doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.06.008

引用格式:罗仁泽,李芮,杨娇,等. 用于 SFBC MIMO-OFDM 系统的改进 SLM 算法[J]. 电讯技术,2014,54(6):735-739. [LUO Ren-ze,LI Rui, YANG Jiao, et al. An Improved SLM Algorithm for SFBC MIMO-OFDM Systems [J]. Telecommunication Engineering,2014,54(6):735-739.]

用于 SFBC MIMO-OFDM 系统的改进 SLM 算法*

罗仁泽,李 芮**,杨 娇,牛 娜

(西南石油大学 电气信息学院,成都 610500)

摘 要:在空频编码(SFBC)多输入多输出正交频分复用(MIMO-OFDM)系统中传输符号存在较高 峰均功率比(PAPR)问题,采用 SLM 算法能够有效降低系统峰均功率比,但随着发射天线数的增加, 较多的快速傅里叶反变换(IFFT)会增加系统的计算复杂度,因此,构造 F 矩阵并提出了一种基于 F 矩阵 SFBC MIMO-OFDM 系统的改进 SLM 算法。采用 F 矩阵作为相位序列组对空频编码信号进行 独立处理,获得最优相位序列取共轭,将共轭序列中每两个旋转因子为一个单位交换位置,并扰码 SFBC 后各天线的信号,以此减少了每根发射天线上的 IFFT 次数。理论和 MATLAB 仿真分析表明, 该算法获得了良好的峰均比性能,同时也降低了系统的计算复杂度。

关键词:多输入多输出正交频分复用;空频偏码;峰均功率比;改进 SLM 算法;F 矩阵 中图分类号:TN911 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)06-0735-05

An Improved SLM Algorithm for SFBC MIMO–OFDM Systems

LUO Ren-ze, LI Rui, YANG Jiao, NIU Na

(School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: In the multiple – input multiple – output (MIMO) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system with space-frequency block coding (SFBC), the transmission symbols have problem with high peak-to-average power ratio(PAPR). The selective mapping (SLM) algorithm is proposed to reduce the PAPR effectively, but with the increase of transmitting antenna number, more inverse fast Fourier transform(IFFT) will increase the computational complexity of the system. This paper constructs an F matrix and proposes an improved SLM algorithm based on the F matrix for SFBC MIMO-OFDM system. The F matrix is used as phase sequences to deal with the signal after Space-Frequency Blocking Coding(SF-BC) to obtain the optimal phase sequence and its conjugation. In the conjugation sequence, two factors form one unit, within which they exchange their location. The sequence scrambles signals from each antenna after SFBC. Therefore, the number of IFFT for each of the transmitting antenna is reduced. Theoretical analysis and MATLAB simulation show that the method achieves good peak-to-average power ratio(PA-PR) performance as well as reduces the computational complexity of the system.

Key words: MIMO-OFDM; SFBC; PAPR; improved SLM algorithm; F matrix

1 引 言

MIMO-OFDM 系统中核心技术之一为空频编码

(SFBC),在多个发射天线的信号之间采用空频编码 后,信号将产生空域、频域的相关性。通过该编码的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61310306022);四川省科技支撑计划项目(2012FZ0021);四川省"千人计划"引进人才资金 资助项目;西南石油大学油气信号检测与信息处理青年科研创新培育团队资金资助项目(2013XJZT007)

^{*} 收稿日期:2013-12-23;修回日期:2014-03-13 Received date:2013-12-23;Revised date:2014-03-13

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61310306022); Science and Technology Support Project in Sichuan Province(2012FZ0021); The "1000 Talents Project" in Sichuan Province; Foundation of Signal Processing Scientific Research and Innovation Team in Southwest Petroleum University(2013XJZT007)

^{**} 通讯作者:437592751@qq. com Corresponding author:437592751@qq. com

应用,MIMO-OFDM 系统可以利用空间和频率的分 集提高数据传输率,增加系统的容量和传输的可靠 性。然而,由于 MIMO-OFDM 系统中的 OFDM 符号 是由多个独立且经调制的子载波信号叠加而成的, 当载波间相位相同或相近时,信号的叠加会产生瞬 时功率峰值,进入功率放大器的非线性区时会进一 步引发信号畸变,这将严重影响系统的性能。

在 MIMO-OFDM 系统中, 解决其峰均功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)问题的方法 可概括为两个方面。一方面是将 OFDM 系统中常 用方法直接移植到 MIMO-OFDM 系统的每一根天 线上。目前,已经提出的降低 OFDM 系统峰均比的 技术有三类,第一类是信号预畸变技术,最常见的信 号预畸变技术包括限幅^[1]和压扩^[2]等算法,在信号 经过放大前,要经过非线性处理:第二类是编码技 术^[3],原理是利用不同的编码原理避免产生较高 PAPR 的码字出现:第三类是扰码技术,该方法利用 不同的加扰序列对 OFDM 符号进行加权处理,显著 减小大峰值功率信号出现的概率,其中扰码类中如 选择映射(SLM)法^[4]和部分传输序列(PTS)法^[5]因 其性能较好已被广泛应用于 OFDM 系统中。另一 方面是针对 MIMO-OFDM 系统的本身特性,采取更 为有效的方法。如 Yung-L Lee 提出的并行 SLM 算 法^[6],在发射端采用同种旋转序列矢量调制,可减 少辅助信息量,但它是以牺牲部分 PAPR 为代价。 由 M. Tan 等提出的降低 STBC MIMO-OFDM 系统 PAPR 的交叉天线旋转取反(CARI)算法^[7],有效利 用天线之间的附加空间自由度,改善了系统的峰均 功率比。该算法与并行 SLM 算法相比具有良好的 峰均比性能,且每次迭代不需要大量的复乘运算,降 低了计算复杂度,但是随着发射端天线数的增加,直 接拓展反而更增加了系统的复杂度,且不能获得 PAPR 的进一步改善。文献[8]提出的 SFBC MIMO -OFDM 系统中,结合 SLM 算法提出了一种只需采 用少量 IFFT 的低复杂度算法,正是由于缺少 IFFT 的次数,系统不能获得良好的 PAPR 性能。

为了降低 MIMO-OFDM 系统的峰均功率比和 计算复杂度,本文构造了 F矩阵,提出了一种基于 F 矩阵的 SFBC MIMO-OFDM 系统改进 SLM 算法,降 低了系统峰均功率比和计算复杂度。该方法巧妙利 用 MIMO 系统中基于 SFBC 编码后天线上信号的正 交性,利用构造的 F 矩阵对编码信号进行独立处 理,获得的最优相位序列取共轭,以共轭序列中每两 ·736 · 个旋转因子为一个单位交换位置,扰码空频编码的 信号,减少每根天线上 IFFT 次数,从而降低系统计 算复杂度,同时 F 矩阵的使用也让系统获得了良好 的峰均比性能。

电讯技术

2 SFBC MIMO-OFDM 系统及其 PAPR

考虑 $N(N \ge 4)$ 根发射天线的 SFBC MIMO – OFDM 系统,在发射端输入的信息流,首先经过 PSK/QAM 调制映射,映射后的数据流串行进入空 频编码器进行 MIMO 编码,经过空频编码之后的信 息流变为并行数据流,每路数据流分别对应一根发 射天线。对 N = 4 根天线分别进行 OFDM 调制,包 括串并转换、插入导频、IFFT 运算、并串转换、加入 循环前缀,最后送入 D/A 变换,经过变频后由各天 线发送出去。经过信道,接收端实行与发射端相反 的操作,即可获得数据。SFBC MIMO–OFDM 系统 发射端基本框图如图 1 所示。



图 1 SFBC MIMO-OFDM 系统发射端基本框图 Fig. 1 Block diagram of the transmitter in SFBC MIMO-OFDM system

SFBC MIMO – OFDM 系统使用 OFDM 调制方式,它继承了 OFDM 调制的众多优点,同时,也不可避免地存在较高的峰均功率比问题。对于一个具有 N_0 个子载波的 MIMO–OFDM 系统,每根天线上的复数基带信号可表示为

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N_0}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi f_n t}$$
(1)

其中, $0 \le t \le N_0 T$, $f_n = n \times \Delta f$ 表示每根天线上第 n 个 子载波的频率, $\Delta f = 1/N_0 T$,T为符号间隔。

MIMO-OFDM 系统的峰均比定义为每一个 MI-MO-OFDM 时域信号的峰值功率与该信号的平均功 率的比值,表示为

$$PAPR = \frac{\max_{0 \le k \le N_0 - 1} [|x_{j,k}|^2]}{E[|x_{j,k}|^2]}$$
(2)

或者,

$$PAPR(dB) = 10 \times \lg \frac{\max_{0 \le k \le N_0 - 1} [|x_{j,k}|^2]}{E[|x_{j,k}|^2]}$$
(3)

其中 $x_{j,k}$ 表示 MIMO 系统中第 j 根发射天线上载波 序号为 k 的信号,且 $k \in (1, N_0), E[\cdot]$ 表示求数学 期望。

3 基于 F 矩阵的改进 SLM 算法

为简化描述,算法采用天线数为2进行描述。 图2是基于两根发射天线(N=2)的改进 SLM 算法 系统框图。



图 2 基于 SFBC 的改进 SLM 算法系统框图(N=2) Fig. 2 Block diagram of the improved SLM algorithm based on SFBC(N=2)

基于 2×2 天线的 Alamouti 方案中改进 SLM 算法描述如下:

输入二进制数据比特流,采用 PSK/QAM 进行 调制,得到映射信号,经过串并转换后获得 X_i 频域 信号,X_i 表示第 *i* 个频域符号,

$$X_{i} = [X_{0}, X_{1}, \cdots, X_{N_{0}-1}]^{\mathrm{T}}$$
(4)

其中, N_0 表示子载波数, $N \times N$ 的上限值设置为 P(P > 0),[·]^T 表示矩阵的转置;利用 F 矩阵产生初始相位序列组:

$$F = \frac{1}{k} I(N_0) + \frac{1}{N_0} \operatorname{rand}(N_0)$$
 (5)

其中,k为衰减因子, $I(N_0)$ 表示单位矩阵, N_0 表示 子载波个数,rand(N_0)表示随机产生的在(0,1)呈 均匀分布的小数。采用 SFBC 对 X_i 信号进行正交 编码,获得能在两根天线 a、b 上传输的空频信号,分 别为 $X'_{i,a}, X'_{i,b}$,表达式如下:

天线 a:

$$X'_{i,a} = \begin{bmatrix} X_i(0), -X_i^*(1), X_i(2), -X_i^*(3), \\ \cdots, X_i(2m), -X_i^*(2m+1) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} (6)$$

$$\mathcal{F}_{3} \leq \mathbf{b}_{1}$$

$$X'_{i,b} = \begin{bmatrix} X_i(1), X_i^*(0), X_i(3), X_i^*(2), \\ \cdots, X_i(2m+1), X_i^*(2m) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(7)

其中, $m \in [0, \frac{N_0}{2} - 1]$,(•)*表示括号内信号的共 轭;将 X_i 与F矩阵产生的初始相位序列组相乘,加 权后的信号经过 IFFT 后计算 PAPR,并由此选出使 该符号具有最小 PAPR 的最优相位序列,记为 F_m :

$$F_{m} = [p_{0}, p_{1}, \cdots, p_{2m}, p_{2m+1}]^{\mathrm{T}}$$
(8)

对该最优相位序列 F_m 取共轭记为 F_m^* ,将序列 F_m^* 中每两个旋转因子为一个单位交换位置,相位 因子 $f_{m,a} = F_m, f_{m,b}$ 表达式如下:

$$f_{m,a} = [p_0, p_1, \cdots, p_{2m}, p_{2m+1}]^{\mathrm{T}}$$
(9)

$$f_{m,b} = [p_1^*, p_0^*, \cdots, p_{2m+1}^*, p_{2m}^*]^{\mathrm{T}}$$
(10)

将两个相位序列分别作用于 SFBC 后的信号, 上述变换不会影响 SFBC 编码的正交性。其中,相 位序列 $f_{m,a}, f_{m,b}$ 分别对应信号 $X'_{i,a}, X'_{i,b}$;将上述所 得相位因子与对应信号复乘, IFFT 之后计算各自的 PAPR 值记为 $PAPR_a$ 和 $PAPR_b$,选取具有 max ($PA-PR_a, PAPR_b$)的信号作为待发送信号 cand(\hat{x}_i),添加 保护间隔后信号为 \tilde{x}_i ,通过天线将其发送出去。

4 算法理论分析

4.1 相位序列间的关系

在设法采用 SLM 算法降低 Alamouti 方案 MIMO -OFDM 系统的峰均比时,由于对信号进行空频编码 后使信号具有一定正交性,独立应用 SLM 算法,会 破坏 SFBC 编码的正交特性。考虑相位序列间的对 应关系,由于空频编码是在两个相邻载波间,所以此 处只考虑一对相邻子载波[*X*(*m*),*X*(*m*+1)],经过 空频编码后输出为

$$\begin{bmatrix} X(m) & -X^*(m+1) \\ X(m+1) & X^*(m) \end{bmatrix}$$
(11)

假设对天线 1、2 使用的相位序列分别为 $[p_1^m, p_1^{m+1}]$ 、 $[p_2^m, p_2^{m+1}]$,将相位序列与编码后的载波信号相乘即

$$\begin{bmatrix} p_1^m \times X(m) & p_1^{m+1} \times (-X^*(m+1)) \\ p_2^m \times X(m+1) & p_2^{m+1} \times X^*(m) \end{bmatrix}$$
(12)

根据 SFBC 编码原理,要保持其正交性,则必须满足下式:

$$(p_1^m \times X(m))^* = p_2^{m+1} \times X^*(m)$$
 (13)

 $p_1^{m+1} \times (-X^*(m+1)) = -(p_2^m \times X(m+1))^*$ (14) 可以推导出

$$P_2^m = P_1^{m+1*}, P_2^{m+1} = P_1^{m*}$$
(15)

由此考虑 N个子载波,可以得到两根天线相位序列 的关系,

$$\begin{bmatrix} p_1^0, p_1^1, \cdots, p_1^{N-2}, p_1^{N-1} \\ p_1^{1*}, p_1^{0*}, \cdots, p_1^{N-1*}, p_1^{N-2*} \end{bmatrix}$$
(16)

如此产生的相位序列不会破坏 SFBC 编码信号 的正交性。

4.2 计算复杂度分析

F矩阵产生了M个相位序列,倘若直接将F矩 阵作为 SFBC 后产生的两路信号的相位因子,采用 基于 STBC 的并行 SLM 算法时^[6],每个符号在每根 天线上需要做 N 次 IFFT: 若采用改进 SLM 算法,每 个符号在每根天线上只需做1次 IFFT。其计算量 分析如表1所示,其中M表示相位因子数(F矩阵 的维数),N表示 MIMO-OFDM 系统的天线数,G表 示一帧信号所包含的符号数。由此可以看出.并行 SLM 算法中采用大量 IFFT. 而本算法在 MIMO-OFDM 系统多天线多载波调制的条件下, IFFT 次数 有明显降低,即计算复杂度降低了。

表1 小回昇法的17月重ガが Table 1 The calculation analysis of different algorithms		
算法名称	复乘量	复加量
并行 SLM 算法 ^[6]	$\frac{(M \times N) \times G}{2} \times (\operatorname{lb} \frac{(M \times N) \times G}{2})$	$(M \times N) \times$ $Glb(M \times N) \times G$
改进 SLM 算法	$\frac{(M+N)\times G}{2} \times (M+N) \times G$	$(M+N) \times$ $Glb(M+N) \times G$

回答计的计符号八七

算法性能仿真及结果分析 5

(1h -

此部分将对本文中提到的改进 SLM 算法进行 仿真,采用 Alamouti 方案 SFBC 编码的 MIMO 系统, 即发送天线数为2. 仿真过程参数设置如下: 子载波 数 N_0 =128,系统采用过采样系数^[4]L为4,二进制 信号采用 PSK 调制,仿真次数为10 000次。其中,发 射天线数取2可简化多天线系统模型,方便实现 SFBC 编码,L≥4 可以保证过采样后离散值更能接 近于连续信号,但是L过大就会增加系统计算复杂 度,此处选择 L=4 比较恰当。相同参数设置下,仿 真过程中加入基于 STBC 的并行 SLM 算法^[6]和相 继次优^[7]算法。

图 3 给出了不同算法下降低 PAPR 性能的比 较,其中并行 SLM 算法中相位序列组数为 v=4.相 继次优算法中分块数目为 M=4, 改进 SLM 算法中 衰减因子选择 k=15。从图 3 中 CCDF 曲线看出,改 进SLM 算法较原始信号的 PAPR 在10-3 处有约 3.5 dB的改善,而与相继次优算法比较在10-3处 PA-PR 有约0.9 dB的改善,与并行 SLM 算法相比在10-3 处有约1.8 dB的改善,由此可以得出 F 矩阵的使用 可以促进系统 PAPR 的进一步降低。



图 3 不同算法降低 PAPR 的性能比较 Fig. 3 Comparison of PAPR reducing performance of different algorithms

图 4 给出了不同相位因序列组数 v 下的 CCDF 曲线。如图4,当v=4时,CCDF曲线在10-3处,改进 SLM 算法较并行 SLM 算法 PAPR 有约4.8 dB的改 善;当v=16时,改进SLM算法较并行SLM算法有 约3 dB的改善。k 值取定后,随着相位序列组数的 增加,使得改进 SLM 算法在10-3处 PAPR 有3 dB的 改善,因此 F 矩阵用于降低 PAPR 具有较强的稳 定性。



衰减因子 k=5)的 CCDF 曲线图 Fig. 4 CCDF curve of different phase sequence v(same attenuation factor k=5)

· 738 ·

图 5 是 v=4,改进 SLM 算法在不同衰减因子条 件下的 CCDF 曲线图。如图 5,随着衰减因子的降 低,PAPR 也随之改善了。CCDF 曲线在10⁻³处,k=7 时,PAPR 约为5.5 dB;k=5 时,约为4.1 dB;k=2.5 时,约为2.4 dB;k=1 时,约为1.3 dB。可见,F 矩阵 的应用改善了 MIMO-OFDM 系统的峰均比。



图 5 改进 SLM 算法在不同衰减因子 k 下的 CCDF 曲线图 Fig. 5 CCDF curve of the improved SLM algorithm with different attenuation factor k

以上算法随着仿真次数的增加,曲线将更平滑, 所获得的峰均比性能会更加稳定和可靠,但是仿真 需要的时间也随之急剧增加,因此,在对仿真次数进 行多次试验后,所有算法均采用了10 000次仿真,从 以上结果可以看出,算法性能在此条件下的改善也 已经比较稳定和明显了。

6 结 论

针对 SFBC MIMO-OFDM 系统中高 PAPR 问题,构造了 F矩阵并提出了一种基于 F矩阵的改进 SLM 算法。经过严格的理论推导和 Matlab 仿真分析,与并行 SLM 算法和相继次优算法相对比,改进 SLM 算法创新之处在于能极大改善 PAPR 且计算复 杂度大大降低。在 MIMO-OFDM 系统中,随着相位 序列数的增加,边带信息的传输和存储将会成为一 个难点,在该改进 SLM 算法的基础上进一步降低边 带信息的传输方法是今后的研究方向。

参考文献:

 Wang Luqing, Tellambura C A. Simplified clipping and filtering technique for PAR Reduction in OFDM systems
 [J]. Signal Processing Letters, 2005, 12(6):453-456.

- [2] 姜晓俊,杨守义,穆晓敏,等.基于载波干涉和压扩技术的 OFDM 系统 PAPR 降低算法[J].电讯技术,2009,49(1):35-39.
 JIANG Xiao-jun, YANG Shou-yi, MU Xiao-min, et al. PAPR Reduction in OFDM Systems via Carrier Interferometry and Companding Transform[J]. Telecommunication Engineering,2009,49(1):35-39. (in china)
- [3] Chen H, Liang H. PAPR Reduction of OFDM Signals Using Partial Transmit sequences and Reed – Muller Codes [J].
 IEEE Communications Letters, 2007, 11(6):528–530.
- [4] Jeon Hyun Bae, No Jong Seon, Shin Dong Joon. A Low-Complexity SLM Scheme Using Additive Mapping Sequences for PAPR Reduction of OFDM Signals[J]. IEEE Transactions on, 2011,57(4):866-875.
- [5] Li Li. Joint Decoding of LDPC Code and Phase Factors for OFDM Systems With PTS PAPR Reduction [J]. IEEE Transaction on Vehichlar Technology, 2013, 62(1):444–449.
- [6] Lee Y L, YOU Y H, Joen W G. Peak-to-average power ratio in MIMO-OFDM systems using selective mapping[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(12):575-577.
- [7] Tan Mizhou, Latinovic Z, Bar-Ness Y. STBC MIMO-OFDM Peak-to-Average Power Ratio Reduction by Cross -Antenna Rotation and Inversion[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(7):592-594.
- [8] Wang Sen Hung, Li Chih Peng. A Low Complexity PAPR Reduction Scheme for SFBC MIMO-OFDM Systems[J]. Signal Processing Letters, 2009, 16(11):941-944.

作者简介:



罗仁泽(1973—),男,四川内江人,2005 年于电子科技大学获信号和信息处理专业博 士学位,现为教授、博士生导师,四川省"千人 计划"特聘专家,主要从事通信传输和信号处 理技术研究;

LUO Ren – ze was born in Neijiang, Sichuan Province, in 1973. He received the

Ph. D. degree in Signal and Information Processing from University of Electronic Science and Technology of China in 2005. He is now a professor and also the Ph. D. superrisor. His research concerns communication transmission and signal processing technology.

Email:lrzsmith@126.com

李 芮(1989—),女,四川邛崃人,硕士研究生,主要研 究方向为多输入多输出正交频分复用系统中降低信号峰均 功率比技术。

LI Rui was born in Qionglai, Sichuan Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns the PAPR reduction technology of MIMO–OFDM system.

Email:437592751@qq. com