

SIGNAL 信号处理系列丛书
PROCESSING

无线通信中的 空时与协作 信号处理

Space-Time and Cooperative Signal Processing
in Wireless Communications

刘琚 许宏吉 郑丽娜 张大鹏 兰鹏 郭卫栋 ○ 著

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

SIGNAL 信号处理系列丛书
PROCESSING

无线通信中的 空时与协作 信号处理

Space-Time and Cooperative Signal Processing
in Wireless Communications

刘琨 许宏吉 郑丽娜 张大鹏 兰鹏 郭卫栋 著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

无线通信中的空时与协作信号处理 / 刘琚等著. —
北京: 人民邮电出版社, 2014. 1
(信号处理系列丛书)
ISBN 978-7-115-33146-5

I. ①无… II. ①刘… III. ①无线电通信—通信系统—信号处理 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第218394号

内 容 提 要

本书主要讨论多天线无线通信系统所涉及的空时与协作信号处理方法与技术。全书共分为 6 章, 集中阐述了无线通信系统中的空时与协作信号处理技术及其最新发展。具体内容包括: 无线通信中多天线技术的基本概念、非相干空时编码调制、波束成形与发射分集、协作波束成形、天线选择与用户调度、协作分集和中继选择等方法与技术。此书可作为高等院校通信与电子学科研究生和相关科技工作者的参考书。

-
- ◆ 著 刘 琚 许宏吉 郑丽娜 张大鹏 兰 鹏 郭卫栋
责任编辑 代晓丽
责任印制 焦志炜
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16 2014 年 1 月第 1 版
字数: 380 千字 2014 年 1 月北京第 1 次印刷
-

定价: 78.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

前 言

随着人们对传输速率和服务质量需求的提高,无线通信系统的网络结构和传输技术也在持续更新。以多输入多输出(MIMO)技术为代表的空时信号处理技术依其特有的优势受到广泛关注,并被许多实际系统所采用。利用空时信号处理技术可以极大地提高系统容量和频谱利用率。随着多用户和分布式天线技术的发展,无线通信中出现了协作和分布式信号处理的思想,每个终端可以拥有一个或多个合作伙伴,合作伙伴共享彼此的天线,构成虚拟 MIMO 系统,从而使单天线的移动终端可以实现空域分集,扩大网络覆盖范围并降低终端发送功率。

《无线通信中的空时与协作信号处理》是作者在相关领域研究工作的总结。全书共分为 6 章,第 1 章主要介绍了无线通信中多天线技术的基本概念和关键技术。具体概述了无线通信中的空间分集、波束成形、空时编码、天线选择、用户调度、协作通信等关键技术,讨论了多天线通信系统的系统容量。第 2 章讨论了非相干空时编码调制技术。针对目前空时系统存在的问题,以提高非相干空时调制的有效性和可靠性为目的进行了分析与设计,包括酉空时调制本身的理论以及与信道编码相结合的技术。具体介绍了酉空时码的基本定义、成对差错概率及其 Chernoff 界、Cayley 差分酉空时码、多电平空时码、适合酉空时矩阵的多进制 Turbo 码、卷积码与酉空时码的联合设计、新型非相干空时码的纠错等。第 3 章讨论了波束成形与发射分集技术。概述了 MIMO 系统中的波束成形技术,具体分析了多种自适应波束成形方案;把分集技术和波束成形进行组合,研究了其系统框架和容量,以此为基础构建了波束空时分组码系统,同时对各种方案的性能进行了比较和分析。第 4 章讨论了协作波束成形技术。具体介绍了虚拟 MIMO 与协作波束成形技术的基本概念、基于最大化接收信噪比的协作波束成形、基于最小中继发射功率的协作波束成形、基于概率约束的稳健协作波束成形技术、基于模拟退火算法的 SNR 最优化方法以及多源多宿通信系统中的协作波束成形等内容。第 5 章讨论了天线选择与用户调度技术。具体介绍了多种几种典型的天线选择方案,如基于几何向量的天线选择方案和基于矩阵分解的天线选择方案等,对 DSTTD 系统天线重分组技术进行了讨论。另外,详细讨论了基于完全信道信息下的用户调度、基于有限反馈的用户调度以及联合天线选择与用户调度等相关技术。第 6 章讨论了协作分集和中继选择技术。概述了中继协作通信技术的基本概念,介绍了基于信噪比的混合译码放大转发协作机制、基于机会中继的译码转发机制、基于选择协作的译码转发机制、多源多中继协作网络以及多中继多用户协作网络。

本书内容兼顾多天线无线通信系统空时与协作信号处理的基本原理、算法和系统设计,所涉及的方法有计算机仿真结果和性能分析。写作力求简明扼要、理论结合实际,通过实例及相应的仿真结果,使读者更好地理解最新分布式信号处理理论和方法;同时,注重相关领域前沿技术的介绍,让读者了解该领域的新发展和动向。



本书得到国家自然科学基金、高等学校科技创新工程重大项目培育基金、山东省自然科学基金、东南大学移动通信国家重点实验室开放基金、西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室开放基金、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金以及海信数字多媒体技术国家重点实验室开放基金等的支持。

本书主要内容来自作者多年来指导的从事无线通信研究方向的历届博士生和硕士生,除了直接作者许宏吉、郑丽娜、张大鹏、兰鹏和郭卫栋外,还有陈磊、张国伟、刘玉玺、陈赫、董郑、孙丰刚、陈晓晗、张琪、邢蕊和王超等也参与了部分工作,对他们表示衷心感谢。

在组稿和成书的过程中，得到人民邮电出版社代晓丽编辑的悉心指导和帮助，在此也一并致谢。

刘璐组织全书的撰写并完成第1章其余各章中的部分小节；第2章主要由张大鹏完成；第3章主要由许宏吉完成；第4章主要由郑丽娜完成；第5章主要由兰鹏完成；第6章主要由郭卫栋完成；最后由刘璐、许宏吉和张大鹏统稿。

由于作者水平所限，书中不足甚至错误之处在所难免，真诚欢迎读者批评指正。

目 录

第 1 章 无线通信中的多天线技术	1
1.1 多天线通信系统概述	1
1.1.1 阵列增益	2
1.1.2 分集增益	3
1.1.3 复用增益	3
1.2 分集技术的原理和分类	4
1.2.1 分集技术的原理	4
1.2.2 分集技术的分类	4
1.2.3 分集合并技术	6
1.3 多天线通信系统的容量	7
1.3.1 发射端已知 CSI 情况下的 MIMO 信道容量	7
1.3.2 发射端未知 CSI 情况下的 MIMO 信道容量	10
1.3.3 发、收两端均未知 CSI 的 MIMO 信道容量	12
1.4 空时编码	14
1.4.1 经典空时码	14
1.4.2 非欧空时码	17
1.5 波束成形	22
1.5.1 波束成形的基本原理	22
1.5.2 波束成形的分类	23
1.6 天线与用户的选择	24
1.6.1 天线选择	24
1.6.2 用户选择	24
1.7 协作通信技术	25
1.7.1 中继协作	25
1.7.2 基站协作	26
参考文献	28



第2章 非相干空时编码调制	34
2.1 酉空时码	34
2.1.1 酉空时码的定义	34
2.1.2 成对差错概率及其 Chernoff 界	36
2.1.3 星座构成	41
2.1.4 酉空时码的调制解调原理	45
2.2 Cayley 差分酉空时码	46
2.2.1 差分酉空时码	46
2.2.2 Cayley 码	49
2.3 多电平空时码	50
2.4 适合酉空时矩阵的多进制 Turbo 码	52
2.4.1 酉空时矩阵级的 Turbo 码	52
2.4.2 多进制 Turbo 码的译码算法	54
2.4.3 非高斯分布多进制 EXIT 图	57
2.4.4 仿真与性能分析	61
2.5 卷积码与酉空时码的联合设计	65
2.5.1 网格酉空时编码	65
2.5.2 比特交织酉空时编码	67
2.5.3 仿真与性能分析	68
2.6 新型非相干空时码的纠错	70
2.6.1 Cayley 码与 Turbo 码的级联	70
2.6.2 多电平空时码与 Turbo 码的级联	72
参考文献	74
第3章 波束成形与发射分集	77
3.1 MIMO 系统中的波束成形技术	77
3.1.1 系统模型	77
3.1.2 MIMO 系统中的特征波束成形技术	77
3.1.3 多用户 MIMO 系统中的波束成形技术	78
3.1.4 基于凸优化的波束成形技术	79
3.2 基于子空间跟踪的自适应波束成形	82
3.2.1 系统模型	83
3.2.2 自适应波束成形	84

3.2.3 子信道选择算法	85
3.2.4 仿真实验及分析	88
3.3 结合用户选择的多用户 MISO 自适应波束成形	90
3.3.1 系统模型	91
3.3.2 算法实现	92
3.3.3 仿真实验及分析	95
3.4 发射分集与波束成形联合优化设计	97
3.4.1 发射分集与波束成形的区别与联系	97
3.4.2 发射分集与波束成形联合系统的错误率分析	98
3.4.3 发射分集与波束成形联合系统的容量	99
3.5 波束空时分组码方案	102
3.5.1 分立波束空时分组码	104
3.5.2 集成波束空时分组码	107
参考文献	113
 第 4 章 协作波束成形	 118
4.1 基于最大化接收信噪比的协作波束成形	118
4.1.1 模型建立	118
4.1.2 近最优波束成形矢量设计	122
4.1.3 闭式次优波束成形矢量设计	123
4.1.4 仿真实验及分析	124
4.2 基于最小化中继发射功率的协作波束成形	126
4.2.1 模型建立	126
4.2.2 协作波束成形矢量设计	127
4.2.3 仿真实验及分析	128
4.3 基于概率约束的顽健协作波束成形技术	130
4.3.1 系统模型	130
4.3.2 高斯近似	133
4.3.3 概率约束下的协作波束成形的优化	134
4.3.4 仿真实验及分析	136
4.4 基于模拟退火算法的协作波束成形	138
4.4.1 Metropolis 准则	138
4.4.2 基于 SA 算法的随机波束成形方法	140



4.4.3 仿真实验及分析	141
4.5 多源多宿通信系统中的协作波束成形	143
4.5.1 系统模型	143
4.5.2 经典协作波束成形算法	145
4.5.3 顽健协作波束成形算法	146
参考文献	151
第5章 天线选择与用户调度	153
5.1 天线选择	153
5.1.1 基于几何向量的天线选择方案	154
5.1.2 基于矩阵分解的天线选择方案	156
5.1.3 最大化最小特征值天线选择方案及其凸优化实现	159
5.1.4 DSTTD 系统天线重分组技术研究	162
5.2 基于完全信道信息下的用户调度	169
5.2.1 基于块对角化预编码的用户调度方案	170
5.2.2 基于信漏造比预编码的用户调度方案	177
5.3 基于有限反馈的用户调度	183
5.3.1 多用户 MISO 系统中基于有限反馈的用户选择算法	183
5.3.2 MU-MIMO 系统中基于有限反馈的用户选择算法	187
5.4 联合天线选择与用户调度	192
5.4.1 基于 QoS 的下行发射天线选择和用户调度算法	192
5.4.2 基于 SINR 最大化的上行天线选择与用户调度算法	199
参考文献	204
第6章 协作分集和中继选择	207
6.1 中继协作通信概述	207
6.1.1 协作转发策略	207
6.1.2 协作通信基本模型	209
6.2 基于信噪比的混合译码放大转发协作机制的性能分析	211
6.2.1 系统和信道模型	211
6.2.2 误比特率性能分析	212
6.2.3 实验结果和分析	215
6.3 基于机会中继的译码转发机制的渐进误符号率分析	217

6.3.1	系统和信道模型	217
6.3.2	平均误符号率分析	217
6.3.3	仿真结果和分析	220
6.4	基于选择协作的译码转发机制性能分析及改进	222
6.4.1	系统和信道模型	222
6.4.2	基于等增益合并的选择协作机制的性能分析	222
6.4.3	译码转发的一种改进型选择协作机制	228
6.5	多源多中继协作网络性能分析	231
6.5.1	系统模型	231
6.5.2	分步选择方案性能分析	232
6.5.3	分步选择方案仿真结果与性能比较	235
6.5.4	基于增量中继和部分信息选择法的分步选择方案性能分析	237
6.5.5	基于增量中继和部分信息选择法的分步选择方案仿真结果与分析	241
	参考文献	243

第 1 章 无线通信中的多天线技术

1.1 多天线通信系统概述

无线通信已经影响到人类社会活动的各个方面,在军事、经济及日常生活中起着举足轻重的作用。随着科技的进步和社会需求的急剧增加,无线通信系统进入前所未有的高速发展时代。最初的无线通信系统多以模拟信号进行传输,数字信号处理技术的出现使无线通信技术产生了革命性的突破,原本的模拟信号可以通过抽样进行数字化,很多先进的信号处理技术也可以应用进来,从而提高了无线通信系统的传输能力。自 20 世纪 90 年代以来,多天线无线通信系统因为可以充分利用空间多径信道对抗衰落和干扰,并使得信道容量成倍增长,因而得到了越来越多的重视,成为第三代、第四代及未来移动通信系统中采用的关键技术之一。

依据天线数量可将无线通信系统分为多种类型:单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统是传统的通信类型,其收发端均只有单个天线;多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统具有多个发射和多个接收天线,单输入单输出、单输入多输出(Single Input Multiple Output, SIMO)及多输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)系统均可视为 MIMO 的特例;多用户 MIMO (Multiple User-MIMO, MU-MIMO)指的是由基站(Base Station, BS)和多个用户构成的系统,基站使用多个天线,而各用户可使用单个或多个天线。

MIMO 技术由来已久,而对 MIMO 产生巨大推动的奠基工作则是在 90 年代由贝尔实验室的学者完成的。1995 年, Telata 给出了在衰落情况下的 MIMO 信道容量^[1]; 1996 年, Foschini 提出了复用型空时码分层空时编码(Bell Laboratories Layered Space-Time, BLAST)^[2]; 1998 年, Tarokh 等人提出了空时网格编码(Space-Time Trellis Code, STTC),它是一种基于编码调制技术的分集型空时编码方案^[3]; 同年, Alamouti 发现了一种简单的发射分集方法^[4], Tarokh 将其拓展并归纳为空时分组编码(Space-Time Block Code, STBC)^[5,6]; 另外, Wolniansky 等人采用垂直分层空时编码(Vertical BLAST, V-BLAST)算法建立了一个 MIMO 实验系统,在室内实验中达到了 20 bit/s/Hz 以上的频谱利用率,这一频谱利用率在传统系统中极难实现。以上工作使得 MIMO 技术得到了迅速发展。

通常,多径会引起衰落,因而被视为有害因素。然而研究表明,对于 MIMO 系统,多径可以作为一种有利因素加以利用。MIMO 系统在发射端和接收端均采用多天线,并利用多天线来抵抗衰落。假设一个 MIMO 系统,传输信息流经过空时编码形成 M 个信息子流,这 M 个子流由 M 个天线发射出去,经空间信道传输后由 N 个接收天线接收。多天线接收机能够分开并解码这些数据子流,从而实现最佳接收。



由于这 M 个子流同时发送到信道, 各发射信号占用同一频带, 因而并未增加带宽。若各发射接收天线间的信道响应独立, 则 MIMO 系统可以建立多个并行空间信道。通过这些并行空间信道独立地传输信息, 数据率必然会得到提高。

MIMO 无线通信系统可用发射和接收天线数量分别为 M 和 N 的一般模型表示, 如图 1-1 所示。

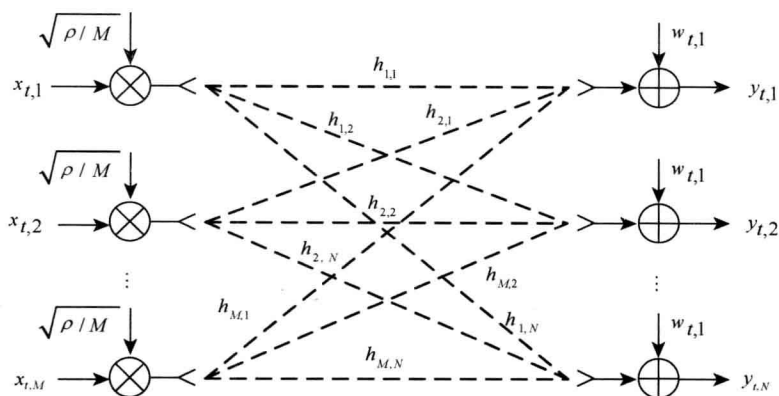


图 1-1 M 根发射天线、 N 根接收天线的 MIMO 无线通信系统的一般结构

发射信号 $\mathbf{X}$ 、接收信号 $\mathbf{Y}$ 、信道衰落系数 $\mathbf{H}$ 和加性噪声 $\mathbf{W}$ 的矩阵表达形式分别为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{T1} & \cdots & x_{TM} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{T1} & \cdots & y_{TN} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \cdots & h_{MN} \end{bmatrix} \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{T1} & \cdots & w_{TN} \end{bmatrix}$$

信号间关系为

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\rho}{M}} \mathbf{X} \mathbf{H} + \mathbf{W} \quad (1.1)$$

其中, ρ 为接收端的信噪比。

MIMO 将多径无线信道与发射机、接收机视为一个整体进行联合优化, 可以有效地提高信息传输速率和频谱利用率, 也可以通过增加信息冗余度来提高信号传输的可靠性; 同时也可以两者之间寻求一种合理的折衷。因此, 多天线方案可以很好地提高无线系统的整体性能。根据不同的系统配置, 多天线系统可以提供不同的增益形式, 分别为阵列增益、分集增益和空间复用增益。

1.1.1 阵列增益

阵列增益指的是使用多个接收天线或发射天线来提高接收端信噪比。例如, 对于 SIMO 信道, 发射信号经过不同的空间路径到达接收端, 而通常各接收天线上的信号幅

度和相位均不相同,接收机可以合并各接收天线的信号用来增强总的输出信号。通常,接收信号功率的平均增加值与接收天线的数目成一定比例,而对于具有多个发射天线的系统,要想获得阵列增益,则需要在发射端知道下行信道信息。

1.1.2 分集增益

信号在无线信道中传播时,其功率会发生波动。当信号功率严重下降时,信道就处于衰落状态,这将会严重影响通信链接的质量。分集是用来抵抗衰落从而提高链接质量的有效工具。通常,用独立衰落路径的数目,即分集阶数,来衡量分集的性能。分集可分为接收分集、发射分集和收发联合分集。

1. 接收分集

接收分集可被用于 SIMO 信道。对于同一个发射信号,各个不同的接收天线会接收到具有独立衰落的信号版本。接收机通过合并各天线的信号,使总输出信号的幅度得以有效地增强。例如,对于 SIMO 信道,其分集阶数的最大值等于接收天线的数目。

2. 发射分集

发射分集技术通常用于 MISO 信道。近几年来,在发射分集方面已取得了很多重要的研究成果。发射分集技术可以在发射机已知或未知下行信道状态信息(Channel State Information, CSI)的情况下进行。其中,空时编码技术是一种特殊的发射分集技术,依靠特定的编码方案,在没有任何下行信道信息的情况下,仍可获得较好的性能。若所有发射天线与接收天线之间的衰落相互独立,则发射分集方案的分集阶数等于发射天线的数目。

3. 收发联合分集

将分集技术应用于 MIMO 信道则是发射和接收分集技术的结合。假设待发射的符号流经过空时编码器后生成 M 个并行的符号流,然后通过 M 个发射天线发送到 MIMO 信道中。信号由 N 个接收天线接收后,要在接收端恢复最初的发射符号流。由于在发射机和接收机之间具有 $M \times N$ 个路径,因此分集阶数应小于等于 $M \times N$ 。只有当所有发射-接收天线对之间的衰落相互独立时,系统的分集阶数才等于发射和接收天线数目的乘积,即 $M \times N$ 。

1.1.3 复用增益

空间复用技术由 Paulraj 于 1994 年提出,该技术在保持原有通信带宽和发射功率的情况下,可以获得的传输速率随收、发两端最小天线数的增加呈线性增长。因此,空间复用技术只有在 MIMO 通信系统中且接收天线数不小于发射天线数时才能实现。

假设 MIMO 系统发射天线和接收天线的数量分别为 M 和 N ,且有 $N \geq M$,在发射端输入 M 个独立的数据流,经过调制以后被发射出去。若各收发天线距离足够远以保证信道相互独立,并且接收机具有理想的信道信息,则接收机可以有效地分离各发射数据流,然后接收机可以使用最大似然(Maximum Likelihood, ML)、迫零(Zero Forcing, ZF)及误差平方和均值最小(Minimum Mean Square Error, MMSE)等方法对信号进行有效地检测。同时,空间复用也可以用于多用户环境。对于下行链路,基站可以在已知或部分已知用户信道状态信息的情况下,通过预编码或波束成形技术消除各用户间的干扰,同时对不同用户进行信息传输;对于上行链路,多个用户可以同时发射信号给基站,而基站在获知不同用户信道状态的情况下可以很容易区分不同用户的信号。



1.2 分集技术的原理和分类

1.2.1 分集技术的原理

无线信号在空间传播会产生衰落。通常,信号包络在短距离传播时遵循瑞利分布,而在长距离传播时遵循标准正态分布。分集是抵抗衰落的一种有效途径。分集的基本原理就是,通过多个信道接收到承载相同信息的多个信号副本,由于多个信道的传输特性不同,信号多个副本的衰落也不相同。接收机将接收到的多径信号分离成不相关的多路信号。然后将多路信号的能量按照一定的规则合并起来,使接收的有用信号能量最大。对数字系统而言,可以使接收端的误码率最小;对模拟系统而言,可以提高接收端的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)。

因此,分集技术包括两个方面:“分”,即信号经过不同路径到达接收端,使接收机获得多个统计独立但携带同一信息的衰落信号;“集”,将接收到的多个衰落信号以某种方式进行合并以降低衰落的影响。

1.2.2 分集技术的分类

1. 宏分集和微分集

按照分集抵抗衰落类型的不同可分为宏分集和微分集。宏分集以抵抗大尺度衰落为目的,多用于蜂窝移动通信系统,也称为“多基站分集”;微分集以抵抗小尺度衰落为目的,在同一位置使用多个天线。

2. 显分集和隐分集

按照信号传输方式的不同可分为显分集和隐分集。显分集是构成明显分集信号的传输方式,利用多副天线实现接收/发射信号的分集;隐分集是隐含在信号之中的传输方式,在接收端利用信号处理技术实现分集。隐分集只需一副天线来接收信号,因此在数字移动通信中得到了广泛应用。目前,主要的隐分集技术有交织编码技术、跳频技术和直接扩频技术。

3. 空间分集、频率分集、极化分集、角度分集和时间分集

按照获得独立信号方法的不同可分为空间分集、频率分集、极化分集、角度分集和时间分集。从不同角度引入分集的思路,如空间、频率、极化、角度和时间等,可以获得不同的分集。时间分集、频率分集和空间分集是主要的实现形式。其中,空间分集技术可以不必牺牲频带资源,在保证数据传输速率的同时获得很大的分集增益,因此,它是克服多径衰落的有效方法,并已成为 3G 的关键技术之一。

4. 发射分集和接收分集

按照分集技术所应用位置的不同可以分为发射分集和接收分集。接收分集是比较传统的技术,常用的包括最大比合并(Maximum Ratio Combination, MRC)、等增益合并(Equal Gain Combination, EGC)和选择合并(Selection-and-Combination, SC)等。

从理论和应用的角度分析,相同阶数的发射分集与接收分集具有相同的分集增益,因此,为了适应下一代移动通信的要求,在基站端采用发射分集技术是比较合理的思路。

发射分集技术以空间为主,也可包括时间、频率和编码的结合技术^[7]。依据发射端是否需要 CSI 可分为闭环发射分集^[8,9]和开环发射分集^[4~6]。

(1) 延时发射分集。Wittneben、Seshadri 和 Winters 等人提出了一种延时发射分集方案^[10,11]。两根天线同时发送相同的信息,但在天线之间有一个符号周期的时延。这种方法的优点是实现简单,但是对延迟估计误差比较敏感,误差带来的性能降低有可能超过分集带来的增益,而且信号延迟传送的关系会使这种方法在接收端无法实时地达到最大合并增益。

(2) 空时发射分集。空时发射分集主要是指将空间分集与空时编码相结合的方案,它是目前引起广泛关注的分集方案,并已列入 3G 的标准。后面的章节将详细介绍几种典型的空时发射分集方案。

(3) 选择发射分集。选择发射分集的基本原理是选择最佳的发射天线来进行数据发送。接收端对收到的不同发射天线上导频信号强度进行测量,周期性地向发射端报告当前传输信道质量最好的天线,然后发射端根据这些反馈信息,将待发送的数据从最好的天线发射出去。

(4) 空间-频率分集。Hiroike 在文献[12]中提出了一种空间-频率分集方案。两个天线中的一个被人为地引入一个小的频偏,然后利用精心设计的信道编码/交织器,就能够提供分集增益。这种方法的实质是人为地模仿快衰落信道,从而获得分集增益。它的主要缺点是使用信道编码占用了额外的带宽,从而降低了系统带宽的效率。

(5) 空间-码偏分集。Rajan 在文献[13]中提出了一种用于码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)系统的空间-码偏分集方案。它采用的方法是在不同的天线上使用相同的扩频码,而扩频码的相位不同。研究表明,在不同天线上使用相位不同的 Gold 码进行发射,可以获得良好的性能。它的缺点是移动台必须进行一些额外的处理,增加了硬件的复杂性。

(6) 最大比发射。文献[14]中 Titus 综合考虑了多发射多接收天线的情况,并根据最大 SNR 准则,提出了“最大比发射”的概念。它可以看作是多接收天线时最大比合并的推广。假设发射天线的个数为 M ,接收天线的个数为 1,则按照最大比发射准则,其分集阶数为 M 。

(7) 协作分集。MIMO 通过在接收端和发射端同时放置多个天线而充分利用空域资源,大幅度提高了信道容量。尽管 MIMO 技术具有明显的优势,但仍然存在很多问题。例如,现有的多天线都设置在基站端,而移动终端则很难安装多天线,这主要有两方面的原因:一方面,移动终端对体积、成本和功耗的要求远比对基站的要求苛刻得多;另一方面,理想的 MIMO 多天线系统要求相邻天线之间的间距要远大于电波波长,并且多个收发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限制,通常无法做到这一点。

针对现有 MIMO 技术存在的问题,1998 年 Sendonaris 等人提出了一种新的协作分集技术^[15~17],它使单天线的移动终端也可以实现空间分集,其基本思想是,系统中的每个移动终端都有一个或多个合作伙伴,合作伙伴之间有责任在传输自己信息的同时,帮助其伙伴传输信息。信号由基站发出后,通过合作伙伴的中继以不同路径到达目标接收机。这样,每个终端在传输信息的过程中既利用了自己又利用了合作伙伴的空间信道,



从目标用户看来,发射机相当于使用了多个虚拟的发射天线,从而获取了空间分集的效果。通俗地讲,协作分集是借助别人的手机完成个人通信的一种实现方式。

现有的研究表明:在平衰落环境下,协作分集可以增加系统容量,提高网络服务质量,改善系统性能。由于协作分集中的合作伙伴共享彼此的天线,从而构成了虚拟的 MIMO 多天线系统,从这个意义上讲,协作分集为 MIMO 技术的真正实用化提供了新的思路^[18]。

协作分集是一个崭新的研究领域,近几年在国内外已经引起了人们的广泛关注。协作分集具有非常广阔的应用前景,它可应用于蜂窝移动通信系统、无线 Ad hoc 网络、无线局域网以及无线传感器网络等多种场合^[19~21]。

1.2.3 分集合并技术

不管使用何种分集技术,在发送端都有多个信号副本,只有在接收端对这些副本信号进行合并,才能提高系统性能,获得分集增益。合并技术大多是对多个衰落支路进行加权求和,且多是线性合并。合并时采用的准则主要有最大比合并、等增益合并和选择合并。

1. 最大比合并

当接收端有多路接收信号时,这些信号经过若干个不相关的分集支路进行相位校正,然后根据各支路的信道衰落确定权值并进行加权,最后进入检测器进行相干检测。最大比合并输出信号的信噪比是各支路接收信号信噪比的和,并且达到了满分集阶数,因此,最大比合并是最优的合并技术,但缺点是需要实时监测每条支路的信道信息。

2. 等增益合并

最大比合并需要实时监测每条链路的信道信息,在实际系统运用中较为困难,等增益合并就可以克服这个困难。等增益合并是用相同的权重对各支路上的信号进行同相合并,实现起来比较简单,但缺点是对接收端瞬时信噪比的统计分析比较复杂。概率密度函数(Probability Density Function, PDF)和累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)往往不存在闭式表达式,因而不便于对系统进行性能分析。当支路较多时,等增益合并和最大比合并差异不大,性能损失约为 1dB,这个性能损失是由低复杂度的加权方法造成的。

3. 选择合并

应用最大比合并时,接收端需要对多个接收信号进行解调,则需要多个射频模块提供基带信号。因为射频模块多用模拟电路实现,尺寸较大而且成本很高,所以尽管最大比合并是最优的,但是要以牺牲成本和物理尺寸为前提。因此,设计一个仅用一个射频模块的合并器是必要的。

选择合并可以解决这一问题。采用选择合并时,各支路的接收信号先被送入选择逻辑,选择逻辑再从所有信号中选择基带信噪比满足要求的信号输出,一般选择信噪比最大的支路进行输出。因为每个时刻只需要输出一个支路,所以接收端只需要将一个接收机随时切换到被选支路上。对于连续发射系统来说,需要在每条支路上安装一个接收机来获得各支路上的信噪比以便信噪比进行排序。为了避免对信噪比的监视,可以使用选择合并的一个特例——扫描选择合并:首先,对所有的接收信号进行扫描,找出最高信噪比信号,然后接收机一直使用该信号,直到信号低于预置的门限,也就是说,只有当

被选信号经历深度衰落时，才进行重新选择，这样就可以避免对多路信噪比进行监视。选择合并虽然实现简单，但每增加一条分集支路，对输出信噪比的贡献仅为分集支路数的倒数倍。但由于其复杂度较低，因此它是在复杂度和性能之间的一个折衷。

1.3 多天线通信系统的容量

MIMO 信道容量的一般表达式为

$$C = \sup_{p(X)} I(X; Y) = \sup_{p(X)} H(Y) - H(Y|X) \quad (1.2)$$

虽然已经作出了瑞利信道的假设，但是衰落系数不同的变化率会导致不同的信道容量和计算方式。下面讨论分析衰落变化率由慢到快在发射端已知 CSI、发射端未知 CSI 和发、收两端均未知 CSI 的 3 种情况下的 MIMO 信道容量。

1.3.1 发射端已知 CSI 情况下的 MIMO 信道容量

对固定的无线通信来说，可认为 CSI 在较长的时间内保持不变，通过反馈可使发射端掌握准确的 CSI。对信道衰落系数矩阵做奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)，得^[22]

$$H = U \Sigma V^H \quad (1.3)$$

其中， U 和 V 分别为 $M \times M$ 和 $N \times N$ 维酉矩阵， Σ 为 $M \times N$ 维非负对角阵，其对角线上元素为矩阵 H 的奇异值。从大到小排列的非零奇异值为 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_v$ ，且有 $v \leq \min(M, N)$ 。

利用 H 的奇异值分解结果，可将式 (1.1) 写为

$$\tilde{y} = \sqrt{\rho} \tilde{x} \Sigma + \tilde{w} \quad (1.4)$$

其中， x 、 y 和 w 分别为 X 、 Y 和 W 的行向量， $\tilde{x} = xU$ ， $\tilde{y} = yV$ ， $\tilde{w} = wV$ 。由于矩阵 U 和 V 均可逆，获得 $\tilde{x}$ 、 $\tilde{y}$ 与获得 x 、 y 等效。设发射信号的功率限制为 1，则由 $E(\tilde{x}\tilde{x}^H) = E(xUU^Hx^H) = E(xx^H) \leq 1$ 可知新发射信号与原发射信号的功率限制相同。由于 V 是酉矩阵，且 w 由独立同分布的高斯变量构成，故新噪声向量与原噪声向量的统计特性相同。新信道模型与原信道模型等效，可得到下列并行子信道。

$$\begin{cases} \tilde{y}_n = \sqrt{\rho} \sigma_n \tilde{x}_n + \tilde{w}_n, & 1 \leq n \leq N' \\ \tilde{y}_n = \tilde{w}_n, & N' + 1 \leq n \leq N \end{cases} \quad (1.5)$$

发射信号的功率限制为 $\sum_{m=1}^M E(|\tilde{x}_m|^2) \leq 1$ ，各噪声项独立且服从 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 。可以看出，

这是一个并行信道，其加性噪声独立同分布，衰落系数为非负实数。

对于发射端已知 CSI 的 MIMO 信道，发射信号的功率分配主要有 3 种方法。

1. 等功率分配

当发射端已知 CSI 时，最简单的功率分配方式是使各天线发射信号的功率相同，此时的信道容量为