

多天线环境下的 无线协作通信技术

冯振杰 ● 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

多天线环境下的无线协作通信技术

冯振杰 ◎ 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

多天线环境下的无线协作通信技术/冯振杰著. —北京: 科学技术文献出版社, 2016. 11 (2017. 3 重印)

ISBN 978-7-5189-2056-3

I. ①多… II. ①冯… III. ①无线电通信 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 256413 号

多天线环境下的无线协作通信技术

策划编辑: 崔灵菲 责任编辑: 安子莹 责任校对: 赵 瑗 责任出版: 张志平

出 版 者	科学技术文献出版社
地 址	北京市复兴路 15 号 邮编 100038
编 务 部	(010) 58882938, 58882087 (传真)
发 行 部	(010) 58882868, 58882874 (传真)
邮 购 部	(010) 58882873
官 方 网 址	www. stdp. com. cn
发 行 者	科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者	虎彩印艺股份有限公司
版 次	2016 年 11 月第 1 版 2017 年 3 月第 2 次印刷
开 本	850 × 1168 1/32
字 数	202 千
印 张	8
书 号	ISBN 978-7-5189-2056-3
定 价	38.00 元



版权所有 违法必究

购买本社图书, 凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

前 言

随着人们对无线多媒体通信业务需求的增长,下一代无线通信系统需要提供更高的传输速率和更可靠的传输性能。在发射端和接收端都采用多个天线的多输入多输出(MIMO)技术,由于该技术能够显著提高频谱效率,成为新一代移动通信系统的核心技术之一。然而,移动终端的体积限制大大制约了多天线系统的实际应用。利用无线网络中的多个终端节点协作构成一个虚拟多天线阵列的协作通信技术将是解决这个问题有效方法。协作通信系统可以在移动终端安装一个或者少量天线的情况下实现与多天线技术相同的空间分集增益,扩展了传统MIMO系统的应用场合。

本书围绕放大转发中继网络中的中继选择、多接入中继信道的分集复用折中性能分析、译码转发中继网络中多天线节点上的天线选择及放大转发中继网络中利用有限信道信息反馈进行功率控制等方面展开分析。本书共分为以下内容。

针对接收节点配置多个天线而其他节点配置单个天线的多中继系统,提出了一个中继选择算法。该算法按照最大化接收信噪比的原则选择多个中继,被选择的中继在相同频带上以类似于循环延时的方式同时参与协作。相对于所有节点均配置单个天线情况下的最优中继选择算法,该算法能获得更优的中断性能和更高的吞吐量。

由于中断概率渐近特性描述上的困难,文献中对放大转发



多接入中继信道的分集复用折中性能的分析局限于系统中只有两个用户和一个中继的情况。通过对其渐近特性的分析和简化,给出了包含一个中继或任意多个用户的多接入中继信道的分集复用折中性能的闭式表达。对于包含任意多个中继或任意多个用户的多接入中继信道,提出了一个分时隙的放大转发多接入协议,并且假设各个中继是孤立的,得到其分集复用折中的闭式表达。分析结果表明,在复用增益较高的时候,放大转发多接入信道相当于一个多输入单输出系统,在复用增益较低的时候,系统中的每个用户能够获得与系统中其他用户不发送信号情况下相同的分集复用折中性能。

针对 MIMO 非正交放大转发信道,提出了一种基于有限信道状态信息反馈的功率控制算法,并且推导了该算法所能获得的分集复用折中性能的一个下界。相比于没反馈的情况,在复用增益较小的区域,基于有限反馈的功率控制算法显著地提高了系统的分集复用折中性能。

分析了具有天线选择的 MIMO 点对点系统在最优天线选择算法下所能获得的分集复用折中性能。针对 3 端 MIMO 中继信道中各个节点的处理复杂度和硬件成本较高的问题,假设每个节点只有一个射频链路,提出了一种译码转发协议下的天线选择算法,然后分析了该算法所能获得的分集复用折中性能。分析结果表明,该算法能够获得的最大分集阶数与没有天线选择的情况下是相同的。

在本书撰写过程中,安阳师范学院计算机与信息工程学院的领导和老师给予了极大支持,在此表示衷心感谢。鉴于作者的经验和知识理解有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者和同行批评指正,笔者会将读者的反馈作为进一步提高质量的动力。

目 录

1 绪论	1
1.1 移动通信的发展	1
1.2 MIMO 概述	4
1.2.1 MIMO 技术的优点	5
1.2.2 MIMO 技术存在的问题	7
1.3 协作通信系统的意义及研究现状	8
1.4 主要内容安排	11
2 协作通信中的基本理论与协议	15
2.1 MIMO 信道的分集复用折中 (DMT) 简介	16
2.1.1 MIMO 点对点信道的 DMT 性能	16
2.1.2 MIMO 多接入信道的 DMT 性能	22
2.1.3 具有天线选择的 MIMO 点对点信道的 DMT 性能	24
2.2 协作通信信道模型简介	27
2.3 协作通信系统的基本传输协议	29
2.3.1 放大转发协议	29
2.3.2 译码转发协议	31
2.3.3 增量型的中继协议	33
2.4 几种 AF 协议简介	35



2.4.1	各个节点配置单个天线的非正交放大转发 (NAF) 协议	35
2.4.2	各个节点配置多个天线的 NAF 协议的 DMT 性能	38
2.4.3	分时隙的放大转发 (SAF) 协议及 DMT 性能	40
2.5	小结	44
3	接收节点配置多根天线放大转发中继网络中的中继选择	45
3.1	引言	45
3.2	信道模型	47
3.3	组选择 AF (GAF) 体系	49
3.3.1	GAF 的基本原理	49
3.3.2	选择算法	54
3.3.3	目的节点的信号处理	55
3.4	GAF 的分集复用折中性能分析	56
3.5	仿真结果和讨论	59
3.6	小结	65
4	放大转发的多接入中继信道中的分集复用折中	70
4.1	引言	70
4.2	单中继 MARC 的 DMT 性能	72
4.2.1	信道模型	72
4.2.2	MARC 的 DMT 性能分析	74
4.2.3	小结	81
4.3	包含任意多个中继和任意多个用户的 MARC 的	

DMT 性能	82
4.3.1 信道模型	82
4.3.2 MASAF 协议下 MARC 的中断指数分析	86
4.3.3 注释	94
4.3.4 MASAF 协议下 MARC 的最优 DMT 性能	95
4.3.5 讨论	97
4.3.6 小结	100
5 具有量化信道信息反馈的 MIMO NAF 中继信道中的 分集复用折中性能分析	101
5.1 引言	101
5.2 信道模型	102
5.3 利用量化 CSI 反馈进行功率控制的 MIMO NAF 信道的 DMT 性能分析	105
5.4 小结	117
6 具有天线选择的 MIMO 系统和中继网络研究	118
6.1 引言	118
6.2 具有天线选择的 MIMO 点对点系统的分集 复用折中性能分析	120
6.2.1 信道模型	120
6.2.2 具有天线选择的 MIMO 点对点系统的 DMT 分析	124
6.2.3 小结	131
6.3 具有天线选择的 MIMO 译码转发中继网络研究	131
6.3.1 信道模型	131
6.3.2 天线选择准则与算法	133



6.3.3	分集复用折中性能分析	135
6.3.4	仿真结果和分析	139
6.3.5	小结	142
附录		143
附录 A	主要符号表	143
附录 B	TD-LTE 数字蜂窝移动通信网 Uu 接口物理层 技术要求 (第一阶段) 第 3 部分: 物理层 复用和信道编码	144
参考文献		228

1 绪 论

1.1 移动通信的发展

移动通信技术从兴起之日发展至今，从第 1 代的模拟蜂窝移动通信系统（1G）到第 2 代的数字蜂窝移动通信系统（2G），直至今天的 3G 和 4G 移动通信系统，世界范围内的移动通信网络发生了巨大的变化。

第 1 代移动通信系统，以模拟传输方式实现语音业务，主要采用以蜂窝结构网为核心的模拟技术和频分多址（FDMA）动态寻址技术。其中，1978 年年底蜂窝移动通信网的出现是现代移动通信系统的里程碑。蜂窝概念^[1]实现了频率复用，真正解决了公用移动通信系统需求容量大与频率资源有限的矛盾，一直沿用至今。1G 的代表系统有美国和澳大利亚的 AMPS 系统，欧洲的 ETACS 系统及日本的 NTT 系统。由于受到传输带宽的限制，其缺点是不能进行移动通信的长途漫游。

第 2 代移动通信系统，以数字传输方式实现语音和数据等业务。2G 系统采用时分多址（TDMA）和码分多址（CDMA）实现动态寻址功能^[2,3]，代表性的第 2 代移动通信系统包括 GSM、IS-54 和 IS-95。以蜂窝结构网为核心，利用频率规划



(在欧洲的 GSM 制式中) 和导频相位规划 (在北美的 IS-95 制式中) 实现用户大范围覆盖与用户大数量增长。与 1G 相比, 2G 中采用了更多的数字信号处理技术, 包括语音编码、信道编码和自适应均衡等, 其中在 IS-95 系统中还成功的使用了 RAKE 接收、软切换、宏分集、动态功率控制等技术。2G 的主要业务包括数字移动电话和低速率数据业务, 它较好地满足了人们对语音的需求, 因此在世界范围内得以广泛应用, 成为人们生活中不可缺少的通信手段之一。

随着全球移动通信的迅猛发展, 2G 系统中用户的最大空中数据传输能力远远不能满足日益增长的宽带多媒体数据业务的要求。在 20 世纪 90 年代末, 2G 通信系统在对数据业务的支持能力方面得到了进一步提升。例如, GSM 系统中的 GPRS 和 EDGE 等技术, 将峰值速率最多提升到约 384 kbps。与此同时, 国际电信联盟 (ITU) 提出建立基于单一频带的第 3 代移动通信标准 (3G), 即为 IMT-2000 通信系统。3G 的设计目标是实现 144 kbps 的车载通信速率、384 kbps 的步行通信速率和 2 Mbps 的室内通信速率, 更加重视移动多媒体业务, 语音业务占的比重越来越小。3G 代表性的标准 CDMA-2000、WCDMA 和 TD-SCDMA 等。其中, CDMA-2000 由美国高通公司提出, 技术成熟性最高, 有着明确的提高频谱利用率的演进路线; WCDMA 则由欧洲和日本支持, 有较高的扩频增益, 发展空间较大, 但技术成熟性一般; TD-SCDMA 标准^[4]则是由我国提出的具有自主知识产权的 3G 标准。尽管 3G 系统在通信容量与质量方面比 2G 系统有了较为明显的改善, 但由于其核心技术未能发生革命性的变革, 无法在有限的无线频谱资源上提供广泛的覆盖, 并使数据传输速率达到 100 Mbps 以上, 以提供宽带移动多媒体业务的服务。



第4代移动通信网络可称为宽带接入和分布网络,它融合了现有3G的增强技术,集3G网络技术和无线LAN系统为一体^[5]。目前所称的4G实际上就是指国际电信联盟提出的IMT-Advanced通信系统^[6]。IMT-Advanced移动通信系统将是移动IP为核心,结合多种接入方式,支持全球漫游、多种服务质量要求(QoS)、随时随地接入并能在不同接入网间无缝漫游的无线异构网。其一个特点是4G通信系统将为移动通信用户提供具有QoS保证的高速数据传输业务,在高速移动环境下的传输速率将大于2 Mbps,而接入核心网的无线接入速率将达到100 Mbps,甚至更高。其支持的业务从语音业务到多媒体业务,包括实时的流媒体业务,并且数据传输速率可以根据这些业务所需速率的不同进行动态调整。而其另一个特点是低成本。要求在有限的频谱上实现高速率和大容量的信息传输,这就需要一种频谱利用效率极高的技术。实现这一目标的关键在于利用多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术进行信号传输^[7]。信息论的研究结果表明^[8,9],在发射和接收端使用多天线的MIMO技术可以使蜂窝通信系统的信道容量成倍提高,这为未来移动通信技术的发展指明了方向,MIMO技术也因此被认为是4G系统的关键技术之一。

相对于3G而言,4G在技术和应用上将有着质的飞跃,而不仅仅是在第3代移动通信系统的基础上再加上某些新的改进技术,4G应具有下述特征^[10,11]:

- ①需要占据更宽的带宽。
- ②采用全数字技术,提供更高的传输速率和更大的容量。
- ③支持分组交换,通信以IP协议为基础,能实现更高质量的多媒体通信服务,包括语音、数据、影像等业务类型。
- ④兼容性更强,采用大区域覆盖,与3G、无线LAN



(WLAN) 和固定网络之间无缝隙漫游, 使得终端具有智能性和可扩展性, 实现真正意义的全球漫游, 能满足用户接入因特网而不受地域和设备的限制, 各种用户设备可便捷地入网。

⑤采用高度自治、自适应的网络, 具有良好的重构性、可伸缩性、自组织性, 拥有独立的软件平台等。

1.2 MIMO 概述

下一代无线通信系统将提供给用户更高的数据传输速率和更好的服务质量, 系统容量需要大幅度提高, 因此有限的无线频谱资源迫使下一代无线通信技术必须极大地提高频谱利用率。MIMO 技术是指在发射端通过多个发射天线传送信号, 在接收端使用多个接收天线接收信号的无线通信技术。由于 MIMO 在提高系统信道容量和提高频谱利用率方面的优点, MIMO 技术也因此被认为是近年来数字通信系统中具有重大技术突破的研究课题之一, 无可替代的成为第 4 代移动通信系统的核心技术之一。

信息论的研究已表明^[8,9], 多天线系统能充分利用空域资源, 在不增加系统带宽和发射功率的前提下, 极大地提升系统的信道容量和频谱利用率。多天线将多个信号副本经过多条空域信道传输, 因而可以获得空间分集增益, 从而有效抵抗无线信道的衰落, 提升通信质量, 降低系统的工作信噪比门限^[12,13], 大大提高移动通信网络的覆盖面积。由于多天线系统具有这些优势, 国内外学者近年来已经对其展开了深入的研究。近年来对多天线技术的研究包括多天线系统的容量^[14]和实际应用^[15]等多个方面。

在 20 世纪 90 年代初, 多天线技术运用于无线通信系统以

提升系统容量和传输质量的理论研究为开始进行展开。移动通信系统中的多天线技术研究是以 Winters^[16]、Foschini 及 Telatar 等开创性工作为基础的。Telatar^[8] 和 Foschini^[9] 分别给出了高斯信道下多天线系统的信道容量分析, 从信息论的角度证明了多天线系统在频谱利用率上所引入的巨大增益。Foschini^[17] 于 1996 年提出了多天线系统高速传输的一种实现结构——对角分层空时 (D-BLAST) 结构。由于 D-BLAST 结构的实现复杂度较高, 贝尔实验室的研究人员进一步提出了一种复杂度较低的垂直分层空时 (V-BLAST) 结构^[18,19]。Golden 等进一步通过建立实验系统, 在室内环境下利用 8 根发射天线和 12 根接收天线实现了高达 25.9 bps/Hz 的频谱利用率^[18]。这种极高的频谱利用率在单天线系统中是难以实现的。

1.2.1 MIMO 技术的优点

传统的无线通信系统是单入单出 (SISO) 系统。SISO 系统在信道容量上具有一个不可突破的瓶颈——香农容量限制。传统通信理论一直将多径传播视为信号传输的一种不利因素, 因为具有不同延时的多径信号副本相叠加会产生破坏性干扰, 使链路性能不稳定。但是在 MIMO 系统中, 不同延时的多径信号被有效利用, 提供了空间复用增益和空间分集增益。

多天线系统中的空间复用 (Spatial Multiplexing) 是指在 MIMO 系统中通过不同的天线尽可能多地在空间信道上传输相互独立的数据, 从而获得较高的频谱利用率, 其典型应用即为 BLAST 系统。BLAST 系统就是将待发射的信息流分解为多路并行子流, 对各路独立地进行编码、调制与映射到其对应的发射天线上, 在接收端采用解码算法将多路子数据流分离。其实质是将单路高信噪比信道分解为多路相互重叠的低信噪比信道



并行传输,达到空间复用的目的,从而极大地提高了频谱利用率。

信号在无线信道中传输时,信道的频率选择性衰落和时间选择性衰落是造成错误传输的主要原因之一^[1]。为了确保一定的传输错误概率,传统的单天线系统中往往需要更高的发送功率。但是在多天线系统中,由于信号可以经过多条空域信道进行传输,因而可以获得空间分集增益。当多个空域信道的相关性较弱时,空间分集增益可以显著地提升接收性能。在功率受限的通信系统中,空间分集增益是具有重要意义的。因此,如何有效利用多天线结构引入更多分集增益,成为另一个重要的研究方向。实现空间分集技术最重要的方法是采用开环发射分集的空时编码(Space-Time Coding, STC)技术^[19-21]及闭环的波束赋型或预编码技术^[22-27]。

但是 MIMO 系统的复用增益与分集增益是一对相互对立的性能指标。空间复用技术主要追求如何最大化传输速率和频谱利用率,而空间分集技术主要关注如何提升系统的传输性能。在多天线系统中,采用特定的编码方式可以同时获得空域复用增益和空间分集增益,但这两者存在折中关系^[28,29]。这种折中关系可以直观地理解为高传输速率和可靠传输之间存在矛盾。因此,针对不同的信道条件和业务质量要求,需要在不同的传输策略间进行取舍,以获得较好的折中。在下文中即将介绍的协作分集系统可以看作是虚拟的 MIMO 系统,其分集复用折中是本书研究的重点之一。

近年来,多天线技术由于其在频谱利用率和传输性能上的巨大优势,已经运用于许多无线通信系统中。例如,贝尔实验室的 BLAST 系统采用了多天线传输多个独立数据流^[17];3G 系统中的 WCDMA 和 CDMA-2000 制式都采用多天线支持发射



分集^[30]；3GPP LTE 系统中，支持开环发射分集、闭环波束赋型及预编码等多种传输模式；无线局域网 802.11n 和 802.20 协议都采用多天线技术提升传输效率^[31]。与此同时，国内外学者对于多天线系统中的各个层面都进行了深入的理论研究。这些研究包含：空时编码技术^[19-21]、多天线信道建模^[32,33]、多天线系统信道容量^[34,35]、空时二维信号处理技术^[36,37]、多用户多天线系统等^[38]。此外，多天线技术与 4G 系统中另一项关键技术正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）相结合的 MIMO-OFDM 系统也引起广泛的关注^[39-41]。在其他无线通信系统，如超宽带（UWB）系统、感知无线电系统（CR），都在考虑应用 MIMO 技术，为 MIMO 技术的应用进一步开辟了广阔的空间^[7,42]。

综上所述，在无线频谱资源有限而高速数据需求不断增长的现实下，利用增加发射和接收天线来增加空间自由度、改善系统性能和提高频谱利用率是无线通信领域中一个重要的研究方向。多天线技术以其特有的优势，将成为未来移动通信系统中的关键技术之一。

1.2.2 MIMO 技术存在的问题

尽管 MIMO 多天线技术具有以上种种优势，并广泛被新的通信标准所采纳，但仍然存在各种问题。首先，移动终端对体积、重量和功耗的要求比基站苛刻很多，因此在移动终端很难安置比较多的天线；其次，理想的多天线系统要求相邻天线之间的传输信道是独立的（或至少是不相关的），而移动终端由于体积的限制，可能无法做到这一点。为此，有学者一方面提出了等效天线阵的概念^[43]，另一方面则致力于研究相关信道下的信号设计。然而，这些解决方法收效甚微，实际可获得的



信道容量比理想值要小很多。在文献 [44 - 46] 中提出了一种新的空间分集技术——协作分集，它使得单天线的移动终端也可以实现空间分集。协作分集的基本思想是通过无线网络中的其他空闲终端，以中继的角色来协助源节点传输数据，因此称该系统为协作通信（Cooperative Communications）系统^[47]。在IMT-Advanced 通信系统中，也已有标准提议通过配置中继节点，构建分布式协作通信系统来提供吞吐量、增加网络覆盖率。

1.3 协作通信系统的意义及研究现状

为了实现 4G 网络中的目标数据速率和带宽，一个直接的办法是在无线网络中架设更多更密集的基站，但是这样做成本太高。文献 [48] 中提出对无线网络的构建进行一定程度的改进，利用无线网络中的节点相互协作传输数据或者加入专门的中继节点。利用无线网络中的中继节点协作传输，可以在提高系统频谱利用率的同时，有效降低增加基站所带来的巨额成本。在一些实际场景中，例如，蜂窝系统上行链路，由于自身体积、实现复杂度与功耗等限制，MIMO 技术不容易直接应用于移动用户终端或者网络节点。在支持更多节点和具有更大覆盖范围的分布式网络中如何提高系统频谱效率的挑战促使了用户之间协作通信技术的产生与发展。用户间协作使一个网络节点可以通过一定的协作方式，合理利用其他节点的资源。由于共享资源的两个或多个节点上的天线在无线网络中形成一个虚拟天线阵列，因此可以使协作节点比非协作节点获得更高的传输速率和分集性能。协作通信已经成为目前移动通信领域学术界及工业界研究和关注的热点。目前协作通信系统的研究包括