

学术专著

# 自适应阵列处理

王永良 丁前军 李荣锋 著

清华大学出版社

学术专著

# 自适应阵列处理

王永良 丁前军 李荣锋 著

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

自适应阵列处理是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、系统地论述了自适应阵列处理的理论、算法及算法之间的内在关系。书中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8章组成,主要内容有自适应阵列处理的研究进展、基本概念与原理、自适应阵列处理、部分自适应阵列处理、空域多级维纳滤波器、特殊干扰抑制的自适应波束形成技术、自适应阵列方向图控制、误差影响及校正等。

本书是关于自适应阵列处理理论与技术的一部专著,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、通信与信息系统等专业的研究生教材或参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

自适应阵列处理/王永良,丁前军,李荣锋著. —北京:清华大学出版社,2009.2  
ISBN 978-7-302-19395-1

I. 自… II. ①王… ②丁… ③李… III. 信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第012613号

责任编辑:邹开颜

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市春园印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153×235 印 张:22 插 页:2 字 数:378千字

版 次:2009年2月第1版 印 次:2009年2月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:58.00元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023435-01



**王永良**，1965年生于浙江嘉兴，1994年于西安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部长，并先后被国防科技大学、海军工程大学、空军工程大学、华中科技大学以及中电集团第十四研究所等院校、科研单位聘为兼职博士生导师、教授与研究员。担任中国电子学会国际合作委员会、学术工作委员会及无线电定位委员会委员，任《现代雷达》、《雷达科学与技术》杂志编委。曾获“全国优秀教师”和“全国优秀博士后”荣誉称号，获中国科协“求是杰出青年奖”、教育部“高校青年教师奖”、“全国优秀骨干教师奖”、人事部“中国优秀博士后奖”，被评为“全军爱军精武标兵”，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”。已在IEEE Trans. IEE Proc.、《中国科学》等学术期刊和会议上发表与合作发表论文200多篇，其中被SCI、EI、ISTP国际三大检索收录100多篇。著有学术专著3部（《空时自适应信号处理》、《空间谱估计理论与算法》及本专著）。获国家技术发明二等奖1项，省部级科技进步一等奖3项、二等奖2项，申请中国发明专利19项（授权8项），获软件著作权1项。主要研究方向为：空时信号处理、雷达信号处理、自适应信号处理及其相关应用等。

## Brief

Adaptive array processing is an important area in signal processing, which is widely used in many fields such as radar, communication, sonar, and so on. The objective of the book is to present the fundamental principles and the algorithms and relations between them studied by the authors and others in recent years. This work is organized in eight chapters, consisting of previous and current researches in this area, fundamental concept and principle of adaptive arrays, typical algorithms of adaptive array processing, reduced-dimension adaptive array processing, reduced-rank adaptive array processing, multistage Wiener filters in spatial domain, adaptive pattern control, adaptive array processing under special interference environments, array errors and calibrations, and so on.

This book is a monograph on adaptive array processing theory and techniques. It could be served as a textbook and reference for graduate students majored in signal processing, information and communication systems, and can also be used by the scientific and technical staffs engaged in radar, communication, navigation, sonar, electronic counter measures (ECM), and so on.

# 前 言

自适应阵列处理是近 50 年来一直处于不断发展的一门重要技术,在雷达、通信、导航、声呐、电子对抗、地震预报、语音处理、地质勘探、射电天文、生物医学等众多领域有着极其广阔的应用前景。随着现代电子技术的迅猛发展,该技术仍处于迅速发展之中。从国际来看,学术研究仍是热点,有大量文献报道其新成果与新进展,特别是该技术已成功应用于大量武器装备和民用电子设备与系统。从国内来讲,无论是新型高性能武器装备的研发还是民用相关领域的发展,也都迫切需要发展与应用该技术。为此,我们在分析总结国内外主要研究工作与成果的基础上,结合多年来的研究成果与心得体会撰写此专著,希望为从事该领域的专家学者、工程技术人员及广大师生提供一部有价值的参考书或教学用书。此外,空时自适应信号处理、空间谱估计与自适应阵列处理三个专业方向的特点是均涉及空域(传感器阵列的多个空间通道),但也均离不开时域处理。因此,本人认为,它们可统称为“空时信号处理”,或者更严谨地讲,它们是“空时信号处理”的三大主要内容。我曾与其他同志合作,出版了《空时自适应信号处理》、《空间谱估计理论与算法》两部著作,鉴于该领域的系统性,我们一直在努力将自适应阵列处理这一方向的相关工作同样形成一部专著,便于广大科技工作者更全面掌握空时信号处理的主要内容。

由于自适应阵列处理的研究前人已做了大量卓有成效的工作,理论与技术内容非常丰富。因此,我们深切地体会到要撰写成这方面的一部好专著是十分困难的。一方面因为我们自身的创新工作与成果相比于整个技术体系来说很不够;另一方面,广大读者必然希望该专著在具有很强创新性的同时具有较强的系统性。尽管如此,我们仍努力撰写好这部专著,尽可能满足广大读者的需要,并力求在以下几个方面形成特色:

(1) 结构体系新。近年来国内外虽然已经出版了几本涉及自适应阵列处理内容的优秀著作,但本书则是紧紧围绕自适应阵列处理理论与方法这一专题进行统一描述、系统阐述与深入研究的一部学术专著。尤其是本书的第 4~8 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。

本书的内容经精心组织,各章之间紧密联系,构成一个有机的整体。自适应阵列处理的核心在于自适应阵列处理的方法。为此,我们在研究各种典型方法的基础上,研究了各种方法之间的内在联系,进而提出了方法的统一框架,这便于读者理解掌握,也为研究者进一步提出新方法及丰富与发展该学科的理论体系奠定基础。

(2) 内容选择精。自适应阵列处理由于其理论丰富与应用广泛,公开报道的文献数量非常之多,涉及内容非常之广。为了写好此书,我们收集了大量的国内外文献资料,并在内容上做了精心选择,以突出自适应阵列处理方法为主线进行提炼总结,尽可能地反映出这门技术中的精华内容。

(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发展,并主要反映我们近年来的研究成果、心得与见解。尤其对书中介绍的绝大多数方法做了详细的计算机仿真分析与比较研究。

(4) 工程实用性强。自适应阵列处理技术的工程应用价值很大程度上取决于方法的性能与实用性。因此,我们围绕方法进行了详细深入的分析与讨论,以正确把握各种方法的特点、性能、适用条件及实现复杂性,从而便于实际应用。其中,方法的误差鲁棒性是方法应用于实际工程并确保处理系统高性能最为关键的因素之一,因此,我们系统地深入地研究了这一问题,并进行了详细讨论。

经过我们近5年的努力,终于提交了这本著作。但由于本学科发展极为迅速,特别是实际应用领域甚广,很难根据不同应用领域一一展开讨论,敬请不同领域的读者见谅。此外,限于作者水平,书中定有不少不妥与不足之处,甚至还有错误,恳请读者批评指正!

回想起来,能写成这部专著得益于我的老师、同事、同行与学生,没有他们的指导与帮助,要完成此书是不可能的!在此,我要首先感谢我的恩师保铮院士(我的博士生导师),是他把我领进了这一领域,教给了研究的方法,培养了严谨的作风,使我受益终身。要感谢清华大学的彭应宁教授(我的博士后导师),我们长期的合作研究使我受益匪浅,不断进步。要感谢与我共同完成专著的丁前军博士后、李荣锋博士后,他们做了大量工作,付出了不少心血。我们携手共同克服种种困难,执着地为完成这部专著而努力。要感谢我带领的这支“空时信号处理”团队,十年来我们共同为空时信号处理及其应用并肩战斗、不懈努力,取得了让本领域国内外同行专家认可的一些成果。其中,陈建文教授、王首勇教授、陈辉副教授、许稼副教授、谢文冲博士、鲍拯博士等许多同志在团队中都发挥了很好的作用,他们在空时自适应

处理、空间谱估计等方面做了大量富有成效的工作,与自适应阵列处理的工作形成了一个有机的整体。要衷心感谢张光义院士、彭应宁教授和梁甸农教授,他们热心推荐出版这部著作。要感谢皇甫堪教授、何子述教授、文必洋教授等许多专家教授对本书的撰写提出了许多有益的意见与建议。还要感谢王超博士后、苏保伟博士、戴凌燕博士生为本书所做的部分工作。最后,要特别感谢邹开颜编辑为本书做了大量细致的工作,并耐心地等待此书的“最终手稿”。

王永良

2009年2月



## 文中术语及缩略语表

ADOF	adaptive degree of freedom	自适应自由度
APC	adaptive pattern control	自适应方向图控制
ASLC	adaptive side lobe canceller	自适应旁瓣相消器
AWSS	adaptive weighted spatial smoothing	自适应加权空间平滑
CBF	conventional beamforming	常规波束形成
CFAR	constant false-alarm rate	恒虚警率
CG	conjugate gradient	共轭梯度
CM	constant modulus	恒模
CMT	covariance matrix taper	协方差矩阵锥化
CSA	correlation subtraction algorithm	相关相减算法
CSM(CS)	cross spectral metric	交叉谱度量
CS-MVB	cross spectrum in MVB framework	MVB 框架交叉谱法
CTMV	complementally transformed minimum variance	辅助变换最小方差
CTP	complementally transformed projection	辅助变换投影
DBF	digital beam-forming	数字波束形成
DCT	discrete cosine transform	离散余弦变换
DFT	discrete Fourier transform	离散傅里叶变换
DL	diagonal loading	对角加载
DOF	degree of freedom	自由度
DREC	distortionless response eigencanceler	无失真响应特征干扰相消器
DR-MWF	distortionless response MWF	无失真响应多级维纳滤波器
EC	eigencanceler	特征干扰相消器
ESB	eigenspace based beamformer	基于特征空间波束形成器
GDP	generalized discrepancy principle	广义差异原理
GEIB	generalized eigenspace based beamformer	广义特征空间波束形成器
GSC	generalized sidelobe canceller	广义旁瓣相消器
GSO	gram-schmit orthonormalization	施密特正交化
G-LCOP	generalized LCOP	广义线性约束正交投影

HTP	Hung-Turner projection	Hung-Turner 投影(正交化)
ICSA	iterative correlation subtraction algorithm	迭代相关相减算法
IDOF	interference degree of freedom	干扰自由度
INR	interference-to-noise ratio	干扰噪声比
ISMSE	independent sample mean square error	独立采样均方误差
LCEC	linearly constrained eigencanceler	线性约束特征干扰相消器
LCMV	linearly constrained minimum variance	线性约束最小方差
LCOP	linearly constrained orthogonal projection	线性约束正交投影
LMS	least mean square	最小均方
MCMV	multiple constrained minimum variance	多约束最小方差
MIMO	multiple-input-multiple-output	多输入多输出
ML	maximum likelihood	最大似然
MMSE	minimum mean square error	最小均方误差
MNV	minimum noise variance	最小噪声方差
MSC	multiple-sidelobe canceller	多旁瓣相消器
MSE	mean square error	均方误差
MSINR	maximum signal to interference-plus-noise ratio	最大信干噪比
MVB	minimum variance beamformer	最小方差波束形成器
MVDR	minimum variance distortionless response	最小方差无失真响应
MWF	multistage Wiener filter	多级维纳滤波器
NAMI	noise-alone matrix inversion	干扰加噪声矩阵求逆
OP	orthogonal projection	正交投影
PAA	partially adaptive array	部分自适应阵
PC	principal components	主分量
PCI	principal components inversion	主分量求逆法
PC-GSC	principal components method in GSC framework	GSC 框架主分量法
QBC	quadratic beam pattern constraints	二次波束方向图约束
QPC	quiescent pattern control	静态方向图控制
QPS	quiescent pattern synthesis	静态方向图综合
RLS	recursive least square	递归最小二乘
ROC	region of convergence	收敛域
RR-	reduced rank	降秩
SC-MVB	small components in MVB framework	MVB 框架小分量法
SDCG	steering dependent conjugate gradient	指向依赖共轭梯度
SICG	steering independent conjugate gradient	指向无关共轭梯度
SINR	signal-to-interference-plus-noise ratio	信干噪比
SMI	sample matrix inversion	采样矩阵求逆

SMSE	sample mean square error	采样均方误差
SNR	signal-to-noise ratio	信噪比
SPNMI	signal-plus-noise matrix inversion	信号加干扰加噪声矩阵求逆
SPT	split-polarity transformation	裂相变换
SS	spatial smoothing	空间平滑
STAP	space-time adaptive processing	空时自适应处理
TDM	tri-diagonal matrix	三对角阵
TDWF	transformation domain Wiener filter	变换域维纳滤波器
T-LCMV	transformation-based LCMV	基于变换的线性约束最小方差
ULA	uniform linear array	等距线阵
UMWF	unitary multistage Wiener filter	酉多级维纳滤波器
WF	Wiener filter	维纳滤波器
WFSS	weighted forward spatial smoothing	加权前向空间平滑
WNGC	white noise gain constraint	白噪声增益约束
WSS	weighted spatial smoothing	加权空间平滑

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 自适应阵列处理的研究进展 .....	2
1.3 本书的主要内容 .....	8
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 自适应阵列处理的基本概念与原理</b> .....	13
2.1 引言.....	13
2.2 自适应滤波.....	13
2.3 自适应阵列处理的数学模型.....	15
2.3.1 空间自适应阵列 .....	15
2.3.2 相干阵与非相干阵、窄带信号与宽带信号.....	17
2.3.3 阵列信号模型 .....	18
2.3.4 阵列方向图 .....	18
2.4 确知波束形成.....	19
2.4.1 均匀加权 ULA 阵 .....	19
2.4.2 空时等效性 .....	21
2.4.3 阵列孔径、分辨率与阵元间隔选择.....	23
2.5 空间匹配滤波器.....	24
2.5.1 阵列增益 .....	25
2.5.2 波束宽度 .....	26
2.5.3 相位扫描的带宽限制 .....	26
2.5.4 低副瓣加权处理 .....	28
2.6 统计最优波束形成.....	30
2.6.1 最优波束形成的寻优准则 .....	30
2.6.2 最优波束形成器的方向图 .....	34

2.6.3	最优波束形成的低副瓣加权处理 .....	39
2.6.4	导向矢量失配对最优波束形成器性能的影响 .....	40
2.6.5	理解统计最优波束形成器的最佳示例——广义旁瓣相消器(GSC) .....	44
2.7	自适应波束形成算法 .....	47
2.7.1	块自适应处理算法 .....	48
2.7.2	连续自适应处理算法 .....	52
	附录 .....	58
	参考文献 .....	61
<b>第3章</b>	<b>自适应阵列处理 .....</b>	<b>62</b>
3.1	引言 .....	62
3.2	自适应旁瓣相消器 .....	62
3.2.1	自适应旁瓣相消器的原理 .....	62
3.2.2	自适应旁瓣相消器中的期望信号相消现象 .....	65
3.3	最小方差无失真响应波束形成器与广义旁瓣相消器 .....	66
3.3.1	最小方差无失真响应(MVDR)波束形成器 .....	66
3.3.2	广义旁瓣相消器(GSC) .....	67
3.3.3	MVDR波束形成器与GSC的等效性 .....	68
3.4	线性约束最小方差波束形成器与线性约束广义旁瓣相消器 .....	70
3.4.1	线性约束最小方差(LCMV)波束形成器 .....	70
3.4.2	线性约束广义旁瓣相消器(LC-GSC) .....	71
3.4.3	LCMV波束形成器与LC-GSC的等效性 .....	72
3.5	多级维纳滤波器 .....	73
3.5.1	维纳滤波器的一种等效结构——变换域维纳滤波器(TDWF) .....	73
3.5.2	维纳滤波器的多级分解与综合——多级维纳滤波器(MWF) .....	76
3.5.3	多级维纳滤波器分析 .....	78
3.6	约束多级维纳滤波器(CMWF) .....	80
3.6.1	线性约束多级维纳滤波器(LC-MWF) .....	80
3.6.2	无失真响应多级维纳滤波器(DR-MWF) .....	81
3.7	自适应阵列处理典型算法的内在关系 .....	82
3.8	小结 .....	82

附录 .....	83
参考文献 .....	84
<b>第 4 章 部分自适应阵列处理 .....</b>	<b>85</b>
4.1 引言 .....	85
4.2 降维自适应阵列处理 .....	86
4.2.1 子阵空间部分自适应阵 .....	87
4.2.2 波束空间部分自适应阵 .....	89
4.2.3 计算机仿真与分析 .....	91
4.3 降秩自适应阵列处理 .....	104
4.3.1 特征干扰相消器 .....	105
4.3.2 主分量求逆法和正交投影类算法 .....	110
4.3.3 基于 MVB 框架的降秩变换自适应滤波算法 (RR-MVB) .....	116
4.3.4 基于 GSC 框架的降秩变换自适应滤波算法 (RR-GSC) .....	119
4.3.5 基于 Krylov 子空间的降秩自适应滤波 .....	123
4.3.6 正交化算法(HTP) .....	128
4.3.7 直接形式的降秩共轭梯度自适应波束形成算法 .....	129
4.3.8 基于特征空间的自适应波束形成算法(ESB) .....	130
4.3.9 降秩自适应滤波算法小结 .....	131
4.4 自适应阵列处理的算法体系与统一框架 .....	132
4.4.1 自适应阵列处理的算法体系 .....	132
4.4.2 基于 GSC 的自适应阵列处理的统一框架 .....	134
4.5 小结 .....	136
附录 .....	137
参考文献 .....	138
<b>第 5 章 空域多级维纳滤波器 .....</b>	<b>144</b>
5.1 引言 .....	144
5.2 多级维纳滤波器特性分析 .....	145
5.3 GRS 多级维纳滤波器和相关相减算法多级维纳滤波器 .....	146
5.3.1 GRS 多级维纳滤波器 .....	147
5.3.2 相关相减算法多级维纳滤波器 .....	148

5.4	改进的相关相减算法多级维纳滤波器 .....	153
5.4.1	改进的多级维纳滤波器 CSA 算法实现 .....	153
5.4.2	计算机仿真与分析 .....	155
5.4.3	小结 .....	163
5.5	迭代相关相减算法多级维纳滤波器 .....	164
5.5.1	多级维纳滤波器的后向迭代算法 .....	165
5.5.2	多级维纳滤波器的迭代相关相减算法实现 .....	166
5.5.3	计算机仿真与分析 .....	170
5.5.4	小结 .....	172
	参考文献 .....	173
<b>第 6 章</b>	<b>特殊干扰抑制的自适应波束形成技术 .....</b>	<b>177</b>
6.1	引言 .....	177
6.2	相干干扰抑制技术 .....	177
6.2.1	相干干扰环境下的期望信号相消现象 .....	179
6.2.2	非空间平滑类算法 .....	182
6.2.3	虚拟波束形成自适应加权空间平滑算法 .....	192
6.2.4	计算机仿真与分析 .....	197
6.3	针对干扰位置快变化的运动干扰抑制技术 .....	203
6.3.1	Mailloux 方法 .....	204
6.3.2	Zatman 方法 .....	204
6.3.3	基于干扰位置变化统计模型的零陷加宽方法 .....	205
6.3.4	计算机仿真与分析 .....	207
6.4	基于数据阻塞矩阵预处理的主瓣干扰抑制技术 .....	208
6.4.1	方法原理 .....	208
6.4.2	计算机仿真与分析 .....	210
6.5	小结 .....	213
	附录 .....	215
	参考文献 .....	217
<b>第 7 章</b>	<b>自适应阵列方向图控制 .....</b>	<b>220</b>
7.1	引言 .....	220
7.2	基于自适应阵理论的静态方向图数值综合方法(NPS) .....	223
7.2.1	基本原理 .....	223

7.2.2	计算机仿真与分析	226
7.3	约束最优化静态方向图综合	232
7.3.1	主瓣约束副瓣最优化静态方向图综合(COP1法)	233
7.3.2	副瓣约束主瓣最优化静态方向图综合(COP2法)	235
7.3.3	线性约束副瓣最优化静态方向图综合(COP3法)	236
7.3.4	计算机仿真与分析	236
7.4	线性约束自适应方向图控制	239
7.4.1	LCMV波束形成器中的自适应方向图控制	239
7.4.2	广义旁瓣相消器自适应方向图控制	241
7.4.3	基于GSC框架的线性约束降秩自适应波束形成器 自适应方向图控制	241
7.4.4	线性约束特征干扰相消器自适应方向图控制	242
7.4.5	线性约束正交投影算法自适应方向图控制	244
7.4.6	计算机仿真与分析	245
7.5	二次波束约束自适应方向图控制	254
7.5.1	LCMV波束形成器的QBC自适应方向图控制	254
7.5.2	线性约束广义旁瓣相消器的QBC自适应方向图 控制	258
7.5.3	计算机仿真与分析	259
7.6	小结	261
	附录	263
	参考文献	271
<b>第8章</b>	<b>误差对自适应阵列性能的影响及其校正</b>	<b>275</b>
8.1	引言	275
8.2	阵元通道幅相误差的影响分析	276
8.2.1	误差模型及方法描述	276
8.2.2	理论分析	277
8.2.3	计算机仿真与分析	279
8.3	阵元互耦的影响及补偿分析	282
8.3.1	互耦情况下的阵列信号模型	282
8.3.2	互耦补偿	283
8.3.3	互耦补偿后自适应阵列性能的分析	284
8.3.4	计算机仿真与分析	287



---

8.4 频带不一致性的影响及解决方法 .....	291
8.4.1 频带不一致性的影响分析 .....	291
8.4.2 传统自适应通道补偿方法 .....	293
8.4.3 基于带宽分割的自适应通道补偿方法 .....	294
8.4.4 自适应通道均衡原理、实现及效果评价 .....	299
8.4.5 各种因素对自适应均衡性能影响的仿真分析 .....	303
8.4.6 两种改进的自适应通道均衡方法 .....	314
8.4.7 高次畸变下基于带宽分割的均衡法 .....	318
8.5 小结 .....	321
附录 .....	323
参考文献 .....	326