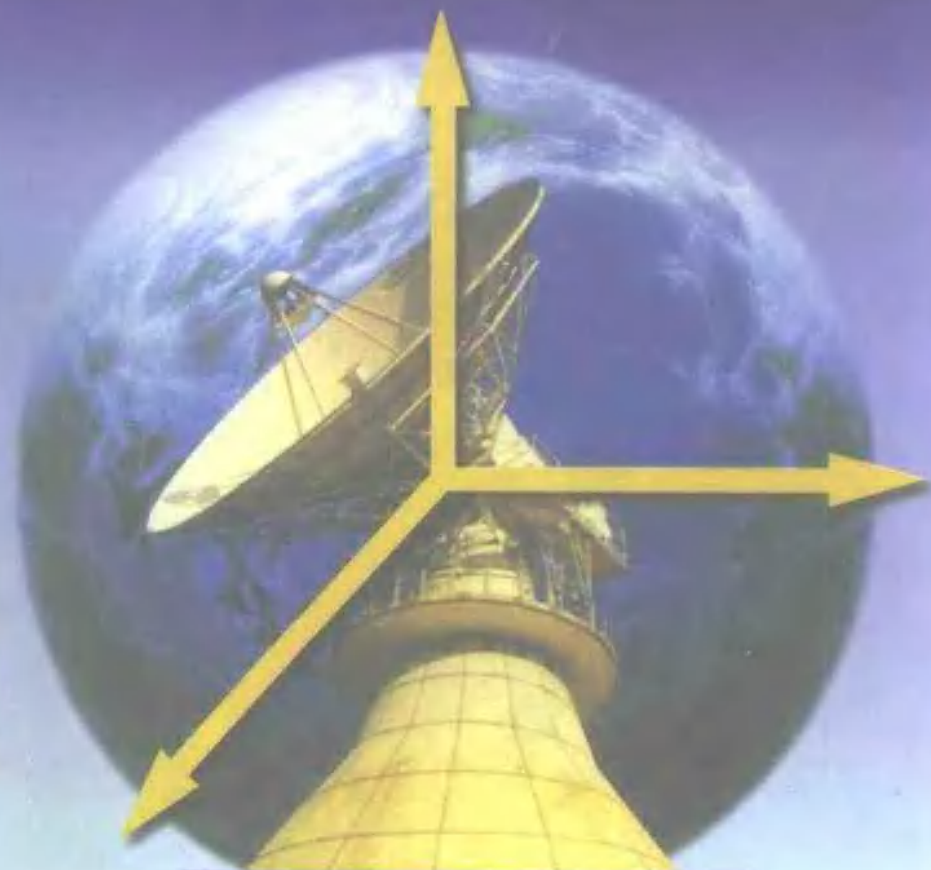


雷达极化信息处理 及其应用

Radar Polarization Information Processing
And Application

庄钊文 肖顺平 王雪松 著



国防工业出版社

7795
二九二

428544

雷达极化信息处理 及其应用

Radar Polarization Information Processing And Application

庄钊文 肖顺平 王雪松 著



00428544

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

雷达极化信息处理及其应用/庄钊文等著. —北京:国防工业出版社, 1999. 1

ISBN 7-118-01938-0

I. 雷… II. 庄… III. 雷达-极化(电子学) IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 15041 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 1/4 396 千字

1999 年 1 月第 1 版 1999 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1-1000 册 定价: 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾铎

秘书长 崔士义

委员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序)

刘仁 朱森元 荣英贤 宋家树

杨呈豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

前 言

雷达目标散射信号中的极化信息在目标检测、增强及识别研究中有着广泛的应用前景,但这一极为重要的信息资源至今尚未得到充分的开发利用。虽然早在雷达技术发展之初,人们就已认识到一般目标具有改变探测信号极化方式的特性,并在实验中发现了目标有效散射截面对于探测信号极化方式的依赖,但之后很长的一段时期内,由于雷达目标极化散射机理难以揭示,以及极化测量将大大增加雷达系统的复杂性、技术实现十分困难且造价昂贵,这些因素严重阻碍了雷达极化信息处理理论与技术的发展。

该领域的研究经过国内外相关研究领域科技工作者几十年的不懈努力,在已完善了的电磁波极化表征基础上,针对窄带雷达体制,已在诸如改善信号杂波功率比、电磁逆散射、增强目标检测和鉴别能力方面取得了一批极富学术价值的研究成果。这些成果零星地报道于各专业期刊上,即使出现在电磁学著作的部分章节中也属少见,雷达极化信息处理本身尚未形成系统的理论与应用成果以专著形式出版。

近十几年来,随着雷达极化测量基础理论、技术及宽带技术的逐步成熟并投入实用,开展宽带极化雷达体制下目标检测、增强及识别方面的研究工作已有现实基础,雷达极化信息处理正日益引起当今国内外学术界的浓厚兴趣和高度重视。作者近年来结合“八·五”、“九·五”国防预研工作,在雷达极化测量误差理论修正、目标宽带极化散射特性分析、极化滤波、极化特征机理与目标识别研究等方面取得了一批富有学术意义的研究成果,以此为重要基础,加之结合国内外相关方面的工作,以及作者多年来为博士生和硕士生相关课程的讲授心得,设想撰写一本有关雷达极化信

息处理理论与应用方面的专著,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。

全书共分七章。第一章着重归纳和评述了雷达极化信息在电
磁信号滤波、目标增强、杂波抑制、目标检测及目标识别等方面的
理论与应用成果;第二章整理了电磁波及其各种表征,给出了各种
极化表示法及相应极化图之间的关系;第三章为雷达极化基础
理论,重点论述了反映目标极化特性信息的目标变极化效应及其
描述、极化散射矩阵变换、极化不变量以及目标最优极化等基本概
念和问题;第四章着重讨论了极化测量及其误差产生的物理成因、
误差修正方法及其性能评估等内容;第五章详细论述了复杂电磁
环境中抑制干扰、改善信号接收质量以及目标极化滤波增强的理
论和技术;第六章阐明了极化频率稳定度、极化状态距离(PSD)的
概念,深入论述了目标宽带动态极化结构特征识别的理论技术和
实现方法;第七章深入探讨了变极化雷达目标识别问题,给出了作
为极化域能量谱和极化谱概念基础的局部最优极化问题的详细数
学推导,讨论了基于极化域能量谱和极化谱的目标识别技术和实
现方法;书末附有二百余篇有关雷达极化信息处理方面的文献资
料,这对于那些希望从事该领域研究的科技工作者无疑是有利的。
本书由庄钊文教授、肖顺平副教授和王雪松博士执笔。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,郭修煌研究员、郁文贤教授、何松华副
教授、陈曾平副教授提供了多方面的支持和帮助,同时还得到了鲜
明、黎湘、李盾、付耀文等博士生以及曾勇虎硕士、鹿小莺、涂智明、
黄知涛、徐振海等硕士生的帮助。

本书的研究内容系国家教委跨世纪优秀人才基金项目的资助
内容,书中的研究内容得到了郭桂蓉院士的直接指导,在评审鉴定
过程中还得到国内著名电子学专家柯有安教授、毛士艺教授、梁甸
农教授等人的指导和关怀,本书的出版得到国防科技出版基金的
资助及基金办的大力支持,还有郑廷编辑的关心、支持和努力,在

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 目标雷达特性及其描述	2
1.3 极化检测、增强、滤波处理技术	10
1.4 极化目标识别技术	13
第二章 电磁波的极化及其表征	29
2.1 引言	29
2.2 基本场方程	30
2.3 电磁波极化状态的表征	33
2.3.1 一般表征	33
2.3.2 极化椭圆	36
2.3.3 Jones 矢量	41
2.3.4 极化比	43
2.3.5 Stokes 矢量及 Poincare 极化球	50
2.3.6 各种极化表示法之间的关系	60
2.3.7 极化状态的平面图示法	65
2.3.8 部分极化波的表征	76
2.4 极化电波接收与天线的极化匹配	93
第三章 雷达极化学基础	110
3.1 引言	110
3.2 目标的变极化效应及其描述	111
3.2.1 Sinclair 散射矩阵	111
3.2.2 散射坐标系和极化基问题	113
3.2.3 Mueller 矩阵和 Kennanugh 矩阵	123

3.3	极化散射矩阵变换与极化不变量	142
3.3.1	极化基变换	142
3.3.2	散射矩阵的变基公式	150
3.3.3	Mueller 矩阵与 Kennaugh 矩阵的变基公式	158
3.3.4	极化不变量	163
3.4	目标最佳极化	178
3.4.1	相干情况下的目标最佳极化	178
3.4.2	部分极化情况下目标的最佳极化	216
3.5	极化轨道与局部最优极化	236
3.5.1	极化轨道的数学描述与物理涵义	236
3.5.2	极化轨道约束下的目标局部最优极化	242
第四章	极化的产生、测量及误差修正	254
4.1	引言	254
4.2	一般极化的产生	255
4.3	极化测量及其误差产生的物理基础	259
4.4	目标互易性的 Cameron 平均修正法	266
4.5	散射矩阵的误差矩阵最小范数修正法	271
4.6	小变质极化散射矩阵的幅相平均修正法	281
4.7	修正法的性能评估	283
第五章	复杂电磁环境中的极化滤波处理	291
5.1	引言	291
5.2	目标和干扰环境的极化特性	293
5.3	复杂电磁环境中极化信号的优化接收	299
5.3.1	单信号源-干扰源情况下的极化优化处理	300
5.3.2	复杂电磁环境下极化信号的极化优化接收	318
5.3.3	多信号源-干扰源情况下的极化优化处理	329
5.3.4	部分极化情况下极化信号的极化优化处理	344
5.4	利用非相干变极化接收技术估算散射源参数	352
5.5	杂波环境中目标的极化滤波增强	359
第六章	目标动态极化结构特征识别	378
6.1	引言	378

6.2	目标宽频带极化结构与描述	379
6.3	极化平面图的目标识别技术	383
6.4	极化状态距离(PSD)的目标识别技术.....	393
6.5	伪本征极化的目标识别技术	406
6.6	零极化目标识别技术.....	420
第七章	极化域谱特征目标识别	428
7.1	引言	428
7.2	极化轨道约束的物理意义和数学基础	430
7.3	圆环极化轨道上目标散射能量最优化	433
7.4	大圆极化轨道上的局部最优极化	436
7.5	目标极化散射特性的谱描述与识别.....	442
7.5.1	Van Zyl 极化谱简介	442
7.5.2	极化域能量谱描述及特征提取与识别.....	443
7.5.3	极化谱描述及特征提取与识别.....	448
参考文献	457

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Target's radar characteristics and its description	2
1.3 Polarization detection, enhancement, filtering processing techniques	10
1.4 Polarization target recognition techniques	13
Chapter 2 Polarization of Electromagnetic Waves and its Description	29
2.1 Introduction	29
2.2 Fundamental field equations	30
2.3 Description of EM wave's polarization states	33
2.3.1 General description	33
2.3.2 Polarization ellipse	36
2.3.3 Jones vector	41
2.3.4 Polarization ratio	43
2.3.5 Stokes vector and Poincare polarization sphere	50
2.3.6 Relationship among various polarization description methods	60
2.3.7 Representation of polarization state on maps	65
2.3.8 Representation of partially polarized waves	76
2.4 Polarized EM waves' reception and polarization match with antennas	93
Chapter 3 Foundations of Radar Polarimetry	110
3.1 Introduction	110

3.2	Target's depolarization effect and its description	111
3.2.1	Sinclair scattering matrix	111
3.2.2	Problems on scattering coordinate system and polarization basis	113
3.2.3	Mueller matrix and Kennaugh matrix	123
3.3	Polarization scattering matrix transformation and polarization invariants	142
3.3.1	Polarization basis transformation	142
3.3.2	Transformation formulae of scattering matrix	150
3.3.3	Transformation formulae of Mueller matrix and Kennaugh matrix	158
3.3.4	Polarization invariants	163
3.4	Target's optimal polarizations	178
3.4.1	Target's optimal polarizations in the coherent case	178
3.4.2	Target's optimal polarizations in the partially polarized case	216
3.5	Polarization tracks and local optimal polarizations	236
3.5.1	Mathematical description and physics of polarization tracks	236
3.5.2	Target's local optimal polarizations with the constraint of polarization tracks	242
Chapter 4 Polarization Generation, Measurement and Error Correction		
		254
4.1	Introduction	254
4.2	Generation of general polarization	255
4.3	Polarimetry and physics of errors	259
4.4	Cameron mean modification method on target's reciprocity	266
4.5	Least norm of error scattering matrix modification method	271

4. 6	Amplitude-phase mean modification method for little polluted polarization scattering matrix	281
4. 7	Evaluation on modification methods' performances	283
Chapter 5 Polarization Filtering Processing in Complicate EM Enviroments		
5. 1	Introduction	291
5. 2	Polarization characteristic of target and interference enviroments	293
5. 3	Optimal reception of polarized signals in complicate EM enviroments	299
5. 3. 1	Polarization optimization processing in the single-signal-interference case	300
5. 3. 2	Optimal reception of polarized signals in complicate EM enviroments	318
5. 3. 3	Polarization optimization processing in the multiple-signal-interference case	329
5. 3. 4	Optimal Processing of Polarized Signals in the partially polarized case	344
5. 4	Evaluation of scatterers' parameters using noncoherent reception technique	352
5. 5	Target polarization filtering and enhancement in clutter enviroments	359
Chapter 6 Target Recognition Based on Dynamic Polarization Structure Characteristics		
6. 1	Introduction	378
6. 2	Target's wide-band polarization structure and its description	379
6. 3	Target recognition technique using polarization maps	383
6. 4	Target recognition technique based on	

polarization states' distance	393
6.5 Target recognition technique using pseudo-eigen polarizations	406
6.6 Target recognition technique using copolarization nulls	420
Chapter 7 Target Recognition Based on Spectrum Characteristics in the Polarization Domain	428
7.1 Introduction	428
7.2 Physics and mathematical foundation of polarization track constraints	430
7.3 Optimization of target's scattering energy with the constraint of circle polarization track	433
7.4 Local optimal polarizations on the greatcircle polarization tracks	436
7.5 Spectrum description of target's polarization scattering characteristics and recognition	442
7.5.1 Brief introduction of Van Zyl's polarization spectrum	442
7.5.2 Description and feature extracting on polarization-domain energy spectrums and recognition	443
7.5.3 Description and feature extracting on polarization spectrum and recognition	448
Reference	457

第一章 绪 论

本章简要评述国内外学术界在雷达极化信息处理研究领域,具体包括检测、最优化/信号增强、杂波抑制及目标识别等方面所做的工作。

1.1 引 言

自雷达问世以来,尤其是在过去的 30 多年里,雷达测量系统的应用范围迅速扩大,同时其结构和性能也发生了巨大而深刻的变化。早期雷达系统,其目的主要用来检测目标是否存在,这在二次世界大战期间因为防空的需要尤显突出。而现代雷达,为了满足现代战争所提出的更高要求以及适应航天和遥感科技发展的需要,其结构上的复杂程度较早期雷达大为增加,同时其性能也更为优良,它不但比早期雷达能检测到更远距离的目标,而且具有精确测定诸如目标速度及位置等重要信息的能力。正在大力开发研究的下一代雷达测量系统,不但在参数测量性能上优于现代的雷达,同时还具有认知目标,即对目标进行可靠分类/识别的能力,标志着雷达系统将由传统的参数测量向特征(非参数)测量的更高阶段迈进。尽管如此,有关目标散射波中信息的利用,到目前为止,还主要限于其幅度、相位、频移和波形,很少涉及极化信息的利用。

雷达目标散射信号中的极化信息在目标检测、增强、滤波及识别中有着巨大的应用潜力,但对这一信息资源的研究开发深度和广度还远不能与其重要性相称,主要是由于雷达目标极化散射机理难以揭示,以及极化测量将大大增加雷达系统的复杂性、技术实现十分困难且造价昂贵,这些因素严重阻碍了雷达极化信息处理

理论与技术的发展。尽管如此,该领域经过几十年的徘徊发展,在已完善的电磁波极化表征基础上,针对窄带雷达体制,已在诸如改善信号杂波功率比、电磁逆散射、增强目标检测和鉴别能力等方面取得了一批极具学术价值的研究成果。

当今复杂、多变的战场电磁环境对雷达探测系统性能提出了越来越高的要求,宽带多极化已成为新一代雷达扩大信息来源、提高探测性能的主要发展趋势。近十几年来,随着雷达极化测量基础理论、技术及宽带技术的逐步成熟并投入实用,开展宽带极化雷达体制下目标检测、增强、滤波及识别方面的研究已有现实基础,雷达极化信息处理正日益引起当今国内外学术界的浓厚兴趣和高度重视。

1.2 目标雷达特性及其描述

长期以来,目标雷达特性^[1~37]的研究由于各种条件的限制只限于对其有效散射截面的研究。然而,对结构和性质各异的不同目标,笼统地用一个有效散射面积来描述,就显得过于粗糙。随着航空与宇航技术的发展、雷达技术的进步以及现代战争的需要,要求获得更多的目标特征信息,如目标散射的幅度特性、相位特性及极化特性等。这些信息对于目标识别与分类、雷达对抗、飞行器隐身及雷达反隐身等都有重要的意义,同时它对现代雷达系统,尤其是对新一代智能雷达系统的理论、体制的形成及其技术的进步,以及优化设计具有强生存能力的飞行器等,都有十分重要的指导意义。基于这些原因,飞行器雷达特性的研究已成为热门课题,国内外许多相关领域专家致力于该领域的研究,不断地披露了大量的研究成果。

雷达发射的电磁波在目标表面感应面电流而进行再辐射,从而产生散射电磁波。散射波的性质不同于入射波的性质,这是由于目标对入射电磁波的调制效应所致。这种调制效应由目标本身的物理结构特性决定,不同目标对相同入射波具有不同的调制特性。