

# IPTS 压扩算法降低 CO-OFDM 系统 PAPR 的研究

胡亚农, 童峥嵘

(天津理工大学 电气电子工程学院, 天津 300384)

**摘要:**针对相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统中存在较高的峰均比(PAPR)问题,提出了一种翻转迭代部分传输序列(IPTS)联合压扩算法的 IPTS 压扩新算法。通过 CO-OFDM 系统进行了仿真实验证明,该算法在压扩迭代系数  $m=3$ 、子块分割数  $V=4$ 、压扩系数为  $\mu=2$ 、互补累积分布函数(CCDF)值为  $10^{-4}$  时,与 IPTS 算法和  $\mu$  律压扩变换相比,其 PAPR 性能分别提高了 3.53dB 和 1.21dB。在误码率(BER)为  $10^{-3}$  时, IPTS 压扩算法( $m=3$ ,  $V=4$ ,  $\mu=2$ )所需要的光信噪比(OSNR)比 IPTS 算法( $V=4$ )和  $\mu$  律压扩算法( $\mu=2$ )分别增加了 2.51dB 和 0.58dB。

**关键词:**相干光正交频分复用; 翻转迭代部分传输序列; 压扩变换; 峰均比; 误码率

**中图分类号:** TN929.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1002-5561(2018)03-0001-04

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.001

## Research on PAPR reduction for CO-OFDM systems with IPTS-Companding

HU Yanong, TONG Zhengrong

(School of Electrical and Electronic Engineering,  
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM) system has a high peak-to-average ratio (PAPR), this paper proposes an iterative inversion partial transmit sequence (IPTS) companding new algorithm that combined with companding algorithm. CO-OFDM simulation experiments show that the algorithm in the iterative companding coefficient  $m=3$ , sub block partition number  $V=4$ , companding coefficient  $\mu=2$ , the complementary cumulative distribution function (CCDF) value was  $10^{-4}$ , compared with the IPTS algorithm and  $\mu$ -law companding transform, the performance of PAPR are increased by 3.53dB and 1.21dB. When the bit error rate (BER) is  $10^{-3}$ , the optical signal-to-noise ratio (OSNR) of IPTS companding algorithm ( $m=3$ ,  $V=4$ , and  $\mu=2$ ) increases 2.51dB and 0.58dB respectively compared with IPTS algorithm ( $V=4$ ) and  $\mu$ -law companding algorithm ( $\mu=2$ ).

**Key words:** CO-OFDM; IPTS; companding transform; PAPR; BER

### 0 引言

正交频分复用(OFDM)技术是一种多载波调制技术,利用各个子载波之间的正交性实现数据的高速并行传输,具有频谱利用率高、抗多径衰落能力强等优点<sup>[1,2]</sup>。但是同无线 OFDM 一样,较高的峰均比(PAPR)

收稿日期:2017-09-12。

基金项目:国家 863 项目(2013AA014201)资助;集成光电子学国家重点实验室开放课题(IOSKL2015KF06)资助。

作者简介:胡亚农(1992-),男,硕士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。

是 CO-OFDM 系统存在的一个严重问题。高 PAPR 不仅会导致功率放大器、马赫-曾德尔调制器(MZM)等器件工作在非线性工作区域,还会增强光纤的非线性效应,对系统的性能产生不良的影响<sup>[3,4]</sup>。目前,许多降低信号 PAPR 的方法已经被提出来,如迭代限幅滤波算法<sup>[5]</sup>通过多次迭代来达到降低 PAPR 的目的,增加了计算的复杂度;LDPC 编码结合 PTS 算法<sup>[6]</sup>有效地降低信号的 PAPR,但是编码效率比较低,受子载波个数的影响比较大;循环移位序列<sup>[7]</sup>通过降低输入序列的相

关性来降低信号的 PAPR;基于哈达玛变换的压扩算法<sup>[8]</sup>,计算复杂度比较低,但是降低信号的 PAPR 不明显。本文主要介绍 IPTS 压扩算法的基本原理,提出一种改进的压扩变换的算法。

## 1 IPTS 压扩算法原理

重复迭代压扩变换原理图如图 1 所示,输入信号首先经过一次压扩变换,接着经过傅里叶变换(FFT)得到 OFDM 频域信号,并对 OFDM 频域信号进行滤波处理,减小带外辐射的干扰,再经逆傅里叶变换(IFFT)得

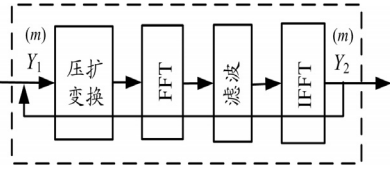


图 1 重复迭代压扩变换原理框图

到 OFDM 时域信号,此时完成一次迭代过程。图中  $m$  为重复压扩滤波的次数,第  $m-1$  次的输出结果将会作为第  $m$  次的输入结果进行下一次循环。压扩变换会导致带外辐射,降低系统的误码率,通过多次循环压扩,可以减小压扩变换对信号的影响,改善误码率。图中压扩变换采用的函数可以表示为:

$$Y_2^{(m)} = \frac{A \cdot Y_1^{(m)} \cdot \ln \left( 1 + \mu \frac{|Y_1^{(m)}|}{A} \right)}{\left| Y_1^{(m)} \right| \ln(1 + \mu)} \quad (1)$$

其中,  $A$  表示归一化的常数,  $\mu$  为压扩系数,  $Y_1$  为输入信号,  $Y_2$  为输出信号,  $m$  为重复压扩滤波的次数。

翻转迭代部分传输序列(IPTS)算法是一种无失真的抑制 PAPR 的算法,通过寻找次优解来代替最优解,

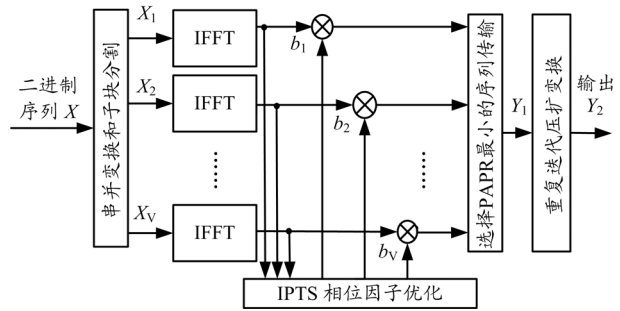


图 2 IPTS 压扩算法原理框图

从而降低了算法的复杂度,同时抑制信号 PAPR 的性能受到影响,但是误码率性能下降<sup>[9]</sup>。本文提出一种 IPTS 压扩算法如图 2 所示。具体算法如下:

- ①输入的二进信号序列经过串并变换和子块分割得到  $V$  个长度相等、互不重叠的子序列;
- ② $V$  个子序列分别经过 IFFT 变换;
- ③初始化  $V$  个相位因子为 1, 记为  $b_v=1$ , 计算出此时信号的峰均比记为  $PAPR_0$ ;
- ④令  $b_1=-1$ , 其它  $V-1$  个相位因子保持不变, 计算此时信号的峰均比记为  $PAPR$ , 并与  $PAPR_0$  作比较, 如果  $PAPR < PAPR_0$ , 则相位因子  $b_1=-1$ , 反之  $b_1=1$  保持不变;
- ⑤按照步骤④依次循环直到完成  $V$  次, 此时得到最优的相位因子  $b_v$  和具有最小  $PAPR$  的传输序列;
- ⑥对具有最小  $PAPR$  的传输序列信号进行重复迭代压扩变换。

## 2 基于 IPTS 压扩算法的 CO-OFDM 系统

由于 OFDM 具有较高的频谱利用率和抗色散能力,在接收端结合相干检测技术后,可以提高接收机

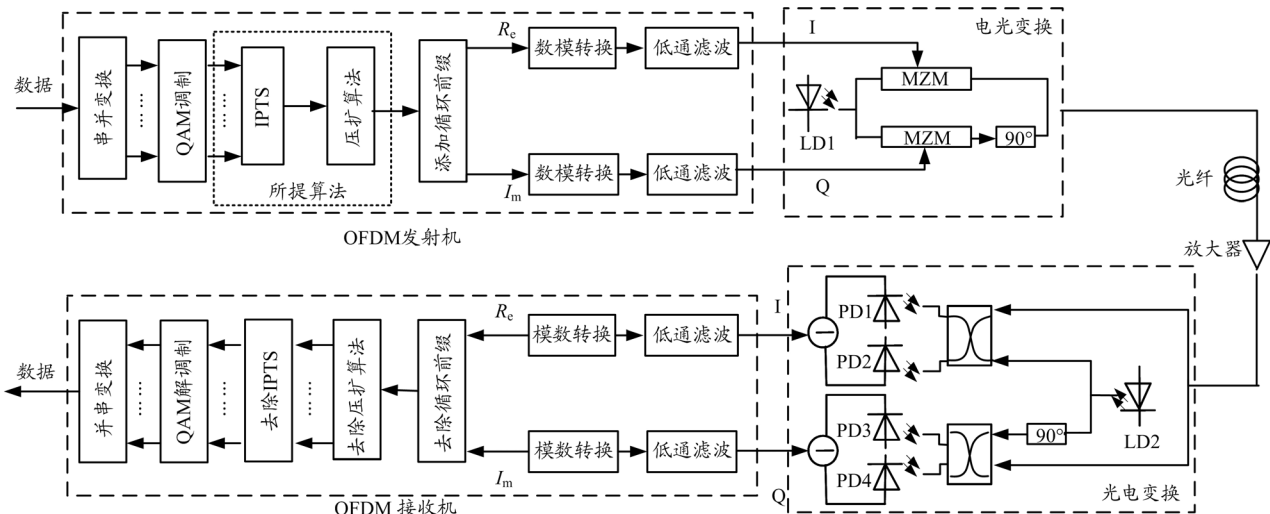


图 3 基于 IPTS 压扩算法的 CO-OFDM 系统

的灵敏度,易于实现信号的均衡<sup>[10,11]</sup>。本文采用基于 Optisystem 软件搭建的 CO-OFDM 系统,完整的系统框图如图 3 所示。

图 3 中,LD 为激光器,PD 为光探测器, $R_e$  和  $I_m$  分别表示信号的实部和虚部。在系统的发送端通过 Matlab 来实现二进制数据的串并转换、QAM 调制、IPTS 压扩算法、添加循环前缀和数模转换等,在接收端实现相反的处理得到原始的二进制数据。相干光通信系统中电-光、光-电信号的转换以及光纤信道的传输通过 Optisystem 软件来完成。

### 3 仿真结果及性能分析

仿真实验的主要参数设置如下:信息速率为 20Gb/s;子载波数为 256,调制方式为 4QAM,循环前缀长度为 32,OFDM 符号长度为 200;LD 的频率为 193.1THz,线宽为 0.1MHz;光纤采用波长为 1550nm 的单模光纤,色散系数为 16.75ps/nm/km,非线性系数为  $2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ ,有效面积为  $80 \mu\text{m}^2$ ,损耗为 0.2dB/km;掺铒光纤放大器的增益为 16dB,噪声系数为 4dB,传输距离为 320km。

#### 3.1 抑制 PAPR 性能分析

图 4 为采用不同算法降低 OFDM 信号得到的 CCDF 曲线图,从图中可以看出原始的 OFDM 信号具有较高的 PAPR, $\mu$  律压扩算法和 IPTS 算法都能降低信号的 PAPR,但是,本文所提出的 IPTS 压扩算法降低 PAPR 效果最好,并且随着迭代次数  $m$  的增加抑制信号 PAPR 效果越来越好。在 CCDF 值为  $10^{-4}$  时,IPTS 压扩算法( $m=3, V=4, \mu=2$ )相对于 IPTS( $V=4$ )和  $\mu$  律压扩算法( $\mu=2$ )分别优化了 3.53dB 和 1.21dB。

#### 3.2 系统误码率分析

IPTS 压扩算法( $m=3, V=4, \mu=2$ )不同调制方式下误码率随光信噪比的变换如图 5 所示,当调制方式为

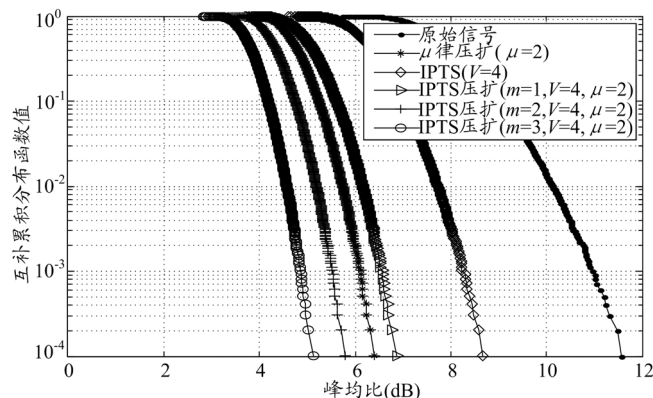


图 4 不同算法下的 CCDF 随 PAPR 的变化

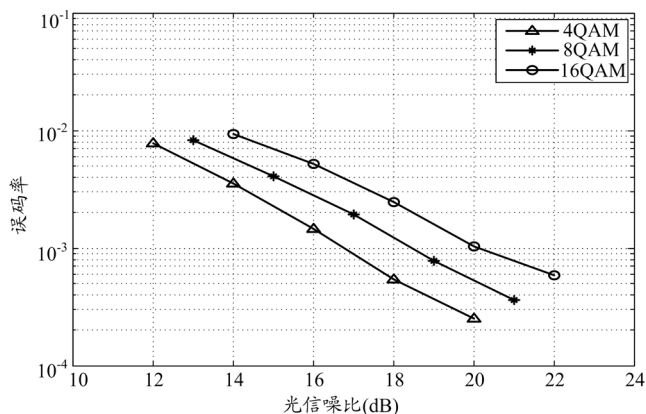


图 5 不同调制方式下误码率随光信噪比的变化

4QAM 时,系统的误码率性能最好;当调制方式为 MQAM 时,随着调制阶数的不断增大,系统的误码率性能逐渐降低。因为随着调制阶数的增大,信号调制后的最小间距越来越小,产生错误的几率变大。综合考虑频带利用率和传输容量问题,本文采用 4QAM 的调制方式。

CO-OFDM 系统采用不同算法后系统的光信噪比和误码率之间的关系如图 6 所示,随着光信噪比的不断增大,系统的误码率逐渐减小。在相同的光信噪比情况下, $\mu$  律压扩算法( $\mu=2$ )的误码率最高,IPTS 算法( $V=4$ )最低,IPTS 压扩算法介于两者之间,但是随着迭代次数  $m$  的增加,IPTS 压扩算法降低系统误码率的性能有所下降。在误码率为  $10^{-3}$  时,IPTS 压扩算法( $m=3, V=4, \mu=2$ )的光信噪比为 18.34dB,IPTS 算法( $V=4$ )的光信噪比为 15.83dB, $\mu$  律压扩算法( $\mu=2$ )的光信噪比为 17.76dB,IPTS 压扩算法需要的光信噪比比 IPTS 算法和  $\mu$  律压扩算法分别增加了 2.51dB 和 0.58dB。由此可见,IPTS 压扩算法是以牺牲系统的误码率性能为代价来换取更好的 PAPR 性能。

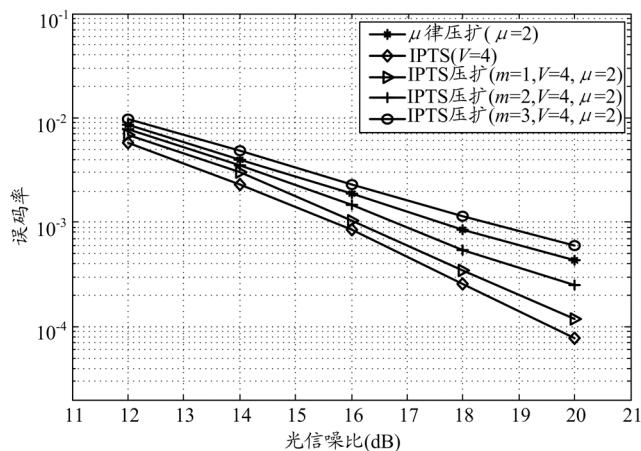


图 6 不同算法下误码率随光信噪比的变化



不同算法下误码率随传输距离的变化如图 7 所示,在光信噪比为 20dB 的情况下,随着传输距离的增加系统的误码率越来越高。但是,IPTS 压扩算法在迭代次数  $m=1$  或 2 的情况下明显优于  $\mu$  律压扩算法( $\mu=2$ )。当传输距离由原来的 320km 变为 640km 时,IPTS 压扩算法仍然优于  $\mu$  律压扩算法( $\mu=2$ ),只是这种优势会随着传输距离的增加有所减小。

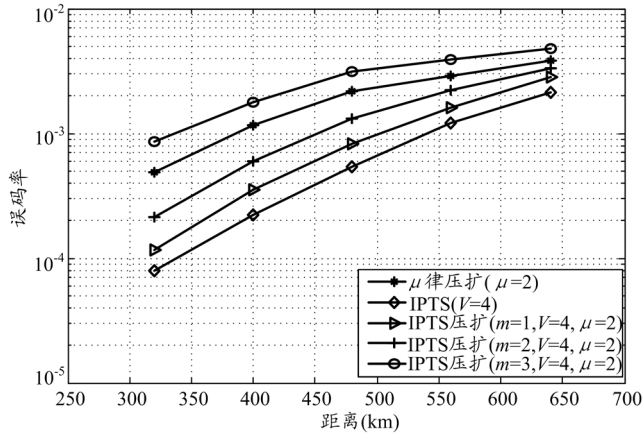


图 7 不同算法下误码率随传输距离的变化

### 3.3 算法复杂度分析

不同算法的复杂度如表 1 所示,结合图 4 和图 6 可以看出,在相同的子块分割数目下 IPTS 压扩算法通过多次重复迭代压扩能够更好地降低信号的 PAPR,并且随着迭代次数的增加复杂度变化较小(保持每次只增加一次 FFT 变换的复杂度),具有很好的可行性。

表 1 不同算法的复杂度

| 算法                           | 复加                                                              | 复乘                                                    |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $\mu$ 律压扩( $\mu=2$ )         | $\frac{N}{2} \cdot \lg \frac{N}{2}$                             | $N \cdot \lg \frac{N}{2}$                             |
| IPTS( $V=4$ )                | $4N \cdot \lg \frac{N}{2}$                                      | $8N \cdot \lg \frac{N}{2}$                            |
| IPTS 压扩( $m=1, V=4, \mu=2$ ) | $4N \cdot \lg \frac{N}{2} + \frac{N}{2} \cdot \lg \frac{N}{2}$  | $8N \cdot \lg \frac{N}{2} + N \cdot \lg \frac{N}{2}$  |
| IPTS 压扩( $m=2, V=4, \mu=2$ ) | $4N \cdot \lg \frac{N}{2} + N \cdot \lg \frac{N}{2}$            | $8N \cdot \lg \frac{N}{2} + 2N \cdot \lg \frac{N}{2}$ |
| IPTS 压扩( $m=3, V=4, \mu=2$ ) | $4N \cdot \lg \frac{N}{2} + \frac{3N}{2} \cdot \lg \frac{N}{2}$ | $8N \cdot \lg \frac{N}{2} + 3N \cdot \lg \frac{N}{2}$ |

## 4 结束语

IPTS 压扩算法在保持了原来 IPTS 算法计算复杂度较低的基础上,提出了重复迭代压扩的算法,通过多次循环迭代能够进一步降低信号的 PAPR,但是随着迭代次数的增加,IPTS 压扩算法的误码率性能会有所下降。通过基于 Matlab 和 Optisystem 软件搭建的 CO-OFDM 系统可以看出,IPTS 压扩算法能够降低电域 OFDM 信号的 PAPR,减小高 PAPR 对器件的非线性影响,系统的误码率性能介于两种单一算法之间。由此可见,随着迭代次数的增加,IPTS 压扩算法是以牺牲了一定的误码率性能为代价来提高系统的 PAPR 性能。由于该方法是在射频发射端对信号进行降低 PAPR 的处理,因此,IPTS 压扩算法同样适用于光 OFDM 系统,并不受接收端检测方式的影响。

### 参考文献:

- [1] XIAO Y, CHEN M, LI F, et al. PAPR reduction based on chaos combined with SLM technique in optical OFDM IM/DD system [J]. Optical Fiber Technology, 2014(21): 81–86.
- [2] 王凌子,唐先锋,张晓光,等. PDM-CO-OFDM 系统中基于判决引导与判决反馈的盲相位估计算法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305001-1–0305001-5.
- [3] 巨阿强,戈立军,李春雨,等. 基于压缩感知的 OFDM 系统非线性失真恢复算法[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2015(4): 21–25.
- [4] MAZAHIR S, SHEIKH SA. On Companding Schemes for PAPR Reduction in OFDM Systems Employing Higher Order QAM [J]. IEEE Transaction on Broadcasting, 2016, 62(3): 716–726.
- [5] 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(50): 1891–1901.
- [6] LI L, QU D. Joint decoding of LDPC code and phase factors for OFDM systems with PTS PAPR reduction[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2013, 62(1): 444–449.
- [7] KIM K H. On the Shift Value Set of Cyclic Shifted Sequences for PAPR Reduction in OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2016, 62(2): 496–500.
- [8] XIAO J J, YU J Y, LI X Y, et al. Hadamard transform combined with companding transform technique for PAPR reduction in an optical direct-detection OFDM system[J]. IEEE Journal of Optical Communication and Networking, 2012, 4(10): 709–714.
- [9] 刘颖慧,童峥嵘,曹晔,等. A novel joint technique for PAPR reduction in CO-OFDM systems[J]. Optoelectronics Letters, 2014, 10(4): 277–280.
- [10] 李勇支,肖江南,陈明,等. 基于虚拟子载波降低光正交频分复用信号峰均比功率比新方法的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 115–121.
- [11] LIU X, BUCHALI F. Intra-symbol frequency-domain averaging based channel estimation for coherent optical OFDM [J]. Opt Express, 2008, 16(26): 21944–21957.