

抑制 OFDM 系统峰值再生的边带信息传输算法

杨 刚, 黄思宁, 姜 勇, 李玉山

(西安电子科技大学 电路 CAD 所, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对在正交频分复用系统中传统边带信息传输方案会引起峰值再生及改变原始正交频分复用符号结构的缺点, 提出一种新的可以抑制峰值再生的边带信息传输算法. 该算法通过将相邻多个正交频分复用符号的边带信息集中到一个特定符号进行传输, 不影响原始正交频分复用符号结构. 通过仿真证实, 当互补累积分布函数为 10^{-3} 时, 采用新算法后峰值平均功率比大约降低 1.57 dB. 同时, 通过重复该特定符号来保证边带信息的准确性. 由于两个相同的符号之间具有最大的相关性, 因此可以用来实现正交频分复用符号的帧同步.

关键词: 正交频分复用; 峰均功率比; 边带信息; 最大似然估计

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)02-0190-04

Side information transmission method for peak re-growth reduction in the OFDM system

YANG Gang, HUANG Si-ning, JIANG Yong, LI Yu-shan

(Research Inst. of Electronic CAD, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel side information transmission method for PAPR (peak-to-average power ratio) reduction in OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) systems is presented, which can avoid the peak re-growth and the change of the structure of original OFDM signals which normally accompany the conventional methods. Simulation shows that the PAPR is reduced about 1.57 dB with the new method for the CCDF (complementary cumulative density function) of 10^{-3} . At the same time, the accuracy of the side information can be ensured by repeating this certain OFDM symbol. Because the two same symbols have the maximal relativity, this characteristic can be used to achieve frame synchronization. Simulation result shows that the proposed scheme can prominently reduce the occurrence of peak re-growth brought by the conventional methods and help to achieve frame synchronization.

Key Words: orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; side information; maximum-likelihood

1 OFDM 系统简介与 PAPR 的描述

正交频分复用 (OFDM) 的基本原理^[1]是将整个信道带宽分成多个相互正交的子信道, 每个子信道单独通过各自的子载波调制各自的信息符号. 由于每个子信道中的符号周期会相对增加, 因此可以减轻无线信道的多径延迟扩展的影响. 如果 N 表示子信道的个数, T 表示 OFDM 符号的宽度, d_i ($i=0, 1, \dots, N-1$) 是分配给每个子信道的数据符号 $r(t) = 1, |t| \leq T/2$, 则从 $t = t_s$ 开始的 OFDM 符号通常采用复等效基带信号描述:

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} d_i r\left(t - t_s - \frac{T}{2}\right) \exp\left(j2\pi \frac{i}{T}(t - t_s)\right) & , \quad t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0 & , \quad T + t_s < t < t_s \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2006-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(60172004); 教育部博士点基金(20010701003); 西安电子科技大学青年工作站基金(2002XD2009)

作者简介: 杨 刚(1967-), 男, 副教授, 博士.

其中实部和虚部分别对应于 OFDM 符号的同相和正交分量。

由于 OFDM 符号是由多个独立的经过调制的子载波信号相加而成的,这些随机变量(如频域 QAM 符号合成的信号)就会在时域产生类似高斯分布的曲线,即出现了较大的峰值功率,由此会带来较大的峰值平均功率比^[2,3](PAPR),简称峰均功率比。峰均功率比可以被定义为

$$R_{\text{PAPR}} = 10 \lg \left[\frac{\max(|x_n|^2)}{E(|x_n|^2)} \right], \quad (2)$$

其中 x_n 表示经过快速傅里叶反变换(IFFT)运算之后所得到的输出信号。针对如何降低峰均功率比,国内外进行了大量的研究,也提出了一些方法,例如部分传送序列^[4,5](PTS)和选择性映射^[6,7](SLM)等。现已提出的降低 PAPR 方法中有一类需要传输使信号能够被恢复成 PAPR 降低之前信号的信息,这些信息称为边带信息(SI)。

2 PTS 方法及传统边带信息传输算法介绍

PTS 方法的基本思想是:利用向量来定义数据符号 $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$;然后把向量 X 分成 V 组,分别由 $\{X_v, v=1, 2, \dots, V\}$ 来表示,其分割方法有多种,如相邻分割法、交织分割法、随机分割法等。假设每个分组中所包括的子载波数量是相同的,然后将这 V 个分组按 $X' = \sum_{v=1}^V b_v X_v$ 组合起来,其中 $\{b_v, v=1, 2, \dots, V\}$ 是加权系数,而且满足 $b_v = \exp(j\varphi_v)$ 以及 $\varphi_v \in [0, 2\pi]$,这被称为边带信息。然后对 X' 进行快速傅里叶反变换(IFFT),得到 $x' = \text{IFFT}\{X'\}$ 。根据 IFFT 的线性,可以利用 V 个单独的快速傅里叶反变换对各个分组

进行计算,得 $x' = \sum_{v=1}^V b_v \cdot \text{IFFT}\{X_v\} = \sum_{v=1}^V b_v \cdot X_v$,其中引入了 V 个部分发送序列, $X_v = \text{IFFT}\{X_v\}$ 。通过使用优化算法选择辅助加权系数 b_v ,使得峰值信号达到最佳化。PTS 的原理框图如图 1 所示。

显然,接收机必须确切地知道发送机所使用的具体旋转因子,该旋转因子通常通过边带信息的形式来通知接收机。因此边带信息必须被小心保护,仔细传输,以确保 PTS-OFDM 系统的正常工作。

传统的 PTS 边带信息传输方案^[8]主要有两种:(1)利用预留子载波;(2)利用预留子块。这两种方案无论哪种均是在 PAPR 优化后,将边带信息插入优化后的 OFDM 符号进行传输,因此会带来以下缺点:

- ①由于 PAPR 优化后,还须返回频域将边带信息插入,然后重新进行 IFFT 变换,因此会带来附加的硬件需求以及延时;
- ②不可避免地引起峰值再生^[9]。由于一般的 PTS 方法优化的是不含边带信息的数据符号的 PAPR,插入边带信息后不再继续优化,也即将原来符号的优化系数用于加入边带信息后的新符号,可能导致峰值再生,也即 PAPR 恶化。

3 抑制 OFDM 系统峰值再生的边带信息传输算法

为了避免传统边带信息传输算法的不足,笔者通过分析峰值再生的本质,提出一种新的抑制 OFDM 系统峰值再生的边带信息传输算法,提高 OFDM 系统的性能。笔者提出的抑制 OFDM 系统峰值再生的边带信息传输算法的实现过程为:在发送端中,对所有输入的 OFDM 符号进行与传统 PTS-OFDM 通信系统相同的 PTS 处理,以降低系统的 PAPR。这里假设任意一个 OFDM 符号在进行 PTS 处理时均被分割成 V 块,则一帧中任意一个 OFDM 符号均可表示为 $x_n = [x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,V}]$ 。

参照图 1,一个 OFDM 符号的边带信息,从第 1 块到第 V 块可以表示为 b_1, b_2, \dots, b_V 。因为一帧中包含

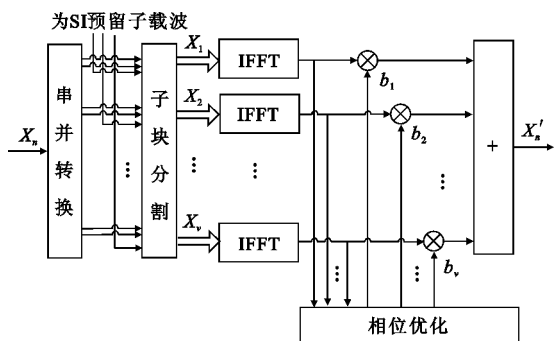


图 1 PTS 方法原理图

多个 OFDM 符号,为了方便描述将第 n 个 OFDM 符号的边带信息,从第 1 块到第 V 块分别表示为 $b_{n,1}, b_{n,2}, \dots, b_{n,V}$. 将一个 OFDM 符号帧的边带信息集中到一个特定的 OFDM 符号(这里称之为 B_{SI} 符号)统一传输, $B_{SI} = [B_1, B_2, \dots, B_m]$, $B_n = [b_{n,1}, b_{n,2}, \dots, b_{n,V}]$. 以 B_{SI} 符号复制 1 次为例,发射出去的 OFDM 符号帧 $z = [B_{SI}, B_{SI}, x_1, x_2, \dots, x_m]$. 具体算法实现过程如图 2 所示;帧结构如图 3 所示.

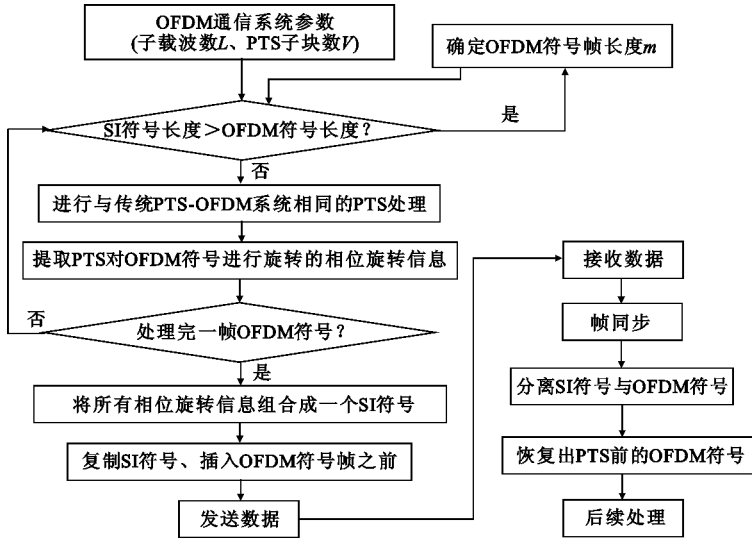


图 2 抑制 OFDM 系统峰值再生的边带信息传输算法流程图

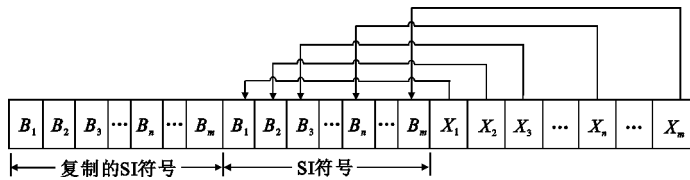


图 3 新算法帧结构示意图

B_{SI} 符号的长度由以下几个参数决定:PTS 子块数 V , 旋转因子的总个数 Q , 编码效率 R , 调制方式对应星座点个数 M 以及 OFDM 符号帧包含 OFDM 符号的个数 P . B_{SI} 符号的长度(对应为星座图上的点的个数) S 为

$$S = P \lceil \log_M(Q^{V-1}/R) \rceil \quad (3)$$

其中 $\lceil x \rceil$ 表示 x 上取整,即取大于或等于 x 并且最接近 x 的整数. 无论 B_{SI} 符号长度是否与 OFDM 符号长度相同,都将把它看作一个独立信号处理. 这是因为参数 V, Q, M, P, R 是由整个 PTS-OFDM 通信系统决定,并且在 PTS-OFDM 通信系统完成之后不会改变, B_{SI} 符号的长度也不会改变,即 B_{SI} 符号的长度不影响帧同步的设计. 但是需要注意的是 B_{SI} 符号的长度不能超过 OFDM 符号长度;当 B_{SI} 符号的长度小于 OFDM 符号的长度时可在 B_{SI} 符号后插入随机序列进行补充或使用其他手段使 B_{SI} 符号长度与 OFDM 符号长度相同.

该算法的帧同步的实现,是通过将携带边带信息的 B_{SI} 符号复制多次并作为帧头传输,从而可以保证该重要符号的准确传输. 同时可以利用重复传输的 OFDM 符号之间的相关性,使用最大似然方法实现符号定时同步技术进行同步,达到获取 OFDM 系统帧同步的目的. 式(4)的计算结果 \hat{d}_{ML} 就是使相关系数最大的采样点,即 OFDM 符号帧起始的采样点位置. m 表示任意采样点, S 表示 B_{SI} 符号的长度(以采样点个数衡量).

$$\hat{d}_{ML} = \arg \max \{ |\gamma(d)| - \rho \Phi(d) \} \quad (4)$$

其中 $\rho = \left| \frac{E\{x(k) x^*(k+S)\}}{[E\{|x(k)|^2\} E\{|x(k+S)|^2\}]^{1/2}} \right| = \left| \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} \right| = \frac{R_{SN}}{R_{SN} + 1}$, R_{SN} 为信噪比,

$$\gamma(m) = \sum_{k=m}^{m+S-1} x(k) x^*(k+S) \quad , \quad \Phi(m) = \frac{1}{2} \sum_{k=m}^{m+S-1} |x(k)|^2 + |x(k+S)|^2 \quad .$$

在笔者提出的抑制 OFDM 系统峰值再生的边带信息传输算法中,OFDM 符号的旋转因子越多,PTS 分割的

子块数越多,OFDM 符号帧包含 OFDM 符号的个数越多,表示边带信息所需的符号位也就越多,即 B_{SI} 符号所含符号位就越多.由于 B_{SI} 符号包含的符号位多,利用最大似然方法进行帧同步时由偶然因素得到高相关系数的概率就大大减少,帧同步效果会更好.然而另一方面,因为需要处理的边带信号太多,系统的时延自然就升高了.此时可根据系统能够接受的时延,通过改变 OFDM 符号的旋转因子数、PTS 分割的子块数以及 OFDM 符号帧包含 OFDM 符号的个数使该算法适应系统要求.

4 仿真结果及分析

表 1 和表 2 分别给出了边带信息传输与帧同步方法 PAPR 性能仿真条件及帧同步效果仿真条件.

表 1 边带信息传输与帧同步方法 PAPR 性能仿真条件

子载波数	调制方式	相位旋转空间	子块数	每帧包含的 OFDM 符号数	仿真包含的 OFDM 帧数
128	QPSK	$\{-1,+1\}$	8	32	150

表 2 帧同步效果仿真条件

子载波数	调制方式	相位旋转空间	子块数	每帧包含的 OFDM 符号数	帧偏移	信噪比	B_{SI} 符号重复次数
128	QPSK	$\{-1,+1\}$	8	32	50 个采样	10 dB	1

图 4 给出了在表 1 所列的仿真条件下 PAPR 的互补累积分布函数曲线图.该图用 PAPR 的互补累积分布函数(CCDF)来衡量 OFDM 系统的 PAPR 分布.即计算出 PAPR 超过某一门限值 $PAPR_0$ 的概率,得到的 CCDF 用数学式子可表示为 $\text{Prob}\{R_{PAPR} > R_{PAPR_0}\}$.仿真得出的 CCDF-PAPR 曲线与理论上不传输边带信息 PTS 处理得出的 CCDF-PAPR 曲线基本重合.从中可更清楚地看到:当 CCDF 为 10^{-3} 时,采用新算法后的 PAPR 为 8.25 dB,而采用传统边带信息传输算法的 PAPR 为 9.82 dB,前者的 PAPR 要比后者低 1.57 dB.

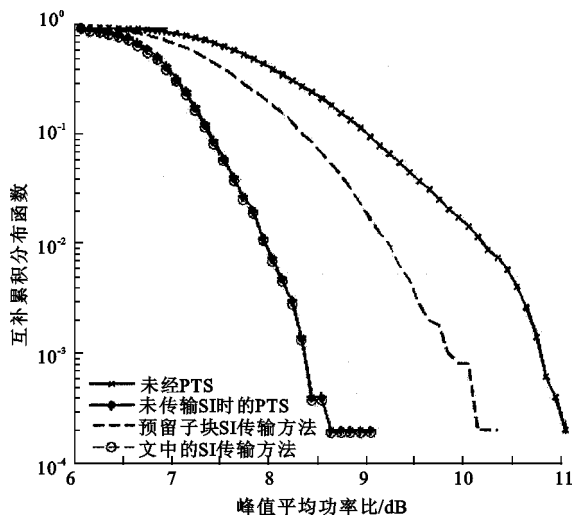


图 4 CCDF-PAPR 对比图

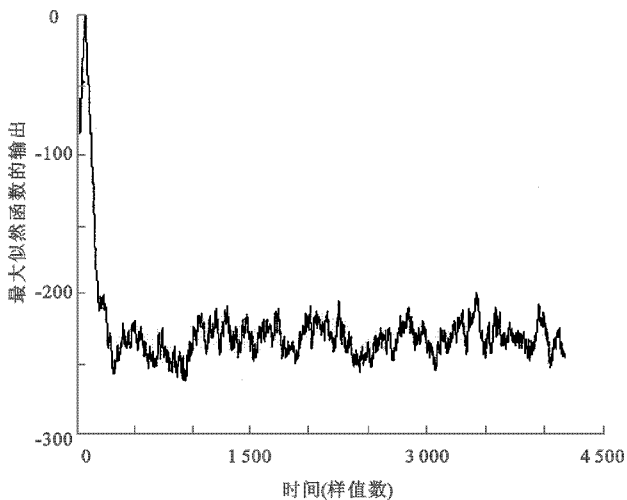


图 5 最大似然帧定时位置估计

图 5 给出了一个 OFDM 帧在表 2 所列的仿真条件下的最大似然函数的输出.该图用最大似然函数的输出来衡量帧同步的有效性,很明显地可看到:在整个仿真的采样范围内,利用最大似然方法计算出的连续 128 个采样点、相隔 128 个采样点的相关曲线图中,只在 OFDM 符号帧开始的第一个采样点的位置上计算出最大相关系数.

5 结束语

笔者提出了一种新颖的边带信息传输算法,将相邻的多个 OFDM 数据符号的边带信息集中到一个特定