

新预留子载波方法降低光 OFDM 系统的 PAPR

邱绍峰, 司亚楠, 陈 鹏

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要:在光正交频分复用(OFDM)系统中较大峰均功率比(PAPR)的信号将会产生严重的畸变,导致系统误码率性能严重下降,为抑制光 OFDM 系统的 PAPR,提出了一种新预留子载波方法。仿真结果表明,该方法与传统预留子载波方法相比,其对 PAPR 的抑制作用不会随着调制阶数的增大而减小,具有很高的稳定性和更小的运算复杂度,更适用于自适应调制方式的光 OFDM 系统。

关键词:光正交频分复用;峰均功率比;预留子载波

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-8788(2011)01-0009-03

Reserved subcarriers for PAPR reduction in optical OFDM systems

Qiu Shaofeng, Si Yanan, Chen Peng

(School of Communication and Information Engineering,

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In optical OFDM systems, signals with a large PAPR will bring about serious distortions, resulting in dramatic reduction of system BER performance. In order to reduce PAPR in OFDM systems, a new method of reserved subcarriers is presented. The simulation results show that compared with the traditional method, its PAPR reduction function is not decreased with the increase of modulation order. Characteristic of high stability and less computational complexity, it is more suitable for adaptive modulation-based optical OFDM systems.

Key words: optical OFDM; PAPR; reserved subcarrier

0 引 言

正交频分复用(OFDM)作为一种高速传输数据的多载波调制技术,由于其抗多径衰落能力强、频谱利用率高优点被广泛研究,并被认为是第四代移动通信系统必不可少的关键技术之一。近几年来,光 OFDM 也逐渐成为人们研究的热点^[1],有望成为长距离大容量光纤通信系统中的首选调制格式。在光 OFDM 系统中,由于放大器、调制器和光纤本身的非线性,较大的峰均功率比(PAPR)将会引起信号的畸变,使系统的性能严重下降。所以,光 OFDM 虽然有着很好的发展前景,但同样面临着如何解决高 PAPR 的问题。目前,降低 OFDM 信号 PAPR 的方法基本可以分为信号预畸变技术、编码类技术和概率类技术。这几类技术虽然都可以有效抑制 PAPR,但每种方法都存在着缺陷。信号预畸变技术最直接最简单,它直接对时域信号的峰值进行非线性操作,但会使信号产生严重畸变,从而降低系统的频谱效率和误码率性能。编码类技术为线性过程,它利用编码避开那些会出现信号峰值的码字,将原来的信息码字映射到一个具有较好 PAPR 特

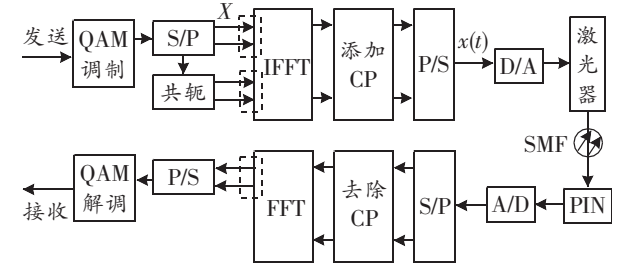
性的传输码集上。该类技术虽不会使信号产生畸变,但其缺点是复杂度很高而且只适用于子载波较少的情况。概率类技术利用努力降低信号峰值出现的概率来有效降低信号的 PAPR 值,其缺点在于计算复杂度太高。预留子载波方法与以上几种技术相比具有非常明显的优势,它不传送任何边带信息,能够较好地抑制 PAPR 且对系统的误码率性能影响小,利用预留子载波方法来降低 PAPR 成为研究的热点^[2]。基于传统预留子载波方法,虽然大多数改进的预留子载波方法能够很好地抑制 PAPR,但它们都不是针对光 OFDM 系统的,无法满足光 OFDM 系统对输出信号为实信号^[3]的要求。所以,有必要针对光 OFDM 系统的特点提出新的预留子载波方法。

1 光 OFDM 系统

1.1 光 OFDM 系统结构

基于强度调制/直接检测的光 OFDM 单模光纤(SMF)通信系统如图 1 所示。一般在无线通信系统中输入信号经过 OFDM 调制后输出信号为复信号,而在强度调制/直接检测的光 OFDM 系统中则

要求为实信号,这就要求输入的数据向量具有 Hermitian 对称的性质^[3]。在图 1 中,调制后的信号经过串/并(S/P)转换,添加共轭数据构成 Hermitian 对称,再经过快速傅里叶逆变换(IFFT),加循环前缀(CP),并/串(P/S)变换和数/模(D/A)转换后,经过激光器由电信号转化为光信号,耦合入 SMF 中传输。接收端首先由光电探测器(PIN)把光信号转化为电信号,然后采取与发送端相对应的变换即可恢复出原始信号。



注:FFT:快速傅里叶变换; QAM:正交调幅
图 1 强度调制/直接检测的 OFDM SMF 通信系统

1.2 OFDM 信号的 PAPR

一个周期内的 OFDM 信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cdot e^{j2\pi nt/T}, t \in [0, T] \quad (1)$$

若 1 个周期 T 内, $x(t)$ 以采样频率 $f_s = 1/\Delta t$ ($\Delta t = T/N$) 被采样,则可得 N 个采样点。设 $t = k\Delta t$, $nt/T = nk/N$, 则

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cdot e^{j2\pi nk/N}, k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (2)$$

式中, $X(n)$ 为不同载波上的频域数据; $x(k)$ 表示时域信号的离散抽样点; $e^{j2\pi nk/N}$ 表示了不同的子载波。式(2)正是序列 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 的 N 点离散傅里叶逆变换(IDFT)的结果。在光 OFDM 系统中,根据中心极限定理,对于较大子载波数 N ,信号 $x(t)$ 的样点服从高斯分布,如果 N 个子载波的信号均以相同的相位相加就会产生一个 OFDM 信号的峰值功率,从而带来较大的 PAPR。PAPR 可以被定义为信号的瞬时峰值功率与平均功率的比值(以 dB 为单位),即

$$PAPR(\text{dB}) = 10\lg \frac{\max\{|x_k|^2\}}{E\{|x_k|^2\}} \quad (3)$$

2 新预留子载波算法

在传统预留子载波方案^[4]中,将多组不同的频域数据分别放在预留子载波上,与有用数据子载波

上的数据进行 N 点的 IFFT 运算,从而得到多组 PAPR 不同的时域信号,从中选择 PAPR 最小的一组数据进行传输。 $[c_{4^L}, \dots, c_2, c_1]$ 为多组不同的频域数据。传统预留子载波方案一般采用的相位集为 $\{1+j, 1-j, -1+j, -1-j\}$,当预留子载波数为 L 时,则需 4^L 次 N 点 IFFT 运算,从而得到具有较小 PAPR 的序列,但计算复杂度很大,随着 L 的增大,复杂度会进一步增加。

在强度调制/直接检测的 OFDM SMF 通信系统中,其时域信号为实信号,依据此特点,提出利用时域峰值信号的反馈得到预留子载波处能够与峰值信号相抵消的频域数据,通过消峰来达到降低 PAPR 的目的。新预留子载波方案从图 1 中的 IFFT 之前开始并最终得到新的频域数据反馈到 IFFT 的输入端,其算法流程如图 2 所示。

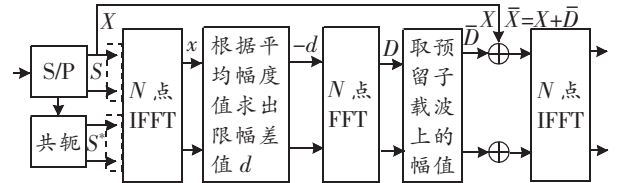


图 2 新预留子载波方案

新预留子载波算法实现步骤如下:

(1) 有用子载波数据 S 与其共轭数据 S^* 复成长度为 N 的频域信号序列 X ,其中预留子载波处的频域信号为 0。

(2) 对频域信号 X 进行 IFFT 运算,得到时域信号 x 。

(3) 根据时域信号 x 的平均幅度值 $\text{mean}(|x|)$ 求出限幅差值 d :

$$\begin{aligned} &[x_i - \text{mean}(|x|), \quad x_i > \text{mean}(|x|) \\ d_i = &\{x_i + \text{mean}(|x|), \quad x_i < -\text{mean}(|x|), \\ &0, \quad \text{其他} \end{aligned} \quad (4)$$

$$d = [d_0 \dots d_i \dots d_{N-1}]^T \quad (i = 0, 1, \dots, N-1) \quad (5)$$

(4) 将 d 取反后进行 FFT 运算,得到反向限幅差值的频域信号 D ,并且只保留预留子载波处的数据,其他置 0,得到预留子载波数据 $\bar{D}$ 。

(5) 将 $\bar{D}$ 与 X 合并从而得到新的频域数据 $\bar{X} = X + \bar{D}$ 。

新预留子载波方法只需 1 次 N 点 FFT 和 1 次 N 点的 IFFT 运算就可以得到具有较小 PAPR 的数据序列,所以与传统预留子载波方法相比其复杂度大大降低。

3 仿真及结果分析

3.1 激光器模型

在光 OFDM 系统中,采用垂直腔面发射激光器 (VCSEL),其速率方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \Gamma g_0 (N - N_0) (1 - \epsilon S) S + \frac{\Gamma \beta N}{\tau_n} - \frac{S}{\tau_p} \\ \frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N}{\tau_n} - g_0 (N - N_0) (1 - \epsilon S) S \end{cases} \quad (6)$$

式中, Γ 是限制因子; ϵ 是增益饱和系数; τ_p 是光子寿命; N 是透明载流子密度; I 为注入电流; V 为有源区体积; S 为光子密度; e 为电子常量; g_0 为光增益系数; N_0 为阈值载流子浓度; β 为自发辐射因子; τ_n 为电子平均寿命。VCSEL 具有低阈值、易于测试和易于与光纤进行高效率耦合的特点,能够在系统中完成光电转化过程。激光器输出功率可表示为

$$P = SV\eta hc / (\Gamma \tau_p \lambda_0) = kS. \quad (7)$$

式中, h 为普朗克常数; c 为光速; λ_0 为激光器辐射波长。

假设温度 $T = 300$ K,材料为 GaAs, 仿真参数参考文献[5],有源区折射率 $n_R = 3.6$,激光器辐射波长 $\lambda_0 = 1.31 \mu\text{m}$,自发辐射因子 $\beta = 4 \times 10^{-4}$,光增益系数 $g_0 = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^3$,阈值载流子浓度 $N_0 = 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。由以上参数得到注入电流与输出光功率的关系曲线,如图 3 所示。当注入电流 < 15 mA 时,激光器发射功率比较微弱,增长幅度较小,主要是自发辐射的非相干荧光;当注入电流 > 15 mA 时,光功率迅速增大,注入电流与输出光功率基本保持线性关系,表明器件已经进入受激发射状态。

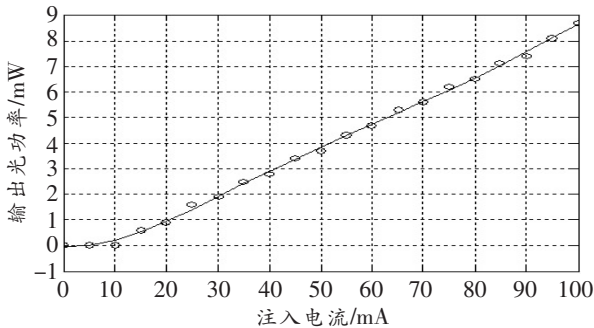


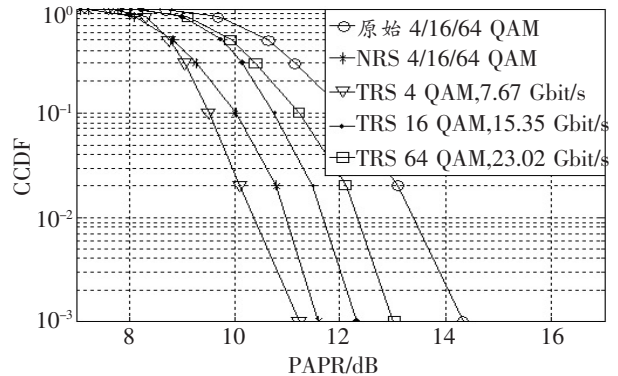
图 3 注入电流与输出光功率关系曲线图

3.2 性能仿真分析

仿真中使用的光 OFDM 系统传输数据的子载波数为 200,IFFT/FFT 的点数 N 为 512,导频数为 21,预留子载波数 L 为 32(子载波占用率 $L/N = 6.3\%$), L/N 控制在 $5\% \sim 10\%$,循环前缀为 64,

信道采用 SMF 信道,调制方式为 4 QAM、16 QAM 和 64 QAM,其对应的信号速率分别为 7.67、15.35 和 23.02 Gbit/s,假设发射端和接收端同步良好。

PAPR 是一个随机变量,我们通常采用 PAPR 的互补累积分布函数 (CCDF) 表示 OFDM 系统的 PAPR 性能。相同概率的情况下, PAPR 值越小说明其抑制 PAPR 的性能越好。图 4 中分别显示了原始序列、利用新预留子载波方法和传统预留子载波方法得到序列的 CCDF 性能曲线。在 CCDF 为 10^{-3} 时,利用传统预留子载波方法得到序列的 PAPR 与原始序列的 PAPR 相比分别降低了 3.2 dB(4 QAM)、2.1 dB(16 QAM) 和 1.4 dB(64 QAM),可以看出随着调制阶数的增加,传统预留子载波方法对系统 PAPR 的抑制性能不再明显;新预留子载波方法使系统的 PAPR 降低了 3 dB,在 16 QAM 和 64 QAM 调制方式下,其性能都要优于传统预留子载波方法,并且不会随着调制阶数的增加对 PAPR 的抑制性能下降,呈现出了稳定的性能。



注: TRS 为传统预留子载波方案; NRS 为新预留子载波方案
图 4 PAPR 的互补累积分布函数图

图 5 给出了各种调制方式下的光 OFDM 系统误码率曲线图,采用新预留子载波方法的光 OFDM

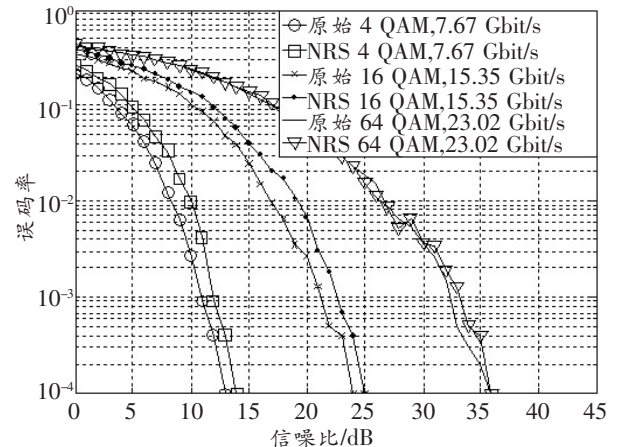


图 5 光 OFDM 系统的误码率性能曲线