



Space-Time Coding

空时编码技术

(澳) Branka Vucetic, Jinhong Yuan 著
王晓海 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

空 时 编 码 技 术

(澳) Branka Vucetic Jinhong Yuan 著

王晓海 黄开枝 杨 旻 等译
白红军 郭 炎 王 峰



机 械 工 业 出 版 社

本书从多输入多输出（MIMO）系统的信息容量极限及信道模型入手，对编码设计准则和主要的空时编码技术作了总体介绍，并积极引入相关领域知识，如空时编码的应用及在宽带无线信道中的性能评估。本书主要围绕空时编码的基本理论及在无线通信系统中的相关应用，如码分多址（CDMA）和正交频分复用（OFDMA）进行介绍，既有各种性能分析与仿真结果，又有生动的应用举例，还提供了基于科研导向的观点。本书适用对象为无线通信工程及相关专业的研究生、工程师和科研人员。

Branka Vucetic, Jinhong Yuan: Space-Time Coding

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley. All right reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面许可，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

图字：01-2003-6217

图书在版编目（CIP）数据

空时编码技术 / （澳）武西蒂奇（Vucetic, B.）等著；
王晓海等译. —北京：机械工业出版社，2004.7

ISBN 7-111-14695-6

I. 空… II. ①武… ②王… III. 无线电通信—编码—技术 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 064409 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：吉 玲（E-mail: jiling@mail.machineinfo.gov.cn）

责任印制：施 红

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·17.25 印张·423 千字

0001—4000 册

定价：28.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

[Http://www.machineinfo.gov.cn/book/](http://www.machineinfo.gov.cn/book/)

封面无防伪标均为盗版

译者序

21 世纪, 全球进入了信息时代, 信息的产生和传递非常迅速, 已影响了社会的各个方面。随着经济的增长、社会的发展和人们物质生活及精神生活水平的提高, 人们对通信提出了更新、更高的要求。

由于因特网和多媒体应用在下一代无线通信中的集成, 宽带高速数据通信服务的需求也不断增长, 而可利用的无线频谱是有限的, 只有使通信频谱的利用率得到显著提高, 才能满足通信容量的需求。

在第三代移动通信系统中, 空时编码 (space-time coding) 技术是抗信道衰落和提高系统容量的一种最新编码方法。近几年来, 许多机构都在研究基于 MIMO 天线系统的空时编码技术。多天线系统和空时编码的结合, 是空间资源利用技术的发展方向, 可以认为是一种高级的分集技术。研究表明, 空时编码可以使频谱利用率得到显著的提高。由于其在宽带系统中可以实现非常高的数据传输率, 因此, 空时编码技术被越来越多地应用于提供高数据传输率的业务 (例如视频会议) 和宽带无线信道中的移动计算。

本书介绍了空时编码技术及其在无线通信系统中的应用。全书共分为 8 章, 对空时编码的性能分析、编码设计及设计准则进行了探讨, 通过大量的推导介绍了各种空时编码方案的编码原理和译码算法, 通过对大量仿真结果的分析比较, 对编码性能进行了有效的评估。书中还介绍了空时编码的应用情况, 通过对一些方案在实际移动通信标准和系统中的应用以及移动通信的相关标准的介绍, 阐述了为什么要将空时编码列入第三代无线通信系统标准的理由。

本书的作者在空时编码技术的研究方面有着丰富的经验, 全书不仅提供了生动的应用举例, 更提供了各种性能分析与仿真结果, 适用于广大无线通信工程及相关专业的研究生、工程师以及科研人员。

本书由王晓海主持翻译。参加翻译工作的有: 王晓海、黄开枝、杨旻、白红军、郭炎、王峰; 参加审校工作的还有: 宋焱淼、邵振付、安辉、毛磊达、王红亮、周银东、王颖、张贤军等; 同时向吉玲、杨东凯、迟国强等对本书的翻译出版给予大力支持和帮助的朋友表示衷心的感谢。

限于学识, 本书在翻译过程中定有不当之处, 恳请广大读者批评指正。

译者

原 书 前 言

本书的主题是介绍空时编码，作者在相关教学、学术报告和商业顾问方面有着丰富的经验，主要介绍了有关空时编码的知识及在无线通信系统中的应用。

随着因特网和多媒体应用在下一代无线通信中的集成，宽带高速数据通信服务的需要正在不断增长。由于可用无线频谱资源的有限性，高数据速率只能通过高效的信号处理来实现。信息论领域近期的研究表明，在无线信道中使用多输入多输出（MIMO）系统可以显著提高通信容量。在无线链路两端设置多元素天线阵列就构成了 MIMO 信道。在 MIMO 信道中，空时编码是可以使信息容量接近理论容量的一种较实用的编码。空时编码的基础理论由 Tarokh、Seshadri 和 Calderbank 于 1998 年提出。自那以后，空时编码和相关的 MIMO 信号处理技术在无线通信领域取得了广泛应用和飞速的发展。

空时编码的依据是将发射信号在空域和时域都引入联合相关，不仅可以同时取得分集增益和编码增益，而且能得到很高的频谱效率。为了达到最优的编码和分集增益，最初的研究集中在发射信号的空间和时间独立的联合设计上。以后的重点逐渐转移到只有时间域编码的独立多发射天线上，研究的难点在于如何抑制和消除接收机信号之间的干扰。

本书适用对象为无线通信工程及相关专业的研究生、工程师和科研人员。同时读者应较好地熟悉基本的数字通信、矩阵分析和概率论知识。

本书从多输入多输出（MIMO）系统的信息容量限及信道模型入手，对编码设计准则和主要的空时编码技术作了总体介绍，并积极引入相关领域知识，如空时编码的应用及其在宽带无线信道中的性能评估。全书既有各种性能分析与仿真结果，又有生动的应用举例，适应广大研究生和工程师的要求和兴趣，书中提供的基于科研导向的观点则是针对部分高级读者的。本书主要围绕基本理论及其在无线通信系统中的相关应用进行组织，如码分多址（CDMA）和正交频分复用（OFDMA）。

全书采用统一符号，包括对所需问题的编址。

书中还包括了大量未曾发表的观点、性能分析和编码设计原则等一些有关空时编码的新的例证，与以往相比有更大的适用范围。关于 CDMA 系统和 OFDMA 系统中分层空时码和网络空时码的系统结构、性能分析和结论，也是以前从未发表过的。

本书的第 1 章和第 6 章由 Branka Vucetic 执笔；第 3 章和第 7 章由 Jinhong Yuan 执笔；第 8 章除去最后两节由 Branka Vucetic 和 Jinhong Yuan 共同完成外，其余由 Jinhong Yuan 执笔；第 2 章、第 4 章和第 5 章的大部分内容都是由 Branka Vucetic 和 Jinhong Yuan 共同完成的，第 2 章和第 4 章由 Jinhong Yuan 执笔，第 5 章由 Branka Vucetic 执笔。

目 录

译者序

原书前言

术语表	1
第 1 章 多输入多输出无线通信系统的性能局限	4
1.1 概述	4
1.2 MIMO 系统模型	4
1.3 MIMO 系统容量推导	6
1.4 自适应发送功率分配的 MIMO 信道容量的推导	10
1.5 具有固定系数信道的 MIMO 容量实例	10
1.6 具有随机信道系数的 MIMO 系统容量	14
1.6.1 快瑞利衰落和块瑞利衰落信道的 MIMO 信道容量	14
1.6.2 MIMO 慢瑞利衰落信道容量	22
1.6.3 MIMO 慢瑞利衰落信道容量的示例	22
1.7 系统参数和天线相关性对 MIMO 信道容量的影响	26
1.7.1 LOS MIMO 信道的相关模型	27
1.7.2 瑞利衰落信道 MIMO 相关模型	29
1.7.3 赖斯 MIMO 信道的相关模型	34
1.7.4 匙孔效应	36
1.7.5 有发射和接收散射体的 MIMO 相关衰落信道	37
1.7.6 系统参数对匙孔传播的影响	39
附录 1.1 注水原理	42
附录 1.2 Cholesky 分解	42
参考文献	43
第 2 章 空时编码的性能分析和编码设计	45
2.1 概述	45
2.2 衰落信道模型	45
2.2.1 多径传播	45
2.2.2 多普勒频移	45
2.2.3 衰落信道的统计模型	46
2.3 分集	49
2.3.1 分集技术	49
2.3.2 分集合并方法	50
2.3.3 发射分集	54
2.4 空时编码系统	56
2.5 空时编码的性能分析	58

2.5.1 慢衰落信道的差错率	59
2.5.2 快衰落信道的差错率	64
2.6 空时编码设计准则	67
2.6.1 慢瑞利衰落信道的编码设计准则	67
2.6.2 快瑞利衰落信道的编码设计准则	69
2.6.3 中低 SNR 范围的编码性能	72
2.7 编码性能的准确评估	73
参考文献	77
第 3 章 空时分组码	80
3.1 概述	80
3.2 Alamouti 空时编码	80
3.2.1 Alamouti 空时编码器	80
3.2.2 合并和最大似然译码	82
3.2.3 有多根接收天线的 Alamouti 方案	83
3.2.4 Alamouti 方案的性能	83
3.3 空时分组码 (STBC)	86
3.4 实信号星座的 STBC	88
3.5 复信号星座的 STBC	90
3.6 STBC 的译码	92
3.7 STBC 的性能	95
3.8 非理想信道估计对性能的影响	98
3.9 天线相关性对性能的影响	100
参考文献	100
第 4 章 空时网格码	102
4.1 概述	102
4.2 STTC 编码器结构	102
4.2.1 生成器简介	103
4.2.2 生成多项式简介	105
4.2.3 举例	105
4.3 慢衰落信道上的空时网格码设计	106
4.3.1 基于秩与行列式准则的最佳 STTC	107
4.3.2 基于迹准则的最佳 STTC	109
4.4 慢衰落信道上的性能评估	112
4.4.1 基于秩与行列式准则的编码性能	112
4.4.2 基于迹准则的编码性能	115
4.4.3 基于不同设计准则的编码性能对比	117
4.4.4 发射天线数对编码性能的影响	118
4.4.5 接收天线数对编码性能的影响	120
4.4.6 信道相关性对编码性能的影响	122
4.4.7 非理想的信道估计对编码性能的影响	122

4.5 快衰落信道下空时网格码的设计	123
4.6 快衰落信道上的性能评估	126
参考文献	129
第5章 空时 Turbo 网格编码	131
5.1 概述	131
5.2 递归 STTC 的性能	134
5.3 空时 Turbo 网格编码 (ST Turbo TC)	135
5.4 译码算法	136
5.5 ST Turbo TC 的性能	142
5.5.1 ST Turbo TC 和 STTC 的比较	142
5.5.2 记忆长度和交织器容量的影响	142
5.5.3 迭代次数的影响	144
5.5.4 分量编码设计的影响	144
5.5.5 译码器的 EXIT 表	147
5.5.6 交织器类型的影响	147
5.5.7 发射天线和接收天线数量的影响	147
5.5.8 天线相关的影响	150
5.5.9 非理想信道估计的影响	150
5.5.10 快衰落信道上的性能	150
附录 最大后验概率算法	155
参考文献	162
第6章 分层空时编码	164
6.1 概述	164
6.2 LST 发射机	164
6.3 LST 接收机	167
6.3.1 QR 分解干扰抑制和干扰抵消	169
6.3.2 最小均方误差 (MMSE) 干扰抑制和干扰抵消	170
6.3.3 迭代 LST 接收机	173
6.3.4 具有 PIC 的迭代接收机	175
6.3.5 迭代 MMSE 接收机	183
6.3.6 迭代 MMSE 接收机和迭代 PIC-DSC 接收机的比较	185
6.4 不同 LST 结构的比较	187
附录 QR 分解	193
参考文献	194
第7章 差分空时分组码	198
7.1 概述	198
7.2 单根发射天线的差分编码	198
7.3 发射天线数为 2 的差分 STBC	199
7.3.1 差分编码	199
7.3.2 差分译码	203

7.3.3 性能仿真	205
7.4 发射天线数为 3 和 4 的实信号星座的差分 STBC	207
7.4.1 差分编码	207
7.4.2 差分译码	208
7.4.3 性能仿真	210
7.5 发射天线数为 3 和 4 的复信号星座的差分 STBC	211
7.5.1 差分编码	211
7.5.2 差分译码	212
7.5.3 性能仿真	213
7.6 酉空时调制	214
7.7 酉群码	216
参考文献	218
第 8 章 宽带系统的空时编码	219
8.1 概述	219
8.2 空时编码在频率选择性衰落信道上的性能	219
8.2.1 频率选择性衰落信道	219
8.2.2 性能分析	220
8.3 宽带 OFDM 系统中的 STC	222
8.3.1 OFDM 技术	222
8.3.2 STC-OFDM 系统	224
8.4 STC-OFDM 系统的容量	226
8.5 STC-OFDM 系统的性能分析	228
8.6 STC-OFDM 系统的性能评估	230
8.6.1 单径衰落信道上的性能	230
8.6.2 交织器对性能的影响	231
8.6.3 逐符号汉明距离对性能的影响	231
8.6.4 路径数对性能的影响	232
8.7 级联空时码在 OFDM 系统上的性能	233
8.7.1 OFDM 系统上的级联 RS-STC	233
8.7.2 OFDM 系统上的级联 CONV-STC	234
8.7.3 OFDM 系统上的 ST Turbo TC	234
8.8 CDMA 系统中的发射分集方案	234
8.8.1 系统模型	235
8.8.2 CDMA 的开环发射分集	236
8.8.3 CDMA 的闭环发射分集	237
8.8.4 时间切换正交发射分集 (TS-OTD)	238
8.8.5 空时扩展 (STS)	239
8.8.6 天线数为 3 和 4 的 STS	240
8.9 CDMA 系统的空时编码	243
8.10 STTC 在 CDMA 系统中的性能	244

8.10.1 空时匹配滤波器检测器	246
8.10.2 空时 MMSE 多用户检测器	248
8.10.3 空时迭代 MMSE 检测器	250
8.10.4 性能仿真	252
8.11 分层 STC 在 CDMA 系统中的性能	255
参考文献	262

术 语 表

- 3GPP: 第三代移动通信伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project)
- APP: 后验概率 (a posteriori probability)
- AWGN: 加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise)
- BER: 误比特率 (bit error rate)
- BPSK: 二进制相移键控 (binary phase shift keying)
- CCSDS: 空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems)
- ccdf: 互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function)
- cdf: 累积分布函数 (cumulative distribution function)
- CDMA: 码分多址 (code division multiple access)
- CRC: 循环冗余校验 (cyclic redundancy check)
- CSI: 信道状态信息 (channel state information)
- DAB: 数字音频广播 (digital audio broadcasting)
- DFT: 离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform)
- DLST: 对角分层空时 (diagonal layered space-time)
- DLSTC: 对角分层空时码 (diagonal layered space-time code)
- DOA: 波达方向 (direction of arrival)
- DPSK: 差分相移键控 (differential phase-shift keying)
- DS-CDMA: 直接序列码分多址 (direct-sequence code division multiple access)
- DSC: 判决统计合并 (decision statistics combining)
- DSSS: 直接序列扩频 (direct-sequence spread spectrum)
- DVB: 数字视频广播 (digital video broadcasting)
- EGC: 等增益合并 (equal gain combining)
- EIR: 外部信息率 (extrinsic information ratio)
- EXIT: 外部信息转移表 (extrinsic information transfer chart)
- FDMA: 频分多址 (frequency division multiple access)
- FER: 误帧率 (frame error rate)
- FFT: 快速傅里叶变换 (fast Fourier transform)
- GCD: 最大公约数 (greatest common divisor)
- GSM: 全球移动通信系统 (global system for mobile)
- HLST: 水平分层空时 (horizontal layered space-time)
- HLSTC: 水平分层空时码 (horizontal layered space-time code)
- ISI: 符号间干扰 (intersymbol interference)
- LDPC: 低密度校验码 (low density parity check)
- LLR: 对数似然比 (log-likelihood ratio)

LMMSE: 线性最小均方误差 (linear minimum mean square error)
LOS: 视距 (line-of-sight)
LST: 分层空时 (layered space-time)
LSTC: 分层空时码 (layered space-time code)
M-PSK: M 进制移相键控 (M -ary phase-shift keying)
MAI: 多址干扰 (multiple access interference)
MAP: 最大后验概率 (maximum a posteriori)
MGF: 矩生成函数 (moment generating function)
MF: 匹配滤波器 (matched filter)
MIMO: 多输入多输出 (multiple-input multiple-output)
ML: 最大似然 (maximum likelihood)
MLSE: 最大似然序列估计 (maximum likelihood sequence estimation)
MMSE: 最小均方误差 (minimum mean square error)
MRC: 最大比合并 (maximum ratio combining)
OFDM: 正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing)
OTD: 正交发送分集 (orthogonal transmit diversity)
pdf: 概率密度函数 (probability density function)
PIC: 并行干扰抵消 (parallel interference canceler)
PN: 伪随机数 (pseudorandom number)
PSK: 相移键控 (phase shift keying)
QAM: 正交幅度调制 (quadrature amplitude modulation)
QPSK: 正交相移键控 (quadrature phase-shift keying)
rms: 方均根 (root mean square)
RSC: 递归系统卷积码 (recursive systematic convolutional)
SER: 误符号率 (symbol error rate)
SISO: 软输入软输出 (soft-input soft-output)
SNR: 信噪比 (signal-to-noise ratio)
SOVA: 软输出 Viterbi 算法 (soft-output Viterbi algorithm)
STC: 空时码 (space-time code)
STBC: 空时分组码 (space-time block code)
STTC: 空时网格码 (space-time trellis code)
STS: 空时扩展分集 (space-time spreading)
SVD: 奇异值分解 (singular value decomposition)
TCM: 网格编码调制 (trellis coded modulation)
TDMA: 时分多址 (time division multiple access)
TLST: 螺旋分层空时 (threaded layered space-time)
TLSTC: 螺旋分层空时码 (threaded layered space-time code)
TS-OTD: 时间切换正交发送分集 (time-switched orthogonal transmit diversity)
TS-STC: 时间切换空时码 (time-switched space-time code)

UMTS: 通用移动通信系统 (universal mobile telecommunication systems)

VA: Viterbi 算法 (Viterbi algorithm)

VBLAST: 垂直-贝尔实验室分层空时 (vertical Bell Laboratories layered space-time)

VLST: 垂直分层空时 (vertical layered space-time)

VLSTC: 垂直分层空时码 (vertical layered space-time code)

WCDMA: 宽带码分多址 (wideband code division multiple access)

WLAN: 无线局域网 (wireless local area network)

ZF: 迫零 (zero forcing)

第 1 章 多输入多输出无线通信系统的性能局限

1.1 概述

随着蜂窝移动通信、因特网和多媒体业务的发展,世界范围内无线通信的容量需求在迅速增长。另一方面,可利用的无线频谱是有限的,如果通信频谱的利用率没有得到显著提高,就不可能满足通信容量的需求。在单天线链路系统中,采用先进的编码(例如 turbo 码^[5]和低密度奇偶校验码^{[6][7]})可以接近香农容量极限^[4]。通过增加发射端和接收端^{[1][2]}的天线数量,可以进一步显著提高频谱利用率。

本章推导和讨论了在多输入多输出(MIMO)信道上传输的基本容量极限,主要基于 Telatar^[2]和 Foschini^[1]的理论工作。这些容量极限强调了 MIMO 信道在理想传播条件下的潜在频谱利用率与天线数量呈线性关系。假定信号可以被任意长的空时码编码,则信道容量可以表示为在任意低的误码率的情况下所能达到的最大数据速率。在后续章节中,我们讨论了一些实际的编码技巧,这些编码在接近推导出来的容量极限方面有很大潜力。已经证明,采用贝尔实验室的分层空时(BLAST)编码技术^[3]可以获得高达 42bit/s/Hz 的频谱利用率。这与目前在蜂窝移动系统和无线局域网系统中可获得的频谱利用率 2~3bit/s/Hz 相比,是一次显著的提高。

可以采用多元素天线阵列实现 MIMO 信道。一种令人感兴趣的特殊传播方式是将特定的发射天线和接收天线对之间的信道等效成独立的平坦瑞利衰落信道。由于本章仅限于对窄带信道进行分析,因而可以用频率平坦模型描述它们。第 8 章中,我们通过把一个宽带信道考虑成一组正交窄带信道,从而得出针对宽带信道的一般性结论。对于存在大量散射体的环境来说,瑞利模型与实际情况比较接近。在独立瑞利衰落信道中,从每个发射天线发出的信号在每个接收天线处是不相关的。因此,从每个发射天线发出的信号在接收天线处都有它自己的空间特征。

对于天线元素的间距远大于载波波长,或者来波入射角度展宽相当大(大于 30°)的 MIMO 信道,可以将其近似为独立的瑞利衰落模型。蜂窝无线系统中的下行链路是此类信道的一个示例。在远高于地面的基站中,由于来波信号角度扩展较小,天线信号是相关的;为了获得相邻天线元素之间的独立信号,就需要比较大的来波入射角度以扩展更大的天线间隔。

很多测量和实验结果显示,如果基站接收机使用两根天线提供分集,那么它们要相隔 10 个波长才能确保不相关。与此相似,测量显示:手机要得到相同的分集增益,需要把天线分开大约 3 个波长。

1.2 MIMO 系统模型

假定一个点对点 MIMO 系统有 n_T 个发射天线、 n_R 个接收天线。集中于用离散时间描述

的复基带线性系统模型。系统框图如图 1-1 所示。用 $n_T \times 1$ 列矩阵 $\mathbf{x}$ 表示每个符号周期内的发射信号，其中第 i 个元素 x_i 表示第 i 根天线发射的信号。

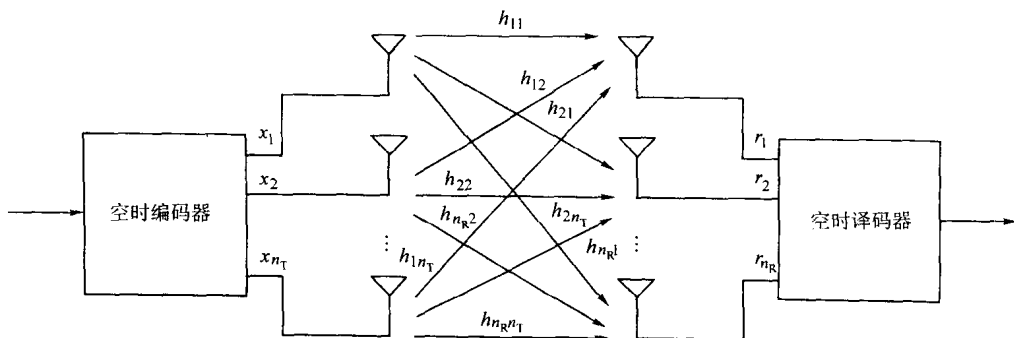


图 1-1 MIMO 系统框图

对于高斯信道，按照信息论^[4]，发射信号的最佳分布也是高斯分布。因此， $\mathbf{x}$ 的元素是零均值独立同分布的高斯变量。发射信号的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} \quad (1-1)$$

式中， $E\{\cdot\}$ 代表均值； $\mathbf{A}^H$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的厄米特（Hermitian）转置矩阵，即 $\mathbf{A}$ 的复共轭转置矩阵。不管发射天线数 n_T 为多少，总的发射功率限制为 P ，可表示为

$$P = \text{tr}(\mathbf{R}_{xx}) \quad (1-2)$$

式中， $\text{tr}(\mathbf{A})$ 代表矩阵 $\mathbf{A}$ 的迹，可以通过对 $\mathbf{A}$ 的对角元素求和得到。如信道在发射端未知，则假定从各个天线发射的信号都有相等的功率 P/n_T 。发射信号的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{P}{n_T} \mathbf{I}_{n_T} \quad (1-3)$$

式中， $\mathbf{I}_{n_T}$ 是 $n_T \times n_T$ 单位矩阵。由于发射信号的带宽足够窄，因此可认为它的频率响应是平坦的。换句话说，假定信道是无记忆的。

用 $n_R \times n_T$ 的复矩阵 $\mathbf{H}$ 描述信道。 h_{ij} 表示矩阵 $\mathbf{H}$ 的第 ij 个元素，代表从第 j 根发射天线到第 i 根接收天线之间的信道衰落系数。为了规范，假定 n_R 根接收天线中每一根天线的接收功率等于总的发射功率。这种假定，实际上忽略了信号传播过程中的信号衰减和放大，包括阴影、天线增益等。于是得到了有确定系数的信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的元素的规范限定，如下式所示：

$$\sum_{j=1}^{n_T} |h_{ij}|^2 = n_T, \quad i=1, 2, \dots, n_R \quad (1-4)$$

当信道矩阵元素为随机变量时，规范就是对上述表达式取期望值。

假定已知接收端信道矩阵，但发射端不确定。那么可以通过在接收端发射测试序列来估计信道矩阵。再通过可靠的反馈信道将估计的信道状态信息（CSI）发送到发射端。

信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的元素可能是确定的，也可能是随机的。我们重点对与无线通信相关的示

例进行分析, 包括信道矩阵元素的瑞利 (Rayleigh) 分布和赖斯 (Rician) 分布。在多数情况下, 假定它是瑞利分布, 因为对于非视距 (NLOS) 无线传播来说, 它最具有代表性。

可以用 $n_R \times 1$ 的列矩阵描述接收端的噪声, 表示为 $\mathbf{n}$ 。它的元素是统计独立的复零均值高斯变量, 它具有独立的、方差相等的实部和虚部。接收噪声的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{nn} = E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\} \quad (1-5)$$

如果 $\mathbf{n}$ 的元素之间没有相关性, 则接收噪声的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{nn} = \sigma^2 \mathbf{I}_{n_R} \quad (1-6)$$

n_R 个接收分支中每一个都有相同的噪声功率 σ^2 。

接收端基于最大似然准则, 在 n_R 根接收天线上进行联合操作。用 $n_R \times 1$ 的列矩阵描述接收信号, 表示为 $\mathbf{r}$, 其中每个复元素代表一根接收天线。 P_r 表示每根接收天线输出端的平均功率。每根接收天线处的平均信噪比 (SNR) 定义为

$$\gamma = \frac{P_r}{\sigma^2} \quad (1-7)$$

假定每根天线的总接收功率都等于总发射功率, 则 SNR 等于总的发射功率和每根接收天线的噪声功率的比值, 而且它独立于 n_T , 可写为

$$\gamma = \frac{P}{\sigma^2} \quad (1-8)$$

使用线性模型, 可将接收矢量表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1-9)$$

接收信号的协方差矩阵定义为 $E\{\mathbf{r}\mathbf{r}^H\}$, 利用式 (1-9), 可以得出

$$\mathbf{R}_{rr} = \mathbf{H}\mathbf{R}_{xx}\mathbf{H}^H \quad (1-10)$$

而总接收信号功率可表示为 $\text{tr}(\mathbf{R}_{rr})$ 。

1.3 MIMO 系统容量推导

系统容量定义为在保证误码率任意小的条件下的最大发射速率。首先, 假设信道矩阵在发射端为未知, 在接收端为已知。

由奇异值分解 (SVD) 理论^[11], 任何一个 $n_R \times n_T$ 矩阵 $\mathbf{H}$ 可以写成

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H \quad (1-11)$$

式中, $\mathbf{D}$ 是 $n_R \times n_T$ 非负对角矩阵; $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 分别是 $n_R \times n_R$ 和 $n_T \times n_T$ 的正交矩阵。则有 $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{I}_{n_R}$ 和 $\mathbf{V}\mathbf{V}^H = \mathbf{I}_{n_T}$, 其中 $\mathbf{I}_{n_R}$ 和 $\mathbf{I}_{n_T}$ 分别是 $n_R \times n_R$ 和 $n_T \times n_T$ 单位阵。 $\mathbf{D}$ 的对角元素是矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值的非负平方根。 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值 (用 λ 表示) 定义为

$$\mathbf{H}\mathbf{H}^H \mathbf{y} = \lambda \mathbf{y}, \quad \mathbf{y} \neq 0 \quad (1-12)$$

式中, $\mathbf{y}$ 是与 λ 相对应的 $n_R \times 1$ 维矢量, 称为特征矢量。

特征值的非负平方根也称为 $\mathbf{H}$ 的奇异值, 而且 $\mathbf{U}$ 的列矢量是 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征矢量, $\mathbf{V}$ 的列矢量是 $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$ 的特征矢量。把式 (1-11) 代入式 (1-9), 可以得到接收矢量 $\mathbf{r}$

$$\mathbf{r} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1-13)$$

引入下列变换:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}' &= \mathbf{U}^H\mathbf{r} \\ \mathbf{x}' &= \mathbf{V}^H\mathbf{x} \\ \mathbf{n}' &= \mathbf{U}^H\mathbf{n} \end{aligned} \quad (1-14)$$

$\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 是可逆的。显然, 式 (1-14) 中定义的矩阵 $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{n}$ 与相应矩阵的乘积仅有一个缩放比例的效果。矢量 $\mathbf{n}'$ 是一个零均值高斯随机变量, 其实部和虚部独立同分布。这样, 前面讨论的信道与下式所描述的信道是等价的。

$$\mathbf{r}' = \mathbf{D}\mathbf{x}' + \mathbf{n} \quad (1-15)$$

矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的非零特征值的数量等于矩阵 $\mathbf{H}$ 的秩, 用 r 表示。对 $n_R \times n_T$ 矩阵 $\mathbf{H}$, 秩的最大值为 $m = \min(n_R, n_T)$, 也就是说, 至多有 m 个奇异值是非零的。用 $\sqrt{\lambda_i}$ 表示 $\mathbf{H}$ 的奇异值。将 $\sqrt{\lambda_i}$ 代入式 (1-15), 得到接收信号元素为

$$\begin{aligned} r'_i &= \sqrt{\lambda_i} x'_i + n'_i \quad (i=1, 2, \dots, r) \\ r'_i &= n'_i \quad (i=r+1, r+2, \dots, n_R) \end{aligned} \quad (1-16)$$

式 (1-16) 显示, 接收元素 r'_i ($i=r+1, r+2, \dots, n_R$) 并不依赖于发射信号, 即信道增益是零。另一方面, 接收元素 r'_i ($i=1, 2, \dots, r$) 仅仅取决于发射元素 x'_i 。因此, 可以认为, 通过式 (1-15) 得到的等效 MIMO 信道是由 r 个去耦平行子信道组成的。为每个子信道分配的矩阵 $\mathbf{H}$ 的奇异值, 相当于信道幅度增益。因此, 信道功率增益等于矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值。例如, 如果 $n_T > n_R$, 由于 $\mathbf{H}$ 的秩不可能比 n_R 高, 那么式 (1-16) 显示了在等效的 MIMO 信道中, 最多有 n_R 个非零增益子信道, 如图 1-2 所示。

另一方面, 如果 $n_R > n_T$, 在等效的 MIMO 信道中, 最多有 n_T 个非零增益子信道, 如图 1-3 所示。特征值谱是对 MIMO 信道的一种描述方式, 适用于对最佳发射路径进行估计。

由式 (1-14), 可以导出信号 $\mathbf{r}'$ 、 $\mathbf{x}'$ 和 $\mathbf{n}'$ 的协方差矩阵和它们的迹

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{r'r'} &= \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{rr} \mathbf{U} \\ \mathbf{R}_{x'x'} &= \mathbf{V}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{V} \\ \mathbf{R}_{n'n'} &= \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{nn} \mathbf{U} \end{aligned} \quad (1-17)$$

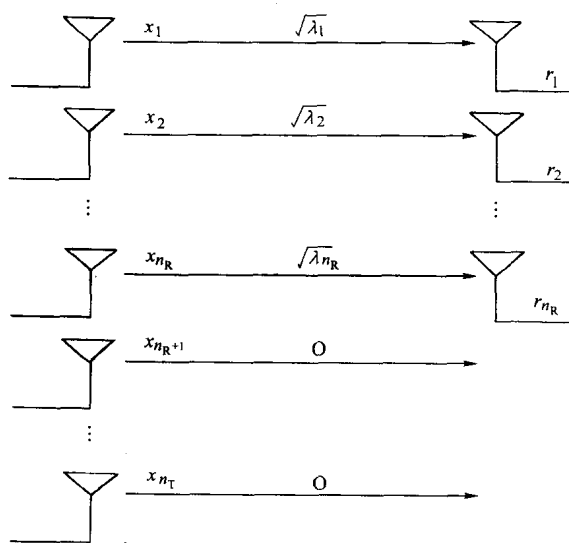


图 1-2 $n_T > n_R$ 时的等效 MIMO 信道框图