

降低 OFDM 系统 PAPR 的 PTS 算法研究与 FPGA 实现

刘晓明, 姜荣庆

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

摘要:正交频分复用是一种多载波传输技术,在无线通信应用中有很好的发展前景。但是在 OFDM 中存在一个比较大的缺点:过高的峰值平均功率比。研究了 OFDM 系统中 PAPR 算法中的部分传输序列(Partial Transmit Sequence, PTS)算法及其峰均比的抑制性能,并在其基础上提出一种能够降低传统 PTS 算法复杂度的 m 序列 PTS 算法,并采用 MATLAB 仿真实验验证了算法的可行性。提出了在 FPGA 中实现的峰均比抑制模块设计方案并加以验证,结果证明此设计方案能够很好完成峰均比抑制功能。

关键词:正交频分复用;峰均功率比;部分传输序列;FPGA

中图分类号:TP311.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)11-0064-03

A Study of PTS Algorithm for PAPR of OFDM Reduction and FPGA Implementation

LIU Xiao-ming, JIANG Rong-qing

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: OFDM is a technique of multicarrier transmission, which has a good prospect in wireless communication. However, OFDM has a disadvantage: large peak-to-average power ratio. This paper mainly focuses on the study of the peak-to-average power ratio of Orthogonal Frequency Division Multiplexing reduction algorithm of partial Transmit Sequence, research PAPR performance, and propose a low-complexity of traditional PAPR using m -sequence PTS approaches, and prove the algorithm workable using MATLAB simulation. The paper proposes a design scheme which will be implemented in FPGA, the results show that the scheme can complete the reduction of peak-to-average power ratio performance perfectly.

Key words: OFDM; PAPR; PTS; FPGA

0 引言

正交频分复用(OFDM)^[1]就是把高速的数据流通过串并变换,然后分配到传输速率相对低的子信道中进行传输的一种多载波传输技术。但是 OFDM 技术也有其固有的高峰值平均功率比(PAPR)的问题^[2]。目前已有的降低 OFDM 信号 PAPR 值的方法大致可分为三类^[3]:第一类是信号预畸变技术,最常用的信号预畸变技术包括限幅法^[4]和压缩扩张方法^[5,6]。第二类是信号扰码技术,最常见的有选择性映射(SLM)^[7]和部分传输序列(PTS)^[8],对于 PTS 算法还提出了很多的改进的方法^[9~11],扰码技术最有希望解决 OFDM 系统中的 PAPR 问题。第三类是编码方法^[12],其基本

思想是将原来的信息码字映射到 PAPR 较小的序列来进行传输,从而避开会使 OFDM 信号出现峰值的码字。文中所研究的就是信号扰码技术中的部分传输序列算法。

1 OFDM 信号的峰均比定义及分布

OFDM 系统中的 PAPR 是指信号的峰值功率与平均功率的比值,则 OFDM 符号的 PAPR 可以认定为:

$$\text{PAPR(dB)} = 10 \lg \frac{\max_n \{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}} \quad (1)$$

其中 n 表示第 n 个子载波, x_n 表示经过 IFFT 运算之后所得到的输出信号,即:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{nk} \quad (2)$$

OFDM 符号的幅值($r_n = |a_n|$)服从概率密度为 $P_a(n) = 2r_n \cdot e^{-r_n^2}$ 的瑞利分布,从而得到其 CDF 为:

收稿日期:2010-03-09;修回日期:2010-06-05

作者简介:刘晓明(1963-),男,重庆人,博士后,教授,研究方向为扩频通信、宽带无线通信。

$$P(\text{Power} \leq z) = F_{\text{Power}}(z) = \int_0^z \exp(-y) dy = 1 - \exp(-z) \quad (3)$$

假设 OFDM 符号周期内每个采样值之间都是不相关的,从另一方面来衡量 CDF,即为 CCDF 分布函数:

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

2 部分传输序列算法研究

2.1 传统 PTS 算法

在传统的 PTS 算法中,首先利用向量来定义数据符号 $\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$ 。然后按照一定的分割方法(相邻分割,随机分割和交织交割)把向量 \mathbf{X} 分割为 V 组,然后将这 V 个分组按如下方式组合起来:

$$\mathbf{X}' = \sum_{v=1}^V b_v \mathbf{X}_v \quad (5)$$

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 $\varphi_v \in [0, 2\pi]$ 。

对 \mathbf{X}' 进行 IDFT 变换,再结合式(6),由于 IDFT 变换的线性特性,可以利用 V 个单独的 IDFT 变换,对每个分组进行计算:

$$\mathbf{x}' = \sum_{v=1}^V b_v \cdot \text{IDFT}\{\mathbf{X}_v\} = \sum_{v=1}^V b_v \cdot \mathbf{x}_v \quad (6)$$

其中引入了 V 个部分发送序列 $\mathbf{x}_v = \text{IDFT}\{\mathbf{X}_v\}$

图 1 为 PTS 算法的基本框图,将输的数据符号根据实际需要分为 V 组,通过中间过程的一些处理再将这些分组进行加权合并,从而达到减小峰均比的目的。

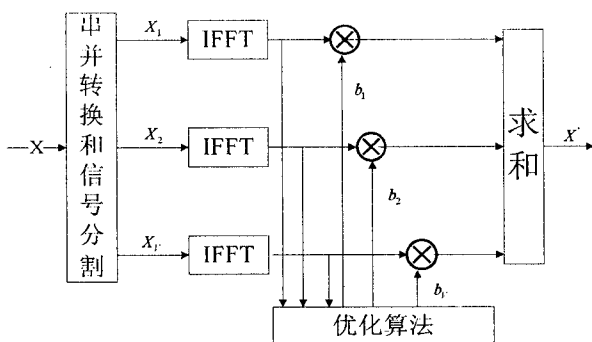


图 1 PTS 原理框图

从图中可以看到整个 PTS 算法的关键在于怎样来选择加权系数 $\{b_v, v = 1, 2, \dots, V\}$,从而使 OFDM 系统中的高峰均比得到降低。最优的加权系数满足下式:

$$\{b_1, b_2, \dots, b_V\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_V\}} \left(\max_{1 \leq n \leq N} \left| \sum_{v=1}^V b_v \cdot x_v \right|^2 \right) \quad (7)$$

2.2 m 序列 PTS

在 PTS-OFDM 系统中,分组数 V 一般为 2 的次

方,例如 $V = 2^n$ (n 是整数),长度为 $2^n - 1$ 的 m 序列^[13]可以应用到 PTS 算法中,如果按照一定的规则把这些 m 序列加入到发送序列中,这样就打散了传输信息一致性的问题,使得很高的峰值功率不再出现,并通过选择器选出 PAPR 最小的一组。

不失一般性,假设 $b_1 = 1$,那么还有 $V - 1$ 个辅助参数需要决定。如果知道了 n 位 m 序列的本原多项式,根据初始状态可以生成 $2^n - 1$ 个 m 序列,用生成的 m 序列代替 PTS 中的 $\{b_v, v = 1, 2, \dots, V\}$,则旋转相位序列 $\{b_v, v = 1, 2, \dots, V\}$ 的取值可以减少为 $V - 1$ 种;而在 b_v 的相位值在“1”和“-1”中取值时,传统 PTS 的旋转相位序列 $\{b_v, v = 1, 2, \dots, V\}$ 的取值共有 2^V 种,由此可以看到采用 m 序列代替 PTS 中的旋转相位序列能够有效降低传统 PTS 算法的复杂度。而且当 b_v 取“1”和“-1”两种旋转相位值时,采用传统的 PTS 算法时,需要 V 个冗余比特传送最优旋转相位序列的值,而采用 m 序列的 PTS 算法,只需要传最优旋转相位序列对应的初始状态,只需要 $\log_2 V$ 个冗余比特,可见采用 m 序列的 PTS 算法还可以减少冗余比特数。

2.3 仿真及分析

仿真中采用 256 个子载波, QPSK 调制,仿真帧数为 1000 帧,采用相邻分割法,分割的组数 $V = 8$ 。为了在同等的条件下与最优 PTS 算法作比较,PTS 中的 b_v 取值为“1”和“-1”, m 序列 PTS 算法中的 $b_1 = 1$, m 序列的初始状态为“10010111”。

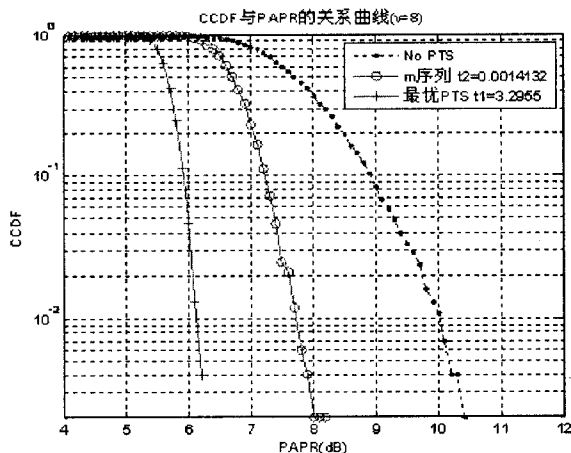


图 2 $V = 8$ 的 m 序列 PTS 仿真结果

图 2 是 $V = 8$ 的 m 序列 PTS,最优 PTS 以及 No PTS 的原始 OFDM 符号的 PAPR 的统计分布曲线。从图中可以看到原始 OFDM 系统中,有 1% 概率的 OFDM 符号的峰均比超过了 10dB,而采用最优 PTS 算法时,超过 1% 概率的 OFDM 符号的峰均比约为 6.3dB,当采用 m 序列 PTS 优化算法时,只有约 7.6dB 的 OFDM 符号超过了 1% 的概率,可见采用 m 序列 PTS

算法的确可以有效的降低 OFDM 系统的 PAPR。

从平均每帧优化所花费的时间来看,采用最优 PTS 算法平均每帧优化所需要的时间为 3.2955s,而采用 m 序列 PTS 算法仅为 0.0014132s,比最优 PTS 优化的时间少了一个数量级,可见 m 序列具有较小的复杂度。

m 序列 PTS 算法在降低 OFDM 的 PAPR 方面的性能会随着分组数目的增加而有所提高,图 3 是 $V = 16$ 的仿真结果,与图 2 相比, m 序列 PTS 的曲线变的更加的陡峭,即对于相同 PAPR 的门限, $V = 16$ 的 OFDM 符号比 $V = 8$ 的 OFDM 符号超过此门限的概率要低。

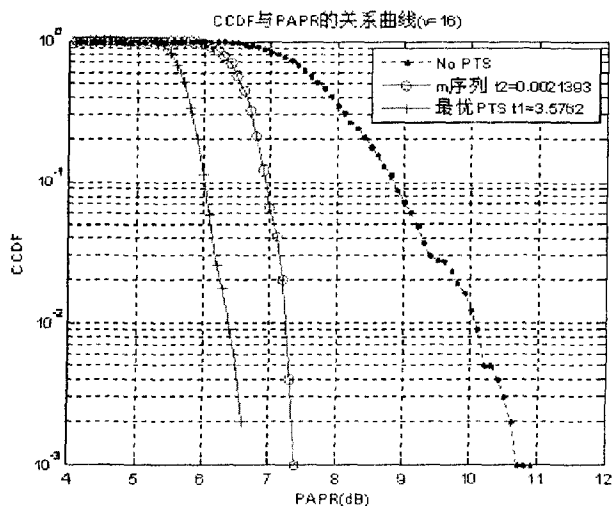


图 3 $V = 16$ 的 m 序列 PTS 仿真结果

3 FPGA 实现

图 4 是 m 序列 PTS 算法 FPGA 方案的整体结构框图,系统的子载波为 1024,采用 QPSK 调制,数据速率为 12.5Mbps。首先将 RAM 中读出来的数据分为四组,然后经过 IFFT 运算, IFFT 的实现是采用 Alter 公司的 FFTIP 核来实现的,由于该核的输出与理论值有着偏差,所以必须要经过指数调整才能得到实际的 IFFT 运算得到的数值;紧接着后面采用一个符号位扩展模块,防止产生数据的溢出,在此模块中将符号位赋给扩展出来的最高两位,而其它位不变;接下来就是 m 序列 PTS 算法的模块,然后计算出 PAPR 最小的一组输出,延时模块是为了使得选择输出模块的数据能在地址有效时到达,即达到一个同步的功能。

图 5 和图 6 是在 LeCroy 公司的 Wavepro7100 示波器上观察到的周期信号在处理前和处理后的波形图,从图中可以很明显看到经过 PTS 处理后,可以很好地抑制峰值。

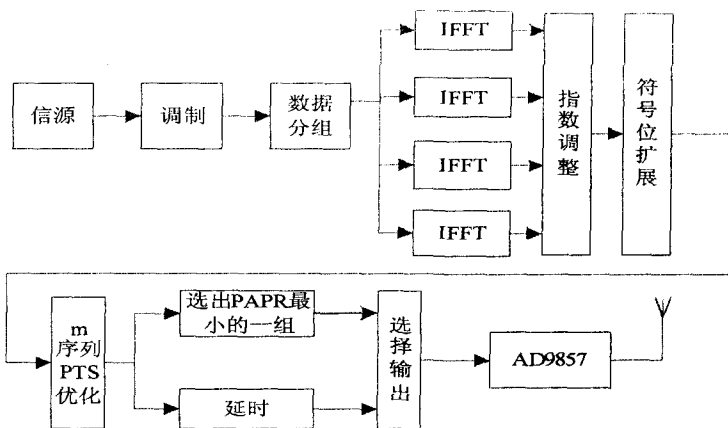


图 4 FPGA 实现的整体结构框图

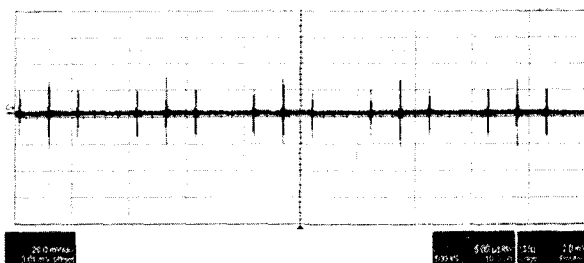


图 5 原始周期信号的时域波形

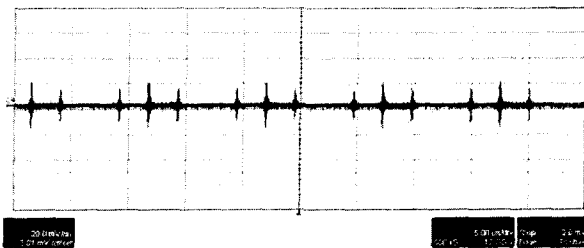


图 6 经过 PTS 处理后的周期信号时域波形

4 结束语

主要介绍了 OFDM 系统中峰均比的抑制部分传输序列算法。首先介绍了 PTS 的基本原理,并介绍了一种能够 PTS 算法复杂度的 m 序列 PTS 算法,通过仿真得到,采用 m 序列算法能够很好达到抑制 OFDM 系统的 PAPR,具有较小的计算复杂度,而且可以减少系统的冗余比特数。在 FPGA 验证中,在使用 m 序列 PTS 抑制峰均比时,能够很好满足系统的要求。

参考文献:

- [1] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003.
- [2] Akhtman J, Bobrovsky B Z, Hanzo L. Peak-to-average power ratio reduction for OFDM modems[J]. IEEE Proc VTC, 2003, 4: 1188-1192.
- [3] Han Seung Hee, Lee Jae Hong. An overview of peak-to-

观察到, RIO-C 算法和 PFRIO 算法在平均分组时延和平均分组丢失率方面有比较近似的特性, 这是因为 PFRIO 算法是针对 RIO-C 算法绝对优先级方面的缺陷改进的, 它通过适量增加高优先级分组的丢弃概率, 同时降低低优先级分组的丢弃概率, 防止低优先级分组长期处于“饥饿”状态, 保证了各级分组之间竞争带宽的公平性。PFRIO 算法改善的是队列中各级分组之间的局部关系问题, 从整个队列来观察这两种算法都仍有 RED 算法相类似的参数设置敏感性问题, 所以它们在平均时延和平均分组丢失率上具有比较相似的特性, 并且它们的性能不如 APRED-G 算法。APRED-G 算法不仅从微观上调整了各级分组之间的关系, 也从宏观上改善了参数设置的敏感性问题, 因此能在分组平均时延和平均丢失率上取得较好的性能。

4 结束语

作为服务质量的实现模型, 区分服务凭借其简单性和可扩展性的优点成为目前 IP QoS 的首选方案。核心路由器是 DiffServ 模型的重要组成部分, 其采用的主动队列管理算法的好坏将直接影响整个模型的性能。文中提出了一种自适应多优先级主动队列管理算法-APRED-G 算法。该算法通过动态调整各优先级分组的最大丢弃概率及最大门限值不但实现了相对优先级, 而且使队列缓冲区中的平均队长能够适应网络负载的动态变化, 减小了参数设置敏感问题, 降低了丢包率和平均时延, 提高了系统的有效吞吐量和稳定性, 能够很好地应用于区分服务核心路由器上。

参考文献:

- [1] Clark D, Fang W. Explicit Allocation of Best Effort Packet Delivery Service[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(4): 362-373.
- [2] Floyd S, Jacobson V. Random Detection Gateways for Congestion Avoidance[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397-413.
- [3] 封宁, 白光伟. RED 算法的数学模型分析[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(9): 2179-2202.
- [4] Bonald T. Analytic evaluation of RED performance[C]// IEEE INFOCOM. Tel Aviv, Israel: [s. n.], 2000: 1415-1424.
- [5] Feng W, Kandlur D, Saha D, et al. A self-configuring RED gateway[C]// Proc of IEEE INFOCOM. Amsterdam: Elsevier Press, 1999.
- [6] 纪起劲, 董永强. 主动队列管理算法性能评价: 比较研究[J]. 通信学报, 2005, 26(11): 100-105.
- [7] 吴春明, 姜明, 朱森良. 几种主动队列管理算法的比较研究[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 429-434.
- [8] 康亚男, 张彩云, 成汝震. DiffServ 模型中主动队列管理研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(5): 125-128.
- [9] Floyd S. NS network simulator[EB/OL]. 2008. <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns>.
- [10] 李方敏, 李仁发, 叶澄清. 网络仿真软件 NS 的结果输出和分析[J]. 计算机工程, 2000, 26(9): 14-16.
- [11] Su Hongjun, Atiquzzaman M. ItsTCM: A New Aggregate Marker to Improve Fairness in DiffServ[C]// Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'01. [s. l.]: IEEE, 2001: 1841-1846.
- [12] 徐刚, 鲁东明. DiffServ 中一种公平的汇聚流标记算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(3): 111-113.

(上接第 66 页)

- average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 4(2): 56-65.
- [4] May T, Rohling H. Reducing the peak-to-average power ratio in OFDM radio transmission systems[J]. IEEE Vehicular Technology Conference, 1998, 5(3): 2474-2478.
- [5] Tao Yang Yang, Song Yong Hua. Exponential companding technique for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Trans. Broadcasting, 2005, 6(2): 244-248.
- [6] 魏克军, 益晓新. 一种采用压扩算法来降低 OFDM 信号 PAPR 的新方法[J]. 电视技术, 2003(2): 14-15.
- [7] Bauml W, Fischer R F H, Huber J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping[J]. Electronics Letters, 1996, 10(22): 2056-2057.
- [8] Thanh N T, Lampe L. On partial transmit sequences for PAR reduction in OFDM systems[J]. IEEE wireless Communications, 2008, 2(2): 746-755.
- [9] 佟梅娟, 朱琦, 鄞广增. 降低复杂度的 PTS 方法及其在 IEEE 802. 16a OFDM 系统中的应用[J]. 南京邮电学院学报, 2005, 25(2): 48-52.
- [10] 满江涛, 江汉红, 李庆. 降低 OFDM 峰均功率比的 PTS 改进算法研究[J]. 武汉理工大学学报·信息与管理工程版, 2006, 28(7): 133-135.
- [11] 韩艳春. 减小 OFDM 系统 PAPR 的一种新的 PTS 方法[J]. 电子技术应用, 2006(10): 122-123.
- [12] Jones A E, Wilkinson T A, Barton S K. Block coding scheme for reduction of peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes[J]. Electronics Letters, 1994, 12(25): 2098-2099.
- [13] 徐强, 宋依. m 序列在信息安全中的应用[J]. 常州工学院学报, 2005, 18(1): 34-38.