

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.025

引用格式:罗仁泽,杨娇,李芮,等. MIMO-OFDM 系统同步技术研究进展[J]. 电讯技术,2014,54(8):1171-1176. [LUO Ren-ze, YANG Jiao, LI Rui, et al. Research Progress on Synchronization Technology for MIMO-OFDM System[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(8): 1171-1176.]

MIMO-OFDM 系统同步技术研究进展*

罗仁泽^{1,2,**}, 杨 娇², 李 芮², 胡帅男²

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500; 2. 西南石油大学 电气信息学院, 成都 610500)

摘 要:多输入多输出正交频分复用(MIMO-OFDM)系统对定时偏移和频率偏差极其敏感,并且对时间同步精度要求极高。分析比较了 29 种具有代表性的 MIMO-OFDM 系统同步算法的优缺点,指出针对数据辅助类的同步方法,采用共轭、取反等特性构造优良正交性的训练序列是提高时间同步性能的关键,可在时域进行频偏估计和降低参数维数来降低系统计算复杂度;针对非数据辅助类的同步方法,构造计算复杂度较低的代价函数是提高频率同步性能的关键,这些都是 MIMO-OFDM 系统同步方法值得研究的方向。

关键词:MIMO-OFDM; 训练序列; 时间同步; 频率同步; 研究进展

中图分类号:TN919.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1171-06

Research Progress on Synchronization Technology
for MIMO-OFDM System

LUO Ren-ze^{1,2}, YANG Jiao², LI Rui², HU Shuai-nan²

(1. State key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract:Very sensitive to timing offset and frequency offset, the Multiple Input Multiple Output (MIMO) Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system requires high accuracy of synchronization. This paper analyzes and compares the advantages and disadvantages of twenty-nine representative synchronization algorithms for MIMO-OFDM system. On this base, it points out that, for data-aided synchronization method, the key to improve the time synchronization performance is to construct training sequences with good orthogonality on the basis of the characteristics of conjugate anti-symmetry, and the computational complexity of system can be lowered by conducting frequency offset estimation in time domain and reducing dimension parameters; for non-data-aided synchronization method, the key to improve the frequency synchronization performance is to construct cost function with lower computational complexity. The summarized techniques for MIMO-OFDM system deserve further investigation.

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

* 收稿日期:2014-04-09;修回日期:2014-06-09 Received date:2014-04-09;Revised date:2014-06-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61310306022);四川省“千人计划”引进人才资金资助项目;四川省科技支撑计划资助项目(2012FZ0021);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)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China (No. 61310306022);The “1000 Talents Project” in Sichuan Province; The Science and Technology Support Foundation of Sichuan Province (2012FZ0021);Foundation of Signal Processing Scientific Research and Innovation Team in Southwest Petroleum University (2013XJZT007)

** 通讯作者:lrzsmith@126.com Corresponding author:lrzsmith@126.com

1 引言

正交频分复用 (OFDM) 技术是一种多载波传输技术,其具有频谱利用率较高、抗多径衰落等特点。多输入多输出 (MIMO) 技术充分利用空间资源,实现多发射多接收的功能,在不增加频谱资源和发射天线功率的情况下,提高信道的容量。MIMO 与 OFDM 结合的系统具有信号传输稳定、频谱利用率高、高速传输率等特点,能够很好地满足下一代无线传输网络的要求,其主要应用领域包括无线宽带接入 (WiMax)、无线局域网 (WLAN)、下一代移动无线通信系统 (B3G/4G) 等^[1]。

由于在高速移动的环境下,MIMO-OFDM 系统易受传输信道的时延产生定时偏移,并且在收发天线两端,其振荡器频率不一致,或者受到多普勒频偏和频率偏差的影响产生频率偏移。因此,MIMO-OFDM 系统需要进行时间同步和频率同步来实现数据准确、高速的传输。

目前,MIMO-OFDM 同步技术主要是分为两类:第一类是数据辅助类的同步方法,其主要是利用训练序列获取时频同步信息,并且具有计算复杂度较低、同步精度较高等特点;第二类是非数据辅助类同步方法,其虽然不需要增加其他开销,并可以有效提高系统频带利用率,但是其系统计算复杂度较高,频偏估计范围受限制,并且不适用于分组突发的系统。本文将对具有代表性算法的两类 MIMO-OFDM 同步技术进行较为详细的分析,同时给出提高 MIMO-OFDM 系统同步性能的建议。

2 MIMO-OFDM 数据辅助类方式同步技术研究现状

数据辅助类同步方法根据模型不同分为两种:第一种为集中式 MIMO-OFDM 同步系统,其假设所有的发射天线到达接收天线的时间延迟和频率偏移相同;第二种为分布式 MIMO-OFDM 同步系统,其不同的发射天线和同一接收天线的时间延迟和频率偏移均不同。

2.1 集中式 MIMO-OFDM 同步技术

集中式 MIMO-OFDM 同步方法主要思想:在发射端,将每个发射天线上的一个 OFDM 符号前插入训练序列;在接收端,利用本地训练序列与接收信号自相关或互相关获得定时同步信息及频偏估计。

文献[2]提出同步方法是在各发射天线的相同位置插入正交训练序列,在接收端,采用接收信号与

本地序列相关进行定时偏移估计和频偏估计。在多条衰落信道下时域正交序列的正交性易受到影响,因此,天线间的干扰增大,其自相关函数的峰值将变得模糊,同步性能降低。其设计的训练序列结构框图如图 1 所示,每根发射天线上的训练序列的长度是 N ,训练序列是由重复序列 $G+N_I$ 构造,其中 G 表示循环前缀的长度, N_I 能被 N 整除,且 $G \leq N_I \leq N$ 。

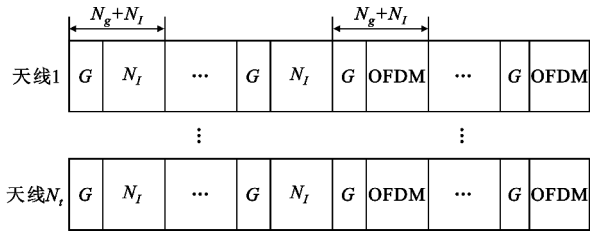


图 1 文献[2]训练序列结构框图
Fig. 1 The block diagram of the training sequence structure in Reference [2]

文献[3]提出采用在各发射天线上插入时间正交的训练序列,时间同步利用接收信号与本地训练序列相关获得,频率同步是接收信号延迟相关获得相位信息。该方法每根天线上的训练序列可以相同,因此,训练序列设计简单、方便。但随着天线数的增加,训练序列将会占用大量的频带资源,导致频谱利用率降低。其设计的训练序列结构框图如图 2 所示,每根发射天线上插入两个连续长度为 N 的训练序列, $2N_g$ 表示循环前缀的长度。

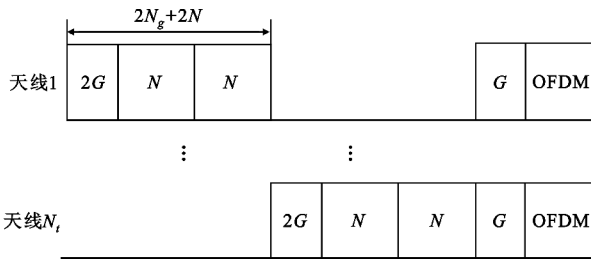


图 2 文献[3]训练序列结构框图
Fig. 2 The block diagram of the training sequence structure in Reference [3]

文献[4]提出的方法是对 Schenk 方法的改进,采用两个训练序列移位正交插入到各发射天线上,在时域上可进行整数频偏估计,省去 FFT 运算,降低系统计算复杂度。改进后的时间同步准确性较好,小数频偏估计精度较高。但由于插入两个训练序列,存在训练序列占用大量频带资源的问题。其设计的训练序列结构框图如图 3 所示,Train1 是由长度为 $N/2$,周期为 2 的 chu 序列重复构成,Train2 是由长度为 N 的 chu 序列构成。

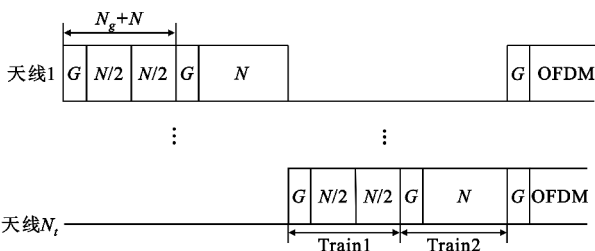


图 3 文献[4]训练序列结构框图

Fig. 3 The block diagram of the training sequence structure in Reference[4]

文献[5–6]中只提出时间同步算法并且是在时域内进行。时间同步算法主要是利用良好的自相关性和正交性的序列构造新的训练序列结构,一般常用 CAZAC 序列、GCL 序列、ZCZ 序列等采用共轭、取反、镜像特性产生相关性更佳的新训练序列,其新训练序列是进行时间同步算法提高系统同步性能的关键。但是,此类算法存在缺陷,没有考虑频率偏移。因此,在存在频率偏移的情况下,同步性能可能会受到影响。文献[7–9]中采用良好自相关性和正交性的序列构造新的训练序列结构,其序列采用共轭对称结构,可在很大程度上提高同步性能,但是,此类算法的频偏估计范围较小。

2.2 分布式 MIMO-OFDM 同步技术

分布式 MIMO-OFDM 同步算法主要是进行多频偏估计,最早是源于文献[10]提出的多频偏方法。假设已获得精确时间同步的情况下,随后进行多频偏估计。采用正交性重复放置的 Walsh 码作为训练序列,在接收端,将接收信号做差分相关进行频偏估计。该方法可以估计收发天线之间的不同频偏,但在多径衰落信道下的同步性能不理想,频偏估计范围较小。其设计的训练序列结构框图如图 4 所示,在每根天线上采用长度为 $N/4$ 、周期为 4 的重复结构组成训练序列。

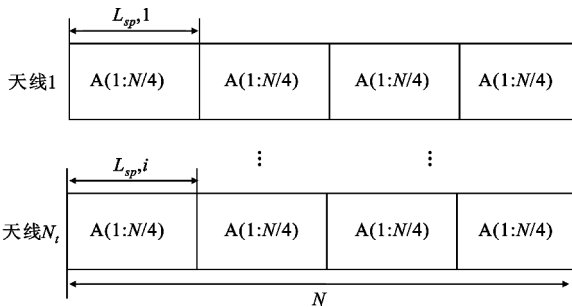


图 4 文献[10]训练序列结构框图

Fig. 4 The block diagram of the training sequence structure in Reference [10]

文献[11]提出一种“不等周期”训练序列的时间同步算法,训练序列采用重复序列的结构,不同的天线采用长度不同的训练序列,在接收端,利用不等长度的相关函数来获取时间同步估计值,因此,可区分不同天线间的时延,但没考虑频率偏移和多径衰落信道情况。其设计的训练序列为

$$Z_{ss,i}(k) = Z_{sp}(k \bmod L_{sp,i}), k = 1, 2, \dots, L_{ss};$$
$$i = 1, 2, \dots, N_i \quad (1)$$

式中, $Z_{ss,i}$ 表示第 i 根发射天线的同步训练序列; Z_{sp} 表示同步序列的本源序列; L_{ss} 是本源训练序列,其长度为 N 。文献[11]同步方法训练序列结构框图如图 5 所示,用不同长度的 $L_{sp,i}$ 从 Z_{sp} 中截取不同周期的同步训练序列插入到各发射天线上。

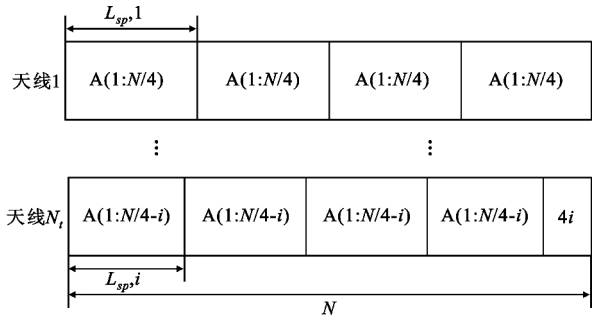


图 5 文献[11]训练序列结构框图

Fig. 5 The block diagram of the training sequence structure in Reference [11]

针对上述问题,文献[12]提出一种良好自相关性和互相关性的伪随机加权序列以及本地训练序列的分段共轭对称特性估计各收发天线间的定时偏移,利用本地训练序列的重复短序列进行迭代频偏估计。在多径衰落信道下精确地估计出收发天线间的定时偏移和较大范围的频偏。但由于频偏估计采用迭代运算进行估计,因此,系统计算复杂度较高。在各发射天线上,本源序列以频域在子载波上传输的数据矢量为

$$T = [t_0, 0, \dots, t_{2L}, 0, \dots, t_{2 \times 2L}, 0, \dots, t_{(M+1)2L}, 0, \dots, 0] \quad (2)$$

式中, L 是正整数,其决定频偏估计范围; $M = N/2^L$; $t_0, t_{2L}, t_{2 \times 2L}, \dots, t_{(M+1)2L}$ 是实数。训练序列的时域采样数据表示为

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} t_n e^{j \frac{2\pi kn}{N}} = \sum_{m=0}^{M-1} t_{m2^L} e^{j \frac{2\pi km2^L}{N}} \quad (3)$$

为了估计各收发天线对之间的定时偏移和频率偏移,将对各发射天线上的本源序列进行加权,其设计的训练序列结构框图如图 6 所示,图中 $p_{i,0}, p_{i,1},$

$\cdots, p_{i,2M-1}, i=1,2,\cdots,N_t$, 其中 $p_{i,j} (i=1,2,\cdots,N_t, j=0,1,\cdots,2M-1)$ 值是+1 或者-1。

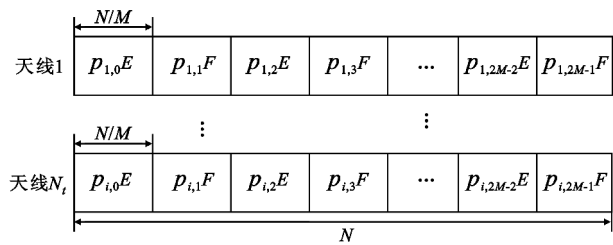


图6 文献[12]训练序列结构框图

Fig.6 The block diagram of the training sequence structure in Reference [12]

文献[13-14]中只提出时间同步算法,训练序列采用自相关性良好的序列构成,利用接收信号之间的相关性获取定时同步信息,并通过设置门限值提高算法同步性能。文献[15-16]假设已获取精确的定时同步,在接收端利用接收信号相关函数获得各收发天线的频偏估计值。文献[17-20]提出时频同步算法,在接收端利用接收信号的相关函数,不仅可较为精确地获得定时偏移,而且还可估计出各收发天线间的频偏。但是,此类算法的计算复杂度与同步性能未达到一个均衡点。

3 MIMO-OFDM 非数据辅助类方式同步技术研究现状

非数据辅助类同步算法可以分为两种:一种是通过循环前缀与复制信号的相关性来获得同步信息,另一种是盲同步,该方法主要是针对载波的频偏估计。

3.1 基于循环前缀的 MIMO-OFDM 同步技术

在单天线 OFDM 系统中采用基于循环前缀的极大似然算法进行频率偏移和定时频偏估计的联合估计存在许多弊端,其算法的定时估计时间同步性能较差,频偏估计范围较小,同时在多径衰落环境下数据的相关性会遭到破坏,从而算法性能下降。在 MIMO-OFDM 系统中同样存在以上问题,因此,单独使用基于循环前缀的同步算法研究相对较少。

文献[21]提出一种新的基于循环前缀的频率同步方法,该方法根据最大比合并原理,减低系统符号间干扰和噪声对频偏估计性能的影响,从而提高频率同步算法性能,但该算法频偏估计范围较小。

文献[22]提出一种基于交织循环前缀的定时同步方法,该方法主要是采用交织的方法来设计循

环前缀,提高系统时间同步性能,但是由于需要产生交织表,从而会增加系统的计算复杂度。

文献[23-24]是将基于循环前缀与训练序列相结合的同步方法,该方法可以有效地弥补只采用循环前缀的同步方法的不足,提高系统的同步性能。

3.2 MIMO-OFDM 盲同步技术

MIMO-OFDM 盲同步方法主要是针对系统载波进行频偏估计,目前,对 MIMO-OFDM 系统盲同步方法研究较少,较早在 MIMO-OFDM 系统中采用盲同步,大多数都是将单天线 OFDM 系统的盲同步方法应用于 MIMO-OFDM 系统中,如文献[25]提出采用峰度代价函数来估计 MIMO-OFDM 系统的盲同步算法,该方法可以有效地估计 MIMO-OFDM 系统载波频率偏移,但不足之处是该算法只在高斯信道下验证其有效性,因此,无法判断该算法在多径衰落信道下是否可以有较好的同步性能。

文献[26]提出一种基于 OFDM 系统固有虚子载波结构的频偏估计方法,该方法不需要任何导频资源,有较低计算复杂度和较高精度的小数频偏估计,在估计较大频偏时,采用增加泰勒级数近似项和迭代机制的应用可以获得较高的估计精度。但是在估计整数频偏时,计算复杂度较高。

文献[27]提出采用接收信号的循环平稳性和最小二乘法准则来估计分布式 MIMO-OFDM 系统各收发天线对的频率偏移。该算法在任何的分布式平稳噪声下实现盲同步估计,同时不限制收发天线的数目。但该算法没有进行定时偏移估计,并且频率偏移估计范围较小。

文献[28]主要是通过构造不同代价函数来进行载波频偏盲估计,该方法可以获得精确的频偏估计,但缺点是需要复杂数学理论分析,即是构造代价函数,从而增加系统计算复杂度。文献[29-30]主要是借助其他算法来完成 MIMO-OFDM 系统的载波频率同步,如可以采用波达方向估计(DOA)算法、ESPRT 算法等对各收发天线对进行频偏估计,最终实现系统盲同步估计。该算法计算复杂度降低,但频偏估计精度也随之降低,并在低信噪比条件下,同步性能也会受到影响。

4 MIMO-OFDM 系统同步技术研究进展与展望

目前,MIMO-OFDM 系统同步算法研究应用在无线传输通信网络已取得很大的进步,但现有的同

步算法还有待提高。本文认为 MIMO-OFDM 系统同步算法的同步性能可在以下几个方面提高:

(1)根据现有的集中式 MIMO-OFDM 同步技术中的同步算法,其对训练序列的自相关性和正交性有严格的要求,因此,构造良好自相关性和优良正交性的训练序列是提高系统同步性能的关键;

(2)在分布式 MIMO-OFDM 同步技术中,通过文献[3-4]提出的同步方法得到启示,为区分不同发射天线和降低各收发天线的干扰,可以构造不同周期长度的训练序列和在训练序列上添加相关性良好的伪随机加权因子,从而提高系统的时间同步性能;

(3)分布式 MIMO-OFDM 系统需要估计各收发天线的定时和频率偏移,同步算法的参数维数越高,其系统计算复杂度越高,因此,研究降低参数维数的方法是降低分布式 MIMO-OFDM 系统计算复杂度的途径之一;

(4)在 MIMO-OFDM 同步技术中,现有的同步方法主要是采用串行插入训练序列方式,其存在的缺陷是占用系统大量频带资源,研究叠加训练序列信道估计和同步有机结合的方法是有效提高 MIMO-OFDM 系统传输效率和频谱利用率的方向之一;

(5)根据现有的 MIMO-OFDM 盲同步方法的研究,通过文献[25,30]提出的盲同步方法的启示,对于提高系统同步性能,可以通过构造良好的代价函数和结合其他算法提高频偏估计性能和估计范围。

本文总结归纳出几种经典型的 MIMO-OFDM 同步方法,并进行比较分析其各自的优缺点,对后期研究进展提出了建议。目前,MIMO-OFDM 同步技术的研究已经取得较大进展,但仍有许多的问题及难点亟待解决,因此,需要更多的学者进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 彭小勇. MIMO-OFDM 同步技术研究仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
PENG Xiao-yong. Research and Simulation on Synchronization Technology of MIMO-OFDM[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [2] Mody A N, Stuber G L. Synchronization for MIMO OFDM systems [C]//Proceedings of 2001 Global Telecommunications Conference. San Antonio, TX: IEEE, 2001:509-513.
- [3] 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.
- [4] Zheng J, Han J, Lv J, et al. A novel timing and frequency synchronization scheme for MIMO OFDM system [C]//Proceedings of 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai: IEEE, 2007: 420-423.
- [5] Wei W, Xiaolu Y. A new synchronization method for MIMO-OFDM systems with CAZAC sequence [C]//Proceedings of 2010 WASE International Conference on Information Engineering. Beidaihe, Hebei:IEEE,2010:3-5.
- [6] Rachini A, Beydoun A, Nouvel F, et al. Timing synchronization method for MIMO-OFDM system using orthogonal preamble[C]//Proceedings of the 19th International Conference on Telecommunications. Jounieh:IEEE, 2012:1-5.
- [7] Zhu Q, Liu Z. Preamble Design for Multiple-Antenna OFDM[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1123-1127.
- [8] Yan B, Qiu M, Hu Q, et al. Synchronization for MIMO-OFDM systems based on preamble signals[C]//Proceedings of 2011 IET International Conference on Communication Technology and Application. Beijing:IET,2011:15-18.
- [9] Han N, Du N, Ma Y. Research of time-frequency synchronization in MIMO-OFDM system [C]//Proceedings of 2012 IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering. Kuala Lumpur: IEEE, 2012: 555-558.
- [10] Yao Y, Ng T S. Correlation-based frequency offset estimation in MIMO system[C]//Proceedings of IEEE 58th Vehicular Technology Conference. Orlando, Florida, USA:IEEE,2003:438-442.
- [11] Guo F, Li D, Yang H, et al. A novel timing synchronization method for distributed MIMO - OFDM system [C]//Proceedings of IEEE 63rd Vehicular Technology Conference. Melbourne, Vic:IEEE,2006:1933-1936.
- [12] Liu G, Ge J H, Guo Y. Time and frequency offset estimation for distributed multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing systems [J]. IET Communications, 2010, 4(6): 708-715.
- [13] Feng C, Zhang J, Zhang Y, et al. A novel timing synchronization method for MIMO OFDM systems [C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. Singapore: IEEE, 2008: 913-917.
- [14] Duanmu Chunjiang, Huang Feng, Atiming synchronization method For MIMO-OFDM systems [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Information Science and Engineering. Hangzhou:IEEE,2010:1807-1810.
- [15] Xiao Chi, Yin Changchuan, Huang Hai, et al. An improved carrier frequency synchronization algorithm with spatial diversity MIMO-OFDM system [C]//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology. Beijing: IEEE, 2009: 628-631.

- [16] Abdullah A, Khan S A. Frequency synchronization for multi input multi output orthogonal frequency division multiplexing systems [C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Internet. Kathmandu; IEEE, 2009: 1-6.
- [17] Koivisto T, Koivunen V. Impact of time and frequency offsets on cooperative multi-user MIMO-OFDM systems [C]//Proceedings of IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Tokyo; IEEE, 2009: 3119-3123.
- [18] 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.
- [19] Wang C L, Wang H C, Chen Y Y. A synchronization scheme based on partial Zadoff-Chu sequences for cooperative MIMO OFDM systems [C]//Proceedings of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai; IEEE, 2012: 925-929.
- [20] Yao Y, Dong X. Low Complexity Timing Synchronization for Decode-and-Forward Cooperative Communication Systems with Multiple Relays [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62 (6): 2865-2871.
- [21] 巩晓群, 赵春明, 华惊宇. 新的 MIMO-OFDM 系统盲频偏估计算法 [J]. 通信学报, 2007, 28 (3): 15-20. GONG Xiao-qun, ZHAO Chun-ming, HUA Jing-yu. Blind carrier frequency offset estimator for MIMO - OFDM systems [J]. Journal on Communications, 2007, 28 (3): 15-20. (in Chinese)
- [22] 张丙杰, 胡捍英, 王大鸣. 基于交织循环前缀的 MIMO-OFDM 系统多符号定时同步 [J]. 通信学报, 2010, 31 (8): 184-187. ZHANG Bing-jie, HU Han-ying, WANG Da-ming. Timing synchronization with multi-symbols in MIMO-OFDM system based on interleaved cyclic prefix [J]. Journal on Communications, 2010, 31 (8): 184-187. (in Chinese)
- [23] Zhang Y, Zhang N. A Novel Coarse Time Synchronization Algorithm for MIMO - OFDM Systems [C]//Proceedings of 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian; IEEE, 2008: 1-4.
- [24] Lee S J, Yoon J S, Song H K. Frequency offset mitigation of cooperative of dm system in wireless digital broadcasting [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55 (2): 385-390.
- [25] Yao Y, Giannakis G B. Blind carrier frequency offset estimation in SISO, MIMO, and multiuser OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53 (1): 173-183.
- [26] 井俊, 胡映波, 徐友云. MIMO-OFDM 系统中基于虚拟载波的低复杂度盲频偏估计 [J]. 信号处理, 2008, 24 (4): 561-564. JING Jun, HU Ying-bo, XU You-yun. A Low-Complexity Blind Carrier Frequency Offset Estimation with Virtual Sub-carriers for MIMO-OFDM Systems [J]. Signal Processing, 2008, 24 (4): 561-564. (in Chinese)
- [27] Niu Y, Chen Q, Chen J. Blind estimation of multi-CFO for distributed MIMO-OFDM system infrequency-selective fading channels [C]//Proceedings of 4th International Conference on Communications and Networking. Xi'an; IEEE, 2009: 1-5.
- [28] Wang D, Wei J, Zhang X. A novel blind carrier synchronization method for MIMO OFDM system [C]//Proceedings of 2007 IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL, USA; IEEE, 2007: 1-4.
- [29] 姜雪峰, 余松煜, 陈容. 恒包络 MIMO-OFDM 系统中的盲载波同步 [J]. 电讯技术, 2006, 46 (4): 41-44. JIANG Xue-feng, YU Song-yu, CHEN Rong. Blind Frequency Synchronization for MIMO - OFDM Systems with Constant - Modulus [J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46 (4): 41-44. (in Chinese)
- [30] Niu Yingtao, Shen Yuehong. Joint Blind Estimation of Symbol Timing and Carrier Frequency Offset for 2×2 MIMO-OFDM System Based on Cyclostationarity [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2008 (5): 513-516.

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 from University of Electronic Science and Technology of China in 2005. He is now a professor, and also the Ph. D. supervisor and one of “1000-elite program” experts of Sichuan Province. His research concerns communication transmission and signal processing technology.

Email: lrzsmith@126.com

杨娇(1990—),女,新疆伊宁人,2012年于西南石油大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为 OFDM 系统及 MIMO-OFDM 系统同步技术、降低 PAPR 技术。

YANG Jiao was born in Yining, Xinjiang Uygur Autonomous Region, in 1990. She received the B. S. degree from Southwest Petroleum University in 2012. She is now a graduate student. Her research concerns synchronization and PAPR reducing techniques for OFDM and MIMO-OFDM systems.

Email: 447186858@qq.com