

国家自然科学基金资助

学术专著

空间谱估计理论与算法

王永良 陈辉 彭应宁 万群 著

清华大学出版社



国家自然科学基金资助
学术专著

空间谱估计理论与算法

王永良 陈辉 彭应宁 万群 著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

空间谱估计是阵列信号处理中的一个重要研究方向,在雷达、通信、声呐等众多领域有极为广阔的应用前景。本书深入、系统地论述了空间谱估计的理论、算法及一些理论方法之间的关系,总结了作者多年来的研究成果以及国际上这一领域的研究进展。全书由14章组成,主要内容有空间谱估计的研究进展、信号源数估计、线性预测(LP)类算法、MUSIC类算法、子空间拟合类算法、旋转不变子空间(ESPRIT)类算法、子空间迭代与更新、特殊信号的空间谱估计、特殊阵列的空间谱估计、阵列误差校正方法、现代信号处理在空间谱估计中的应用及多维空间谱估计等。

本书是关于空间谱估计理论与算法的一部专著,可供从事雷达、通信、导航、声呐与电子对抗等领域的广大技术人员学习与参考,也可作为高等院校和科研院所信号与信息处理、信息与通信系统等专业的研究生教材或参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

空间谱估计理论与算法/王永良等著. —北京:清华大学出版社,2004.11
ISBN 7-302-09209-5

I. 空… II. 王… III. 信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第082092号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:邹开颜

文稿编辑:赵从棉

印装者:三河市春园印刷有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:153×235 印张:33.5 字数:617千字

版 次:2004年11月第1版 2005年9月第2次印刷

书 号:ISBN 7-302-09209-5/TN·204

印 数:2001~3100

定 价:78.00元

作者简介



王永良，1965年生于浙江嘉兴，1994年于西安电子科技大学获工学博士学位，1996年清华大学电子工程系博士后出站，同年晋升为教授。现为空军雷达学院科研部副部长兼雷达兵器运用工程军队重点实验室主任，国防科技大学信号与信息处理专业博士生导师，空军工程大学电磁场与微波技术专业博士生导师，华中科技大学兼职教授，中电科技集团公司14所客座研究员，中国电子学会无线电分会委员。曾获清华大学优秀博士后奖、中国优秀博士后奖、高校“青年教师奖”、全国优秀骨干教师奖、“全国优秀教师”荣誉称号。享受国务院政府特殊津贴，入选“新世纪百千万人才工程国家级人选”，当选第十届全国人大代表。已在IEEE Trans., IEE Proc., 《中国科学》等学术期刊与会议上发表论文100多篇，其中被SCI, EI, ISTP国际三大检索收录60多篇，著有学术专著2部，获省部级科技进步一等奖2项，二、三等奖各1项，拥有中国发明专利3项。主要研究方向：空时信号处理，雷达信号处理，阵列信号处理等。

前言

空间谱估计是阵列信号处理中的一个重要研究方向,是在空域滤波、时域谱估计的基础上发展起来的一门学科与技术,其优异的参数估计性能、广阔的应用前景引起了人们极大的兴趣。在过去的30年时间里,许多专家学者对这一技术进行了广泛而深入的研究,取得了极为丰硕的成果,极大地推动了该学科及其相关领域的发展。

目前,空间谱估计理论与技术已日趋成熟,应用领域日益扩大,新理论、新方法不断涌现,可以说仍处于方兴未艾的蓬勃发展之中。因此,要想完整、系统与全面地阐述该领域的丰富知识与全面反映其最新的研究成果难度很大。但高等院校、科研院所及工业生产部门均迫切需要一本较系统、较完整地阐述空间谱估计理论与技术的著作。为此,我们全面总结了近30年来关于空间谱估计方面的相关研究成果,结合我们多年来的研究实践与教学体会,写成此书,相信它能对从事空间谱估计、阵列信号处理与应用领域的科技人员及高等院校师生有所裨益。

本书全面、系统地介绍了空间谱估计涉及的概念、原理与方法,尤其详细地介绍了许多典型算法并进行了深入研究,给出了大量的定性与定量分析。全书共14章,其内容概括为:空间谱估计的进展、现状与展望;空间谱估计的基本原理、数学模型及相关概念,信号源数的估计问题;线性预测类空间谱估计算法;MUSIC类算法;子空间拟合类算法;旋转不变子空间算法;子空间迭代与更新算法;宽带信号的空间谱估计问题;循环平稳信号的空间谱估计问题;分布式信号的参数估计问题;特殊结构阵列的空间谱估计问题;基于高阶累计量的空间谱估计问题;空间谱估计误差校正方法;多维空间谱估计算法。

本书力图实现以下五个特色。

1. 体系结构新。近年来国内外虽然已经出版了几本涉及空间谱估计内容的优秀著作,但本书却是紧紧围绕空间谱估计这一专门问题进行统一描述、全面阐述与深入研究的第一部学术著作。尤其是本书的第7~14章的内容,仅散见于各类文献,在公开出版的书籍中很少涉及。本书各章之间紧密联系,构成一个有机的整体。

2. 内容选材广。众所周知,空间谱估计由于其理论丰富与应用广泛,近二

三十年来研究报道的文献数量之多与涉及内容之广为许多专家学者所感触。为了写好此书,我们收集了大量的国内外文献资料,并做了精心组织,以空间谱估计理论算法为主线进行提炼总结,尽可能地反映出这一学科中的精华内容。

3. 创新程度高。尽管该领域的内容十分丰富,但我们仍力求反映出其最新的研究成果与最新进展,并充分反映我们近年来的研究成果、心得与见解。书中介绍的绝大多数算法我们都做了详细的计算机仿真分析,并形成了关于这些算法的 Matlab 软件包。

4. 可读性强。对于许多读者来说,空间谱估计所涉及的内容难学、难懂、难理解,尤其是专业论文不易读懂。本书注意了这一问题,尽量做到由浅入深,特别注重了表达的清晰性、易懂性和可读性。

5. 实用性好。空间谱估计的最大特点在于算法。只有在深入地理解与掌握算法的基础上,其工程应用才易于实现。因此,我们着重围绕算法进行讨论分析,以正确把握算法的特点、性能、适用条件及实现复杂性,从而便于实际应用。其中,算法的误差鲁棒性是算法实用性最为关键的因素之一,因此,我们加强了对这一问题的研究。此外,我们给出了本书的体系结构(见绪论)及在多个章节中提出了同类算法的统一框架(或模型),便于研究者进一步提出新算法及丰富该学科的理论体系。

为了实现上述特色,我们从开始撰写到完成本书已历时5年多,但由于本学科发展极为迅速,实际应用领域甚广,加上作者水平有限,且真正实现上述五个特色还有大量的工作可做,因此,书中难免存在不妥与不足之处,敬请读者批评指正!

刘永坦院士、张光义院士和陆大铨教授热情推荐本书出版,并对本书的写作提出了许多宝贵意见,谨向他们致以衷心的感谢!本书的第一作者在攻读博士学位期间,在阵列信号处理领域得到了其导师保铮院士开拓性的指导,走向工作岗位之后,仍能得到保铮院士的长期指点,在此向他表示最衷心的感谢。同时也向曾经同作者一起参与课题研究的同志们与同行专家、学者们表示感谢,长期的合作研究与广泛交流使作者受益匪浅。在本书的撰写过程中,得到了王布宏博士在计算机仿真和文稿整理等多方面的大力支持与帮助,同时还得到了在读博士生苏保伟、范西昆在文献整理等方面的帮助。此外,还要特别感谢空军电子对抗雷达部王军副部长的支持与帮助,感谢空军雷达学院雷达兵器运用工程军队重点实验室的同志们给予的支持、关心与帮助。

本专著获得了教育部高等院校青年教师教学科研奖励计划(TRAPOYT)、国家自然科学基金(No. 60272086)及清华大学出版社学术专著基金的资助。

王永良 陈辉 彭应宁 万群

常用符号规定

A	阵列流型	σ_N^2	阵元噪声功率
$a(\theta)$	导向矢量	Σ'	$\Sigma' = \Sigma_s - \sigma_N^2 I$
$\text{diag}\{b\}$	表示由矢量 b 组成的对角矩阵	Λ	奇异值构成的对角阵
e_i	矩阵 R 的特征矢量	θ	信号入射的方位角
I_N	$N \times N$ 的单位阵	ϕ	信号入射的俯仰角
J_N	$N \times N$ 的置换矩阵, 反对角元素均为 1	$\text{tr}\{\cdot\}$	求迹运算
L	快拍数	$\text{det}\{\cdot\}$	求矩阵行列式
m	子阵阵元数	$\text{rank}\{\cdot\}$	求秩运算
M	阵元数	$\text{Re}\{\cdot\}$	取实部
N	信号源数	$\text{Im}\{\cdot\}$	取虚部
P_A	矩阵或矢量 A 的投影矩阵	$\max\{\cdot\}$	取最大值
P_A^\perp	与 P_A 正交的矩阵	$\min\{\cdot\}$	取最小值
R	协方差矩阵	$\text{dim}\{\cdot\}$	取矩阵的维数
\hat{R}	矩阵 R 的估计值	$\text{det}\{\cdot\}$	取矩阵的行列式
R_s	信号协方差矩阵	const	表示常数
R_N	噪声协方差矩阵	$E\{\cdot\}$	统计平均
U	左奇异矢量	$\{\cdot\}^H$	共轭转置运算
U_N, U_s	分别为噪声和信号特征矢量构成的矩阵, 即噪声子空间和信号子空间	$\{\cdot\}^T$	转置运算
V	右奇异矢量	$\{\cdot\}^{-1}$	求逆运算
W	权矢量	$\{\cdot\}^*$	共轭运算
λ_i	矩阵的特征值	$\{\otimes\}$	Kronecker 积
σ_i	矩阵的奇异值	$\{\circ\}$	Hadamard 积, 即点乘(对应元素相乘, 最后得到与原矩阵同维的矩阵)
Σ	特征值构成的对角阵	$\langle \cdot, \cdot \rangle$	内积(内积一般指矢量与矢量对应元素相乘求和)
Σ_s	大特征值构成的对角阵	$\ \cdot\ $	范数
Σ_N	小特征值构成的对角阵	A^+	矩阵 A 的伪逆

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 空间谱估计的发展及现状	2
1.3 展望	9
1.4 本书结构及内容安排.....	11
参考文献	13
第 2 章 空间谱估计基础	18
2.1 引言.....	18
2.2 空间谱估计数学模型.....	18
2.2.1 通常情况下的数学模型	19
2.2.2 相干信号源数学模型	22
2.2.3 宽带信号源数学模型	22
2.2.4 分布式目标数学模型	23
2.2.5 误差模型	25
2.3 阵列模型二阶统计特性.....	26
2.4 空间谱估计基础知识.....	30
2.4.1 阵列的方向图	30
2.4.2 基本原理	36
2.4.3 波束宽度	36
2.4.4 分辨力	38
2.4.5 空时等效性	39
2.5 信号源数估计.....	40
2.5.1 信息论方法	41
2.5.2 平滑秩序列法	43
2.5.3 盖氏圆方法	46
2.5.4 正则相关技术	49

2.5.5 小结	50
参考文献	52
第3章 线性预测算法	55
3.1 引言	55
3.2 线性预测的基本原理	56
3.3 波束形成的最佳权矢量	58
3.3.1 波束形成的最优权	59
3.3.2 波束形成与线性预测之间的关系	60
3.3.3 最优约束的谱曲线	61
3.4 空间谱估计中的线性预测算法	62
3.4.1 前向预测算法	62
3.4.2 后向预测算法	63
3.4.3 双向预测算法	64
3.4.4 多阶线性预测算法	64
3.5 线性预测算法的推广	68
3.5.1 最大熵算法	68
3.5.2 自回归模型(AR)算法	69
3.5.3 最小模算法	70
3.6 算法性能比较	73
3.7 小结	78
参考文献	80
第4章 多重信号分类算法	82
4.1 引言	82
4.2 MUSIC 算法	83
4.2.1 经典 MUSIC 算法	83
4.2.2 MUSIC 算法的推广形式	85
4.2.3 MUSIC 算法性能分析	88
4.2.4 MUSIC 算法仿真分析	92
4.2.5 相关结论	98
4.3 基于解相干的 MUSIC 算法	98
4.3.1 空间平滑算法	99
4.3.2 矩阵重构类算法	106

4.4	基于波束空间的 MUSIC 算法	117
4.4.1	波束形成原理及算法	118
4.4.2	波束空间算法的性能	122
4.4.3	波束空间算法的实验仿真	125
4.4.4	相关结论	131
4.5	求根 MUSIC 算法	132
4.5.1	Root-MUSIC 算法	132
4.5.2	Root-MUSIC 算法性能	134
4.5.3	仿真性能分析	136
4.5.4	小结	138
4.6	小结	138
	参考文献	139
第 5 章	最大似然及子空间拟合算法	146
5.1	引言	146
5.2	最大似然算法	147
5.2.1	最大似然准则	147
5.2.2	最大似然估计器性能	149
5.3	子空间拟合算法	152
5.3.1	子空间拟合问题	152
5.3.2	子空间拟合算法性能	154
5.4	参数模型拟合算法的统一	156
5.5	参数模型拟合算法的实现	158
5.5.1	交替投影算法	159
5.5.2	迭代二次型极大似然算法	161
5.5.3	MODE 算法	163
5.5.4	MVP 算法	166
5.5.5	遗传算法	168
5.6	最大似然函数算法的仿真分析	173
5.7	小结	179
	参考文献	180
第 6 章	旋转不变子空间算法	185
6.1	引言	185

6.2	旋转不变子空间算法原理	186
6.3	标准的旋转不变子空间算法	188
6.3.1	最小二乘法	188
6.3.2	总体最小二乘法	189
6.3.3	结构最小二乘法	191
6.4	旋转不变子空间算法的推广	193
6.4.1	Toeplitz 近似法	194
6.4.2	矩阵束的 ESPRIT 算法	196
6.4.3	实值空间的 ESPRIT 算法	197
6.5	旋转不变子空间算法理论性能	204
6.6	旋转不变子空间算法实验性能	206
6.7	小结	210
	参考文献	211
第 7 章 子空间迭代与更新		215
7.1	引言	215
7.2	子空间计算的最优化理论	216
7.3	子空间迭代算法	218
7.3.1	梯度类算法	218
7.3.2	幂迭代算法	223
7.3.3	Lanczos 算法	231
7.4	子空间更新算法	236
7.4.1	数据协方差矩阵的更新	237
7.4.2	基于特征分解批处理的子空间更新	238
7.4.3	基于最优化求解的子空间更新	238
7.4.4	基于秩-1 子空间更新	244
7.5	小结	249
	参考文献	249
第 8 章 宽带信号的空间谱估计算法		253
8.1	引言	253
8.2	宽带聚焦矩阵算法	254
8.2.1	TCT 算法	254
8.2.2	RSS 算法	256

8.2.3	SST 算法	258
8.2.4	LS 类算法	259
8.2.5	宽带波束空间的聚焦矩阵算法	261
8.3	CSM 类聚焦算法框架	262
8.4	CSM 算法性能分析	266
8.5	小结	272
	参考文献	273
第 9 章	循环平稳信号的空间谱估计	276
9.1	引言	276
9.2	基于循环平稳的数学模型	277
9.2.1	循环平稳信号特性	277
9.2.2	数学模型	282
9.3	空间谱估计中的循环平稳算法	285
9.4	空间谱估计中的共轭循环平稳算法	290
9.5	循环平稳算法的性能分析	296
9.6	小结	301
	参考文献	301
第 10 章	空间分布式信号源参数估计	306
10.1	引言	306
10.2	分布源信号模型	307
10.2.1	点目标信号源推广模型	308
10.2.2	局部散射信号源模型	309
10.2.3	级数展开近似模型	310
10.2.4	空间频率近似模型	311
10.2.5	两点源近似模型	312
10.2.6	广义方向矢量模型和复数角	313
10.2.7	单峰对称性约束	314
10.2.8	平坦 Ricean 衰落信道模型	315
10.2.9	更复杂的分布源信号模型	316
10.3	点目标 DOA 估计方法的空间扩展模型误差分析	316
10.3.1	波束形成估计方法	317
10.3.2	常规 MUSIC 估计方法	318

10.3.3	常规 ESPRIT 估计方法	319
10.4	非相干分布源参数估计方法	320
10.4.1	最大似然估计方法	321
10.4.2	协方差矩阵加权最小二乘匹配法	322
10.4.3	伪子空间方法	324
10.4.4	加权伪子空间匹配法	325
10.5	相干分布源波达方向估计方法	327
10.5.1	广义 MUSIC 估计方法	328
10.5.2	最小或最大特征值搜索估计方法	328
10.5.3	广义 ESPRIT 方法	330
10.6	实验仿真	331
10.7	小结	335
	参考文献	336
第 11 章	特殊阵列结构的空谱估计	340
11.1	引言	340
11.2	模式空间方法	341
11.2.1	圆阵的模式空间	341
11.2.2	模式空间虚拟均匀线阵的形成	344
11.2.3	虚拟均匀线阵与真实均匀线阵的比较	346
11.2.4	模式空间平滑算法	350
11.2.5	模式空间 MODE 算法	351
11.2.6	模式空间变换的聚焦性	354
11.3	非等距线阵设置方法	355
11.3.1	阵列信号模糊问题	355
11.3.2	非等距线阵的设置	359
11.3.3	解相干阵列设置方法	365
11.4	虚拟阵列变换法	367
11.4.1	内插阵列变换思想	368
11.4.2	基于内插阵列变换的 DOA 算法	371
11.5	任意阵列的估计性能	373
11.6	算法仿真与分析	378
11.7	小结	384
	参考文献	385

第 12 章 基于高阶统计量的空间谱估计	390
12.1 引言	390
12.2 高阶累积量特性	391
12.3 阵列信号中四阶累积量的特性	394
12.4 基于四阶累积量的空间谱算法	400
12.4.1 基于四阶累积量的 MUSIC 算法	400
12.4.2 基于四阶累积量的 ESPRIT 算法	401
12.4.3 四阶累积量在空间谱估计中的其他应用	405
12.5 基于四阶累积量的 DOA 算法性能分析	407
12.6 小结	410
参考文献	411
第 13 章 空间谱估计中的阵列误差校正	415
13.1 引言	415
13.2 阵列误差及其建模	416
13.2.1 阵元方向图误差	417
13.2.2 阵元通道幅相误差	417
13.2.3 阵元位置误差	417
13.2.4 阵元互耦	418
13.2.5 仿真实验	420
13.3 阵列流型的测量与内插	422
13.3.1 内插算法的机理描述	423
13.3.2 单极化方位内插算法	425
13.3.3 多极化内插算法	425
13.3.4 阵列流型的频域内插	429
13.3.5 测量离散格点的选择与方位估计误差的关系	429
13.4 阵列误差的有源校正方法	430
13.4.1 单辅助信源的通道幅相误差校正	430
13.4.2 多辅助源的通道幅相和阵元位置误差校正	431
13.4.3 多辅助源对阵元位置误差的校正	432
13.5 阵列误差的自校正算法	434
13.6 阵列校正的辅助阵元法	438
13.6.1 算法性能定性讨论	440
13.6.2 参数估计统计一致性的证明	441

13.6.3	方位估计与方位依赖阵元幅相误差估计的 CRB	442
13.6.4	辅助阵元法用于阵元位置误差的校正	443
13.6.5	计算机仿真结果	444
13.7	均匀线阵的互耦校正方法	449
13.7.1	算法原理描述	450
13.7.2	参数估计统计一致性	451
13.7.3	无模糊估计及互耦自由度	452
13.7.4	方位估计与互耦矩阵估计的 CRB	456
13.7.5	计算机仿真结果	457
13.8	小结	461
	参考文献	462
第 14 章	多维空间谱估计	466
14.1	引言	466
14.2	空域与时域处理的等效性	467
14.3	空时二维谱估计	470
14.4	信号频率与二维到达角联合估计	473
14.4.1	空间二维到达角的估计	473
14.4.2	频率与空间二维到达角的联合估计	476
14.4.3	频率与空间方位角的估计	477
14.5	宽频段阵列的信号频率与二维到达角联合估计	479
14.5.1	基于 FFT 的频率无模糊估计	479
14.5.2	基于时延的频率无模糊估计	480
14.5.3	均匀圆阵的无模糊估计	481
14.5.4	信号频率与信号二维到达角联合估计	482
14.5.5	基于圆阵的三维参数估计	484
14.6	多维估计性能分析	486
14.7	小结	493
	参考文献	493
附录 A	数学知识预备	497
附录 B	算法检索表	507

Contents

Chapter 1 Preface	1
1.1 Introduction	1
1.2 Overview of Spatial Spectrum Estimation Techniques	2
1.3 Prospect	9
1.4 Structure and Content	11
References	13
Chapter 2 Basis of Spatial Spectrum Estimation	18
2.1 Introduction	18
2.2 Mathematics Model of Spatial Spectrum Estimation Techniques	18
2.2.1 General Mathematics Model	19
2.2.2 Mathematics Model on Coherent Signals	22
2.2.3 Mathematics Model on Wideband Signals	22
2.2.4 Mathematics Model on Distribute Targets	23
2.2.5 Error Model	25
2.3 Two-Order Statistics Characteristics of Array Model	26
2.4 Basic Knowledge of Spatial Spectrum Estimation	30
2.4.1 Patterns of Array	30
2.4.2 Fundamental Principles	36
2.4.3 Beamwidth	36
2.4.4 Resolution	38
2.4.5 Space Time Equivalence	39
2.5 Number of Signal Estimation	40
2.5.1 Information Theory Method	41
2.5.2 Smoothing-Rank Sequence Method	43
2.5.3 Gerschgorin Disk Method	46

2. 5. 4	Canonical Correlation Technique	49
2. 5. 5	Summary	50
References	52
Chapter 3	Linear Prediction Algorithm	55
3. 1	Introduction	55
3. 2	Fundamental Principles of Linear Prediction	56
3. 3	Optimal Weight Vector	58
3. 3. 1	Optimal Weight for Beamforming	59
3. 3. 2	Relationship between Beamforming and Linear Prediction	60
3. 3. 3	Spectrum of Optimal Constraint	61
3. 4	Linear Prediction Algorithm in Spatial Spectrum Estimation	62
3. 4. 1	Forward Prediction Algorithm	62
3. 4. 2	Back Prediction Algorithm	63
3. 4. 3	Forward-Back Algorithm	64
3. 4. 4	Multiple-Order Linear Prediction Method	64
3. 5	Generalization of Linear Prediction	68
3. 5. 1	Maximum Entropy Method	68
3. 5. 2	Autoregression(AR) Model Algorithm	69
3. 5. 3	Minimum-Norm Method	70
3. 6	Performance Comparison	73
3. 7	Summary	78
References	80
Chapter 4	Multiple Signal Classification Method	82
4. 1	Introduction	82
4. 2	MUSIC Method	83
4. 2. 1	Classical MUSIC Method	83
4. 2. 2	Generalization of MUSIC Method	85
4. 2. 3	Performance Analysis of MUSIC Method	88
4. 2. 4	Analysis on Simulation of MUSIC Method	92
4. 2. 5	Conclusions	98