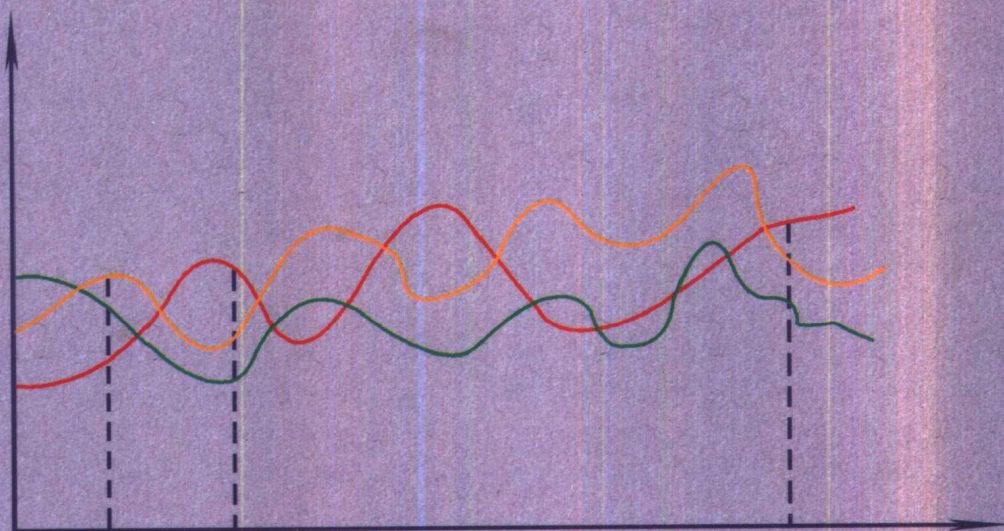


信号统计分析与处理

沈凤麟 叶中付 钱玉美



中国科学技术大学出版社

信号统计分析与处理

沈凤麟 叶中付 钱玉美

中国科学技术大学出版社

2001•合肥

图书在版编目(CIP)数据

信号统计分析与处理/沈凤麟, 叶中付, 钱玉美. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.3
ISBN7-312-01256-6

I. 信… II. ①沈… ②叶… ③钱… III. ①随机信号-信号分析-高等学校-教材 ②随机信号-信号处理-高等学校-教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 03457 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 787×1092/16 印张: 39.125 字数: 985 千

2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册

ISBN7-312-01256-6/TN·43 定价: 45.00 元

前 言

本书是中国科学技术大学出版社 1989 年版的《信号统计分析基础》一书的增订版, 考虑到增订后的全书内容, 改名为“信号统计分析与处理”。

在原版的前言中阐明了 1989 年出版的历史与现实背景, 现摘录于下:

“……鉴于“信号统计分析基础”对于现代科学技术发展的重要意义, 中国科学技术大学在建校之初(注: 中国科学技术大学于 1958 年建校)就把它列入有关系的教学计划, 作为重要的课程向学生进行讲授。1980 年以来, 中国科学技术大学无线电电子学系在总结建校以来本课程的教学经验的基础上, 并根据人才培养的实际需要, 不断地对本课程的教学进行改进, 从这个意义上讲, 本书是自中国科学技术大学(以下简称科大)设置本课程以来, 特别是近八年来教学实践的一个总结。……”

自那时以来, 信号统计分析与处理得到了惊人的发展:

1. 新的统计特征的出现与应用, 例如高阶累量与累量谱;
2. 二阶矩概念与应用的新的发展与应用;
3. 各种现代谱估计方法新的改进与随机信号的时空处理;
4. 以小波变换为代表的各类时频变换的理论与应用;
5. “缺损”前提下的随机信号处理(例如, 各类盲信号处理)与无源探测;
6. 以神经网络为代表的非线性处理的理论与应用;
7. 以现代军事电子为背景的大批量, 低信杂比, 高精度的随机信号分析与处理;
8. 多变量与多维的随机信号分析与处理。

以上提到的所有理论与应用几乎都是在离散随机序列前提下展开或者是在连续随机信号与离散随机信号两种前提下同时展开的。

科大电子工程与信息科学系(原无线电电子学系)近十年来形成了一个好传统, 本系三年年级以上的学生通过自由选择进入系内各研究室或实验室从事力所能及的研究工作; 近十年来该系蓬勃的研究实践以及大量的研究生论文撰写与发表, 促进了本课程教学内容的逐步更新与积累, 从这个背景来说, 本书是中国科学技术大学在随机信号分析与处理这一领域在教学上再一次作出的阶段性总结。

对原版经修改增订以后, 全书共分九章。

第一章“随机过程”, 与原版相比, 增加了马尔柯夫链, 隐式马尔柯夫链, 循环平稳随机过程, 随机场等内容。

第二章“从二阶矩分析到高阶累量”, 与原版相比, 增加了 Karhuen Loeve 展开, 关系函数, 随机变量与随机过程的循环性, 高阶累量等内容, 这一章就增加内容以及全章叙述的系统而言, 是全新的。

第三章“随机信号与系统”, 将原版第三、四章所有这方面的内容加以系统的归并, 增加

了随机信号通过线性系统后输出累量与输入累量之间的关系,随机信号与非线性惯性系统等内容。

第四章分成两部分,第一部分是第四章(一)“假设检验与信号检测”,将原版的第五、六、七、八各章加以合理的归并,增加了模糊函数与匹配滤波器,时变匹配滤波器,离散信号的匹配滤波器,恒虚警率信号检测(干扰概型已知)等内容;第二部分是第四章(二)“非参量恒虚警检测与稳健检测”,这部分属增加的内容。

第五章“估计理论”,与原版相比增加了误差矩阵,线性最小误差估计的递推算法,最小二乘估计的矢量子空间分析,最小二乘估计的递推算法,最小二乘估计的应用,最大似然估计的应用,区间估计等内容。

第六章“时间序列分析与现代谱估计”,本章是全新的一章,系统地介绍了各类现代谱估计方法。

第七章为“维纳滤波与卡尔曼滤波”。

第八章“阵列信号处理”,是全新的一章,系统地介绍了自适应空域滤波,非相干及相干源两种不同前提下的处理方法。

第九章“开拓性练习”,该章包括了13道大型习题,各自反映了目前随机信号处理中很有意义的课题。

与原版相比,第一、二、三、四、五、六、八各章增补了计算机作业。

在大学本科采用本书讲授本课程时,以下建议供参考:

第一章,1-6“随机过程的微分、积分及其它有关统计特性”可不讲授;1-8“马尔柯夫过程”重点介绍马尔柯夫链。

第二章,2-8“关系函数”只讲授基本概念,2-9“循环性”不必讲授。

第三章,3-2,3-6,3-9,3-10各节不必讲授,学生通过自学及习题演算应可掌握。

第四章,重点讲授4-1到4-10各节,第四章(二)不必讲授。

第五章,重点讲授5-1到5-8各节。

第六章,“Wold分解定理”的论证不必讲授;最大熵功率谱估计重点介绍6.5.4“有约束的最大熵功率谱估计”;其它现代谱估计方法重点介绍Pisarenko谐波分解法,最大似然功率谱估计,子空间-MUSIC方法,ESPRIT等。

第七章,第八章,一般介绍。

对于有志于从事信息科学技术的年轻大学生来说,应着重从基础与框架上掌握随机信号处理这门课程,有了“基础”与“框架”,添上砖瓦是不难的事情。

对于初学者来说,本书的选材为他们提供了足够的内涵与开拓空间,我们也相信,对于研究生教学以及有关领域的从业人员来说,本书有相当的参考价值。

本书的第一、二、三、四、五、六各章由我完成;原来的第四、五、六、七、八各章的归并工作,由于原作者钱玉美教授身体欠佳,因此具体归并工作与她商议后,由我代劳;叶中付教授执笔第七、八章;第九章的创意由95届科大00班毕业生卢越峰提出;38所研究员陆军,研究生徐旭,吴涛,周刚毅以及95届毕业生卢越峰,梁云峰分别执笔将各自的研究课题转化为相应的大型习题,并由卢越峰汇总形成初稿,最终由作者定稿完成。科大校友卞红林寄来通讯方面的习题,后因对于初学者来说题目背景工程性较强未被采用,在这里应特别予以致谢。全书的附录由我执笔。

信号检测实验室的徐旭，王劲松，吴涛，李琼各位研究生，以及 94 届毕业生孙玮，95 届毕业生范旺生，96 届毕业班同学蒋轶，吕昱昭，陈琦，李铖不辞辛苦地完成了书稿的打印工作以及经过编排的正式书稿（第一稿）。

在本书即将付印出版之际，特别感谢：英国的 Alan Miller 博士，科大校友相韶华博士从香港购赠有关专著；香港大学科大校友常春起博士寄来他本人相关的系列论文（已发表及待发表）；旅居美国的宋向军博士，沈雁小姐在旧金山各著名大学图书馆及书店多次奔波，为作者借、查并复印装订有关资料；原无线电系 77 届旅美诸多校友积极反映对于本课程教学改进的意见；所有曾在信号检测实验室完成学位论文的研究生与大学生们，他们的研究实践，为本书的形成起到了无可置代的作用。

在结束这篇前言之前，我要特别提到信号检测实验室建立的早期参与者——英年早逝的李辉博士，他曾为原版各章习题的编写与演算作出了很好的工作，这次增订保留了原版的绝大部分习题；本书的第四章（二）作者主要参考了由他当年编写的研究生课程讲义“现代信号统计分析”。我想，李辉博士若仍在我们中间，他一定会高兴本书的出版。

科大电子工程与信息科学系的领导对本书的出版从策划开始就一直予以支持，我代表所有作者表示感谢。并以此书献给科大电子工程与信息科学系过去、现在与未来的学生们。

对于本书的疏漏以及谬误，请所有读者不吝指正。

沈凤麟

2000 年 9 月

目 次

前言	(i)
第一章 随机过程	(1)
1-1 随机过程	(1)
1-2 平稳与非平稳随机过程	(2)
1-3 随机过程的有关统计特性	(4)
1.3.1 随机过程的有关统计特征	(4)
1.3.2 复随机过程的有关统计特征	(5)
1-4 特征函数	(7)
1-5 平稳随机过程的遍历性(即埃尔哥德性)	(11)
1.5.1 随机过程的时间平均(单样本平均)	(11)
1.5.2 各态历经随机过程	(11)
1.5.3 随机过程的遍历性条件	(12)
1-6 随机过程的微分、积分及其它有关统计特性	(12)
1.6.1 随机过程差的有关统计特征	(12)
1.6.2 随机过程的连续性	(13)
1.6.3 随机过程的可微性及其有关性质	(14)
1.6.4 随机过程的积分	(17)
1-7 高斯(正态)随机过程	(18)
1.7.1 一维高斯随机变量及其特征	(18)
1.7.2 二维高斯随机变量及其特征	(20)
1.7.3 n 维高斯随机变量的有关性质	(21)
1.7.4 高斯随机过程	(23)
1-8 马尔柯夫过程	(26)
1.8.1 马尔柯夫过程	(26)
1.8.2 马尔柯夫链	(31)
1.8.3 隐式马尔柯夫模型(Hidden Markov Model)	(39)
1-9 循环平稳随机过程(Cyclostationary Random Process)	(40)
1-10 随机场	(41)
1-11 结束语	(43)
习题	(44)
计算机作业	(48)
第二章 从二阶矩分析到高阶累量	(49)
2-1 相关函数的性质	(49)

2.1.1	一般随机信号相关函数与协方差函数的性质	(49)
2.1.2	平稳随机信号相关函数与协方差函数的性质	(51)
2.1.3	复随机信号相关函数与协方差函数的性质	(51)
2.1.4	随机序列相关函数与协方差函数的性质	(54)
2-2	平稳随机信号的功率谱密度、维纳-辛钦定理	(55)
2-3	平稳随机信号的互谱密度	(58)
2-4	复功率谱密度及复互谱密度	(60)
2-5	非平稳随机信号的功率谱	(62)
2-6	基于相关函数的一种最佳变换——卡亨南-洛维(Karhuen Loeve)	(63)
2.6.1	连续随机信号的 KL 变换	(63)
2.6.2	离散随机信号的 KL 变换	(66)
2.6.3	KL 变换是最小均方误差意义下的一种最佳变换	(68)
2.6.4	二维离散随机信号的 KL 变换	(70)
2-7	信号的希尔伯特变换、复信号的基本形式——解析信号	(76)
2.7.1	信号的希尔伯特变换及其性质	(76)
2.7.2	解析信号的定义及其频域特性	(81)
2.7.3	线性系统输出及输入解析信号之间的关系	(82)
2-8	关系函数(Relation Function)	(83)
2.8.1	关系函数定义	(83)
2.8.2	复随机信号的二阶矩平稳及关系函数的频域特性	(83)
2.8.3	非平稳复随机信号的关系函数的频域特性	(86)
2.8.4	一般意义下的白噪声,二阶矩白噪声	(89)
2.8.5	联合二阶矩平稳随机信号	(90)
2-9	循环性(Circularity)	(91)
2.9.1	复高斯随机矢量	(92)
2.9.2	复高斯随机变量的循环性	(98)
2.9.3	一般复随机变量的循环性	(99)
2.9.4	复随机信号的循环性	(100)
2.9.5	复随机信号的平稳性与循环性的关系(离散频谱)	(101)
2.9.6	复随机信号的平稳性与循环性之间的关系(连续频谱)	(103)
2.9.7	复随机序列的平稳性与循环性之间的关系	(105)
2.9.8	平稳随机序列与循环平稳随机序列之间的转换	(107)
2-10	从二阶矩到高阶累量	(112)
2.10.1	引言	(112)
2.10.2	高阶累量的定义	(112)
2.10.3	随机过程的高阶累量	(114)
2.10.4	高阶累量与高阶矩	(114)
2.10.5	高阶累量的基本性质	(117)
2.10.6	高斯过程的高阶累量	(119)

2.10.7 高阶累量谱·····	(120)
2.10.8 3阶累量谱的基本性质·····	(124)
2-11 结束语·····	(126)
习题·····	(128)
计算机作业·····	(131)

第三章 随机信号与系统····· (133)

3-1 窄带确定信号、窄带随机信号及窄带滤波器·····	(133)
3.1.1 窄带确定信号·····	(133)
3.1.2 窄带滤波器·····	(135)
3.1.3 窄带随机信号·····	(136)
3-2 窄带高斯随机信号经平方检波输出,其累积的概率分布·····	(146)
3.2.1 窄带高斯噪声经平方检波后输出的累积·····	(147)
3.2.2 正弦信号加窄带高斯噪声经平方检波后输出的累积·····	(149)
3-3 系统的类别·····	(153)
3-4 随机信号与时不变线性系统·····	(154)
3.4.1 时不变线性系统的冲击响应·····	(154)
3.4.2 时不变线性系统随机输入与输出之间的一般关系(时域)·····	(154)
3.4.3 时不变线性系统随机输入与输出之间的一般关系(频域)·····	(157)
3.4.4 白噪声与时不变线性系统·····	(159)
3-5 随机信号与时变线性系统·····	(162)
3.5.1 时不变线性系统随机输入与随机输出的一般关系(时域与频域)·····	(162)
3.5.2 随机信号与若干典型的时变线性系统·····	(166)
3.5.3 随机信号与随机线性变化系统·····	(167)
3-6 随机信号通过线性系统后输出的概率密度·····	(170)
3.6.1 系统的输入为高斯分布时,线性系统输出的概率密度函数·····	(170)
3.6.2 系统的输入不是高斯分布时,线性系统输出的概率密度函数·····	(170)
3-7 随机信号通过线性系统后输出累量与输入累量之间的关系·····	(171)
3.7.1 线性系统输出累量与输入累量之间的关系·····	(171)
3.7.2 输出累量谱与输入累量谱之间的关系·····	(173)
3-8 随机信号与非线性无惯性系统·····	(175)
3.8.1 直接算法·····	(177)
3.8.2 级数展开近似法·····	(180)
3.8.3 特征函数法·····	(180)
3.8.4 Price 定理(导数法)——高斯随机信号输入适用·····	(181)
3.8.5 3阶近似法——高斯随机信号输入使用·····	(184)
3.8.6 傅立叶级数展开法——窄带随机信号输入适用·····	(186)
3-9 随机信号“超越脉冲”的统计特性·····	(189)
3.9.1 “超越脉冲”与非线性变换·····	(189)

3.9.2 “正超越”与“负超越”	(189)
3.9.3 “超越脉冲”出现的平均时间	(190)
3.9.4 “超越脉冲”出现的平均次数	(191)
3.9.5 “超越脉冲”的平均宽度	(191)
3.9.6 单位时间内“超越脉冲”出现的平均次数	(191)
3-10 随机信号与非线性惯性系统	(192)
3.10.1 非线性惯性系统	(192)
3.10.2 双重线性系统	(195)
3.10.3 随机信号与双重线性系统	(196)
3.10.4 随机信号与三重线性系统	(197)
3-11 结束语	(199)
习题	(201)
计算机作业	(204)

第四章(一) 假设检验与信号检测	(205)
4-1 引言	(205)
4-2 假设检验	(206)
4-3 判决准则	(207)
4.3.1 贝叶斯(Bayes)平均风险最小准则	(207)
4.3.2 最小错误概率准则	(212)
4.3.3 聂孟-皮尔逊(Neyman-Pearson)准则	(214)
4.3.4 最大后验概率准则	(216)
4.3.5 极大极小准则	(217)
4-4 最佳检测器与等效检验统计量	(222)
4-5 确知信号检测与“相关接收”	(223)
4.5.1 二元确知信号检测与“相关接收”	(223)
4.5.2 聂孟-皮尔逊准则下的“相关接收”	(226)
4.5.3 限带高斯白噪声下的“相关接收”	(227)
4.5.4 “相关接收”检测性能分析	(228)
4-6 检测性能与信噪比	(232)
4-7 多观测样本的“累积”效应	(234)
4-8 最大信噪比准则——确知连续信号的匹配滤波	(240)
4.8.1 匹配滤波器的频域特性(输入噪声为白噪声)	(240)
4.8.2 匹配滤波器的时域特性(输入噪声为白噪声)	(242)
4.8.3 匹配滤波器的有关性质	(243)
4.8.4 模糊函数与匹配滤波器	(245)
4.8.5 时变匹配滤波器	(251)
4.8.6 有色噪声条件下的确知信号匹配滤波	(252)
4.8.7 广义匹配滤波器——预白化最佳处理	(255)

4-9	离散信号的匹配滤波	(257)
4.9.1	确知离散信号的匹配滤波	(257)
4.9.2	随机离散信号的匹配滤波	(260)
4.9.3	离散信号的预白化匹配滤波	(261)
4-10	恒虚警率信号检测(干扰概型已知)	(262)
4.10.1	恒虚警率及其意义	(262)
4.10.2	噪声的恒虚警检测	(263)
4.10.3	杂波的恒虚警检测	(265)
4-11	备择假设检验	(271)
4.11.1	贝叶斯平均风险最小准则	(271)
4.11.2	最大后验概率准则	(272)
4.11.3	平均错误概率最小准则	(273)
4.11.4	备择假设检验的似然比判决规则	(273)
4-12	复合假设检验	(276)
4.12.1	复合假设检验	(276)
4.12.2	二元复合假设检验的判决规则	(276)
4.12.3	备择复合假设检验的判决规则	(280)
4.12.4	随机相位信号检测与正交接收	(282)
4.12.5	“非相干频移键控”检测	(288)
4-13	序贯检验	(293)
4.13.1	序贯检验的特点	(293)
4.13.2	判决规则与检验门限	(293)
4.13.3	终止判决的平均样本数	(295)
4.13.4	终止判决的必然性	(297)
第四章(二) 非参量恒虚警检测与稳健检测		(300)
4-14	非参量恒虚警检测	(300)
4.14.1	参量检测与非参量检测	(300)
4.14.2	检测器的渐进相对效率与检测器的效验	(300)
4.14.3	符号恒虚警检测器	(302)
4.14.4	Wilcoxon 秩检测器	(308)
4.14.5	双输入非参量检测器	(313)
4.14.6	相持与相关	(317)
4-15	稳健(Robust)检测	(318)
4.15.1	引言	(318)
4.15.2	稳健似然比检验	(319)
4.15.3	稳健检验统计量的构成	(325)
4.15.4	确知信号的稳健检测	(327)
4-16	“多个检测器”检测简介	(328)

4-17 结束语	(330)
习题	(331)
计算机作业	(341)

第五章 估计理论

5-1 引言	(343)
5-2 最小均方误差估计	(344)
5-3 线性最小均方误差估计	(347)
5.3.1 线性最小均方误差估计的一般形式	(347)
5.3.2 线性最小均方误差估计的另一种形式	(348)
5.3.3 线性最小均方误差估计的正交条件	(349)
5.3.4 误差矩阵	(349)
5.3.5 线性最小均方误差估计的无偏性	(352)
5.3.6 线性最小均方误差估计与最小均方误差估计的估计误差比较	(353)
5.3.7 线性观测方程下的线性最小均方误差估计	(353)
5.3.8 待定参量是确定量时的线性最小均方误差估计($Y=H\theta+N$)	(355)
5.3.9 白噪声条件下的线性最小均方误差估计	(355)
5.3.10 有色噪声条件下的线性最小均方误差估计($n_i=\rho n_{i-1}+w_i$)	(357)
5.3.11 线性最小均方误差估计的递推算法	(358)
5-4 最小二乘估计	(365)
5.4.1 最小二乘估计	(365)
5.4.2 加权最小二乘估计	(367)
5.4.3 最小二乘估计的矢量子空间分析	(369)
5.4.4 最小二乘估计的递推算法	(372)
5.4.5 最小二乘估计的应用	(373)
5-5 最大似然估计	(379)
5.5.1 最大似然估计	(379)
5.5.2 $Y=H\theta+N$ 条件下 $\hat{\theta}_{ML}$ 与 $\hat{\theta}_{LSM}$ 的比较	(380)
5.5.3 最大似然估计的应用	(380)
5-6 最大后验概率估计	(387)
5.6.1 最大后验概率估计	(387)
5.6.2 最大后验概率估计与最大似然估计	(387)
5-7 贝叶斯估计	(389)
5-8 估计的统计性质	(392)
5.8.1 估计的基本统计性能指标	(392)
5.8.2 统计量的充分性	(395)
5-9 Cramer-Rho 不等式	(399)
5.9.1 非随机参量(标量)估计的 Cramer-Rho 不等式	(399)
5.9.2 随机参量(标量)的估计均方误差下界	(401)

5.9.3 非随机矢量的估计均方误差下界	(403)
5.9.4 随机矢量的估计均方误差下界	(405)
5-10 区间估计	(406)
5.10.1 点估计与区间估计	(406)
5.10.2 高斯随机变量均值的区间估计	(407)
5.10.3 高斯随机变量方差的区间估计	(408)
5-11 结束语	(409)
习题	(409)
计算机作业	(412)
第六章 时间序列分析与现代谱估计	(413)
6-1 引言	(413)
6-2 Wold 分解定理	(413)
6-3 平稳随机序列的线性模型	(416)
6.3.1 滑动平均模型(Moving Average Model MA)	(416)
6.3.2 自回归模型(Autoregressive Model AR)	(417)
6.3.3 自回归滑动平均模型(ARMA)	(419)
6-4 广义平稳随机序列的线性模型拟合	(421)
6.4.1 AR 模型的参数估计	(421)
6.4.2 Levinson-Durbin 递推算法	(421)
6.4.3 格型(Lattice)递推算法	(426)
6.4.4 最小二乘算法	(430)
6.4.5 ARMA 模型的参数估计	(431)
6.4.6 模型阶数估计	(433)
6-5 最大熵功率谱估计	(439)
6.5.1 传统的功率谱估计	(439)
6.5.2 最大熵外推功率谱估计	(440)
6.5.3 最大熵功率谱估计与 AR 拟合的关系	(442)
6.5.4 有约束的最大熵功率谱估计	(443)
6.5.5 模型拟合功率谱估计	(446)
6-6 Pisarenko 谐波分解法	(448)
6-7 Prony 扩展谐波分解法	(453)
6-8 最大似然功率谱估计	(455)
6-9 子空间-MUSIC 方法	(456)
6.9.1 信号子空间与噪声子空间	(457)
6.9.2 Pisarenko 谐波分解与“子空间”方法	(459)
6.9.3 MUSIC(Multiple Signal Classification)	(461)
6-10 子空间-最小范数法	(462)
6-11 子空间-ESPIRIT 法	(464)

6.11.1 基本 ESPRIT 法	(464)
6.11.2 最小二乘 ESPRIT	(466)
6-12 有色噪声条件下的子空间	(467)
6-13 多维线性平稳随机序列	(468)
6.13.1 多维广义平稳随机序列	(468)
6.13.2 多维线性平稳随机序列	(468)
6-14 频率波数谱与零延迟波数谱	(470)
6.14.1 频率波数谱	(470)
6.14.2 零延迟波数谱	(471)
6-15 倒谱(Cepstrum)	(472)
6-16 结束语	(472)
习题	(473)
计算机作业	(477)
第七章 维纳滤波与卡尔曼滤波	(478)
7-1 引言	(478)
7-2 波形估计的分类	(478)
7-3 连续信号的维纳滤波	(480)
7.3.1 非平稳随机过程的维纳滤波	(480)
7.3.2 广义平稳随机过程的维纳滤波	(481)
7.3.3 非因果广义平稳维纳-霍甫积分方程的解	(482)
7.3.4 因果广义平稳维纳-霍甫积分方程的解	(484)
7-4 离散维纳滤波	(487)
7.4.1 非平稳非因果离散维纳滤波	(488)
7.4.2 广义平稳非因果离散维纳滤波	(488)
7.4.3 广义平稳因果离散维纳滤波	(490)
7.4.4 有限观测样本广义平稳因果离散维纳滤波	(490)
7-5 卡尔曼滤波	(491)
7.5.1 随机过程的状态空间模型	(491)
7.5.2 离散卡尔曼滤波	(496)
7-6 结束语	(498)
习题	(498)
计算机作业	(501)
第八章 阵列信号处理	(502)
8-1 引言	(502)
8-2 自适应空域滤波	(502)
8.2.1 信号与噪声	(502)
8.2.2 阵列天线的方向图	(504)

8.2.3	最大输出信噪比准则	(507)
8.2.4	最小均方误差准则	(510)
8.2.5	主瓣约束自适应阵	(512)
8-3	非相关源测向方法	(513)
8.3.1	信号模型	(513)
8.3.2	极大似然估计算法	(514)
8.3.3	波束形成器测向方法	(515)
8.3.4	Capon 最小功率估计器	(516)
8.3.5	多信号分类法(MUSIC)	(518)
8.3.6	旋转不变量信号参数估计方法	(519)
8.3.7	采用信号子空间特征向量的广义特征值法(GEASE)	(521)
8-4	相干信号源的处理	(523)
8.4.1	信号模型	(523)
8.4.2	信号特征矢量法	(524)
8.4.3	空间平滑技术	(524)
8.4.4	基于信号特征矢量的通用差分技术	(528)
8.4.5	频域平滑技术	(528)
8.4.6	信号特征矢量序列合成矩阵法	(529)
8-5	结束语	(530)
	习题	(531)
	计算机作业	(531)

第九章 开拓性练习

9-1	前言	(532)
9-2	练习题	(532)
9.2.1	用“MA 预处理”实现信号污染的恢复	(532)
9.2.2	线性调频连续波的噪声分析	(533)
9.2.3	估计信号个数	(534)
9.2.4	非平稳过程分段	(535)
9.2.5	扩频通信中的最佳接收机	(536)
9.2.6	多项式相位信号的参数估计	(536)
9.2.7	雷达中的自适应检测	(537)
9.2.8	基于频率域的空间平滑算法	(537)
9.2.9	单通道接收机方位超分辨测向的实现	(538)
9.2.10	基于分形理论的编码	(540)
9.2.11	多站数据融合	(542)
9.2.12	卡尔曼滤波在谐波分析中的应用	(542)
9.2.13	基于二阶矩的盲信号分离	(544)
	参考文献	(545)

附录一 概率论·····	(547)
1-1 概率定义 ·····	(547)
1-2 条件概率 ·····	(550)
1-3 乘法定理、全概率定理及贝叶斯定理·····	(550)
1-4 统计独立 ·····	(550)
1-5 随机变量、概率分布函数、概率密度函数 ·····	(551)
1-6 随机变量的变换 ·····	(555)
1-7 随机变量的数字特征 ·····	(556)
1-8 中心极限定理 ·····	(558)
附录二 随机序列 X 及其经常用到的几种变换 ·····	(560)
2-1 矢量及矩阵的倒置(Reversal) ·····	(560)
2-2 相关矩阵基于特征矢量的对角化 ·····	(561)
2-3 协方差矩阵基于特征矢量的对角化 ·····	(561)
2-4 两个相关矩阵(或协方差矩阵)基于特征矢量的同时对角化 ·····	(562)
2-5 相关矩阵与协方差矩阵的基于上、下三角矩阵的对角化·····	(565)
2-6 奇异值分解法 ·····	(565)
2-7 QR 分解法 ·····	(568)
附录三 关于检测器的校验·····	(573)
3-1 校验的定义 ·····	(573)
3-2 正则条件下的有关性质 ·····	(574)
附录四 几种不同类型的秩检测器·····	(577)
4-1 Normal Scores 检测器·····	(577)
4-2 Van der Waerden 检测器 ·····	(578)
4-3 Spearman Rho 检测器·····	(578)
4-4 Kendall Tau 检测器 ·····	(578)
4-5 几种秩检测器渐近相对效率的比较 ·····	(580)
附录五 聂孟-皮尔逊准则与效验最大准则、局部有效准则之间的关系(弱信号)·····	(581)
5-1 聂孟-皮尔逊准则与效验最大准则之间的关系 ·····	(581)
5-2 聂孟-皮尔逊准则与局部最有效准则 ·····	(582)
附录六 矩阵的求导运算及其它·····	(585)
6-1 矢量函数对标量变量求导 ·····	(585)
6-2 矩阵函数对标量变量求导 ·····	(585)
6-3 矩阵函数对标量变量求导的有关规则 ·····	(585)

6-4	矢量函数对矢量变量求导	(586)
6-5	矢量函数对矢量变量求导的有关规则	(586)
6-6	矩阵函数对矢量变量的求导	(587)
6-7	矢量函数对矢量变量求导的其它规则	(588)
6-8	标量函数对复数求导	(588)
6-9	矢量函数及矩阵函数对矩阵变量的求导	(589)
6-10	矩阵函数对矩阵变量的求导	(590)
6-11	矩阵函数对矩阵变量求导的有关公式	(591)
6-12	有约束的极值问题	(591)
6-13	矩阵的反演公式及其它	(592)
附录七	矢量空间	(594)
7-1	矢量空间	(594)
7-2	赋范线性空间	(594)
7-3	距离空间	(594)
7-4	内积空间与希尔伯特(Hilbert)空间	(595)
7-5	矢量空间的基	(596)
7-6	直接子空间(Direct Subspace)	(597)
7-7	矢量空间的维数	(597)
7-8	零空间的 Sylvester's 定律	(597)
7-9	由矩阵的奇异值分解引出的若干结论	(598)
7-10	投影与投影算子	(599)
参考书籍		(601)
参考文献		(605)