

一种基于时域处理的低复杂度 HACO-OFDM 系统

王涛,陈善继,贾国庆,吴国庆,陈超

(青海民族大学 物理与电子信息工程学院,西宁 810007)

摘要:针对计算复杂度高和误码率(BER)受限幅噪声估计精度影响的问题,提出一种低复杂度的混合非对称限幅光正交频分复用(HACO-OFDM)系统及基于时域处理的接收解调方法,详细介绍了 HACO-OFDM 系统的组成及其时域信号的结构特点,通过简单的时域信号处理实现限幅噪声消除。实验结果表明:该方案显著降低了计算复杂度;当限幅噪声估计误差较大时,系统接收机的脉冲幅度调制的离散多音频(PAM-DMT)支路 BER 性能显著优于传统系统接收机。

关键词:非对称限幅光正交频分复用;脉冲幅度调制离散多音频;混合非对称限幅光正交频分复用;计算复杂度

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)01-0028-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Low complexity HACO-OFDM system based on time-domain processing

WANG Tao, CHEN Shanji, JIA Guoqing, WU Guoqing, CHEN Chao

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China)

Abstract: Aiming at the problems of high computational complexity and the influence of bit error ratio (BER) limited amplitude noise estimation accuracy, a low complexity hybrid asymmetric limited amplitude optical orthogonal frequency division multiplexing (HACO-OFDM) system and a receiving demodulation method based on time domain processing are proposed. The composition of HACO-OFDM system and the structure characteristics of time domain signal are introduced in detail. The limited amplitude noise is eliminated by simple time-domain signal processing. The experimental results show that the proposed scheme significantly reduces the computational complexity, and the BER performance of pulse-amplitude-modulated discrete multitone (PAM-DMT) branch of system receiver is significantly better than that of traditional system receiver when the estimation error of clipping noise is large.

Key words: asymmetrically clipped optical-orthogonal frequency division multiplexing; pulse amplitude modulated-discrete multitone; hybrid asymmetrically clipped optical-orthogonal frequency division multiplexing; computational complexity

0 引言

近年来,光无线通信(OWC)受到越来越多的关注,由于它具有频谱丰富且不受许可限制、支持高速率、功耗低和安全性高等独特的优点,被认为是室内射频接入技术的有力互补^[1]。同时,在高速率点对点

收稿日期:2020-07-04。

基金项目:青海民族大学新一代无线通信关键技术研究及原型开发科研创新团队资助。

作者简介:王涛(1976—),男,河南武陟人,博士,副教授,主要研究方向是可见光通信调制解调技术和移动通信关键技术,主持完成了教育部“春晖计划”项目2项,参与完成了青海省科技厅项目“高原环境自动监测点远程无线控制及数据传输研究”和“非对称干扰异构网络多维联合干扰对齐研究”。



OWC 系统中,正交频分复用(OFDM)调制解调技术得到广泛应用^[2-6]。主要的光 OFDM(O-OFDM)方案有直流偏置光 OFDM(DCO-OFDM)、非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)和脉冲幅度调制的离散多音频(PAM-DMT)。DCO-OFDM 方案的频谱效率较高,但需要添加不携带任何信息的直流偏置,所以功率效率较低^[7];ACO-OFDM 方案只有奇数子载波被用于调制^[8],所以频谱效率较低;PAM-DMT 方案仅调制每个子载波的虚部^[9],所以频谱效率也较低。为提高频谱效率,文献[10]提出了混合非对称限幅光学 OFDM(HACO-OFDM)方案,虽然提高了频谱效率,但是基于频域处理的噪声估计过程的计算复杂度较高,同时 PAM-DMT 支路上的误码率(BER)性能受限幅噪声估计精度

的影响较大。

本文提出一种低复杂度的 HACO-OFDM 系统,利用系统中时域信号的结构特点和简单的时域处理消除 ACO-OFDM 支路产生的限幅噪声,以降低系统的计算复杂度,提高误码性能。

1 低复杂度的 HACO-OFDM 系统

基于频域处理的传统 HACO-OFDM 系统需要较多的逆快速傅里叶变换/快速傅里叶变换(IFFT/FFT)模块,噪声估计和消除过程导致 PAM-DMT 支路上的 BER 性能受到幅度截断噪声估计准确性的影响。本文提出的低复杂度的 HACO-OFDM 系统分别从发射机和接收机 2 个方面进行改进,减少了 FFT/IFFT 模块的计算量,基于时域处理的方法避免了噪声估计和消除过程,以提高误码性能。

1.1 发射机

由于 PAM-DMT 支路只占用了偶数子载波的虚部,所以满足稀疏 IFFT。根据稀疏 IFFT 算法^[1],PAM-DMT 支路可以采用 $N/2$ 点 IFFT。HACO-OFDM 系统发射机的框图如图 1 所示,与传统系统发射机不同的是,该接收机的 PAM-DMT 支路采用了 $N/2$ 点 IFFT,输出的 $N/2$ 个双极性实值信号再重复一次得到 N 个 PAM-DMT 支路时域信号,这样减少了计算量,从而降低复杂度。

1.2 接收机

基于时域处理的 HACO-OFDM 系统接收机框图如图 2 所示。该接收机不需要估计 ACO-OFDM 支路的限幅噪声,将恢复的离散时间信号 r_n 分为两部分: $r_{1,n}$ 和

$r_{2,n}$ 。 $r_{1,n}$ 是 r_n 的前半部分; $r_{2,n}$ 是 r_n 的后半部分,分别表示为:

$$\begin{cases} r_{1,n} = \lfloor (x_{ACO,n})_{\text{half}} \rfloor_c + \lfloor (y_{PAM,n})_{\text{half}} \rfloor_c + w_{1,n}, 0 \leq n \leq N/2-1 \\ r_{2,n} = \lfloor -(x_{ACO,n})_{\text{half}} \rfloor_c + \lfloor (y_{PAM,n})_{\text{half}} \rfloor_c + w_{2,n}, 0 \leq n \leq N/2-1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_{ACO} 是发射机中 ACO-OFDM 支路 IFFT 模块输出的具有反对称性的实数信号; $(x_{ACO,n})_{\text{half}}$ 表示 x_{ACO} 的 $N/2$ 个样本值; y_{PAM} 是 PAM-DMT 支路 IFFT 模块输出的具有周期性的实数信号; $(y_{PAM,n})_{\text{half}}$ 表示 y_{PAM} 的 $N/2$ 个样本值; $\lfloor \cdot \rfloor_c$ 表示幅度截断操; w_n 表示加性白高斯噪声 $w(t)$ 的离散时间样本, $w_{1,n}$ 为 w_n 的前半部分, $w_{2,n}$ 为 w_n 的后半部分。将 $r_{2,n}$ 从 $r_{1,n}$ 中减去,可以得到 ACO-OFDM 时域信号 $r_{3,n}$:

$$\begin{aligned} r_{3,n} &= r_{1,n} - r_{2,n} = \\ & \lfloor (x_{ACO,n})_{\text{half}} \rfloor_c + \lfloor (y_{PAM,n})_{\text{half}} \rfloor_c + w_{1,n} - \\ & \lfloor -(x_{ACO,n})_{\text{half}} \rfloor_c - \lfloor (y_{PAM,n})_{\text{half}} \rfloor_c - w_{2,n} = \\ & (x_{ACO,n})_{\text{half}} + w_{3,n}, 0 \leq n \leq N/2-1 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $w_{3,n} = w_{1,n} - w_{2,n}$,表示经过式(2)处理后的残留的噪声。信号 $r_{3,n}$ 与 ACO-OFDM 时域信号的前半部分完全相同,包含了全部信息,对 $r_{3,n}$ 进行 N 点 FFT 运算可以恢复奇数子载波上的 M-QAM 符号。将 $r_{1,n}$ 与 $r_{2,n}$ 相加,可得 $r_{4,n}$:

$$\begin{aligned} r_{4,n} &= r_{1,n} + r_{2,n} = \\ & \lfloor (x_{ACO,n})_{\text{half}} \rfloor_c + \lfloor (y_{PAM,n})_{\text{half}} \rfloor_c + w_{1,n} + \\ & \lfloor -(x_{ACO,n})_{\text{half}} \rfloor_c + \lfloor (y_{PAM,n})_{\text{half}} \rfloor_c + w_{2,n} = \\ & \lfloor (x_{ACO,n})_{\text{half}} \rfloor_c + 2 \lfloor (y_{PAM,n})_{\text{half}} \rfloor_c + w_{4,n}, 0 \leq n \leq N/2-1 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $w_{4,n} = w_{1,n} + w_{2,n}$,表示经过式(3)处理后残留的噪声。对 $r_{3,n}$ 取绝对值,可得:

$$\begin{aligned} |r_{3,n}| &= |(x_{ACO,n})_{\text{half}} + w_{3,n}| = \\ & |(x_{ACO,n})_{\text{half}}| + w_{5,n}, 0 \leq n \leq N/2-1 \end{aligned} \quad (4)$$

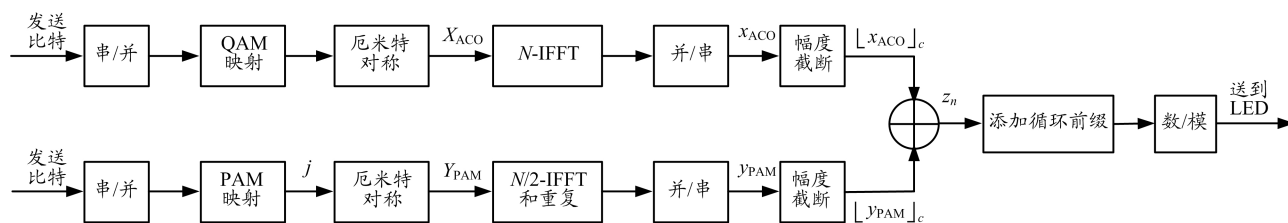


图 1 HACO-OFDM 系统发射机的框图

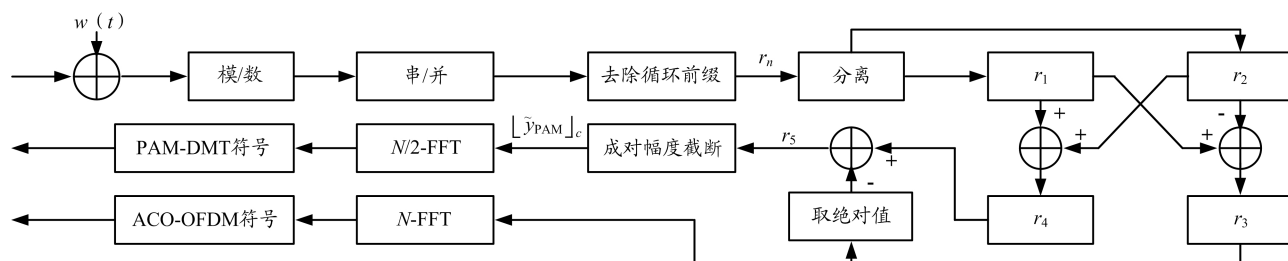


图 2 HACO-OFDM 系统接收机的框图

其中, $w_{5,n}$ 表示残留的噪声。将 $|r_{3,n}|$ 从 $r_{4,n}$ 中减去, 可得时域信号 $r_{5,n}$:

$$\begin{aligned} r_{5,n} = & r_{4,n} - |r_{3,n}| = \\ & |(x_{\text{ACO},n})_{\text{half}}| + 2|(y_{\text{PAM},n})_{\text{half}}|_c + w_{4,n} - \\ & |(x_{\text{ACO},n})_{\text{half}}| - w_{5,n} = 2|(y_{\text{PAM},n})_{\text{half}}|_c + w_{6,n}, \\ & 0 \leq n \leq N/2-1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $w_{6,n} = w_{4,n} - w_{5,n}$, 表示经过式(5)处理后残留的噪声。从式(3)~式(5)可以看出, 在恢复 PAM-DMT 频域信号之前, ACO-OFDM 支路产生的限幅噪声通过简单的时域处理已完全消除, PAM-DMT 支路的性能不再受 ACO-OFDM 支路性能的影响, 但是信道噪声略微增加。利用文献[10]的反对称性, 成对幅度截断可以剔除 $r_{5,n}$ 中的部分信道噪声, 获得估计精度更高的幅度截断的 PAM-DMT 时域信号:

$$[\hat{y}_{\text{PAM},n}]_c = \begin{cases} r_{5,n}, & \text{若 } r_{5,n} > r_{5,N/2-n}, 1 \leq n \leq N/2-1 \text{ 且 } n \neq N/4 \\ 0, & \text{若 } r_{5,n} < r_{5,N/2-n}, 1 \leq n \leq N/2-1 \text{ 且 } n \neq N/4 \end{cases} \quad (6)$$

$[\hat{y}_{\text{PAM},0}]_c$ 和 $[\hat{y}_{\text{PAM},N/4}]_c$ 设置为 0, 以进一步降低噪声。根据文献[10]的反对称性, 成对幅度截断后的信号没有信息丢失, 对它进行 $N/2$ 点 FFT 可以获得频域 PAM-DMT 信号, 其虚部是 M-PAM 符号。本文提出系统的接收机只需要一个 N 点实数值 FFT 模块和一个 $N/2$ 点实数值 FFT 模块, 大大降低了接收机的复杂度。

2 计算复杂度比较

在 HACO-OFDM 系统中, 传统发射机需要 1 个处理复数信号的 N 点 IFFT 模块, 1 个处理虚数信号的 N 点 IFFT 模块; 传统接收机需要 2 个处理实数信号的 N 点 FFT 模块, 1 个处理复数信号的 N 点 IFFT 模块。1 个处理实数(或虚数)信号的 N 点 IFFT 操作可以用 1 个处理复数信号的 $N/2$ 点 IFFT 操作实现^[12], 因此传统 HACO-OFDM 系统总的计算复杂度为:

$$\begin{aligned} C_{\text{C-HACO}} = & O(N \log_2(N)) + O(N/2 \log_2(N)) + \\ & O(N \log_2(N)) + 2O(N/2 \log_2(N)) \approx \\ & 3.5O(N \log_2(N)) \end{aligned} \quad (7)$$

在本文提出的 HACO-OFDM 系统中, 发射机需要 1 个处理复数信号的 N 点 IFFT 模块, 1 个处理虚数信号的 $N/2$ 点 IFFT 模块; 接收机需要 1 个处理实数信号的 N 点 FFT 模块, 1 个处理实数信号的 $N/2$ 点 IFFT 模块。因此, HACO-OFDM 系统总的计算复杂度为:

$$\begin{aligned} C_{\text{P-HACO}} = & O(N \log_2(N)) + O(N/4 \log_2(N)) + \\ & O(N/2 \log_2(N)) + O(N/4 \log_2(N)) \approx \\ & 2O(N \log_2(N)) \end{aligned} \quad (8)$$

对比式(7)和式(8)可以看出, 本文所提方案的计算复杂度更低。

3 实验与仿真结果

为了与文献[10]中的传统系统接收机进行性能对比, 在加性高斯白噪声(AWGN)信道条件下, 本文分别在 ACO-OFDM 支路和 PAM-DMT 支路上仿真比较了 2 种系统接收机的 BER。仿真中, IFFT/FFT 的尺寸设置为 512; 2 条支路分配到的功率相等; 联合调制符号映射的 3 个方案分别为 16QAM-4PAM、64QAM-4PAM 和 64QAM-8PAM。

3.1 ACO-OFDM 支路的 BER 性能对比

2 种接收机的 ACO-OFDM 支路的 BER 曲线对比如图 3 所示。可以看出, 采用 3 种不同的联合调制符号映射方案时, 本文提出系统接收机的 BER 曲线与传统系统接收机的 BER 曲线完全重合, 并且联合调制符号映射方案采用 64QAM-4PAM 和 64QAM-8PAM 时, 2 种接收机的 BER 曲线也都重合。这是由于 2 种接收机中的 ACO-OFDM 信号都不受限幅噪声的影响, ACO-OFDM 信号误码率主要受 QAM 星座尺寸和信道噪声的影响, 与采用的 PAM 星座尺寸无关。因此, 当 QAM 星座尺寸相同时, 2 种系统接收机的 ACO-OFDM 支路误码率也是相同的。

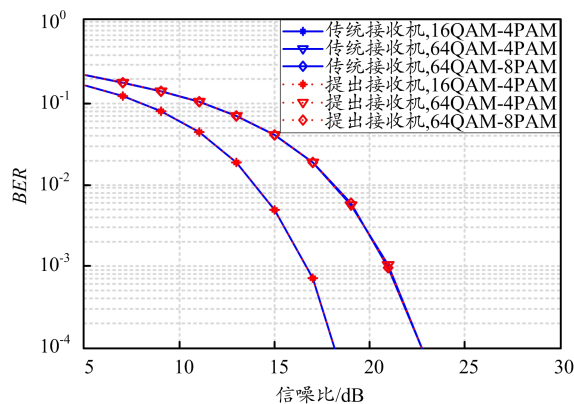


图 3 2 种系统接收机的 ACO-OFDM 支路的 BER 性能比较

3.2 PAM-DMT 支路的 BER 性能对比

2 种系统接收机的 PAM-DMT 支路的 BER 曲线如图 4 所示。可以看出, 采用给定的 3 种联合调制符号映射方案时, 本文提出系统的接收机的 BER 性能显著优于传统系统接收机的 BER 性能, 随着信噪比增大, 2 种系统接收机的 PAM-DMT 支路 BER 性能差距逐渐减小。此外, 通过从图 4 中对比 16QAM-4PAM 和 64QAM-4PAM 这 2 个方案可知, 当 PAM 星座尺寸固

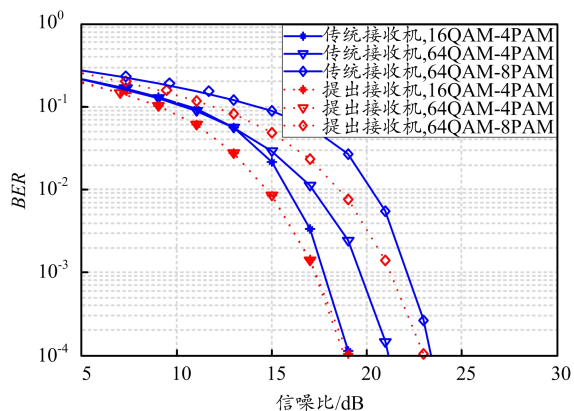


图4 2种系统接收机的PAM-DMT支路的BER性能比较

定为4时,传统系统接收机的PAM-DMT支路BER性能随着QAM星座尺寸的增大而恶化;而本文提出系统接收机的PAM-DMT支路BER性能不受QAM星座尺寸的影响,2种情况下的BER曲线重合,在BER性能方面表现出良好的稳定性。产生上述现象的原因是:传统系统接收机中,ACO-OFDM支路的限幅噪声的估计精度会影响PAM-DMT支路的BER性能。在信噪比较小或QAM星座尺寸较大时,传统系统接收机中ACO-OFDM符号的估计误差将增加,导致不准确的限幅噪声估计,所以会显著降低PAM-DMT支路的BER性能。然而,在本文提出系统的接收机中,由于不需要进行限幅噪声估计,所以PAM-DMT支路BER性能与ACO-OFDM支路BER性能是彼此独立的,PAM-DMT支路BER性能不随QAM星座尺寸变化,只与信噪比大小和PAM星座尺寸有关,表现出更稳定的BER性能。随着信噪比的增大,传统系统的接收机中QAM符号的误码迅速减少,QAM星座尺寸对PAM-DMT支路BER性能的影响越来越小,所以2种系统接收机的BER性能差距减小。

4 结束语

本文针对高复杂度的HACO-OFDM系统存在的问题提出了一种基于时域处理的低复杂度HACO-OFDM系统。该系统利用HACO-OFDM时域信号的独特结构,通过简单的时域处理完成接收解调,减少了FFT/IFFT模块,显著降低了系统的计算复杂度。同时,这种时域处理避免了限幅噪声对PAM-DMT支路误码性能的影响,改善了系统的误码性能。仿真结果表

明:当传统接收机中限幅噪声估计误差较大时,本文提出系统接收机的PAM-DMT支路BER性能优于传统系统的接收机,在QAM星座尺寸固定时,PAM-DMT支路的BER性能不随QAM星座尺寸变化,具有很好的稳定性;随着信噪比增大,传统接收机中限幅噪声估计越来越准确,2种系统接收机的PAM-DMT支路性能差距逐渐减小。

参考文献:

- [1] JOVICIC A, LI J, RICHARDSON T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 26–32.
- [2] KHALID A M, COSSU G, CORSINI R, et al. 1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1465–1473.
- [3] COSSU G, KHALID A M, CHOUDHURY P, et al. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED [J]. Optics express, 2012, 20(26): B501–B506.
- [4] COSSU G, WAJAHAT A, CORSINI R, et al. 5.6 Gbit/s downlink and 1.5 Gbit/s uplink optical wireless transmission at indoor distances (≥ 1.5 m) [C]//Proceedings of 2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC), September 21–25, 2014, Cannes, France. Piscataway: IEEE, 2014: 1–3.
- [5] TSONEV D, CHUN H, RAJBHANDARI S, et al. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(7): 637–640.
- [6] 宋小庆,王慕煜,邢松,等. 可见光通信OFDM系统PAPR抑制技术研究进展[J]. 光通信技术, 2019, 43(12): 1–6.
- [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] 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.
- [10] RANJHA B, KAVEHRAD M. Hybrid asymmetrically clipped OFDM-based IM/DD optical wireless system[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(4): 387–396.
- [11] HASSANIEH H, INDYK P, KATABI D, et al. Nearly optimal sparse fourier transform [C]//Proceedings of the Forty-Fourth Annual ACM Symposium on Theory of Computing, May 20–22, 2012, New York, USA. New York: ACM, 2012: 563–578.
- [12] ISLIM M S, HAAS H. Augmenting the spectral efficiency of enhanced PAM-DMT based optical wireless communications [J]. Optics express, 2016, 24(11): 11932–11949.