



国防特色教材·信息与通信技术

极化敏感阵列信号处理

JIHUA MINGAN ZHENLIE XINHAO CHULI

徐友根 刘志文 龚晓峰 编著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·信息与通信技术

极化敏感阵列信号处理

徐友根 刘志文 龚晓峰 编著



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书介绍了极化敏感矢量阵列信号处理的基础理论和方法, 主要内容包括极化敏感阵列输出信号的建模, 非相干源信号参数估计理论与方法, 空域、极化域、相域以及谱域平滑信号解相干方法, 信号子空间拟合, 最大似然, 多维搜索和松弛迭代相干源信号参数估计方法, 基于张量和多元数的规则极化敏感阵列信号参数估计方法, 部分校正极化敏感阵列信号参数估计方法, 极化敏感阵列极化—空间域波束形成理论与方法, 规则极化敏感阵列流形模糊问题, 完全极化信号的检测与角度跟踪等。

本书可作为高等院校、科研院所信号与信息处理、通信与信息系统等学科和专业的研究生教材, 也可供通信、雷达以及导航、电子对抗等领域的广大技术人员学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

极化敏感阵列信号处理 / 徐友根, 刘志文, 龚晓峰编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2013. 1

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7340 - 4

I. ①极… II. ①徐…②刘…③龚… III. ①信号处理-高等学校-教材 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 015015 号

极化敏感阵列信号处理

徐友根 刘志文 龚晓峰 编著
责任编辑 王玲玲

*

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街 5 号 (100081) 发行部电话: 010 - 68944990 传真: 010 - 68944450

[http: // www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

北京地质印刷厂印刷 全国各地新华书店经销

*

开本: 787 毫米×960 毫米 1/16 印张: 23.75 字数: 501 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷 印数: 1~3000 册

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7340 - 4 定价: 65.00 元

前 言

极化敏感矢量阵列信号处理是阵列信号处理的一个前沿领域和最新发展，在通信、雷达、声纳和生物医学等众多领域有着广阔的应用前景。本教材全面、深入地论述了极化敏感矢量阵列信号处理的关键理论、方法及性能，并系统地展现了极化敏感矢量阵列信号处理领域国内外的最新研究成果。

本教材共分9章。第1章介绍了极化敏感阵列信号处理的研究背景和发展概况；第2章介绍了极化敏感阵列信号处理方面的一些基础知识，主要涉及电磁波极化的概念及其数学和物理表征、极化敏感阵列输出信号的数学模型、极化敏感阵列的分类，以及极化信息的利用在提高阵列信号处理性能方面的潜在优势；第3章介绍了非相干源信号参数估计的一般理论和基本方法，主要包括极化多重信号分类方法、极化子空间旋转不变参数估计方法、多项式求根方法以及噪声子空间拟合方法；第4章介绍了四种基于极化敏感阵列的信号解相干技术：空域平滑、极化域平滑、相域平滑及谱域平滑，同时还介绍了四种无需解相干处理的相干源信号参数估计方法：信号子空间拟合方法、最大似然方法、多维搜索法和色噪声条件下的松弛方法；第5章介绍了基于张量分解和多元数的规则极化敏感阵列信号参数估计理论与方法；第6章介绍了极化敏感阵列模型参数部分未知条件下的信号参数估计理论与方法；第7章介绍了极化敏感阵列极化-空间域波束形成的理论、方法及其性能；第8章讨论了规则极化敏感阵列流形矢量的线性无关度；第9章介绍了基于极化敏感阵列的完全极化信号检测和角度跟踪问题。

限于作者水平，书中不妥甚至错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者
于北京理工大学

常用符号说明

$(\cdot)^*$	共轭运算	\otimes	线性卷积运算
$(\cdot)^T$	转置运算	\otimes	Kronecker 积 (见附录 E)
$(\cdot)^H$	共轭转置运算	\odot	张量外积 (见附录 E 的定义 E.11)
$(\cdot)^{-1}$	满秩矩阵逆	\ominus	Khatri-Rao 积 (见附录 E)
$(\cdot)^+$	列满秩矩阵左逆	\odot	Hadamard 积 (见附录 E)
$(\cdot)^{\#}$	Moore-Penrose 伪逆	$\mathcal{P}_{\min}(\cdot)$	矩阵的最小特征值
$\text{tr}(\cdot)$	矩阵迹	$\vec{\mathcal{P}}_{\min}(\cdot)$	最小特征值对应的特征矢量
$\text{rank}(\cdot)$	矩阵秩	$\mathcal{P}_{\max}(\cdot)$	矩阵的最大特征值
$\det(\cdot)$	矩阵行列式	$\vec{\mathcal{P}}_{\max}(\cdot)$	最大特征值对应的特征矢量
$\text{vec}(\cdot)$	矩阵矢量化	$\mathcal{G}_{\min}(\cdot)$	矩阵束的最小广义特征值
$\text{unvec}(\cdot)$	矢量矩阵化	$\vec{\mathcal{G}}_{\min}(\cdot)$	最小广义特征值对应的广义特征矢量
$\text{span}(\cdot)$	矩阵列扩张空间	$\mathcal{G}_{\max}(\cdot)$	矩阵束的最大广义特征值
$\text{col}(\cdot)$	矩阵的列数	$\vec{\mathcal{G}}_{\max}(\cdot)$	最大广义特征值对应的广义特征矢量
$\text{dim}(\cdot)$	线性空间的维数	$\vec{\mathcal{L}}_{\max}(\cdot)$	最大奇异值对应的奇异矢量
$\text{diag}(\cdot)$	对角矩阵	\mathbf{I}_N	$N \times N$ 维单位矩阵
$\ \cdot\ $	矢量 Euclidean 范数	\mathbf{O}_N	$N \times N$ 维零矩阵
$\ \cdot\ _F$	矩阵 Frobenius 范数	$\mathbf{0}_N$	N 维零矢量
$\text{Re}(\cdot)$	求复数量实部	$\mathbf{O}_{M \times N}$	$M \times N$ 维零矩阵
$\text{Im}(\cdot)$	求复数量虚部	$\mathbf{i}_{N,m}$	$N \times N$ 维单位矩阵的第 m 列
$\max(\cdot)$	求最大值	$\mathbf{1}_N$	N 维全 1 矢量
$\min(\cdot)$	求最小值	θ	信号方位角
$\text{round}(\cdot)$	四舍五入求整运算	ϕ	信号俯仰角
s.t.	受约束于	γ	信号极化辅助角
$E(\cdot)$	数学期望	η	信号极化相位角
$\text{cum}(\cdot)$	高阶累积量	α	信号极化倾角
$\partial(\cdot)$	偏导数	β	信号极化椭圆角

$\delta(\cdot)$	Dirac 函数	$\mathcal{U}_{\theta,\phi}$	信号阵元空间相位矩阵
$ \cdot $	模/绝对值	\mathcal{P}	阵列极化敏感矩阵
$\arg(\cdot)$	主相角	$\mathbf{a}_s(\theta, \phi)$	信号空域导向 (流形) 矢量
\mathcal{F}	Fisher 矩阵	$\mathbf{a}_v(\theta, \phi, \gamma, \eta)$	信号极化-角度域导向 (流形) 矢量
$\mathcal{R}(\cdot)$	旋转矩阵	$\boldsymbol{\psi}(\theta, \phi, \gamma, \eta)$	全电磁矢量传感器信号导向 (流形) 矢量
\times	矢量叉积运算	$\mathbf{h}_{\gamma,\eta} / \mathbf{h}_{\alpha,\beta}$	信号极化矢量
\tilde{h}	信号非圆率	$\vec{\mathbf{e}}_p(\theta, \phi)$	信号传播矢量
ϖ	信号非圆相位	$\vec{\mathbf{e}}_v(\theta, \phi)$	信号波前平面垂直分量
\wp	信号 (波) 极化度	$\vec{\mathbf{e}}_h(\theta)$	信号波前平面水平分量

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 极化敏感阵列信号处理的发展概况	3
1.2.1 极化-空间域波束形成	4
1.2.2 信号多维参数估计及其性能分析	5
1.2.3 信号检测与角度跟踪	6
1.2.4 其他应用	7
1.3 教材结构及内容安排	7
第 2 章 极化敏感阵列信号处理基础	9
2.1 极化概念及表征	9
2.1.1 完全极化波	9
2.1.2 部分极化波	14
2.2 电磁波信号的空间多点相干接收	15
2.3 极化敏感阵列输出信号模型	19
2.4 极化敏感阵列的类型	24
2.5 极化敏感阵列信号的统计特性	26
2.6 利用信号极化信息的潜在优势	29
习题	39
第 3 章 非相干源信号参数估计	46
3.1 信号模型	46
3.1.1 完全极化情形	46
3.1.2 部分极化情形	48
3.2 极化多重信号分类方法: 极化 MUSIC	49
3.2.1 完全极化 MUSIC	49
3.2.2 部分极化 MUSIC	65

3.3	极化子空间旋转不变方法: 极化 ESPRIT	67
3.3.1	空域完全极化 ESPRIT	67
3.3.2	空域部分极化 ESPRIT	75
3.3.3	极化-角度域完全极化 ESPRIT	77
3.3.4	极化-角度域部分极化 ESPRIT	85
3.3.5	单电磁矢量传感器非圆 ESPRIT	86
3.3.6	近场源极化 ESPRIT	89
3.4	多项式求根方法	93
3.5	噪声子空间拟合方法	96
	习题	100
第 4 章	相干源信号参数估计	110
4.1	空域平滑信号解相干方法	111
4.2	极化域平滑信号解相干方法	119
4.2.1	极化域均匀平滑	119
4.2.2	极化域加权平滑	122
4.2.3	极化域加权平滑方法性能分析	126
4.2.4	部分极化条件下的极化域平滑	131
4.2.5	基于残缺电磁矢量阵列的极化域平滑	133
4.3	相域平滑信号解相干方法	138
4.3.1	相域直接平滑	138
4.3.2	相域平方平滑	139
4.4	谱域平滑信号解相干方法	141
4.5	信号子空间拟合方法	144
4.6	最大似然方法	148
4.6.1	确定最大似然方法 (DML)	148
4.6.2	随机最大似然方法 (SML)	152
4.7	多维搜索方法	153
4.8	色噪声条件下的松弛方法 (RELAX)	156
	习题	158
第 5 章	张量和多元数域规则极化敏感阵列信号参数估计	162
5.1	规则极化敏感阵列信号张量模型	162
5.2	双模投影 MUSIC 方法	163
5.2.1	双模投影原理	163

5.2.2 角度和极化参数的解耦	166
5.3 矢量 MUSIC 方法	169
5.4 四元数 MUSIC 方法	171
5.5 双四元数 MUSIC 方法	174
习题	177
第 6 章 模型参数部分未知时的信号参数估计	178
6.1 存在非时变模型不确定性时的信号参数估计	178
6.1.1 矢量阵元流形已知, 但矢量阵元间相对位置及增益未知	178
6.1.2 矢量阵元间相对位置已知, 但矢量阵元流形未知	182
6.2 存在时变模型不确定性时的信号参数估计: 多重投影秩亏 MUSIC 方法	189
6.3 最低约束部分校正矢量阵列	191
6.3.1 混合阶正则化 ESPRIT 方法	191
6.3.2 滞后(时)域 ESPRIT 方法	196
6.3.3 空间拉伸电磁矢量传感器及其阵列	198
习题	199
第 7 章 极化-空间域波束形成	204
7.1 极化-空间域波束形成基础及设计方法	204
7.1.1 波束形成器的基本结构及分类	204
7.1.2 波束形成器极化-空间选择性的描述: 波束方向图	205
7.1.3 数据无关波束形成器: 极化-空间域匹配滤波器	206
7.1.4 统计最优波束形成器	209
7.1.5 部分统计最优波束形成器: 广义旁瓣相消器	213
7.2 极化-空间域波束形成的潜能和优势	214
7.2.1 均匀电、磁噪声功率情形	216
7.2.2 三极子天线情形	217
7.3 统计最优波束形成器的自适应实现	223
7.3.1 成批处理: 样本矩阵求逆方法	224
7.3.2 逐次处理: 序贯方法	224
7.4 基于信号非圆特征恢复的盲波束形成	226
7.4.1 单秩环境盲波束形成	227
7.4.2 多秩环境盲波束形成	235
7.5 基于参数估计的两步自适应波束形成	239
7.6 波束形成在信号参数估计中的应用: 波束扫描方法	240

7.6.1	极化 Bartlett 方法	241
7.6.2	极化 Capon 方法	242
	习题	246
第 8 章	规则极化敏感阵列流形模糊问题	255
8.1	预备知识	255
8.1.1	阵列流形模糊及虚拟信号导向矢量的概念	255
8.1.2	规则极化敏感阵列信号虚拟导向矢量	256
8.1.3	虚拟信号导向矢量的冗余性	257
8.1.4	相关引理	257
8.2	任意偶数阶虚拟信号导向矢量线性无关度的上、下界	259
8.3	三种典型规则极化敏感阵列其信号(虚拟)导向矢量的线性无关度	265
8.3.1	交叉偶极子/磁环阵列	265
8.3.2	三极子天线阵列	267
8.3.3	全电磁矢量传感器阵列	268
	习题	272
第 9 章	完全极化信号的检测与角度跟踪	274
9.1	完全极化信号的检测	274
9.2	完全极化信号的角度跟踪	276
9.2.1	单遗忘因子自适应矢量叉积法	277
9.2.2	多遗忘因子自适应矢量叉积法	278
	习题	279
附录		280
附录 A	式(2.7)所示结论的证明	280
附录 B	式(2.76)、式(2.112)、式(4.212)的证明	282
附录 C	极化距离	286
附录 D	多重幅相比较算法	294
附录 E	张量基础	295
附录 F	电磁矢量传感器规则阵列信号导向矢量的线性无关度	302
附录 G	标量函数对矢量及矩阵的导数	313
附录 H	矩阵求逆公式	321
附录 I	部分习题解答	322
参考文献		338

第1章 绪 论

1.1 引 言

电磁源的极化是除其信号幅度、相位、频率和波形等信息之外,另一可资利用的重要特征信息^[1-10]。对信号源极化信息的充分挖掘和利用,可以显著提高有关信息系统的处理性能。譬如,在针对天波信号的短波(2~30 MHz)测向阵列(LOW Frequency ARray, LOFAR)系统中,经电离层反射至阵列的待处理信号通常具有不同的极化状态,如果能合理地利用信号间的这种极化差异,势必能提高测向性能。另外,同时考虑信号方向和极化也有助于了解电离层状况和改善短波通信质量^[11]。信息获取与处理的常规手段,比如雷达、通信、电子侦察和对抗,地震勘探,射电天文,智能感知以及医学影像等系统,多是基于单(均匀)极化标量阵列(uniformly polarized array)。该类阵列由增益特性相同的多个天线(传感器)组成,只可获得反映信号波场某剖面结构的标量信息,对信号极化这一矢量信息具有盲性。相应地,标量阵列信号处理通常也只能利用信号空域相干波前中所隐含的空间相位信息,其处理性能对阵列孔径的大小和信号波长均较为敏感,而对入射信号的极化方式有时还会呈现病态响应:由于单极化阵列所有天线单元仅有单一的极化方式,当入射信号的极化方式与之正交时,阵列将不会产生有效输出,后续信号处理自然也就无法进行。

获取和利用信号源极化信息的一个有效手段是采用所谓“极化敏感”阵列,其英文名称为“polarization-sensitive array”。与标量阵列不同的是,极化敏感阵列由若干个极化选择特性不尽相同的天线组成,所以有文献也称之为多极化阵列(diversely polarized array),这些天线可以在空间上按一定几何要求完全散开分布,例如图 1.1 (a)所示的水平极化敏感均匀圆阵,它由 8 个指向互异的空间分立偶极子天线组成;它们也可部分位于空间同一位置并具有相同的相位中心,形成若干个所谓电磁矢量传感器^[12],例如图 1.1 (b)所示的三极子天线,它由 3 个相互垂直的(电)偶极子组成,在空间学中如电离层监测和等离子体层结构探测等领域有着广泛的应用^[11, 13-14]。电磁矢量传感器结构紧凑,但阵元互耦效应明显,且制作成本高;空间散布型极化敏感阵列一般需要较大的载荷空间,但阵元间互耦效应相对较低,也易于由标量阵列升级而成,譬如改变天线指向等。

极化敏感阵列本质上属于矢量阵列(vector array),其内部阵元极化选择特性的多元化使之能以矢量方式观测信号波场,从而能够提取更为细致的微观结构信息。这一矢量信息获取能力为提高阵列信号处理的整体性能,如自适应滤波、信号检测和分辨、参数估计等奠定了物理基础,同时也为进一步提高信息获取与处理系统的性能提供了新的技术手段和途径。正是由于这个原因,极化敏感矢量阵列信号处理受到了广泛的关注,是阵列信号处理领域的研

究热点之一^[15-17]。

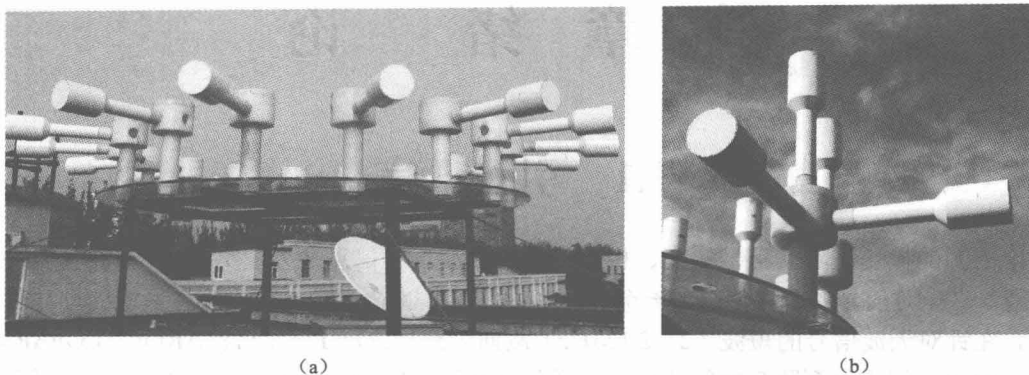


图 1.1 两种极化敏感阵列实图

(a) 水平极化敏感偶极子圆阵；(b) 三极子极化敏感阵

与标量阵列相比，矢量阵列的优势主要在于：① 微观上能以矢量方式感知入射电磁波在不同方向上的投影分量，宏观上又可提取入射波在特定媒质中传播所具有的空间相干特征；② 极化-角度域相干结构信息辅之以空域相干结构信息，以及隐含的信号间相关度的减弱，使得空间源信号多维参数估计、自适应波束形成、信号检测等的性能得到进一步改善；③ 在一些实际应用场合，如安装在飞行器上的传感器阵列，由于飞行器姿态的非规则性，通常很难保证组成阵列的所有天线极化选择特性完全一致，此时以极化敏感阵列对其建模无疑更为合理而科学；④ 极化敏感阵列具有与信号参数有关的空域调制特性，抗相位模糊能力较强，可方便地实现空域稀疏布阵；⑤ 高阶累量域虚拟阵列的有效阵元个数高于同阵元数的标量阵列^[18]。

作为极化敏感阵列特殊形式的电磁矢量传感器^[12]，是目前学术界和工业部门都比较关注的一类新型单入多出天线。例如，美国 Flam and Russell 公司生产的所谓“SuperCART”天线阵（Superresolution Compact Array Radiolocation Technology），它由 3 个正交的偶极子和 3 个正交的矩形磁环共点构成，其工作频段为 2~30 MHz^[19-22]（图 1.2 (a) 是其示意图），可以感知完整的电磁矢量信息，教材中又称其为“全”电磁矢量传感器（或天线）。

若去除全电磁矢量传感器中的某些电磁感应单元，则可以得到一系列具有不同电磁感应能力的低维矢量天线，比如图 1.1 (b) 所示的三极子天线。与全电磁矢量传感器相比，三极子天线缺少了环天线单元，所以并不能感应磁场。又比如由同点配置并且相互正交的一对偶极子天线所组成的交叉偶极子天线（Co-centered Crossed-Dipole pair, CCD），它是另外一种更为简单的二维矢量天线。正是由于低维矢量天线只能感应部分电磁矢量信息，教材中又统称之为“残缺”矢量天线（传感器）。另外，与标量阵元相对应，电磁矢量传感器有时也简称为矢量阵元。

电磁矢量传感器可以直接提供输入电磁波信号的部分甚至全部六个电、磁场分量，从而

形成有效的极化-角度域观测孔径。电磁矢量传感器及其阵列作为一类特殊的极化敏感阵列，其信号处理特别是信号多维参数估计和波束形成具有以下特点：① 单个全电磁矢量传感器可对信号进行极化-角度域相干接收形成有效孔径，且极化-角度域流形（型）矢量与信号频率无关，可用于短波信号测向（特别是阵列尺寸受限的场合），并可同时处理窄带和宽带信号，对于宽带情形，还具有一定的抗多径能力；② 对于单个全电磁矢量传感器，两信号对应的导向矢量间的夹角与信号间的实际物理角度差和极化距离成正比，可实现三维空间无栅瓣波束形成（标量阵列一般不具备此性质）；③ 由多个电磁矢量传感器组成的电磁矢量传感器阵列还可同时得到空间相位信息，形成有效的极化-空间域相干结构，在极化和空间域同时观测信号波场使得阵列输出数据中具有大量的冗余信息可以利用，这更有利于阵列孔径的扩展，后续信号处理算法对模型误差的鲁棒性也有所提高；④ 与具有相同空域流形结构的标量阵列相比，极化敏感矢量阵列具有更高秩的抗角度模糊能力；⑤ 某些类型的电磁矢量传感器阵列在近场源测向方面有着明显的优势，例如后文将要介绍的由多个同点配置正交小磁环-短偶极子二维矢量天线（Co-centered Orthogonal Loop and Dipole, COLD）所组成的阵列^[23-24]。

电磁矢量传感器在很多军事和民用实际系统中都已有应用^[25]。比如，日本总务省位于冲绳县石垣市白保地区的 DEURAS-H（DEtect Unlicensed RADio Stations）短波侦测系统即由 9 个正交配置的交叉磁环天线组成^[26]；瑞典 LOIS（LOFAR in Scandinavia）项目建于南部韦克舍市（Växjö）的 Riscing 测试站则采用了如图 1.1（b）所示的电三极子和如图 1.2（b）所示的磁三极子（由 3 个相互正交的小圆环天线组成，工作频段为 10~240 MHz^[27]）。

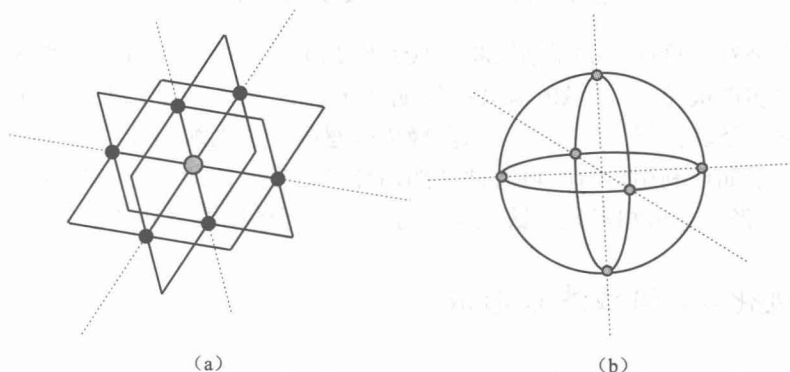


图 1.2 两种常见的电磁矢量传感器结构示意图

(a) “SuperCART” 天线；(b) “LOIS” 磁三极子天线

1.2 极化敏感阵列信号处理的发展概况

图 1.3 所示是阵列信号接收和处理系统的一般框图：将若干个天线按一定规律放置于空间组成接收阵列，多个接收通道同步采集空间电磁波信号，然后采用一定的算法对得到的矢

量观测数据进行处理, 获得有用信息或实现信号增强等。与常规标量阵列信号处理一样, 极化敏感矢量阵列信号处理的目的是功能仍是从干扰与噪声中检测有用信号, 估计其波形或波达方向 (Direction-Of-Arrival, DOA), 或确定信号源的位置等。

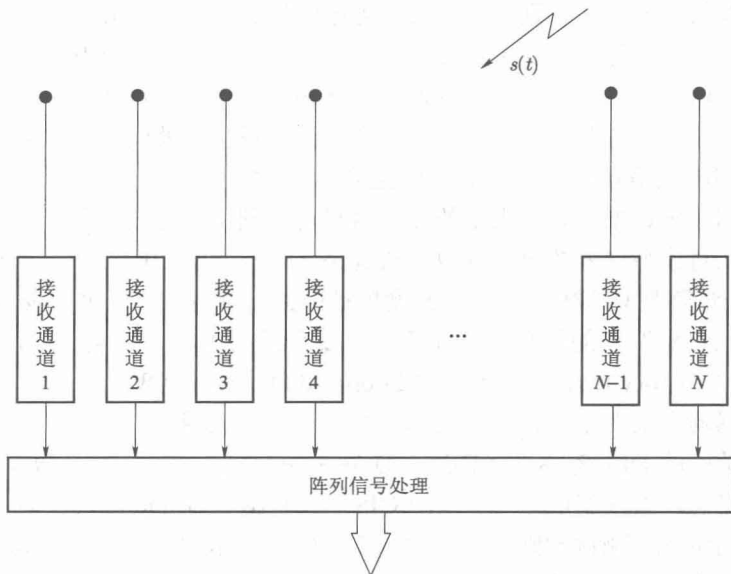


图 1.3 阵列信号接收和处理系统示意图

从发展历史来看, 早期 (20 世纪 80 年代) 研究主要集中于利用极化敏感阵列进行自适应波束形成, 以实现极化-空间域的滤波; 后期 (20 世纪 90 年代到 21 世纪初) 则主要围绕信号多维参数估计及其性能分析问题, 以及极化敏感阵列在无线通信系统中的应用; 最近的研究则主要侧重于如何利用信号时域特性 (如循环平稳性、非圆性等) 和采用先进数学工具 (如高阶累积量、张量分析和多元代数理论) 进一步提高极化敏感阵列信号处理的性能。

1.2.1 极化-空间域波束形成

极化敏感矢量阵列自适应波束形成可以实现极化-空间域的滤波, 使阵列具有期望的极化-方向选择性, 从而有效抑制与有用信号具有不同极化-空间特征的干扰和噪声, 显著提高信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)。

文献 [28-32] 较早研究了由交叉偶极子或三极子天线所组成的极化敏感阵列的自适应滤波与抗干扰性能, 这些工作初步证实了极化敏感阵列的极化域滤波功能及其优越性, 并且揭示了两点: ① 利用极化敏感矢量阵列有可能突破空域均匀采样定理 (阵元间距不超过半个信号波长), 且在一定程度上克服了传统均匀极化标量阵列的栅瓣问题; ② 仅利用信号和干扰间的极化差别可完成对后者的有效抑制。文献 [33-36] 进一步从理论上定量说明了信号

极化信息的利用对滤波性能的改善作用(特别是当信号和干扰在空间距离较近时)。这些工作继承和发展了空间多址理论,有力地支撑了极分多址的构想。

文献[37]探讨了基于非校准极化敏感阵列的滤波方法,文献[38–41]则进一步研究了相干干扰、阵元互耦、通道失配和部分极化等条件下交叉偶极子天线阵列的自适应滤波性能。

文献[42–44]定量研究了基于单个全电磁矢量传感器的完全/部分极化环境、电传感器噪声和磁传感器噪声功率相同和互异条件下最小方差滤波器的性能,进一步佐证了利用信号-干扰极化差异可提高干扰抑制性能这一事实;文献[45–46]则研究了电磁矢量传感器阵列在宽频段信号盲波束形成中的应用。

其他关于极化敏感阵列信号波束形成理论、方法和性能的一些主要研究工作见于文献[47–66]。

1.2.2 信号多维参数估计及其性能分析

信号多维参数估计是极化敏感阵列信号处理的另一重要任务,主要侧重于研究如何提高算法的估计精度和分辨力。文献[67–99]将子空间旋转不变参数估计方法(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT^[100])移植于极化敏感阵列,实现了多个信号 DOA 和极化参数的闭式估计。特别地,文献[79–80, 85, 90]讨论了电磁矢量传感器阵列的孔径扩展问题,其中的工作表明电磁矢量传感器阵列的空域调制特性使之可突破空域均匀采样定理,即矢量阵元间距可超过半个信号波长而不引入参数估计模糊问题;文献[75, 77, 86, 88, 92]则讨论了信号极化状态的时变性对测向性能的影响以及相应的算法修正。

文献[12, 101–102]推导了矢量阵列参数估计的几种性能下界,并提出了一种针对单个全电磁矢量传感器的所谓矢量叉积(cross-product)信号 DOA 估计算法,该法要比文献[70]中提出的多重幅相比较算法简单;文献[103–104]提出了针对单个三极子天线的准矢量叉积算法,它要比文献[93, 105]中的多重幅相比较算法简单。

文献[106–115]将另外一种经典子空间分解方法即多重信号分类方法(Multiple Signal Classification/Characterization, MUSIC^[116, 117])推广到了极化敏感矢量阵列;文献[118–126]在此基础上研究了基于多项式求根技术的极化敏感矢量阵列信号参数估计闭式方法。

文献[23, 127–136]研究了基于极化敏感阵列的最大似然(包括其变体)和子空间拟合类方法及性能,此类估计子的统计性能要优于前述基于子空间分解的次最优方法(即 MUSIC 和 ESPRIT),但需要多维搜索,计算复杂度非常高。

继文献[68]首次针对交叉偶极子阵列提出极化平滑的概念之后,文献[71, 137–148]进一步从不同层面研究了基于矢量阵列的空域/极化域数据平滑信号解相干技术及其性能。与空间平滑相比,极化平滑对阵列空间几何没有特殊要求,并且不破坏阵列的空间有效孔径。

文献[140, 149–158]和[159–165]分别研究了非平稳信号和近场源信号的参数估计理论和方法;文献[113, 166–168]研究了基于电磁矢量传感器阵列的分布源信号参数估计问题。

文献 [18, 169–188] 研究了极化敏感阵列流形矢量的特点、线性无关度以及相应的参数估计模糊问题。

文献 [189–214] 研究了极化敏感阵列信号建模及其误差问题（特别是阵元互耦效应和指向误差），以及算法或系统层面的校正。

近年来，人们开始关注张量分解和多元代数等先进代数工具在极化敏感矢量阵列信号处理中的应用，以更直观地表征和分析矢量阵列信号，并更充分地挖掘信号在空-时-极化维上的多重关联^[215–217]。特别地，文献 [218–219] 首次提出在张量域实现信号、噪声子空间分解，提出所谓矢量 MUSIC 思想；文献 [144, 220] 提出了基于张量分解的双模投影 MUSIC 方法，该方法能以张量形式实现空间/极化平滑运算，因而可以处理相干源信号；文献 [221–222]、[223–224] 和 [225–226] 则分别针对双分量矢量传感器（如交叉偶极子天线）、三分量矢量传感器（如三极子天线）和全电磁矢量传感器（六分量）阵列提出四元数、双四元数和四四元数 MUSIC 方法；文献 [227–228] 则将四元数方法推广到了色噪声情形；文献 [229] 研究了矢量线阵四元数 MUSIC 方法的改进；文献 [230] 针对交叉偶极子线性均匀阵列（数据具有空间平移不变结构）提出了基于四元数的 ESPRIT 方法。

文献 [16, 231–234] 推导了极化敏感阵列非相干源和相干源信号测向的性能下界；文献 [235–236] 研究了极化敏感阵列流形的内插问题；文献 [237] 研究了阵元极化选择性对信号测向性能的影响；文献 [81, 99, 159–160, 198, 238–248] 研究了宽频段信号频率、极化和 DOA 的同时估计及其性能；文献 [94, 159, 161, 163, 239, 249–253] 研究了基于高阶累积量的极化敏感阵列信号参数估计问题；文献 [142–143, 147, 254] 研究了基于极化敏感阵列的循环平稳信号参数估计问题；文献 [255–256] 研究了并行因子分析理论 (PARAllel FACtor analysis, PARAFAC) 在极化敏感阵列信号参数估计中的应用。

其他一些围绕极化敏感阵列信号多维参数估计及其性能分析和实测数据处理的工作见于文献 [257–317] 中。

1.2.3 信号检测与角度跟踪

极化敏感阵列在提高信号检测与动目标跟踪性能方面也有着重要的潜能。文献 [318] 首先将均匀极化工作方式下的检测器理论推广到了极化域，提出了空-时-极化域联合检测的理论和方法，并将极化矢量而非极化参数本身引入检测模型以实现空-时参数空间和极化参数空间的分离，从而消除了常规极化敏感检测器中所需的复杂极化滤波器组。

文献 [319–337] 进一步研究了基于极化敏感阵列的信号检测和分离理论及方法。其中，文献 [320] 研究了部分极化信号的检测问题；文献 [322–323] 提出了基于 PARAFAC 的极化信号检测方法；文献 [326] 提出了基于多线性分解理论的极化信号检测方法；文献 [327–329] 将广义似然比信号检测方法推广到了电磁矢量传感器及其阵列；文献 [334, 337] 研究了张量分解和多元数理论在矢量传感器源分离中的应用。

文献 [104, 158, 319, 332, 338–343] 研究了极化目标的跟踪问题, 其中, 文献 [338, 341] 研究了基于单个全电磁矢量传感器的矢量叉积单源跟踪方法; 文献 [319, 332] 研究了基于单个全电磁矢量传感器的多源跟踪方法; 文献 [340] 提出了一种可用于三极子阵列多源跟踪的 H^∞ 算法; 文献 [104] 提出了一种基于单个三极子天线的准矢量叉积单源跟踪方法。

1.2.4 其他应用

文献 [9] 系统地介绍了雷达系统中的极化分集理论和有关技术, 以及极化雷达在目标检测、识别和分类方面的优势; 文献 [190, 204, 344] 介绍了极化敏感阵列在遥感和空时信号处理中的应用; 文献 [339, 343, 345–347] 研究了基于电磁矢量传感器的极化雷达及其波形设计问题; 文献 [218, 321, 325, 336, 348–350] 研究了极化敏感阵列在地震信号处理中的应用。

文献 [8, 46, 51, 58, 103, 333, 351–375] 介绍了极化敏感阵列在无线通信系统中的应用。

特别地, 文献 [352] 描述了一个有趣的现象, 即在散射环境中使用矢量天线传输信息, 系统通信容量可望提高至原来的 3 倍。因为横电磁波传播方向和波前平面垂直, 所以传统观点认为用电磁波携带和传输信息只有两个自由度, 因此多数常规系统均使用双极化天线, 如上文所提及的交叉偶极子天线。事实上, 在散射环境中, 若发送端利用如图 1.1 (b) 所示的三极子天线同时发射三路独立信号, 经过散射通道后有可能经由不同路径最终都到达接收端。

文献 [368, 376–385] 介绍了极化敏感阵列的一些设计理论和方法、实际应用及其系统实现。

1.3 教材结构及内容安排

本教材旨在介绍极化敏感矢量阵列信号处理, 特别是信号多维参数估计和波束形成问题中的一些基本理论和方法。继本章绪论之后, 教材结构及内容安排如下:

第 2 章, 介绍极化敏感阵列信号处理方面的基础知识, 主要涉及极化的概念及其表征、极化敏感阵列输出信号的数学模型、极化敏感阵列的分类, 以及极化信息的利用在提高阵列信号处理性能方面的潜在优势。

第 3 章, 介绍非相干源信号参数估计的一般理论和基本方法, 主要包括极化多重信号分类方法 (极化 MUSIC)、极化子空间旋转不变参数估计方法 (极化 ESPRIT)、多项式求根方法以及噪声子空间拟合方法。

第 4 章, 介绍 4 种基于极化敏感阵列的信号解相干技术: 空域平滑、极化域平滑、相域平滑以及宽带条件下的谱域平滑; 此外, 还将介绍 4 种计算复杂度较高但无需信号解相干处理的信号参数估计方法, 即信号子空间拟合方法、最大似然方法、多维搜索方法以及色噪