

分布式波束成形载波同步策略

邹莹¹, 彭端², 肖启峰¹

(1. 广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广东工业大学 实验教学部, 广东 广州 510006)

摘要: 分布式波束成形是协作通信的一种形式, 其中两个或多个信源节点同时传输同一个信息并控制其相位, 目的端重组接收信号。载波偏移使得终端的信号重组产生偏差, 严重影响通信质量。分析了载波同步对分布式波束成形的重要性, 介绍了现有的分布式波束成形中的载波同步策略。频率同步的方法是主-辅结构同步, 相位同步有开环相位同步和闭环相位同步两个方法。分布式载波同步后传输信号在目标节点有效地重组整合, 增加了分布式波束成形技术的可行性。

关键词: 分布式; 波束成形; 载波同步

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2011)10-0164-04

Methods for Carrier Synchronization of Distributed Transmit Beamforming

ZOU Ying¹, PENG Duan², XIAO Qi-feng¹

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Department of Experimental Education, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Distributed transmit beamforming is a form of cooperative communication in which two or more information sources simultaneously transmit a common message and control the phase of their transmissions so that the signals combine at an intended destination. Carrier frequency offset will significantly degrade the performance of communication by damaging the combine at the destination. It proved that the carrier synchronization is the significant problem for distributed transmit beamforming and introduced some existing methods for carrier synchronization of distributed transmit beamforming that can reduce the effect of the carrier. One approach to frequency synchronization is to employ a master-slave architecture. There are two basic approaches to phase synchronization, closed-loop phase synchronization and open-loop phase synchronization. After distributed carrier synchronization, the transmissions combine constructively at the destination. That makes the feasibility of distributed transmit beamforming increases.

Key words: distributed; beamforming; carrier synchronization

0 引言

无线通信系统中, 信源通过两根及以上的天线传输无线频率信号, 并通过天线调整传输相位, 经过传输后信号在接收端合并, 这种技术称为传输波束成形。波束成形技术是多天线技术中的一种^[1,2]。给定单元天线辐射功率, N 条天线的理想接收功率应该为 N^2 倍单位功率。与单天线传输对比, 传输波形能提高范围(自由空间传播提升 N 倍), 提升速率(有限功率状态下提升 N^2 倍), 提升能量效率(以一定单位接受能量为

基准, 网络传输所需能量降低 N 倍)^[3-5]。固定方向传输能量比例越多, 能量在其他方向的消耗就越少, 减少干扰增加可靠性^[6]。

分布式传输波束成形技术与常见波束成形技术最关键的区别在于分布式的每个信源节点都有独立的本地振荡器(LO)。这些振荡器使用固定的频率, 产生的载波频率序列每百万大约有 10-100 个错位。信号相位在传输过程中有偏移, 破坏终端信号重组, 如果不进行纠正的话, 对通信性能的影响是灾难性的。因此, 不同信源的载波同步问题是技术关键。

收稿日期: 2011-02-24; 修回日期: 2011-05-13

基金项目: 广东工业大学博士基金项目(073016); 广州市应用基础研究项目(2006J1-C0331)

作者简介: 邹莹(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为宽带移动通信载波同步; 彭端, 教授, 硕士生导师, 主要从事宽带移动通信及网络方向研究。

1 载波频率相位问题

载波频率同步的一个方法是主-辅结构同步, 其中主节点广播载波信号, 辅节点使用锁相环(PLL)来锁住该参考载波信号^[7,8]。除主节点外, 目的节点也可

以广播参考载波给信源节点进行频率同步^[3-5]。信源节点估算出频率偏移为 Δf , 通过数字信号处理器、数模转换器和乘法器将基带信号与 $e^{-j2\pi\Delta f t}$ 相乘。鉴于信源振荡器的稳定性, 需要重复其频率同步步骤。

频率同步完成后, 必须同步不同信源发送的载波相位并以合理的队列到达接收端。为了了解载波相位同步的重要性, 首先假设一个使用 N 元集中阵列的传输波束成形。发送一个合成基带信号 $s(t)$, 天线 i 的发送信号为 $w_i s(t)$, 接收信号为 $\sum_i w_i h_i s(t)$, 其中 h_i 是从天线 i 到接收端的信道增益, 接收端的信噪比 (SNR) 正比于 $|\sum_i w_i h_i|^2$ 。给传输功率 $\sum_i |w_i|^2$ 制定一个上限, SNR 的最大值由 $w_i \propto h_i^*$ 决定, 也就是 $|w_i| \propto |h_i|$ 和 $\angle w_i = -\angle h_i$ 。天线的峰值功率在受限的情况下, 选用固定的振幅 $|w_i| = w_{\max}$ 和 $\angle w_i = -\angle h_i$ 。信道增益几乎相同时, 两种方法具有相似的性能: 接收信号 $|\sum_{i=1}^N w_i h_i| \propto N$, 接收信噪比随着 N^2 缩放。两种情况下都要求关于 $\{h_i\}$ 的信道状况信息, 相位 $\angle h_i$ 是波束成形获得增益的最重要因素。

分布式波束成形中, 假设信源相位未先验同步, 信源的相位估计模糊。设信源节点 i 接收传输频带信号 $\text{Re}(h_i e^{j2\pi f_c t})$ 。当该信号通过节点 i 的本地振荡器, 使用 $\cos(2\pi f_c t + \theta_i)$ 和 $\sin(2\pi f_c t + \theta_i)$ 正交的载波, 则节点 i 的基带信道估计为 $\hat{h}_i = h_i e^{-j\theta_i}$ 。没有载波同步的情况下, 本地振荡器相位 $\{\theta_i\}$ 均匀随机地分布在 $(-\pi, \pi]$ 之间。该信道估计没有包含实际信道信息。

综上所述, 即使跨节点理想定时同步, 由于节点到接收端的分散信道 ISI 还可能升高, 分布式波束成形依然离不开分布式载波同步。

有两种基本方法实现相位同步:

(1) 闭环相位同步: 闭环系统中, 目的节点直接控制校准各信源间相位。测量接收到的信源信号相位, 而后传送反馈信号到各信源补偿其相位偏移。

(2) 开环相位同步: 开环系统中, 各源节点信号互相影响很大, 只能接受小部分目的节点发送的信号。目的节点广播一个未调制的正弦信标给各源节点, 各个源节点信号使用信标后达到合适的相位补偿。

无论是哪种同步方式, 波束成形增益都有很好的鲁棒性, 可以减少相位校正中的错误。

2 闭环同步

2.1 全反馈闭环同步

第一个适合分布式波束成形的载波同步方案由

Yung-Szu Tu 等人提出。这是一种主节点-辅节点载波同步方法^[7,9], 主节点广播信息, 所有辅节点用主节点发送的信息在每个辅节点应用 PLL 实现载波同步和相位跟踪, 其中目的节点作为主节点。目的节点与第 n 个源节点之间的未知偏移通过闭环来校正, 实现步骤为:

- 1) 目的节点广播一个主信标给所有的信源节点。
- 2) 每个信源节点使用另一个频率将这个主信标反馈到目的节点。
- 3) 接收到反馈的信号后, 目的节点根据最初传送的主信号来估算每个信源发送的信号。而后目的节点量化这些估算值, 再将这些估算值作为“相位补偿信息”传送给源节点。
- 4) 各个信源接收到相位补偿信息, 提取各自的相位补偿估计, 相应的调整其载波相位。

假设同步和波束成形间隔的相位偏移没有显著的变化, 载波相位补偿后的各个带通传输信号将在目标端会连贯的整合。同步和信息传输的能量分配问题也在文献[9]中进行了阐述, 结果表明存在最佳能量分配方案, 分配给载波同步太多或太少能量都会导致效率低下。

2.2 单比特反馈闭环同步

在全反馈闭环载波同步系统中为了建立和维持信源间合理的相位校准, 必须有一定的反馈速率^[3]。但在某些情况下, 反馈速率会受到抑制。全反馈闭环同步系统中, 单比特反馈闭环为每个信源纠正了所有由 LO 和信道引起的相位偏移^[10,11]。基本思想如图 1 所示为以下几点:

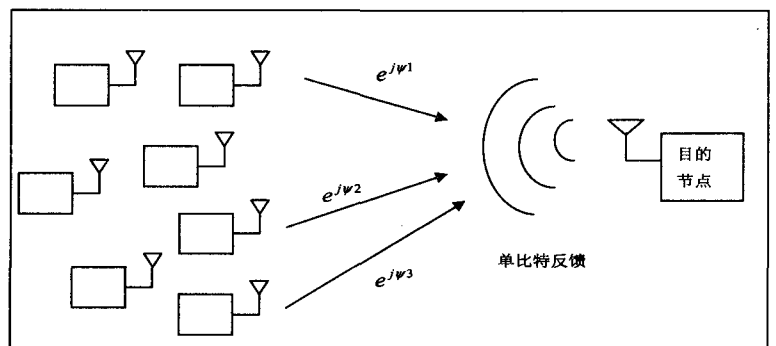


图1 闭环载波系统中单比特反馈

- 1) 每个源节点随机调整其载波相位。
 - 2) 源节点传送信息同时到达目的端。
 - 3) 目的端估计接收信号的信噪比。
 - 4) 目的端广播单比特反馈信息给信源, 告知信源其 SNR 在调整相位前后的变化。如果变好, 所有源节点保留上一次相位调整, 否则撤销上一次相位调整。
- 这四个步骤形成一个迭代周期。每个信源只保留那些改进性能的相位调整, 因此达到某特定相位所需

迭代次数是随机的^[10]。要达到相位收敛所需的迭代次数与 N 大致成线性关系,其中 N 为源节点数。当迭代次数约为 $5N$ 时可达到 75% 的理想波束成形振幅^[12]。

全反馈闭环同步系统中,单比特反馈闭环为每个信源纠正了所有由 LO 和信道引起的相位偏移。同时,迭代可以无限追踪信道时变和振荡器漂移。单比特反馈同步系统具有简单性和可扩展性,有助于实现目的节点闭环反馈^[8]。

3 开环同步

3.1 主从开环同步

在一些应用中,目的端到信源端的闭环反馈并不可取,因为这个链接通信成本相对较高,并增加了目的端复杂性。主从频率同步方法出发有下面这个开环方法,如图 2 所示^[8]。

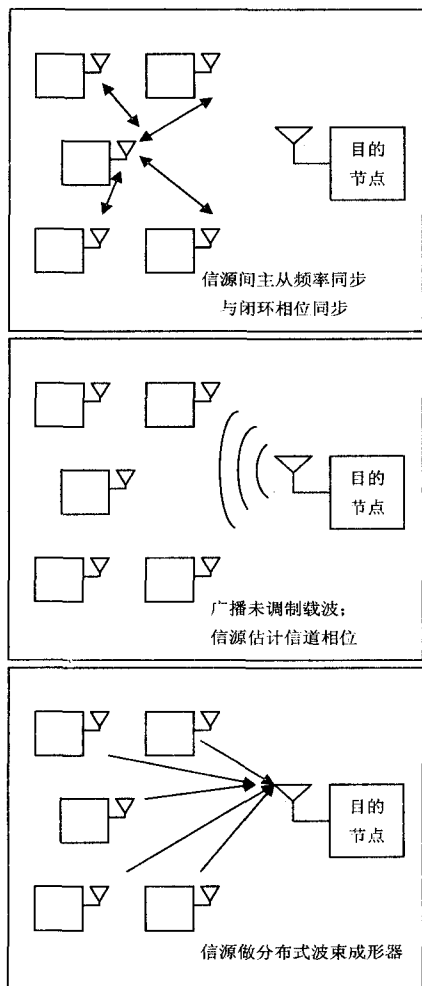


图 2 主从开环同步

在开环主从同步中,一个源节点被设为主节点,其它源节点为从节点。频率同步中,主节点广播一个正弦信号给从节点,从节点估计和修正其频率偏移。源节点的相位同步通过闭环方法实现,主节点和从节点间使用 TDD 协议。反馈从主源节点到从源节点,不

涉及目的端。

同步过程在源节点之间协调,无需与目的节点有任何交互作用。为使传感器有序的波束形成,信源必须估计其到目标端的信道响应。这通过目标端广播信标(例如,载波频率上的一个正弦信号)到源节点来实现。由于信源已经同步,每个源节点可以使用它的频率和相位同步 LO 独立地估计其复杂的通道增益。通过提供增益的复共轭给传输信号,源节点作为分布式波束形成器发射信号至目的端。

3.2 往返开环同步

该设计基于多跳源节点传输链的往返传播延迟相等,因此被称为往返载波同步方案。基本概念是,一个未调制的信标按顺时针方向“反弹”与在相反信道逆时针方向“反弹”引发的总相位偏移是相同的^[13,14]。往返线路积累的相移相等是往返载波同步技术最主要的特色。具有同样相位偏移的信息在线路传输后,当目的端接收到已信息调制的两个信标之和时,波束成形就完成了。

图 3 为两信源往返开环同步示意图。

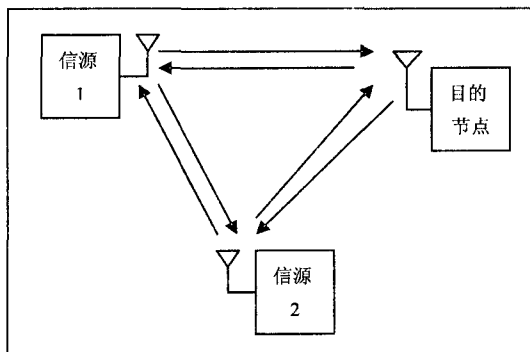


图 3 两信源往返开环同步

无线收发器不能同一时间传输和接收相同的频率,因此往返分布式波束成形的实现比较复杂。有一种方法是使用连续传输的独特频率信标(与载波频率也不同)。这种方法称为频率合成往返载波同步系统,每个信源采用一对频率合成锁相环来形成适当的信标,信标按频率比例周期性扩展。信源和或目的端流动性很高时信标仍可以连续传输,而由于信标和载波使用不同频率导致相移和多径信道性能降低。

为了确保多径信道的信道互易性,单频时隙往返载波同步技术可用在双源分布式波形成型器也可扩展到信源数 $N > 2$ 。波束成形之前同步各个信源需要 $2N - 1$ 个同步时隙。波束成形期间,为了避免频率估计误差和相位噪声或移动性产生的不可接受的相移,同步过程会多次重复。较长同步时隙可以降低估计误差,但增大了相移和移动性引起的偏差。较短同步时隙可以减少相位噪声和移动性的负面影响,但频率和相位估计不准确导致偏差增大。

4 结束语

分布式传输波束成形的可行性研究仍在继续,迄今为止的研究成果表明在目标节点进行载波相位调整可行。在分布式传输波束成形中,载波的频率和相位同步效果直接影响波束成形的效果,对通信效果影响非常大。笔者对其关键技术载波同步进行介绍并描述了多种分布式载波同步策略,利于将来分布式波束成形技术的实际应用研究。

参考文献:

- [1] 黄 嵘. MIMO 系统中联合收发波束成形算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2006.
- [2] 李 钊,韦 玮. 第四代移动通信中的多天线技术[J]. 移动通信,2005(12):21-24.
- [3] 施 瑛,戴吉祥,罗汉文. MIMO 系统中的收发波束成形技术[J]. 上海电机学院学报,2009,12(1):29-32.
- [4] 吴杏芬,宋荣方. 多波束机会波束成形系统性能比较[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2008,28(6):29-33.
- [5] 李 婧. MIMO 系统中随机波束成形算法的研究[J]. 光通信研究,2008(5):64-66.
- [6] 傅 华,姚天任,江小平,等. 有限反馈的联合波束成形和调度方案[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(4):29-32.
- [7] Barriac G, Mudumbai R, Madhow U. Distributed Beamforming for Information Transfer in Sensor Networks[C]//Proc. Info. Process. Sensor Net., 3rd Int'l. Wksp. Berkeley, CA: [s. n.], 2004.
- [8] Mudumbai R, Barriac G, Madhow U. On the Feasibility of Distributed Beamforming in Wireless Networks[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2007(6):1754-1763.
- [9] Tu Y, Pottie G. Coherent Cooperative Transmission from Multiple Adjacent Antennas to a Distant Stationary Antenna Through AWGN Channels[C]//Proc. IEEE VTC. Birmingham, AL: [s. n.], 2002:130-134.
- [10] Mudumbai R, Hespanha J, Madhow U, et al. Scalable Feedback Control for Distributed Beamforming in Sensor Networks[C]//Proc. IEEE Int'l. Symp. Info. Theory. Adelaide, Australia: [s. n.], 2005:137-141.
- [11] Mudumbai R, Hespanha J, Madhow U, et al. Distributed Transmit Beamforming Using Feedback Control[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56:411-426.
- [12] Seo M, Rodwell M, Madhow U. A Feedback-Based Distributed Phased Array Technique and its Application to 60-ghz Wireless Sensor Network[C]//IEEE MTT-S Int'l. Microwave Symp. Digest. Atlanta, GA: [s. n.], 2008:683-686.
- [13] Brown III D R, Prince G, McNeill J. A Method for Carrier Frequency and Phase Synchronization of Two Autonomous Cooperative Transmitters[C]//Proc. 5th IEEE Signal Proc. Advances Wireless Commun. New York, NY: [s. n.], 2005:278-282.
- [14] Brown III D R, Poor H V. Time-Slotted Round-Trip Carrier Synchronization for Distributed Beamforming[J]. IEEE Trans. Signal Proc., 2008, 56:5630-5643.

(上接第163页)

架技术实现了高校科研成果管理系统。实际开发表明,它有效地缩短了系统开发周期,简化了程序代码,降低了代码维护成本,提高了系统开发效率以及开发质量。而且,系统符合普通高校需求,让高校教师随时都能通过网络查询到自己或者他人的科研信息,方便科研管理人员能有效管理科研成果。本系统不但具有良好的交互性,而且具有较好的可扩展性和可维护性以及较强的稳定性和健壮性。

参考文献:

- [1] 田晓芳,袁志芳,李桂宝. 高校科研信息管理系统的设计与研发[J]. 中国教育信息化,2007(10):52-54.
- [2] Li Kangrong, Miao Fang. Study on E-commerce system architecture based on MVC model and J2EE platform[J]. Journal of Communication and Computer, 2008(5):46-50.
- [3] 隋 永,周家纪. MVC 在 J2EE 框架中的应用研究[J]. 计算机技术与发展,2006,16(12):119-121.
- [4] 郑 颖,袁宝国. MVC 模式在中小型连锁超市信息管理系统的应用[J]. 计算机应用与软件,2006(9):134-136.
- [5] 陈红红,马 威,贾相春. 基于 MVC 结构的高校智能建站系统的设计与实现[J]. 西北师范大学学报,2009(5):59-62.
- [6] Struts Reference Documentation. Introduction to the Struts Framework[EB/OL]. 2008. <http://struts.apache.org/1.3.10/apidocs/index.html>.
- [7] 衡友跃,刘 锋,仲 红. 基于 J2EE 轻量级框架的电子商务研究[J]. 计算机技术与发展,2009,19(10):106-109.
- [8] 李绍平,彭志平. S2SH:一种 Web 应用框架及其实现[J]. 计算机技术与发展,2009,19(8):117-119.
- [9] Spring Reference Documentation. Introduction to the Spring Framework[EB/OL]. 2010. <http://www.springsource.org/documentation>.
- [10] 肖 伟,徐茂增,罗 宪,等. 高校 INTRANET 环境下科研成果综合管理系统开发研究[J]. 微型电脑应用,2009(1):21-23.
- [11] 于晓强,姚春龙,王海文,等. 基于 SSH 框架的考务信息平台设计与实现[J]. 大连工业大学学报,2009(3):142-144.
- [12] Hibernate Reference Documentation. Introduction to the Hibernate Framework[EB/OL]. 2009. <http://www.hibernate.org/docs>.