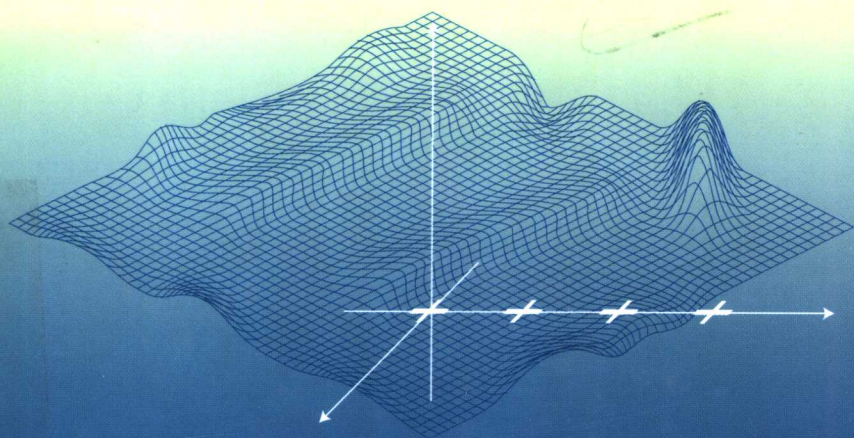


极化敏感阵列信号处理

Signal Processing of Polarization Sensitive Array

庄钊文 等著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

极化敏感阵列信号处理

Signal Processing of Polarization Sensitive Array

庄钊文 徐振海 肖顺平 著
王雪松 代大海 邓 泳

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

极化敏感阵列信号处理/庄钊文等著. —北京:国防工业出版社, 2005.3

ISBN 7-118-03862-8

I. 极... II. 庄... III. 信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 022820 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 10 $\frac{1}{8}$ 258 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 35.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

众所周知,空间电磁信号是矢量信号,完备的电场和磁场为六维的复矢量。普通阵列仅获取其中的一维信息,阵元输出仅为反映信号强度的复幅度,对信号的极化信息不敏感。极化敏感阵列是一种能够获取电磁信号极化信息的新型阵列,其阵元的输出为矢量而非标量,完备的电磁信息为阵列性能的提高奠定了物理基础。和普通阵列相比,极化敏感阵列具有优越的系统性能:较强的抗干扰能力、稳健的检测能力、较高的分辨能力以及极化多址能力,其诸多优点导致极化敏感阵列具有重要的军事、民事应用价值和广阔的应用前景。

20世纪90年代以来,极化敏感阵列信号处理成为阵列信号处理领域新的研究热点,积累了一批极富学术价值的研究成果并逐渐进入实用阶段。然而,学术界的 research 主要集中在信号极化状态、到达角、频率联合估计方面,关于极化敏感阵列信号滤波方面的研究较少,关于极化敏感阵列信号检测方面的研究未见报道。作者近年来结合“国家安全重大基础研究973项目”等工作,在极化敏感阵列信号滤波、极化敏感阵列信号检测、极化域-空域联合谱估计等方面取得了一批富有学术意义的研究成果,以此为基础设想撰写一本有关极化敏感阵列信号处理方面的专著,试图对该领域所涉及的主要问题进行理论概括和技术总结,供相关领域的科技工作者阅读参考。

本书是关于极化敏感阵列的专著,以极化敏感阵列为研究对象,研究了信号滤波、检测及参量估计等一系列信号处理过程,从理论上定量地证明了极化敏感阵列的优势和潜能。研究将极化信

息处理与阵列信号处理结合起来,构建了极化敏感阵列信号处理的理论框架。

全书共分六章。第一章定性分析了极化敏感阵列的性能优势和应用前景,并综述了学术界关于极化敏感阵列的研究进展和现状。第二章主要研究极化敏感阵列的结构以及信号接收模型,是后续章节信号处理问题研究的基础。第三章主要研究利用干扰信号与期望信号空域和极化域的特征差异抑制干扰、增强信号的问题;研究了完全极化、部分极化以及相关干扰条件下极化敏感阵列的最优滤波性能;提出了一种双信息信号传输的方案,并导出了无互扰传输的条件,设计了双信息信号的极化状态。第四章主要研究待定检测方向上广义噪声背景下的信号检测问题,在普通阵列信号检测、极化信号检测的基础上提出了极化敏感阵列信号检测的概念,研究了匹配子空间检测理论和自适应子空间检测理论,推导了各种条件下检测器的表达式,并分析了其检测性能;利用匹配子空间检测理论深入研究了极化敏感阵列对完全极化信号的检测问题,具体研究了白噪声背景、单干扰背景以及信号偏离阵列波束时的检测性能,并和普通阵列信号检测作了比较;研究了极化敏感阵列对部分极化信号检测问题,利用矩阵特征分解导出了似然比统计检验量,分析了检测器的检测性能。第五章主要研究利用极化敏感阵列的一系列采样数据对信号空间到达角和极化状态角的联合估计问题;构建了极化域-空域联合谱,深入研究了联合谱的两项重要性能指标:估计精度和分辨力,导出了信号到达角和极化角 CRB 的解析表达式,提出了极化敏感阵列信号模糊函数的概念并求出其解析表达式,提出了“序贯”处理方式下联合谱的自适应递推估计算法;根据获得的极化信息提出了广义“最近邻”算法,解决目标跟踪领域目标关联问题。第六章总结了信号滤波、信号检测以及信号估计三部分的关系,构建了极化敏感阵列实验系统原理框架,指出了后续值得研究的方向。

为了便于读者阅读,书末附有必要的数学知识和一些复杂的推导以及大量关于极化敏感阵列信号处理方面的文献资料,对于

那些希望从事该领域研究的科技工作者无疑是有益的。

本书由庄钊文教授、徐振海博士、肖顺平教授、王雪松教授和博士生代大海、邓泳执笔,庄钊文教授拟定全书内容并审校全稿。在本书的撰写过程中,王国玉研究员、蒋兴才教授、鲜明副教授、李盾副教授、张文明副教授提供了多方面的支持和帮助,同时还得到了周颖、张义荣等博士生以及李金梁、李李佳等硕士生的帮助。

由于时间仓促,水平有限,加上这一领域仍处于迅速发展之中,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2005年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 极化敏感阵列性能优势	2
1.1.1 较强的抗干扰能力	3
1.1.2 稳健的检测能力	3
1.1.3 较高的分辨能力	4
1.1.4 极化多址能力	4
1.2 极化敏感阵列应用前景	5
1.3 国内外相关领域研究概况	6
1.3.1 极化敏感阵列信号滤波方面	7
1.3.2 极化敏感阵列信号检测方面	8
1.3.3 极化敏感阵列信号参量估计方面	9
1.3.4 极化敏感阵列系统实现方面	11
1.4 本书主要内容与结构安排	12
第 2 章 极化敏感阵列与信号接收模型	15
2.1 电磁波的极化及其表征	15
2.1.1 完全极化波	16
2.1.2 部分极化波	19
2.2 空间电磁信号极化域—空域联合表征	22
2.3 极化敏感阵列	24
2.3.1 阵元结构	25
2.3.2 阵列几何结构	26
2.3.3 阵列工作模式	28
2.4 信号接收模型	28
2.4.1 假设条件	28
2.4.2 阵元接收模型	30

2.4.3	阵列接收模型	32
2.4.4	阵列矢量的线性独立性	36
2.5	小结	37
第3章	极化敏感阵列信号滤波	38
3.1	概述	39
3.2	极化域—空域最优滤波理论	43
3.2.1	极化域—空域自适应处理原理	43
3.2.2	最大信号干扰噪声比准则	45
3.2.3	最小均方误差准则	49
3.2.4	干扰抑制准则	51
3.2.5	主瓣约束准则	53
3.2.6	最大检测概率准则	54
3.2.7	极大似然准则	56
3.2.8	多线性约束准则	57
3.2.9	待定主瓣约束准则	60
3.2.10	几种滤波准则之间的比较分析	62
3.3	完全极化情形下阵列滤波性能	65
3.3.1	最优信号处理	66
3.3.2	滤波性能分析	66
3.3.3	滤波性能比较	69
3.3.4	算例与分析	71
3.3.5	小结	80
3.4	部分极化情形下阵列滤波性能	80
3.4.1	部分极化信号接收模型	81
3.4.2	阵列接收信号分解	82
3.4.3	信号干扰噪声比与最优加权矢量	83
3.4.4	滤波性能分析	84
3.4.5	算例与分析	90
3.4.6	小结	96
3.5	相关干扰情形下阵列滤波性能	97
3.5.1	相关干扰条件下信号模型	98
3.5.2	基于 MMSE 准则阵列信号处理	98

3.5.3	滤波性能分析	102
3.5.4	算例与分析	104
3.5.5	小结	115
3.6	双信息信号无互扰传输	116
3.6.1	双信息信号传输与处理框架	117
3.6.2	无互扰条件	117
3.6.3	小结	122
3.7	小结	122
第4章	极化敏感阵列信号检测	124
4.1	概述	125
4.1.1	常规阵列信号检测算法	126
4.1.2	极化雷达目标自适应检测算法	128
4.1.3	极化空时联合域 GLRT 检测算法	130
4.1.4	子空间变换 GLRT 检测算法	131
4.1.5	匹配子空间检测器与自适应子空间检测器	131
4.2	匹配子空间检测理论	132
4.2.1	白噪声中信号匹配子空间检测:强度已知情形	133
4.2.2	白噪声中信号匹配子空间检测:强度未知情形	137
4.2.3	色噪声中信号匹配子空间检测	142
4.2.4	结构噪声中信号匹配子空间检测	144
4.2.5	小结	149
4.3	自适应子空间检测理论	151
4.3.1	噪声协方差矩阵完全相同	152
4.3.2	噪声协方差矩阵不完全相同	158
4.3.3	小结	163
4.4	完全极化情形极化敏感阵列信号检测	164
4.4.1	白噪声背景中单信号检测	166
4.4.2	单干扰背景中单信号检测	169
4.4.3	信号到达方向偏离波束方向	177
4.4.4	与普通阵列比较	179
4.4.5	小结	181
4.5	部分极化情形极化敏感阵列信号检测	182

4.5.1	部分极化信号检测模型	182
4.5.2	似然比检测器推导	183
4.5.3	检测器性能分析	186
4.5.4	结构噪声背景下的信号检测性能	190
4.5.5	小结	196
4.6	小结	196
第5章 极化域—空域联合谱估计		199
5.1	概述	200
5.2	极化域—空域 MUSIC 联合谱估计	204
5.2.1	联合谱定义	204
5.2.2	联合谱估计方法	205
5.2.3	联合谱分辨特性	208
5.2.4	仿真与分析	209
5.2.5	小结	212
5.3	联合谱估计精度分析	213
5.3.1	阵列参量估计的 CRB	214
5.3.2	极化敏感阵列参量估计的 CRB	217
5.3.3	单信号源情形	220
5.3.4	两信号源情形	221
5.3.5	小结	226
5.4	联合谱分辨力分析	226
5.4.1	MUSIC 零谱概念	227
5.4.2	分辨性能分析	228
5.4.3	极化敏感阵列信号模糊函数	233
5.4.4	仿真与结论	236
5.4.5	小结	237
5.5	极化域—空域动态联合谱估计	238
5.5.1	阵列协方差矩阵更新	239
5.5.2	矩阵特征分解二阶修正	240
5.5.3	信号子空间更新算法	247
5.5.4	具体的算法流程	250
5.5.5	仿真与结论	251

5.5.6 小结	255
5.6 基于目标极化特征的数据关联	256
5.6.1 目标特征距离度量	257
5.6.2 广义“最近邻”算法	258
5.6.3 极化状态预测与滤波	259
5.6.4 仿真与结论	260
5.6.5 小结	263
5.7 小结	263
第6章 结束语	266
6.1 滤波、检测和估计之间的关系	266
6.2 极化敏感阵列实验系统框架	267
6.3 后续研究展望	269
6.3.1 自适应滤波算法	269
6.3.2 阵列多参量估计问题	270
6.3.3 阵列系统误差问题	271
6.3.4 极化敏感阵列极限能力	273
6.3.5 单一电磁矢量传感器信号处理	274
6.3.6 接收全极化雷达广义旁瓣对消	274
6.3.7 “超”智能天线理论与应用	275
6.3.8 机载极化相控阵雷达理论与应用	276
附录	278
参考文献	295

Contents

Chapter 1 Preface	1
1.1 Advantage of PSA	2
1.1.1 Stronger Anti-jammer Ability	3
1.1.2 Robust Detection Performance	3
1.1.3 Higher Resolving Power	4
1.1.4 Polarization Division Multiple Address	4
1.2 Application Prospect of PSA	5
1.3 Overview of Signal Processing of PSA	6
1.3.1 On Signal Filtering	7
1.3.2 On Signal Detection	8
1.3.3 On Signal Estimation	9
1.3.4 On Systemic Realization	11
1.4 Structure and Content	12
Chapter 2 PSA and its Signal Model	15
2.1 Polarization of Electromagnetic Wave and its Description	15
2.1.1 Completely Polarized Wave	16
2.1.2 Partially Polarized Wave	19
2.2 Representation of Signal in both Polarization and Space Domains	22
2.3 Polarization Sensitive Array	24
2.3.1 Struction of Polarization Sensitive Element	25
2.3.2 Struction of PSA	26
2.3.3 Working Mode of PSA	28
2.4 Received Signal Model of PSA	28

2.4.1 Hypothesis	28
2.4.2 Signal Model of Element	30
2.4.3 Signal Model of Array	32
2.4.4 Independence of Steering Vectors	36
2.5 Summary	37
Chapter 3 Signal Filtering of PSA	38
3.1 Introduction	39
3.2 Optimal Filtering Theory in both Polarization and Space Domains	43
3.2.1 Adaptive Signal Processing Structure	43
3.2.2 MSINR Criterion	45
3.2.3 MMSE Criterion	49
3.2.4 Interference Suppress Criterion	51
3.2.5 Mainlobe Constraint Criterion	53
3.2.6 Maximal Detection Probability Criterion	54
3.2.7 ML Criterion	56
3.2.8 Multiple Linear Constraints Criterion	57
3.2.9 Mainlobe Constraint to Determine Criterion	60
3.2.10 Difference between Criteria	62
3.3 Filtering Performance of PSA: Completely Polarized Case	65
3.3.1 Optimal Signal Processing	66
3.3.2 Filtering Performance Analysis	66
3.3.3 Compared with Common Array	69
3.3.4 Examples and Results	71
3.3.5 Conclusions	80
3.4 Filtering Performance of PSA: Partially Polarized Case	80
3.4.1 Receiving Singal Model of Partially Polarized Signal	81
3.4.2 Receiving Signal Decomposition	82
3.4.3 SINR and Optimal Vector	83
3.4.4 Filtering Performance Anlysis	84

3.4.5	Examples and Results	90
3.4.6	Conclusions	96
3.5	Filtering Performance of PSA: Correlated Interference	
Case	.....	97
3.5.1	Received Signal Model of Correlated Interference Case	98
3.5.2	Signal Processing Based on MMSE Criterion	98
3.5.3	Filtering Performance Analysis	102
3.5.4	Examples and Results	104
3.5.5	Conclusions	115
3.6	Dual Information Signals Transmission without	
Mutual Interference	.....	116
3.6.1	Dual Information Signals Transmission and Processing	117
3.6.2	Null interference Condition	117
3.6.3	Conclusions	122
3.7	Summary	122
Chapter 4	Signal Detection of PSA	124
4.1	Introduction	125
4.1.1	Array Signal Detection Algorithms	126
4.1.2	Polarization Radar Signal Detection Algorithms	128
4.1.3	GLRT in Polarization-Space-Time Domains	130
4.1.4	GLRT Based on Subspace Transform	131
4.1.5	Matched Subspace Detector and Adaptive Subspace	
Detector	.....	131
4.2	Matched Subspace Detection Theory	132
4.2.1	Matched Subspace Detection in White Noise with	
Known Level	.....	133
4.2.2	Matched Subspace Detection in White Noise with	
Unknown Level	.....	137
4.2.3	Matched Subspace Detection in Colourful Noise	142
4.2.4	Matched Subspace Detection in Structued Noise	144
4.2.5	Conclusions	149
4.3	Adaptive Subspace Detection Theory	151

4.3.1	Adptive Subspace Detection in Noise of Equal Level	152
4.3.2	Adptive Subspace Detection in Noise of Different Level	158
4.3.3	Conclusions	163
4.4	Signal Detection of PSA: Completely Polarized	
	Case	164
4.4.1	Single Signal Detection in White Noise	166
4.4.2	Single Signal Detection in Single Interference plus White Noise	169
4.4.3	Signal Detection when Misaligned with Looking Direction	177
4.4.4	Compared with Common Array	179
4.4.5	Conclusions	181
4.5	Signal Detection of PSA: Partially Polarized Case	182
4.5.1	Detection Model of Partially Polarized Signal	182
4.5.2	Likelihood Ratio Test	183
4.5.3	Detection Performance and Analysis	186
4.5.4	Detection Performance in Structured Noise	190
4.5.5	Conclusions	196
4.6	Summary	196
Chapter 5 Joint Spectrum Estimation in both Polarization and Space Domains		199
5.1	Introduction	200
5.2	Joint Spectrum Estimation by MUSIC Method	204
5.2.1	Defination of Joint Spectrum	204
5.2.2	Estimation of Joint Spectrum	205
5.2.3	Resolving Property of Joint Spectrum	208
5.2.4	Simulations and Results	209
5.2.5	Conclusions	212
5.3	Accuracy of Joint Spectrum	213
5.3.1	CRB of Aommon Array	214
5.3.2	CRB of PSA	217
5.3.3	Single Source Case	220
5.3.4	Two Sources Case	221

5.3.5	Conclusions	226
5.4	Resolving Power of Joint Spectrum	226
5.4.1	MUSIC Null Spectrum	227
5.4.2	Resolving Power Analysis	228
5.4.3	Ambiguity Function of Polarization Sensitive Array Signals	233
5.4.4	Simulations and Results	236
5.4.5	Conclusions	237
5.5	Adaptive Estimation of Joint Spectrum	238
5.5.1	Updating of Array Covariance Matrix	239
5.5.2	Rank-2 Updating of Matrix Eigendecomposition	240
5.5.3	Signal Subspace Updating Algorithm	247
5.5.4	Algorithm Steps	250
5.5.5	Simulations and Results	251
5.5.6	Conclusions	255
5.6	Data Association based on Polarization Information	256
5.6.1	Feature Distance of Targets	257
5.6.2	Generalized "Nearest Neighbour" Algorithm	258
5.6.3	Forecast and Filter of Polarization State	259
5.6.4	Simulations and Results	260
5.6.5	Conclusions	263
5.7	Summary	263
Chapter 6	Tag	266
6.1	Relation among Filter, Detection and Estimation	266
6.2	Systematic Structure of PSA	267
6.3	Research in Future	269
6.3.1	Adaptive Filtering Algorithms	269
6.3.2	Multiple Parameters Estimation	270
6.3.3	Error of PSA	271
6.3.4	Utmost Ability of PSA	273
6.3.5	Signal Processing of EM Vector Sensor	274
6.3.6	Sidelobe Canceler of Receiving Polarization Radar	274

6.3.7 Super Smart Antenna	275
6.3.8 Polarization-Space-Time Signal Processing	276
Appendix	278
Reference	295