

引用本文: 陆超峰, 李建华, 汪井源, 等. 基于离散哈特莱变换的 LACO-OFDM 低复杂度接收方法研究[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 48-52.

基于离散哈特莱变换的 LACO-OFDM 低复杂度接收方法研究

陆超峰, 李建华, 汪井源, 赵继勇, 戚艾林, 徐智勇*

(中国人民解放军陆军工程大学, 南京 210007)

摘要: 在分层非对称限幅光正交频分复用(LACO-OFDM)中, 采用离散哈特莱变换(DHT)可以弥补采用快速傅里叶变换(FFT)时存在的频谱效率不高的缺陷, 但在接收端多层信号的分离仍存在计算复杂度高的问题。结合 DHT-LACO-OFDM 信号的时域对称和反对称特性, 提出一种基于时域重构的分层信号接收方法, 在时域把叠加的信号进行分层接收。研究表明, 相比于传统的时频域结合的迭代接收方式, 基于时域重构的分层信号接收方法在误比特性能上与传统的迭代接收方式几乎相同, 但计算复杂度约降低为原来的一半。

关键词: 正交频分复用; 离散哈特莱变换; 分层非对称限幅光正交频分复用; 时域重构; 计算复杂度; 误码性能

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)02-0048-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of LACO-OFDM low-complexity reception method based on discrete Hartley transform

LU Chaofeng, LI Jianhua, WANG Jingyuan, ZHAO Jiyong, QI Ailin, XU Zhiyong*

(Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: In the layered asymmetric clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (LACO-OFDM), the use of discrete Hartley transform(DHT) can makes up for the low spectral efficiency of fast Fourier transform (FFT), but there is still a problem of high computational complexity in the separation of multi-layer signals at the receiving end. Combined with the time-domain symmetry and anti-symmetry characteristics of the DHT-LACO-OFDM signal, a layered signal receiving method based on time domain reconstruction is proposed, in which the superimposed signal is received layered in the time domain. The results of the study show that, compared with the traditional iterative receiving method combining time-frequency domain, the layered signal receiving method based on time-domain reconstruction has almost the same bit error performance as the traditional iterative receiving method, but the computational complexity is reduced by half.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing, discrete Hartley transform, layered asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing, time domain reconstruction, computational complexity, bit error performance

0 引言

目前,随着无线频谱资源的日益稀缺、发光二极管(LED)产业的飞速发展,基于LED的无线光通信受到了研究人员的关注^[1]。可见光通信是照明和通信相结合的一种无线光通信方式,相比于传统的无线射频

通信,其具有频谱资源充裕、保密性好、无电磁污染和应用场景广泛(如应用于对电磁干扰敏感的环境^[2])等优点,而且对人体健康几乎没有危害。可见光通信被认为是无线射频通信的一种有效补充技术,和无线射频通信之间相互独立、不存在干扰。

正交频分复用(OFDM)技术具有频谱利用率高、有效对抗多径干扰等优点,是一种在可见光通信中应用广泛的多载波调制技术^[3]。在可见光通信系统中,强度调制/直接检测(IM/DD)技术以其复杂度低、实现简单等优势,成为无线光通信中的重要技术之一^[4]。传统的OFDM信号为双极性的复数信号,而基于IM/DD技术的无线光通信系统只能传输非负实数信号。为获得实数信号,徐宪莹等人^[5]提出了一种Hermitian共轭的

收稿日期: 2022-07-04。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62171463)资助。

作者简介: 陆超峰(1997—),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,现就读于陆军工程大学通信工程学院电子信息专业,主要从事无线光通信方向的研究工作,主要负责的内容是可见光通信以及可见光通信中的多载波调制技术研究等。

*通信作者: 徐智勇(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为无线光通信



方式,该方法在快速傅里叶变换(FFT)前,对子载波设置共轭对称,但其中只有一半的子载波可用于调制,另一半子载波被浪费。为此,MOREOLO M S 等人^[6]提出基于离散哈特莱变换(DHT)替换 FFT 的实数信号获取方法,各路子载波得到充分利用。

针对如何产生非负信号这一问题,研究人员提出各种可以应用于可见光通信的 OFDM 方法,具有代表性的有直流偏置光 OFDM(DCO-OFDM)^[7]、非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)^[8]。在 DCO-OFDM 方案中,需要引入一个额外的直流偏置把信号的负值提到正值,以此满足信号的非负性,但该方案添加了额外的直流偏置,功率效率较低。ACO-OFDM 方法虽然不需要额外添加直流偏置,但只有奇数子载波携带信息,完成调制后的 ACO-OFDM 时域信号需进行零值限幅,产生的限幅噪声落在偶数子载波上,不影响原奇数子载波上的有效数据信息。因此,该方法具有较高的功率效率,在可见光通信中应用较为广泛,但其只调制一半子载波,子载波利用率较低。为提升 ACO-OFDM 的子载波利用率,研究人员提出许多不同的基于 ACO-OFDM 的方法^[9-13]。其中,分层非对称限幅光 OFDM(LACO-OFDM)方法^[12-13]在时域叠加多个 ACO-OFDM 信号,具有较高的功率效率和频谱效率。但在 LACO-OFDM 方法中,由于 Hermitian 共轭对称的限制,一半子载波不携带有效数据。因此,研究人员把 DHT 应用于 LACO-OFDM^[14-15]中替代 FFT,取消了需要 Hermitian 共轭来产生实信号的限制,子载波数得到充分利用。

但是,采用 DHT 的 LACO-OFDM (DHT-LACO-OFDM)方法在接收端仍需要多级的时频域转换迭代方法来对多层信号进行分离。相较于 ACO-OFDM 方法,多层迭代的接收机的复杂度大幅增高,在实际的应用过程中存在着较大的难度。为提高计算速度、降低接收端的计算量,本文根据 DHT-LACO-OFDM 时域信号的特点,提出一种基于时域重构的分层信号接收方法,在时域中把多层的 DHT-LACO-OFDM 信号进行分离。

1 方法介绍

1.1 DHT 原理

DHT 是实数域的三角变换^[16],无需 Hermitian 共轭,可充分利用子载波。此外,DHT 和逆离散哈特莱变换(IDHT)的变换核是一致的,系统的发送端和接收端可采用同一模块进行调制和解调,降低了硬件实现的

复杂度,且无虚数部分的计算,提高了运算的速度。

DHT 和 IDHT 的定义式^[14]分别如下:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}(2\pi kn/N) \quad (1)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \text{cas}(2\pi kn/N) \quad (2)$$

其中, $k=0,1,\dots,N-1, n=0,1,\dots,N-1, X(k)$ 是由 $x(n)$ 进行 DHT 后得到的频域信号, $x(n)$ 是由 $X(k)$ 进行 IDHT 后得到的时域信号, N 为离散哈特莱变换点数, $\text{cas}(2\pi kn/N)$ 是 DHT 的核函数,并且满足正交条件,其表达式如下:

$$\text{cas}(2\pi kn/N) = \sin(2\pi kn/N) + \cos(2\pi kn/N) \quad (3)$$

1.2 DHT-ACO-OFDM 方法

与基于 FFT 的 ACO-OFDM 方法相同,DHT-ACO-OFDM 方法同样采用奇数子载波进行有效数据的分配,其表达式为

$$X(k) = [0, X(1), 0, X(3), \dots, 0, X(N-3), 0, X(N-1)] \quad (4)$$

其中, $X(k)$ 仅调制到奇数子载波上,再通过 IDHT 后得到的时域信号 $x(n)$ 具有时域的反对称性,其表达式为

$$x(n) = x(n+N/2), n=0,1,2,\dots,N/2-1 \quad (5)$$

因此, $x(n)$ 可通过零值限幅来满足 IM/DD 系统中对于非负信号的要求,限幅表达式为

$$\lfloor x(n) \rfloor = \begin{cases} x(n), & x(n) \geq 0 \\ 0, & x(n) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示剪切操作,且进行零值限幅后时域信号 $\lfloor x(n) \rfloor$ 不会丢失任何信息。因此,在接收端可以直接从奇数子载波中检索出有效信息。

1.3 DHT-LACO-OFDM 方法

为提升 DHT-ACO-OFDM 的频谱效率,DHT-LACO-OFDM 方法被提出^[14]。该方法采用多层 DHT-ACO-OFDM 信号叠加并行传输,且在接收端进行逐层解调。在 DHT-LACO-OFDM 系统发送端,由于没有 Hermitian 共轭的限制,子载波得到充分利用。DHT-LACO-OFDM 系统的子载波分配方法如图 1 所示,其中箭头代表削波噪声的叠加。

在第 l 层中,有效数据子载波为第 $2^{l-1}(2k+1)$ ($k=0,1,2,\dots,N/2-1$) 路子载波,第 l 层的削波噪声则落在将要调制第 $l+1$ 层 DHT-LACO-OFDM 信号的偶数子载波上。通过 l 层 DHT-LACO-OFDM 信号的叠加,使得偶数路子载波被充分利用,显著提升了系统的频谱效率。

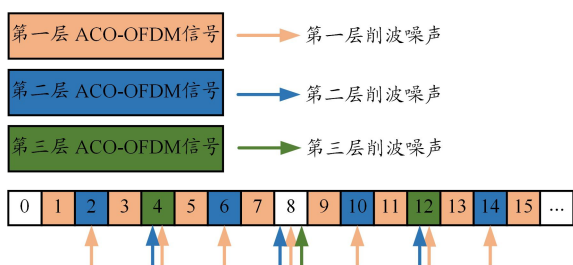


图1 DHT-LACO-OFDM 子载波分配方法

l 层的 DHT-LACO-OFDM 信号进行子载波分配后的 OFDM 调制发送端原理框图如图 2 所示。其中, LACO-OFDM 信号的层数为 l 。对于第 l 层 DHT-LACO-OFDM 信号, 输入的二进制比特流先经过 M -PAM 映射后得到频域信号 $S^l(n)$, 再通过不同层的划分调制到不同的子载波上, 经过 IDHT 把频域信号 $S^l(n)$ 转换为时域信号 $x^l(n)$, 最后加上并/串(P/S)转换、零值限幅等步骤, 叠加各层的时域信号并发送, 发送的信号为 $x(n)_c$ 。

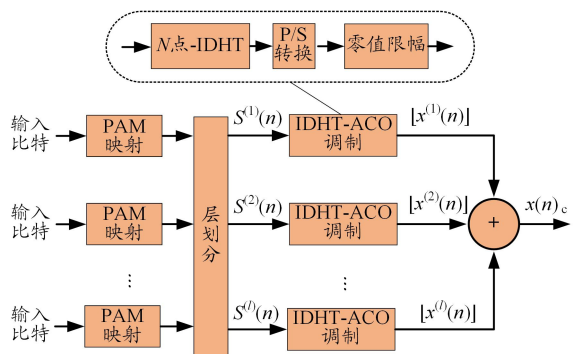


图2 DHT-LACO-OFDM 系统发送端原理图

2 DHT-LACO-OFDM 信号的接收方法研究

光信号经过传播后, 在接收端被 PD 检测器检测到, 并转换为电信号。在接收端, 散粒噪声和热噪声通常被建模为加性高斯白噪声(AWGN)^[16-17], 通常接收信号表示为

$$r(n) = \eta h(t) \otimes x(n)_c + n(t) \quad (7)$$

其中, η 是光电转换效率, $h(t)$ 是信道的频率响应, $n(t)$ 是建模为 AWGN 的热噪声和背景光噪声。

2.1 传统迭代接收方法

在传统迭代接收方法中, 高层的削波噪声不会影响底层的信号, 因此第一层的时域信号 $y^{(1)}(n)$ 可以直接从接收信号 $r(n)$ 中检索并提取出来, 然后通过 N 点 DHT 后转换为频域信号 $Y^{(1)}(n)$ 进行解调。由于高层的 ACO-OFDM 信号叠加在低层的削波噪声上, 传统的 DHT-LACO-OFDM 接收机采用时频域结合的迭代接

收, 因此, 高层信号的恢复需要先在频域检索出底层信号的有效数据部分 $Y^{(1)}(n)$, 并进行 N 点 IDHT 后估计出第一层 $y^{(1)}(n)$ 的时域信号, 再从 $y^{(1)}(n)$ 中减去 $y^{(1)}(n)$ 进行第二层的解调。更高层信号的解调以此类推, 具体流程如图 3 所示。相比于传统的 ACO-OFDM 系统接收机的接收方法, 虽然传统迭代接收方法可以完成信号的分离, 但会增高接收机的复杂度。

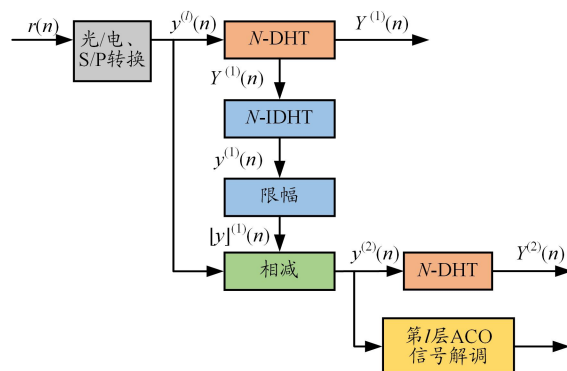
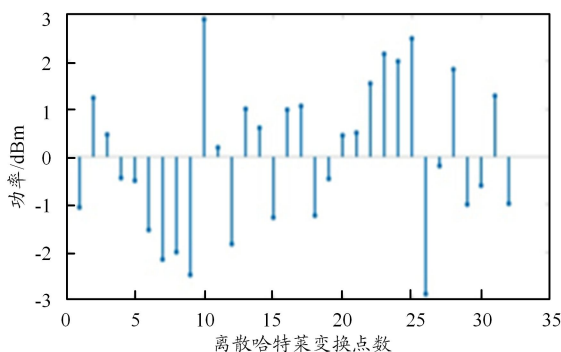


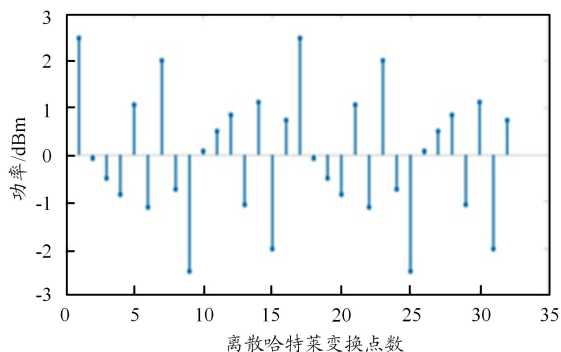
图3 传统迭代接收方法流程转换

2.2 基于时域重构的分层信号接收方法

对于多层叠加的 DHT-LACO-OFDM 接收信号, 其时域信号也满足半波对称性。基于 32 点 DHT 削波前的第一层 DHT-LACO-OFDM 信号和削波前的第二层 DHT-LACO-OFDM 信号分别如图 4 所示。可以看



(a) 第一层时域信号



(b) 第二层时域信号

图4 第一、二层时域信号

出, 第一层的 DHT-LACO-OFDM 时域信号在时域内具有半波反对称性, 第二层的 DHT-LACO-OFDM 时域信号的前 $N/2$ 部分和后 $N/2$ 部分具有对称性, 满足:

$$x^{(2)}(n) = x^{(2)}(n + N/2), n = 0, 1, \dots, N/2^l - 1 \quad (8)$$

同时, 前 $N/4$ 和 $n + N/4$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N/4 - 1$) 处满足半波反对称性。通过推导, 第 l 层的 DHT-LACO-OFDM 时域信号在前 $N/2^{l-1}$ 和 $n + N/2^{l-1}$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N/2^{l-1} - 1$) 处满足半波对称性, 并且重复 $2^{l-1} - 1$ 次。在前 $N/2^l$ 处与 $n + N/2^l$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N/2^l - 1$) 处满足半波反对称性, 并且重复 $2^l - 1$ 次。

针对传统接收方法复杂度高的问题, 基于 DHT-LACO-OFDM 时域信号的特点, 本文在接收端采用时域分离的方法降低 DHT-LACO-OFDM 系统接收机的复杂度。基于时域重构的分层信号接收方法如图 5 所示。可以看出, 不同于传统的时频域结合的迭代接收方式, 该方法在时域完成信号的迭代接收, 接收到的信号 $r(n)$ 经过光/电转换和 S/P 转换后, 第一层的 DHT-LACO-OFDM 信号进行 DHT 后得到 $Y^{(1)}(n)$, 可以直接进行检索并解调。高层的信号则通过 DHT-LACO-OFDM 时域信号的反对称性, 构建出低层时域信号并从 DHT-LACO-OFDM 信号中消去; 再利用 DHT-LACO-OFDM 时域信号的对称和反对称特性, 构建出干净的第一层时域信号 $y^{(1)}(n)$, 并除去第一层的削波噪声对高层信号的影响。其中第 l 层时域信号分离如下:

$$x^{(l)}(n) = \left(\left[r(n) - \sum_{k=1}^{l-1} x^{(k)}(n) \right] - \left[r(n + N/2^l) - \sum_{k=1}^{l-1} x^{(k)}(n + N/2^{l-1}) \right]; \left[r(n + N/2^l) - \sum_{k=1}^{l-1} x^{(k)}(n + N/2^{l-1}) \right] - \left[r(n) - \sum_{k=1}^{l-1} x^{(k)}(n) \right] \right) \quad (9)$$

其中, $n = 0, 1, \dots, N/2^l$, $x^{(l)}(n)$ 是第 l 层的时域信号, $r(n)$ 是接收到的多层叠加的混合信号的前 $N/2^l$ 部分, $r(n + N/2^l)$ 是多层叠加的混合信号的后 $N/2^l$ 部分,

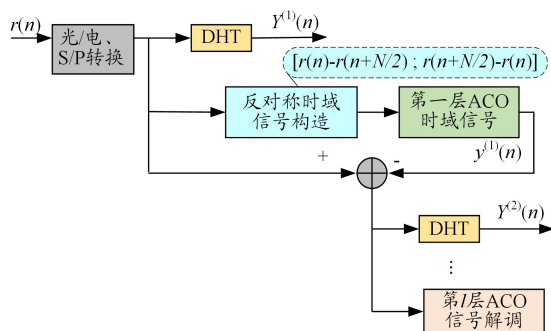


图 5 基于时域重构的分层信号接收方法

$x^{(k)}(n)$ 是第 k ($k = 1, 2, \dots, l-1$) 层的时域信号, $x^{(k)}(n + N/2^l)$ 是第 k 层的 $n + N/2^l$ 部分的时域信号。

3 基于时域重构的分层信号接收方法性能分析

本文分别分析所提出的基于时域重构的分层信号接收方法和传统的迭代接收方法在接收端的计算复杂性和误比特性能。

3.1 计算复杂性分析

DHT-LACO-OFDM 系统的计算复杂性是通过计算收发端所需要的算术运算次数来评估的。在计算复杂性分析中, 因为剪切和反对称信号的构造等操作可以通过逻辑运算实现, 所以假设这些操作不增加任何复杂度。

在 DHT-LACO-OFDM 系统中, N 点的 IDHT 运算和 N 点的 DHT 运算具有相同的乘法运算 (MOS) 次数和加法运算 (AOS) 次数, 分别为 $N \log_2 N - 3N + 4$ 和 $N \log_2 N - 3N + 6$ [18]。在计算分析时, 采用的系统模型具有 256 个子载波, 分层数为 3。因此, 256 点的 IDHT 和 DHT 具有的 MOS、AOS 次数分别为 1284 次、1286 次。

在传统接收过程中, 每一层的数据恢复都采用 256 点的 DHT, 因此, 3 层 DHT-LACO-OFDM 信号的数据恢复所需的 MOS、AOS 次数分别为 3852 次和 3858 次。但由于第二层和第三层的 DHT-LACO-OFDM 信号叠加了前一层的削波噪声, 第二层和第三层的信号恢复需要额外进行一个 256 点的 IDHT 来消除削波噪声, 所以在传统迭代接收方法中, 具有 3 层的 DHT-LACO-OFDM 信号的数据恢复需要的 MOS、AOS 次数分别为 6420 次和 6430 次。

在基于时域重构的分层信号接收方法中, 第一层的 DHT-LACO-OFDM 信号的数据恢复是直接混合信号中检索出的, 所以第一层的信号恢复与传统方法相同, 恢复所需要的 MOS 次数和 AOS 次数分别为 1284 次和 1286 次。而第二层和第三层 DHT-LACO-OFDM 信号的恢复是在时域进行分离, 不需要额外的 DHT 和 IDHT 进行 DHT-LACO-OFDM 信号时频域的转换, 只需要把分离出的信号进行一次 256 点的 DHT 即可。因此, 在基于时域重构的分层信号接收方法中, 具有 3 层的 DHT-LACO-OFDM 信号的数据恢复需要的 MOS、AOS 次数分别为 3852 次和 3858 次, 相比传统迭代接收方法, 其在接收机的复杂度上降低了近一半。

3.2 误比特性能分析

传统迭代接收方法与基于时域重构的分层信号

陆超峰,李建华,汪井源,等:基于离散哈特莱变换的 LACO-OFDM 低复杂度接收方法研究

接收方法的误比特性能如图 6 所示。其中,DHT 点数为 256,映射方式分别采用 4PAM 和 16PAM,DHT-LACO-OFDM 的层数设置为 3 层,Layer 1 表示第一层的 DHT-ACO-OFDM 信号,Layer 1 可直接从叠加的 DHT-LACO-OFDM 信号中检索出,不受高层削波噪声的影响。Layer 2 IR 是采用传统迭代接收机剥离出的第二层信号,Layer 2 IR 和采用时域接收机剥离出的第二层信号 Layer 2 TR 具有相同的误比特率曲线。同样地,采用传统迭代接收机剥离出的第三层信号 Layer 3 IR 和采用时域接收机剥离出第三层信号 Layer 3 TR 也具有相同的误比特率曲线。因此,采用时域接收机的方式并不会在信号的分离过程中带入额外的噪声和造成信号的失真,也不会影响每层信号的误比特率。

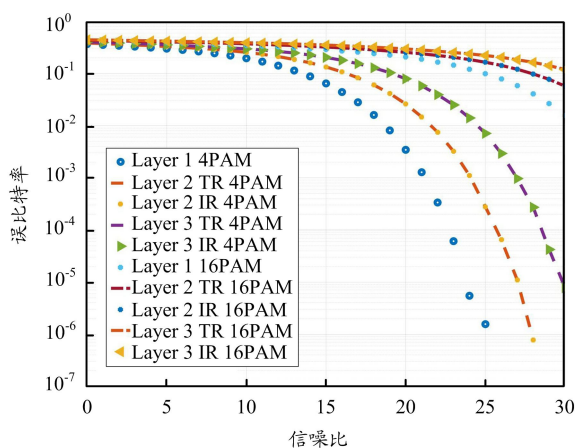


图 6 传统迭代接收方法与
基于时域重构的分层信号接收方法的误比特性能比较

4 结束语

针对 DHT-LACO-OFDM 系统接收端复杂度高的问题,本文提出了一种基于时域重构的分层信号接收方法进行多层信号的分离。与传统的迭代接收方法不同,该方法在多层 DHT-LACO-OFDM 信号的分离过程中不需要额外添加 DHT、IDHT 模块,仅利用时域信号的反对称性对每一层的 DHT-LACO-OFDM 信号进行重构,并在时域进行相减,除去低层的信号。仿真和分析结果表明:基于时域重构的分层信号接收方法与传统迭代接收方法具有几乎相同的误比特性能,但前者计算的复杂度更低,更适用于实际的应用。

参考文献:

[1] 陈勇,李雷,刘焕淋. Hartley 变换离散多音调制在可见光通信中的应

用[J]. 半导体光电,2016,37(1):100-103.

[2] 迟楠,陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程,2020,47(3):6-17.

[3] 白菊蓉. OFDM 系统峰均比抑制技术与应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2018:2-4.

[4] 唐芳,徐智勇,汪井源,等. DCO-OFDM 系统中导频辅助峰均比抑制技术[J]. 光电子·激光,2019,30(10):1116-1122.

[5] 徐宪莹,岳殿武. 可见光通信中正交频分复用调制技术[J]. 中国光学,2021,14(3):516-527.

[6] MOREOLO M S, MUÑOZ R, JUNYENT G. Novel power efficient optical OFDM based on Hartley transform for intensity-modulated direct-detection systems[J]. Journal of lightwave Technology, 2010, 28(5): 798-805.

[7] HU W W. PAPR reduction in DCO-OFDM visible light communication systems using optimized odd and even sequences combination [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1-15.

[8] WANG T Q, LI H, HUANG X. Analysis and mitigation of clipping noise in layered ACO-OFDM based visible light communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 67(1): 564-577.

[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] 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] WU N, BAR-NESS Y. A novel power-efficient scheme asymmetrically and symmetrically clipping optical (ASCO)-OFDM for IM/DD optical systems [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2015, 2015(1): 1-10.

[12] WANG Q, QIAN C, GUO X, et al. Layered ACO-OFDM for intensity-modulated direct-detection optical wireless transmission[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12382-12393.

[13] ZHANG X, WANG Q, ZHANG R, et al. Performance analysis of layered ACO-OFDM[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18366-18381.

[14] AZIM A W, LE G Y, MAURY G. Spectrally augmented Hartley transform precoded asymmetrically clipped optical OFDM for VLC [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(23): 2029-2032.

[15] AZIM A W, LE G Y, MAURY G. Performance analysis of precoded layered ACO-OFDM for visible light communication systems [J]. Optics Communications, 2019, 440: 49-60.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 李炉焦,陈君,唐志军,等. 光无线通信中基于哈特莱变换的翻转 OFDM 技术[J]. 光学学报,2021,41(19):82-88.