

基于非对称限幅法降低 OOFDM 系统的 PAPR

陈 琳^{1,2}, 方 勇¹, 汪 敏¹

(1. 上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072;
2. 上海电力学院 计算机与信息工程学院, 上海 200090)

摘要:为降低 OOFDM(光正交频分复用)系统中的高 PAPR(峰均功率比),文章提出了一种基于非对称限幅法的抑制算法,其核心思想是通过门限电平去除信号负项并对信号峰值进行限幅,产生满足 OOFDM 系统要求的正、实基带信号,同时联合滤波技术避免较大 PAPR 的出现。仿真结果表明,该方法既能有效地改善 PAPR 特性,又能保证系统获得可靠的误码率性能。

关键词:光正交频分复用;峰均功率比;非对称限幅法

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-8788(2011)06-0035-03

Peak-to-average power ratio reduction in OOFDM systems using asymmetrically clipping technique

Chen Lin^{1,2}, Fang Yong¹, Wang Min¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Key Laboratory of Specialty Fiber Optics
and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Shanghai University of Electronic Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In this paper, an asymmetrically clipping technique is proposed for the reduction of the Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) in Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OOFDM) systems. Its main idea is to generate positive and real baseband signals that satisfy the requirements of the OOFDM systems by deleting the negative terms of the signals and clipping their peak values with the threshold levels and at the same time avoid high PAPR in the OOFDM systems with the filtering technique. Simulation results show that this algorithm can both effectively improve the PAPR features and ensure reliable system BER performance.

Key words: OOFDM; PAPR; asymmetrically clipping technique

0 引 言

OOFDM(光正交频分复用)系统融合了无线 OFDM(正交频分复用)技术和光通信的优点,具有传输速率高、抗色散能力强和频谱利用率高等优势,是目前高速光传输领域的研究重点之一。

OOFDM 信号由多个子信道信号叠加而成,因此如果多个信号的相位一致,所得到的叠加信号的瞬时功率就会远远高于信号的平均功率,导致出现较大的 PAPR(峰均功率比)。这对发射机的线性范围提出了很高的要求,也容易引入信号失真和符号间干扰,降低系统的信噪比。同时,在对光源进行调制时,产生的光信号随输入的电信号成比例变化,这就要求进行光强调制之前的电信号必须符合光通信系统的特点。因此必须降低 PAPR。

现有的 PAPR 抑制算法主要是针对 OFDM 无线通信系统提出的,不能直接应用到光通信系统中。本文从信号畸变的角度,提出了一种满足 OOFDM

系统实信号和正信号要求的非对称限幅抑制 PAPR 算法。通过非对称限幅法,保留了 OFDM 信号的非负部分,同时对信号峰值进行限幅滤波,提高了发送光功率的效率,降低了高 PAPR 出现的概率,保证了 OOFDM 通信系统的传输性能。

1 OOFDM 系统的基本结构

一个典型的 OOFDM 系统包括 OFDM 基带信号发射机、电/光变换、光纤线路、光/电检测和 OFDM 基带信号接收机 5 个部分。根据接收端的实现方式不同,可以分为相干检测 OOFDM 系统与直接检测 OOFDM 系统两类。由于直接检测 OOFDM 系统实现简单、成本低,得到了较为广泛的研究和应用。本文以 IM/DD(强度调制/直接检测)系统为模型展开研究,具体框图如图 1 所示。

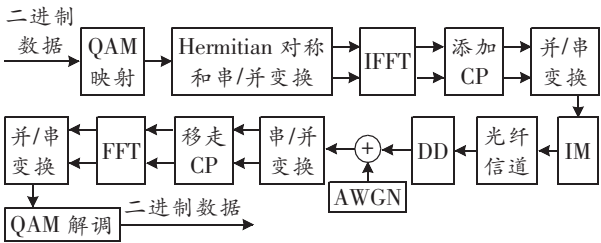
在无线通信系统中,输入的二进制数据经过 OFDM 调制后,输出的信号为复数信号。而在 IM/DD 的 OOFDM 系统中,由于接收端采用直接检测,

收稿日期:2011-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61132004);上海市重点学科项目(S30108);上海市科委重点实验室项目(08DZ2231100)

作者简介:陈琳(1978-),女,江苏常州人,讲师,博士研究生,研究方向为 OFDM 信号关键技术、光纤通信技术。

通讯作者:方勇,教授,E-mail: yfang@staff.shu.edu.cn



AWGN:加性高斯白噪声;QAM:正交幅度调制;CP:循环前缀;
FFT:快速傅里叶变换;IFFT:快速傅里叶逆变换

图 1 IM/DD OOFDM 系统框图

产生的光信号强度与输入的电信号有关,输入的电信号要求是实信号。因此必须通过 Hermitian 对称算法^[1]添加共轭数据,使 IFFT 输出的基带 OFDM 信号为实信号。

OOFDM 技术引入到光纤通信系统后,仍然保留了 CP。加入 CP 可以提高抗色散能力,使得 OOFDM 系统比传统的光通信系统对色散有更好的容忍度,同时也降低了系统对定时同步的要求。经过添加 CP、并/串变换后,激光器进行 IM,将电信号转化为光强信号,耦合入光纤信道传输。在接收端,首先由光电检测器把光信号转化为电信号,此时光接收机中会引入检测器的散粒噪声,因此用 AWGN 来表示噪声信号模型^[2]。然后采用与发送端相应的反变换即可恢复出原始的数据信号。

2 基于非对称限幅法降低 OOFDM 系统的 PAPR

在一个周期内,一个包含 N 个子载波的 OFDM 信号可表示为

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \cdot e^{j2\pi n \Delta f t} \quad 0 \leq t \leq NT, \quad (1)$$

式中, Δf 为子载波间隔; X_n 是第 n 个子载波的调制数据信息; NT 表示有效数据块时间周期。

在光通信系统中,必须对 IFFT 之前的复信号作 Hermitian 对称,实现 OFDM 信号的实数化。具体算法要求输入到 IFFT 的一组数据的后半部分是前半部分的倒序共轭复数,即

$$X_0, X_1, \dots, X_{N/2-1}, X_{N/2}, X_{N/2+1}^*, \dots, X_1^*, \quad (2)$$

其中, X_n^* 表示 X_n 的共轭复数,输入的 X_0 和 $X_{N/2}$ 分别对应直流和奈奎斯特频率分量,一般设置为 0。

PAPR^[3]是指 OFDM 信号的最大峰值功率与其平均功率之比,即

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2}{\text{mean}_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2} \quad (3)$$

若子载波数为 N , 理论上的 $PAPR_{\max} = 10\log_{10} N$

(dB)。如子载波数为 16 的基带 OFDM 系统, PAPR 理论上的最大值为 12 dB。这是一种极端情况, PAPR 通常不会达到这个数值,因此人们更为关心的是 PAPR 的统计特性。

在 OOFDM 系统中, OFDM 信号是由多个统计独立的正弦信号合成的。当子载波数 N 较大时(一般取 $N \geq 64$), $x(t)$ 的实部和虚部都渐近服从高斯分布。因此, OFDM 信号的幅度服从瑞利分布,其功率服从均值为 0、自由度为 2 的 χ^2 分布。PAPR 小于某一门限值 z 的概率分布,即 CDF(累积分布函数)的数学表达式为 $P(PAPR \leq z) = (F(z))^N = (1 - e^{-z})^N$ 。实际应用中,习惯用 CCDF(互补累积分布函数)来表征 OFDM 信号 PAPR 分布,其数学表达式为^[3]

$$P(PAPR > z) = 1 - (1 - e^{-z})^N \quad (4)$$

对于 IM/DD 光通信系统,需将信息携带在光强上,实现光的强度调制,因此必须将传统的双极性 OFDM 信号转变为正信号。实现信号的单极性,可以通过加载直流偏压,使 OFDM 信号位于轴上方,但是这会使得信号平均发送光功率提高,产生大的 PAPR,造成光功率利用率低、光信噪比低,降低了系统性能^[4-5]。因此,本文提出利用非对称限幅法,只保留信号的非负部分,并对信号峰值进行限幅滤波,如图 2 所示。

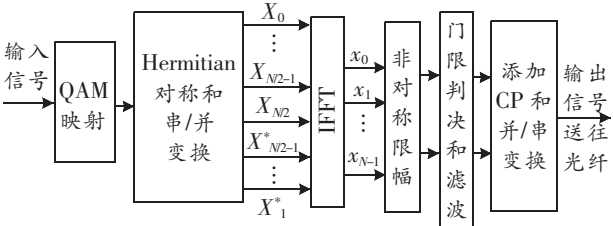


图 2 非对称限幅降低 OOFDM 系统 PAPR 的方案

具体算法如下:

(1) 对输入的 2 进制序列进行 QAM 星座映射。若采用 16QAM(4 阶正交调幅),则发送端信息对应的星座图为 $\{\pm 1, \pm j\}, \{\pm 3, \pm 3j\}$ 。

(2) 对星座映射的复数信号添加共轭数据构成 Hermitian 对称,并进行串/并转换后送往 IFFT 模块。

(3) 对 IFFT 后产生的双极性实数抽样值进行非对称限幅。通过在零值处限幅将其变为单极性的正信号,即

$$x' = \begin{cases} x & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

并对得到的正实数信号 x' 设定门限值 A , 判决准则

如下：

$$y = \begin{cases} x' & \text{if } 0 \leq x' \leq A \\ A & \text{if } x' > A \end{cases} \quad (6)$$

定义限幅率为 $CR = A / \sqrt{P_{in}}$ ，其中 P_{in} 为限幅前 OFDM 信号的平均功率。门限判决后进行频域滤波，得到基带 OFDM 信号。频域滤波可以减轻限幅造成的带外能量辐射，抑制带外噪声。

(4) 为非对称限幅滤波后的基带 OFDM 正实数信号添加 CP，并/串转变后送往 IM/DD 光纤通信系统。

3 仿真结果及分析

假设 OOFDM 系统传输数据的子载波数 $N = 128$ ，星座映射为 16QAM， $CP = 8$ 。假设发射端和接收端同步良好，对该算法进行仿真，其 CCDF 曲线如图 3 所示。仿真次数为 1 000 次，采用 4 倍的过采样，保证采样值能够逼近于连续信号。

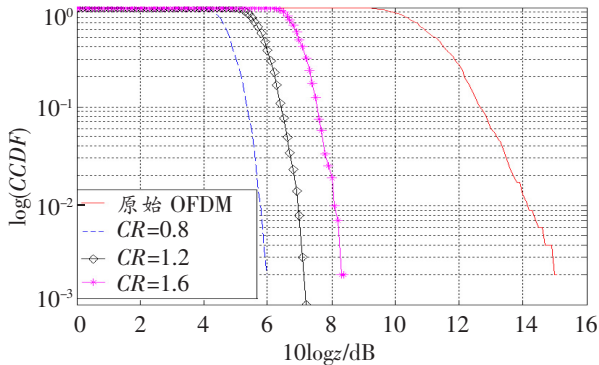
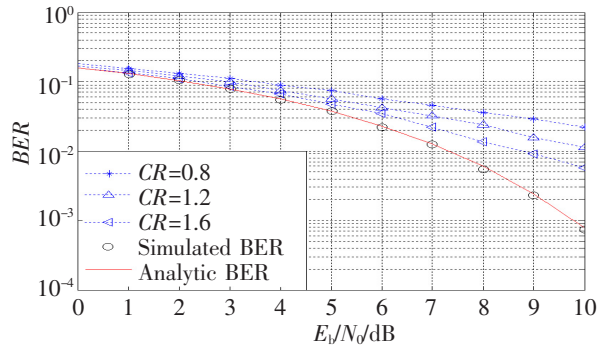


图 3 采用非对称限幅降低 PAPR 的 CCDF 曲线

从仿真结果可以看出：与原始的 OFDM 信号相比，在 $\log(CCDF)$ 为 10^{-2} 处，当限幅率 $CR = 1.6$ 、 1.2 和 0.8 时，能将系统的 PAPR 从 14.1 dB 分别下降到 8 、 7 和 5.8 dB，大大改善了系统性能；且随着限幅率 CR 的减小，PAPR 的抑制性能越来越优异。由仿真得到的数据可知，该方案可以明显改善 OOFDM 系统的 PAPR。

图 4 所示为采用非对称限幅算法的 OOFDM 系统 BER 随 E_b/N_0 (E_b 为单位比特码的能量， N_0 为噪声功率谱密度)变化的仿真曲线。可以看出，与原始的 OFDM 信号相比，采用限幅滤波后，BER 性能有一定的下降，但仍具有良好的瀑布特性；随着限幅率 CR 的上升，误码率特性曲线更接近于理想值。

通过分析可知，采用非对称限幅法后，随着限幅率 CR 的减小，系统的 PAPR 抑制性能越来越明显，但误码率性能会有一定的下降。因此通过合理地选



Simulated BER 表示仿真得到的原始 OFDM 信号的 BER 曲线；Analytic BER 表示理论上的原始 OFDM 信号的 BER 曲线。

图 4 系统 BER 性能曲线

择限幅率系数，既可以获得理想的 PAPR 抑制性能，又能得到满意的 BER 曲线，从而在 OOFDM 信号的 PAPR 和 BER 性能之间达到折衷。

4 结束语

OFDM 技术在光通信领域中的应用是近年来的研究热点。针对 IM/DD OOFDM 通信系统中的高 PAPR，本文提出了一种非对称限幅抑制算法。该算法能够有效地降低 OOFDM 信号的 PAPR，同时系统误码率性能也没有明显恶化。仿真实验证明，该算法简单有效，具有良好的应用前景。

参考文献：

- [1] Schmidt B J C, Lowery A J, Armstrong J. Experimental Demonstrations of Electronic Dispersion Compensation for Long-Haul Transmission Using Direct-Detection Optical OFDM [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(1):196-203.
- [2] Mondal M Rubaiyat H, Oanta Kusha R, Armstrong J. Performance of Two Dimensional Asymmetrically Clipped Optical OFDM [A]. IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications [C]. Miami, United states: IEEE Computer Society, 2010. 995-999.
- [3] Han S H, Lee J H. An Overview of Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for Multicarrier Transmission [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.
- [4] Armstrong J, Lowery A J. Power Efficient Optical OFDM [J]. Electronics Letters, 2006, 42(6): 370-371.
- [5] Armstrong J, Schmidt B J C. Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(5):343-345.