

DCO-OFDM 系统 TFI-SLM 峰均比抑制算法

马春波, 童俊杰, 敖珺*

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 过高的峰均功率比(PAPR)造成的非线性失真在直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)技术亟待解决的问题之一。针对该问题, 设计了一种基于时频交织(TFI)和选择映射法(SLM)的 TFI-SLM 峰均比抑制算法。该算法通过先对输入信号进行 TFI, 降低输入信号的自相关性, 再利用小 m 序列产生随机相位因子对变换后的信号进行选择映射。仿真结果表明: 与传统算法相比, 该算法不仅避免了发送过多的相位因子序列冗余信息, 并且互补累积分布函数(CCDF)值为 10^{-5} 时, PAPR 比原始 DCO-OFDM 系统降低了 2.8 dB。

关键词: 基于直流偏置光的正交频分复用; 峰均功率比; 时频域交织选择映射法; 小 m 序列

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)08-0055-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



TFI-SLM peak-to-average ratio suppression algorithm in DCO-OFDM system

MA Chunbo, TONG Junjie, AO Jun*

(School of information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Non-linear distortion caused by excessively high peak-to-average power ratio(PAPR) is one of the problems to be solved urgently in direct-current biased optical orthogonal frequency division multiplexing (DCO-OFDM) technology. Aiming at this problem, an algorithm based on time frequency interleaving (TFI) and selection mapping (SLM) which called TFI-SLM peak-to-average ratio suppression algorithm is designed. This algorithm firstly performs TFI on the input signal to reduce the autocorrelation of the input signal, and then uses a small m sequence to generate a random phase factor to selectively map the transformed signal. Simulation results show that compared with the traditional algorithm, the algorithm not only avoids sending too much redundant information of phase factor sequence, but also reduces PAPR by 2.8 dB when the complementary cumulative distribution function(CCDF) value is 10^{-5} .

Key words: direct-current biased optical orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; time frequency interleaving and selection mapping; small m sequence

0 引言

在自由空间可见光通信的发展过程中, 系统的稳定、高速和高速带利用率一直是人们追求的目标。正交频分复用(OFDM)技术具有抗频域选择性衰落强、频带利用率高等优点, 已成为当前自由空间光通信研究的热门技术之一^[1]。直流偏置光正交频分复用

收稿日期: 2020-01-17。

基金项目: 广西自然科学基金(2018GXNSFAA294056)资助。

作者简介: 马春波(1975—), 男, 教授, 博士后, 硕士研究生导师, 先后主持和承担国家自然科学基金、电子部重点和企事单位合作等科研项目 20 余项; 主要从事光通信技术、通信系统安全技术和网络安全方面的研究工作。

* 通信作者: 敖珺(E-mail: junjunao1@263.net)。



(DCO-OFDM)技术通过增加 DCO, 将双极性信号尽可能地提升到零电平以上, 削去小于零的信号, 从而得到正的实数信号并加载到发光二极管(LED)上进行通信。由于 DCO-OFDM 系统采用多载波的调制方式, 当各载波相位相同或者相近时, 将产生非常大的峰值功率。该峰值功率可能会超过系统的线性带宽而引起非线性失真, 进而影响系统的通信性能。

针对 DCO-OFDM 系统存在的峰均功率比(PAPR)过高的问题, 学者们提出了很多可行的方法。这些 PAPR 抑制方法大概可以分成 3 种, 即基于预失真的、编码的和概率的方法。基于预失真的方法包括限幅法和压缩扩张等。这类采取非线性操作的方法虽然可以有效降低系统的 PAPR, 但是会导致系统的误

码率升高^[2]。文献[2]提出的迭代限幅方案可以改善传统限幅法的缺点,但该方案需要多次迭代限幅滤波操作,虽然能改善系统误码率,但是明显提高了系统计算复杂度。文献[3]利用编码的方法来降低系统的 PAPR,虽然采用线性操作,不会造成信号畸变,但是计算复杂度会非常高。基于概率的方法包括选择映射法(SLM)以及部分序列传输法(PTS)等^[4]。由于概率类方法采用线性操作,所以不仅对系统的误码率性能没有影响,而且还有良好的 PAPR 抑制性,但是其计算剪度高,需要进行多次逆快速傅里叶变换(FFT)运算。文献[4]提出了利用转移矩阵来代替 IFFT 模块,将 IFFT 后的数据经过不同的转移矩阵来获取不同的备选信号,这样虽然可以降低系统的 PAPR,但是随着备选信号增多,系统的误码率会升高。

由于系统的 PAPR 与系统的输入信号的自相关性有关^[5],为了解决 DCO-OFDM 系统 PAPR 的问题,本文提出一种时频域交织选择映射(TFI-SLM)算法。

1 DCO-OFDM 系统模型

本文设计的采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统的工作过程分为三步:首先,将输入信号经过 TFI 以降低输入信号的自相关性;然后,将交织的信号输入到 SLM 模块以选择具有最小 PAPR 的信号;最后,将该信号加上 DCO 以得到正实数信号进行传输。采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统模型如图 1 所示。

1.1 TFI

图 1 中,在系统发射端,对二进制比特流数据进行串/并变换以及 16 进制正交幅度调制(16QAM),生成离散时域数据 $x=(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$,其中 N 表示有效子载波个数。为了降低系统的 PAPR,需对 x 进行 TFI 以减小输入信号的自相关性。交织过程如图 2 所示,将 x 分成两部分 $x_1=[x_0, x_1, \dots, x_{N/2-1}]$ 与 $x_2=[x_{N/2}, x_{N/2+1}, \dots, x_{N-1}]$ 。对第一部分 x_1 进行离散傅里叶变换

(DFT)形成离散频域数据 X_1 ,而第二部分离散时域数据 x_2 不做处理,然后两部分进行 TFI 形成 X' 。交织器采用 802.11 标准交织器。

1.2 SLM 算法^[7]

SLM 算法通过对输入子载波进行随机的相位加权,得到多个能表示同一输入的不同备选序列,然后从中选择 PAPR 最小的备选序列进行传输,从而有效降低出现 PAPR 过高的概率。由于相位旋转因子是随机的,所以在发送端需要传输相位旋转因子序列的信息以供接收端进行解旋转。

图 1 中,当输入 TFI 后的数据 X' 时,频域备选序列为:

$$X'(M)=X' \cdot P_M \quad (1)$$

其中,随机相位旋转因子 $P_M=[p_M^0, p_M^1, \dots, p_M^n, \dots, p_M^{N-1}]$,

$p_M^n=\exp(j\varphi_M^n)$, M 是备选信号的个数, M 值越大,代表备选信号数越多, PAPR 抑制效果越好,但是相应的计算复杂度会升高。 φ_M^n 为在 $[0, 2\pi)$ 上均匀取值的相位旋转因子。由于严格在 $[0, 2\pi)$ 上均匀取值,计算复杂度会非常高,因此本文采取一种次优算法,即 φ_M^n 只能在 $0, \pi$ 中进行选择。由于 $0, \pi$ 需要均匀取值,所以采用小 m 序列产生 P_{M0} 。这样在发送端就只需发送初始随机种子以及选取备选序列的序号,而不用发送 N 位旋转因子的信息。然后,对各个频域备选序列进行 Hermitian 变换。设 $X'(M)=[X'_0(M), X'_1(M), \dots, X'_{N-1}(M)]$ 经 Hermitian 变换后得到 $X''(M)=[0, X'_0(M), X'_1(M), \dots, X'_{N-1}(M), 0, X'_{N-1}^*(M), \dots, X'_1^*(M), X'_0^*(M)]$, 其中 $*$ 表示该数的共轭, $X''(M)$ 表示经过共轭变换后的频域备选序列。对 $X''(M)$ 进行 $2N+2$ 个点的 IFFT 运算,将

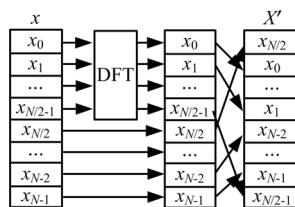


图 2 TFI 过程

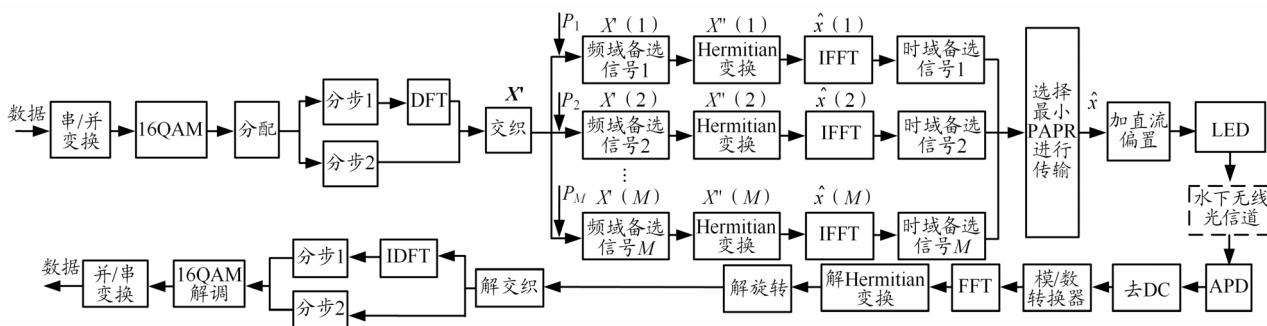


图 1 采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统图

双极性复数信号转变成双极性实数信号,得到各个时域备选序列 $\hat{x}(M)$ 。 $\hat{x}(M)$ 可表示为:

$$\hat{x}(M)=IFFT(X''(M)) \quad (2)$$

计算各个时域备选序列的 PAPR, 选择具有最小 PAPR 的一路时域备选序列进行传输。

1.3 DCO

由于 DCO-OFDM 系统采用强度调制/直接检测(ID/MM)的调制方式^[8],这要求信号是正实数信号,而选取的具有最小 PAPR 的信号 $\hat{x}$ 是双极性实数信号,所以要加上 DCO 将信息抬升至零电平以上^[9],即:

$$\begin{cases} \hat{x}_{DC}=\hat{x}+B_{DC} \\ B_{DC}=U \cdot \sigma \end{cases} \quad (3)$$

其中, B_{DC} 为 DC 大小, $\sigma=\sqrt{\sum_{k=0}^{2N+1} [\hat{x}(k)-\bar{x}]^2}$, U 是 DC 系数, $\bar{x}$ 为 $\hat{x}$ 的均值。

然而,加上 DCO 后的信号依旧有少数是负信号,所以对 $\hat{x}_{DC}$ 依旧小于 0 的部分进行削去,表示为:

$$y(n)=\begin{cases} \hat{x}_{DC}(n), \hat{x}_{DC}(n) \geq 0 \\ 0, \hat{x}_{DC}(n) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $n=0,1,2,\dots,2N+1$ 。随后,信号经过强度调制加载到 LED 上,通过无线信道到达接收端。接收端首先利用雪崩光电二极管(APD)进行接收,再经过滤波放大、去 DCO、模/数采样得到 $2N+2$ 点离散时域信号;接着对 $2N+2$ 点时域信号进行 FFT 运算得到频域信号,频域信号经过解 Hermian 变换、解旋转和解交织得到 N 点离散时频域信号;然后对其中 $\frac{N}{2}$ 点进行离散傅里叶逆变换(IDFT)运算,而另一部分 $\frac{N}{2}$ 点离散信号不进行变换;最后经过 16QAM 解调及并/串变换得到原始数据比特流即可完成通信。

2 仿真结果与分析

本文通过 Matlab 仿真来验证所设计的 TFI-SLM 算法对 DCO-OFDM 系统 PAPR 的抑制效果,同时探讨 DC 系数与系统误码率的关系并分析采取各种算法的系统计算复杂度。

2.1 PAPR 抑制效果对比

本文采用互补累积分布函数(CCDFF)值来表示一个系统的 PAPR 分布情况。CCDF 值定义为 OFDM 系统 PAPR 值大于阈值 $PAPR_0$ 的概率,即: $CCDF(PAPR)=P\{PAPR>PAPR_0\}$ 。不失一般性,设 DC 系数 $U=3.5$,

$M=4$,子载波数为 256,采用 16QAM 映射,符号数为 5000。

本文对比了采用 TFI-SLM 算法、仅采用 SLM 算法和仅采用 TFI 算法的 DCO-OFDM 系统以及原始的 DCO-OFDM 系统的 PAPR 抑制效果,结果如图 3 所示。可以看出,采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统 PAPR 抑制效果最好,CCDF 值为 10^{-5} 时,相对于仅采用 SLM 算法、仅采用 TFI 算法的 DCO-OFDM 系统以及原始 DCO-OFDM 系统,其 PAPR 分别减小了 0.5 dB、1.3dB 和 2.8 dB。

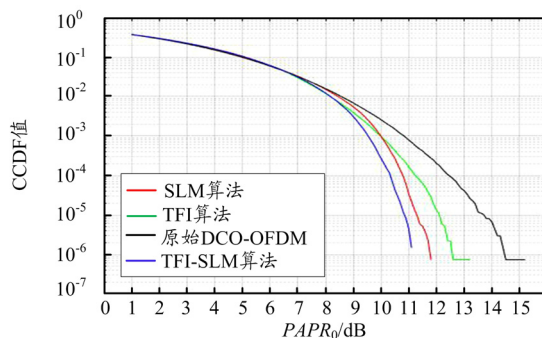


图 3 采用不同算法的 DCO-OFDM 系统 PAPR 抑制效果

M 取不同值时,采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统 PAPR 的抑制情况如图 4 所示。可以看出, M 越大,备选信号越多,PAPR 抑制效果越好,但是相应的计算复杂度越高。而且随着 M 的增大,系统 PAPR 的抑制效果的提升越来越不明显。所以在实际应用中, M 值的选取应当充分考虑 PAPR 抑制效果和系统计算复杂度。

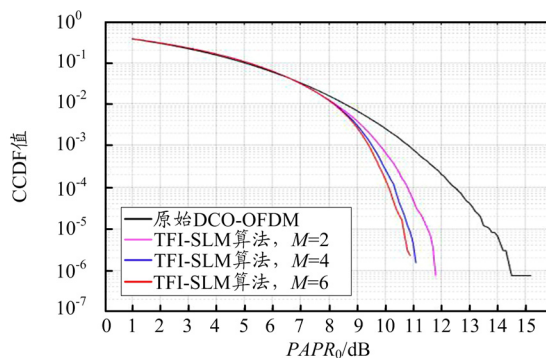


图 4 M 值的大小与系统 PAPR 的关系

采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统与采用各个经典算法的 DCO-OFDM 系统的 PAPR 抑制效果对比情况如图 5 所示。对比的经典算法包括:概率类的 SLM 算法、预失真类的 μ 律压缩扩张算法、预编码类的 DCT 展开算法和交织类的块交织算法。从图 5 可以看出,CCDF 值为 10^{-4} 时,采用本文所设计的 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统相对于采用概率类 SLM 算

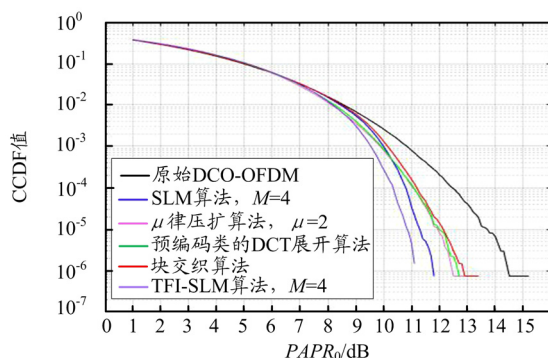


图5 TFI-SLM 算法与经典算法的对比

法、 μ 律压缩扩张算法、离散余弦变换(DCT)展开算法和块交织算法的 DCO-OFDM 系统以及原始 DCO-OFDM 系统, 其系统 PAPR 依次降低了 0.5 dB、0.7 dB、0.7 dB、0.9 dB 和 2.2 dB; 当 CCDF 值为 10^{-5} 时, 按上述对比顺序, 则其系统 PAPR 依次降低了 0.5 dB、1.1 dB、1.15 dB、1.3 dB 和 2.8 dB。因此, 本文所设计的 TFI-SLM 算法相较于传统算法有一定的优势。

2.2 DC 系数与误码率的关系

DC 系数严重影响着系统的误码率。DC 系数过小会造成系统的非线性失真, 这将导致系统误码率恶化进而影响系统的正常通信。随着 DC 系数的增加, 系统误码率减小, 但是过高的 DC 系数会导致过高的发光功率。因此, DC 系数的选择需要在误码率和发光功率之间进行权衡。DC 系数与系统误码率之间的关系如图 6 所示, 当 DC 系数 $U > 2.3$ 时, 系统的误码率在 10^{-5} 以下。

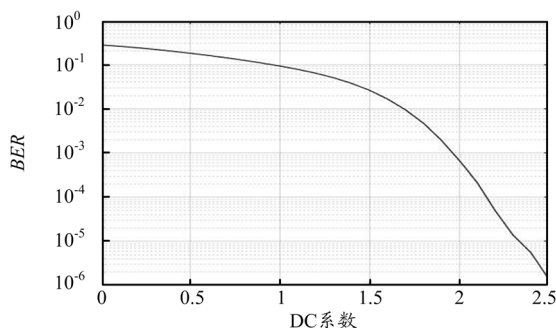


图6 DC 系数与系统误码率的关系

2.3 计算复杂度

各算法的计算复杂度如表 1 所示。可以看出, 采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统的计算复杂度相比于其它系统的计算复杂度有所增加。虽然该系统计算复杂度有所增加, 但是相对于 PAPR 抑制效果来说还是可以接受的。

表 1 采用各算法的 DCO-OFDM 系统的计算复杂度

系统	复数乘法次数	复数加法次数
原始 DCO-OFDM 系统	$\frac{N}{2} \log_2 N$	$N \log_2 N$
采用 TFI 算法的 DCO-OFDM 系统	$\frac{N}{2} \log_2 N + \frac{N}{4} \log_2 \frac{N}{2}$	$\frac{N}{2} \log_2 \frac{N}{2} + N \log_2 N$
采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统	$\frac{MN}{2} \log_2 N + \frac{N}{4} \log_2 \frac{N}{2}$	$\frac{N}{2} \log_2 \frac{N}{2} + MN \log_2 N$
采用 SLM 算法的 DCO-OFDM	$\frac{MN}{2} \log_2 N$	$MN \log_2 N$

3 结束语

本文设计了一种采用 TFI-SLM 算法的 DCO-OFDM 系统, 通过 TFI 降低系统输入信号的自相关性; 采用小 m 序列产生的不同的旋转相位因子序列, 通过分别计算各个备选序列的 PAPR, 选择最优备选序列传输。探讨了 M 值大小与系统 PAPR、DC 系数与系统误码率的关系。仿真表明: 采用 TFI-SLM 算法比采用大部分传统 PAPR 抑制算法效果更好; M 值越大, 备选信号越多, PAPR 抑制效果越好, 但是抑制效果的提升越来越不明显, 且相应的计算复杂度越高; 在 DC 系数 $U > 2.3$ 时, 系统的误码率在 10^{-5} 以下。

参考文献:

- [1] ARMSTRONG J. OFDM for optical communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 189–204.
- [2] YU Z, BAXLEY R J, ZHOU G T. Iterative clipping for PAPR Reduction in visible light OFDM communications [C]. IEEE Military Communications Conference. Baltimore, MD, USA, Oct. 2014: 1681–1686.
- [3] DAOUD O, ALANI O. Reducing the PAPR by utilisation of the LDPC code [J]. Communication Lett, 2009, 3(4): 520–529.
- [4] WANG C L, YUAN O Y. Low-complexity selected mapping schemes for peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2005, 53(12): 4652–4660.
- [5] TELLAMBURA. Upper bound on peak factor of N-multiple carriers [J]. Electronics Letters, 1997, 33(19): 1608–1609.
- [6] BAUML R W, FISCHER R F H, HUBER J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping [J]. Electronics Letters, 1996, 32(22): 2056–2057.
- [7] 纪金伟, 夏玉杰. 一种降低 OFDM 系统 PAPR 的低复杂度盲 SLM 方法[J]. 无线电工程, 2017, 47(5): 27–31.
- [8] MYUNG H G, LIM J, GOODMAN D J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2006, 1(3): 30–38.
- [9] JURONG Bai. Peak-to-average power ratio reduction for DCO-OFDM underwater optical wireless communication system based on an interleaving technique[J]. Optical Engineering, 2018, 57(8): 34–39.