

MIMO-OFDM 系统训练序列构造及其同步方法

罗仁泽, 杨 娇, 李 芮, 牛 娜, 党煜蒲, 付元华, 曹 鹏

(西南石油大学电气信息学院, 四川成都 610500)

摘 要: 针对 MIMO-OFDM 系统对同步错误率和载波频偏特别敏感问题, 本文提出了 MIMO-OFDM 系统训练序列构造及其同步方法. 该同步方法设计的训练序列由两个结构不同的序列构成: 第一个序列利用重复性构成, 第二个序列利用反对称性构成, 其构造训练序列中的 β 因子影响系统定时同步性能. 在接收端, 利用训练序列和本地数据信号进行互相关获取定时同步, 在获取精确地定时同步后进行小数频偏估计和整数频偏估计, 其整数频偏估计范围可达到 $1/4$ 带宽. 通过理论分析和仿真表明: 本文提出的同步新方法比常规方法有更好的同步性能, 并且降低了系统计算复杂度.

关键词: MIMO-OFDM 系统; 训练序列; 时间同步; 频率同步

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)09-1781-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.09.18

The Construct of Training Sequence and Synchronization for MIMO-OFDM System

LUO Ren-ze, YANG Jiao, LI Rui, NIU Na, DANG Yu-pu, FU Yuan-hua, CAO Peng

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

Abstract: To reduce synchronization error and sensitivity to carrier frequency offset of MIMO-OFDM system, this paper proposes that construction of training sequence and synchronization method for MIMO-OFDM system. The training sequences of the synchronization method consist of two sequences of different structures: the first one is repetitive and the second one is antisymmetric. The factor β in the training sequences affects timing synchronization performance of the system. The timing synchronization is caught At the receiver by cross-correlating the training sequence and the local signal. The fractional frequency offset and integer frequency offset are estimated after catching precise timing synchronization, with the range of the integer frequency offset estimation being one-quarter of the bandwidth. Theoretical analysis and simulation show that the proposed synchronization has better synchronization performance than the conventional methods and reduces the computational complexity.

Key words: MIMO-OFDM system; training sequence; timing synchronization; frequency synchronization

1 引言

同步错误率和载波频偏是 MIMO-OFDM 同步系统特别敏感的问题. 目前, 同步模型分为: 集中式 MIMO-OFDM 同步模型和分布式 MIMO-OFDM 同步模型.

常用的集中式 MIMO-OFDM 同步方案有两种: 第一种是在各收发天线在相同位置插入正交的训练序列. Mody 和 Stuber^[1]提出通过重复短序列结构方法加强训练序列抗多径的能力, 在接收端, 采用接收信号与本地序列相关进行时间同步和频率同步. 但缺点是时域正交序列在多径衰落信道下易受到影响, 减弱序列的正交性, 影响

系统同步性. Qingyu Zhu 和 Zhiqiang Liu^[2]提出一种复合天线 OFDM 序列结构设计及其同步算法, 但训练序列结构比较复杂, 同步算法复杂度较高. Liming He^[3]提出重复训练序列频率同步方法, 每根天线上采用不同的训练序列, 天线间干扰降低, 但该算法没有考虑系统的定时偏移. Chin-Liang Wang 和 Hung-Chin Wang^[4]提出采用设置门限的方法降低系统计算复杂度, 并利用传统方法和信道估计获取同步信息. 但该算法频偏估计范围较小, 用长序列作为训练序列, 其占用大量带宽资源. 第二种方法是采用时间正交的训练序列的方法, 通过时间上相互错开在不同发射天线上插入训练序列. Schenk^[5,6]等人提出

一种无线局域网 MIMO OFDM 同步方法,在接收端,利用接收信号与本地训练序列相关获得时间同步,及利用接收信号延迟相关获得频率同步相位信息.该方法训练序列设计简单,但缺点是随着天线数增加,正交训练序列所占用带宽也相应增加,从而导致频率利用率下降.FAN Hui-li^[7]等人采用正交性的 CAZAC 序列进行时间同步、频偏估计,并获得良好的同步性能,但算法只适应于高斯信道及短波信道模型,频偏估计范围较小.Li Jun^[8]等人提出利用信道估计信息降低系统计算复杂度,采用最大似然法(ML)准则进行频偏估计,但算法中采用信道的信噪比,信道的信噪比难以确定,这将影响算法在实际中的应用.针对常用的分布式 MIMO-OFDM 同步模型,由于在基站端各收发天线是分开放置,因而不同的发射天线之间信号的时延和频偏各不相同.因此,分布式 MIMO-OFDM 系统需要分别估计各收发天线对应的定时和频率偏移.从而实现系统的同步性能^[10~13].分布式 MIMO-OFDM 同步可以估计各收发天线的定时和频偏估计,但是其同步系统非常复杂,并且增大了系统计算复杂度.

在已有训练序列同步算法的基础上,本文提出采用正交训练序列插入到本地序列,设计具有良好的自相关性和互相关性的训练序列.通过训练序列和本地序列的互相关性实现系统定时同步.小数频偏估计和整数频偏估计是在获取精确地定时同步后进行.本文提出的算法与文献[6]和[7]在多径衰落信道的环境下的仿真对比,理论分析和仿真结果表明:本文提出的算法的同步性能与文献[6]和[7]相比较,其具有精确地定时同步性能和频率同步可估计较大的频偏范围,并且降低系统计算复杂度.

本文余下部分的安排如下:第二部分是简要描述系统模型;第三部分提出训练序列构造方法和时间与频率同步具体算法;第四部分是时间同步和频率同步算法的理论分析;第五部分是本文算法的性能仿真和与其它算法的对比;最后一部分是本文结论.

2 系统模型

具有 N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线的 MIMO-OFDM 系统结构的同步方法主要有两部分组成,在发送端主要有:输入的数据比特流经过编码、符号映射、MIMO 编码、IFFT 等模块;在接收端主要有:定时同步和频率同步、FFT、信道估计、MIMO 解码、解码模块等.MIMO-OFDM 系统中的信道为多径衰落信道^[9].

$$r(n) = \sum_{k=0}^{N_t-1} e^{j(2\pi/N)\epsilon_k(n-\tau_k)} \sum_{l=0}^{L-1} h_k y_k(n - \tau_k - l) + w(n) \quad (1)$$

式中, $h_k = [h_k(0), h_k(1), \dots, h_k(L-1)]$ 表示 L 径的信道脉冲响应向量. y_k 表示传输的信号, τ_k 表示符号到达时间相对于采样周期的整数值的的时间偏移, ϵ_k 相对于子载波间隔的归一化的载波频率偏移, N 表示快速傅里叶变换(FFT)的长度, $w(n)$ 表示均值为 0 方差为 δ_w^2 的复高斯白噪声.

3 同步算法

3.1 构造训练序列

如图 1 是训练序列插入到数据的结构框图.

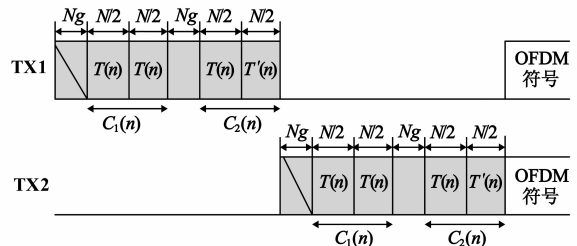


图1 训练序列插入到数据的结构框图

构造一个新训练序列 $T(n)$,在训练序列随 β 因子增加,其序列自相关性增强,其序列 $T(n)$,有:

$$T(n) = \exp\left(\frac{2j\pi n^2}{\beta N}\right), n = 0, 1, \dots, N/2 - 1 \quad (2)$$

其中,取 $r = N/2 - 1$, $\gcd(r, N/2) = 1$, $\beta \in [1, 25]$;

取 $T(n)$ 序列重复一次构造长度为 N 的训练序列 $C_1(n)$,有:

$$C_1(n) = \begin{cases} T(n), & n \in [0, N/2 - 1] \\ T(n - N/2), & n \in [N/2, N - 1] \end{cases} \quad (3)$$

取 $T(n)$ 序列进行反对称,生成一个新的序列 $T'(n)$,有:

$$T'(n) = -T(N/2 - n), n \in [0, N/2 - 1] \quad (4)$$

将序列 $T(n)$ 和 $T'(n)$ 构成长度为 N 的序列 $C_2(n)$,有:

$$C_2(n) = \begin{cases} T(n), & n \in [0, N/2 - 1] \\ T'(n - N/2), & n \in [N/2, N - 1] \end{cases} \quad (5)$$

3.2 时间同步算法

当接收端接收到的训练序列 $C_1(n)$ 与本地传输的数据信息进行互相关,来获取定时同步,同步的定时量度函数可以表示为:

$$P(d) = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \left[\sum_{n=0}^{N/2-1} r_j^*(d+n) C_{1,i}(n) \right] \cdot \left[\sum_{n=0}^{N/2-1} r_j^*(d+n+N/2) C_{1,i}(n) \right]^* \quad (6)$$

$$R(d) = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \sum_{n=1}^{N/2-1} |C_{1,i}^*(n+d) \cdot C_{1,i}(n+d)| \quad (7)$$

$$M(d) = \frac{|P^2(d)|}{R^2(d)} \quad (8)$$

式中, N_t 为发送端天线条数, N_r 为接收端天线条数, N 为一个不包含循环前缀 OFDM 符号的长度, d 为整数值, d 表示接收的序列相对于本地序列的相对滑动位置, n 为接收信号的采样点数, $()^*$ 表示括号内的数据取共轭运算, $C_{1,i}(n)$ 表示各发送天线上插入的第一个训练序列, r_j^* 表示各接收天线上传输的数据信号取共轭运算;

通过设定简单的门限值,使目标函数 $M(d)$ 超过门限值 d 值判为定时同步的位置. 即同步时刻:

$$\tau_{\text{est1}} = \arg \max_d (M(d)) \quad (9)$$

3.3 频率同步算法

频率同步是在获取精确的定时同步后进行,利用本地数据信息进行相关,得到小数频偏估计值:

$$\epsilon_f = \frac{1}{\pi} \text{angle}(R(\tau_{\text{est1}})) \quad (10)$$

$$R(\tau_{\text{est1}}) = \sum_{j=0}^{N_r} \sum_{m=0}^{N_c-1} r_j^*(\tau_{\text{est1}}) r_j(\tau_{\text{est1}} + N/2) \quad (11)$$

式中, 小数频偏估计范围是 $\epsilon_f \in (0, 1)$.

将估计出的小数频率偏移补偿后进行频率的整数频偏估计, 整数频偏估计是在时域的条件下直接估计的 ϵ_i , 省去了 FFT 运算. 整数频偏估计值:

$$\epsilon_i = \tau_{\text{est2}} - \tau_{\text{est1}} - N - Ng + 1 \quad (12)$$

$$Q(d') = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} \left[\sum_{n=0}^{N/2-1} r_j^*(d' + n) C_{2,i}(n) \right] \cdot \left[\sum_{n=0}^{N/2-1} r_j^*(d' + N/2 - n) C_{2,i}(n) \right]^* \quad (13)$$

$$\tau_{\text{est2}} = \arg \max_{d'} (Q(d')) \quad (14)$$

其中, Ng 表示循环前缀的长度, $C_{2,i}(n)$ 表示各发送天线上插入的第二个训练序列, r_j^* 表示各接收天线上传输的数据信号取共轭运算; 式(13)与(14)中的搜索是以 $d' = \tau_{\text{est1}} + N + Ng$ 为中心. 整数频偏估计的范围 $\epsilon_i \in (-N/4, N/4)$.

4 算法性能理论分析

这部分是对算法在多径衰落信道的简单数学分析, 具体仿真对比在第五部分进行详细的介绍.

4.1 时间同步性能分析

时间同步是确定 FFT 窗口数据的起始位置, 在本文中数据的时间同步位置是由训练序列 $C_1(n)$ 与本地数据信号相关获得. 因此, 则在一定信噪比下, 时间同步正确检测概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_r &= \{M(d)\} \\ &= P_r \{E[M(d)] \leq M(d) \leq E[M(d)] + N/2\} \\ &= F_{M(d)} \{E[M(d)] + N/2\} - F_{M(d)} \{E[M(d)]\} \\ &= \frac{1}{2} \frac{\text{erfc}\{E[M(d)] - E[M(d)]\}}{\sqrt{2\sigma_c^2}} \end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2} \frac{\text{erfc}\{E[M(d)] - E[M(d)] + N/2\}}{\sqrt{2\sigma_c^2}} \quad (15)$$

式中: P_r 表示时间同步正确概率, σ_c^2 表示本地数据信号的方差值; $F_{M(d)}$ 表示 $M(d)$ 的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) $F_{M(d)} = 1 - (1/2)\text{erfc}\{[x - M(d)]/\sqrt{2\sigma_c^2}\}$.

4.2 频率同步性能分析

由式(10)得, 小数频偏估计的均方误差可以表示为:

$$\text{var}(\hat{\epsilon}_f - \epsilon_f) \geq \frac{N^2}{(2\pi)^2 N_r (N/2) \sigma} = \frac{N}{2\pi^2 N_r \sigma} \quad (16)$$

式中: ϵ_f 表示小数频偏的理想估计值, N_r 为接收天线数, σ 表示接收端的信噪比.

本文提出的整数频偏估计算法是在时域的条件下进行的频偏估计. 省去了 FFT 运算, 在一定程度上减小系统计算复杂度, 从而减小系统运算量.

5 仿真分析

仿真主要参数设置: 仿真次数 10000, 收发天线数为 2×2 , 调制方式是 BPSK, 子载波数 $N = 1024$, 循环前缀长度 $Ng = 128$, 信道环境选取在多径衰落信道环境, 其频率偏移 $\epsilon = 50.3$.

图 2 为同步正确概率性能比较 ($\beta = 10$) 仿真, 可以看出, 在相同信噪比条件下, 本文提出的同步算法的同步正确概率明显高于文献[6]和[7]的算法, 说明本文提出多的定时同步性能较好.

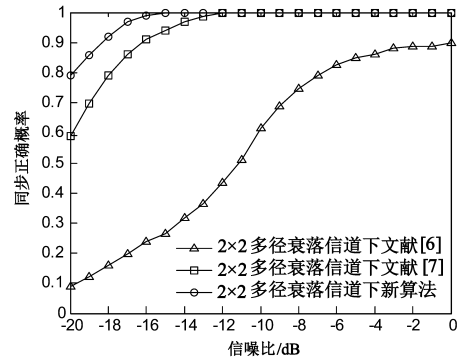


图2 同步正确概率性能比较($\beta=10$)

图 3 小数频偏估计均方误差性能比较 ($\text{CFO} = 0.3$) 仿真, 可以看出, 在不同信噪比条件下, 获得相同的频率同步均方误差时, 本文提出的小数频偏估计的频率同步性能要优于文献[6]和[7]算法. 本文小数频偏估计算法的频偏范围为 $|\epsilon_f| \leq 1$ 具有较低的均方误差, 克服常规算法频偏范围是 $|\epsilon_f| \leq 0.5$ 的缺陷.

图 4 频偏估计均方误差性能比较 ($\text{CFO} = 50.3$) 仿真, 可以看出随着信噪比的增加, 本文提出的频率同步

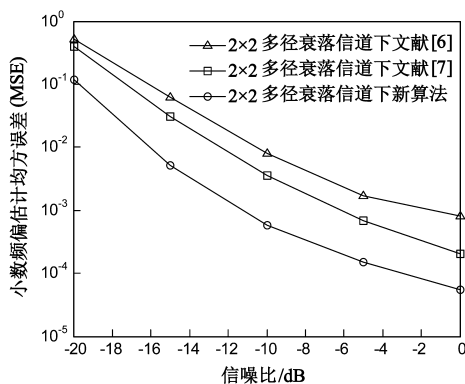


图3 小频偏估计均方误差性能比较(CFO=0.3)

算法与文献[7]比较,频偏估计的均方误差明显较小,频率同步性能较好.

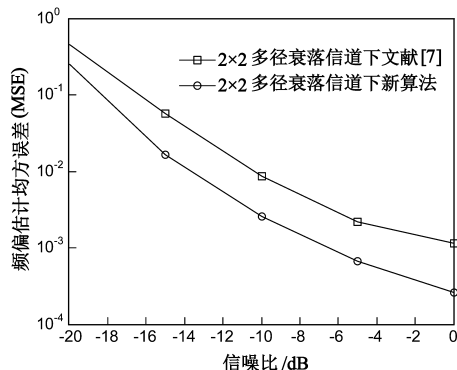
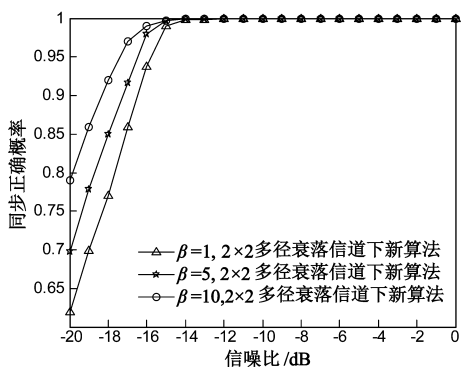


图4 频偏估计均方误差性能比较(CFO=50.3)

图5不同 β 因子的同步正确概率仿真,可以看出,在相同信噪比为-20dB时,选取 β 因子逐渐增大,其系统的同步正确概率性能也增强. $\beta=1$,同步正确概率为60%; $\beta=5$,同步正确概率为70%; $\beta=10$,同步正确概率为80%.因此, β 因子不同,对系统同步性能也有所的影响.

图5 不同 β 因子的同步正确概率

6 结论

本文提出了 MIMO-OFDM 系统训练序列构造及其

同步方法,该同步算法可以提高无线通信系统的信道容量和频谱利用率,并且提高系统的有效性;同时设计训练序列的 β 因子影响系统的同步性能,随着 β 增大,系统的定时同步性能变好.比同类常规方法,性能改善较大.理论分析和仿真表明:本文提出的同步新方法同步性能较好,同时降低系统计算复杂度.

参考文献

- [1] Mody A N, Stuber G L. Synchronization for MIMO OFDM systems[A]. Proceedings of the Global Telecommunications Conference[C]. San Antonio, TX: IEEE, 2001. 509 - 513.
- [2] Zhu Q, Liu Z. Preamble design for multiple-antenna OFDM[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1123 - 1127.
- [3] Liming H. Frequency Synchronization in MIMO OFDM Systems[A]. Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communication Networking and Mobile Computing[C]. Chengdu: IEEE, 2010. 1 - 4.
- [4] Wang C L, Wang H C. Optimized joint fine timing synchronization and channel estimation for MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(4): 1089 - 1098.
- [5] Schenk T C W, Van Zelst V. Frequency synchronization for MIMO OFDM wireless LAN systems[A]. Proceedings of 58th Vehicular Technology Conference[C]. Orlando, FL, USA: IEEE, 2003. 781 - 785.
- [6] Van Zelst V, Schenk T C W. Implementation of a MIMO OFDM-based wireless LAN system[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 483 - 494.
- [7] Hui-li F, Jing-fang S, Ping Y, et al. A robust timing and frequency synchronization algorithm for HF MIMO OFDM systems[A]. Proceedings of the Global Mobile Congress[C]. Shanghai: IEEE, 2010. 1 - 4.
- [8] Li Jun, He Bo, Hou Meng, Li Ming-Ming, WU Wei-ling. Robust frequency synchronization and channel estimation algorithms for burst-mode MIMO-OFDM[A]. Proceedings of the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications[C]. Taichung: IEEE, 2010. 1868 - 1873.
- [9] 罗仁泽, 戈勇华, 党煜蒲, 等. 叠加弱能量序列的 OFDM 系统时频同步方法[J]. 电子学报, 2012, 40(2): 412 - 416. Luo Ren-ze, Ge Yong-hua, Dang Yu-pu, et al. Timing and frequency synchronization algorithm with superimposed weak power sequence for OFDM systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(2): 412 - 416. (in Chinese)
- [10] Saemi A, Cances J, Meghdadi V. Synchronization algorithms for MIMO OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(12): 4441 - 4451.
- [11] Kim K J, Pun M O, Iltis R A. Joint carrier frequency offset and channel estimation for uplink MIMO-OFDMA systems

using parallel Schmidt Rao-Blackwellized particle filters[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(9): 2697 – 2708.

- [12] Xi-Yin Wang, Zi-Wei Zheng. Research on the synchronization methods for the distributed MIMO-OFDM systems[A]. Proceedings of the International Conference on Electronics, Com-

munications and Control [C]. Ningbo: IEEE, 2011. 2252 – 2254.

- [13] Bannour A, Sun Y, Ammari M L, et al. A novel algebraic carrier frequency offset estimator for ASTC-MIMO-OFDM systems over a correlated frequency-selective channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(6): 2468 – 2475.

作者简介



罗仁泽 男, 1973 年 9 月出生于四川省内江市, 博士, 教授, 博士生导师. 主要从事通信信号处理技术研究. 已在国内外核心刊物及国际学术会议发表学术论文 96 篇, 其中 EI、ISTP 检索 35 篇; 独立出版学术专著 1 部.

E-mail: lrzsmith@126.com



杨 娇 女, 1990 年 12 月出生于新疆伊宁市, 现就读于西南石油大学电气信息学院研究生. 研究方向: OFDM 系统及 MIMO-OFDM 系统同步技术.

E-mail: yangjiao113@126.com