

分布式 MIMO-OFDM 定时同步算法的研究及比较^①

张 驰¹, 韩太林¹, 陈小云²

¹(长春理工大学, 长春 130022)

²(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 多输入多输出-正交频分复用(MIMO-OFDM)技术是下一代 4G 通信的核心技术, 具有频谱利用率高, 抗干扰能力强, 信道容量大等优点. 分布式 MIMO-OFDM 系统会产生多时延、多频偏, 同时对定时和频偏非常敏感, 所以对分布式 MIMO-OFDM 同步算法的研究更加具有实际意义. 文章对目前三种分布式 MIMO-OFDM 定时同步算法从序列结构, 性能做了全面的比较分析与总结, 并通过 MATLAB 仿真进行比较, 得出运用 CAZAC 序列作为子载波数据的反向共轭定时算法性能突出.

关键词: MIMO-OFDM; 定时敏感; 频偏估计; 定时同步; 频率同步

Comparative Timing Synchronization Method for Distributed MIMO-OFDM Systems

ZHANG Chi¹, HAN Tai-Lin¹, CHEN Xiao-Yun²

¹(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

²(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Multiple input multiple output-orthogonal frequency division multiplexing MIMO-OFDM technology is the core of the next generation(4G) of communication technology. MIMO-OFDM has the advantages of high spectrum efficiency, strong anti-interference capability and large Channel capacity. Distributed MIMO-OFDM system can produce time delay and frequency offset. It is also very sensitive to the timing and frequency offset. So, the study of distributed MIMO-OFDM synchronization algorithm is more practical significance. The article made a comprehensive analysis and summary from the sequence structure and the performance of these three current kinds of distributed MIMO-OFDM timing synchronization algorithm, and through the MATLAB simulation comparison. It acquires to use CAZAC sequence as subcarrier data reverse conjugate timing algorithm has outstanding performance.

Key words: MIMO-OFDM; timing offset; frequency offset estimation; timing synchronization; frequency synchronization

1 引言

多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)系统和正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)技术的结合存在诸多优点^[1], 而且 MIMO-OFDM 是下一代移动通信系统的关键技术, 因此受到越来越多的关注^{[2]-[3]}. MIMO-OFDM 系统中的发射信号不仅存在多径衰落、信道间的干扰, 还存在天线间的干扰使其同步变得困难, 虽然已有许多文献对 MIMO-OFDM 系统的同步算法进行了研究, 但大部分适用于集中式 MIMO-OFDM 系统^{[4]-[5]}. 分布

式 MIMO-OFDM(Centralized)系统由于可以提高系统容量, 扩大小区覆盖范围, 提高通信质量等优点引起了人们的广泛关注但也存在多时延、多频偏的同步误差问题, 所以对于分布式 MIMO-OFDM 系统同步技术研究更加具有实际意义^{[6]-[8]}. 本文对现有的分布式 MIMO-OFDM 系统定时同步算法进行对比分析. 基于这个出发点, 本文主要从两个方面对 UPSP 定时同步算法、循环移位 CAZAC 序列定时同步算法、反向共轭定时同步算法这三种常用的定时同步算法进行比较: (1) 算法的序列结构; (2) 不同信道下, 三种算法的性能变化.

^① 收稿时间:2013-09-05;收到修改稿时间:2013-11-07

1 分布式MIMO-OFDM

MIMO-OFDM 系统同步主要应用于集中式 MIMO-OFDM 和分布式 MIMO-OFDM 两种系统. 设系统发射天线数是 N_t , 接受天线数是 N_r . 发送端和接受端之间的时间偏移和频率偏移矩阵分别为:

$$\Theta = [\theta_{ij}] = \begin{bmatrix} \theta_{1,1} & \theta_{1,2} & \cdots & \theta_{1,N_r} \\ \theta_{2,1} & \theta_{2,2} & \cdots & \theta_{2,N_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{N_t,1} & \theta_{N_t,2} & \cdots & \theta_{N_t,N_r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E = [\varepsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1,1} & \varepsilon_{1,2} & \cdots & \varepsilon_{1,N_r} \\ \varepsilon_{2,1} & \varepsilon_{2,2} & \cdots & \varepsilon_{2,N_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{N_t,1} & \varepsilon_{N_t,2} & \cdots & \varepsilon_{N_t,N_r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

θ_{ij} 为归一化时间偏移, ε_{ij} 为归一化频率偏移.

在分布式 MIMO-OFDM 系统中, 一般移动台仍采用集中式天线, 基站处天线采用分布式. 在下行链路情况下, 可以认为不同的接收天线与同一个发射天线之间的时延、频偏相同, 但与不同的发射天线之间的时延、频偏不同.

时间偏移矩阵为:

$$\Theta = [\theta_{ij}] = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_{N_t}]' \quad (5)$$

频率偏移矩阵为:

$$E = [\varepsilon_{ij}] = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \cdots \quad \varepsilon_{N_t}]' \quad (6)$$

分布式 MIMO-OFDM 系统各天线间时延, 频偏不同更接近于现实.

目前, 对于分布式 MIMO-OFDM 系统同步算法比较流行的几种同步算法分别是: YaoYao 提出的一种在发射天线处放置多段重复的 Wlsh 码的频率同步算法^[7], 文章^[8]提出一种不等周期(UPSP)的时间同步算法, 文章^[9]提出一种用 CAZAC 序列循环移位并加权后的序列作为训练序列的时间同步算法, 以及一种基于反向共轭序列的定时同步算法.

2 定时同步算法

2.1 UPSP 定时同步算法

对于分布式 MIMO-OFDM 系统进行时间定时同步估计^[9,11]. 同步序列采用多段的重复训练序列结构, 在不同的天线上采用长度不同的同步序列, 在接收端

进行周期不同的同步估计 (unequal period synchronization pattern, UPSP).

同时, 接收端需要 N_t 个相关器来估计各个发射天线的时延. 对应的第 i 个发射天线的时延可以估计为:

$$\hat{\tau}_{i,j} = \arg \max_n \{|\varphi(n)|\} \quad (7)$$

其中,

$$\varphi(n) = \sum_{i=0}^{L_{ss}-L_{sp}} r^*(d+i)r(d+i+L_{sp}^i) \quad (8)$$

由式(8)可看出, 对应不同的发射天线定时度量函数的相关长度也不同, 且相关间隔也不相同. 从而保证了目标天线的相关值达到峰值时天线的相关值比较小, 造成的干扰不大.

2.2 基于循环移位 CAZAC 序列定时同步算法

提出了一种 CAZAC(Constant Amplitude Zero Auto Correlation, 恒包络零自相关)定时同步算法 (WPS)^[12].

CAZAC 序列的定义式如下:

$$c(m) = \begin{cases} e^{-\frac{j2\pi r}{L}(\frac{m^2}{2}+qm)}, & m = 0, 1, \dots, L-1. \quad L \text{ 为偶数} \\ e^{-\frac{j2\pi r}{L}(\frac{m(m+1)}{2}+qm)}, & m = 0, 1, \dots, L-1. \quad L \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (9)$$

其中 r 表示码号, q 为任意整数, L 表示序列长度, r 与 L 互为素数.

CAZAC 序列的自相关性是理想的二值函数, 即

$$\varphi(d) = \left| \sum_{n=0}^{L-1} c(n)d c^*(n+d) \right|^2 = \begin{cases} L^2, & d=0 \\ 0, & d \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

且由 CAZAC 定义可证明, 当 $q=0$ 时, 序列具有伪自反特性:

$$c(m) = c(L-m), m = 1, 2, \dots, L/2-1 \quad (11)$$

算法中各发射天线同步训练序列通过 CAZAC 序列循环移位后加权得到:

$$X_{i,k} = \omega_i c_{\text{mod}(k+D_i)N_t} \quad (12)$$

上式中, ω_i 为正交加权系数, $c_{\text{mod}(k+D_i)N_t}$ 为第 i 个发射天线上的 CAZAC 序列循环移位第 k 个长度后的序列.

在接收端, 利用序列的相关性和伪自反性进行对称相关运算, 其定时同步度量函数为:

$$\hat{\tau}_{i,j} = \arg \max_d (M_i(d)) \quad (13)$$

$$M_i(d) = \left| \sum_{n=0}^{N/2-1} r(d+\frac{N}{2}+n)r^*(d+\frac{N}{2}-n) \right|^2 \quad (14)$$

其中 $\hat{\tau}_{i,j}$ 定位在每个天线的起始位置, 式(14)表示序列的能量, 因为相关值在其他地方接近于 0, 所以理论上

会出现单脉冲。

2.3 反向共轭的定时同步算法

由于 UPSP 算法在多径情况下不理想, 对 UPSP 算法进行改进, 在 UPSP 算法训练序列结构的基础上进行优化^[13], 采用具有很好相关性的 CAZAC 序列作为子载波数据. 训练序列结构如图 1 所示.

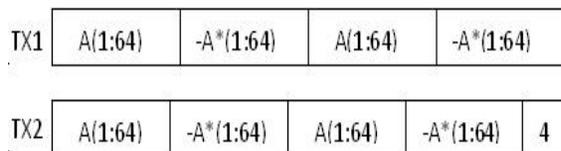


图 1 基于反向共轭序列的训练结构示意图

$$\Phi_i(n) = \sum_{l=0}^{L_{sp}^i-1} r_j(n+l) \cdot r_j(n+2L_{sp}^i-l-1) + r_j(n+l+2L_{sp}^i) \cdot r_j(n+4L_{sp}^i-l-1) \quad (17)$$

$$P_i(n) = \sum_{l=0}^{L_{sp}^i-1} \left(|r_j(n+l)|^2 + |r_j(n+2L_{sp}^i-l-1)|^2 + |r_j(n+l+2L_{sp}^i)|^2 + |r_j(n+4L_{sp}^i-l-1)|^2 \right) \quad (18)$$

那么定时估计式为:

$$\hat{\tau}_{i,j} = \arg \max_n (M_i(n)) \quad (19)$$

图 1 中, A 表示 CAZAC 序列, $-A^*$ 表示 A 的反向共轭对称序列. 即:

$$-A^*(k) = \text{conj}(A(L_{sp}^i - k + 1)), k = 1, 2, \dots, L_{sp}^i \quad (15)$$

定时度量函数为:

$$M_i(n) = \frac{|\phi_i(n)|^2}{P_i(n)} \quad (16)$$

其中 $\phi_i(n)$ 和 \tilde{q}_i 在式(17)及(18)中.

3 三种定时同步算法的比较

通过对以上三种算法的详细描述, 不难发现, UPSP 算法、WPS 算法和反向共轭算法各有所长, 他们互相之间的优缺点比较详见表 1.

表 1 三种算法的优缺点比较

方法名称	主要优点	不足之处
UPSP 算法	1) 序列简单, 易构造。 2) 在高斯信道下, 度量函数尖锐, 可估计出不同发射天线的时延。	1) 由于 UPSP 训练序列具有四段重复性, 导致自相关曲线不够尖锐, 定时度量函数存在平台效应导致估计误差变大。 2) 在多径衰落信道中难以准确的判断出时间同步点。
WPS 算法	1) 定时度量函数尖锐。 2) 各天线之间干扰较小。	1) 无法根据峰值点来确定每个发射天线的定时位置。 2) 当系统频率偏移变大时, 会出现天线定时错误。
反向共轭算法	1) 各天线之间干扰最小。 2) 可估计出不同发射天线的时延。	1) 序列结构较为复杂。 2) 当系统频率偏移较大时造成天线间干扰, 会出现天线定时错误。

在分布式 MIMO-OFDM 系统下, UPSP、WPS 和反向共轭序列三种定时同步算法都针对于 AWGN 信道和多径衰落信道下的性能比较.

从图 2 中可以看出, 在 AWGN 信道情况下, 信噪比从 -8dB 到 6dB 时, 三种算法性能大致比较接近, UPSP 定时同步算法在 3dB 时接近 100%, 而反向共轭定时算法在 1dB 时就已接近 100%, 从而可以看出反向共轭定时算法比 UPSP 定时算法有 2dB 的性能增益.

反向共轭算法和 WPS 定时同步算法十分接近, 但是在整个信噪比变化范围之内都优于 WPS 定时算法.

从图 3 中可以看出, 在多径衰落信道下, WPS 和反向共轭算法比较接近. 由于 CAZAC 序列具有良好的自相关和互相关特性, 在经过 FFT/IFFT 变换后依然是 CAZAC 序列, 在多径信道下都具有良好的定时同步特性, 且在整个信噪比变化范围之内 WPS 算法和反向共轭算法的性能都优于 UPSP 定时算法.

较三种算法来说,各有其优点,UPSP 算法具有多段重复,可以很好地区分不同天线中的延时,就这一点来说,比 WPS 算法要好很多,但是当天线数增加时,复杂度也会大大提升. WPS 算法和反向共轭算法中运用了 CAZAC 序列具有良好的自相关性和互相关性,使得在多径衰落信道中具有很好的同步性能. 在多径衰落信道中,UPSP 算法由于有多径干扰信号的存在,在时延来临时,UPSP 算法仍具有三段相关特性导致其在多径衰落信道中同步性能下降. 反向共轭算法基于 UPSP 算法的思想,各天线使用不等周期序列,运用 CAZAC 序列作为子载波数据,所以可以很好地抑制噪声,且区分各发射天线的定时位置,由于运用了反向共轭序列使得系统可以抵抗多径干扰,使正确定时位置的相关峰值更加尖锐,所以说反向共轭定时同步算法吸收了 UPSP 算法和 WPS 算法的优点,从而定时的准确性较好.

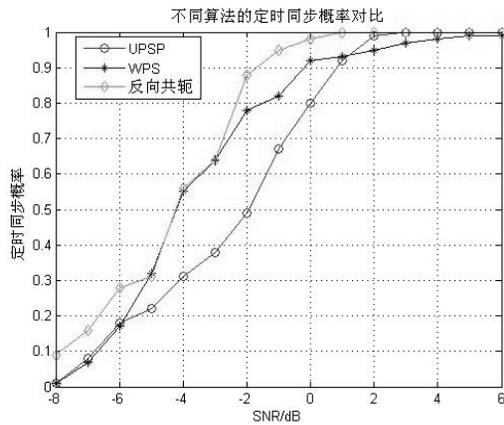


图 2 在 AWGN 信道下定时同步性能示意图

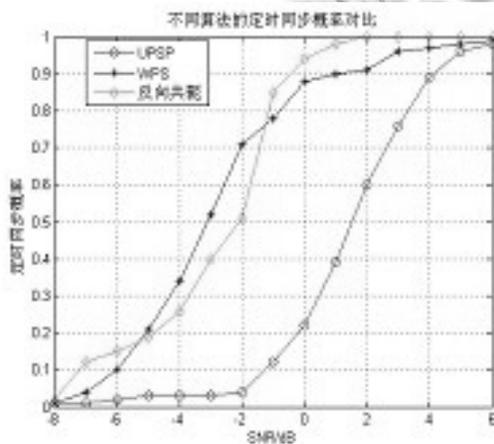


图 3 多径衰落信道下定时同步性能示意图

4 结语

随着第 4 代移动通信的发展,对其同步的准确率也要求越来越高,除了优化空时编码,改进均衡技术等,优化同步算法也是重中之重. 同步算法普遍是根据 OFDM 同步算法演变及改进而来的. 大部分同步方法都是基于训练序列的,所以对其训练序列的优化与改进,减少算法占频谱的资源是以后同步算法的重点,也是发展趋势. 本文主要介绍了几种分布式 MIMO-OFDM 定时和频率的同步算法并对其性能做了简要的介绍与比较.

参考文献

- 1 Mesleh R, Elgala H, Haas H. On the performance of different OFDM based optical wireless communication systems. *Optical Communications and Networking*. Tabuk. 2011. 620–628.
- 2 汪愚民. OFDM 关键技术. 北京:机械工业出版社,2009.
- 3 Mody AN, Stuber GL. Synchronization for MIMO-OFDM systems. *Global Telecommunications Conference*. IEEE. 2001. 509–513.
- 4 Stuber GL, Barry JR, McLaughlin SW, Li Y. Broadband MIMO-OFDM wireless communication. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(2): 271–293.
- 5 Kamruzzaman MM. Performance of Turbo coded wireless link for SISO-OFDM, SIMO-OFDM, MISO-OFDM and MIMO-OFDM system. *Computer and Information Technology*. China. 2011. 185–190.
- 6 Oberli C, Daneshrad B. Maximum likelihood tracking algorithms for MIMO-OFDM. *2004 IEEE International Conference on Communications*. 2004, 4. 2468–2472.
- 7 Tureli U, Honan PJ, Liu H. Low complexity nonlinear least squares carrier offset estimator for OFDM: identifiability, diversity and performance. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(9): 2441–2452.
- 8 Yao Y, Ng TS. Correlation-based frequency offset estimation in MIMO system. *Vehicular Technology Conference*. Jan. 2003, (6-9): 438–442.
- 9 Guo F, Li D, Yang H, Cai L. A novel timing synchronization method for distributed MIMO-OFDM system. *Vehicular Technology Conference*. 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63. 2006.

(下转第 213 页)

的 LED 也执行同样的操作,同时开发板正确收到设置指令后,会将该指令回送到串口助手.



图 5 SCOM 串口助手初始化设置



图 6 SCOM 串口助手设置闪烁间隔时间等待状态



图 7 SCOM 串口助手显示设置指令返回状态

通过串口助手显示可以判断,串口能够正确接收任务并显示定义的闪烁间隔时间,此时开发板上的 3 个 LED 按照定义间隔闪烁时间正常运行,证明此设计可行,通过串口中断响应处理任务可实现对 LED 的控制.另一方面,该实验也体现了 $\mu C/OS-II$ 在处理多任务时,可剥夺型内核的优势,表现出良好的实时性能.

5 结语

随着微控领域应用日趋复杂化,对 MCU 资源以及嵌入式实时操作系统要求越来越高.本文通过研究在 $\mu C/OS-II$ 嵌入式操作系统在奋斗 STM32 开发板上对 LED 闪烁控制方法,验证了该方法的可行性以及 $\mu C/OS-II$ 在处理实时性较强,多任务系统必要性和优势,也为更加复杂的微控应用提供了实践基础和开发思路.

参考文献

- 1 周超.具有声光提示双功能的倒车防撞系统设计.传感器与微系统, 2011,5 (30).
- 2 张宏波,袁钦成.故障指示器在智能电网中的应用,能源技术经济, 2011,1(23).
- 3 王中良,梅静静,胡敏. $\mu C/OS-II$ 中软件定时器的研究与改进.单片机与嵌入式系统应用,2011,4.
- 4 Labrosse JJ,邵贝贝等译.嵌入式实时操作系统 $\mu C/OS-II$.北京:北京航空航天大学出版社,2012:72-73.
- 5 魏春杰.嵌入式实时操作系统 $\mu C/OS-II$ 应用技术研究[学位论文].大连:大连海事大学,2004.

(上接第 167 页)

- 10 张建华,冯冲,刘毅,等.用于 MIMO OFDM 系统的定时同步算法.北京邮电大学学报,2009,32(1):118-121.
- 11 王一蓉,王文博.一种改进的分布式 MIMO-OFDM 系统同步方案.电子测量技术,2007,30(11):173-176.
- 12 Feng C, Zhang J, Zhang Y, Xia M. A novel timing synchro-

- nization method for MIMO OFDM systems. Vehicular Technology Conference. 2008. VTC. Spring, 2008. IEEE. May 2008.913-917.
- 13 柏刚, MIMO-OFDM 系统同步技术研究[硕士学位论文].西安:西安电子科技大,2011.1.