

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.04.007

一种改进交织算法降低 OFDM 系统的 PAPR

任松, 文鸿, 石成锋, 黎彪, 刘宏鹏

(湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为有效抑制正交频分复用 (OFDM) 系统中的高峰均功率比 (PAPR) 问题, 提出了一种基于随机交织分割的部分传输序列 (PTS) 改进算法。该算法对交织的数据子块进行随机分割, 以避免传统交织分割方式导致的相位因子选择遗漏。仿真结果表明, 改进的 PTS 算法不仅能够降低 OFDM 系统的 PAPR, 同时可以降低算法的计算复杂度。

关键词: 正交频分复用; 峰均功率比; 部分传输序列

中图分类号: TN913.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)04-0045-04

An Improved Interleaved Algorithm for Reducing PAPR of OFDM System

REN Song, WEN Hong, SHI Chengfeng, LI Biao, LIU Hongpeng

(College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an effective suppression of the peak to average power ratio (PAPR) in the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system, a proposal has thus been made of a modified partial transmit sequence (PTS) algorithm based on random interleaved segmentation. The proposed algorithm partitions the interleaved data blocks randomly to avoid the omission of phase factor selection resulting from the traditional interleaved segmentation. The simulation results show that the improved PTS algorithm can not only reduce PAPR of OFDM system, but also reduce the computational complexity of the algorithm.

Keywords: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); partial transmit sequence (PTS); peak to average power ratio (PAPR)

0 引言

正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 系统因具有对抗频率选择性衰落或窄带干扰、频谱利用率较高等优点, 已经被广泛地应用于无线通信系统中。第四代移动通信所用的

MIMO-OFDM (multiple-input multiple-output OFDM) 就是结合 MIMO 和 OFDM 的优点, 使之成为 4G 中的关键技术。同样, 第五代移动通信中的骨干光网络, 就是利用相干光 OFDM 系统传输机理及数学模型进行分析和研究的^[1-2]。

由于 OFDM 系统中输出子信道时存在信号的叠

收稿日期: 2017-12-11

基金项目: 湖南省教育厅开放基金资助项目 (15K035), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目 (CX1604)

作者简介: 任松 (1991-), 男, 重庆人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为认知 OFDM,

E-mail: rensong0722@163.com

通信作者: 文鸿 (1981-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事下一代宽带无线通信网络方面的教学与研究, E-mail: wenhhut@163.com

加,所以当多个信号相位一致时,所叠加的信号瞬时功率会远高于信道中信号的平均功率^[3],从而导致系统中出现高峰值平均功率比(peak to average power ratio, PAPR),这个问题一直是正交频复用技术中的主要缺陷^[4]。现有针对OFDM系统中的高峰值平均功率比的降低技术,主流方法有编码法、信号预畸变法和概率类方法3种。其中,概率类方法中多采用选择性映射法(selected mapping, SLM)和部分传输序列法(partial transmit sequence, PTS)^[5-6]。唐满等^[2]提出了一种PTS重复搜索方法,该方法能够在高信噪比的条件下,有效地降低OFDM系统的PAPR,但是其计算的复杂度较高;邢钢等^[3]比较了主流的3种降低PAPR的方法,其中的限幅法最为简单,但是由于限幅的影响,容易产生失真现象;相对而言,PTS算法降低PAPR的效果最好,同时算法的复杂度也最高;文献[7-10]都是针对PTS算法的改进研究,但是几种改进的PTS算法都不能同时满足降低PAPR和减少计算复杂度。因此,针对以上所述降低PAPR的PTS算法中出现的问题,本研究提出一种基于随机交织分割方式的PTS算法以降低系统的PAPR,此算法主要针对传统PTS算法的分割方式进行优化。仿真结果表明,所提出的基于随机交织分割方式的PTS算法不仅能够降低系统的PAPR,而且在一定程度上减少了计算的复杂度。

1 OFDM系统的PAPR

对于子载波数为 N 的OFDM系统,其逆傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)后产生的OFDM信号 $x(n)$ 可以表述如下:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) \quad (1)$$

式中: $0 \leq n \leq N-1$;

X_k 表示第 k 个子载波经过调制后的信号,本文采用正交相移键控(quadrature phase shift keyin, QPSK)获取。

因OFDM系统中的信号是由多个子载波叠加而成的,故与单载波系统相比较,其在信号幅值上会有较大的波动,当叠加的子载波相位相同时,容易产生较大的峰值功率,带来较大的峰均功率比^[4]。OFDM系统的峰均功率比PAPR可以表示为

$$PAPR = 10 \lg \frac{\max\{|x(n)|^2\}}{E\{|x(n)|^2\}} \quad (2)$$

式中: $E\{\cdot\}$ 表示期望值;

\max 表示取最大值。

为了能直观地描述系统的PAPR,一般采用互补累积分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF)衡量PAPR值的分布情况。用奈奎斯特采样率进行抽样时,OFDM系统中PAPR的互补累积分布函数为

$$Pr(PAPR > PAPR_0) = 1 - (1 - \exp(-PAPR_0))^N, \quad PAPR_0 \geq 0 \quad (3)$$

2 基于随机交织分割的PTS算法

2.1 PTS算法原理

PTS算法的基本原理,是将长度为 N 的数据符号向量 $\mathbf{X} = (X_0, X_1, \dots, X_{N-1})$,按照一定的分割方式,将其分割成为互不重叠的 V 组子向量,分别由 \mathbf{x}_v ($v=1, 2, \dots, V$)表示^[7];将每一组子向量里面的每个子载波都乘以一个相位旋转因子 b_v ,然后将这 V 组向量按照式(4)组合起来,PTS的基本原理框图^[7]如图1所示。

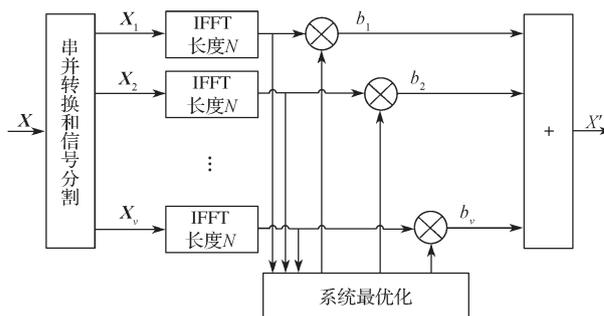


图1 PTS基本原理框图

Fig. 1 Block diagram of the basic principles of PTS

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

式中, $b_v = \exp(j\varphi_v)$, 且 $\varphi_v \in [0, 2\pi)$ 。

对式(4)进行离散傅里叶逆变换(inverse discrete Fourier transform, IDFT),可得

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

接下来选择PAPR最小的组合进行传输,传输信号如式(6)所示。

$$\{b_1, b_2, \dots, b_v\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_v\}} \left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \left| \sum_{v=1}^V b_v X_v \right|^2 \right\} \quad (6)$$

式(6)中, $\arg \min(\cdot)$ 表示函数取得最小值时所用的判断条件。

2.2 一种改进的交织分割PTS算法

对于PTS算法,常用的分割方式有随机分割(pseudo-random)、相邻分割(adjacent)、交织分

割 (interleaved) 3 种。随机分割是通过随机选取的方法将每个子载波随机分配到 V 个 PTS 内; 相邻分割是将 N/V 个相邻的子载波分配在 1 个 PTS 内, 这也是最常用的分割方法; 交织分割是将相距间隔为 V 的子载波分配在 1 个 PTS 内^[11]。3 种分割方式各具特色, 本文主要研究相邻分割和交织分割的特点, 并基于此提出一种改进的交织分割 PTS 算法, 其主要思想可以描述如下:

采用 PTS 算法降低 OFDM 信号的 PAPR 时, 相位序列 \mathbf{P}_k 具有如下结构:

$$\mathbf{P}_k = [D_1, D_2, \dots, D_L] \quad (7)$$

式中: $L=N/V$;

D 为 $\{b_1, b_2, \dots, b_v\}$ 内的随机组合, 其中 $b_v \in \{\pm j, \pm 1\}$ ($v=1, 2, \dots, V$)。

根据 b_v 的取值范围, 通过遍历搜索方法, 可以得到 $M=4^V$ 个不同的相位序列 \mathbf{P}_k^μ ($\mu=1, 2, \dots, M$)。

于是, 若通过交织分割将 \mathbf{X}_k 分割成 V 个子载波, 分别用 $\mathbf{X}^{(v)}$ ($v=1, 2, \dots, V$) 表示, 则有

$$\mathbf{X}_k^\mu = \mathbf{P}_k^\mu \mathbf{X}_k = \sum_{v=1}^V b_v \mathbf{X}^{(v)}, \mu=1, 2, \dots, M \quad (8)$$

由此可见, 对于同一子载波 $\mathbf{X}^{(v)}$, 采用相同的旋转因子 b_v , 对式 (8) 进行 IFFT 变换, 就可以得到 OFDM 的部分传输序列。

基于上述分析, 可以将这种改进的交织分割算法的发送端具体操作步骤归纳如下:

步骤 1 根据式 (7) 构建新的传输序列 \mathbf{Y}_k 。

步骤 2 对 \mathbf{Y}_k 用改进的交织分割算法进行分段, 共分成 V 段, 其中第一段为

$$\mathbf{Y}^{(1)} = \left\{ \mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_1, \dots, \mathbf{Y}_{\frac{N}{V}-1}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{Y}_{\frac{N}{V}-1}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0} \right\} \quad (9)$$

将这些子段通过 $V/2$ 次 N 点 IDFT, 得到相应的 PTS 传输序列。

步骤 3 将完成分组的子载波进行遍历搜索, 获得不同的相位序列, 选择具有 PAPR 的实数 OFDM 信号进行传输, 相应的相位因子 b_1, b_2, \dots, b_v 做为辅助信息被传输到接收端。

在接收端, 通过相应的辅助信息 $\{b_1, b_2, \dots, b_v\}$, 可以构造出相应的相位序列, 从而恢复原始的 OFDM 信号。因为这种改进的交织分割算法既考虑了顺序分组的情况, 又顾及了随机分组的情况, 所以在发送端进行遍历搜索时, 能够搜索到所有的相位因子组合; 且采用交织分割方式 PTS 算法的计算复杂度较低, 因此该方法既保证了不增加 OFDM 系统的计算复杂度, 又搜索了最小峰均功率比, 使得系统的

性能得到了提升。

3 仿真与分析

图 2 所示为基于随机交织分割的 PTS 算法跟传统的基于未使用 PTS、交织分割、相邻分割 3 种不同分割方式的 PTS 算法在不同子载波数下经过 Matlab 仿真后得到的 CCDF 曲线。仿真时采用 QPSK 调制, OFDM 符号数为 10 000, 分组数为 4, 旋转相位 $\{b_1, b_2, \dots, b_v\} = \{1, -1, j, -j\}$, 子载波数分别选取 128 和 256, 采用遍历搜索方式。

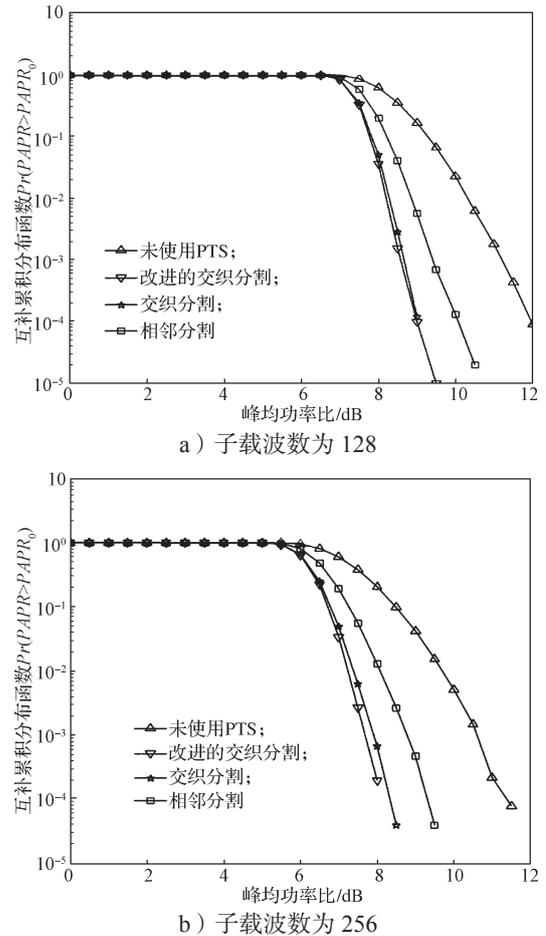


图 2 不同子载波数下 4 种不同分割方法的仿真 CCDF 曲线

Fig. 2 Simulation of CCDF curves for different segmentation methods under four different subcarrier numbers

由图 2a 所示子载波数取 128 时的仿真 CCDF 曲线可以看到, 当 $CCDF=10^{-3}$ 时, 改进的交织分割 PTS 算法的 OFDM 系统的 PAPR 值为 8.2 dB, 未使用 PTS 算法的 OFDM 系统的 PAPR 值为 11.2 dB, 而交织分割算法和相邻分割算法的 OFDM 系统的 PAPR 值介于两者之间。

由图 2b 所示子载波数取 256 时的仿真 CCDF 曲线可以发现, 同样在 $CCDF=10^{-3}$ 时, 改进的交织分

割 PTS 算法的 OFDM 系统的 PAPR 为 7.6 dB, 未使用 PTS 算法的 OFDM 系统的 PAPR 为 10.7 dB, 而交织分割算法和相邻分割算法的 OFDM 系统的 PAPR 值介于两者之间。

从图 2 可以看出, 基于随机交织分割方式的 PTS 算法, 其 PAPR 性能相较传统的 3 种分割方式有所提升, 但是随着子载波数的增加, 随机交织分割方式的计算复杂度并没有增加。

仿真所得 4 种不同分割方式下系统的误码率 - 信噪比曲线如图 3 所示。

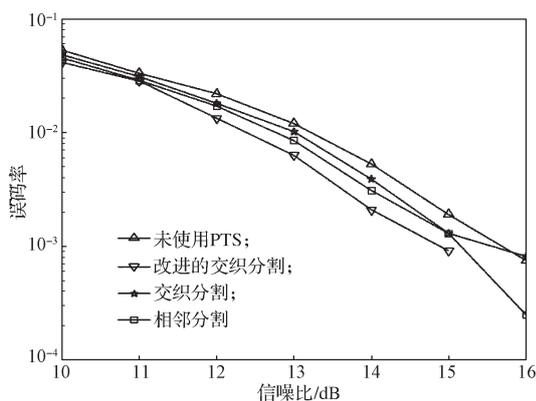


图 3 仿真所得 4 种不同分割方式下系统的误码率 - 信噪比曲线

Fig. 3 Simulation result of BER-SNR curves of the system under four different segmentation methods

从图 3 所示系统的误码率 - 信噪比曲线可以看出, 当信噪比相同时, 使用改进后的交织分割 PTS 算法的误码率, 要比原始即未使用 PTS、基于交织分割及相邻分割 3 种分割方式的系统误码率低。当 OFDM 系统的误码率为 10^{-3} 时, 使用改进交织分割算法的 OFDM 系统的信噪比约为 15.0 dB, 交织分割 PTS 算法的 OFDM 系统信噪比为 15.2 dB, 相邻分割和未使用 PTS 算法的 OFDM 系统信噪比均约为 15.7 dB。由此也可以看出, 使用改进的交织分割算法的 PTS 可以提高 OFDM 系统的性能。

在子载波数相同的情况下, 通过 Matlab 仿真发现, 传统 PTS 方法的仿真时间为 15 min, 而随机交织分割的仿真时间为 15.35 min, 仿真时间几乎不变。

综合以上仿真结果可以得知, 改进的随机交织分割方式既包含了相邻的两个子载波可以被分在同一个 PTS 内, 又可以保证每个 PTS 内的子载波是随机组合的。

4 结论

针对 OFDM 系统中较高的 PAPR, 本文分析了

传统 PTS 算法降低 OFDM 系统 PAPR 及不同分割方式对系统 PAPR 的降低效果, 通过系统仿真与分析, 可得出如下结论:

1) 传统 PTS 算法在不同程度上降低了系统的 PAPR, 且各分割方式的计算复杂度也有所不同, 其中随机分割方式随着子载波数量的增加, 计算复杂度加大。

2) 本文所提出的改进交织分割 PTS 算法相比于传统的相邻分割算法和交织分割算法, 分别提高了 0.2~0.3 dB 和 1.4~1.6 dB 的性能。

3) 改进的交织分割 PTS 算法不仅能实现抑制 OFDM 系统峰均功率比, 还能降低系统的计算复杂度, 提高系统频带利用率。

参考文献:

- [1] CHANDRASEKHAR S, LIU X. OFDM Based Superchannel Transmission Technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3816-3823.
- [2] 唐满, 王少英, 李跃新, 等. 基于自适应时变的 OFDM 无线信道机会估计机制[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(3): 606-610.
TANG Man, WANG Shaoying, LI Yuexin, et al. OFDM Opportunistic Wireless Channel Estimation Mechanism Based on Adaptive Time-Varying[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(3): 606-610.
- [3] 邢钢, 李辉, 高维廷. 降低 OFDM 系统峰均功率比的 PTS 重复搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(10): 80-83.
XING Gang, LI Hui, GAO Weiting. Duplicate Search Algorithm of PTS Technique for PAPR Reduction in OFDM System[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(10): 80-83.
- [4] 孙齐, 黄明, 王灿, 等. OFDM 系统中降低 PAPR 方法研究[J]. 电子科学技术, 2016, 3(5): 611-614.
SUN Qi, HUANG Ming, WANG Can, et al. Research of PAPR Reduction in OFDM System[J]. Electronic Science & Technology, 2016, 3(5): 611-614.
- [5] 纪金伟, 夏玉杰. 一种降低 OFDM 系统 PAPR 的低复杂度盲 SLM 方法[J]. 无线电工程, 2017, 47(5): 27-31.
JI Jinwei, XIA Yujie. A Blind SLM Scheme for Reducing the PAPR of OFDM Systems with Low Complexity[J]. Radio Engineering, 2017, 47(5): 27-31.
- [6] 解来历, 辜方林, 马东堂, 等. 一种基于预留子载波降峰均比的改进方法[J]. 通信技术, 2017, 50(6): 1108-1114.

(下转第 54 页)

- 26.
- [21] 冯爽, 蒋念平. 基于STM32的无线数据传输综合应用[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(9): 228-231.
FENG Shuang, JIANG Nianping. Wireless Data Transmission Applications Based on STM32[J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(9): 228-231.
- [22] 杨光伟, 钱志余, 李赳韬, 等. 一种新型智能输液监护系统的研制[J]. 生物医学工程研究, 2011, 30(1): 35-38.
YANG Guangwei, QIAN Zhiyu, LI Weitao, et al. A New Intelligent Monitoring System for Infusion[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2011, 30(1): 35-38.
- [23] 王东峰. 单片机C语言应用100例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 30-70.
WANG Dongfeng. SCM C Language Application of 100 Cases[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 30-70.
- [24] 刘克成, 张凌晓. C语言程序设计[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 2005: 40-45.
LIU Kecheng, Zhang Lingxiao. C Language Programming[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2005: 40-45.
- [25] BLUM Richard. 汇编语言程序设计[M]. 马朝晖, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006: 15-20.
BLUM Richard. Professional Assembly Language[M]. MA Zhaohui, Translated. Beijing: China Machine Press, 2006: 15-20.

(责任编辑: 廖友媛)

(上接第48页)

- XIE Laili, GU Fanglin, MA Dongtang, et al. Improved Method Based on Tone Reservation to Reduce PAPR[J]. Communications Technology, 2017, 50(6): 1108-1114.
- [7] 李恩玉, 杨士中, 吴皓威, 等. 一种基于PTS技术降低OFDM系统峰均比的改进算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2511-2515.
LI Enyu, YANG Shizhong, WU Haowei, et al. An Improved Method for PAPR Reduction in OFDM Systems Based on the PTS[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(10): 2511-2515.
- [8] 高宇航, 李莉, 韩力, 等. 基于相位翻转PTS降低OFDM系统PAPR的改进算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2016, 34(1): 8-15.
GAO Yuhang, LI Li, HAN Li, et al. PAPR Reduction Technology Based on Phase Flip PTS for OFDM System[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2016, 34(1): 8-15.
- [9] 乐兵兵, 吴多龙, 李瑞, 等. 一种改进的降低OFDM系统PAPR的PTS算法[J]. 电子技术, 2011, 38(3): 51-53.
LE Bingbing, WU Duolong, LI Rui, et al. An Improved PTS Algorithm Reducing PAPR in OFDM System[J]. Electronic Technology, 2011, 38(3): 51-53.
- [10] 卢光跃, 邵朝, 罗琳. 用部分传输序列方法降低实数OFDM信号峰均值比[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 971-974.
LU Guangyue, SHAO Chao, LUO Lin. Peak-to-Average Power Ratio Reduction in Real-Valued OFDM Systems Using PTS Method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(4): 971-974.
- [11] 杨莘元, 李卓, 栗春辉. OFDM-PTS算法中的三种不同分割方法的特性[J]. 信息技术, 2015(8): 82-85.
YANG Shen yuan, LI Zhuo, LI Chunhui. Characteristics of the Three Different Segmentation Algorithms in OFDM-PTS Algorithms[J]. Information Technology, 2015(8): 82-85.

(责任编辑: 廖友媛)