

基于虚拟子载波降低光正交频分复用信号峰均功率比新方法的实验研究

李勇志 肖江南 陈 明 陈 林 余建军

(湖南大学信息科学与工程学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 光正交频分复用(O-OFDM)是一种有效降低符号间干扰的高速数据调制技术。在技术实现过程中若峰值平均功率比(PAPR)过高,发射机和接收机内部放大器线性要求就会很高,从而限制了 O-OFDM 调制技术的实际应用。总结了目前国内外降低 PAPR 的多种技术,在此基础上,给出了 PAPR 的定义和分布,并提出了一种新的基于虚拟子载波来降低光 OFDM 系统 PAPR 的方法,该方法在发送端不需要传输 OFDM 信号的边带信息,接收端不需增加额外处理。实验和仿真结果证明,经 200 km 标准单模光纤(SSMF)传输后,该方法既能更加有效地抑制 O-OFDM 的 PAPR,又能改善系统的误码率(BER)性能和降低传统虚拟子载波技术计算的复杂度。

关键词 光通信;光正交频分复用;峰均功率比;虚拟子载波;数据子载波;光传输

中图分类号 TN929.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706020

Experiment for Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing System Peak to Average Power Ratio Reduction with a New Scheme Using Dummy Subcarriers

Li Yongzhi Xiao Jiangnan Chen Ming Chen Lin Yu Jianjun

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Optical orthogonal frequency division multiplexing (O-OFDM) is an efficient modulation technology for reduction of intersymbol interference. There is a strict requirement for the linear characteristics of amplifiers in transmitters and receivers if the peak to average power ratio (PAPR) is high in the implementation of O-OFDM modulation technology, which limits the practical employment of O-OFDM. Various techniques on reducing the PAPR are summarized, and the definition and distribution of PAPR are introduced. In order to contain the PAPR in O-OFDM systems, a new scheme for optical OFDM system PAPR reduction using dummy subcarrier is presented, which does not need to send sideband information in the transmitter and does not need additional treatment in the receiver. The experimental results show that the method can not only reduce the PAPR and the complexity of the calculation, but also improve the bit error rate (BER) of the system when the O-OFDM signals transmits over 200 km standard single-mode fiber (SSMF).

Key words optical communications; optical orthogonal frequency division multiplexing; peak to average power ratio; dummy subcarrier; data subcarrier; optical transmission

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.4510

1 引 言

正交频分复用(OFDM)是一种性能优越、有效地对抗符号间干扰(ISI)和信道间干扰(ICI)的高速

数据传输技术,具有频谱效率高、对光纤链路的色散和偏振模色散抵抗性强、信号调制强和处理灵活等优点,因而 OFDM 技术被应用到光纤传输系

收稿日期: 2012-12-06; **收到修改稿日期**: 2013-01-22

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01A347)、国家自然科学基金(60977049)

作者简介: 李勇志(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤无线通信技术和光正交频分复用等方面的研究。

E-mail: liyongzhi@hnu.edu.cn

导师简介: 余建军(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤无线通信技术、光正交频分复用和光标记交换等方面的研究。E-mail: jy61@mail.gatech.edu (通信联系人)

统^[1-2]。光正交频分复用(O-OFDM)技术已成为下一代高速光通信系统的最具潜力的技术之一^[3-7]。

但是 OFDM 通信系统的主要缺点之一是 OFDM 信号的高峰值平均功率比(PAPR), O-OFDM通信系统存在同样的问题。O-OFDM 信号由 N 个独立的子载波叠加而成,当 N 足够大时,有些信号可能同相,而在幅度上叠加在一起从而产生很大的瞬时峰值幅度,导致出现较大的 PAPR。高 PAPR 对发射机和接收机内部放大器线性要求很高,在传输过程中不仅会引起严重的光纤克尔效应,降低传输系统的信噪比(SNR)^[8-12],而且会引起子载波间的交调干扰和带外功率辐射,从而导致整个 OFDM 系统性能下降。这对传输系统的线性范围提出了很高的要求。因此降低 PAPR 对 O-OFDM 技术应用具有关键意义。

近些年来,人们对 PAPR 降低技术做了大量的研究,提出了一些降低 PAPR 的方法,包括限幅类技术^[13-18]、编码类技术^[19]和概率类技术[子载波预留法(TR)^[20-21],子载波插入法(TI)^[20-21],星座图扩展法(ACE)^[22],部分传输序列法(PTS)^[23-26]和选择映射法(SLM)^[27-29]]等。这些减小 PAPR 的技术是以增加信号功率、增加误码率(BER, R_{BE})、降低数据速率或增加算法复杂度等为代价的。

传统的虚拟子载波方法是利用 OFDM 信号的

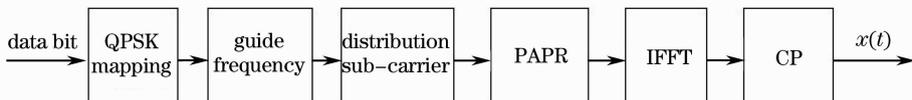


图 1 OFDM 基带信号产生原理框图

Fig. 1 Block diagram to produce the OFDM baseband signal

在一个符号时间间隔 T 内,功率归一化的 OFDM 基带信号表达式为

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \exp(j2\pi f_n t), \quad (1)$$

式中 $f_n = n/T$ 表示第 n 个子载波的载波频率, N 为 IFFT 点数, $X(n)$ 表示第 n 个子载波上的数据。

则 OFDM 信号的 PAPR 定义为

$$R_{\text{PAP}}[X(t)] = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2}{E[|x(t)|^2]}, \quad (2)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示期望。

通常采用互补积累分布函数(CCDF)来作为衡量 OFDM 系统中 PAPR 减小技术的一个指标,即用 CCDF 计算 PAPR 超过某一门限值 z 的概率。其定义为

所有虚拟子载波来抑制系统 PAPR,通过调整 OFDM 信号的相位和幅度使之在迭代次数内最大程度地与满足系统 PAPR 要求的期望信号相似。本文提出了一种新的基于虚拟子载波降低 O-OFDM 系统 PAPR 的方法,利用 OFDM 信号的指定位置部分虚拟子载波来抑制系统的 PAPR,通过调整 OFDM 信号部分位置的相位和幅度来抬升信号峰值功率和信号平均功率,并使信号平均功率提升的幅度大一些,从而使系统 PAPR 得到抑制。由于虚拟子载波不承载信息,因此不会导致任何数据子载波间干扰和增加接收端的负担,并且具有发送端不需要传输边带信息、接收端不需增加额外处理等优点。与传统的虚拟子载波方法^[30]比较,实验和仿真结果表明,新虚拟子载波方法只需迭代 3 次,就可很好地降低 O-OFDM 信号 PAPR,还可明显提高光传输系统中接收机的灵敏度,降低计算复杂度,提高系统的误码性能。

2 PAPR 的定义和提出的算法描述

2.1 PAPR 的定义

OFDM 基带信号产生的原理框图如图 1 所示,图中 QPSK 为四相相移键控信号调制,IFFT 为快速傅里叶逆变换,CP 为循环前缀。

$$P\{R_{\text{PAP}} > z\} = 1 - P\{R_{\text{PAP}} \leq z\} = 1 - [1 - \exp(-z)]^N, \quad (3)$$

式中 z 与某一门限值 R_{PAP0} (dB) 之间的关系为 $R_{\text{PAP0}} = 10 \lg z$ 。

2.2 新的虚拟子载波技术

在多载波系统中,一般 N 个子载波不会全部传输信息,用于传递数据的子载波称为数据子载波,部分不携带信号的 OFDM 子载波提供保护频带,这些子载波称为虚拟子载波。提出的新虚拟子载波技术的基本原理是挑选出部分虚拟子载波作为预留虚拟子载波放置适当的数据,使 O-OFDM 时域信号的峰值功率和平均功率同时增大,但平均功率增大的幅度稍大些,从而达到降低 O-OFDM 信号 PAPR 的目的。由于虚拟子载波不承载信息,所以新虚拟子载波技术不会增加接收端的负担。

如图 2 所示,新虚拟子载波技术生成的 OFDM 信号子载波数为 256,选用其中 96×2 个子载波传输数据,8 个导频,余下 56 个为虚拟子载波。

设定虚拟子载波预留 $2 \times N_d$ 个位置用于插入适当的数据($N_d \in N; N_d \leq 27$),位置如图 2 中阴影部分所示,子载波分配后的 O-OFDM 频域信号为 X 。

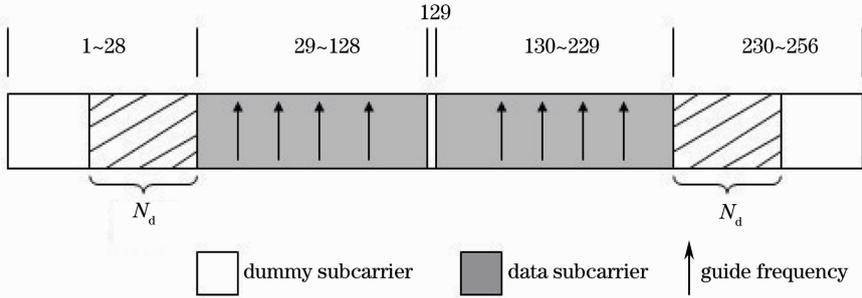


图 2 子载波分配详图

Fig. 2 Subcarrier allocation

X 和 X_d 经过 IFFT 变换后的时域信号分别为 x 和 x_d 。其中 X_d 长度为 256,且对应图 2 中阴影位置的数据为虚拟子载波所对应的数据矢量。设预设时域信号为 x_{TH} ,即满足幅度为常数 u ,相位与 O-OFDM 时域信号 x 保持一致的要求,则

$$x_d = x_{TH} - x. \quad (4)$$

根据虚拟子载波技术原理,将 X_d 的图 2 中阴影位置对应坐标的数据保留,其他位置对应的数据置为零后加入 X ,得到新的 OFDM 频域信号。

的 O-OFDM 频域信号 X 经过 IFFT 变换得到初始化 O-OFDM 时域信号 x_i ,根据上文提到的预设时域信号要求设置信号 x_{TH} 。用 x_{TH} 减去 x_i ,得到信号 $x_{d,i}$ 。接着将 $x_{d,i}$ 进行快速傅里叶变换(FFT),并将其如图 2 所示的阴影位置的数据保留,其他位置的数据都置为零,与信号子载波的数据相加后再进行适当幅度调整得到新的 O-OFDM 频域信号,如此反复迭代 i 次。对这 i 个 O-OFDM 信号进行 PAPR 性能比较,选择性能最好的 OFDM 信号进行输出。

本文算法的迭代流程如图 3 所示。图 3 中输入

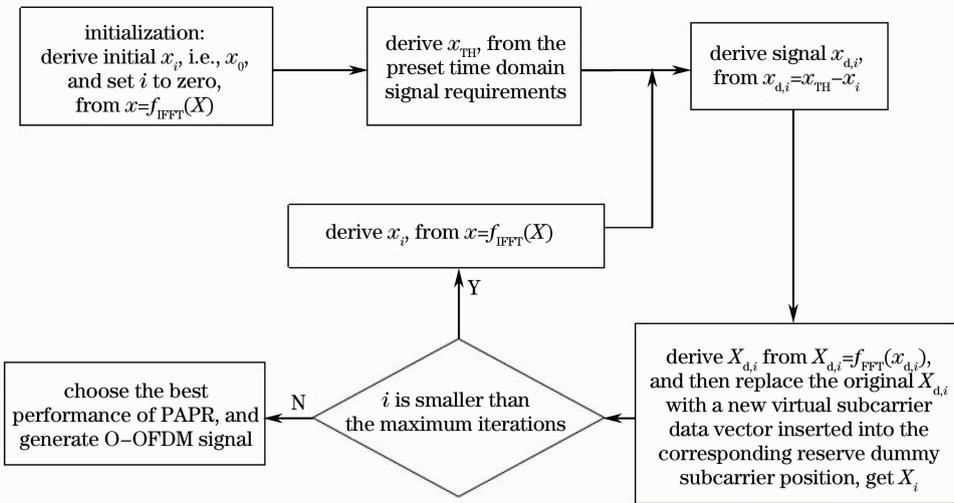


图 3 改进的虚拟子载波技术迭代流程图

Fig. 3 Iterative flow chart of the improved dummy subcarrier technology

3 实验和仿真结果

根据以上理论,利用虚拟子载波技术抑制系统 PAPR 算法中需要考虑 3 个参数,分别是迭代次数 i ,预留虚拟子载波数 N_d 和预设时域信号 x_{TH} 幅度 u 。为了选定适当的参数,对直接调制 O-OFDM 传

输系统进行了仿真,仿真条件如下:OFDM 信号由随机信号源产生,QPSK 调制方式,时域信号 x_{TH} 幅度 $u=2.2$,传输 200 km 标准单模光纤(SSMF),接收光功率为 -24 dBm。

由图 4(a)可知,当选取预留虚拟子载波数 N_d

为 24 时,迭代两次的性能效果最好;当选取预留虚拟子载波数 N_d 为 21 时,迭代 3 次和 4 次的性能效果接近。由于每次迭代需对信号进行一次 FFT 和 IFFT 运算,为了降低复杂度算法,故选择参数迭代次数为 2 次或 3 次。从图 4(b)得出当迭代 2 次时,

预留虚拟子载波数 N_d 为 24 的性能效果最好;当迭代 3 次时,预留虚拟子载波数 N_d 为 21 的性能效果最好。故传输系统采用以下两种方案:1) $i=2$, $N_d=24$; 2) $i=3$, $N_d=21$ 。

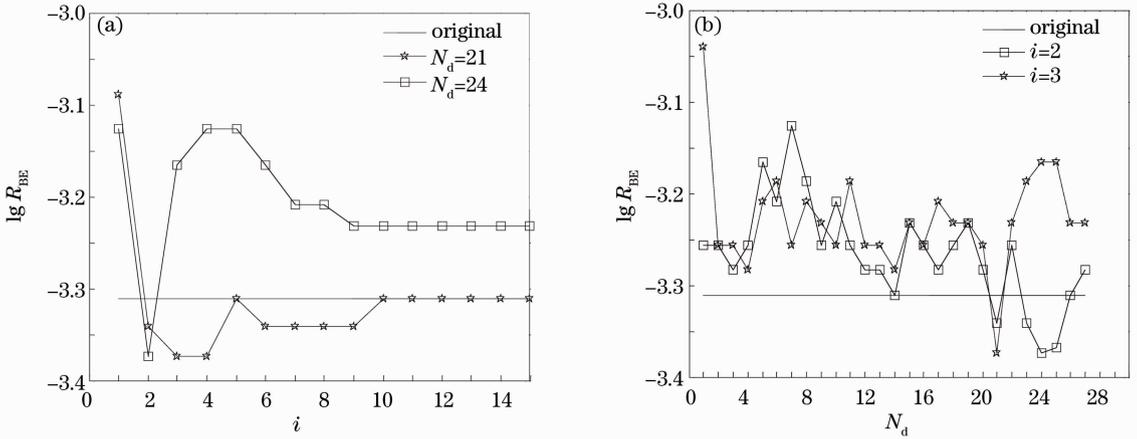


图 4 传输 200 km SSMF 下不同迭代次数或预留虚拟子载波数对系统性能的影响。(a) 迭代次数; (b) 预留虚拟子载波数

Fig. 4 Influence of various N_d and i on the system performance when transmitting over 200 km SSMF. (a) Iteration times i ; (b) reserve dummy subcarrier number N_d

首先按照 O-OFDM 传输实验平台的数据帧结构构成帧,通过仿真比较以上两种方案抑制 PAPR 的效果,CCDF 曲线仿真结果如图 5 所示。图 5(a)中给出了第一种方案中幅度 u 分别为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.9, 2.1, 2.5 这 8 种情况的比较,图 5(b)中给出了第二种方案中幅度 u 分别为 0.3,

0.4, 0.7, 0.9, 1.8, 2.2, 2.3 这 7 种情况的比较,从图 5 可看出虚拟子载波技术的两种方案都可以降低 O-OFDM 信号 PAPR。同原始 O-OFDM 信号 PAPR 相比,预设时域信号 x_{TH} 幅度 u 越大, PAPR 降低得越多。

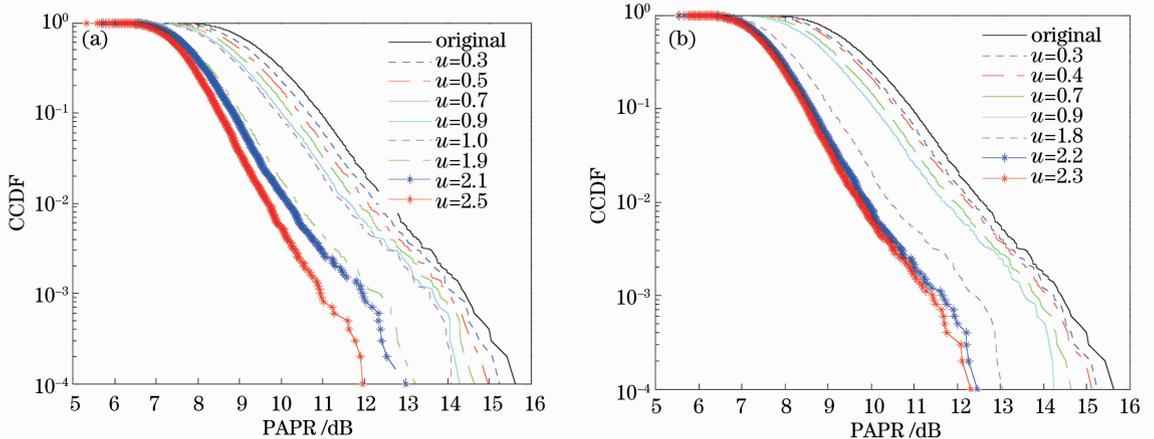


图 5 两种方案 CCDF 仿真曲线比较图。(a) $i=2$, $N_d=24$; (b) $i=3$, $N_d=21$

Fig. 5 CCDF performance comparison of two programs. (a) $i=2$, $N_d=24$; (b) $i=3$, $N_d=21$

为了进一步验证本技术抑制 PAPR 算法对实际光纤传输 OFDM 系统误码性能的影响,下面将分别对以上两种方案进行直接调制 O-OFDM 传输系统的实验,实验传输系统如图 6 所示,发送端

OFDM 信号通过任意波形发生器(AWG)产生, AWG 发送速率为 2.5 GS/s, 5000 个 OFDM 信号由随机信号源产生, QPSK 调制方式, 每个 OFDM 信号子载波数为 256 bit, 循环前缀为 32 bit, OFDM

信号通过强度调制器(MZM)加载到光载波上,传输 200 km SSMF 后在接收端通过光电二极管(PD)将光信号转变为电信号,通过实时示波器(TDS)对信号进行采集。最后对采集的信号经 Matlab 软件离

线处理分析性能。

采用虚拟子载波两种方案抑制 PAPR 系统的误码性能曲线如图 7 所示。

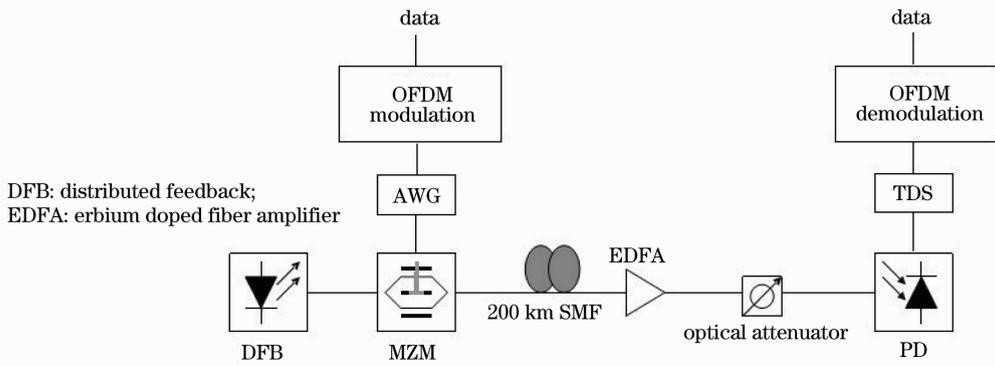


图 6 光 OFDM 传输直接检测系统实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of the optical OFDM transmission system

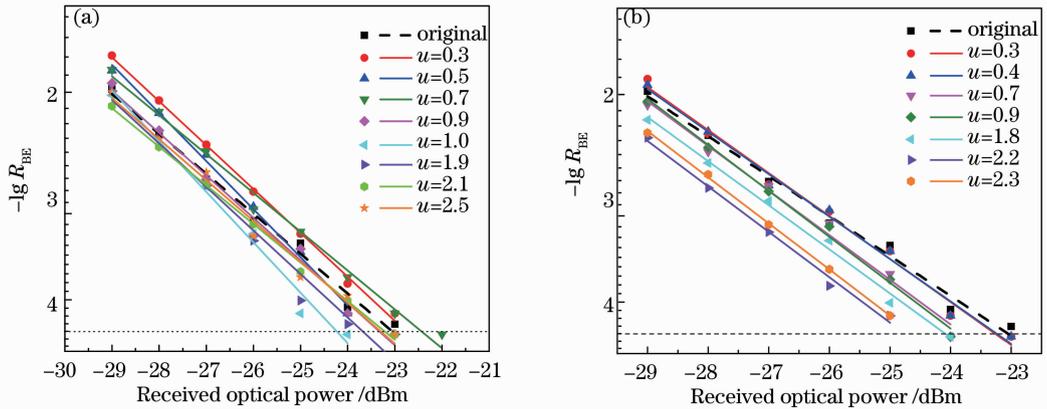


图 7 两种方案 BER 曲线比较图。(a) $i=2, N_d=24$; (b) $i=3, N_d=21$

Fig. 7 Comparison of bit error rates of the two programs. (a) $i=2, N_d=24$; (b) $i=3, N_d=21$

图 7(a)描述的是虚拟子载波技术第一种方案,可以发现,当幅度 $u=0.3, 0.7$ 时,系统的误码性能不如没有采用算法的系统性能好。而当幅度 $u=0.5, 0.9, 2.1, 2.5$ 时,在接收光功率大于 -26 dBm 时系统的误码性能优于原来的系统 0.2 dB 左右;当幅度 $u=1.9$ 时,在误码率为 $10^{-4.4}$ 数量级时接收灵敏度可提高 0.7 dB 左右;当幅度 $u=1$ 时,在误码率为 $10^{-4.4}$ 数量级时接收灵敏度可提高 1.25 dB 左右,因此合理选择预设时域信号 x_{TH} 的幅度 u , 可达到降低信号的 PAPR、同时提高系统的误码性能的目的。

图 7(b)描述的是虚拟子载波技术第二种方案,当幅度 $u=0.3, 0.4$ 时,在接收光功率大于 -23 dBm 时系统的误码性能比没有采用该算法的系统性能好一点。而当幅度 $u=0.7, 0.9, 1.8$ 时,在误码率为 $10^{-4.4}$ 数量级时接收灵敏度可提高 1 dB 左右;当幅

度 $u=2.2, 2.3$ 时,系统的误码性能明显优于没有使用该方法时的原始 OFDM 信号系统,在误码率为 $10^{-4.4}$ 数量级时接收灵敏度可提高 2 dB 左右,同样验证了通过合理选择预设时域信号 x_{TH} 幅度 u , 可以达到降低信号的 PAPR, 同时提高系统的误码性能的目的。

通过以上实验结果分析可知,与未使用该技术的原始 O-OFDM 信号相比,采用虚拟子载波技术,随着预设时域信号 x_{TH} 幅度 u 的增加,系统的 PAPR 抑制性能会明显增强,误码率性能具有一定的下降趋势,因此通过合理选择预设时域信号 x_{TH} 幅度 u 既可获得比较理想的 PAPR 抑制性能,又能得到满意的 BER 性能,从而在 O-OFDM 信号 PAPR 和 BER 性能之间实现一个适当的折中。通过实际光传输实验结果表明,选择参数 $i=3, N_d=21, u=2.2$ 为一种较好的性能折中方案,该条件下

算法只需迭代 3 次,降低了算法复杂度,在降低 OFDM 信号 PAPR 的同时可以显著提高传输系统的误码性能,在 CCDF 为 10^{-4} 时可降低 PAPR 约 3.2 dB,同时在误码率 $10^{-4.4}$ 数量级时,可提高接收机灵敏度 2 dB 左右。

4 结 论

提出了一种新的基于虚拟子载波的抑制 OFDM 信号 PAPR 的算法。相比其他多载波系统 PAPR 抑制方法,该算法不需要发送需严格保护的边带信息且不会对信号带来畸变。本传输系统通过合理选择算法的参数可有效地降低 O-OFDM 信号的 PAPR 约 3.2 dB,同时系统误码率性能也明显改善 2 dB。与传统虚拟子载波方法相比,该方法能够使传输系统得到更好的误码率性能,并且只需迭代 3 次,有效地降低了计算复杂度,具有很好的实时性。

参 考 文 献

- Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze, *et al.*. An experimental system of direct-detection optical OFDM transmission system [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(3): 554-557.
陈 林, 曹子峥, 董 泽, 等. 直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(3): 554-557.
- Wang Jing, Cao Zizheng, Zhou Hui, *et al.*. A wavelength division multiplexing radio-over-fiber system with 58 GHz optical orthogonal frequency division multiplexing millimeter-wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1274-1278.
王 晶, 曹子峥, 周 慧, 等. 承载正交频分复用信号的 58 GHz 光载毫米波波分复用光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1274-1278.
- N E Jolley, H Kee, R Rickard, *et al.*. Generation and propagation of a 1550 nm 10 Gbit/s optical orthogonal frequency division multiplexed signal over 1000 m of multimode fibre using a directly modulated DFB [C]. *OFC/NFOEC 2005*, 2005, 319-321.
- Xia Minmin, Dong Ze, Cao Zizheng, *et al.*. Performance comparison of 40 GHz optical millimeter wave with OFDM signal generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1586-1591.
夏敏敏, 董 泽, 曹子峥, 等. 光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载 OFDM 毫米波信号的传输性能比较[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1586-1591
- Armstrong Jean. OFDM for optical communications [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(3): 189-204.
- Li Xinying, Hou Chunling, Zhang Junwen, *et al.*. IQ imbalance in optical DD-OFDM back-to-back and transmission systems[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3): 66-71.
李欣颖, 侯春宁, 张俊文, 等. 在光 DD-OFDM 背靠背和传输系统中研究 IQ 不平衡[J]. *光电工程*, 2010, 37(3): 66-71.
- M R H Mondal, K R Oanta, J Armstrong. Performance of two dimensional asymmetrically clipped optical OFDM [C]. *IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications*, 2010, 955-999.
- Jean Armstrong, J C S Brendon. Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN [J]. *IEEE Commun. Lett*, 2008, 12(5): 343-345.

- Wang Xin, Chen Lin, Cao Zizheng. Influence of modulation depth on optical subcarrier OFDM system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0506002.
王 鑫, 陈 林, 曹子峥. 调制深度对副载波正交频分复用光传输系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0506002.
- Qi Yang, Yan Tang, Yiran Ma, *et al.*. Experimental demonstration and numerical simulation of 107-Gb/s high spectral efficiency coherent optical OFDM [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, 27(3): 168-176.
- Mei Jiawei, Xiao Xiaosheng, Xu Mingrui, *et al.*. Wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application on the demodulation of fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1114003.
梅佳伟, 肖晓晟, 许明睿, 等. 基于色散调谐宽带扫描光纤激光器及其在光纤光栅解调中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1114003.
- T Jiang, Y Imai. An overview: peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals [J]. *IEEE Trans Broadcasting*, 2008, 54(2): 257-268.
- Shangkang Deng, Maochao Lin. OFDM PAPR reduction using clipping with distortion control [C]. *International Conference on Communications*, 2005, 2563-2567.
- Chen Hongxian, Chen Lin, Yu Jianjun, *et al.*. Experimental investigation for 60 GHz radio-over-fiber system employing orthogonal frequency-division multiplexing format based on companding transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306002.
陈虹先, 陈 林, 余建军, 等. 基于压扩变换的 60 GHz 正交频分复用光载无线 [J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306002.
- Jiangnan Xiao, Jianjun Yu, Xinying Li, *et al.*. Hadamard transform combined with companding transform technique for PAPR reduction in an optical direct-detection OFDM system [J]. *J Opt Commun Networking*, 2012, 4(10): 709-714.
- Kim Jacwoon, Shin Yoan. An effective clipping companding scheme for PAPR reduction of OFDM signal [C]. *IEEE International Conference on Communications*, 2008, 668-672.
- Goebel Bernhard, Hellerbrand Stephan, Haufe Norman, *et al.*. PAPR reduction techniques for coherent optical OFDM transmission [C]. *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2009, 36-39.
- Yang Pinlu, Hu Aiqun. Piecewise-linear companding transform for peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals [J]. *J Communications*, 2011, 32(8): 1-7.
杨品露, 胡爱群. 降低 OFDM 信号峰均功率比的分段线性压扩变换 [J]. *通信学报*, 2011, 32(8): 1-7.
- Xue Shichun, Hou Jia. A quasi-optimum PAPR coding for OFDM system [J]. *Communications Technology*, 2008, 41(12): 218-220.
薛世春, 侯 嘉. 一种准优化 PAPR 编码在 OFDM 系统中的应用 [J]. *通信技术*, 2008, 41(12): 218-220.
- S K Brian, L J Douglas. An active-set approach for OFDM PAR reduction via tone reservation [J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2004, 52(2): 495-504.
- Qiu Shaofeng, Si Yanan, Chen Peng. Reserved subcarrier for PAPR reduction in optical OFDM systems [J]. *Study on Optical Communications*, 2011, 37(1): 9-11.
邱绍峰, 司亚楠, 陈 鹏. 新预留子载波方法降低光 OFDM 系统的 PAPR [J]. *光通信研究*, 2011, 37(1): 9-11.
- B S Krongold, D L Jones. PAR reduction in OFDM via active constellation extension [J]. *IEEE Trans Broadcasting*, 2003, 49(3): 258-268.
- O J Kwon, Y H Ha. Multi-carrier PAP reduction method using sub-optimal PTS with threshold [J]. *IEEE Trans Broadcasting*, 2003, 49(2): 232-236.
- Yi Dan, Luo Renze, Ge Yonghua, *et al.*. Comparison of PTS

- algorithms for PAPR reduction[J]. *Communications Technology*, 2011, 44(6): 38–42.
- 易丹, 罗仁泽, 戈勇华, 等. 降低 PAPR 的 PTS 算法比较[J]. *通信技术*, 2011, 44(6): 38–42.
- 25 Wang Jinxiang, Wu Xinchun, Mao Zhigang, *et al.*. Low complexity PTS scheme for PAPR reduction of OFDM signals [J]. *J Xidian University*, 2010, 37(2): 326–333.
- 王进祥, 吴新春, 毛志刚, 等. 降低 OFDM 信号 PAPR 的低复杂度 PTS 方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2010, 37(2): 326–333.
- 26 Zhu Xiaodong, Zhu Guangxi, Lin Pei. A scheme based on linear transformation to reduce PAPR in the OFDM systems [J]. *Computer Engineering & Science*, 2009, 31(7): 109–111.
- 朱晓东, 朱光喜, 林沛. 基于线性变换降低 OFDM 系统中峰均功率比的方法[J]. *计算机工程与科学*, 2009, 31(7): 109–111.
- 27 Thanh Nguyen Trung, L Lampe. On trellis shaping for PAR reduction in OFDM systems [J]. *IEEE Trans Commun*, 2007, 55(9): 1678–1682.
- 28 Stéphane Y Le Goff, Boon Kien Khoo, Charalampos C Tsimeridis, *et al.*. A novel selected mapping technique for PAPR reduction in OFDM systems [J]. *IEEE Trans Commun.*, 2008, 56(11): 1775–1779.
- 29 Chen Lin, Fang Yong. A new scheme for PAPR reduction using quasi-cyclic LDPC code and SLM[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(9): 1341–1345.
- 陈琳, 方勇. 基于准循环 LDPC 码和 SLM 法降低 PAPR 的新方法[J]. *信号处理*, 2012, 28(9): 1341–1345.
- 30 Hu Dengpeng, Zhang Eryang. PAPR reduction for OFDM system with dummy subcarrier and its low complexity algorithm [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(3): 394–399.
- 胡登鹏, 张尔扬. 利用虚拟子载波抑制 OFDM 系统 PAPR 及其低复杂度算法[J]. *信号处理*, 2010, 26(3): 394–399.

栏目编辑：王晓球