

# 智能天线波束成形技术的比较及演进

[吴杏芬 左德伟]

## 摘要

介绍了智能天线的收发机结构,在此基础上介绍了其关键技术波束成形的长期发展,并对各种波束成形技术进行了比较,探讨了下一代移动通信系统中智能天线波束成形技术的发展趋势及其所面临的问题。



关键词: 智能天线 波束成形 MIMO 多用户分集

## 吴杏芬

南京邮电大学硕士研究生,通信与信息系统专业,研究方向为无线数据与移动计算网络。

## 左德伟

江西宜春职业技术学院讲师。

## 1 引言

在无线通信技术的发展中,智能天线已成为一个最活跃的领域,近年内,几乎所有先进的无线通信系统都将采用此技术。智能天线技术对无线通信系统所带来的优势是目前任何技术难以替代的。智能天线技术已经成为无线通信中最具有吸引力的技术之一。而波束成形是智能天线中的关键技术,通过将主要能量对准期望用户以提高信噪比。波束成形能有效地抑制共道干扰,其关键是波束成形

权值的确定。

如何提高频谱效率和数据传输速率成为下一代无线通信系统的关键问题之一。提高通信速率和可靠性的办法之一就是使用多个发送天线和多个接收天线,也就是多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)的通信系统。这一点已经得到了理论和实践的证明<sup>[1-3]</sup>。另外一种提高通信速率的办法就是多用户分集<sup>[4-9]</sup>。

本文主要研究了在多用户通信条件下无线通信智能天线技术中波束成形技术的长期发展,所有讨论都是在无

线通信下行链路的基础上展开的。

## 2 智能天线收发机结构

智能天线通常也称作自适应天线阵列,可以形成特定的天线波束,实现定向发送和接收,主要用于完成空间滤波和定位。在如图1所示的一个多发射多接收天线系统中,发送的数据块需要进行编码和复星座图的映射。在空时加权后,每个符号被映射到一个发射天线,信号通过无线信道后,在接收天线中首先进行解复用,然后通过加权、解调、解码来恢复最初的发送数据。

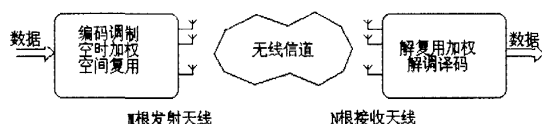


图1 智能天线收发机结构

## 3 多用户分集

实现多用户分集的途径就是公平调度(scheduling),以平坦衰落信道为例,在多用户系统中,基站到用户之间的衰落信道是独立随机波动的。调度的目标就是使得那些瞬时信道增益接近峰值状态的用户获得基站当前的服务,而数据业务对有限时延的不敏感性使得这种调度成为可能。这种利用信道的随机波动而带来的好处,就是多用户分集。

获得多用户分集增益的系统要求:一是每个接收端具有通过一个普通导频跟踪自己信道的SNR并将其瞬时信道特性反馈给基站的能力,一是基站具有在用户之间调度发送的能力,并且能够适应数据速率随着瞬时信道特性而改变。

多用户分集在两个方面获得好处:一是可以使用户在好的信道条件下提高前向链路的网络吞吐量,一是可以通过多用户分集来减少反向链路上的反馈需求。

## 4 MIMO系统中的波束成形技术

(1) 特征波束成形 MIMO系统的系统模型为  $r=Hs+n$ ,将信道矩阵H进行奇异值分解,如果发射端已知

信道信息,通过发射端的特征波束成形和接收端的线性处理,可将MIMO信道分成平行的子信道。如果发射端不知道信道状态信息,在多用户的环境下,可以采用随机波束成形方法实现多用户分集。

(2) 波束成形与空时编码结合 大多数情况下,假设信道状态信息(CSI, channel state information)的部分信息在发射端已知是合理的,因而提出了空时编码和波束成形相结合的混合机制。空时编码和波束成形是两种不同的发送分集技术。空时编码属于开环分集技术,在发送端不需信道信息,阵列波束成形属于闭环分集技术,利用信道反馈信息进行空间滤波或干扰抑制,信道反馈的准确性会严重影响波束成形的效果。当发送端获得部分信道状态信息时(如信道均值或信道协方差矩阵),可以根据信道信息选择发射策略(波束成形或空时编码)。波束成形的权值在保证接收端达到信噪比和误码率要求的条件下,由反馈信道信息决定,文献<sup>[10][11]</sup>中指出结合功率分配,波束成形和空时编码对发射机进行联合优化,在不增加设备复杂度和损失发射速率的条件下,提供了比传统空时编码更好的性能。

总之,描述多输入多输出智能天线收发机特征的性能度量均为方误差(MSE, Mean Square Error)、信噪比SNR(signal-to-noise ratio)、误比特率(BER, Bit Error Rate)、可达吞吐量、需要的发射功率和信道容量。发射和接收机制都是根据这些准则进行优化的。

## 5 波束成形技术的长期发展

(1) 相干波束成形 信号通过多根发送天线发送给当前所有用户,发送向量可以表示为  $X=Wx$ ,其中  $x$  是标量信号,  $W=[w_1, w_2, \dots, w_M]$  表示M根发送天线上的波束成形矢量,天线加权系数用复向量表示,用户需要估计和反馈多个天线信道各自的幅度和相位,反馈量很大,基站发送端需要知道全部的CSI,因此会大大增加系统的开销。当用户数目很大时,基站要从用户那反馈获得全部的CSI几乎是不可能的,考虑到如果基站只获得部分CSI,是否可以通过采用一些措施得到相同或者接近的性能呢?

在多用户通信中,一种叫作机会机制的通信方式得到了人们的重视。其基本思想是通过把信道分配给那些最有可能完成连续传输的用户来复用。这样可以使系统的吞吐量最大化。对于反射空间信道,机会波束成形方法会指向具有最高SNR的用户;另一方面,在充分散射情况下,机会机制会把信道分配给那些具有最高瞬时容量的用户。在此基础上Pramod Viswanath等在2002年首次提出了机会波束成形法。

(2) 机会波束成形<sup>[5]</sup>引入随机衰落的措施,不需要增加设备复杂度,只需在基站采用多个天线,终端采用一个天线,不同发送天线上的加权复系数不一样,并且天线加权系数以随机方式产生。每个用户测量接收的信噪比SNR并将其反馈给基站发送端,基站总是选择SNR最大的用户来通信。对于用户来说,给定信道矩阵 $H$ ,当某个时隙的加权复系数正好与某个用户的信道系数匹配时,该用户具有最高的SNR,我们称之为波束成形结构配置。当用户数足够大的情况下,对于随机产生的 $W$ 每个时隙总是会存在用户满足或接近波束成形结构配置,而且每个用户的通信机会我们可以认为是均等的,因此系统的公平性可以得到一定程度的保证,而系统的吞吐量也可以得到有效的提高。但是,在用户数不够多的情况下,用户满足或接近波束成形结构配置的机会就会大大减小,从而系统性能就得不到很好的改善。因此,传统的机会波束成形的优势受小用户数目的限制,随着用户数目的增加可以明显的改善系统的性能。特别要指出的是,机会波束成形技术还具有干扰机会零陷(Opportunistic Nulling)功能,它能抑制相邻小区间的干扰,提高小区边缘用户的数据速率。

当 $SNR = 0dB$ ,发送端有小数目的发送天线(假设两根天线),在瑞利慢衰落信道条件下,随着用户数的增加相干波束成形和机会波束成形分别获得的吞吐量变化如图2所示:

可以看出,在上述条件下,当用户数等于16时,机会波束成形的吞吐量性能已经非常接近相干波束成形。

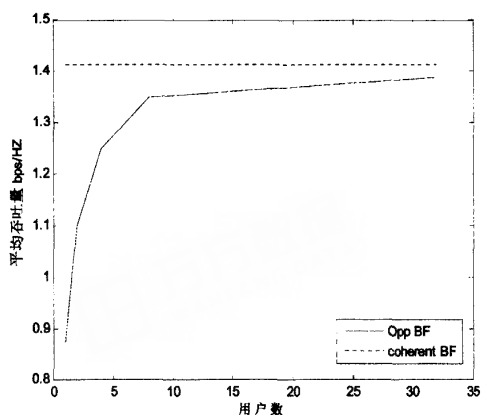


图2 相干波束成形与机会波束成形性能比较

(3) 机会波束成形与接收天线选择结合法<sup>[12]</sup>在MIMO系统中,为了改善用户数目较少情况下系统的性能,提出了结合天线选择的方案。每个用户端都有一个射频(RF, Radio Frequency)链和多个接收天线,假定接收天线之间是独立衰落的,每个用户的多根天线与转换选择模块连接,在任何时刻只有一个天线和RF相连接。系统模型如图3所示:

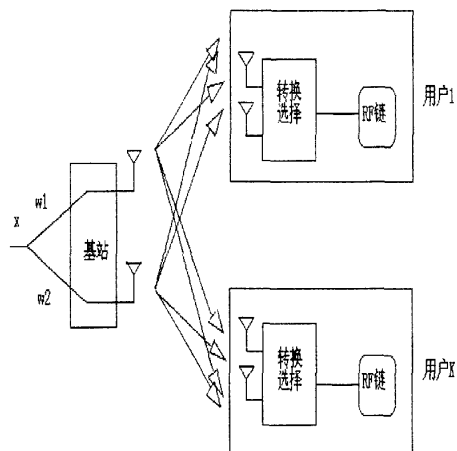


图3 系统模型

假定每个用户都能跟踪与自己相关的CSI,用户接收端只需监视自己多根天线上的所有接收SNR。只要移动用户选择最好的接收天线并将此天线上的SNR反馈给基站,

基站就能像传统方式一样运用机会波束成形法。在这种方式下,同时获得了天线选择分集增益和多用户分集增益,实际上,接收端采用多天线可以看作等同于增加了下行链路上的有效用户数,因此结合波束成形与天线选择这两种技术显著的提高了系统的吞吐量。

(4) 多波束机会波束成形 多波束机会波束成形有两种,一种是导频传输采取多波束模式,数据传输采用单波束<sup>[13]</sup>,在导频时隙,基站同时随机产生多重加权系数以形成多个波束,每个用户反馈多重波束下的最大信噪比(或信道增益)以及对应的波束序号,这种方法为每个用户提供了多个可供选择的波束,所以增加了多用户分集增益,尤其当用户数较少时更是如此。这种方法的主要不足是增加了导频开销,对应于多个波束,导频时隙分成了多个子时隙,而且,与最初的机会波束成形方法一样,由于数据传输只采用单波束,没有利用多天线可能带来的空分多址(SDMA, space division multiple access)增益。另一种是在导频和数据传输阶段均采用多波束的方法<sup>[14]</sup>,在导频阶段生成多个波束,然后选择多个最好的用户进行数据传输,选择的依据是信号干扰噪声比(SINR, signal-to-noise-plus-interference ratio)而非信道增益(因为可能存在波束间干扰),这种方法的主要问题是波束间的干扰问题,空分多址是非完全正交的,所以在高信噪比条件下(此时波束间干扰起决定作用)性能较差。

导频模式采用多波束,数据模式采用单波束的多波束机会波束成形与单波束机会波束成形的性能比较如图4,导频模式微时隙 $\tau$ 与时隙 $L$ 的关系为 $\tau/L = 5\%$ ,发送端天线数为8,每个用户有一个接收天线。可以看出,多波束机会波束成形与传统的机会波束成形相比性能得到了一定的改善。

(5) 基于用户选择的正交机会波束成形(ORBF/SUS, Orthonormal Random Beamforming with Systematic User Selection)<sup>[15]</sup> 在多波束发展过程中又提出了ORBF/SUS,并且又分为动态ORBF/SUS和静态ORBF/SUS。顾名思义,动态ORBF/SUS就是数据传输时选择的波束数在各衰落块中动态改变以达到最大的速率

和,静态ORBF/SUS就是数据传输时选择的波束数不随衰落块的变化而变化,因此,静态ORBF/SUS获得的速率与动态ORBF/SUS相比稍微差了一点,但它减少了计算复杂度和反馈复杂度。与单波束相比,ORBF/SUS增加了反馈量,但传统的相干波束成形相比,反馈开销还是大大减少了,而且ORBF/SUS在性能上明显优于单波束机会波束成形,尤其是在用户数目不足够多的情况下,更是有显著的优越性。

如图5所示:在 $SNR = 20dB$ ,发送天线 $N = 4$ ,基站产生的导频波束 $B = 4$ ,数据模式采用的数据波束 $B_0 = 2$ 条件下,静态ORBF/SUS,动态ORBF/SUS方案和传统的机会波束成形方案性能的比较。从图中我们可以看出,在用户数较少时,动态ORBF/SUS相比静态ORBF/SUS有明显的优越性,随着用户数目的增加,静态ORBF/SUS与动态ORBF/SUS性能的差距逐渐缩小,当用户数目等于30时,静态方案与动态方案只有3%的差距。而这两种ORBF/SUS与传统的机会波束相比,性能得到了明显的改善。

## 6 波束成形技术发展的展望

目前提出的波束成形已经发展到在动态时分多址(D-TDMA, dynamic time division multiple access)的基础上结合空分多址(也即多波束),为了进一步提高

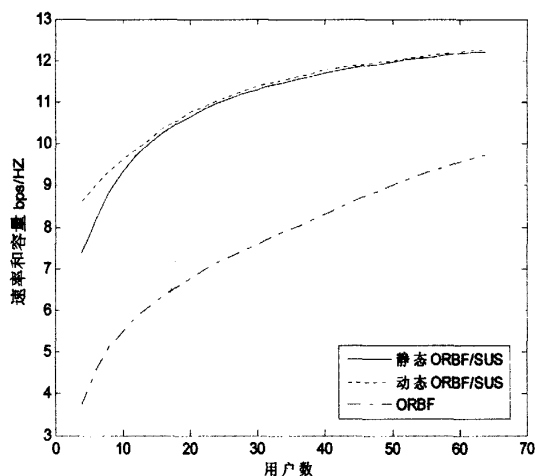


图5 两种ORBF/SUS与机会波束成形的性能比较

系统容量和性能,未来我们可以研究宽带信道条件下收发均采用多天线的正交频分复用 (OFDM, orthonormal frequency division multiplexing) 技术与多波束机会波束成形相结合的动态空-时-频混和多址技术,研究多波束的相互干扰问题,研究MIMO空间子信道的干扰问题,研究降低反馈开销的技术。由于采用 OFDM 技术,增加了频域自由度,而采用多波束机会波束成形增加了空域自由度,使实现动态三维机会多址成为可能,另外,收发均采用多天线可带来空间复用增益。这些研究将扩大未来无线通信系统的总容量,扩大覆盖范围,提高抗干扰性能,提高频谱利用率。

## 7 小结

本文介绍了智能天线的收发机结构,在此基础上引出了对智能天线关键技术波束成形发展的研究,讨论了不同阶段波束成形的发展及其优缺点,并作了一些定性的比较,还提出了未来无线通信智能天线波束成形技术的研究方向,总之,深入的研究并且合理地使用智能天线波束成形技术将大大地提高未来无线通信系统的性能。

### 参考文献

- 1 TELATAR E. Capacity of multiantenna Gaussian channels [J].AT&T-BELL Lab Internal Tech Memo, 1995,

- 10(6):585-596
- 2 FOSCHINI G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J].Bell Labs Tech J, 1996, 1(2):41-59
- 3 FOSCHINI G J. GANS M J. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas [J].Wireless Personal Commun, 1998, 6(3):311-335
- 4 TSE D N. Multiuser diversity in the wireless network [A]. Wireless Communication Seminar [C]. Stanford University, 2001.1-60
- 5 VISWANATH P, TSED N C, LAROL R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6):1277-1294
- 6 HEATH R W J, AIRY M, PAULRAA J. Multiuser diversity for MIMO wireless systems with linear receivers [A]. Conference Record of the Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C]. 2001. 1194-1199
- 7 BENDER P, BLACK P, GROB M, et al. CDMA/HDR: a bandwidth efficient high speed data service for nomadic users [J]. IEEE Comm Magazine, 2000, 38(7):70-77
- 8 JALALI A, PADOVANI R. Data through of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system [A]. IEEE Vehicular Technology Conf 2000-Spring [C]. Tokyo, 2000. 1854-1858
- 9 TIA/EIA IS-856, CDMA2000: High Rate Packet Data Air interface Specification [S]. 2000
- 10 S. Zhou and G. B , Optimal transmitter eigen-beamforming and STBC based on channel mean feedback .IEEE Trans. signal processing, 2002
- 11 S. Zhou and G. B. Optimal transmitter eigen-beamforming and STBC based on channel correlations.IEEE Trans. information ,2003
- 12 Lei Zan, Syed Ali Jafar.Combined Opportunistic Beamforming and Receive Antenna Selection.IEEE Comm Society, 2005, 1007-1011
- 13 I. M. Kim, S. C. Hong, S. S. Ghassemzadeh, and V. Tarokh.Oppportunistic beamforming based on multiple weighting vectors. IEEE Trans. Wireless Commun.,

随着技术的提高, ADSL将会以更佳的性能、更低的价格走进广大的用户。

## 5 结束语

目前, ADSL的发展已经成熟, 预计在未来几年内, 随着对ADSL的升级, ADSL2+将会得到大范围的使用。在实现光纤宽带接入之前, 以ADSL为代表的铜线接入技术在很长时间内将是宽带接入的重要手段。

## 参考文献

- 1 蒋清泉等.接入网技术[M].北京: 人民邮电出版社, 2005
- 2 新一代标准ADSL2+能否刺激宽带神经[EB/OL]. <http://www.4it168.com/adsl/showTitle.asp?ctype=1>, 2007-02-26
- 3 王卫东.适应网络转型的需求的宽带接入技术[J].中国新通信, 2007, (1): 5-8

(收稿日期: 2007-5-25)

(上接第46页)

2005, vol. 4(6): 2683-2687

- 14 M. Sharif and B. Hassibi. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information, IEEE Trans. Inf. Theory, 2005, vol. 51(2): 506-522

- 15 Jorg Wagner, Ying-Chang Liang, Rui Zhang. On the Balance of Multiuser Diversity and Spatial Multiplexing Gain in Random Beamforming.

(收稿日期: 2007-6-5)

(上接第61页)

(13)启动监听器。

\$lsnrctl start

至此, 整个数据库的存储迁移已全部完成, 即数据库已完整地迁移到新存储ESS800上, 可对外提供使用(实际迁移中几百G的数据库可以在几小时内完成迁移)。同样的, 用这种方法还可以实现部分数据文件的迁移。

## 4 小结

通过RMAN COPY的方式进行数据迁移具有性能好、时间短、可实现大数据量迁移、不需要创建新的目标

数据库、可操作性强、无需其他领域(如操作系统及存储)相关技术支持等优势, 不失为实现ORACLE数据库存储迁移的一种优选方案。

## 参考文献

- 1 ORACLE9i Recovery Manager User's Guide (Release 2)
- 2 ORACLE9i Database Concepts (Release 2)
- 3 温力. ORACLE数据库的数据迁移方法. 计算机世界, 2000
- 4 (美)弗里曼, (美)哈特著, 梁志敏, 蔡建译. Oracle 9i RMAN备份与恢复技术. 清华大学出版社, 2004

(收稿日期: 2007-6-7)



## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>