

提高 CO-OFDM 系统性能的 ACE-IPTS 联合算法

李婷婷,童峥嵘*

(天津理工大学 电气电子工程学院,天津 300384)

摘要:为了平衡相干光正交频分复用系统(CO-OFDM)的高峰均功率比(PAPR)和高复杂度,提出了一种基于凸集映射星座扩展(ACE-POCS)和迭代部分传输序列(IPTS)相结合的新型联合算法——改进凸集映射星座扩展迭代部分传输序列(ACE-IPTS)算法。仿真结果表明:与原始信号相比,ACE-IPTS 算法的 PAPR 优化了 4.907 dB;在误码率为 10^{-3} 时,与 IPTS 算法相比,ACE-IPTS、改进 ACE-POCS 算法的光信噪比(OSNR)分别增加了 0.54 dB 和 1.04 dB;IPTS、ACE-IPTS 和 ACE-POCS 算法的运算量分别为 59392、79872 和 204800,其中相比 ACE-POCS 算法,ACE-IPTS 算法计算量降低了 61%。

关键词:正交频分复用;峰均功率比;复杂度;迭代部分传输序列;改进凸集映射星座扩展

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)05-0058-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



ACE-IPTS joint algorithm to improve the performance of CO-OFDM system

LI Tingting, TONG Zhengrong*

(School of electrical and electronic engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to balance the peak-to-average power ratio (PAPR) and high complexity of coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM), a novel joint algorithm based on active constellation extension-projection onto convex sets (ACE-POCS) and iterative partial transmission sequence (IPTS) is proposed, which is called the improved iterative partial transmission sequence of active constellation extension (ACE-IPTS). The simulation results show that, compared with the original signal, the PAPR of ACE-IPTS algorithm is optimized by 4.907 dB. When the bit error rate is 10^{-3} , the optical signal-to-noise ratios (OSNRs) of ACE-IPTS and improved ACE-POCS increase by 0.54 dB and 1.04 dB respectively compared with the IPTS algorithm. The calculation times of IPTS, ACE-IPTS and ACE-POCS are 59392, 79872 and 204800 respectively. Compared with ACE-POCS algorithm, the calculation times of the ACE-IPTS algorithm decreases by 61%.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; complexity; iterative partial transmission sequence; improved constellation extension - projection onto convex sets

0 引言

正交频分复用(OFDM)是一种多载波数据传输技术,具有抗多径衰落能力强、频谱利用率高优点,被广泛应用^[1]。但是,较高的峰均功率比(PAPR)是系统存在的一个较大的问题。相干光正交频分复用(CO-

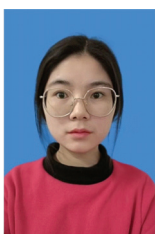
OFDM)系统引进上/下变换结构,这种线性变换是实现 OFDM 的关键^[2,3]。高 PAPR 会增加功率放大器的功耗,造成带外辐射、带内非线性失真等,导致通信质量下降^[4]。研究者们针对 PAPR 过高这一缺点已提出了多种方法。文献[5]采用随机选择循环移位和旋转值的 III 类选择性映射(SLM)方案,该方案在最小化备选 OFDM 信号序列之间相关值的方差方面是最佳的,能有效抑制 PAPR,但该方案的边带信息较复杂,占用信道带宽较大。文献[6]采用遗传算法辅助部分发射序列(NGA-PTS)以降低 OFDM 的 PAPR,但该算法找 PTS 的优化解不是最优的,因此降 PAPR 性能不理想。文献[7]采用迭代限幅滤波算法,通过多次迭代来降低信号 PAPR,但多次迭代会增加系统的计算量。文献[8]采用星座扩展算法来降低 OFDM 的 PAPR,该算法通过

收稿日期:2019-11-11。

基金项目:天津自然科学基金(No.18JCYBJC86300)资助;天津市教委科研项目(No.2018KJ132)资助。

作者简介:李婷婷(1995—),女,硕士生,现就读于天津理工大学电气电子工程学院信息与通信工程专业,主要从事光纤通信和光正交频分复用系统的降峰均比方面的研究。曾参加过 USRP 无线通信对抗赛,获得三等奖,在校获得过学业奖学金,

*通信作者:童峥嵘(E-mail:tjtongzhenrong@163.com)。



载波分组技术来提高优化过程中的自由度,进而降低算法复杂度。文献[9]提出凸集映射星座扩展(ACE-POCS)结合粒子群算法降低信号的 PAPR。但是这两种算法降低系统 PAPR 性能都不明显。文献[10]采用星座扩展限幅算法通过优化收敛速度降低信号 PAPR 等,但该算法的误码率性能不够理想。

本文提出一种基于 ACE-POCS 和迭代部分传输序列(IPTS)相结合的新型联合算法,即改进凸集映射星座扩展迭代部分传输序列(ACE-IPTS)算法。

1 ACE-IPTS 算法原理

本文提出的 ACE-IPTS 算法原理图如图 1 所示,模块 1 为改进的 ACE-POCS 模块,模块 2 为 IPTS 模块, X 为模块 1 的输入信号,该信号首先经傅里叶逆变换(IFFT)和削波后,得到的信号减去原始时域信号 x 得到时域削波信号 c ,然后经傅里叶变换(FFT)后乘以扩展因子 G 得到信号,该信号与原始频域信号 X 相加得到扩展频域信号 $\tilde{X}$ 。其中,乘以 G 能使可扩展区域扩大,使 OFDM 信号叠加的概率减小,降低 OFDM 的 PAPR。星座修正后的信号 X' 作为 IPTS 的输入信号,经过模块 2 的运算可以进一步降低 OFDM 信号的 PAPR,并且改善 CO-OFDM 系统的误码率(BER)。

算法流程具体如下:

①映射后的 OFDM 频域信号 $X=[X(1),X(2),\dots,X(N)]$ 经过 IFFT 为时域信号 $x=[x(1),x(2),\dots,x(n)]$ 。

②设置限幅门限值 A ,对超过门限值的信号样点进行限幅操作:

$$x'(n)=\begin{cases} x(n), & |x(n)| \leq A \\ Ae^{j\theta(n)}, & |x(n)| > A \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 表示时域信号, $\theta(n)$ 表示相位, $n=1,2,3,\dots,\infty$ 。

③限幅后的信号 $x'(n)$ 和原始时域信号 $x(n)$ 相减,计算出削波噪声 $c(n)$:

$$c(n)=x'(n)-x(n) \quad (2)$$

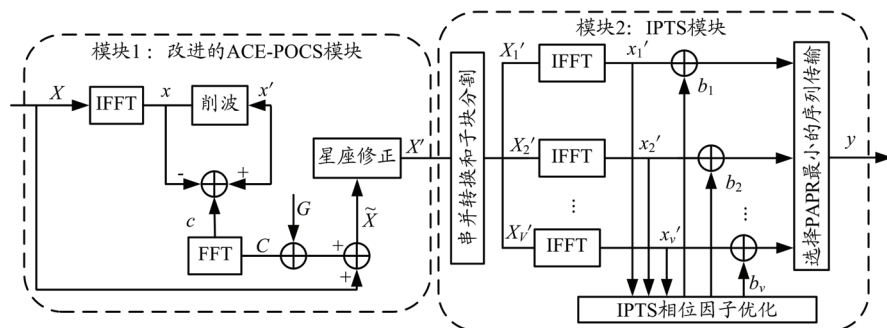


图 1 ACE-IPTS 算法原理图

④ $c(n)$ 经过 FFT,得到频域削波噪声 $C=[C(1),C(2),\dots,C(N)]$ 。

⑤设置扩展因子 G ,进行扩展获得初步扩展频域信号 $\tilde{X}=[\tilde{X}(1),\tilde{X}(2),\dots,\tilde{X}(N)]$, $\tilde{X}$ 可表示为:

$$\tilde{X}=X+G \cdot C \quad (3)$$

⑥根据星座点可扩展区域,对频域信号进行修正得到输出信号 X' 。

⑦将改进的 ACE-POCS 模块输出信号 X' 作为 IPTS 模块的输入信号,划分为 V 个互不相交的子块 $X'=[X'_1,X'_2,\dots,X'_V]^T$,每个子块进行 N 点 IFFT^[13],即: $x'_v=IFFT(X'_v)$ 。

⑧设定所有的相位因子 $b_v=1, v=1,2,\dots,V$ 。

⑨子块与相应的相位因子相乘,得到备选信号:

$$y=\sum_{v=1}^V b_v \cdot x'_v \quad (4)$$

⑩选择 PAPR 最小的信号进行传输。

星座图扩展(ACE)主要思想是把信号最外层星座点向外扩展到规定区域,从而改变子载波的相位,避免相位一致的情况,进而有效地抑制信号的 PAPR^[14]。改进的 ACE-POCS 算法结构图如图 1 中的模块 1,根据设定的星座点可扩展区域,对初步频域扩展信号进行修正,修正规则如图 2 所示。以第一象限为例,如果 $\tilde{X}$ 落在 B 点,则实部和虚部均还原为原来的点,即 $B \rightarrow B'$;如果落在 A 位置,则虚部保持不变,实部变为原来的实部,即 $A \rightarrow A'$;如果落在 E 位置,则虚部还原为原来的虚部,实部保持不变,即 $E \rightarrow E'$;如果位于 F 点,则在可扩展区域内,无需星座修正,实部、虚部保持不变。

传统的 PTS 算法采用遍历搜索方法选择使 PAPR 最小的最优序列,计算量非常大,因此提出 IPTS 算法^[12],通过寻找次优序列实现 PAPR 抑制和计算量的折中。IPTS 算法原理框图如图 1 中模块 2 所示,其具体流程如图 3 所示。

图 3 中,输入信号首先被分为 V 组互不重叠的子

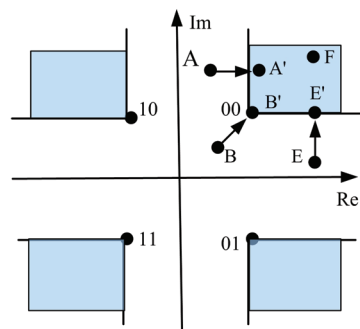


图 2 QPSK 调制时星座修正示意图

序列, 每组相位因子初始值都被初始化为 1, 相位因子的符号位置

$index=1$ 时, 计算出此时的 $PAPR$, 记为 $PAPR_0$, 将第一组相位因子置换为 -1, 即 $b_{index}=-1$ 时, 计算此时的 $PAPR$, 如果此时的 $PAPR$ 大于 $PAPR_0$, 则 $b_{index}=1$; 反之, 第一组的

相位因子记为 $b_{index}=-1$, 并被保留, 此时完成一次迭代过程, 直到所有的子序列都经过相位因子的翻转比较才算完成一次 IPTS 运算。

每执行一次 IPTS 算法, 复乘和复加的计算量 n_{mul} 、 n_{add} 为:

$$\begin{cases} n_{mul} = VW^V \cdot (N/2) \cdot \log_2 N \\ n_{add} = VW^V (N \cdot \log_2 N) \end{cases} \quad (5)$$

其中, N 为子载波个数, V 为子块分割数, W 为相位因子个数, 则加权系数的取值有 W^V 种; 而采用 IPTS 算法, 只需计算 V 步即可得到最优加权系数, 每步只需计算 W 次信号的 $PAPR$, 进行 $W-1$ 次比较, 与传统 PTS 算法的 W^V 次 $PAPR$ 计算和 W^V 次比较相比, 计算量大大降低。

经过 ACE-IPTS 算法前、后的 OFDM 时域波形图如图 4 所示。图 4(a) 中原始信号的时域峰值在 5 以

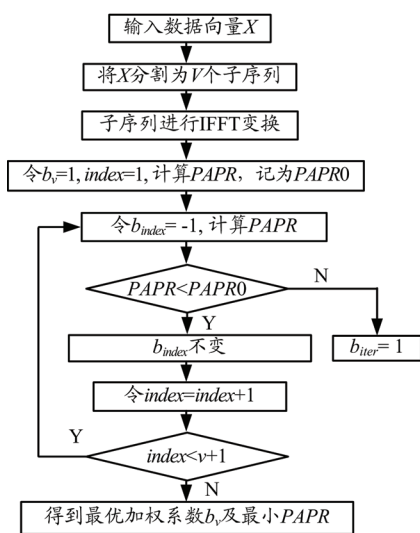
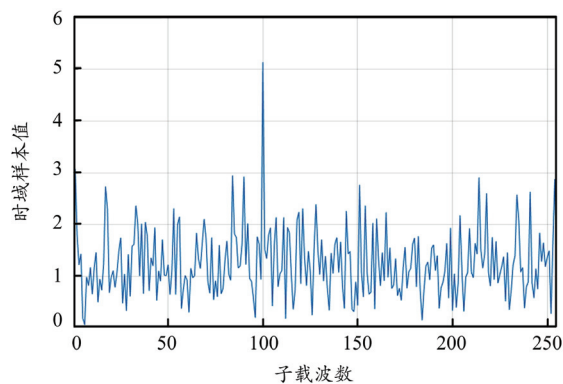
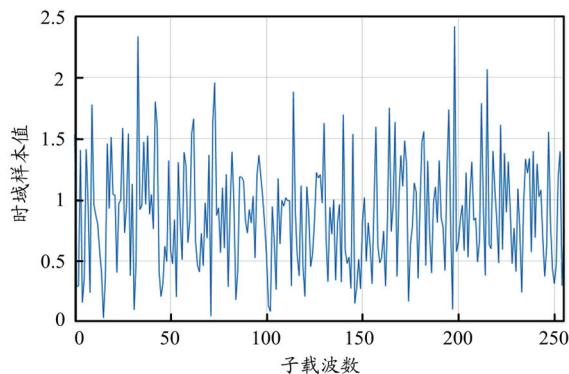


图 3 IPTS 算法流程图



(a) 原始信号时域波形



(b) 经 ACE-IPTS 处理后时域波形

图 4 ACE-IPTS 算法前、后时域波形对比

上; 图 4(b) 中 ACE-IPTS 算法处理后时域峰值降到 2.5 以内。

2 基于 ACE-IPTS 算法的 CO-OFDM 系统

基于 ACE-IPTS 算法的 CO-OFDM 系统如图 5 所示, CO-OFDM 系统满足了 OFDM 技术所需的线性关

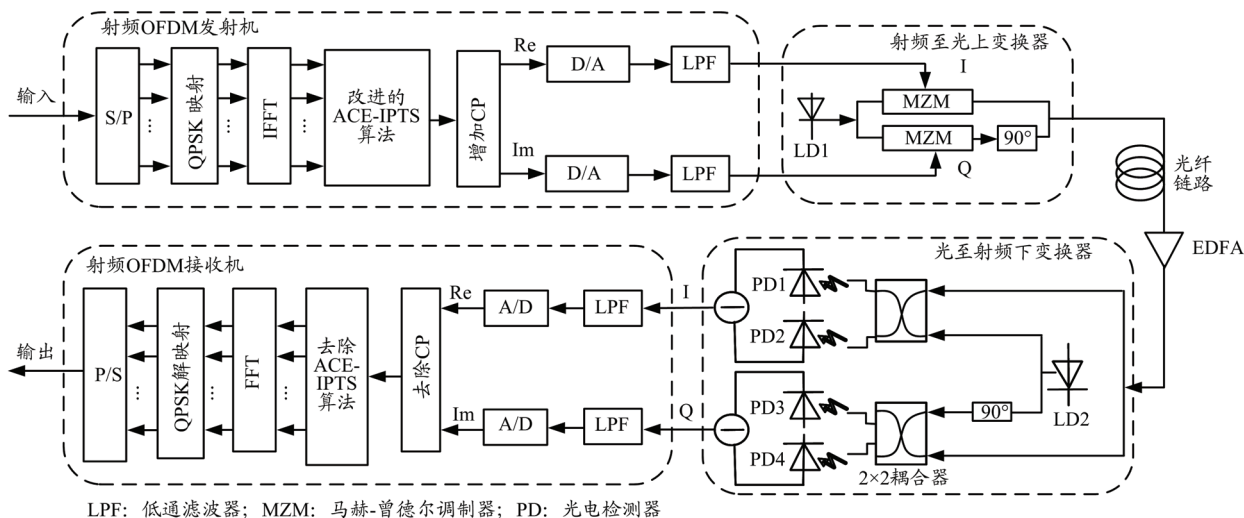


图 5 基于 ACE-IPTS 算法的 CO-OFDM 系统框图

李婷婷, 童峥嵘: ACE-IPTS 联合算法降低 CO-OFDM 系统 PAPR

系且计算效率高。在射频 OFDM 的发射机, 输入数据序列首先经过串/并(S/P)变换、QPSK 映射、IFFT、改进的 ACE-IPTS 算法、添加循环前缀(CP)和数/模(D/A)转换等, 上变换结构把 2 路电信号 I、Q 转换成光信号在 Optisystem 软件搭建的光纤信道中传输, 在接收机则进行相反的处理。本文中射频 OFDM 发送机和接收机的工作是由 Matlab 软件实现的, 射频至光上变换器、光信道和光至射频下变换器部分则由 Optisystem 软件完成。

激光器(LD)频率为 193.1 THz, 带宽为 0.1 MHz, 波长为 1550 nm。掺铒光纤放大器(EDFA)的增益为 16 dB, 噪声系数为 3.2 dB。系统其它仿真设置如下: 信息速率为 20 Gb/s, 子载波个数为 256, CP 长度为 32, OFDM 符号数为 200, 调制方式为 QPSK, 相位因子个数 $W=2$, 子块分割数 $V=4$, 扩展因子 $G=4$ 。

图 6 为 ACE-POCS 不同迭代次数 ($iter$ 为 1~10) 下的互补累计分布函数(CCDF)曲线图, 其纵坐标为 CCDF 值(PAPR 超过某一门限值 $PAPR_0$ 的概率)。由图 6 可知, ACE-POCS 的收敛速度很慢, 原信号和 10 次迭代次数下信号在 $CCDF=10^{-4}$ 的 $PAPR_0$ 分别为 11.27 dB、9.853 dB、8.956 dB、8.363 dB、8.012 dB、7.637 dB、7.345 dB、7.115 dB、6.928 dB、6.774 dB 和 6.638 dB, 在第 10 次迭后优化了 4.642 dB, 但是计算量显著增加。

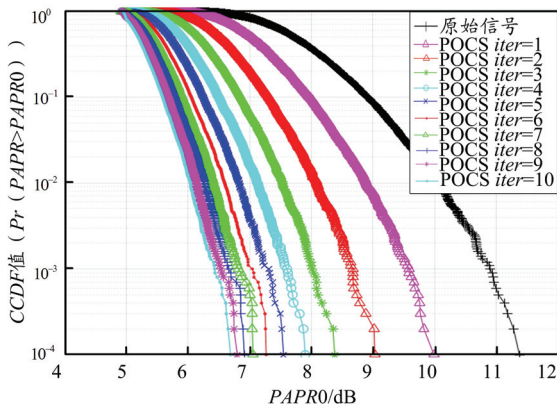


图 6 不同迭代次数下 ACE-POCS 的 CCDF 曲线

图 7 为 IPTS ($V=4$)、PTS ($V=4$)、IPTS-ACE ($V=4$, $G=4$)、改进 ACE-POCS ($G=4$) 和 ACE-IPTS ($V=4$, $G=4$) 算法下 CCDF 值随 $PAPR_0$ 的变化曲线图, 其中相比 IPTS-ACE ($V=4$, $G=4$) 算法, ACE-IPTS ($V=4$, $G=4$) 是先对数据进行 ACE ($G=4$) 算法处理, 再对得到的数据序列进行 IPTS 算法处理, 与 IPTS-ACE ($V=4$, $G=4$) 的前后级联顺序不同。可以看出, 在 $CCDF=10^{-4}$ 处, 原始

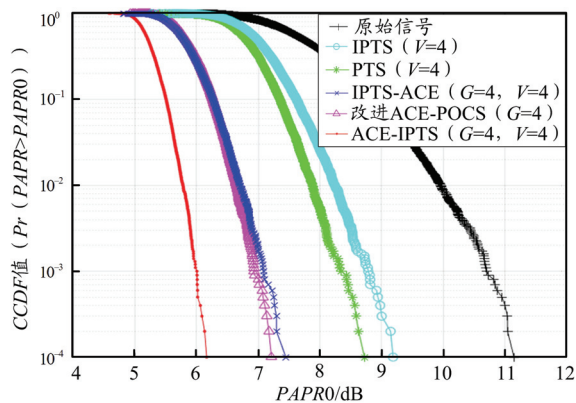


图 7 不同算法下 CCDF 的曲线

信号的 $PAPR_0$ 为 11.05 dB, 该值较高, IPTS ($V=4$)、PTS ($V=4$)、IPTS-ACE ($G=4$, $V=4$)、改进 ACE-POCS ($G=4$) 和 ACE-IPTS ($G=4$, $V=4$) 算法的 $PAPR_0$ 的值分别为 9.397 dB、8.44 dB、7.382 dB、7.31 dB 和 6.143 dB。比较这 5 组曲线可以看出, ACE-IPTS 算法抑制 PAPR 的能力较强, 优化了 4.907 dB, 其它算法分别优化了 1.653 dB、2.61 dB、3.67 dB 和 3.74 dB, 且比图 6 中迭代了 10 次后的 ACE-POCS 算法优化了 0.495 dB, 则本文提出的 ACE-IPTS 算法 PAPR 优化性能较好, 复杂度较低。

采用不同算法在 80 km 的单模光纤(SMF)上传输信号的 BER 随光滤波器信噪比(OSNR)的变化如图 8 所示, BER 随着 OSNR 的增加逐渐减小, BER 性能较好的依次为 IPTS、ACE-IPTS、改进的 ACE-POCS 和 IPTS-ACE, 在 $BER=10^{-3}$ 处, 以上算法的 OSNR 分别为 18.54 dB、19.08 dB、19.58 dB 和 19.96 dB。ACE-IPTS 的 BER 略高于 IPTS, 但低于改进的 ACE-POCS 算法和 IPTS-ACE 算法。另外, 与 IPTS 算法相比, ACE-IPTS、改进的 ACE-POCS、IPTS-ACE 算法的 OSNR 分别增加了 0.54 dB、1.04 dB 和 1.42 dB, 仿真结果证明了本文提出的 ACE-IPTS 算法可行性。

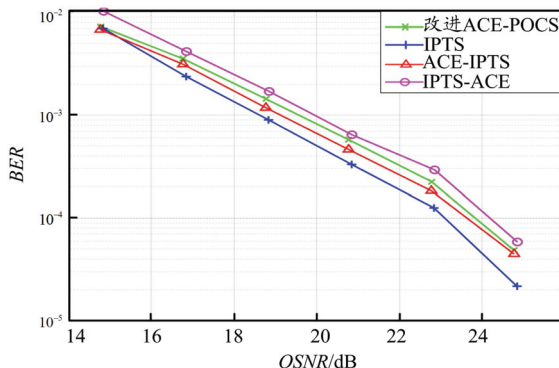


图 8 不同算法的 BER 随 OSNR 的变化

不同算法的 BER 随 SMF 长度的变化如图 9 所示,当 SMF 的长度由 80 km 增加到 560 km 时,3 种算法的 BER 都逐渐增大。其中,ACE-IPTS 的 BER 低于改进 ACE-POCS 算法,虽高于 IPTS 算法,但是差距逐渐减小。

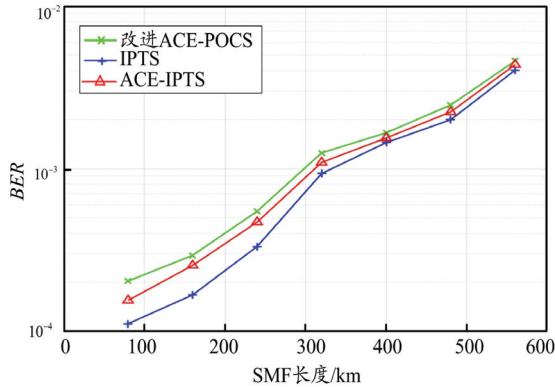


图 9 不同算法的 BER 随 SMF 长度的变化

不同算法的运算复杂度如表 1 所示,根据表 1 中的计算公式可以得出不同算法的计算量,如表 2 所示。从表 2 可以看出,IPTS($W=2, V=4$)、ACE-IPTS($W=2, V=4, G=4$)、ACE-POCS($iter=10$)算法的运算量分别为 59392、79872 和 204800,与 ACE-POCS($iter=10$)算法相比,另 2 种算法计算量分别降低了 71% 和 61%。从图 7 可以看出,ACE-IPTS($G=4$)、ACE-POCS($iter=10$)与 IPTS($V=4$)算法相比,降 PAPR 性能分别优化了 3.25 dB 和 2.759 dB。由于 IPTS 的 PAPR 抑制能力较差,因此 ACE-IPTS 算法有很好的可行性。

表 1 不同算法运算复杂度

算法	复加运算复杂度	复乘运算复杂度
IPTS	$3NV \cdot \log_2 N + N \cdot W^{V-1} \cdot (2V-1)$	$2NV \cdot \log_2 N + 2N \cdot W^{V-1}$
ACE-POCS	$6N \cdot \log_2 N \cdot N_{iter}$	$4N \cdot \log_2 N \cdot N_{iter}$
ACE-IPTS	$(6+3V) \cdot N \log_2 N + (2V-1) \cdot N W^{V-1}$	$(4+2V) \cdot N \log_2 N + 2N \cdot W^{V-1}$

表 2 不同算法的运算量

算法	复加运算量	复乘运算量	总运算量
IPTS($W=2, V=4$)	38912	20480	59392
ACE-IPTS($W=2, V=4, G=4$)	51200	28672	79872
ACE-POCS($iter=10$)	122880	81920	204800

3 结束语

改进的 ACE-POCS 算法能较快地收敛,减少系统的复杂度,本文在此基础上结合 IPTS 算法,提出

ACE-IPTS 算法不仅优化了 CO-OFDM 系统的 PAPR 性能,而且相对于单一的改进的 ACE-POCS 算法,其又降低了系统的 BER。另外,ACE-IPTS 算法在一定程度上降低了电光转换后光信号的峰值功率,保证了通过光纤信道前,光信号峰值功率较低,从而减轻了 D/A、A/D 转换器、放大性器件和光纤非线性对信号的影响。

参考文献:

- [1] ARMSTRONG J. OFDM for Optical Communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 189–204.
- [2] MAIVAN Lap, HE Jing, CHEN Ming, et al. A PAPR reduction scheme based on a new spreading code in optical direct detection OFDM system[J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(1): 155–161.
- [3] SHIEH W, BAO H, TANG Y. Coherent optical OFDM: Theory and design[J]. Optics Express, 2008, 16(2): 841–859.
- [4] VITTAL M V R, NAIDU K R. A novel reduced complexity optimized PTS technique for PAPR reduction in wireless OFDM systems[J]. Egyptian Informatics Journal, 2017, 18(2): 123–131.
- [5] ZHUANG L, LIU L, LI J, et al. Discrete Sine and Cosine Transforms in Single Carrier Modulation Systems[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 78(2): 1313–1329.
- [6] WOO J Y, JOO H S, KIM K H, et al. PAPR Analysis of Class-III SLM Scheme Based on Variance of Correlation of Alternative OFDM Signal Sequences[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(6): 989–992.
- [7] CHEN Z, ZHANG S, YANG L, et al. Optimal phase searching of PTS using modified genetic algorithm for PAPR reduction in OFDM systems[J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(6): 1–11.
- [8] ZHU X, PAN W, LI H, et al. Simplified Approach to Optimized Iterative Clipping and Filtering for PAPR Reduction of OFDM Signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(5): 1891–1901.
- [9] WANG S H, LIN W L, HUANG B R, et al. PAPR Reduction in OFDM Systems Using Active Constellation Extension and Subcarrier Grouping Techniques[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 27(12): 2378–2381.
- [10] OUQOUR A, JABRANE Y, SAID B A E, et al. PAPR Reduction in OFDM via Active Constellation Extension-Projection Onto Convex Sets Combined with Particle Swarm Optimization [J]. The Computer Journal, 2014, 57(8): 1230–1237.
- [11] 韩硕,李艳萍,张博叶. 降低 OFDM 系统 PAPR 的低复杂度 ACE-C 算法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(3): 19–22, 26.
- [12] PACHORI K, MISHRA A. PAPR Reduction in MIMO-OFDM by Using Active Partial Sequence[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2015, 34(12): 3999–4010.
- [13] 冯卓明,周隆龙. 用于降低计算复杂度的双相位因子 PTS[J]. 光通信技术, 2016, 40(1): 50–53.
- [14] HAN S H, LEE J H. PAPR reduction of OFDM signals using a reduced complexity PTS technique [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004(11): 887–890.