



“十二五”
国家重点图书出版规划项目

学术中国·院士系列

未来网络创新技术研究系列

空间多维协同传输 理论与关键技术

■ 白琳 梁仙灵 肖振宇 金荣洪 于全 编著

Spatial Multidimensional
Cooperative Transmission
Theories and Key Technologies



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家重点出版项目

学术中国·院士系列

未来网络创新技术研究系列

空间多维协同传输 理论与关键技术



■ 白琳 梁仙灵 肖振宇 金荣洪 于全 编著

Spatial Multidimensional
Cooperative Transmission
Theories and Key Technologies

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

空间多维协同传输理论与关键技术 / 白琳等编著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2015. 5

(学术中国. 院士系列. 未来网络创新技术研究系列)

ISBN 978-7-115-38358-7

I. ①空… II. ①白… III. ①移动网—无线传输技术

IV. ①TN929. 5

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第021636号

内 容 提 要

本书从空间多维信号传输以及多天线系统的原理出发, 分别介绍了在地基、空基以及天基协同传输系统中如何最大程度利用空间维度资源提升系统性能以及频谱效率。本书主要内容包括自适应天线系统、MIMO 多天线系统中的空间多维信号发送、接收, 多天线设计以及迭代信号处理等基础理论与关键技术。基于以上理论与技术, 本书还从实际应用角度出发, 分别介绍了空间多维协同传输在地基、空基以及天基通信系统中的特点及应用。

本书内容丰富、结构清晰, 是一本理论与实践并重的技术书籍, 可作为移动互联网通信相关专业研究生的教材, 亦适合从事相关领域研究的科研工作者阅读与参考。

◆ 编 著 白 琳 梁仙灵 肖振宇 金荣洪 于 全

责任编辑 代晓丽

责任印制 彭志环

◆ 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>

三河市中晟雅豪印务有限公司印刷

开本: 700×1000 1/16

印张: 22.5

2015 年 5 月第 1 版

字数: 441 千字

2015 年 5 月河北第 1 次印刷

定价: 98.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

移动通信技术发展至今主要经历了 4 个时代。1995 年问世的第一代移动终端只能进行语音通信；而 1996 年至 1997 年出现的第二代移动终端便增加了数据收发功能，如收发电子邮件或网页浏览；随着通信和计算机两大产业的快速发展，从第三代移动通信引入互联网接入服务，移动通信技术开始了以数据业务为主导的移动互联网飞速发展时期；随之而来的第四代移动通信则更加体现了人们对以高速数据流为主的类互联网通信业务的需求。赛迪网数据显示，至 2012 年 6 月，手机上网用户数量首次超过了计算机上网用户数量，移动互联网正在前所未有地改变着人们的社交和生活方式，成为现代人类信息交互的必要手段之一。

面对日益增长的宽带通信需求和移动互联网产业的井喷式发展，如何实现随时、随地的大容量数据传输已成为当前无线通信面临的重要问题。根据香农理论，其对无线频谱资源的需求也相应增长，从而导致适用于无线通信的频谱资源变得日益紧张，成为制约无线通信发展的主要瓶颈。从第一代到第三代移动通信的核心技术可以依次体现为 FDMA、TDMA 以及 CDMA 技术，分别利用了频率、时间、码元等资源来提高系统的频谱效率。在人们想方设法挖掘时、频、码资源来提高频谱利用率的同时，空间资源的合理利用以及相应的多天线技术的发展将成为未来移动通信的核心问题和关键技术。

与此同时，随着航空航天技术的不断进步，天基、空基平台总类和数量的快速增长，以卫星、平流层气球、多种航空飞行器组成的天空地一体化信息网络正在飞速发展。随之孕育而生的天空地一体化移动互联网则将成为未来人类认识空间、进入空间、利用空间以及开发空间的信息桥梁。合理利用多天线技术实现高效空间多维信号协同传输是未来天空地一体化移动互联网能够健康发展的前提，也为其发展提供理论基础和技术保障。本书从空间多维信号传输以及多天线系统的原理出发，分别介绍了在地基、空基以及天基协同传输系统中如何最大程度地利用空间维度资源提升系统性能以及频谱效率。

本书在第 1 章首先概述了移动通信发展历史以及地基、空基和天基协同通信系统的特点。随后在第一部分就多天线系统以及信号发送、接收关键技术展开讨

论,并在第2~5章围绕这些问题,介绍了向量空间与多天线系统、自适应天线系统、MIMO多天线系统以及空间多维信号接收与迭代处理技术。基于以上理论与技术,本书最后从实际应用角度出发,在第二部分的6~8章分别介绍了空间多维协同传输在地基、空基以及天基通信系统中的应用以及相应关键技术。

本书作者所在的团队多年来一直致力于天、空、地一体化协同传输方面的相关研究工作,承担过众多国家级重点科研项目,具有从理论到工程实践的相关基础。本书内容取自我们多年的研究积累,所阐述的原理方法较好地结合了理论与工程实践,具有由浅入深的行文风格,非常适用于具有一定专业基础的高校研究生以及企事业研发机构的科研工作者与工程师。

在此,我们需要感谢很多一起奋斗的同事,包括张军教授、刘锋教授、陈晨副教授等,他们对本书的完成给予了诸多建议和帮助。此外,还需要特别感谢为本书的整理及校对而辛勤工作的学生们,包括窦圣跃、张敏、李瑶、张昕、潘圣森、白文杰、赵乐文、党尚、李业振、祝贺等。

另外,感谢国家自然科学基金项目(编号:91338106、61231011、61231013、61201189)以及科技部重大专项“高速移动环境下的谱效率提升技术的研究和开发”(编号:2011ZX03001-007-03)对本书的资助。

最后,十分感谢家人对作者工作的大力支持和理解。

作 者

2014年8月于北京、上海

第1章 绪论	1
1.1 地基无线通信系统概述	1
1.1.1 第一代移动通信系统	1
1.1.2 第二代移动通信系统	2
1.1.3 第三代移动通信系统	2
1.1.4 第四代移动通信系统	3
1.1.5 第五代移动通信系统	4
1.2 空基协同传输系统概述	6
1.3 天基协同传输系统概述	10
1.3.1 天基协同传输系统的现状及发展趋势	11
1.3.2 天基协同传输系统的基本原理	13
1.4 本章小结	14
参考文献	14
第2章 多天线信号与系统概述	18
2.1 空间信号组合与检测基础	18
2.1.1 空间信号组合	19
2.1.2 接收信号检测	26
2.2 阵列天线方向图综合技术	34
2.2.1 阵列天线排列方式	35
2.2.2 阵列天线自由度	39

2.2.3 阵列天线方向图综合	40
2.3 MIMO 系统概述	42
2.3.1 分集技术	43
2.3.2 SIMO 系统	44
2.3.3 MISO 系统	48
2.3.4 MIMO 系统	50
2.4 MIMO 传统检测技术	55
2.4.1 系统模型	55
2.4.2 未编码 MIMO 信号检测	56
2.4.3 仿真结果	62
2.5 本章小结	62
参考文献	63
第3章 自适应天线阵列理论与技术	65
3.1 自适应天线阵列的基本原理	65
3.2 最佳滤波准则	68
3.2.1 最小均方误差准则	68
3.2.2 最大信干噪比准则	69
3.2.3 最大似然准则	70
3.2.4 最小方差准则	71
3.3 自适应波束形成算法	73
3.3.1 最小均方算法	74
3.3.2 采用矩阵求逆法	78
3.3.3 递归最小二乘法	79
3.3.4 共轭梯度算法	81
3.3.5 恒模算法	83
3.4 波达方向估计	85
3.4.1 传统谱估计方法	86
3.4.2 最大熵谱估计	86
3.4.3 多重信号分类算法	87
3.4.4 旋转不变子空间算法	90

3.4.5 最大似然算法	92
3.4.6 子空间拟合算法	94
3.5 自适应天线阵列校正	96
3.5.1 无线馈入参考信号法	97
3.5.2 注入信号法	101
3.5.3 盲信号校正法	102
3.6 自适应天线系统硬件构架	103
3.6.1 射频前端模块	104
3.6.2 数据信号处理模块	105
3.6.3 并行数字波束形成	106
3.7 本章小结	107
参考文献	107
第4章 MIMO 多天线理论与技术	109
4.1 MIMO 信道模型	109
4.2 MIMO 信道容量	112
4.2.1 确定性信道的容量	113
4.2.2 随机 MIMO 信道的容量	118
4.2.3 平均功率分配的 MIMO 信道容量比较	118
4.3 MIMO 空时编码技术	122
4.3.1 空时编码及编码准则	123
4.3.2 空时格形码	125
4.3.3 空时分组码	127
4.3.4 分层空时码	131
4.3.5 其他的空时编码	132
4.4 MIMO 波束成形技术	133
4.4.1 单用户波束成形技术	135
4.4.2 多用户波束成形技术	136
4.5 MIMO 多天线技术	144
4.5.1 多天线单元的互耦	144
4.5.2 空域相关系数	146

4.5.3	空域相关性与 MIMO 信道	148
4.5.4	MIMO 多天线去耦	151
4.5.5	MIMO 多天线选择	157
4.6	大规模 MIMO 技术	159
4.6.1	大规模 MIMO 系统应用前景	159
4.6.2	大尺寸下信道的硬化	160
4.6.3	大规模 MIMO 面临的技术挑战	163
4.7	本章小结	165
	参考文献	166
第 5 章	空间多维信号接收与迭代处理	169
5.1	基于格基理论的 MIMO 检测技术	169
5.1.1	格基数学基础	170
5.1.2	基于格基规约的 MIMO 检测	172
5.1.3	仿真结果	182
5.2	迭代检测译码基本原理及最优 MAP 检测	182
5.2.1	BICM-ID 系统	183
5.2.2	MIMO 迭代接收机—最优 MAP 检测	185
5.3	基于随机采样的检测译码技术	187
5.3.1	系统模型	188
5.3.2	基于 LR 的采样列表生成方法	188
5.3.3	复杂度分析	195
5.3.4	仿真结果	197
5.4	基于比特滤波的检测译码技术	199
5.4.1	基于 LR 的 IDD 与比特级组合和列表生成	199
5.4.2	复杂度分析	203
5.4.3	仿真结果	204
5.5	本章小结	208
	参考文献	208
第 6 章	地基协同传输系统	211
6.1	地基传输系统概述	211

6.1.1 地基无线通信系统发展历程	211
6.1.2 地基无线通信系统特点	215
6.2 地基无线通信系统多维联合资源管理	216
6.2.1 基于双层认知环路的无线资源管理模型	216
6.2.2 智能无线资源管理模型	222
6.2.3 面向服务的无线资源管理实现架构	226
6.2.4 MIMO-OFDM 系统无线资源调度	227
6.3 多用户协作传输方法	228
6.3.1 正交波束成形技术	228
6.3.2 多用户中继系统的波束成形技术	232
6.3.3 多用户选择策略	234
6.4 多小区协同传输与抗干扰方法	244
6.4.1 多小区协同传输	244
6.4.2 多小区干扰系统几何建模	246
6.4.3 多小区系统抗干扰技术	247
6.4.4 多小区系统协同干扰抑制	248
6.5 大规模 MIMO 系统	253
6.5.1 大规模 MIMO 基本概念回顾	253
6.5.2 单用户大规模 MIMO	254
6.5.3 多用户大规模 MIMO	256
6.5.4 多小区大规模 MIMO	259
6.6 本章小结	261
参考文献	261
第 7 章 空基协同传输系统	266
7.1 空基传输技术概述	266
7.1.1 高空平台通信系统简介	266
7.1.2 Project Loon 简介	270
7.2 基于阵列的空基传输系统	271
7.2.1 天线波束的数学模型	272
7.2.2 预测同信道干扰的高效算法	275

7.2.3	121 小区结构的结果	278
7.2.4	结论	280
7.3	空基波束赋形技术	280
7.3.1	二维空间插值波束赋形器 (2-D SIB)	281
7.3.2	二维空间插值滤波器设计示例	285
7.4	高空平台小区规划	287
7.4.1	高空平台的覆盖和小区划分	288
7.4.2	结论	292
7.5	高空平台传输机制	293
7.5.1	相关技术介绍	293
7.5.2	系统和信道模型	294
7.5.3	基于奇异向量的训练方法	295
7.5.4	基于导向向量的训练方法	296
7.5.5	性能评估	297
7.5.6	结论	300
7.6	本章小结	300
	参考文献	301
第 8 章	天基协同传输系统	305
8.1	天基传输技术概述	306
8.2	星群协同多波束传输技术	308
8.3	星群协同 MIMO 系统建模	308
8.3.1	单天线星群	309
8.3.2	阵列天线星群	311
8.4	星群协同 MIMO 系统容量	312
8.4.1	容量推导	312
8.4.2	单天线星群容量	313
8.4.3	阵列天线星群容量	318
8.5	星群协同 MIMO 系统容量影响因素分析	324
8.5.1	单天线星群	325
8.5.2	阵列天线星群	329

8.6 本章小结	336
参考文献	337
结束语	339
通用符号表	341
中英对照表	342
名词索引	345

第1章

绪论

伴随着无线宽带通信和互联网产业的高速发展，移动互联网呈井喷式发展，前所未有地改变着人们的社交和生活方式，成为现代人类信息交互的必要手段之一。传统的无线通信多以地基蜂窝通信为主，然而随着航空航天技术的不断进步，天基、空基平台总类和数量的快速增长，以卫星、平流层气球、多种航空飞行器组成的天空地一体化信息网络正在飞速发展。随之产生的天空地一体化移动互联网将成为未来人类认识空间、进入空间、利用空间以及开发空间的信息桥梁。

从无线通信诞生至今，频谱资源紧缺一直是制约其发展的最大瓶颈。频谱资源的高效利用以及相应的空间多维协同传输技术的发展给未来无线通信带来了新的增长点，也为未来天空地一体化移动互联网的健康发展提供了理论和技术保障。本章将分别从地基、空基和天基三方面概述无线通信的特点和发展历程。

1.1 地基无线通信系统概述

从 1947 年美国贝尔实验室提出移动通信的概念^[1]至今，移动通信技术在近 30 年取得了突飞猛进的发展，成为现代地基通信网中不可缺少的通信手段之一。本节我们将首先概述地基移动通信的 4 个时代的发展历程及其关键技术。

1.1.1 第一代移动通信系统

第一代移动通信系统（1G）诞生于集成电路、微型计算机和微处理器技术得到快速发展的 20 世纪 70 年代至 80 年代。1978 年，美国贝尔实验室推出了蜂窝式模拟移动通信系统，使得移动通信进入了个人领域。1983 年，美国的高级移动

电话业务 (Advanced Mobile Phone Service, AMPS)^[1]投入商用。AMPS 系统采用 7 小区复用模式,并可在需要时采用“扇区化”和“小区分裂”来提高容量。与此同时,欧洲和日本也相继建立了各自的移动通信网络。其中包括英国的扩展式全向访问通信系统 (Extended Total Access Communication System, ETACS) 和日本的窄带完全接入通信系统 (Narrowband Total Access Communication System, NTACS) 等。这个时期的无线通信系统主要采用的是模拟调制和频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 技术。毫无疑问,第一代移动通信系统存在着诸多缺点,如用户容量受限制、系统扩容困难、调制方式混杂、不能实现国际漫游、保密性差、通话质量不高和不能提供数据业务等。

1.1.2 第二代移动通信系统

1992 年,随着第一个数字蜂窝移动通信网络——全球移动通信系统 (Global System for Mobile communications, GSM) 的问世,移动通信跨入了第二代 (2G)。由于性能优越,使得其在全球范围内迅速扩张。1993 年,中国的第一个全数字移动电话 GSM 系统建成开通,之后中国电信和中国联通都采用了 GSM。GSM 系统主要有以下几个特点:微蜂窝小区结构;语音信号数字化;采用新的调制方式 (GMSK、QPSK 等);采用频分多址 (FDMA) 或时分多址 (TDMA);具有很高的频谱利用率;高保密性等。

1995 年,美国的高通公司 (Qualcomm) 提出了另一种采用码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) 方式的数字蜂窝系统技术解决方案——IS-95 CDMA^[1],目前分别在中国香港、韩国、北美等国家和地区投入使用,用户反映良好。CDMA 系统主要有以下几个特点:用户的接入方式采用码分多址;软容量、软切入、系统容量大;抗多径衰落;可采用语音激活、分集接收等先进技术。

相较于 1G 系统,2G 系统具有更高的频谱利用率、更强的保密性能、更好的语音质量。发展至今,2G 体制标准日趋完善,技术也相对成熟。但随着人们对数据业务的需求不断提高,2G 系统所提供的速率已不能满足需求,从而需要有更强的系统支持高速的移动通信。

1.1.3 第三代移动通信系统

第三代移动通信系统的概念由 ITU 于 1985 年提出,命名为未来公共陆地移动通信系统 (Future Public Land Mobile Telecommunications System, FPLMTS); 1996 年更名为国际移动通信-2000 (International Mobile Telecommunications 2000, IMT-2000) 系统,即该系统工作在 2 000 MHz 频段,且能提供最高 2 000 kbit/s 的

数据传输速率。3G 的目的是实现蜂窝移动通信的统一标准,建立全球普及的无缝漫游系统,同时支持高质量的多媒体业务,增强网络容量以及多种用户管理的能力。因此,IMT-2000 对 3G 技术提出的要求有:高数据传输速率——卫星链路的速率最小 9.6 kbit/s、市内环境至少 2 Mbit/s、室外步行和车辆环境分别至少是 384 kbit/s 和 144 kbit/s;传输速率按需分配;上下行链路能适应不对称业务的需求;简单的小区结构和易于管理的信道结构;灵活的频率和无线资源管理、系统配置和服务设施;能够将无线网和有线网结合起来,试图达到与有线网一样的传输质量。

2007 年 10 月 19 日,ITU 正式批准了基于 IEEE 802.16 的全球微波互联接入系统(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMax)成为 3G 的标准。WCDMA 和 cdma 2000 已经在全球范围内规模化商用,我国也于 2008 年开始了基于 TD-SCDMA 3G 系统的商用。可是 3G 还是有其局限性:由于受多用户干扰,CDMA 难以达到很高的通信速率;由于空中接口对核心网的限制,3G 所能提供服务速率的动态范围不大,不能满足各种业务类型的要求;分配给 3G 的频率资源已经趋于饱和;3G 所采用的语音交换架构仍承袭了 2G 的电路交换,而不是纯 IP 方式;流媒体的应用也不尽如人意等。因此,需要引入更先进的技术来进一步提升移动业务的质量。

1.1.4 第四代移动通信系统

伴随着前三代移动通信系统和智能移动终端的迅猛发展,用户对于业务的需求也从以话音为主转变为以高速数据流为主的类互联网通信模式。随着用户对传输速率需求的不断增长,人们开始在前三代移动通信系统的基础上开发新一代系统以更好地支持高速宽带移动通信服务。2007 年世界无线电大会为 IMT-Advanced 分配了频谱,并于 2008 年 3 月开始征集 IMT-Advanced 标准,至 2009 年 10 月一共征集到 6 个候选提案,可分别归为 3GPP 的 LTE-Advanced^[2]和 IEEE 802.16m^[3]两大阵营。目前 4G 移动通信技术国际标准主要有 FDD-LTE、FDD-LTE-Advanced、TD-LTE 以及 TD-LTE-Advanced。其中,TD-LTE 和 TD-LTE-Advanced 是中国主导制定的 4G 国际标准。

LTE 是 3G 的演进,它改进并增强了 3G 的空中接入技术,采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术作为其无线演进技术,LTE 移动通信系统在 20 MHz 频谱带宽下能提供下行 100 Mbit/s (TD-LTE)或 150 Mbit/s (FDD-LTE)、上行 50 Mbit/s (TD-LTE)或 40 Mbit/s (FDD-LTE)的峰值速率。TD-LTE 是我国主导的 4G 国际标准,中国移动就采用了 TD-LTE。

LTE-Advanced 分为 FDD-LTE-Advanced 和 TD-LTE-Advanced,它针对室内环境进行了技术优化,并采用了载波聚合等技术,能够弹性分配频谱,以获得更宽

的频谱带宽,能有效支持新频段和大带宽应用。其在 100 MHz 频谱带宽下能提供下行 1 Gbit/s、上行 500 Mbit/s 的峰值速率。

WiMax 是 IEEE 802.16 标准,能提供最高接入速度 70 Mbit/s,其工作频段范围为无须授权的 2~66 GHz 频段。MiMax 的主要优点有:①有利于避开已知干扰;②有利于节省频谱资源;③灵活的带宽调整能力有利于运营商协调频谱资源;④能够实现无线信号传输距离达 50 km。但其在移动性能方面无法满足高速下的无线网络无缝衔接。因此 WiMax 并不能算是无线移动通信技术,而只能算是无线宽带局域网技术。

Wireless MAN-Advanced 是 WiMax 的升级版,即 IEEE 802.16m 标准,其具有在高速移动下无缝切换的能力,能有效解决 WiMax 的移动性能问题。IEEE 802.16m 兼容 4G 网络,其优势在于:①扩大网络覆盖面,实现网络无缝衔接;②提高频谱效率;③在漫游模式或高效率/强信号模式下可提供 1 Gbit/s 的无线传输速率等。

1.1.5 第五代移动通信系统

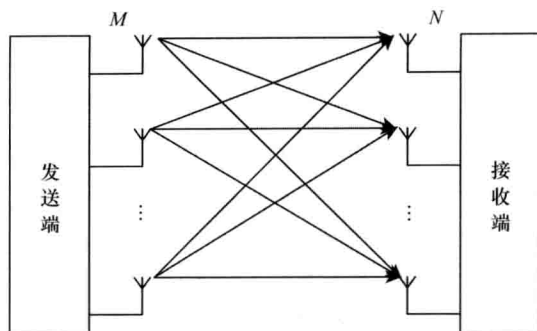
第五代移动通信系统(5G)是继 4G 之后,为了满足智能终端的快速普及和移动互联网的高速发展而正在研发的下一代无线移动通信系统,是面向 2020 年以后人类信息社会需求的无线移动通信系统。

5G 已经成为国内外移动通信系统领域的研究热点。2013 年,由包括我国华为公司等在内的 29 个参加方共同承担的第 7 框架计划启动了面向 5G 研发的 METIS (Mobile and Wireless Communications Enablers for the 2020 Information Society) 项目^[4]。我国“863”计划也分别于 2013 年 6 月和 2014 年 3 月启动了 5G 重大项目一期和二期研发课题。目前,世界各国正就 5G 的发展愿景、应用需求、候选频段、关键技术指标等进行广泛的研讨,力求在 2015 年世界无线电大会前后达成共识,并于 2016 年后启动有关标准化进程^[5]。

对于 5G 的未来愿景和应用,学术界和产业界都进行了相关的描述,从中可总结出人们对未来 5G 的技术需求。相对于传统的移动通信网络,5G 应具备如下基本特征:①数据流量增长 1 000 倍;②联网设备数目扩大 100 倍;③峰值速率至少为 10 Gbit/s;④用户可获得速率达 10 Mbit/s,特殊用户需求达 100 Mbit/s;⑤时延短、可靠性高;⑥频谱利用率高;⑦网络耗能低等。

目前,关于 5G 的关键技术仍处于研究和发展阶段,如大规模 MIMO 技术、波束成形技术以及协同无线通信技术等都将可能成为 5G 的关键技术。

MIMO 技术可以有效提升无线通信的频谱效率,获得接收分集增益(Receive Diversity Gain, RDG),因而被公认是下一代移动通信系统的核心技术。一个典型的 $M \times N$ 的 MIMO 系统如图 1-1 所示。

图 1-1 $M \times N$ MIMO 系统

由于每根接收天线都会收到来自所有发射天线信号的叠加，因此接收信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_n \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

$$= \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$$

其中， y_n 、 h_{nm} 、 s_m 以及 n_n 分别表示第 n 根接收天线的接收信号、第 m 根发送天线到第 n 根接收天线的信道增益、第 m 根发送天线的发送信号以及第 n 根接收天线的噪声。从式 (1-1) 可以看出，每一个发送信号在接收端都会有 N 个备份，这就是所谓的接收分集。但是，来自不同发送天线的信号在接收端就形成了干扰。为了在接收端检测出所发送的信号，必须把来自不同发送天线的信号提取出来。因此，MIMO 接收机的检测算法是 MIMO 系统不可或缺的重要组成部分。

除此之外，波束成形 (Beamforming) 技术也是实现空间分集增益的关键技术。波束成形技术在方向性天线阵雷达、声呐水生定位和分类、超声波光学成像、地球物理勘探以及石油探测、生物医学和无线通信领域都有着广泛的应用。在发送端，利用波束成形技术对天线阵列中的各个天线发送信号进行适当加权，以产生具有指向性的虚拟波束，从而达到增强期望信号并抑制干扰，提高通信容量和质量的目的；在接收端，来自不同接收天线的信号在接收机中进行组合，从而达到相干叠加，提高信号的接收质量。波束成形技术可划分为两大类，即基于天线阵列 (Antenna Array) 的阵列波束成形和基于信号预处理 (Pre-Processing) 的多天线波束成形，它们分别利用了不同天线信道的空间相关性和独立性。阵列波束成形技术是利用空间信道的强相关性以及电磁波的干涉原理，通过对多根天线输出信号的相关性进行幅度和相位加权，使信号在某个方向形成同相叠加，在其他方向形成相位抵消，以增强目标信号的同时抑制干扰；多天线波束成形技术则是利