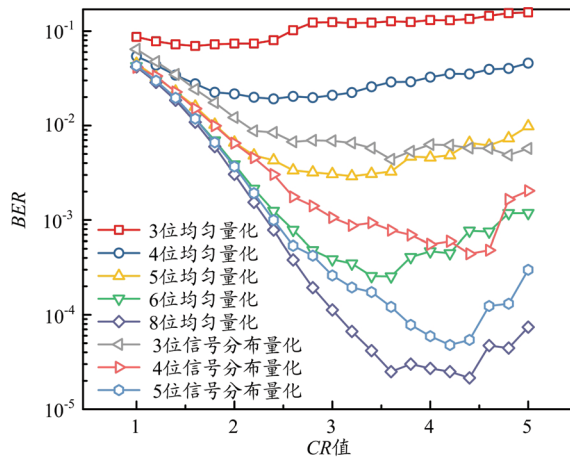


图 4 系统 BER 性能曲线对比图

林嘉芊,毕美华,杨珏,等:基于信号分布非均匀量化的 IMDD-FBMC 系统性能提升

号分布量化的 BER 相差不大。图 5 中,4 位均匀量化方式最优 EVM 稳定在 22.9% 左右,对比同等位数下的 2 种量化方式的星座图,基于信号分布量化的星座图 (EVM 等于 11%) 更加理想。3~5 位基于信号分布量化的最优 EVM 分别为 16%、11% 和 8.8% 左右,均符合性能要求,且当量化比特位数为 5 位时,基于信号分布估计量化的 EVM 性能与 8 位均匀量化的 EVM 相差不多 (由于 3 位均匀量化的 EVM 性能非常不理想,故没有在图中画出)。

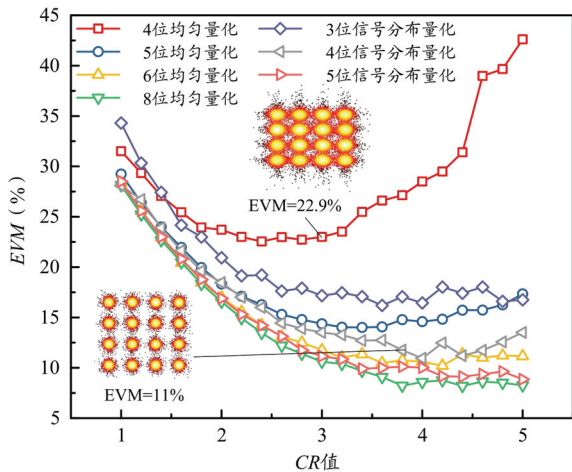


图 5 系统 EVM 性能曲线对比图

因此,在相同量化比特位数的情况下,基于信号分布的量化方式在 BER 和 EVM 性能方面都远好于均匀量化方式;且在相同系统性能的情况下,基于信号分布的量化方式可以比均匀量化方式减少 1~2 位量化比特位数。

4 结束语

本文提出了一种基于 IMDD-FBMC 信号分布的非均匀量化方案,通过对 IMDD-FBMC 系统的仿真结果对比可知,相较于均匀量化方式,基于信号分布估计的量化方案在低量化比特位数时对系统性能有着

极大的提升。在保证系统性能的情况下,该方案可以减小 1~2 位量化比特位数,降低系统成本;同时,该方案受 CR 值的影响较小,能在较大 CR 值范围内保持最佳系统性能,充分证明了该方案的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] WUNDER G, JUNG P, KASPARICK M, et al. 5G NOW: Non-Orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 97-105.
- [2] ZHENG Z, WANG D, ZHU X, et al. Orthogonal-band-multiplexed offset-QAM optical superchannel generation and coherent detection [J]. Scientific Reports, 2015(5): 17891-1-17891-10.
- [3] VAIDYANATHAN P P. Multirate Systems and Filter Banks [M]. Chennai: Pearson Education India, 1993.
- [4] YU Y, TOWNSEND P D, ZHAO Jian. Equalization of dispersion-induced crosstalk in optical offset-QAM OFDM systems [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 7(28): 782-785.
- [5] OH Y, MURMANN B. System embedded ADC calibration for OFDM receivers [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(8): 1693-1703.
- [6] JIANG T, NI C, YE C, et al. A Novel Multi-Block Tone Reservation Scheme for PAPR Reduction in OQAM-OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(4): 717-722.
- [7] UDAYAKUMAR E, VETRIVELAN P. PAPR reduction for OQAM/OFDM signals using Optimized Iterative Clipping and Filtering technique [C]// International Conference on Soft-computing & Networks Security, Feb. 25-27, 2015. Coimbatore, India. New York: IEEE, 2015: 1-6.
- [8] TIPÁN M N, CÁCERES J, JIMÉNEZ M N, et al. Comparison of clipping techniques for PAPR reduction in UFMFC systems [C]// 2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), Nov. 8-10, 2017, Guatemala City, Guatemala. New York: IEEE, 2015: 1-4.
- [9] PENG J, HAN L, ZHU Q, et al. SQNR Improvement Enabled by Nonuniform DAC Output Levels for IM-DD OFDM Systems [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-11.
- [10] 俞嘉生, 毕美华, 卓先好, 等. 基于非均匀量化 ADC/DAC 的 IMDD-UMFC 系统性能提升[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 7-12.

《光通信技术》首届年度优秀论文评选活动公告

尊敬的各位作者和读者:

为了活跃光通信学术氛围,提高光通信科技水平,提升《光通信技术》杂志所刊登光通信技术文章的科技含量和实用性,《光通信技术》编辑部决定从 2019 年起,每年举办一次《光通信技术》优秀论文评选活动,评选出本年度 6~10 篇已正式刊登(纸质版)的优秀论文,对获优秀论文奖的第一署名作者颁发荣誉证书和现金奖励(500 元/篇),获奖名单将在 2019 年第 12 期《光通信技术》杂志和网站公布。敬请广大作者积极支持我们的工作,踊跃佳作,与我们共同携手把《光通信技术》办得更好。

《光通信技术》编辑部