

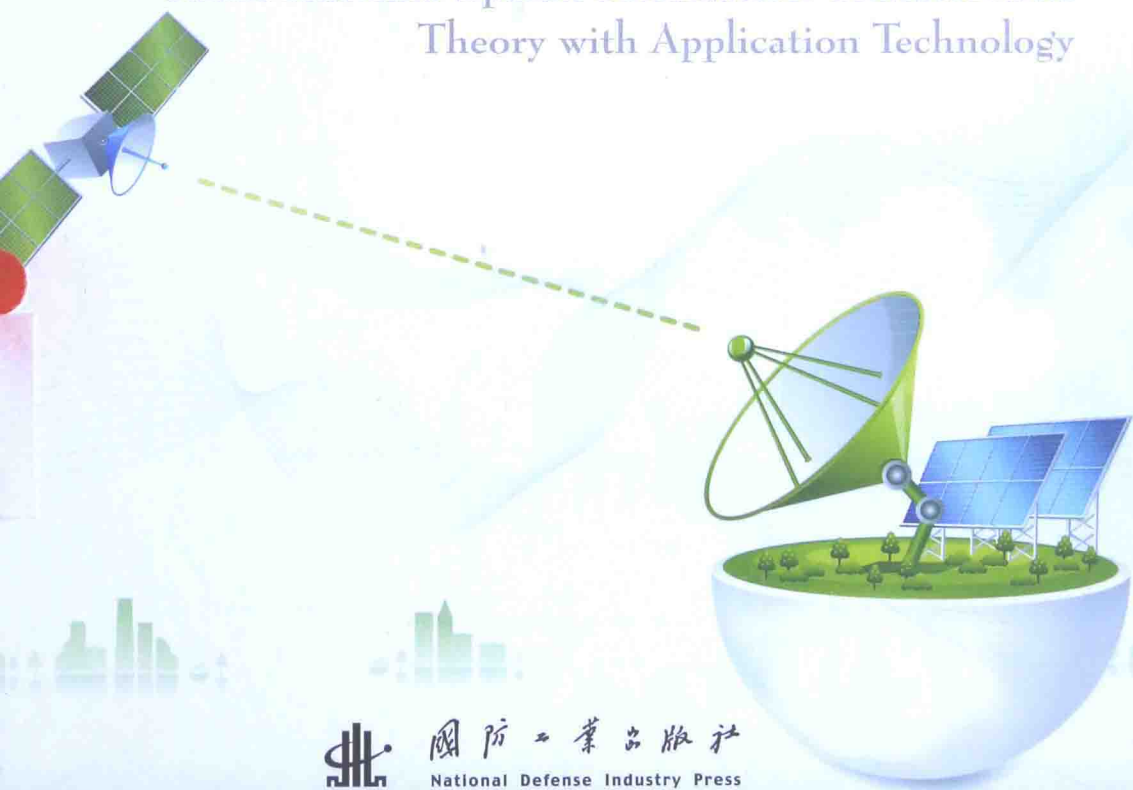


国防科技图书出版基金

雷达天线的 空域极化特性及其应用

■ 戴幻尧 王雪松 谢虹 肖顺平 罗佳 著

Radar Antenna Spatial Polarization Characteristic
Theory with Application Technology



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

雷达天线的空域极化 特性及其应用

**Radar Antenna Spatial Polarization
Characteristic Theory with
Application Technology**

戴幻尧 王雪松 谢 虹 著
肖顺平 罗 佳 审
汪连栋

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

雷达天线的空域极化特性及其应用 / 戴幻尧等著.

—北京:国防工业出版社,2015.3

ISBN 978-7-118-09852-5

I. ①雷… II. ①戴… III. ①雷达—极化天线—研究

IV. ①TN957.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 021255 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

※

开本 710 × 1000 1/16 印张 15½ 字数 298 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

序 言

随着先进电子干扰技术的应用以及复杂电磁环境的综合效应,干扰成为雷达面临的最为严重的威胁,而雷达抗干扰技术通过采用新的信号处理方法提高雷达系统在恶劣电磁环境下的生存和对抗能力,极大地提高了雷达系统的作战效能,使之能够适应复杂多变的电磁环境,已成为雷达技术领域所面临的重要课题和紧迫任务。

现有雷达干扰与抗干扰多在时域、频域和空域进行,极化信息在抗干扰中的作用和潜力尚未被充分重视和挖掘;同时,现有各种雷达干扰样式在设计和战术使用中对极化都考虑甚少。这也促使专家、学者等研究人员不断开发、利用各种极化信息处理技术来提高传感系统的探测能力和感知能力。极化是电磁波除时域、频域和空域信息以外的又一可资利用的重要信息,充分挖掘极化信息为改善现代雷达探测系统性能提供了广阔的空间,为提高雷达抗干扰和目标识别能力开辟了有效的技术途径。因此,如果雷达具有极化测量能力,并能够充分利用目标和干扰的极化信息差异,则有望取得显著的抗干扰效果。

随着雷达极化测量技术的发展和人们对目标电磁散射特性认识的逐步深入,雷达极化技术作为现代雷达技术的重要分支,取得了丰硕的研究成果,极大地推动了雷达技术的发展。越来越多的极化雷达相继研制成功并投入使用,美国、加拿大、意大利、德国、法国、英国、荷兰等国就已经有相当数量的极化雷达问世。它们大都采用两个正交极化通道分时或同时发射多个正交极化的脉冲,接收时两正交极化通道同时接收信号,经过若干个相邻脉冲的处理,就可得到极化状态的估计。但是,这两种极化测量方法存在一个共同特点,即均需要双极化天线和两个极化通道,这对雷达的系统设计、复杂度和研发经费提出了很高的要求。

在天线理论中,位于给定频率和空间指向的远场区,天线存在着某一确定的极化方式,随着工作频率和空间指向的不同,天线辐射场的极化方式也有所不同,这意味着天线的极化是频率和空域指向的函数。据此,本书提出了一个全新的概念,即“天线的空域极化特性”。在以往的研究中,这种特性的存在往往被视为非理想因素而未加考虑,并未作为雷达极化技术领域的主流研究和发展方向。但是,天线空域极化特性却给雷达信息处理理论的发展带来了新思路,并形成了一个全新的研究方向,即合理地利用天线极化空域变化所构成的“非理想正交基”进行目标测量、抗干扰等新技术。作者近年来结合“九五”、“十五”、“十一五”国防

预研、国家自然科学基金、973 国家安全重大基础研究计划项目等工作,在天线空域极化特性的表征、空域极化特性的分析与建模、天线极化特性的测量与试验新方法、测量误差校准方法、基于天线空域极化特性的新型抗干扰方法与试验等方面取得了一批富有学术意义和应用价值的研究成果,以此作为主要基础,再结合我国对雷达等信息化装备建设的需求,着手撰写一本有关于雷达天线的空域极化调制效应及其处理技术的专著,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 7 章。第 1 章着重归纳和评述了雷达极化技术在目标识别、目标检测、杂波抑制、抗干扰等方面的理论和应用成果,指出了现有雷达极化技术研究的不足,说明了天线空域极化特性的科学内涵和发展趋势。第 2 章整理了天线空域极化特性的各种表征方法,侧重以动态的、统计的观点讨论了天线极化在空间的演化规律。第 3 章、第 4 章、第 5 章是本书的理论基础,第 3 章分析了口径天线的空域极化特性,包括了线天线、面天线的极化特性,给出了清晰的数学表达式,重点分析了抛物反射面天线的极化特性规律,通过电磁计算和暗室测量给出了定性和定量的结果。第 4 章讨论了相控阵天线的空域极化特性,指出了该式天线与机械扫描天线在特性上的相同点和差异,通过计算机仿真和高频电磁计算给出了相控阵天线在方位和俯仰进行二维扫描时极化特性的变化情况。第 5 章给出了天线空域极化特性的测量新方法 with 误差校准试验方法,重点是解决实际的雷达天线特性在外场的快速精确测量问题,本书给出的方法不需要将天线拆卸下来和射频链路断开,仅仅需要处理雷达输出的中频信号就可以实现有效测量,方法实用、算法简便,便于实际操作,给出了外场测量的步骤和实际测量的结果,具有很好的参考价值,为最大限度地利用雷达天线特性奠定了基础。第 6 章、第 7 章是本书的应用研究部分,针对军用雷达中大量装备的警戒雷达、目标指示雷达和引导雷达等机械扫描雷达所面临的目标识别和抗干扰问题,设计了新型的处理方法。利用天线空域极化特性,对天线扫描过程中各个空间位置所接收的时间序列进行处理,为实现目标散射矩阵的测量、噪声干扰信号的极化测量与抑制、真假目标的极化测量和鉴别等应用进行了系统深入的探讨,为使相关技术将来迈向应用,深入地研究了极化技术和相参处理的兼容问题、自动增益控制系统影响下的改进问题、仰角估计误差下的干扰抑制并行处理等问题。仿真实验和实际试验结果表明,新方法取得了较好的抗干扰效果,验证了新方法的正确性、可行性和优越性。这些方法都是在传统的单极化雷达上实现的,也就是说通过改进或改善现有雷达装备的信号处理软件,能够使雷达具有一定的极化处理能力,进而能够显著地获得抗干扰效果。书末附有近 200 篇有关雷达极化信息处理方法的文献资料,这对于那些希望从事该领域研究,或者探索新型处理技术的科技工作者无疑是有益的。

本书内容新颖,系统性强,理论联系实际,具有一定的学术水平和实际应用价值,基本反映了近年来雷达抗干扰研究领域的新理论、新方法和新成果,部分内容

已经发表在 IEEE Transaction on Antenna Propagation, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, Science in China、Journal of Systems Engineering and Electronics、中国科学(F)等国际知名期刊上,并获得多项国家发明专利授权,是作者多年来在相关领域深入研究与实践的结晶。研究成果有力地拓展了雷达极化信息处理技术的外延,丰富了雷达极化理论的内涵。将其与时域、频域、空域等抗干扰措施配合使用,可望有效提高现有雷达系统的抗干扰能力和目标识别能力,提高其在复杂电磁环境下的适应能力和生存能力,具备一定的应用前景。

本书由戴幻尧博士、王雪松教授、谢虹研究员、肖顺平教授、罗佳博士执笔,由汪连栋研究员主审。在本书的撰写过程中,国防科技图书出版基金评审委员会、国家自然科学基金(61301236)、电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室、中国洛阳电子装备试验中心、北京空间信息中继传输技术研究中心等多家机构给予了大量的指导和帮助,王小谟院士对本书提出了非常有价值的修改意见。申绪润高工、孔德培高工、黄振宇、尤春华、周波、崔建岭、乔会东、刘文钊、王建路、张杨、焦斌、狄东宁、李永祯、常宇亮、李棉全、刘勇、赵晶等同志参加了部分内容的研讨,并提出了宝贵建议,作者在此一一表示感谢。

由于本书内容涉及面广,有些问题还在进一步深入研究,加之作者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者
2015年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 天线空域极化特性的科学内涵和发展趋势	2
1.1.1 电磁波的极化特性研究现状	3
1.1.2 天线的极化特性研究现状	4
1.1.3 雷达极化测量体制现状	6
1.2 雷达极化信息的处理与应用的研究现状	15
1.2.1 极化目标分类识别	15
1.2.2 极化检测	16
1.2.3 极化抗干扰	18
第 2 章 天线空域极化特性的表征	20
2.1 电磁波的极化表征	20
2.1.1 电磁波极化的经典描述	21
2.1.2 电磁波的瞬态极化表征	22
2.2 天线空域极化特性的涵义	23
2.2.1 天线的极化	23
2.2.2 天线的交叉极化	24
2.2.3 天线空域极化特性的内涵	28
2.3 天线空域极化特性的表征	29
2.3.1 天线空域极化特性的经典描述	31
2.3.2 天线空域瞬态极化特性的表征	33
第 3 章 口径天线的空域极化特性分析	39
3.1 典型线天线的空域极化特性	39
3.1.1 短偶极子天线的空域极化特性	40
3.1.2 正交偶极子天线的空域极化特性	42
3.1.3 环天线的空域极化特性	45
3.1.4 螺旋天线的空域极化特性	48

3.2	典型面天线的空域极化特性	50
3.2.1	典型等效口径分布天线的空域极化特性	50
3.2.2	典型波导口辐射器的空域极化特性	53
3.2.3	典型喇叭天线的空域极化特性	55
3.3	偏置抛物面天线的空域极化特性	56
3.3.1	偏置抛物面天线空域极化特性的理论计算	57
3.3.2	偏置抛物面天线空域极化特性的仿真分析	67
3.4	实测天线的空域极化特性分析	80
3.4.1	某干扰机天线的空域极化特性分析	81
3.4.2	某抛物面天线的空域极化特性分析	85
3.5	天线空域极化特性的建模与仿真	88
第4章	相控阵天线的空域极化特性分析	93
4.1	天线空域极化特性的表征	94
4.1.1	天线空域极化的内涵	94
4.1.2	相控阵天线空域极化特性的描述	95
4.2	相控阵天线的空域极化特性建模与仿真分析	99
4.2.1	天线单元的极化特性	99
4.2.2	相控阵天线的空域极化特性建模	101
4.2.3	相控阵天线空域极化特性的仿真分析	104
4.3	基于XFDTD的相控阵天线设计与空域极化特性分析	112
4.3.1	均匀分布相控阵天线的设计与仿真	112
4.3.2	基于XFDTD计算数据的空域极化特性分析	114
第5章	天线空域极化特性的测量与误差校准技术	118
5.1	基于标准体散射特性的天线空域极化特性的测量方法	119
5.1.1	极化散射矩阵的变基计算	119
5.1.2	圆极化天线的测量算法	120
5.1.3	线极化天线的测量算法	122
5.1.4	外场实验设计	125
5.1.5	天线特性测量实验与分析	128
5.2	天线特性测量中极化基失配的影响及校准	131
5.2.1	雷达天线空域极化特性测量模型	132
5.2.2	天线极化测量的最优化及校准模型	134
5.2.3	天线测量实验及处理结果	136
5.3	实测雷达天线的空域极化特性测量及校正	139

5.3.1	抛物面天线空域极化特性的先验信息	139
5.3.2	实测雷达天线空域极化特性分析及误差校正	141
第6章	基于天线空域极化特性的 $[S]$ 矩阵测量方法	146
6.1	基于天线空域极化特性的目标极化散射矩阵时域测量	146
6.1.1	算法原理	146
6.1.2	算法性能的理论分析	150
6.1.3	计算机仿真与结果分析	152
6.1.4	时域测量法的适用性分析	156
6.2	基于天线空域极化特性的目标极化散射矩阵频域测量	161
6.2.1	算法原理	161
6.2.2	算法性能的理论分析	164
6.2.3	算法性能的仿真分析	166
第7章	基于天线空域极化特性的压制干扰对抗方法	170
7.1	回波信号极化分解与极化参数估计方法	171
7.1.1	雷达观测方程的建立	171
7.1.2	回波信号极化分解与极化参数估计方法	172
7.2	空域零相移干扰抑制滤波设计	180
7.2.1	空域虚拟极化滤波技术	180
7.2.2	空域零相移干扰抑制极化滤波器	182
7.2.3	实验分析	185
7.3	仰角盲估计条件下的空域虚拟多通道并行极化滤波技术	188
7.3.1	空域虚拟多通道并行极化滤波技术	191
7.3.2	仿真实验与结果分析	192
7.4	极化估计误差下干扰抑制极化滤波的有效性分析	194
7.4.1	基于正交极化通道的极化估计	195
7.4.2	极化滤波有效性分析	202
7.5	基于单脉冲雷达天线空域极化特性的抗欺骗干扰方法	204
7.5.1	基于和差波束特性差异的假目标干扰极化的估计方法	204
7.5.2	基于和差波束特性差异的目标回波极化估计	207
7.5.3	基于极化相似度的有源多假目标干扰鉴别方法	208
7.5.4	鉴别实验与结果分析	214
参考文献		219

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Science Connotation and Progress of Antenna Spatial Polarization Characteristic	2
1.1.1	Study Present Situation of Electromagnetic Wave Polarization Property	3
1.1.2	Study Present Situation of Antenna Polarization Characteristic	4
1.1.3	Study Present Situation of Radar Polarimetry	6
1.2	Present Situation of Radar Polarization Information Processing and Application	15
1.2.1	Polaization Target Classify Cation and Identification	15
1.2.2	Polaization Detection	16
1.2.3	Polaization Anti-jamming	18
Chapter 2	Connotation and Representation of Spatial Polarization Characteristic	20
2.1	Polarizations Characterization of Electromagnetic Waves	20
2.1.1	Classic Description of the Electromagnetic Waves Polarization	21
2.1.2	Instantaneous Polarization Characterization of Electromagnetic Waves	22
2.2	Primary Meaning of Antenna Spatial Polarization Characteristic	23
2.2.1	Antenna Polarization	23
2.2.2	Antenna Cross Polarization	24
2.2.3	Antenna Spatial Polarization Characteristic Connotation	28
2.3	Antenna Spatial Polarization Characterization	29
2.3.1	Classicspatial Polarization Characteristics Description of Antenna	31

2. 3. 2	Instantaneous Polarization Characterization Description of Antenna	33
Chapter 3	Spatial Polarization Characteristics of Aperture Antenna	39
3. 1	Spatial Polarization Characteristics of Typical Wire Antenna	39
3. 1. 1	Spatial Polarization Characteristics of Dipole Antenna	40
3. 1. 2	Spatial Polarization Characteristics of Orthogonal Dipole Antenna	42
3. 1. 3	Spatial Polarization Characteristics of Coil Antenna	45
3. 1. 4	Spatial Polarization Characteristics of Helical Antenna	48
3. 2	Spatial Polarization Characteristics of Typical Surface Antenna	50
3. 2. 1	Spatial Polarization Characteristics of Typical Equivalence Aperture Distribution Antenna	50
3. 2. 2	Spatial Polarization Characteristics of Typical Waveguide Radiator	53
3. 2. 3	Spatial Polarization Characteristics of Typical Horn Antenna	55
3. 3	Spatial Polarization Characteristics of Offset Parabolic Antenna	56
3. 3. 1	Theoretical Calculation of Spatial Polarization Characteristics of Offset Parabolic Antenna	57
3. 3. 2	Simulation Analysis of Spatial Polarization Characteristics of Offset Parabolic Antenna	67
3. 4	Actual Measurement Spatial Polarization Characteristics of Antenna	80
3. 4. 1	Spatial Polarization Characteristics of a Certain Jamming Antenna	81
3. 4. 2	Spatial Polarization Characteristics of a Certain Parabolic Antenna	85
3. 5	Modeling and Simulation of Antenna Spatial Polarization Characteristics	88
Chapter 4	Spatial Polarization Characteristics of Phased Array	93
4. 1	Antenna Spatial Polarization Characterization	94
4. 1. 1	Antenna Spatial Polarization Characteristic Connotation	94
4. 1. 2	Description of Spatial Polarization Characteristics of Phased Array	95
4. 2	Modeling and Simulation of Phased Array Spatial Polarization Characteristics	99

4. 2. 1	Antenna Element Polarization Characteristics	99
4. 2. 2	Phased Array Antenna Spatial Polarization Characteristics Modeling	101
4. 2. 3	Phased Array Antenna Spatial Polarization Characteristics Simulation Analysis	104
4. 3	Phased Array Antenna Design and Spatial Polarization Characteristics Analysis Based on XFDTD	112
4. 3. 1	Uniformly Distributed Phased Array Antenna Design and Simulation	112
4. 3. 2	Spatial Polarization Characteristics Analysis Based on XFDTD Computation Dada	114

Chapter 5	Antenna Spatial Polarization Characteristics Measurement and Calibration	118
5. 1	Antenna Spatial Polarization Characteristics Measurement Method Based on Target Character of Calibrator	119
5. 1. 1	Base Transformation Computation of Polarization Scattering Matrix	119
5. 1. 2	Measurement Algorithm of Circular Polarized Antenna	120
5. 1. 3	Measurement Algorithm of Linear Polarized Antenna	122
5. 1. 4	Outfield Experiment Design	125
5. 1. 5	Antenna Property Measurement Experiment and Analysis	128
5. 2	Polarization Basemismatch Effect and Calibration in Antenna Property Measurement	131
5. 2. 1	Radar Antenna Spatial Polarization Characteristics Measurement Model	132
5. 2. 2	Antenna Polarization Measurement Optimizing and Calibration	134
5. 2. 3	Antenna Measurement Experiment and Analysis	136
5. 3	Actual Radar Antenna Spatial Polarization Characteristics Measurement and Calibration	139
5. 3. 1	Priori Knowledge of Parabolic Antenna Spatial Polarization Characteristics	139
5. 3. 2	Actual Radar Antenna Spatial Polarization Characteristics Analysis and Error Calibration	141

Chapter 6	Scattering Matrix Measurement Method Based on Spatial Polarization Characteristics of Antenna	146
6.1	Scattering Matrix Time Domain Measurement Method Based on Spatial Polarization Characteristics of Antenna	146
6.1.1	Algorithm Theory	146
6.1.2	Theoretical Analysis of Algorithm Performance	150
6.1.3	Simulation and Result Analysis	152
6.1.4	Applicability of Time Domain Measurement Method	156
6.2	Scattering Matrix Frequency Domain Measurement Method Based on Spatial Polarization Characteristics of Antenna	161
6.2.1	Algorithm Theory	161
6.2.2	Theoretical Analysis of Algorithm Performance	164
6.2.3	Simulation Analysis of Algorithm Performance	166
Chapter 7	Blanketing Jamming Countermeasure Method Based on Spatial Polarization Characteristics of Antenna	170
7.1	Polarization Decomposition and Parameter Estimation Method of Return Signal	171
7.1.1	Radar Observation Equation Building	171
7.1.2	Polarization Decomposition and Parameter Estimation	172
7.2	Spatial Nullphase-shift Interference Suppression Polarization Filter Design	180
7.2.1	Spatial Virtual Polarization Filtering Technology	180
7.2.2	spatial Null Phase-shift Interference Suppression Polarization Filter	182
7.2.3	Experiment Analysis	185
7.3	Spatial Virtual Multi-channelparallel Polarization Filter in Elevation Blind Estimation Condition	188
7.3.1	Spatial Virtual Multi-channel Parallel Polarization Filter	191
7.3.2	Simulation Experiment and Result Analysis	192
7.4	The Validity Demonstration of Polarization Filtering Within Polarization Estimated Error	194
7.4.1	Polarization Estimation Based on Orthogonal Polarization Channel	195
7.4.2	Validity Analysis of Polarization Filtering	202

7.5 Electronic Deception Jamming Countermeasure Method Based on
Spatial Polarization Characteristics of Mono-pulse Radar Antenna 204

7.5.1 False Target Jamming Polarization Estimation Method
Based on Sum-dif Beam Property 204

7.5.2 Target Return Signal Polarization Estimation Method Based
on Sum-dif Beam Property 207

7.5.3 Multi-false Target Jamming Discrimination Method Based
on Polarization Similarity 208

7.5.4 Discrimination Experiment and Result Analysis 214

Reference 219