

利用峰值抵消策略的 PTS 方法

焦玉中,王新安,倪学文,许 应,刘雪娇

(北京大学深圳研究生院 集成微系统科学与工程与应用重点实验室,广东 深圳 518055)

摘 要: 利用预留载波法峰值抑制原理,提出了一种采用峰值抵消策略的 PTS 方法.该方法把一些部分传输序列看作 PAPR 抑制载波所对应的时域序列,通过选择部分传输序列和相位旋转因子进行逐步叠加将潜在的峰值消除,最后构成待发送的 OFDM 符号.由于总的迭代次数有所减少,并且每次迭代过程中只需要处理少数波峰点的样值,因此复杂度较低.仿真结果显示,新的 PTS 方法具有良好的 PAPR 抑制性能.

关键词: 峰平比抑制; PTS; 峰值抵消; 复杂度

中图分类号: TN919.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)07-0035-05

A Novel PTS by Using the Scheme of Peaks Counteraction

JIAO Yu-zhong, WANG Xin-an, NI Xue-wen, XU Ying, LIU Xue-jiao

(Key Lab of Integrated Microsystem Science & Engineering Applications,
Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Based on the basic idea of Reserved Tone PAPR reduction algorithm, this paper presents a novel PTS which uses the scheme of peaks counteraction. The method regards some partial transmit sequences as the time-domain signals corresponding to certain PAPR reduction tones. By selecting proper partial transmit sequence and phase factor, the partial transmit sequences are accumulated one by one to counteract the potential peaks till one whole OFDM sequence is formed. Since the total iteration times decrease to some extent and only a few samples with high peaks need to be processed in each time iteration, this method has low complexity. Simulation results show that the proposed method has good PAPR reduction performance.

Key words: PAPR reduction; PTS; peaks counteraction; complexity

1 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM)是一种非常有效的应对信道失真的传输方式,它已在 WLAN、WiMAX、DVB、ADSL 和 Homeplug 等许多宽带无线或有线系统得到了广泛应用^[1]. 由于各子载波间统计独立,其相应的时域波形近似于高斯分布,因此 OFDM 这种传输方式的一个主要缺点是峰值平均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)较高.

这就要求系统中的射频功放具有较大的线性范围以避免传输信号的频谱扩散和非线性失真,增加

了系统成本、功耗和实现难度.

为了解决这个问题,很多能够有效降低 PAPR 的方法^[2]被提出. 部分传输序列法(partial transmit sequence technique, PTS)^[3]属于概率类方法,它的基本思想是:将需要传输的数据信号分割成若干互不重叠的子块,选取一组合适的相位旋转因子序列优化子块的相位,使得信号的峰值达到最低. PTS 不会引入失真,并且具有非常理想的峰值抑制效果. 但由于搜索最优相位旋转因子序列需要大量的迭代运算,因此复杂度非常高. Cimini 等提出迭代 PTS 方法(iterative PTS, IPTS),使迭代次数由最优化 PTS 方法(optimum PTS, OPTS)的次减为 V 次(V

收稿日期: 2009-05-20; 修回日期: 2009-07-20

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2003AA1Z1210)

为相位旋转因子数, V 为子数据块数), 代价是性能有所损失^[4]. 很多优化技术被用于 PTS 相位旋转因子序列的搜索上^[5-9]. 这些次优 PTS 方法致力于寻求复杂度和性能之间的平衡, 其复杂度和性能介于 IPTS 和 OPTS 之间.

本文利用文献[10]所述的预留载波峰值抑制原理, 提出了一种峰值抵消策略的 PTS 方法. 该方法可以有效减少迭代次数, 能够降低每次迭代过程中的运算量, 使算法的复杂度大为降低.

2 PTS 算法

2.1 PAPR 定义

对于一个具有 N 个子载波的 OFDM 系统, 其复数基带信号可表示为

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kt \Delta f}, 0 \leq t < T \quad (1)$$

式中, X_k 为加载到第 k 个子载波上的数据符号; Δf 为子载波间隔; $T = 1/\Delta f$, 为 OFDM 符号周期.

OFDM 信号的 PAPR 可表示为

$$\text{PAPR} = \frac{\max_{0 \leq t < T} |x(t)|^2}{E[|x(t)|^2]} \quad (2)$$

式中, $E[\cdot]$ 表示均值.

OFDM 调制可由 N 点 IFFT 实现, 其输出为 OFDM 时域符号的 N 个样值. 这些在奈奎斯特采样速率下得到的样值序列并不能完全反映真实连续符号的峰值. 为了正确估计 PAPR, 需要对 OFDM 时域符号进行过采样, 通常认为 4 倍过采样是一个比较合适的选择.

2.2 OPTS

PTS 是将频域数据向量 X 分割成 V 个互不交的子块 $\{X^{(v)}, v = 1, 2, \dots, V\}$. 每个子块具有 N 个数据, 其中 N/V 个数据与 X 中相应位置的数据相同, 其他数据均为零, 满足

$$X = \sum_{v=1}^V X^{(v)} \quad (3)$$

每一个子块对应一个部分传输序列 $x^{(v)} = \text{IFFT}(X^{(v)})$. 为每个子块引入一个旋转因子 $b^{(v)} = e^{j\theta^{(v)}}$, $\theta^{(v)} \in [0, 2\pi)$. 通过选择不同的相位旋转因子序列 $\{b^{(v)}, v = 1, 2, \dots, V\}$, 可以求得包含相同信息的多个时域序列:

$$x' = \sum_{v=1}^V b^{(v)} x^{(v)} \quad (4)$$

最优的相位旋转因子序列应该满足

$$\{b^{(1)}, b^{(2)}, \dots, b^{(V)}\} = \arg \min_{(b^{(1)}, b^{(2)}, \dots, b^{(V)})} (\max_n |x'|) \quad (5)$$

式中, $\arg \min(\cdot)$ 表示使函数取最小值时所使用的判决条件. OPTS 进行遍历搜索需要 W^{V-1} 次迭代运算. 最后将最优的相位旋转因子序列所对应的一个 OFDM 时域序列输出. 为不增加乘法计算量, 一般取 $b^{(v)} \in \{\pm 1, \pm j\}$, 因此 W 一般取 1~4. 经过 L 倍过采样的 PTS 算法结构如图 1 所示.

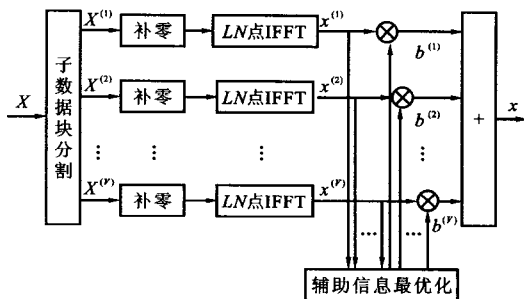


图1 PTS 算法结构

2.3 IPTS

IPTS 的算法流程如下 ($b^{(v)} \in \{1, -1\}$):

(1) 先将 N 个子载波分割成 V 个子块, 分别进行 IFFT 处理; 设 $b^{(v)} = 1, v = 1, 2, \dots, V$, 得到一个初始 OFDM 序列; 计算 PAPR_1 .

(2) 改变 $b^{(1)}$, 使其等于 -1 , 其他相位旋转因子不变, 于是可得到一个新的 OFDM 序列; 计算 PAPR_{-1} .

(3) 比较 $\text{PAPR}_1, \text{PAPR}_{-1}$, 选取最小的一个; 如果 PAPR_1 最小, 则 $b^{(1)} = 1$; 如果 PAPR_{-1} 最小, 则 $b^{(1)} = -1$.

(4) 令 PAPR 最小的 OFDM 序列为新的初始序列, 同时令最小的 PAPR 为 PAPR_1 .

(5) 返回步骤 (2). 同理, 可确定 $b^{(2)}, b^{(3)}, \dots, b^{(V)}$.

该算法只需要 V 次迭代过程, 与 OPTS 相比大大降低了 PTS 的复杂度.

IPTS 每次迭代的计算量包括: (1) 生成 1 个新的 OFDM 序列; (2) 计算 PAPR_{-1} . 表 1 给出了 IPTS 迭代处理总的计算量. 表中平方和操作代表求复数样值的幅值平方.

表 1 IPTS 迭代计算量统计

平方和	$(V+1)LN$
复数加/减	$(2V-1)LN$
比较	$(V+1)LN$

3 利用峰值抵消策略的PTS方法

3.1 峰值抵消原理

文献[10]给出了一种逐步迭代的预留载波方法.该方法每次迭代选取一个合适的预留载波叠加到OFDM信号上,从而逐步降低信号峰值.用来PAPR抑制处理的预留载波被称为PAPR抑制载波.该方法的处理步骤为:

(1) 针对每个PAPR抑制载波生成一个原型序列.所谓原型序列是指在某个PAPR抑制载波位置取值为 $A(1+j)/\sqrt{2}$,而在其他载波位置取值为0的频域符号所对应的时域序列. A 表示幅值.

(2) 找出OFDM序列的峰值,记录峰值点位置 p 和相位 φ .

(3) 对每个未被使用过的原型序列在 p 点的样值进行相位旋转,旋转因子取 1 、 -1 、 j 和 $-j$.假设有 r 个未被使用的PAPR抑制载波,则可得到 $4r$ 个复数值,对应 $4r$ 个相位.

(4) 从 $4r$ 个相位中找到与 $\pi + \varphi$ 最接近的一个相位.将该值所对应的原型序列进行相应的相位旋转即可得到一个PAPR抑制载波序列.

(5) 将该PAPR抑制载波序列叠加到OFDM时域序列.这样便完成一次迭代,然后回到步骤(2)开始下一个PAPR抑制载波的选取.随着迭代的进行,每次可选择的原型序列也将减少.迭代直到用完所有原型序列为止.

该方法通过选取合适的PAPR抑制载波可以逐步将原OFDM信号的峰值抵消掉,从而得到PAPR较小的OFDM信号.

3.2 采用峰值抵消策略的PTS

将 V' 个数据子块 $\{X^{(v)}, v = 1, 2, \dots, V'; V' < V\}$ 进行叠加,构成一个较大的数据子块:

$$X_{\text{add}} = \sum_{v=1}^{V'} X^{(v)} \quad (6)$$

我们称该子块所对应的部分传输序列 $x_{\text{add}}^{(0)} = \text{IFFT}(X_{\text{add}})$ 为初始叠加序列.

借鉴峰值抵消原理,可以将初始叠加序列看作是原始OFDM时域序列,将剩余的 $V - V'$ 个部分传输序列看作PAPR抑制载波序列.则第 i 次迭代所得到的叠加序列为

$$x_{\text{add}}^{(i)} = x_{\text{add}}^{(i-1)} + b^{(v(i))} x^{(v(i))} \quad (7)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, V - V'$; $v(i) \in [V' + 1, V]$,表示第 i 次迭代所选择的 v .迭代处理的目标是找到合适的部分传输序列 $x^{(v(i))}$ 和相位旋转因子 $b^{(v(i))}$.

具体处理步骤为:(1) 找到 $x_{\text{add}}^{(0)}$ 的峰值点 p ;(2) 对 $V - V'$ 个部分传输序列在 p 点的样值进行相位旋转(相位旋转因子分别取 1 、 -1 、 j 和 $-j$),并与 $x_{\text{add}}^{(0)}$ 的峰值点样值相加;(3) 从得到的 $4(V - V')$ 个复数值中找出幅值最小的一个,该复数值所对应的部分传输序列和相位旋转因子即是 $x^{(v(1))}$ 和 $b^{(v(1))}$;(4) 由式(7)求得 $x_{\text{add}}^{(1)}$,然后回到步骤(1)求 $x_{\text{add}}^{(1)}$ 的峰值点,并从剩余的 $V - V' - 1$ 个部分传输序列中选择下一个合适的部分传输序列和相位旋转因子.同理,可得到所有部分传输序列所对应的相位旋转因子和一个包括完整OFDM符号信息的序列 $x_{\text{add}}^{(V-V')}$.

不难看出,利用峰值抵消策略的PTS方法的核心思想是用部分传输序列去抵消每次序列叠加形成的峰值,最终完成一组合适相位旋转因子的选择.

对于一个新生成的叠加序列,其峰值尽管出现在前一次迭代生成的叠加序列的峰值点或附近的可能性最大,出现在次峰值点及其附近样值点的可能性也很大.为了选择出合适的部分传输序列和相位旋转因子,有必要适度增加处理样值点的个数,即将几个次峰值也作为处理样值.设需要处理的样值点有 M 个,分别为叠加序列中幅值最大的几个波峰点,其位置如图2所示.

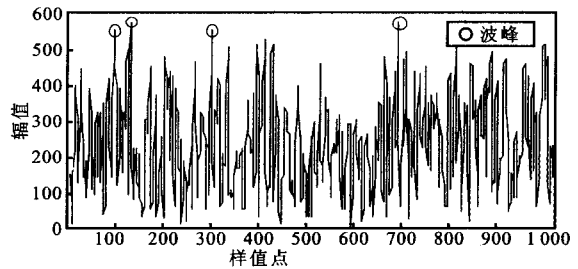


图2 一个叠加序列的幅值曲线($M = 4$)

多峰值搜索器如图3所示.图中0和1分别表示随样值点序号的增加相应样值的幅度是减小还是增大.如果比较器A输出10,则表示当前寄存器A中的数据为一个波峰值.这个波峰值需要和之前寄存在多峰值存储器件中的 M 个波峰值中最小的一个进行比较.如果大于,则比较器B输出1,数据开关B开通,将该波峰值及其样值点位置存储到多峰值(与位置)存储器件中.反之,将该波峰值抛弃.

利用峰值抵消策略的PTS方法需要 $V - V' + 1$ 个 LN 点IFFT,比IPTS少 $V' - 1$ 个.该方法每次迭代的计算量包括:(1) 产生一个新的叠加序列;(2) 搜索其 M 个波峰点;(3) 比较 M 个样值点的幅值抵消效果.整个算法一共有 $V - V'$ 次迭代,总的

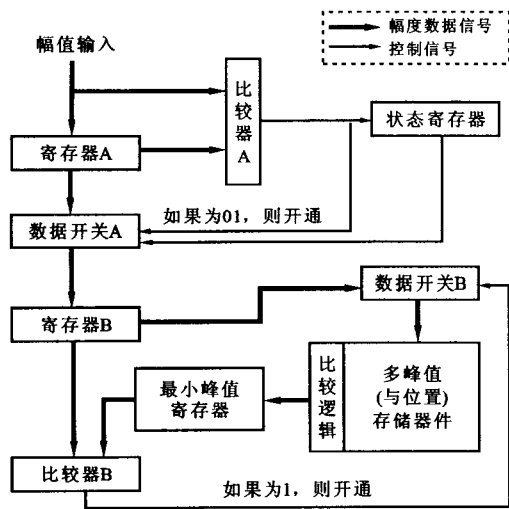


图3 多峰值搜索器结构

迭代计算量如表2所示.其中 ρ_1 和 ρ_2 为两个概率参数,分别表示多峰值搜索器中数据开关A和B相对于比较器A的 $LN-1$ 次操作的开通概率.可以通过仿真得到这两个概率参数.

表2 新的PTS迭代计算量统计

平方和	$(V-V')LN+2M(V-V')(V-V'+1)$
复数加	$(V-V')LN+2M(V-V')(V-V'+1)$
比较	$(V-V')(LN-1)[\rho_2(M-1)+\rho_1+1]+(V-V')[2M(V-V'+1)-1]$

4 性能仿真与复杂度比较

4.1 PAPR抑制性能比较

图4给出了 $N=256, L=4, M=8, V'=V/4$,交织分割,调制方式为64QAM情况下新的PTS与IPTS的PAPR抑制性能比较.在概率为 10^{-3} 时,对于 $V=8,16$ 和32三种情况,新的PTS与IPTS的性能差异分别为 -0.11dB 、 -0.02dB 和 0.19dB .由此可见,随着 V 的增加,相对于IPTS,新

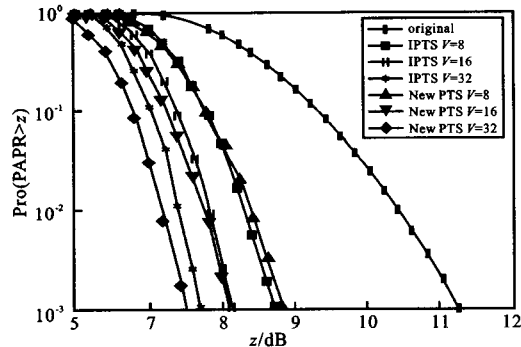


图4 新的PTS与IPTS的PAPR抑制性能比较($N=256$)

的PTS的PAPR抑制性能越来越好.在 $V \geq 16$ 时,与未经PAPR抑制处理的OFDM信号相比,新的PTS可以带来超过3dB的性能增益.

图5给出了 $N=1024, L=4, M=16, V'=V/4$,交织分割,调制方式为16QAM情况下新的PTS与IPTS的PAPR抑制性能比较.在概率为 10^{-3} 时,对于 $V=8,16$ 和32三种情况,新的PTS与IPTS的性能差异分别为 -0.17dB 、 0dB 和 0.21dB .在 $V \geq 16$ 时,与未经PAPR抑制处理的OFDM信号相比,新的PTS可以带来超过2.8dB的性能增益.

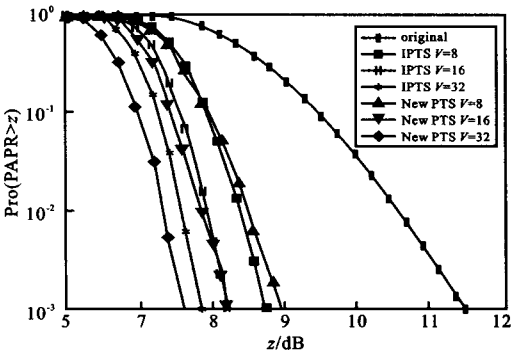


图5 新的PTS与IPTS的PAPR抑制性能比较($N=1024$)

4.2 复杂度比较

新的PTS需要的IFFT个数比IPTS和OPTS少 $V'-1$ 个.由于我们更加关注大量迭代处理所面临的时间压力,因此下面将比较的重点放在迭代处理的计算量上.对于表1和表2中的操作,每个复数加/减可以分解为2个实数加/减,每个平方和分解为2个实数乘和1个实数加.假设一个算法的实数加、实数乘和比较的计算量分别用 γ_{add} 、 γ_{mul} 和 γ_{com} 表示,那么复杂度可以通过 $C=\gamma_{\text{add}}+f_{\text{mul}}\gamma_{\text{mul}}+f_{\text{com}}\gamma_{\text{com}}$ 得到, f_{mul} 和 f_{com} 分别表示每个乘法器和每个比较器需要的加法器个数.

表3给出了新的PTS与IPTS的迭代处理复杂度比值,其中 f_{mul} 和 f_{com} 分别设为4和1;对于 $N=256$ 的情况, ρ_1 和 ρ_2 分别取12.0%和7.1%;对于 $N=1024$ 的情况, ρ_1 和 ρ_2 分别取11.9%和6.6%;其他参数与上面仿真所用参数一致.可以看出,新的PTS具有更低的复杂度;并且 $C_{\text{newPTS}}/C_{\text{IPTS}}$ 随着 V 的增大而增大,随着 N 的增大而减小.

表3 新老PTS方法的复杂度比值 $C_{\text{newPTS}}/C_{\text{IPTS}}$

	$V=8$	$V=16$	$V=32$
$N=256$	0.70	0.78	0.91
$N=1024$	0.69	0.74	0.81

5 结束语

文中提出了一种利用峰值抵消策略的 PTS 方法.该方法在部分传输序列的叠加过程中将潜在的峰值消除.由于需要处理的部分传输序列相对较少,以及在相位旋转因子的选择过程中只需要关注少数几个波峰点的样值,因此具有较低的算法复杂度.仿真结果显示,新的 PTS 具有良好的 PAPR 抑制性能.在 $V \geq 16$ 时,可实现与 IPTS 相近,甚至更优的 PAPR 抑制性能.

参考文献:

- [1] Bahal A R, Saltzberg B R, Ergen M. Multi-carrier digital communications: theory and applications of OFDM [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2004.
- [2] 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): 56-65.
- [3] Müller S H, Huber J B. OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences[J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 368-369.
- [4] Cimini L J, Sollenberger N R. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(3):86-88.
- [5] Ho W S, Madhukumar A S, Chin F. PAPR reduction using partial transmit sequences: a suboptimal approach based on dual layered phase sequencing[J]. IEEE Transactions

- on Broadcasting, 2003, 49(2):225-231.
- [6] Han S H, Lee J H. PAPR reduction of OFDM signals using a reduced complexity PTS technique[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(11):887-890.
- [7] 武林俊,朱世华,冯兴乐.利用部分传输序列减小 MC-CDMA 系统的峰均比[J].电子与信息学报,2005,27(4):599-602.
- [8] Lee B M, Figueiredo R J. A low complexity tree algorithm for PTS-based PAPR reduction in wireless OFDM[C]// Proceedings of ICASSP 2006. France: IEEE Press, 2006: 301-304.
- [9] Jiang T, Xiang W, Richardson P C. PAPR reduction of OFDM signals using partial transmit sequences with low computational complexity [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(3):719-724.
- [10] Jiao Y Z, Liu X J, Wang X A. A novel tone reservation scheme with fast convergence for PAPR reduction in OFDM systems[C]// Proceedings of IEEE CCNC 2008. USA: IEEE Press, 2008: 398-402.

作者简介:

焦玉中 男,(1975-),博士研究生.研究方向为 OFDM 技术与 SOC 设计方法学.

王新安 男,(1963-),副教授,博士生导师.研究方向为 SOC 设计方法学、组合 ASIC 和可重构 DSP.

倪学文 男,(1944-),教授,博士生导师.研究方向为 MEMS 和 SOC 设计方法学.

许应 男,(1982-),硕士.研究方向为 OFDM 技术及其实现.

刘雪娇 女,(1984-),硕士研究生.研究方向为 OFDM 技术与 IC 设计.

(上接第 34 页)

- [4] 张志涌.精通 MATLAB 6.5 版[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [5] Synplicity, Inc. Synplicity FPGA synthesis user guide [M]. Beijing: Synopsys, 2007.
- [6] Mentor Graphics, Inc. FPGA advantage tutorial[M].北京:肯思科技有限公司,2006.
- [7] Altera Corp. Nios II processor reference handbook[M].

Altera, 武汉骏龙科技有限公司,2005.

作者简介:

尹淑仙 女,(1978-),硕士.研究方向为图形图像显示及信息处理.

徐火生 研究员,硕士生导师.研究方向为指挥控制系统、图形图像显示及信息处理.

李玉蓉 工程师.研究方向为 EDA 设计.