

冀保峰 著

面向5G的无线宽带 协同传输方案及性能分析



科学出版社

面向 5G 的 ~~元或元市~~ 协同传输 方案及性能分析

冀保峰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

5G 移动通信系统已将大规模 MIMO 列入国际标准, 并予结合超密集网络、毫米波 MIMO 等开展深入研究。MIMO 技术带来的分集增益和阵列增益有效地对抗了无线通信的衰落效应, 可极大地提高信号传输的可靠性, 已成为一项业界普遍认可的提高无线通信系统性能的有效技术。但由于多方面条件的约束和限制使得 MIMO 多天线技术仍存在诸多问题。分析表明, 借助协作中继、网络编码等一些新的理论和技术, 并利用干扰消除、干扰避免以及物理层和 MAC 层的层间协作传输, 可有效地提高整个系统的传输性能。本书围绕无线通信网络中宽带协作传输方案及其性能分析的课题进行了深入研究, 研究内容涉及联合协作中继选择和网络编码的协作传输策略及其性能分析, 联合物理层和 MAC 层的层间协作传输, 以及基于 MAC 层协作的传输方案及其性能分析等方面。

本书可作为高等院校通信专业选修课参考用书, 与可供相关技术人员选用。

图书在版编目 (CIP) 数据

面向 5G 的无线宽带协同传输方案及性能分析/冀保峰著. —北京: 科学出版社, 2017.7

ISBN 978-7-03-053716-4

I. ①面… II. ①冀… III. ①无线电通信-移动通信-通信技术-教材 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 138961 号

责任编辑: 张 帆 / 责任校对: 桂伟利
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 7 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 7 月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 171 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

为了适应 5G 数据量暴增的大规模 MU-MIMO 多天线场景,急需研究 MU-MIMO 多天线技术带来的分集增益和阵列增益,以有效对抗无线信道的衰落,可极大地提高信号传输的可靠性,成为一项业界普遍认可的提高无线通信系统性能的有效技术。这种技术已经逐渐被新一代的无线通信主流协议采纳。但是,多方面条件的约束和限制使 MIMO 多天线技术仍存在诸多问题。分析表明,借助协作中继、网络编码等一些新的理论和技术,并利用干扰消除、干扰避免以及物理层和 MAC 层的层间协作传输,可以有效地提高整个系统的传输性能。本书围绕无线网络中宽带协作传输方案的研究及其性能分析课题进行深入研究,研究内容涉及联合协作中继选择和网络编码的协作传输策略及其性能分析,联合物理层和 MAC 层的层间协作传输,以及基于 MAC 层协作的传输方案及其性能分析等。具体研究内容和主要工作如下。

(1) 针对两个信源节点、多个双向协作中继的系统模型,基于最大化较小链路的信噪比的选择准则,研究不同参数 Nakagami- m 衰落信道下放大转发双向中继选择传输方案的性能,基于概率密度函数的性能分析法,推导双向中继选择系统的中断概率和平均误符号率的闭合表达式,分析各个节点发送功率不同时双向中继选择系统的传输性能,最后验证各种情况下的解析解与数值仿真结果的一致性。通过对双向中继选择系统两跳信道不均衡时的性能分析可知,两跳信道质量的不同,对系统性能的影响也不同,而且通过对双向中继选择系统的平均误符号率的性能分析发现,系统的平均误符号率近似等于两个信源节点中较差节点的误符号率。

(2) 针对两个信源节点、多个双向协作中继的系统模型,基于最小化较差链路的误码率的选择准则,研究不同参数 Nakagami- m 衰落信道下联合网络编码和双向中继选择的协作传输方案的性能,分别考虑联合中继选择和不联合中继选择两种情况。基于概率密度函数的性能分析法,推导联合网络编码的协作中继选择方案的中断概率和平均误码率的闭合表达式,进一步推导无协作中继选择时网络编码的平均误码率的闭合表达式。仿真和分析表明,各种情况下的解析解与数值仿真结果吻合良好,并且联合网络编码的协作中继选择方案的性能要优于无协作中继选择的网络编码方案性能,通过推导还得到了联合网络编码的协作中继选择方案相对于无协作中继选择的网络编码方案的性能增益。

(3) 基于 IEEE 802.11 的超高吞吐量无线局域网协议,针对 OBSS 处的站点在新型的 MU-MIMO 传输机制下受干扰比较严重,因此无法满足其服务质量要求的问题,提出了两种解决方案。第一种是缓解 OBSS 站点干扰强度的分组调度方案,

通过对不同组的自适应调度来降低 OBSS 处站点的干扰强度；第二种方案是基于波束方向约束的干扰避免方案，通过对物理层和 MAC 层的优化设计，系统“和速率”有较大的提升，所提方案不仅能够较好地解决 OBSS 站点的强干扰问题，而且只需较小的帧结构修改，易于实现。

(4) 基于 IEEE 802.11 的超高吞吐量无线局域网协议，针对其新引入的 MU-MIMO 传输机制进行深入研究，提出几点改进的优化设计方案，并完成相应的性能分析。所提的几点改进方案包括：第一，针对 MU-MIMO 预编码要求信道信息比较精确的特点，提出在其 TXOP 初始化后用块确认帧对信噪比进行反馈来提高 MU-MIMO 预编码的性能，并基于该反馈信息，采用“和速率”最大化准则进行功率分配的优化设计；第二，针对 MU-MIMO 分组后通信需要进行 RTS 轮询的机制，规定接入站点需要先对主 AC 用户进行轮询以提高 TXOP 初始化成功的概率；第三，由于 MU-MIMO 分组后，一个用户组有多个主 AC 用户，如果只对第一个主 AC 用户轮询后失败就放弃该 TXOP 初始化，那么这将导致各站点进入回退阶段，从而降低了系统有效的数据传输量，而且对其他主 AC 用户也不公平，因此提出在多个主 AC 用户存在时 AP 需要对第二个主 AC 用户轮询后再决定是否放弃该 TXOP 的方案；最后对 802.11ac 的 MU-MIMO 传输方案进行系统的性能分析，仿真结果表明，改进的传输方案在吞吐量方面获得了明显的性能增益，且针对性能的理论分析与仿真结果相吻合。

(5) 针对 VHT WLAN 引入 MU-MIMO 和带宽扩展后造成的载波侦听机制呈现的一些问题，提出了基于 MAC 层协作的两层网络分配矢量方案，该方案不仅有效解决了传统机制存在的问题而且在实际应用中简单易行，并能获得系统吞吐量的有效提升。在此基础上提出了一种超高吞吐量无线局域网的不等带宽发送方案，该方案不仅解决了多用户模式发送时带宽的浪费问题，而且获得了系统吞吐量的进一步提高。本书对所提方案进行性能分析，获得了所提方案在单用户和多用户发送模式下的吞吐量增益。最后，本书通过仿真验证所提方案的有效性以及理论分析的正确性，从数值仿真结果可以看到，随着传输机会内剩余时长的增加，所提方案能获得显著的吞吐量性能增益。

(6) 针对同信道干扰下 Small cell 的场景，本书分析宏小区基站的覆盖位置服从泊松分布且多用户预编码采用线性预编码时用户端的性能。通过基于概率密度函数的性能分析法，推导出 Small cell 的中断概率和误符号率的闭合表达式，以及 Small cell 用户端容量的闭合表达式。结果表明，由于聚合干扰的存在，仅仅依靠 Small cell 基站天线数的增加并不能持续提高用户端的性能。进一步地，本书针对 Small cell 用户的接入问题，提出一种基于能效的用户接入方案，并对所提方案进行性能分析和仿真验证。从仿真结果可以看到，所提 Small cell 用户接入方案在提高系统能效方面的有效性、理论分析的正确性，以及所提接入方案的能效性能均优于其他接入方案。

由于研究时间和知识水平有限，书中不足之处在所难免，恳请诸位学者专家、老师同学批评指正。

作 者

2017年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 无线信道	2
1.2.1 大尺度衰落	2
1.2.2 小尺度衰落	3
1.3 MIMO 信道容量	6
1.3.1 MIMO 系统模型	6
1.3.2 点到点的 MIMO 信道容量	6
1.3.3 MIMO 空间分集	8
1.4 中继协作传输方案	8
1.4.1 中继协作通信	8
1.4.2 中继协作传输的系统模型	10
1.4.3 网络编码	12
1.5 MAC 层协作传输方案	13
1.6 Small cell 协作传输方案	14
1.7 本书的主要工作	16
第 2 章 Nakagami 信道下双向中继选择的协作传输方案及其性能分析	19
2.1 概述	19
2.2 系统模型	20
2.3 双向协作中继选择的传输方案	21
2.4 双向中继选择的协作传输方案的性能分析	22
2.4.1 双向链路的概率密度函数	22
2.4.2 中断概率	24
2.4.3 平均误符号率	27
2.5 仿真和分析	29
2.6 小结	32
第 3 章 联合网络编码和中继选择的协作传输方案及其性能分析	33
3.1 概述	33
3.2 系统模型	33

3.3	联合网络编码的协作中继传输方案	35
3.4	联合网络编码的协作中继选择传输方案的性能分析	36
3.4.1	联合网络编码的协作中继选择传输方案的中断概率分析	36
3.4.2	联合网络编码的协作中继选择传输方案的误码率分析	38
3.5	无协作中继选择的网络编码方案性能分析	39
3.6	仿真与分析	41
3.7	小结	45
第 4 章	联合 PHY 层和 MAC 层设计的 OBSS 干扰避免方案及其性能分析	46
4.1	概述	46
4.2	VHT WLANs MU-MIMO 传输机制下 OBSS 干扰问题的形成	48
4.3	VHT WLANs MU-MIMO 传输机制下 OBSS 的数学模型	50
4.4	OBSS 的干扰解决方案	50
4.4.1	基于站点信道相关性的分组方案	50
4.4.2	联合 PHY 层和 MAC 的波束方向干扰避免方案	51
4.4.3	基于 BSS 之间协作的干扰对准技术	53
4.5	方案 2 (空间干扰避免) 中发射预编码的优化设计	55
4.6	仿真结果与分析	58
4.7	小结	61
第 5 章	基于 IEEE 802.11ac 的 MU-MIMO 传输方案的优化设计及其性能分析	62
5.1	概述	62
5.2	IEEE 802.11ac 中的 MU-MIMO 传输机制	63
5.3	改进的 IEEE 802.11ac MU-MIMO 传输方案	65
5.3.1	多用户预编码方案的改进和最优功率分配	65
5.3.2	MU-MIMO 传输的 MAC 层调度优化方案	69
5.4	IEEE 802.11ac MU-MIMO 传输方案的性能分析	71
5.5	仿真结果与分析	74
5.6	小结	76
第 6 章	基于 MAC 层协作的 VHT WLAN 吞吐量增强方案及其性能分析	78
6.1	概述	78
6.2	现有方案问题形成和所提方案阐述	79
6.2.1	现有方案问题形成	79
6.2.2	基于 MAC 层协作的吞吐量增强方案阐述	80
6.3	不等带宽发送方案	82
6.4	所提方案性能研究	83
6.5	仿真与分析	88
6.6	小结	92

第 7 章 Small cell 协作传输方案及其性能分析	93
7.1 概述	93
7.2 系统模型	94
7.3 聚合干扰下 Small cell 中用户的性能分析	97
7.3.1 中断概率	97
7.3.2 误符号率	99
7.3.3 Small cell 第 k 个用户的容量	100
7.4 Small cell 网络中用户的接入机制	101
7.4.1 大尺度衰落下基于能效的接入机制	101
7.4.2 所提接入机制的性能分析	101
7.5 仿真与分析	104
7.6 小结	110
第 8 章 结论与展望	111
8.1 工作总结	111
8.2 未来研究展望	113
参考文献	114

第1章 绪 论

1.1 研究背景

无线通信是当今通信领域中最活跃的研究热点之一,随着网络时代的到来,近十几年无线网络的信息交互量正在以指数级的速度增长,受到了各行业的普遍关注。随着因特网以及无线通信多媒体技术的快速发展,人们对移动环境下的通信速率和服务质量的要求越来越高,已投入商用的移动通信系统已经远远不能满足人们日益增长的服务需求。为了更好地满足用户的服务质量要求、提高数据的传输速率,传统的无线通信蜂窝网络采用提高发射功率、小区分裂等技术来改善用户接收的信噪比,以提高用户的服务质量,然而这些技术面对浩瀚且高速的信息交互量显得杯水车薪,而且发送功率的提高会造成相邻小区的同频干扰,小区数量的增加需要花费大量的成本,这将降低无线通信系统的频谱效率,阻碍无线通信产业的迅速发展。如何高效地利用无线资源,扩展小区的覆盖面积,更好地提高系统的性能,是无线通信产业首先要解决的问题,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)多天线技术和协作中继技术的提出给这些问题的解决带来了福音。MIMO 多天线技术通过在收发端配置多根天线,达到了在不增加发射功率的前提下,成倍提高系统容量的目标,不仅如此, MIMO 多天线技术带来的分集增益和阵列增益有效地对抗了无线信道的衰落,极大地提高了信号传输的可靠性,成为业界普遍认可的提高无线通信系统性能的一项有效技术。尽管多天线技术已经逐渐被新一代的无线通信主流协议所采纳,但是它仍然存在诸多问题,例如,现有的多天线都配置在基站端,而移动终端受到自身体积、重量以及现有技术等条件的约束和限制而难以配置多天线,协作中继技术的提出将发展缓慢的无线通信产业带入了一个新的发展阶段,协作中继在平坦衰落的环境中在不明显改变骨干网络的同时,解决或者部分解决了目前蜂窝网络存在的诸多问题,增加了系统的容量,提高了网络的服务质量,改善了系统的性能。众多的物理层技术有效推动了无线通信产业的发展,然而,无线信道的时变性和不同用户地理分布上的分散性使无线通信面临另外一些挑战,例如,衰落和干扰使无线信号在传输的过程中会受到来自相邻节点的影响,单纯依靠物理层技术是无法克服无线通信产业发展中的各种挑战的,因此联合物理层和媒体访问控制(Medium Access Control, MAC)层等的层间协作传输方案是一个至关重要的发展方向。

本书所研究的正是在传统 MIMO 系统中引入新技术,通过物理层和 MAC 层的

联合设计进行协作传输,从而达到增强系统性能的目的。下面从简单介绍最基础的无线信道特性开始。

1.2 无线信道

无线时代已经有一百多年的发展历史,而无线信道作为一种有效的、可靠的高速通信介质,受到了诸多学者和生产商家的广泛青睐。然而无线信道本身的时变性和传输的复杂性,使信号在传播过程中受到周围环境中物体辐射功率的散射、反射和衍射或者介质的折射,产生了多径衰落、阴影衰落、多普勒扩展以及一些未知干扰等因素的影响,这些影响严重阻碍了接收端对信号的正确接收。其中无线信道对信号传输的影响主要表现为衰落和扩展两大方面,衰落则主要分为大尺度衰落和小尺度衰落,而扩展主要包括多普勒扩展、延迟扩展以及角度扩展。下面对这些影响逐一地进行介绍。

1.2.1 大尺度衰落

大尺度衰落(Large-Scale Fading)是由建筑物、山脉等大型障碍物地形起伏的阻碍效应造成的,它取决于快速衰落信号的局部平均数。该平均数的统计分布状态主要受到天线高度、载波频率和特定环境的影响,而在实际环境中,大尺度衰落对信号传输的影响主要表现为路径损耗和阴影衰落两个方面。

1. 路径损耗

路径损耗是由发射功率的辐射扩散及信道的传播特性造成的。一般认为具有相同收发距离的无线信道模型,其路径损耗相同。假定信号经过自由空间到达距离为 d 处的接收机,如果发射机和接收机之间没有任何障碍物,则信号沿直线传播,这种信道称为视距信道(Line-of-Sight, LOS),相应的接收信号称为 LOS 信号或者直射信号。若 G_t 和 G_r 分别是发送和接收天线的功率增益, λ_c 是波长,那么自由空间中接收功率 P_r 与发射功率 P_t 之比为

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\sqrt{G_t G_r} \lambda_c}{4\pi d} \right)^2 \quad (1.1)$$

由此可见,接收功率与收发天线间距离 d 的平方成反比,而接收功率与波长 λ_c 有关是因为接收天线的有效面积和波长有关^[1],如果采用定向天线,那么接收功率也有可能随着频率的增加而增大^[2]。

自由空间的路径损耗(Free-Space Path Loss)定义为自由空间模型下的路径损耗 P_L :

$$P_L(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_t}{P_r} = -10 \lg \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1.2)$$

其中, dB 是分贝单位, 相应的自由空间路径增益 (Free-Space Path Gain) 为

$$P_G = -P_L = 10 \lg \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1.3)$$

2. 阴影衰落

阴影衰落是由发射机和接收机之间的障碍物造成的。这是因为信号在无线信道的传播过程中遇到的障碍物通过吸收、反射、散射和绕射等方式衰减了信号的功率, 严重时甚至会阻断信号, 从而造成给定距离处接收信号功率的随机变化。造成信号随机衰减的因素主要包括障碍物的位置、大小与介质特性以及反射面和散射体的变化情况。由于这些因素的变化情况一般都是未知的, 因此只能用统计模型来表征这种随机衰减。最常用的模型就是对数正态阴影模型, 它可以精确地建模室外和室内无线信道的传播环境中接收功率的变化情况^[3,4]。

对数正态阴影衰落模型是将发射功率 P_t 和接收功率 P_r 的比值 $\Psi = \frac{P_t}{P_r}$ 假设为一个对数正态分布的随机变量, 即

$$p(\Psi) = \begin{cases} \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Psi_{\text{dB}}}\Psi} \exp\left[-\frac{(10\lg\Psi - \mu_{\Psi_{\text{dB}}})^2}{2\sigma_{\Psi_{\text{dB}}}^2}\right], & \Psi > 0 \\ 0, & \Psi \leq 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

其中, $\xi = 10 / \ln 10$ ($\ln$ 是自然对数); $\mu_{\Psi_{\text{dB}}}$ 是以 dB 为单位的 $\Psi_{\text{dB}} = 10\lg(\Psi)$ 的均值; $\sigma_{\Psi_{\text{dB}}}$ 是 Ψ_{dB} 的标准差 (单位也为 dB)。

由于经验路径损耗的测量已经包括对阴影衰落的平均, 所以 $\mu_{\Psi_{\text{dB}}}$ 等于路径损耗^[5], 路径损耗 Ψ 的平均值可以从式 (1.4) 求得

$$\mu_{\Psi} = E[\Psi] = \exp\left(\frac{\mu_{\Psi_{\text{dB}}} + \frac{\sigma_{\Psi_{\text{dB}}}^2}{2\xi^2}}{\xi}\right) \quad (1.5)$$

对数正态阴影衰落的参数一般采用对数均值 $\mu_{\Psi_{\text{dB}}}$, 称为平均分贝路径损耗 (Average Decibel Path Loss), 单位是 dB。

1.2.2 小尺度衰落

小尺度衰落是由多路径的建设性和破坏性的组合造成的, 它是接收信号在空间、时间和频率中的快速波动。小尺度衰落与频率有关, 尤其是当空间尺度与载波

波长相当时,会引起信号的小尺度衰落,由于经过小尺度衰落的接收信号在较短的距离或者时间内呈现起伏波动变化,因此小尺度衰落也称为快衰落,其所对应的大尺度衰落则称为慢衰落。

实际环境中由于发送端、接收端的运动引起的衰落,主要包括时间选择性衰落、频率选择性衰落以及空间选择性衰落。下面对这些衰落逐一进行介绍。

(1) 时间选择性衰落:也称为多普勒扩展,是由发送端和接收端之间的相对速度导致的,可以用信道的相干时间 T_c 来描述,相干时间与多普勒扩展成反比,相干时间是信道在时域中变化快慢的度量,即相干时间越大,信道的多普勒扩展越小,信道的波动也越慢。

(2) 频率选择性衰落:也称为延迟扩展,是信号在传输过程中受到多个路径的反射、散射以及折射等,导致不同路径上的信号到接收端叠加形成的。频率选择性衰落可以用相干带宽 B_c 来描述,相干带宽与延迟扩展的均方根成反比,并且是信道频率选择性的量度。路径之间的延迟间距随着路径时延而呈指数增长,而路径幅度随路径时延呈指数下降^[6,7]。当相干带宽小于信号带宽时,信号经过该无线信道时将会形成频率选择性衰落。

(3) 空间选择性衰落:也称为角度扩展,是天线阵列的多路径成分导致的角度扩展引起的。角度扩展对于接收端是到达角度扩展(Angle of Arrival, AOA),对于发送端是离开角度扩展(Angle of Departure, AOD)。空间选择性衰落可以用相干距离 D_c 来描述,相干距离与角度扩展成反比,即角度扩展越大,相干距离越短。

假定衰落是由大量独立散射成分的叠加造成的,那么所接收信号的包络可以表征为一个特定的分布函数,并且由于所处场景的不同,信号包络的典型分布主要包括瑞利(Rayleigh)分布、Nakagami- n 分布以及 Nakagami- m 分布。

1) 瑞利分布

瑞利衰落主要适用于描述密集建筑物和其他高大物体等的城镇中心地区的无线信道。在此环境下,无线信号的传输会被这些密集的建筑等高大物体进行反射、折射、衍射而造成衰减,并且会致使发射端与接收端之间没有直达路径。曼哈顿实验证明,当地的无线信道环境确实接近于瑞利衰落。瑞利衰落属于小尺度衰落,它总是叠加于路径损耗、阴影衰落等大尺度衰落之上。瑞利衰落信道也适用于描述经过对流层、电离层以及海面的反射和折射的信号传输模型^[8-10]。

瑞利衰落对应的特定分布函数即为瑞利分布。瑞利分布是一个均值为 0, 方差为 σ^2 的平稳窄带高斯随机过程,它是最常见的用于描述平坦衰落信号接收包络或者独立多径分量接收包络统计时变特性的一种分布类型。两个正交的高斯变量之和的包络服从瑞利分布,并且服从瑞利分布的无线信道增益的幅度 h_t 的概率密度函数表达式为

$$f_{h_t}(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}, \quad x \geq 0 \quad (1.6)$$

其中, σ^2 是无线信道 h_r 的方差, 即 $E\{|h_r|^2\} = \sigma^2$ 。

2) Nakagami- n 分布

Nakagami- n 分布等同于赖斯(Rice)分布^[11], Nakagami- n 分布通常用来描述具有直达路径的信号传输, 如微蜂窝网络的城镇和郊区的地面移动无线通信传输^[12]、室内的 Pico cell 网络传输^[13]、卫星通信以及海上通信等传输模型^[14]。服从 Nakagami- n 分布的无线信道增益的幅度 h_r 的概率密度函数表达式可以表示为

$$f_{h_r}(x) = \frac{2(1+n^2)e^{-n^2}x}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(1+n^2)x^2}{\sigma^2}\right] I_0\left[2nx\sqrt{\frac{(1+n^2)}{\sigma^2}}\right], \quad x \geq 0 \quad (1.7)$$

其中, n 是 Nakagami- n 的信道衰落参数, 范围是 $0 \sim \infty$, 与 Rice 分布的因子 K 的关系是 $K = n^2$, 当 $n=0$ 时, Nakagami- n 信道退化为瑞利信道, 当 $n=\infty$ 时则表示无线信道没有衰落, 即恒参信道; σ^2 是无线信道 h_r 的方差, 即 $E\{|h_r|^2\} = \sigma^2$ 。

3) Nakagami- m 分布

具有 Nakagami- m 分布特征的无线信道衰落模型统称为 Nakagami 衰落, Nakagami- m 分布更加符合实际的经验数据。目前研究表明, Nakagami- m 分布对于一些实验数据的拟合比瑞利分布、Rice 分布或者对数正态分布都要好^[15]。Nakagami- m 分布可以非常精确地表征地面无线通信信道^[16,17]、室内移动通信信道^[18]等多径无线衰落信道, 而且 Nakagami- m 分布可以在衰落参数 m 不同时表征很多分布情况, 例如, 常见的瑞利分布或者 Rice 分布, 因此只要研究获得无线信道服从 Nakagami- m 时系统的性能, 就可以很容易地扩展到其他信道的情形。

如果平均发送信噪比为 γ_0 , 那么无线信道 h_r 服从 Nakagami- m 分布时, 接收信噪比 $\gamma = \gamma_0 \|h_r\|^2$ 的概率密度函数可以表示为

$$f_\gamma(x) = \frac{m^m x^{m-1}}{\gamma_0^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx}{\gamma_0}\right), \quad x \geq 0 \quad (1.8)$$

Nakagami- m 的衰落参数 m 的取值范围为 $\frac{1}{2} \sim \infty$ 。当 $m = \frac{1}{2}$ 时, Nakagami- m 分布是单边高斯分布; 当 $m=1$ 时, Nakagami- m 分布是瑞利分布; $m=\infty$ 则表示无线信道没有衰落, 即恒参信道。Nakagami- m 分布的衰落参数 m 与 Nakagami- n 分布的衰落参数 n 或者 Rice 分布的衰落因子 K 的映射关系如下:

$$m = \frac{(1+n^2)^2}{1+2n^2}, \quad n \geq 0$$

$$K = n^2 = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}, \quad m \geq 1 \quad (1.9)$$

1.3 MIMO 信道容量

信道可支持的最大无差错数据传输速率叫做信道容量, 1948 年 Shannon 在他著名的论文《通信数学理论》中第一次推导出了加性高斯白噪声信道的信道容量^[19]。随着无线通信的迅速发展, Telatar 于 1999 年首次推导出了 MIMO 情形下高斯信道的信道容量^[20], 论文证明了 MIMO 通信系统中采用的多天线技术, 可以充分地利用空间资源, 在没有增加带宽和发射功率的基础上, 能够成倍地提高信息的传输速率并显著增强信号在无线信道上传输的可靠性, 为无线通信的快速发展奠定了坚实的基础。

1.3.1 MIMO 系统模型

考虑如图 1.1 所示的一个带有 M_T 根发送天线和 M_R 根接收天线的 MIMO 无线信道模型, 假定该信道是频率平坦衰落。用 $\mathbf{H}$ 表示 $M_R \times M_T$ 的传输矩阵, 那么 MIMO 信道下的发送和接收的输入输出关系可以表示为

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{E_s}{M_T}} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1.10)$$

其中, $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{M_R}]^T$ 是 $M_R \times 1$ 维的接收信号向量; $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{M_T}]^T$ 是 $M_T \times 1$ 维的发送信号向量; $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_{M_R}]^T$ 是协方差矩阵为 $E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\} = N_0 \mathbf{I}_{M_R}$ 的零均值循环对称复高斯噪声向量; E_s 是在一个符号周期内发送端的总平均可用能量, 并且发送信号的功率约束必须满足 $\text{Tr}\{\mathbf{R}_{ss}\} = \text{Tr}\{E\{\mathbf{S}\mathbf{S}^H\}\} = M_T$ 。其中, $\mathbf{R}_{ss}$ 是发送相关矩阵; $E\{\cdot\}$ 是对变量的期望。

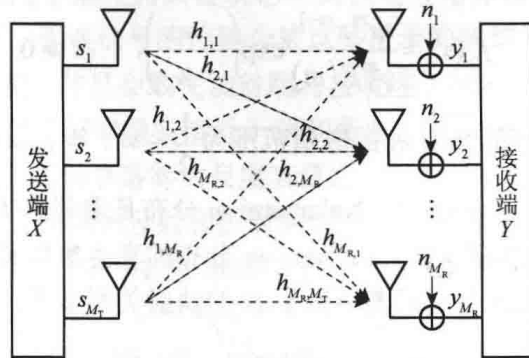


图 1.1 MIMO 无线信道模型

1.3.2 点到点的 MIMO 信道容量

首先研究确定性信道 $\mathbf{H}$ 时的容量, 以表明无线通信系统采用 MIMO 多天线时

所能带来的系统容量增益, 那么 MIMO 信道中发送信号 $\mathbf{s}$ 与接收信号 $\mathbf{y}$ 的容量或者互信息可以表示为^[21]

$$I(\mathbf{s}; \mathbf{y}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{y} | \mathbf{s}) \quad (1.11)$$

其中, $H(\mathbf{y})$ 是向量 $\mathbf{y}$ 的微分熵; $H(\mathbf{y} | \mathbf{s})$ 是向量 $\mathbf{y}$ 的条件微分熵。如果已知发送信号向量 $\mathbf{s}$, 由于发送信号矢量和复高斯噪声向量是相互独立的, 那么可以得到 $H(\mathbf{y} | \mathbf{s}) = H(\mathbf{n})$, 而且 $\mathbf{y}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{yy} = E\{\mathbf{y}\mathbf{y}^H\}$ 等于

$$\mathbf{R}_{yy} = E\{\mathbf{y}\mathbf{y}^H\} = \frac{E_s}{M_T} \mathbf{H} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{H}^H + N_0 \mathbf{I}_{M_R} \quad (1.12)$$

其中, $\mathbf{R}_{ss}$ 是发送信号矢量的相关矩阵。

因此可以得到:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{y}) &= \log_2 \left(\det(\pi e \mathbf{R}_{yy}) \right) \text{bit/s/Hz} \\ H(\mathbf{n}) &= \log_2 \left(\det(\pi e N_0 \mathbf{I}_{M_R}) \right) \text{bit/s/Hz} \end{aligned} \quad (1.13)$$

由文献[22]可知, MIMO 信道的容量为

$$C = \max_{\text{Tr}\{\mathbf{R}_{ss}\}=M_T} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{M_R} + \frac{E_s}{M_T N_0} \mathbf{H} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{H}^H \right) \text{bit/s/Hz} \quad (1.14)$$

并且如果假定带宽为 W Hz, 那么 MIMO 信道在这个带宽上可支持的最大数据传输速率等于 WC bit/s。

如果信道状态信息 $\mathbf{H}$ 对于发送端和接收端都是已知的, 那么 MIMO 信道的容量可以转化为 r 个平行的 SISO 信道容量之和, 可以表示为

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{E_s \gamma_i}{M_T N_0} \lambda_i \right) \quad (1.15)$$

其中, r 是发送信道的秩; $\gamma_i (i=1, \dots, r)$ 是第 i 个子信道的发送能量, 并满足约束

$$\sum_{i=1}^r \gamma_i = M_T。$$

那么 MIMO 信道容量的最大化问题就可以表示为

$$C = \max_{\sum_{i=1}^r \gamma_i = M_T} \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{E_s \gamma_i}{M_T N_0} \lambda_i \right) \quad (1.16)$$

由于对于该目标函数的变量 γ_i , MIMO 信道容量的最大化问题是一个凸优化问题^[22], 因此可以获得最优的功率分配策略 γ_i^{opt} 满足:

$$\gamma_i^{\text{opt}} = \left(\mu - \frac{M_T N_0}{E_s \lambda_i} \right)_+, \quad i=1, \dots, r \quad (1.17)$$

当 MIMO 信道矩阵 $\mathbf{H}$ 中的各元素统计独立并且服从均值为零、方差为 1

的循环对称复高斯分布时,当收发端的天线数趋于无穷大时,即 $M_R, M_T \rightarrow \infty$, 利用大数定律^[23,24]可以得到

$$C = \min(M_T, M_R) W \log_2(1 + \rho) \quad (1.18)$$

其中, $\rho = \frac{E_s}{N_0}$ 是第 i 根接收天线接收到的平均信噪比。式 (1.18) 表明 MIMO 信道的容量与发射端或接收端的最小天线数近似呈线性增长的关系。

1.3.3 MIMO 空间分集

MIMO 多天线技术不仅可以提高无线信道的容量,而且可以提供分集增益和阵列增益。信号在传输过程中经过空间、时间和频率等的变化,会导致信号强度随机波动,这通常被认为是衰落,然而分集给接收端提供了多个相互独立的分支,多个分支会使同一时刻内信号衰落的概率急剧下降,这样,分集技术就使无线链路更加稳定,改进了无线链路的可靠性或者平均误符号率(Symbol Error Probability, SEP)。无线通信系统中有很多方法可以实现独立的衰落路径分支,而其中使用多个发送天线或者接收天线的天线阵列可以获得的分集叫作空间分集。在接收空间分集中,实现独立的衰落路径不需要增加额外的发送功率或者带宽,通过分集信号可以通过相干合并来提高接收端的信噪比,这种相对于单天线的信噪比增益叫作阵列增益。除了阵列增益之外,空间分集还可以带来分集增益,分集增益要求有足够大的天线间距从而使各天线上的衰落近似独立。对于均匀散射环境及全向的发送和接收天线,达到各天线上的衰落独立,需要的最小天线间距近似等于波长的一半(精确值是波长的 38%)^[5]。

用来对抗多径衰落的分集技术叫作微分集,用来对抗建筑物、地表起伏等物体的阴影衰落的分集叫作宏分集。微分集主要包括时间分集、空间分集和频率分集,而这些分集中根据发送或者接收对象的不同以及处理方法的不同,又可以分为接收分集、发送分集、极化分集以及角度分集等分集方法。而研究较多的接收分集是将多个接收天线上的独立衰落信号合并为一路之后再通过解调器进行解调。合并的方式有很多种,大部分的合并方式都是线性合并,合并后的输出结果是不同支路衰落信号的加权之和。其中接收分集的相干合并主要包括选择合并、门限合并、最大比合并和等增益合并方式,其中最大比合并可以实现接收端信噪比的最大接收,而最大比发送则是最大比合并的逆过程。

1.4 中继协作传输方案

1.4.1 中继协作通信

在传统的蜂窝网络中,基站与用户之间的无线传输是通过单跳来实现的。随着