



“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

# 空间信号协同处理 理论与技术

■ 白琳 李敏 李颖 于全 编著

Cooperative Spatial Signal Processing  
Theories and Key Technologies

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



“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

# 空间信号协同处理 理论与技术

■ 白琳 李敏 李颖 于全 编著

Cooperative Spatial Signal Processing  
Theories and Key Technologies

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

空间信号协同处理理论与技术 / 白琳等编著. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2017. 2  
(学术中国. 院士系列. 未来网络创新技术研究系列)  
ISBN 978-7-115-41240-9

I. ①空… II. ①白… III. ①空间通信系统—信号处理 IV. ①TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第027220号

## 内 容 提 要

本书从空间信号协同传输以及 MIMO 系统的原理出发, 分别从信号的发送、接收两个方面介绍如何利用空间信号协同处理理论与技术来提升 MIMO 系统的信号传输性能以及频谱利用率。本书主要内容包括信号发送端的单用户、多用户以及中继波束成形技术, 讨论了理想信道状态信息、非理想信道状态信息以及同信道干扰情况下的波束成形设计; 信号接收端的串行干扰消除技术、格基规约技术、迭代检测译码技术以及信道估计检测双重迭代技术。

本书内容丰富, 适用于具有一定无线通信专业基础的高校研究生以及相关领域的科研工作者与工程师阅读参考。

- 
- ◆ 编 著 白琳 李敏 李颖 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>  
固安县铭成印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张: 13.5 2017年2月第1版  
字数: 265千字 2017年2月河北第1次印刷
- 

定价: 88.00 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

纵观无线通信从始至今 20 多年的发展历史，从第一代移动通信系统（1G）的概念提出到目前正在广泛研发的第五代移动通信系统（5G），客观上频谱资源的紧缺一直是制约其发展的最大瓶颈。频谱资源对于无线通信系统就好比公路资源对于交通运输系统一样重要，如何合理有效地利用频谱资源修建好信息高速公路一直以来都是摆在研究者以及工程师面前的重要挑战和关键问题。从第一代到第三代移动通信系统（3G）的核心技术可以依次体现为频分、时分以及码分多址技术，分别利用了频率、时间、码元等资源来提升无线通信系统的频谱利用率。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多天线技术的发展已成为第四代移动通信系统（4G）以及未来 5G 的核心内容和关键组成部分。

基于多天线技术的多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）架构能在不增加额外带宽的情况下大幅度提升通信系统的频谱利用率。MIMO 系统最初在 20 世纪 70 年代就被用于通信系统，但是由于技术局限，直到 20 世纪 90 年代才被人们广泛关注。实验证明相对于传统无线通信技术在移动蜂窝系统中  $1\sim 5 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$  的频谱效率，MIMO 技术在室内传播环境下的频谱效率则可以达到  $20\sim 40 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ，因此 MIMO 技术作为提高数据传输速率的重要手段受到人们越来越多的关注，目前 4G 以及未来的 5G 都将充分利用和发掘 MIMO 技术的潜力。本书从空间信号协同传输以及 MIMO 系统的原理出发，分别从信号的发送、接收两个方面介绍如何利用空间信号协同处理理论与技术来提升 MIMO 系统的信号传输性能以及频谱利用率。

本书在第 1 章首先概述了全书的目的以及各章节的组织结构。随后在第 2~5 章就 MIMO 系统的信号发送以及波束成形技术展开讨论，并围绕这些问题，介绍单用户、多用户以及中继波束成形技术，并针对具有理想信道状态信息、非理想信道状态信息以及同信道干扰条件下 MIMO 系统讨论不同的波束成形方案。本书在第 6~9 章主要介绍如何在 MIMO 系统的接收端利用不同的信号检测译码技术进行空间信号协同处理，分别就串行干扰消除技术、格基规约技术、迭代检测译

码技术以及信道估计检测双重迭代系统展开讨论并进行了性能与复杂度分析。

本书作者所在团队长期以来一直致力于无线通信与协同信号处理相关研究工作，具有承担国家级科研项目的丰富经验，对从理论到工程实践有较好的理解。本书所阐述的内容取自作者多年的研究成果与理论积累，其中的原理方法较好地结合了理论与工程实践，具有较为简洁的行文风格。

在此，需要特别感谢为本书的整理及校对而辛勤工作的学生们，包括李田、吴杰、万瑞敏、汤秋缘、李东泉、韩超、窦胜跃、祝丽娜等。

同时感谢国家自然科学基金项目（编号：91338106，61231011，61231013）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

2016年11月于北京

# 目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	3
第 2 章 信号发送与波束成形技术概述	5
2.1 信号发送基础	5
2.1.1 单天线系统的容量极限	5
2.1.2 突破容量极限——多天线系统	6
2.1.3 多天线技术应用模式	7
2.2 MIMO 波束成形技术	8
2.2.1 单用户波束成形技术	8
2.2.2 多用户波束成形技术	9
2.3 MIMO 中继波束成形技术	14
2.3.1 从点对点系统到中继系统	14
2.3.2 从单天线中继系统到多天线中继系统	17
2.3.3 多天线中继系统的研究热点	18
2.4 本章小结	18
参考文献	18
第 3 章 理想条件下 MIMO 中继系统波束成形	21
3.1 MIMO 系统波束成形方案	21
3.2 MIMO 中继系统波束成形方案和性能分析	23
3.2.1 波束成形方案	24

3.2.2 性能分析 .....	28
3.3 仿真结果 .....	31
3.4 本章小结 .....	35
3.5 附录 .....	35
3.5.1 定理 3-1 的证明 .....	35
3.5.2 定理 3-3 的证明 .....	39
参考文献 .....	41
<b>第 4 章 非理想 CSI 条件下 MIMO 中继系统波束成形</b> .....	<b>43</b>
4.1 非理想 CSI 条件下 MIMO 系统的波束成形方案 .....	43
4.2 非理想 CSI 条件下 MIMO 中继系统波束成形方案及性能 .....	46
4.2.1 波束成形方案 .....	46
4.2.2 性能分析 .....	50
4.3 仿真结果 .....	52
4.4 本章小结 .....	55
4.5 附录 .....	55
参考文献 .....	62
<b>第 5 章 存在 CCI 条件下 MIMO 中继系统波束成形</b> .....	<b>64</b>
5.1 存在 CCI 条件下 MIMO 系统波束成形方案 .....	64
5.2 存在 CCI 条件下 MIMO 中继系统波束成形方案 .....	67
5.2.1 研究背景 .....	67
5.2.2 波束成形方案 .....	68
5.3 仿真结果 .....	73
5.4 本章小结 .....	77
5.5 附录 .....	77
参考文献 .....	83
<b>第 6 章 串行干扰消除与列表检测法</b> .....	<b>86</b>
6.1 MIMO 信号检测基础 .....	86
6.1.1 MIMO 系统基础 .....	86
6.1.2 经典 MIMO 信号检测 .....	89
6.2 串行干扰消除技术 .....	93

6.2.1	QR 分解	93
6.2.2	ZF-SIC 检测	94
6.2.3	MMSE-SIC 检测	97
6.2.4	仿真结果	98
6.3	基于串行干扰消除的列表检测方法	100
6.3.1	列表检测	101
6.3.2	排序与检测	103
6.3.3	子检测	106
6.3.4	性能分析	109
6.3.5	仿真结果	110
6.4	本章小结	112
	参考文献	112
<b>第 7 章</b>	<b>基于格基规约的检测技术</b>	<b>114</b>
7.1	基于格基规约的天线阵信号组合概述	114
7.2	基于格基规约的 MIMO 系统检测	116
7.2.1	基于格基规约的线性检测	117
7.2.2	基于格基规约的 SIC 检测	120
7.2.3	两基底系统的格基规约方式	122
7.2.4	两基底系统的高斯格基规约	126
7.2.5	LLL 算法和 CLLL 算法	132
7.2.6	性能评价	137
7.2.7	仿真结果	144
7.3	格基法列表检测	148
7.3.1	算法描述	149
7.3.2	格基法检测	150
7.3.3	格基规约域中列表的生成	151
7.3.4	表长的影响	152
7.3.5	复杂度分析	155
7.3.6	格基法列表检测的构成	156
7.4	本章小结	165



参考文献 .....	165
<b>第 8 章 高性能低复杂度迭代信号检测与译码技术</b> .....	<b>168</b>
8.1 迭代信号检测与译码接收机结构 .....	168
8.1.1 MIMO 系统模型 .....	168
8.1.2 MIMO 传统检测技术 .....	169
8.1.3 MIMO-IDD 技术 .....	170
8.2 基于比特级滤波的检测译码技术 .....	174
8.2.1 基于 LR 的比特级 MMSE 滤波器设计 .....	174
8.2.2 整体扰动列表生成 .....	175
8.3 基于随机采样的检测译码技术 .....	177
8.3.1 系统模型 .....	177
8.3.2 基于非 IDD 系统的随机抽样检测 .....	177
8.3.3 基于 IDD 系统的随机抽样检测 .....	179
8.3.4 高效抽样取整方法 .....	180
8.4 MMSE 检测 .....	180
8.4.1 比特级 MMSE 检测 .....	180
8.4.2 部分比特级 MMSE 检测 .....	181
8.5 仿真结果及性能分析 .....	183
8.6 本章小结 .....	185
参考文献 .....	185
<b>第 9 章 低复杂度双重迭代接收机</b> .....	<b>186</b>
9.1 信道估计技术 .....	186
9.1.1 信道估计概述及分类 .....	186
9.1.2 半盲信道估计技术 .....	187
9.2 迭代信道估计技术 .....	189
9.3 双重迭代接收机 .....	190
9.3.1 双重迭代接收机结构设计 .....	190
9.3.2 基于双重迭代接收机的迭代信道估计与信号检测方法 .....	192
9.3.3 正交分离度准则 .....	193
9.3.4 最小误码准则 .....	194

9.4 仿真结果及性能分析 .....	196
9.5 本章小结 .....	199
参考文献 .....	199
通用符号表 .....	201
中英文对照 .....	202
名词索引 .....	205

# 第1章

## 绪 论

随着以无线通信和移动互联网技术为载体的现代信息产业的飞速发展，人们对信息量的需求呈现井喷式增长，这也让以电磁波为载体的无线通信技术不断取得革命性的突破。纵观无线通信的发展历史，从第一代移动通信系统（1G）的概念提出到目前正在广泛研发的第五代移动通信系统（5G）<sup>[1-3]</sup>，客观上频谱资源的紧缺一直是制约其发展的最大瓶颈。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多天线技术的发展已成为第四代移动通信系统（4G）以及未来 5G 的核心内容和关键部分。

作为多天线技术的典型应用之一，多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）技术能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的频谱利用率。在 20 世纪 70 年代就有人提出将 MIMO 技术在用于通信系统，但是对 MIMO 技术在无线通信中的应用产生巨大推动的奠基工作则是在 20 世纪 90 年代由 AT&T 贝尔实验室学者完成的<sup>[4-8]</sup>。1996 年，贝尔实验室的 G. J. Foschini 提出了空间复用技术—分层空时码（Bell Laboratories Layered Space-Time, BLAST）<sup>[5]</sup>，1998 年贝尔实验室研究出了 V-BLAST，实验室的结果已能达到  $20\sim 40 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$  的频谱利用率<sup>[6]</sup>。而使用传统无线通信技术在移动蜂窝中的频谱效率仅为  $1\sim 5 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ，在点到点的固定微波系统中也只有  $10\sim 12 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。在此之后的理论分析可以进一步证明，在独立同分布的高斯信道条件下，MIMO 系统的容量将随着天线数近似成线性增长。由于 MIMO 技术能够以较少的频谱资源传输更多的信息，它作为提高数据传输速率的重要手段受到人们越来越多的关注。目前，4G 的物理层采用了 MIMO 技术，而大规模 MIMO 技术将在 5G 中得到应用。

本书将从信号的发送、接收两个方面介绍如何利用最优的空间信号协同处理理论与技术来发掘 MIMO 系统的空间资源从而提升信号传输性能以及频谱效率。

本书分为 9 章内容。

第 1 章为绪论，概述了本书的目的以及本书各章节的组织结构。

第 2~5 章为本书的前半部分，主要介绍如何在 MIMO 系统的发送端利用不同的波束成形技术进行空间信号协同处理，以在发送端提升信号发送质量。

第 2 章从多天线系统的容量出发，讨论了多天线技术 3 种主要的应用模式，即空间复用、空时编码和波束成形，并重点针对波束成形技术，分别研究了单用户波束成形技术和多用户波束成形技术。最后，从点对点的 MIMO 系统延伸到了 MIMO 中继系统。

第 3 章考虑理想条件下，即拥有理想信道状态信息且没有同信道干扰时，如何提高系统的可靠性为目标，设计最优的波束成形方案并进行性能分析。由于 MIMO 中继系统波束成形技术是对点对点 MIMO 系统波束成形技术的扩展，因此，本章首先简要介绍了 MIMO 系统波束成形技术，为本章关于 MIMO 中继系统波束成形技术的工作提供参照。

第 4 章针对非理想信道状态信息条件下，如何提高系统的可靠性为目标，设计最优的波束成形方案并进行性能分析。首先，简要介绍了非理想信道状态信息条件下点对点 MIMO 系统波束成形技术，为本章关于 MIMO 中继系统波束成形技术的分析提供参照；接着，以最大化目的端信噪比为目标函数，推导出非理想信道状态信息条件下 MIMO 中继系统最优的波束成形方案，并分析了其性能上限；最后，通过仿真验证了设计的波束成形方案的优越性和性能分析的有效性。

第 5 章考虑存在同信道干扰条件下，如何提高系统的可靠性为目标，设计波束成形方案，并进行性能分析。为了进行对比分析，首先给出了存在同信道干扰条件下点对点 MIMO 系统最优波束形成方案；然后以最大化目的端信噪比为目标函数，推导出了存在同信道干扰条件下 MIMO 中继系统的最优波束成形方案；最后，通过仿真验证了设计的波束成形方案的优越性和性能分析的有效性。

第 6~9 章为本书的后半部分，主要介绍如何在 MIMO 系统的接收端利用不同的信号检测译码技术进行空间信号协同处理，以提升接收信号质量，并降低接收机复杂度。

第 6 章首先对接收信号检测技术进行简要介绍，并阐述信号检测技术在 MIMO 系统中的应用原理与方法。首先概述了 MIMO 系统的信号检测基本原理，并讨论了两种经典的 MIMO 信号检测方法，即最大似然信号检测法与线性信号检测法；为了设计一种性能接近最大似然检测法复杂度接近线性检测法的高性能低复杂度 MIMO 信号检测方法，接着介绍连续干扰消除技术，并分析了其性能；在此基础上，将列表检测原理应用其中，通过调整列表长度来实现性能和复杂度之间的权衡。

第 7 章将讨论基于格基规约(LR)的 MIMO 信号检测方法，从而在高维 MIMO

系统中实现低复杂度、高性能及完全接收分集增益的信号检测。首先讨论了如何将 MIMO 信号检测问题转化为在格基中寻找某向量的问题；接下来介绍了两种基于 LR 的 MIMO 信号检测方法，即基于 LR 的线性检测法与基于 LR 的 SIC 检测法；为了进一步降低 LR 在大规模 MIMO 中的复杂度，运用 SIC 把一个大规模 MIMO 检测问题分解为多个小规模 MIMO 检测子问题，并设计格基法列表检测器，从而能以较低的计算复杂度实现近似最优检测的性能。

第 8 章首先简要介绍了常规的 MIMO 信号检测方法和迭代解码检测技术，从而引出比特交织编码调制 (BICM) 系统迭代解码原理和最大后验概率 (MAP) 迭代信号检测方法，在此基础之上，为了避免 MAP 检测方法的指数型增长复杂度，提出了基于随机采样的部分比特级最小均方误差 (MMSE) 滤波器检测算法，并将该算法与 MAP 方法以及其他低复杂度信号检测方法进行了对比分析，验证了该算法的高性能和低复杂度特性。

第 9 章将讨论 MIMO 系统联合信道估计和检测算法。首先介绍了传统的信道估计技术，然后作为对传统的信道估计与信号检测方式的改进，引出了一种包括外部迭代信道估计与内部基于 LR 的 IDD 抽样迭代检测的双重迭代接收机架构，在此基础上，针对其中的迭代信道估计，引出一种低复杂度算法，以此降低外部迭代信道估计的计算复杂度，并验证了该双重迭代接收机的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] AGYAPONG P A, IWAMURA M, STAEHLE D, et al. Design considerations for a 5G network architecture[J]. IEEE communications magazine, 2014, 52(11): 65-75.
- [2] CHEN S, ZHAO J. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication[J]. IEEE communications magazine, 2014, 52(5): 36-43.
- [3] HANZO L, EL-HAJJAR M, ALAMRI O. Near-capacity wireless transceivers and cooperative communications in the MIMO era: evolution of standards, waveform design, and future perspectives[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(8): 1343-1385.
- [4] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless personal communications, 1998, 6(3): 311-335.
- [5] FOSCHINI G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas[J]. Bell labs. tech. journal, 1996, 1(2): 41-59.
- [6] WOLNIANSKY P W, FOSCHINI G J, GOLDEN G D, et al. VBLAST: an architecture

for realising very high data rates over the rich-scattering wireless channel[C]// IEEE ISSSE, 1998: 295-300.

- [7] TAROKH V, JAFARKHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE transactions on information theory, 1999, 45(5): 1456-1467.
- [8] TAROKH V, SESHADRI H, CALDERBANK A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criteria and code construction[J]. IEEE transactions on information theory, 1998, 44(2): 744-765.

# 信号发送与波束成形技术概述

处于空间不同位置的多个天线发出的信号可以基于不同的方法实现最优的线性组合，这种组合方式通常被人们称为波束成形技术。波束成形技术是多天线技术的一种，本章从介绍多天线技术开始，阐述了点对点的多天线波束成形技术，最后将点对点传输扩展到了中继传输，并分析了多天线中继波束成形技术。

## 2.1 信号发送基础

无线通信技术在不断发展，有限的通信资源面临着数据大爆炸的困境，如何用较少的频率来传输更多的信息以及抑制无线电干扰成为无线通信技术发展的挑战。配置多天线的 MIMO 技术能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的频谱利用率。实验室研究表明，采用 MIMO 技术在室内传播环境下的频谱效率可以达到  $20\sim 40 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ，而使用传统无线通信技术在移动蜂窝中的频谱效率仅为  $1\sim 5 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ，在点到点的固定微波系统中也只有  $10\sim 12 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。MIMO 技术作为提高数据传输速率的重要手段受到人们越来越多的关注。目前，4G 的物理层采用了 MIMO 技术，而大规模 MIMO 技术将在 5G 中得到应用。

### 2.1.1 单天线系统的容量极限

香农定理指出在被高斯白噪声干扰的信道中，最大信息传送速率为

$$C = B \log(1 + S/N) \quad (2-1)$$

其中， $B$  是信道带宽（单位是 Hz）， $S$  是信号功率（单位是 W）， $N$  是噪声功率（单

位是  $W$ )。该式即为著名的香农公式。显然,信道容量与信道带宽成正比,同时还取决于系统信噪比。香农定理指出,如果信息源的信息速率  $R$  小于或者等于信道容量  $C$ ,那么,在理论上存在一种方法可使信息源的输出能够以任意小的差错概率通过信道传输。该定理还指出:如果  $R > C$ ,则没有任何办法传递这样的信息,或者说传递这样的二进制信息的差错率为 50%。

为了逼近香农极限,人们研究了不同的信道编码,从早期的 RS 码、卷积码到网格编码调制。其中,逼近香农极限的有 20 世纪 90 年代发明的 Turbo 码和重新焕发生机的 LDPC 码。

Turbo 码是 Claude Berrou 等人在 1993 年首次提出的一种级联码。基本原理是编码器通过交织器把两个分量编码器进行并行级联,两个分量编码器分别输出相应的校验位比特;译码器在两个分量译码器之间进行迭代译码,分量译码器之间传递去掉正反馈的外信息,这样整个译码过程类似涡(Turbo)工作。因此,这个编码方法又被形象地称为 Turbo 码。Turbo 码具有卓越的纠错性能,性能接近香农极限,而且编译码的复杂度不高。

LDPC 码是由 Gallager 在 1963 年提出的一类具有稀疏校验矩阵的线性分组码,然而在接下来的 30 年来由于计算能力的不足,一直被人们忽视。1996 年, D. MacKay 和 M. Neal 等人对它重新进行了研究,发现 LDPC 码具有逼近香农极限的优异性能,并且具有译码复杂度低、可并行译码以及译码错误可检测等特点,从而成为了信道编码理论新的研究热点。Mackay、Luby 提出的非正则 LDPC 码将 LDPC 码的概念推广。非正则 LDPC 码的性能不仅优于正则 LDPC 码,甚至还优于 Turbo 码的性能,是目前已知的最接近香农极限的码。

### 2.1.2 突破容量极限——多天线系统

在 20 世纪 70 年代就有人提出将 MIMO 技术用于通信系统,但是对 MIMO 技术在无线通信中的应用产生巨大推动的奠基工作则是在 20 世纪 90 年代由 AT&T 贝尔实验室学者完成的。1996 年,贝尔实验室的 G. J. Foschini 提出了空间复用技术——BLAST,1998 年贝尔实验室研究出了 V-BLAST,实验室的结果已能达到  $20 \sim 40 \text{ bit/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$  的频谱利用率。而使用传统的无线通信技术在移动蜂窝和 WLAN 系统中也只有  $10 \sim 12 \text{ bit/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。另外通过理论分析得知,在独立同分布的高斯信道条件下,当接收天线数大于发射天线数时,该 MIMO 系统的容量随着发射天线数近似成线性增长。

在图 2-1 所示的 MIMO 系统模型中,假设发射端有  $N_t$  根天线,接收端有  $N_r$  根天线(假设  $N_r \geq N_t$ ),发射端发射的信号矢量为  $\mathbf{S}$  且满足  $E[\|\mathbf{S}\|_F^2] = P_t$ ,经过  $N_r \times N_t$



的信道  $H$  的传输, 接收端的信号矢量可以表示为

$$Y = HS + N \quad (2-2)$$

其中, 噪声矢量  $N$  满足  $E[NN^H] = \sigma^2 I$ , 根据文献[1], MIMO 系统的容量可以表示为

$$C = \text{lb} \left\{ \det \left[ I + \frac{1}{N_t} \frac{P_t}{\sigma^2} HH^H \right] \right\} \quad (2-3)$$

若  $HH^H$  的特征值分解可以表示为

$$H^H H = [u_1, u_2, \dots, u_{N_t}] \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_t}) [u_1, u_2, \dots, u_{N_t}]^H \quad (2-4)$$

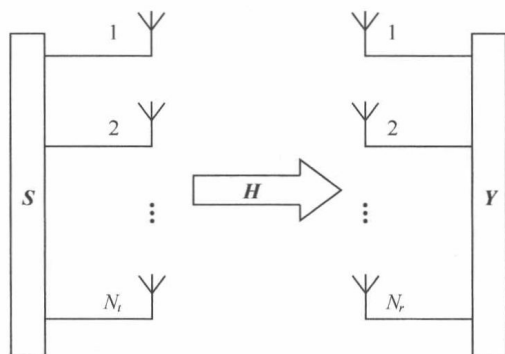


图 2-1 MIMO 系统模型

MIMO 系统的容量可以表示为

$$C = \sum_{i=1}^{N_t} \text{lb} \left( 1 + \frac{1}{N_t} \frac{P_t}{\sigma^2} \lambda_i \right) \quad (2-5)$$

从式 (2-5) 与式 (2-1) 的对比可以看出, 相对于单天线系统, 多天线系统的容量有了成倍的提升。

### 2.1.3 多天线技术应用模式

多天线技术主要有 3 种应用模式: 空间复用、空时编码和波束成形。

典型的空时复用技术是贝尔实验室的 BLAST。以 V-BLAST 系统为例, 它采用一种直接的天线与层的对应关系, 即编码后的第  $k$  个子流直接送到第  $k$  根天线, 不进行数据流与天线之间对应关系的周期改变, 数据流在时间与空间上为连续的垂直列向量。由于 V-BLAST 中数据子流与天线之间只是简单的对应关系, 因此在检测过程中, 只要知道数据来自哪根天线即可以判断其是哪一层的数据, 检测过程较为简单。