

“十二五”国家重点出版规划项目



雷达与探测前沿技术丛书

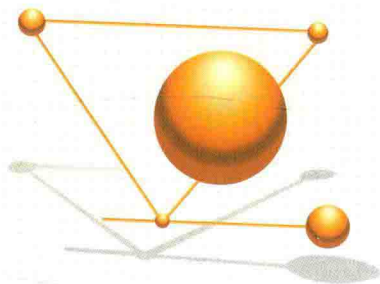
王小谟 左群声 主编

量子雷达

Quantum Radar

江涛 著

- ◀ 探寻电磁场量子化奥秘 ▶
- ◀ 照亮雷达探测遗忘角落 ▶
- ◀ 扩展雷达探测基础理论 ▶
- ◀ 丰富雷达探测实现途径 ▶



国防工业出版社
National Defense Industry Press

重点出版规划项目
探测前沿技术丛书

量子雷达

Quantum Radar

江涛 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书从经典电磁场与电磁场量子化入手,通过总结量子传感中的基础理论和方法,引入量子雷达探测的概念。全书以量子力学为基础,系统介绍量子雷达探测的核心机理、信号处理理论和探测体制。主要包括量子态大气传输机理、量子雷达散射截面积、量子雷达信号检测与估计理论;对实现量子雷达探测的几种可能的系统构成和工作体制进行分析比对;对量子雷达探测的应用前景进行展望,提出了未来量子雷达探测在理论和实验中面临的挑战。

本书由国内长期从事量子信息技术和雷达技术研究的专家编写而成,研究成果属于国内首创。本书可以为从事雷达、通信、电子对抗等专业的科研和教学人员提供参考,也可以作为相关高校教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

量子雷达 / 江涛著. —北京:国防工业出版社,
2017.12

(雷达与探测前沿技术丛书)

ISBN 978-7-118-11515-4

I. ①量… II. ①江… III. ①量子-雷达 IV.
①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 008337 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)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 290 千字

2017 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 76.00 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

“雷达与探测前沿技术丛书” 编审委员会

主 任	左群声						
常务副主任	王小谟						
副 主 任	吴曼青	陆 军	包养浩	赵伯桥	许西安		
顾 问	贲 德	郝 跃	何 友	黄培康	毛二可		
(按姓氏拼音排序)	王 越	吴一戎	张光义	张履谦			
委 员	安 红	曹 晨	陈新亮	代大海	丁建江		
(按姓氏拼音排序)	高梅国	高昭昭	葛建军	何子述	洪 一		
	胡卫东	江 涛	焦李成	金 林	李 明		
	李清亮	李相如	廖桂生	林幼权	刘 华		
	刘宏伟	刘泉华	柳晓明	龙 腾	龙伟军		
	鲁耀兵	马 林	马林潘	马鹏阁	皮亦鸣		
	史 林	孙 俊	万 群	王 伟	王京涛		
	王盛利	王文钦	王晓光	卫 军	位寅生		
	吴洪江	吴晓芳	邢海鹰	徐忠新	许 稼		
	许荣庆	许小剑	杨建宇	尹志盈	郁 涛		
	张晓玲	张玉石	张召悦	张中升	赵正平		
	郑 恒	周成义	周树道	周智敏	朱秀芹		

编辑委员会

主 编	王小谟	左群声				
副 主 编	刘 劲	王京涛	王晓光			
委 员	崔 云	冯 晨	牛旭东	田秀岩	熊思华	
(按姓氏拼音排序)	张冬晔					

雷达在第二次世界大战中初露头角。战后,美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家,总结战争期间的经验,于1950年前后出版了一套雷达丛书,共28个分册,对雷达技术做了全面总结,几乎成为当时雷达设计者的必备读物。我国的雷达研制也从那时开始,经过几十年的发展,到21世纪初,我国雷达技术在很多方面已进入国际先进行列。为总结这一时期的经验,中国电子科技集团公司曾经组织老一代专家撰著了“雷达技术丛书”,全面总结他们的工作经验,给雷达领域的工程技术人员留下了宝贵的知识财富。

电子技术的迅猛发展,促使雷达在内涵、技术和形态上快速更新,应用不断扩展。为了探索雷达领域前沿技术,我们又组织编写了本套“雷达与探测前沿技术丛书”。与以往雷达相关丛书显著不同的是,本套丛书并不完全是作者成熟的经验总结,大部分是专家根据国内外技术发展,对雷达前沿技术的探索性研究。内容主要依托雷达与探测一线专业技术人员的最新研究成果、发明专利、学术论文等,对现代雷达与探测技术的国内外进展、相关理论、工程应用等进行了广泛深入研究和总结,展示近十年来我国在雷达前沿技术方面的研制成果。本套丛书的出版力求能促进从事雷达与探测相关领域研究的科研人员及相关产品的使用人员更好地进行学术探索和创新实践。

本套丛书保持了每一个分册的相对独立性和完整性,重点是对前沿技术的介绍,读者可选择感兴趣的分册阅读。丛书共41个分册,内容包括频率扩展、协同探测、新技术体制、合成孔径雷达、新雷达应用、目标与环境、数字技术、微电子技术八个方面。

(一) 雷达频率迅速扩展是近年来表现出的明显趋势,新频段的开发、带宽的剧增使雷达的应用更加广泛。本套丛书遴选的频率扩展内容的著作共4个分册:

(1) 《毫米波辐射无源探测技术》分册中没有讨论传统的毫米波雷达技术,而是着重介绍毫米波热辐射效应的无源成像技术。该书特别采用了平方千米阵的技术概念,这一概念在用干涉式阵列基线的测量结果来获得等效大

口径阵列效果的孔径综合技术方面具有重要的意义。

(2)《太赫兹雷达》分册是一本较全面介绍太赫兹雷达的著作,主要包括太赫兹雷达系统的基本组成和技术特点、太赫兹雷达目标检测以及微动目标检测技术,同时也讨论了太赫兹雷达成像处理。

(3)《机载远程红外预警雷达系统》分册考虑到红外成像和告警是红外探测的传统应用,但是能否作为全空域远距离的搜索监视雷达,尚有诸多争议。该书主要讨论用监视雷达的概念如何解决红外极窄波束、全空域、远距离和数据率的矛盾,并介绍组成红外监视雷达的工程问题。

(4)《多脉冲激光雷达》分册从实际工程应用角度出发,较详细地阐述了多脉冲激光测距及单光子测距两种体制下的系统组成、工作原理、测距方程、激光目标信号模型、回波信号处理技术及目标探测算法等关键技术,通过对两种远程激光目标探测体制的探讨,力争让读者对基于脉冲测距的激光雷达探测有直观的认识和理解。

(二)传输带宽的急剧提高,赋予雷达协同探测新的使命。协同探测会导致雷达形态和应用发生巨大的变化,是当前雷达研究的热点。本套丛书遴选出协同探测内容的著作共10个分册:

(1)《雷达组网技术》分册从雷达组网使用的效能出发,重点讨论点迹融合、资源管控、预案设计、闭环控制、参数调整、建模仿真、试验评估等雷达组网新技术的工程化,是把多传感器统一为系统的开始。

(2)《多传感器分布式信号检测理论与方法》分册主要介绍检测级、位置级(点迹和航迹)、属性级、态势评估与威胁估计五个层次中的检测级融合技术,是雷达组网的基础。该书主要给出各类分布式信号检测的最优化理论和算法,介绍考虑到网络和通信质量时的联合分布式信号检测准则和方法,并研究多输入多输出雷达目标检测的若干优化问题。

(3)《分布孔径雷达》分册所描述的雷达实现了多个单元孔径的射频相参合成,获得等效于大孔径天线雷达的探测性能。该书在概述分布孔径雷达基本原理的基础上,分别从系统设计、波形设计与处理、合成参数估计与控制、稀疏孔径布阵与测角、时频相同步等方面做了较为系统和全面的论述。

(4)《MIMO 雷达》分册所介绍的雷达相对于相控阵雷达,可以同时获得波形分集和空域分集,有更加灵活的信号形式,单元间距不受 $\lambda/2$ 的限制,间距拉开后,可组成各类分布式雷达。该书比较系统地描述多输入多输出(MIMO)雷达。详细分析了波形设计、积累补偿、目标检测、参数估计等关键

技术。

(5)《MIMO 雷达参数估计技术》分册更加侧重讨论各类 MIMO 雷达的算法。从 MIMO 雷达的基本知识出发,介绍均匀线阵,非圆信号,快速估计,相干目标,分布式目标,基于高阶累计量的、基于张量的、基于阵列误差的、特殊阵列结构的 MIMO 雷达目标参数估计的算法。

(6)《机载分布式相参射频探测系统》分册介绍的是 MIMO 技术的一种工程应用。该书针对分布式孔径采用正交信号接收相参的体制,分析和描述系统处理架构及性能、运动目标回波信号建模技术,并更加深入地分析和描述实现分布式相参雷达杂波抑制、能量积累、布阵等关键技术的解决方法。

(7)《机会阵雷达》分册介绍的是分布式雷达体制在移动平台上的典型应用。机会阵雷达强调根据平台的外形,天线单元共形随遇而布。该书详尽地描述系统设计、天线波束形成方法和算法、传输同步与单元定位等关键技术,分析了美国海军提出的用于弹道导弹防御和反隐身的机会阵雷达的工程应用问题。

(8)《无源探测定位技术》分册探讨的技术是基于现代雷达对抗的需求应运而生,并在实战应用需求越来越大的背景下快速拓展。随着知识层面上认知能力的提升以及技术层面上带宽和传输能力的增加,无源侦察已从单一的测向技术逐步转向多维定位。该书通过充分利用时间、空间、频移、相移等多维度信息,寻求无源定位的解,对雷达向无源发展有着重要的参考价值。

(9)《多波束凝视雷达》分册介绍的是通过多波束技术提高雷达发射信号能量利用效率以及在空、时、频域中减小处理损失,提高雷达探测性能;同时,运用相位中心凝视方法改进杂波中目标检测概率。分册还涉及短基线雷达如何利用多阵面提高发射信号能量利用效率的方法;针对长基线,阐述了多站雷达发射信号可形成凝视探测网格,提高雷达发射信号能量的使用效率;而合成孔径雷达(SAR)系统应用多波束凝视可降低发射功率,缓解宽幅成像与高分辨之间的矛盾。

(10)《外辐射源雷达》分册重点讨论以电视和广播信号为辐射源的无源雷达。详细描述调频广播模拟电视和各种数字电视的信号,减弱直达波的对消和滤波的技术;同时介绍了利用 GPS(全球定位系统)卫星信号和 GSM/CDMA(两种手机制式)移动电话作为辐射源的探测方法。各种外辐射源雷达,要得到定位参数和形成所需的空域,必须多站协同。

(三) 以新技术为牵引,产生出新的雷达系统概念,这对雷达的发展具有里程碑的意义。本套丛书遴选了涉及新技术体制雷达内容的 6 个分册:

(1) 《宽带雷达》分册介绍的雷达打破了经典雷达 5MHz 带宽的极限,同时雷达分辨力的提高带来了高识别率和低杂波的优点。该书详尽地讨论宽带信号的设计、产生和检测方法。特别是对极窄脉冲检测进行有益的探索,为雷达的进一步发展提供了良好的开端。

(2) 《数字阵列雷达》分册介绍的雷达是用数字处理的方法来控制空间波束,并能形成同时多波束,比用移相器灵活多变,已得到了广泛应用。该书全面系统地描述数字阵列雷达的系统和各分系统的组成。对总体设计、波束校准和补偿、收/发模块、信号处理等关键技术都进行了详细描述,是一本工程性较强的著作。

(3) 《雷达数字波束形成技术》分册更加深入地描述数字阵列雷达中的波束形成技术,给出数字波束形成的理论基础、方法和实现技术。对灵巧干扰抑制、非均匀杂波抑制、波束保形等进行了深入的讨论,是一本理论性较强的专著。

(4) 《电磁矢量传感器阵列信号处理》分册讨论在同一空间位置具有三个磁场和三个电场分量的电磁矢量传感器,比传统只用一个分量的标量阵列处理能获得更多的信息,六分量可完备地表征电磁波的极化特性。该书从几何代数、张量等数学基础到阵列分析、综合、参数估计、波束形成、布阵和校正等问题进行详细讨论,为进一步应用奠定了基础。

(5) 《认知雷达导论》分册介绍的雷达可根据环境、目标和任务的感知,选择最优化的参数和处理方法。它使得雷达数据处理及反馈从粗犷到精细,彰显了新体制雷达的智能化。

(6) 《量子雷达》分册的作者团队搜集了大量的国外资料,经探索和研究,介绍从基本理论到传输、散射、检测、发射、接收的完整内容。量子雷达探测具有极高的灵敏度,更高的信息维度,在反隐身和抗干扰方面优势明显。经典和非经典的量子雷达,很可能走在各种量子技术应用的前列。

(四) 合成孔径雷达(SAR)技术发展较快,已有大量的著作。本套丛书遴选了有一定特点和前景的 5 个分册:

(1) 《数字阵列合成孔径雷达》分册系统阐述数字阵列技术在 SAR 中的应用,由于数字阵列天线具有灵活性并能在空间产生同时多波束,雷达采集的同一组回波数据,可处理出不同模式的成像结果,比常规 SAR 具备更多的新能力。该书着重研究基于数字阵列 SAR 的高分辨力宽测绘带 SAR 成像、

极化层析 SAR 三维成像和前视 SAR 成像技术三种新能力。

(2)《双基合成孔径雷达》分册介绍的雷达配置灵活,具有隐蔽性好、抗干扰能力强、能够实现前视成像等优点,是 SAR 技术的热点之一。该书较为系统地描述了双基 SAR 理论方法、回波模型、成像算法、运动补偿、同步技术、试验验证等诸多方面,形成了实现技术和试验验证的研究成果。

(3)《三维合成孔径雷达》分册描述曲线合成孔径雷达、层析合成孔径雷达和线阵合成孔径雷达等三维成像技术。重点讨论各种三维成像处理算法,包括距离多普勒、变尺度、后向投影成像、线阵成像、自聚焦成像等算法。最后介绍三维 MIMO-SAR 系统。

(4)《雷达图像解译技术》分册介绍的技术是指从大量的 SAR 图像中提取与挖掘有用的目标信息,实现图像的自动解译。该书描述高分辨 SAR 和极化 SAR 的成像机理及相应的相干斑抑制、噪声抑制、地物分割与分类等技术,并介绍舰船、飞机等目标的 SAR 图像检测方法。

(5)《极化合成孔径雷达图像解译技术》分册对极化合成孔径雷达图像统计建模和参数估计方法及其在目标检测中的应用进行了深入研究。该书研究内容为统计建模和参数估计及其国防科技应用三大部分。

(五)雷达的应用也在扩展和变化,不同的领域对雷达有不同的要求,本套丛书在雷达前沿应用方面遴选了 6 个分册:

(1)《天基预警雷达》分册介绍的雷达不同于星载 SAR,它主要观测陆海空天中的各种运动目标,获取这些目标的位置信息和运动趋势,是难度更大、更为复杂的天基雷达。该书介绍天基预警雷达的星星、星空、MIMO、卫星编队等双/多基地体制。重点描述了轨道覆盖、杂波与目标特性、系统设计、天线设计、接收处理、信号处理技术。

(2)《战略预警雷达信号处理新技术》分册系统地阐述相关信号处理技术的理论和算法,并有仿真和试验数据验证。主要包括反导和飞机目标的分类识别、低截获波形、高速高机动和低速慢机动小目标检测、检测识别一体化、机动目标成像、反投影成像、分布式和多波段雷达的联合检测等新技术。

(3)《空间目标监视和测量雷达技术》分册论述雷达探测空间轨道目标的特色技术。首先涉及空间编目批量目标监视探测技术,包括空间目标监视相控阵雷达技术及空间目标监视伪码连续波雷达信号处理技术。其次涉及空间目标精密测量、增程信号处理和成像技术,包括空间目标雷达精密测量技术、中高轨目标雷达探测技术、空间目标雷达成像技术等。

(4)《平流层预警探测飞艇》分册讲述在海拔约 20km 的平流层,由于相对风速低、风向稳定,从而适合大型飞艇的长期驻空,定点飞行,并进行空中预警探测,可对半径 500km 区域内的地面目标进行长时间凝视观察。该书主要介绍预警飞艇的空间环境、总体设计、空气动力、飞行载荷、载荷强度、动力推进、能源与配电以及飞艇雷达等技术,特别介绍了几种飞艇结构载荷一体化的形式。

(5)《现代气象雷达》分册分析了非均匀大气对电磁波的折射、散射、吸收和衰减等气象雷达的基础,重点介绍了常规天气雷达、多普勒天气雷达、双偏振全相参多普勒天气雷达、高空气象探测雷达、风廓线雷达等现代气象雷达,同时还介绍了气象雷达新技术、相控阵天气雷达、双/多基地天气雷达、声波雷达、中频探测雷达、毫米波测云雷达、激光测风雷达。

(6)《空管监视技术》分册阐述了一次雷达、二次雷达、应答机编码分配、S 模式、多雷达监视的原理。重点讨论广播式自动相关监视(ADS-B)数据链技术、飞机通信寻址报告系统(ACARS)、多点定位技术(MLAT)、先进场面监视设备(A-SMGCS)、空管多源协同监视技术、低空空域监视技术、空管技术。介绍空管监视技术的发展趋势和民航大国的前瞻性规划。

(六) 目标和环境特性,是雷达设计的基础。该方向的研究对雷达匹配目标和环境的智能设计有重要的参考价值。本套丛书对此专题遴选了 4 个分册:

(1)《雷达目标散射特性测量与处理新技术》分册全面介绍有关雷达散射截面积(RCS)测量的各个方面,包括 RCS 的基本概念、测试场地与雷达、低散射目标支架、目标 RCS 定标、背景提取与抵消、高分辨力 RCS 诊断成像与图像理解、极化测量与校准、RCS 数据的处理等技术,对其他微波测量也具有参考价值。

(2)《雷达地海杂波测量与建模》分册首先介绍国内外海面环境的分类和特征,给出地海杂波的基本理论,然后介绍测量、定标和建库的方法。该书用较大的篇幅,重点阐述地海杂波特性与建模。杂波是雷达的重要环境,随着地形、地貌、海况、风力等条件而不同。雷达的杂波抑制,正根据实时的变化,从粗犷走向精细的匹配,该书是现代雷达设计师的重要参考文献。

(3)《雷达目标识别理论》分册是一本理论性较强的专著。以特征、规律及知识的识别认知为指引,奠定该书的知识体系。首先介绍雷达目标识别的物理与数学基础,较为详细地阐述雷达目标特征提取与分类识别、知识辅助的雷达目标识别、基于压缩感知的目标识别等技术。

(4)《雷达目标识别原理与实验技术》分册是一本工程性较强的专著。该书主要针对目标特征提取与分类识别的模式,从工程上阐述了目标识别的方法。重点讨论特征提取技术、空中目标识别技术、地面目标识别技术、舰船目标识别及弹道导弹识别技术。

(七) 数字技术的发展,使雷达的设计和评估更加方便,该技术涉及雷达系统设计和应用等。本套丛书遴选了3个分册:

(1)《雷达系统建模与仿真》分册所介绍的是现代雷达设计不可缺少的工具和方法。随着雷达的复杂度增加,用数字仿真的方法来检验设计的效果,可收到事半功倍的效果。该书首先介绍最基本的随机数的产生、统计实验、抽样技术等与雷达仿真有关的基本概念和方法,然后给出雷达目标与杂波模型、雷达系统仿真模型和仿真对系统的性能评价。

(2)《雷达标校技术》分册所介绍的内容是实现雷达精度指标的基础。该书重点介绍常规标校、微光电视角度标校、球载BD/GPS(BD为北斗导航简称)标校、射电星角度标校、基于民航机的雷达精度标校、卫星标校、三角交会标校、雷达自动化标校等技术。

(3)《雷达电子战系统建模与仿真》分册以工程实践为取材背景,介绍雷达电子战系统建模的主要方法、仿真模型设计、仿真系统设计和典型仿真应用实例。该书从雷达电子战系统数学建模和仿真系统设计的实用性出发,着重论述雷达电子战系统基于信号/数据流处理的细粒度建模仿真的核心思想和技术实现途径。

(八) 微电子的发展使得现代雷达的接收、发射和处理都发生了巨大的变化。本套丛书遴选出涉及微电子技术及与雷达关联最紧密的3个分册:

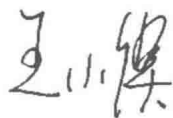
(1)《雷达信号处理芯片技术》分册主要讲述一款自主架构的数字信号处理(DSP)器件,详细介绍该款雷达信号处理器的架构、存储器、寄存器、指令系统、I/O资源以及相应的开发工具、硬件设计,给雷达设计师使用该处理器提供有益的参考。

(2)《雷达收发组件芯片技术》分册以雷达收发组件用芯片套片的形式,系统介绍发射芯片、接收芯片、幅相控制芯片、波速控制驱动器芯片、电源管理芯片的设计和测试技术及与之相关的平台技术、实验技术和应用技术。

(3)《宽禁带半导体高频及微波功率器件与电路》分册的背景是,宽禁带材料可使微波毫米波功率器件的功率密度比Si和GaAs等同类产品高10倍,可产生开关频率更高、关断电压更高的新一代电力电子器件,将对雷达产生更新换代的影响。分册首先介绍第三代半导体的应用和基本知识,然后详

细介绍两大类各种器件的原理、类别特征、进展和应用:SiC 器件有功率二极管、MOSFET、JFET、BJT、IBJT、GTO 等;GaN 器件有 HEMT、MMIC、E 模 HEMT、N 极化 HEMT、功率开关器件与微功率变换等。最后展望固态太赫兹、金刚石等新兴材料器件。

本套丛书是国内众多相关研究领域的大专院校、科研院所专家集体智慧的结晶。具体参与单位包括中国电子科技集团公司、中国航天科工集团公司、中国电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所、北京无线电测量研究所、电子科技大学、西安电子科技大学、国防科技大学、北京理工大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学等近 30 家。在此对参与编写及审校工作的各单位专家和领导的大力支持表示衷心感谢。



2017 年 9 月

作为一种具有重要战略意义的军事武器,雷达的首要任务是,通过提取目标回波的强度,判定目标的有无,解决目标的探测问题。随着各种新型军事目标的出现,特别是隐身技术的逐步成熟,使得目标回波能量越来越弱。为了满足新型军事威胁下目标探测的需求,雷达系统需要能够完成对极微弱信号的有效接收和积累,从而实现对新型军事威胁的有效探测。

但是,当雷达接收机的灵敏度不断提高时,接收信号的功率水平达到量子级别,例如单光子探测,许多被经典电磁场理论所忽视的物理现象逐步展现出来,例如对于经典的宏观接收信号,即信号的平均光子数 $N \gg 1$,由光子数涨落所引起噪声 $1/N^{0.5} \ll 1$,可以近似忽略,因此,在经典理论下接收端噪声主要由电子器件中的短电流导致的散粒噪声(Shot Noise)构成。但是当入射信号的平均光子数 N 接近可以分辨的级别,甚至 $N < 1$ 时,光子数涨落所引起的噪声在接收机噪声中所占的比例就大幅上升,若依然按照经典理论进行雷达接收机设计,则回波的信噪比将受到标准量子极限的限制而无法进一步提高。此时若希望改善雷达的性能,则必须利用量子理论进行分析和系统设计,通过有效的量子操作提升雷达探测的性能,突破标准量子极限对雷达探测性能的限制。

基于上述的基本思想,将量子技术与传感器技术相结合构建量子传感器,用于提升传感器性能,逐步成为量子信息技术领域的研究热点,量子传感器旨在利用量子信息技术,突破传统传感器所具有的空间分辨极限。理论上证明,量子传感器在特定的条件下,可以实现对 $1 \sim 100\text{km}$ 距离范围内目标的探测和成像,理论上角度分辨力可以提升 10 倍,距离分辨力可以提高 2 倍。综合考虑,可以将成像的三维分辨力提升 200 倍(距离-俯仰-方位)。

从广义上来说,雷达属于传感器的范畴,雷达的首要用途是发现远距离的兴趣目标,并提供有关目标位置、运动、尺寸和其他参数的信息。从这个角度上来看,量子传感已经矗立了量子雷达这个全新的研究领域,但并没有将量子技术深入到雷达真正核心的技术领域,即实现目标的可靠探测。

然而,量子传感的研究成果,为量子雷达探测概念的提出和技术攻关奠定了坚实的理论和实验基础。首先,量子传感与量子雷达探测具有本质上相同的理论,即信号检测与估计理论,只不过量子雷达探测对应着检测目标有无的问题,而量子传感对应着检测一个目标或两个目标的问题;其次,量子传感与量子雷达

探测具有类似相同的目的,即通过量子操作,降低接收机噪声水平,提高回波信号的信噪比,只不过量子雷达探测通过提高信噪比提升作用距离,而量子传感通过提高信噪比,提高对点目标个数检测的准确性以提升分辨力;最后,量子传感与量子雷达探测均需要克服相同的工程问题,即大气环境下的远距离传输问题,为了实现远距离的传输,量子传感最终提出的实现方案,为量子雷达探测的体制研究提供了非常关键的支撑。

量子信号检测与估计理论作为量子雷达探测的信号处理的核心理论,早在20世纪60年代就已经开展理论分析和证明。只不过受限于器件水平,经过40多年的研究,终于在2011年底,分别由日本人和美国人给出了绝对实验证据,虽然这项技术还处在实验室验证和研究阶段,且仅在数据通信场景下开展实验,但是说明利用量子技术提升信号检测的性能在原理和实验上是完全可行的。此外,国外仿真研究表明,当功率为单光子级别的信号入射目标表面时,量子雷达散射截面使得目标具有更高的“能见度”。

基于这样蓬勃发展的研究背景,本书首创性地提出了量子雷达探测的概念,旨在将量子信息技术引入雷达探测领域,解决未来战场给雷达探测带来的全新挑战,全面提升雷达探测的威力和性能。同时,也意在总结目前量子雷达探测领域的理论和实验的研究成果,与各界交流研究心得,起到抛砖引玉、交流共享、互相促进的作用。

本书对量子雷达探测的主要原理和基础理论进行阐述。首先,对量子传感的相关理论和方法进行介绍,并分析了量子传感与量子雷达探测之间的异同点,以此为切入口开展量子雷达探测原理的分析和论证,包括量子态传输和散射特性、量子雷达散射截面、量子雷达信号检测与估计。其次,根据上述基础理论,对量子雷达探测的体制进行分析。最后,对量子雷达探测的未来进行总结和展望。由于作者知识结构、学识水平的客观限制,本书错、漏或不当之处在所难免,衷心希望各界专家、同仁不吝指教,直言批评,使本书渐趋完善。

作者

2017年8月

第 1 章 概述	001
1.1 量子雷达探测的基本概念	001
1.1.1 量子雷达探测的定义	001
1.1.2 量子雷达探测的内涵	002
1.1.3 量子雷达探测的技术优势	003
1.2 量子雷达探测的核心理论	004
1.2.1 量子态传输与散射理论	004
1.2.2 量子信号检测与估计理论	005
1.2.3 量子目标散射截面积	006
1.3 量子雷达探测的起源与发展	006
1.3.1 量子信息是量子雷达探测的起源	007
1.3.2 从量子信息到量子传感器	010
1.3.3 量子雷达与量子雷达探测	014
1.4 本书的构成	015
参考文献	016
第 2 章 从量子信息到量子雷达	020
2.1 引言	020
2.2 量子理论中的一些基本概念	021
2.3 从麦克斯韦方程看经典理论与量子理论	024
2.3.1 经典麦克斯韦方程	024
2.3.2 电磁场的量子化	024
2.4 从接收机噪声看经典理论与量子理论的差异	027
2.4.1 直接探测中噪声的经典论与量子论解释	027
2.4.2 零差探测中噪声的经典论与量子论解释	031
2.5 量子传感的主要类型和基本理论	036
2.5.1 量子传感器的分类依据和主要特性	037
2.5.2 量子传感器角度分辨的原理与方法	041
2.6 量子传感器与量子雷达探测	051
2.6.1 雷达目标探测中的信号检测问题	052

2.6.2	量子传感器成像中的信号检测问题	053
2.6.3	信噪比是量子传感与量子雷达探测的共同的核​​心	057
	参考文献	060
第3章	量子雷达的传输和散射	062
3.1	引言	062
3.2	大气散射粒子的微观特性和模型	063
3.2.1	散射的基本物理概念	063
3.2.2	大气散射粒子的微观物理特性	064
3.3	偏振量子态大气传输散射的原理与特性	070
3.3.1	偏振态的描述与测量	070
3.3.2	偏振量子态的大气散射特性分析	072
3.3.3	偏振量子态传输特性的仿真与实测分析	084
3.4	非经典量子态大气传输的特性	089
3.4.1	非经典量子态传输的描述	089
3.4.2	非经典量子态传输的理论和特性	092
3.5	量子雷达散射截面积	097
3.5.1	量子雷达散射截面积的基本定义	098
3.5.2	基于单个光子入射的量子雷达散射截面积的 仿真实验	099
3.5.3	基于多个光子入射的量子雷达散射截面积的 仿真实验	102
	参考文献	105
第4章	量子雷达的检测与估计	107
4.1	引言	107
4.2	量子统计理论	108
4.2.1	经典检测与估计理论回顾	108
4.2.2	量子理论概述	109
4.3	量子检测理论	110
4.3.1	量子二元检测	110
4.3.2	量子门限检测	114
4.3.3	多元量子检测	120
4.4	量子估计理论	120
4.4.1	克拉美劳不等式	121
4.4.2	充分统计量	123
4.4.3	量子多参数估计	124

参考文献	126
第5章 量子雷达发射机	128
5.1 引言	128
5.2 量子雷达发射机概述	130
5.2.1 量子雷达发射机的基本构成	130
5.2.2 (准)单光子/非单光子偏振量子态调制量子 雷达发射机	130
5.2.3 使用纠缠量子态的量子雷达发射机	131
5.2.4 使用压缩态的量子雷达发射机	132
5.3 量子雷达发射中的一些基本概念	132
5.3.1 激光器光场的量子描述	132
5.3.2 量子态的非经典判据	138
5.4 量子雷达发射机中高压压缩比压缩光场的制备	142
5.4.1 引言	142
5.4.2 准相位匹配	142
5.4.3 高压压缩比压缩光场实验装置	150
5.4.4 高压压缩比的压缩光场制备实验结果	153
5.5 量子雷达发射机中高亮度纠缠光场的制备	154
5.5.1 引言	154
5.5.2 高亮度纠缠光源制备难点分析	155
5.5.3 高亮度多光子纠缠光源制备实验系统	157
5.5.4 实验实现及结果分析	162
参考文献	165
第6章 量子雷达接收机	169
6.1 引言	169
6.2 量子雷达接收机的基本组成	170
6.2.1 雷达接收机的基本概念	170
6.2.2 量子雷达接收机的设计思路	172
6.2.3 量子雷达接收机的组成	174
6.3 量子接收通道的特性分析	176
6.3.1 量子接收通道的信号测量	176
6.3.2 量子接收通道的信号检测	179
6.4 量子接收通道的发展展望	189
参考文献	193