

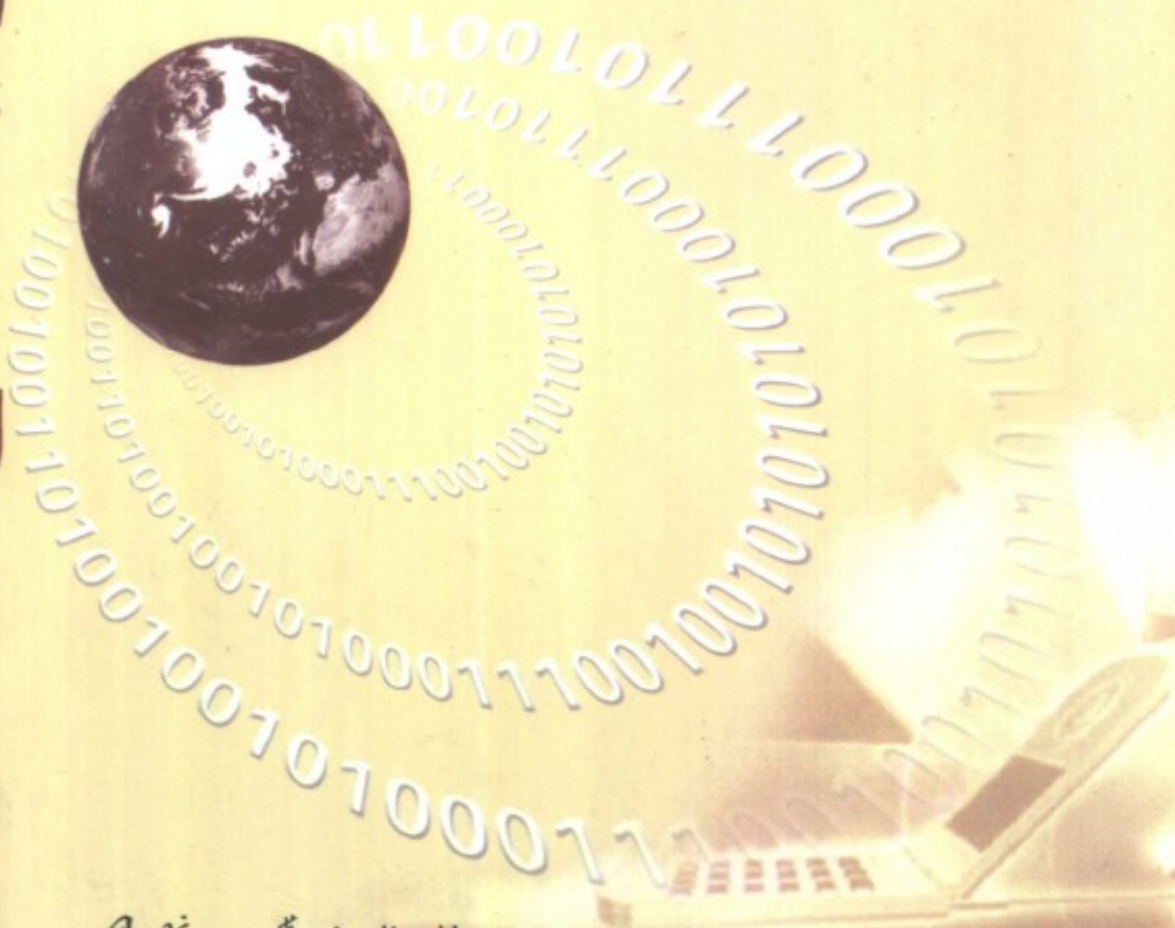
COMMUNICATION



通信信号处理

张贤达 保铮 著

SIGNAL PROCESSING



国防工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

通信信号处理

COMMUNICATION SIGNAL PROCESSING

张贤达 保铮 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

通信信号处理/张贤达,保铮著. —北京:国防工业出版社,2000.12

ISBN 7-118-02443-0

I.通... II.①张... ②保... III.通信-信号处理
IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 73589 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 39 $\frac{3}{4}$ 903 千字

2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:66.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

最近十几年, 无线通信经历了巨大的变化。尤其是数字通信技术的诞生与应用, 更是极大地推动了移动通信技术的革命性发展。可以毫不夸张地说, 数字通信技术和计算机技术是信息学科中发展最为迅速的两个领域。

最近几年, 随着数字通信技术的发展, 作为两个学科的交叉点, 通信信号处理不仅吸引了通信学科的大批研究人员, 而且还吸引了信号与信息处理学科的大批研究人员竞相投入。两个学科优势互补, 使通信信号处理在短短的几年间便获得了极其迅速的发展, 迅速成为通信和信号处理学科共同的研究亮点, 并保持着强劲的发展势头。可以预料, 随着第三代通信系统的涌现和普及, 以及对第四代通信系统的开发, 通信信号处理在 21 世纪将会有更大、更重要的发展。

伴随着数字通信技术的发展, 国内外出版了大量有关数字无线通信的著作, 其中许多是优秀之作。但是, 由于通信信号处理的迅速发展相对较晚, 所以通信信号处理的专著和教材还甚少, 国内尚属空缺。本书旨在填补这一空白, 为从事通信和信号处理研究与应用的广大研究人员、科技工作者、大学高年级学生、研究生和教师提供一部富有使用和参考价值的通信信号处理专著。

本书由十五章组成。除第一章为概论外, 其它各章分为两大部分: 通信信号与信道(第二至八章)和通信信号处理(第九至十五章)。

与信号处理的理论基础为“信号与系统”一样, “通信信号与信道”构成了通信信号处理的理论基础。本书的这一部分主要论述通信信号的表示及特征(第二章)、无线信道的动态特性与参数(第三章)、调制技术(第四章)、分集接收与最佳接收机(第五章)、扩频信号(第六章)、多址通信技术(第七章)、信源编码与信道编码(第八章)。与专门介绍通信技术和系统的书不同, 这七章紧紧围绕通信信号分析与处理所必需的基础知识, 对通信信号与信道的表示及分析进行系统的阐述。

在本书的第二部分里, 我们系统介绍了通信信号处理具有代表性的主要理论、方法及应用, 包括: 信道辨识与均衡(第九章)、自适应均衡(第十章)、阵列信号处理(第十一章)、通信中的自适应阵列处理(第十二章)、多用户检测(第十三章)、空时二维处理(第十四章)和 CDMA 系统的信号处理(第十五章)。这一部分既包括了通信信号处理的基本理论和方法, 又介绍了最近几年涌现的大量新理论和新方法。

我们著述本书的立足点是: 使读者能够尽快与通信信号处理的新发展“接轨”, 吸引更多的大学教师、高年级学生、研究生和科研单位、公司的科技工作者参加到通信信号处理的研究行列里来, 共同推动我国通信信号处理研究及应用的发展, 赶超世界先进水平。为此, 本书力图在以下几个方面形成特点:

(1) 体系新、选材广: 本书是我国第一部系统和全面论述通信信号处理基础知识以及各主要研究领域的理论、方法及应用的著作, “通信信号与信道”部分包括了数字移动通

信系统和技术的必要知识,以及信号与信道分析的完整理论;“通信信号处理”部分则充分反映了通信技术近 10 年取得的最重要的信号处理新进展,两部分各章内容紧密联系,构成了一个有机的整体。

(2) 内容新颖、有较高的学术水平:本书的“通信信号与信道”部分是在充分参考了国内外有关数字移动通信的优秀之作,并结合我们对通信信号与信道分析的理解写成的,书中第二部分“通信信号处理”则基本上选材自国际权威或著名杂志上发表的研究成果,很大一部分是近几年才发表的新成果。书中充分反映了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室和清华大学自动化系现代信号处理研究组多年来在现代信号处理、阵列信号处理、空时二维处理、自适应信号处理、高阶统计量理论、非平稳信号处理、盲信号处理和通信信号处理领域的相关工作积累和研究成果。

(3) 可读性强:我们著述本书的指导思想是既保证全书的高质量和高水平,又力求把可读性放在第一位。为此,特别注意了通信和信号处理两个不同学科读者的知识背景的不同。本书图文并茂,共有插图 236 幅、表格 29 个。

(4) 应用背景强:通信信号处理是实用性很强的信号处理新技术,本书紧紧围绕通信信号的最佳接收方法进行论述,书中以算法形式对大量的方法进行了总结和归纳。

概括地讲,我们的愿望是为广大读者奉献一部可读性、学术性和实用性都能够比较满意的著作。

但是,由于通信和信号处理学科发展都极其迅速,通信信号处理是实用性很强的新技术,我们又希望将最新成果介绍给读者,因而在内容的选取、组织,问题的分析和论述等方面可能存在诸多的不足和问题,诚恳欢迎广大读者提出批评与指正。

陈俊亮教授、侯朝焕教授、王越教授三位中科院院士热情推荐本书申请国家科学技术学术著作出版基金,并对本书的写作提出了许多极为宝贵的意见,谨向他们致以诚挚的谢意!西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室的冯大政教授、楼顺天博士后和博士生李小军、朱孝龙、陈建峰、冶继民,清华大学自动化系博士生周雷、杨恒、赵锡凯、时宇、硕士生隗伟等认真阅读了本书书稿,提出了一些很好的改正意见,朱孝龙博士生还为本书的插图做了大量实际工作,在此一并向他们表示感谢。

我们关于通信信号处理的研究以及相关的信号处理课题研究得到了国家自然科学基金(包括重点基金项目)、国家 863 课题、教育部高等学校博士点专项基金、国防科技预研基金、国防科技重点实验室基金等的长期资助,近年还得到深圳市华为技术有限公司在西安电子科技大学和清华大学设立的科技基金的资助。如果没有这些基金课题的资助,我们就不可能在现代信号处理和雷达信号处理等相关研究上有长期的工作积累,近几年也难以对通信信号处理开展一系列深入研究,本书也就不可能现在问世。

最后衷心感谢国家科学技术学术著作出版基金的资助!

张贤达

谨识于 2000 年 7 月

保铮

目 录

第一章 概论	1
1.1 无线通信技术的重大变革	1
1.2 通信信号处理的主要研究领域	5
1.3 本书的结构与内容安排	8
1.4 对读者使用本书的几点建议	9
第二章 通信信号的表示及特征	11
2.1 平稳过程与循环平稳过程	11
2.1.1 平稳过程	11
2.1.2 循环平稳过程	13
2.2 复信号	17
2.2.1 解析信号	18
2.2.2 基带信号	20
2.3 窄带信号与系统的复基带表示	22
2.3.1 窄带信号的复基带表示	22
2.3.2 信道及其输出的复基带表示	26
2.4 随机信号的复基带表示	30
2.4.1 广义平稳信号的复基带表示	30
2.4.2 广义循环平稳信号的复基带表示	33
2.5 带限信号与带限信道	35
2.6 周期信号的相关函数	37
本章小结	39
第三章 无线信道	40
3.1 引言	40
3.2 自由空间的无线信号传播模型	41
3.3 反射、绕射与散射	44
3.3.1 反射	44
3.3.2 绕射	48
3.3.3 散射	51
3.4 阴影衰落	54
3.5 多径传输信道的冲激响应模型	56
3.5.1 影响多径衰落的因素	56
3.5.2 冲激响应模型	57

3.6	衰落信道的动态特性	60
3.6.1	衰落信道的动态特性	60
3.6.2	信道的特征参数	65
3.7	慢衰落和快衰落	67
3.7.1	慢衰落	68
3.7.2	快衰落	68
3.8	选择性衰落	72
3.8.1	多普勒扩展 (时间选择性衰落)	73
3.8.2	时延扩展 (频率选择性衰落)	75
3.8.3	角度扩展 (空间选择性衰落)	79
3.9	干扰	80
3.9.1	信道畸变和码间干扰	80
3.9.2	同信道干扰	84
3.9.3	邻信道干扰	86
3.10	信号模型	87
3.11	时变信道的计算机仿真	89
3.11.1	无线信道仿真的两类方法	89
3.11.2	无线信道仿真的谐波分解算法	90
	本章小结	93
第四章	移动通信的调制技术	94
4.1	调幅	94
4.1.1	双边带抑制载波	95
4.1.2	单边带调幅	95
4.1.3	调幅信号的解调	97
4.2	调频与调相	98
4.2.1	调频	98
4.2.2	调相	100
4.2.3	调频信号的解调	101
4.3	脉冲成形技术	102
4.3.1	码间干扰对消的 Nyquist 准则	102
4.3.2	升余弦脉冲成形滤波器	104
4.3.3	具有匹配滤波的 Nyquist 准则	107
4.4	二进制数字调制	108
4.4.1	线性调制信号的功率谱	108
4.4.2	二进制幅度键控 (BASK)	111
4.4.3	二进制频移键控 (BFSK)	112
4.4.4	二进制相移键控 (BPSK)	113
4.4.5	二进制差分相移键控 (DPSK)	114

4.5	多进制数字调制	116
4.5.1	多进制幅度键控 (MASK) 与脉冲幅度调制 (PAM)	116
4.5.2	正交幅度调制 (QAM)	118
4.5.3	多进制相移键控 (MPSK)	119
4.5.4	四相相移键控 (QPSK)	120
4.5.5	多进制频移键控 (MFSK)	123
4.6	恒包络调制	123
4.6.1	偏移四相相移键控 (OQPSK)	124
4.6.2	$\pi/4$ 四相相移键控 ($\pi/4$ QPSK)	126
4.6.3	最小频移键控 (MSK)	129
4.6.4	高斯最小频移键控 (GMSK)	132
	本章小结	133
第五章	分集接收与最佳接收机	134
5.1	分集接收	134
5.1.1	几种基本的空间分集技术	135
5.1.2	极化分集	138
5.2	相关接收机	139
5.2.1	最佳判决	139
5.2.2	Karhunen-Loeve 展开	141
5.2.3	相关接收机	142
5.2.4	使用相关接收机的通信系统模型	144
5.3	匹配滤波接收机	146
5.3.1	匹配滤波器的一般原理	146
5.3.2	单用户信道的匹配滤波检测	149
5.3.3	多址通信的匹配滤波接收机	151
5.3.4	匹配滤波检测器的最佳判决区	153
5.4	RAKE 接收机	154
5.4.1	RAKE 接收机的工作原理	154
5.4.2	抽头延迟线信道模型	155
5.4.3	RAKE 接收机的实现	157
	本章小结	158
第六章	扩频信号	159
6.1	扩频原理	159
6.1.1	扩频	160
6.1.2	相关接收与解扩	161
6.2	伪噪声序列	163
6.2.1	m 序列	164

6.2.2 Gold 序列与 Kasami 序列	166
6.3 直接序列扩频信号	169
6.3.1 特征波形	170
6.3.2 扩频因子	172
6.3.3 扩频信号	174
6.3.4 随机扩频序列的互相关函数	176
6.4 跳频扩频信号	178
6.4.1 跳频扩频信号	178
6.4.2 直接序列扩频与跳频方法的比较	179
6.5 扩频技术的应用	180
6.5.1 码间干扰抑制	180
6.5.2 多址干扰抑制	181
本章小结	182
第七章 多址通信技术	183
7.1 窄带和宽带多址系统	183
7.2 时分多址 (TDMA)	185
7.3 频分多址 (FDMA)	188
7.4 码分多址 (CDMA)	189
7.4.1 CDMA 的基本工作原理	190
7.4.2 DS-CDMA 系统	192
7.5 CDMA 系统的几个问题	196
7.5.1 远近效应与功率控制	196
7.5.2 捕获 (粗同步)	197
7.5.3 跟踪 (细同步)	198
7.6 CDMA 系统的数学模型	200
本章小结	203
第八章 信源编码与信道编码	204
8.1 信源的数学模型与信息测度	204
8.1.1 信源的数学模型	204
8.1.2 熵与平均互信息	205
8.2 离散和模拟信源的编码	207
8.2.1 离散无记忆信源的编码	207
8.2.2 离散平稳信源的编码	210
8.2.3 模拟信源的编码	211
8.3 信道编码的基本概念	212
8.3.1 信道容量	212
8.3.2 检错与纠错	214

8.4 线性分组码	215
8.4.1 分组码的性质	215
8.4.2 生成矩阵与奇偶校验矩阵	218
8.4.3 几种典型的分组码	219
8.5 卷积码	223
8.5.1 卷积码及其表示	223
8.5.2 卷积码的译码	225
本章小结	225
第九章 信道辨识与均衡	226
9.1 反卷积和均衡的基本考虑	226
9.1.1 反卷积的基本考虑	226
9.1.2 盲均衡问题的数学描述	229
9.2 信道具有码间干扰时的最佳接收	232
9.2.1 字符序列的最佳估计算法	232
9.2.2 MLSE 接收机	234
9.2.3 Viterbi 算法	239
9.3 线性均衡器	242
9.3.1 信道的等效离散时间模型	242
9.3.2 两种线性均衡器	244
9.4 决策反馈均衡器	246
9.5 分数间隔均衡器	249
9.5.1 为什么需要分数间隔均衡器	249
9.5.2 分数间隔均衡器的系统模型	251
9.5.3 无噪声情况下的完全均衡	253
9.5.4 有噪声情况下的完全均衡	256
本章小结	257
第十章 自适应均衡	258
10.1 Kalman 滤波	258
10.1.1 Kalman 滤波问题	258
10.1.2 新息过程	259
10.1.3 Kalman 滤波算法	260
10.2 LMS 类自适应算法	261
10.2.1 LMS 算法及其基本变型	262
10.2.2 解相关 LMS 算法	262
10.3 RLS 自适应算法	265
10.3.1 RLS 算法	265
10.3.2 快速 RLS 算法	268

10.4	Bussgang 自适应均衡算法	270
10.4.1	实基带信道的 Bussgang 自适应均衡	270
10.4.2	复基带信道的 Bussgang 自适应均衡	276
10.5	基于高阶统计量的盲均衡	277
10.5.1	高阶统计量	277
10.5.2	基于倒三谱的盲均衡	280
10.5.3	自适应倒三谱均衡算法	284
10.6	基于循环倒谱的盲均衡	287
10.7	利用接收端循环平稳性的盲信道辨识与均衡	292
10.7.1	过采样信号与过采样信道	292
10.7.2	盲信道辨识与盲均衡的时域方法	297
10.7.3	盲信道辨识与盲均衡的多信道方法	299
10.8	利用发射端循环平稳性的盲信道辨识与均衡	300
10.8.1	调制产生循环平稳性	300
10.8.2	信道估计与信道均衡算法	302
10.9	多信道盲辨识的子空间方法	305
10.9.1	问题的描述	305
10.9.2	子空间分解	306
10.9.3	子空间方法	308
	本章小结	309
第十一章	阵列信号处理	310
11.1	平面波与阵列	310
11.2	等距线阵与均匀圆阵	312
11.2.1	等距线阵	312
11.2.2	等距线阵的阵列响应与方向图	314
11.2.3	均匀圆阵	316
11.3	阵列信号处理的统计模型	316
11.3.1	窄带信号的延迟	316
11.3.2	连续时间信道模型	317
11.3.3	阵列信号处理的统计模型	318
11.4	波束形成	320
11.4.1	波束形成的最佳权向量	321
11.4.2	Bartlett 波束形成器	324
11.4.3	Capon 波束形成器	325
11.5	MUSIC 方法	326
11.5.1	基本 MUSIC 算法	327
11.5.2	MUSIC 算法的改进	328
11.5.3	求根 - MUSIC 方法	331

11.6	ESPRIT 方法	332
11.6.1	基本 ESPRIT 算法	332
11.6.2	TLS-ESPRIT 方法	335
11.7	最大似然法	336
11.7.1	确定性最大似然法	336
11.7.2	随机性最大似然法	337
11.8	迭代二次型最大似然法	339
11.8.1	子空间拟合的一般理论	339
11.8.2	迭代二次型最大似然 (IQML) 法	341
11.8.3	MODE 算法与加权子空间拟合	342
	本章小结	344
第十二章	通信中的自适应阵列处理	345
12.1	自适应天线系统原理	345
12.1.1	向量信道冲激响应与空间特征	345
12.1.2	自适应阵列的最佳权向量	347
12.1.3	权向量更新的自适应算法	350
12.2	多径对最佳空间滤波的影响	352
12.3	随机性盲波束形成	355
12.3.1	基于高阶累积量的盲波束形成	356
12.3.2	基于循环统计量的盲波束形成	359
12.4	确定性盲波束形成	361
12.4.1	信道的齐次多输入—多输出模型	361
12.4.2	确定性盲波束形成算法	363
12.5	盲信号分离	367
12.5.1	盲可辨识性	367
12.5.2	等变化信号分离	369
12.5.3	二阶辨识方法	370
12.5.4	多个矩阵的联合对角化	372
12.6	盲信号分离的神经网络方法	374
12.6.1	独立分量分析与主分量分析	375
12.6.2	盲信号分离的神经网络结构	376
12.6.3	盲信号分离的自然梯度算法	378
12.7	最小二乘恒模算法	383
12.7.1	最陡下降恒模算法	383
12.7.2	最小二乘恒模算法	384
12.7.3	亚高斯和超高斯信号	388
12.7.4	恒模代价函数	389
12.8	恒模阵列	390

12.8.1	恒模阵列与自适应信号对消器	391
12.8.2	性能分析	393
12.8.3	多信号恢复的恒模阵列	395
12.8.4	输出信干噪比和信噪比	397
12.9	解析恒模算法	398
12.9.1	恒模分解问题	398
12.9.2	解析恒模算法	399
12.10	多目标自适应波束形成器	403
12.10.1	多目标最小二乘恒模算法	403
12.10.2	信号的分拣	405
12.10.3	多目标决策指向算法	406
12.11	最小二乘解扩重扩多目标阵列	408
12.11.1	最小二乘解扩重扩多目标阵列	408
12.11.2	最小二乘解扩重扩多目标恒模阵列	412
12.12	基于子空间的自适应阵列处理	413
12.12.1	信号模型与最佳组合	413
12.12.2	基于子空间的自适应阵列算法	415
	本章小结	419
第十三章	多用户检测	420
13.1	系统模型	420
13.1.1	离散时间同步模型	421
13.1.2	离散时间非同步模型	422
13.2	性能测度	424
13.3	最佳多用户检测	426
13.3.1	同步 CDMA 系统的最佳多用户检测	426
13.3.2	非同步 CDMA 系统的最佳多用户检测	428
13.4	解相关多用户检测器	429
13.4.1	同步信道的解相关检测器	429
13.4.2	非同步信道的解相关检测器	431
13.5	线性 MMSE 多用户检测器	432
13.6	最佳线性多用户检测器	434
13.6.1	线性检测器与线性变换	434
13.6.2	最佳线性多用户检测器	435
13.7	自适应多用户检测	437
13.7.1	自适应 MMSE 检测器	437
13.7.2	自适应解相关检测器	440
13.8	自适应决策反馈检测器	442
13.8.1	解相关决策反馈检测器	442

13.8.2	自适应解相关决策反馈检测器	443
13.9	支持向量机多用户检测	445
13.9.1	学习机与多用户检测器	446
13.9.2	支持向量机检测器	450
13.10	盲多用户检测的基本理论与方法	454
13.10.1	线性多用户检测器的典范表示	454
13.10.2	盲多用户检测的自适应算法	457
13.11	基于 Kalman 滤波的盲多用户检测	460
13.11.1	基于 Kalman 滤波的盲多用户检测器	460
13.11.2	Kalman 自适应算法的收敛性分析	462
13.12	盲多用户检测的子空间方法	467
13.12.1	基于子空间的盲线性多用户检测器	467
13.12.2	频率选择性信道的信号模型与分集接收结构	471
13.12.3	基于子空间的线性滤波器组设计	473
13.13	盲多用户检测的统计算法	474
13.13.1	非同步多址信道的隐 Markov 模型	475
13.13.2	盲自适应多用户检测的统计算法	479
	本章小结	482
第十四章	空时二维处理	483
14.1	一维处理的局限性	483
14.1.1	时域一维处理的局限	483
14.1.2	空域一维处理的局限	485
14.2	离散空时信道与信号模型	486
14.2.1	离散空时信道模型	487
14.2.2	离散空时信号模型	489
14.3	空时 MMSE 接收机	492
14.3.1	空时 MMSE 准则	492
14.3.2	空时 MMSE 均衡器	493
14.4	空时 MLSE 接收机	497
14.4.1	空时 MLSE 准则	497
14.4.2	空时 MLSE 方法	498
14.5	空时盲均衡	500
14.5.1	问题描述	500
14.5.2	空时盲均衡	501
14.5.3	权向量更新的恒模算法	503
14.6	空时盲波束形成	503
14.6.1	信道的 FIR 多输入—多输出模型	504
14.6.2	空时盲波束形成	507

14.7	空时二维 RAKE 接收机	512
14.7.1	信号模型	512
14.7.2	基于匹配滤波器的空时二维 RAKE 接收机	513
14.8	联合角度-时延估计	516
14.8.1	数据模型	516
14.8.2	联合角度-时延估计问题	517
14.8.3	联合角度-时延估计的 ESPRIT 算法	520
14.9	时延和空间特征估计	522
14.9.1	数据模型	523
14.9.2	最大似然算法	525
14.9.3	ESPRIT 算法	527
14.10	空时编码	529
14.10.1	空时编码的问题描述	529
14.10.2	空时格形码与空时分组码的编码	530
14.10.3	空时分组码的译码	535
14.10.4	干扰抑制	537
	本章小结	540
第十五章 CDMA 系统的信号处理		541
15.1	最小方差接收机	541
15.1.1	离散时间信号模型	541
15.1.2	最小方差接收机	543
15.2	约束最小输出能量接收机	545
15.2.1	系统模型与问题描述	545
15.2.2	约束最小输出能量接收机	548
15.3	解相关 RAKE 接收机	552
15.3.1	有效特征波形	552
15.3.2	有效特征波形估计的子空间方法	553
15.3.3	解相关 RAKE 接收机	557
15.4	天线阵列 CDMA 系统的盲均衡	560
15.4.1	天线阵列 CDMA 系统	560
15.4.2	基于相关器的二维 RAKE 接收机	562
15.4.3	主分量 MMSE 均衡器估计	564
15.4.4	确定性盲均衡	566
15.5	多径 CDMA 信道的波束形成	568
15.5.1	码滤波方法	568
15.5.2	多径 CDMA 的波束形成	571
15.6	借助天线阵列的多径 CDMA 系统的盲辨识	573
15.6.1	系统模型	574

15.6.2 几个预备性引理	575
15.6.3 不使用扩频码的盲多用户检测	577
本章小结	579
参考文献	580
索引	599

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Historical Perspective of Wireless Communication Techniques	1
1.2 Main Research Areas of Communication Signal Processing	5
1.3 Overview and Organization of the Book	8
1.4 How to Use the Book	9
Chapter 2 Representation and Characterization of Communication Signals	11
2.1 Stationary Processes and Cyclostationary Processes	11
2.1.1 Stationary Processes	11
2.1.2 Cyclostationary Processes	13
2.2 Complex Signals	17
2.2.1 Analytic Signals	18
2.2.2 Complex Baseband Signals	20
2.3 Complex Baseband Representation of Narrowband Signals and Systems	22
2.3.1 Complex Baseband Representation of Narrowband Signals	22
2.3.2 Complex Baseband Representation of Channel and its Outputs	26
2.4 Complex Baseband Representation of Random Signals	30
2.4.1 Complex Baseband Representation of Stationary Signals	30
2.4.2 Complex Baseband Representation of Cyclostationary Signals	33
2.5 Band-Limited Signals and Band-Limited Channels	35
2.6 Correlation Function of Periodic Signals	37
Brief Summary of This Chapter	39
Chapter 3 Wireless Channels	40
3.1 Introduction	40
3.2 Propagation Model in Free Space	41
3.3 Reflection, Diffraction and Scattering	44
3.3.1 Reflection	44
3.3.2 Diffraction	48
3.3.3 Scattering	51
3.4 Shadowing Fading	54
3.5 Impulse Response Model of a Multipath Channel	56
3.5.1 Factors Affecting Multipath Fading	56
3.5.2 Impulse Response Model	57