



Ultra Wideband Radar Theory and Technology

超宽带雷达 理论与技术

编著 费元春



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

超宽带雷达理论与技术

Ultra Wideband Radar Theory and Technology

编 著 费元春

国防工业出版社

·北京·

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

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 第六届评审委员会组成人员

- 主任委员 刘成海
- 副主任委员 宋家树 蔡 镛 程洪彬
- 秘 书 长 程洪彬
- 副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明
- 委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)
- 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴
- 刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁
- 李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生
- 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠
- 陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起
- 崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波
- 本书主审委员 王小谟

前 言

随着现代雷达技术的发展,研究的热点转移到如何提高距离分辨率、改善目标识别成像等诸多性能的同时又兼顾提高雷达隐蔽性与抗干扰性能。超宽带(UWB)雷达新体制是这种探索研究方向之一,它具有高的距离分辨率、低截获概率、抗干扰、反隐身、抗多径、特有的穿透力等常规雷达无法比拟的优点。

所谓超宽带雷达,这里指相对工作带宽大于或等于其中心频率20%的雷达。超宽带雷达按超宽带信号形式的不同可分为两大类:有载波的超宽带雷达和无载波的超宽带雷达,后者又称冲激脉冲雷达。

从20世纪60年代开始,人们对超宽带理论与技术及其在冰层探测成像、地表层探测等民用方面作了大量的研究工作。进入90年代,人们对其在无线通信(大容量、高数据率)与军事方面的应用(如优越的反隐身能力)产生了极大的兴趣,许多国家都积极开展研究工作,其中美国和俄罗斯一直处于世界领先水平。我国从20世纪80年代起开始了对超宽带技术的研究,取得了一些成果,但基本上都停留在实验阶段,超宽带雷达无论民用或军用的实际研究都甚少,直到21世纪初探地雷达在我国的引进和研究才有了新的较大发展。由于超宽带技术具有独特的优势,其必将从众多的新技术中脱颖而出,在军用、民用等领域带来良好的发展前景。21世纪将是我国超宽带技术蓬勃发展和应用的世纪。

超宽带雷达是一种全新体制的雷达,与常规窄带雷达系统相比,超宽带雷达具有以下优越性能。

(1)优越的反隐身能力。超宽带雷达信号兼有低频和宽频带

的特性,频谱从直流伸展到几吉赫,毫米波、太赫超宽带电磁波对叶簇和地表层、隐身目标涂层具有较强的穿透能力,可以探测森林中、墙体后或地表层的隐藏目标,用于探地雷达、穿墙雷达、探月雷达,特别是军事应用中对隐身飞机、隐身装甲的探测。

(2)强的抗干扰能力。由于超宽带信号具有宽谱特性,其截获概率低,不易被侦察发现。普通雷达信号的截获接收机不能有效地检测超宽带雷达信号,超宽带雷达信号也难以被干扰,所以超宽带雷达具有强的电子抗干扰能力和反侦察能力,保密性强。因为要进行超宽带干扰,在进行干扰时,必须加大雷达的频带宽度,这就会降低干扰信号的功率谱密度,使干扰的效果减弱。UWB扩频处理增益主要取决于脉冲的占空比和发送每个比特所用的脉冲数。UWB的占空比一般为 $0.01 \sim 0.001$,具有比其他扩频系统高得多的处理增益,抗干扰能力强。一般来说,UWB抗干扰处理增益在50dB以上。

(3)强的抗多径能力。超宽带信号可以减小或消除由于多路径造成的测高误差和天线方向图畸变。

(4)有极高的距离分辨率,使超宽带雷达分辨率达到厘米量级,其定位精度很高。

(5)具有很强的目标识别能力。超宽带雷达的相对带宽很宽,可以分辨目标的主要散射点,利于多个强散射点的目标回波信号积累,可以改善信噪比;极高的距离分辨率,这一特性对目标识别也极为有用。由于雷达发射脉冲的短时性,可以使目标不同区域的响应分离,使目标的特性突出,借此可进行目标——人体及其佩带武器的识别。此外,由于信号的宽谱特性,可以激励起目标的各种响应模式,这也有助于目标识别。

(6)具有好的目标成像能力,用扫描合成孔径成像工作方式,超宽带雷达可同时提供良好的距离与角度分辨率,使目标成像比常规窄带雷达有极大的改善。

(7)有超近程探测能力。常规窄带雷达在探测超近程目标时存在近程盲区,冲激雷达的脉冲宽度极窄,其最短探测距离与距离

分辨率大致相等,所以可超近程探测目标。这种近距离探测雷达可用于导弹引信起爆、飞行器编队位置保持及防撞装置、汽车防撞等方面。

超宽带技术在军用和民用两个领域都有着广泛的应用。超宽带雷达是超宽带技术的一种应用,其体积小、成本低、工作灵活,对超宽带冲激脉冲雷达而言,无需混频电路与解调电路,易于实现集成化、数字化。虽然 UWB 技术原本是为军事目的而开发的,但有巨大的民用市场,UWB 系统容量大、传输速率高,在超宽带大容量通信、无线宽带组网、高速数据传输等方面市场广阔,前景诱人。在军事上,以军事为目的 UWB 开发研究的源头,在海、陆、空等军事领域,UWB 通信和 UWB 雷达有着广泛的应用前景。

UWB 技术具有巨大的诱惑力,同时又向我们提出了很多挑战,要实现 UWB 的军用和民用,尚有一些关键技术需要解决,一些课题有待攻关。

近十余年来,作者从事超宽带领域特别是超宽带雷达理论与技术的研究,获得比较系统的理论知识,结合超宽带冲激雷达的理论、设计研制与技术攻关,积累了一些心得体会,愿与同行、读者交流。本书的主要内容根据作者从事 UWB 技术教学和科研成果,包括发表的部分学术论文、技术总结及指导十余名博士、硕士的研究工作:超宽带信号的产生、辐射、传播、回波信号建模、超宽带天线的仿真与优化设计、超宽带信号的接收与高速采集、精确定时与信号处理等研究成果编著而成。通过多年的研究,对超宽带雷达电路及系统进行理论分析仿真与优化设计,取得一些成功经验加以系统全面地总结、提高而成,这里融入了一些新思路、新方法的探讨和新器件、新技术的应用心得,构成了本书的特色和论述基础。因此可以说,该书是微波电路实验室十余位师生多年来参与超宽带雷达理论与技术研究的智慧结晶。

本书比较全面系统地论述了超宽带雷达的理论体系和工程实现的关键技术。理论上有别于传统的脉冲雷达的理论分析,重点阐明了宽带信号传播的特点、时频分析,超宽带雷达天线机理,不

同常规脉冲雷达的雷达距离方程、模糊函数、信号形式与调制理论,回波信号模型及定位分析处理方法等;技术上融入了作者设计研制的一些新成果:如新的超宽带雷达天线分析仿真与优化设计、超宽带雷达冲激脉冲产生与放大、发射技术、多通道超宽带雷达相参接收机及相位校准方法、超宽带频率合成源及脉冲阶梯步进频率源、皮秒级高精度定时系统、时域信号处理等。这些理论与技术密切结合国防现代化和武器装备信息化的需要,有重要发展前景和开发使用价值。

全书共分 12 章,主要内容包括超宽带技术的发展和应⤵用、超宽带冲激雷达理论基础、超宽带雷达发射信号的理论研究、超宽带信号的传播特性研究、超宽带雷达回波模型、目标检测及信号处理方法、超宽带天线的理论与设计、超宽带雷达发射技术、外差式超宽带雷达接收机技术、冲激脉冲雷达时域接收机技术、超宽带雷达精确定时及定时抖动校正技术、超宽带雷达信号的实时处理技术、超宽带穿墙雷达系统研究。

本书由北京理工大学费元春教授担任主编,负责制订编写书目大纲,主要完成前言、第 1 章、第 6 章、第 8 章、第 9 章、第 12 章写作及其他各章编纂修改和统稿工作,并负责国防科技图书出版基金和国家科学技术学术著作出版基金的申请;周建明副研究员主要完成第 7 章、第 8 章部分编写工作;张冰博士主要完成第 10 章编写,第 1 章、第 2 章、第 8 章部分编写及全书图文修改等工作;王治国博士主要完成第 3 章~第 5 章编写及第 1 章、第 2 章、第 11 章部分编写工作;李熹博士主要完成第 7 章、第 11 章部分编写工作。

中国工程院毛二可院士、中国科学院电子所方广有研究员、装备指挥技术学院陈世伟教授认真审阅了本书,提出了许多宝贵意见,并给予热情鼓励和指导。本书获得国防科技图书出版基金和国家科学技术学术著作出版基金的资助。在此,对基金委专家的评审和指导及相关人员为本书的出版所付出的辛勤劳动一并表示衷心的感谢。同时,向微波电路实验室十余位师生多年来参与超

宽带雷达理论与技术研究付出的一切深表谢忱。

本书可作为雷达、通信、航天、制导、射电天文、电子对抗和信息系统、微波、仪器仪表、地球物理等专业研究生教材和本科生参考用书,亦可供从事雷达、通信、制导、射电天文、电子对抗、反恐作战、地震预报与救援、仪器测量等领域的科研人员和工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免有不妥与错误之处,恳请读者批评指正。

费元春

目 录

第 1 章 超宽带技术的发展和應用	1
1.1 超宽带信号的概念.....	1
1.2 超宽带技术的特点.....	2
1.3 超宽带技术的历史和发展.....	4
1.4 超宽带技术的应用.....	6
1.4.1 超宽带定位技术	6
1.4.2 超宽带探地雷达	9
1.4.3 超宽带合成孔径雷达.....	12
1.4.4 超宽带技术的其他应用.....	15
参考文献.....	17
第 2 章 超宽带冲激雷达理论基础	20
2.1 超宽带雷达与窄带雷达的区别	20
2.2 超宽带冲激雷达系统的基本结构	22
2.3 超宽带收发天线的简化模型	26
2.4 超宽带雷达性能研究	28
2.4.1 超宽带雷达方程.....	28
2.4.2 超宽带接收机噪声功率分析.....	30
2.4.3 超宽带雷达距离模糊函数的研究.....	32
2.4.4 方位分辨率的分析.....	34
2.4.5 时钟抖动对超宽带性能的影响分析.....	36

2.4.6	距离估计的误差下界	37
	参考文献	38
第3章	超宽带雷达发射信号的理论研究	41
3.1	超宽带脉冲信号形式	41
3.1.1	常见的超宽带脉冲信号形式	41
3.1.2	高斯微分次数和信号频谱特性的关系研究	47
3.1.3	脉宽因子和信号频谱特性的关系研究	49
3.2	脉冲重复间隔的设计	51
3.3	脉冲序列的调制方案研究	53
3.3.1	超宽带脉冲序列调制方法及性能研究	54
3.3.2	分组PN码的研究	63
	参考文献	64
第4章	超宽带信号的传播特性研究	66
4.1	超宽带传播环境分析	66
4.1.1	大尺度路径损耗及其影响的研究	67
4.1.2	超宽带室内多径传播环境分析	70
4.2	超宽带信号的室内多径模型	72
4.2.1	修正后的S-V信道模型	73
4.2.2	超宽带信号传播的确定性模型	75
4.3	超宽带信道仿真	75
4.3.1	仿真步骤	75
4.3.2	仿真结果	76
4.4	用Hurst指数进行超宽带信道描述的初探	78
4.4.1	白噪声经过超宽带信道后的统计特性研究	78

4.4.2	超宽带传播信道的统计自相似性分析	81
4.4.3	Hurst 指数的经典估计算法	82
4.4.4	基于小波包变换的 Hurst 指数估计算法 研究	84
	参考文献	86
第 5 章	超宽带雷达回波模型、目标检测及信号处理方法	88
5.1	超宽带穿墙雷达回波建模	88
5.1.1	理想低速运动目标对信号的影响研究	89
5.1.2	多散射中心的影响分析	91
5.1.3	墙体对信号的影响研究	92
5.1.4	天线对超宽带信号的影响分析	92
5.1.5	超宽带雷达回波模型的建立	93
5.2	回波接收和动目标的检测算法研究	94
5.2.1	基于脉冲偏移检测的动目标检测算法 研究	95
5.2.2	基于回波强度变化的低速运动目标检测 算法研究	100
5.3	超宽带目标检测理论以及时延估计算法的研究	102
5.3.1	超宽带目标检测建模	103
5.3.2	超宽带雷达检测算法和时延估计算法 研究	104
5.3.3	超宽带雷达检测性能研究	107
5.4	超宽带雷达定位算法研究	111
5.4.1	超宽带穿墙雷达的定位原理	112
5.4.2	利用查找表技术的超宽带雷达快速 定位算法研究	116
5.4.3	定位结果和分析	121

5.4.4	超宽带雷达定位性能分析	123
5.5	基于小波变换的超宽带雷达信号处理算法研究	125
5.5.1	小波变换基本知识	126
5.5.2	连续小波变换在超宽带雷达信号处理 中的应用研究	131
5.5.3	基于离散小波变换的超宽带雷达回波 去噪算法研究	135
5.5.4	基于极小化极大估计准则的阈值策略 研究	138
5.5.5	小波算法的 Matlab 仿真与分析	147
5.5.6	小波实施策略研究	153
	参考文献	156
第6章	超宽带天线的理论与设计	160
6.1	超宽带天线概述	160
6.2	常见的超宽带天线	162
6.2.1	对数周期天线	162
6.2.2	等角螺旋天线	164
6.2.3	TEM 喇叭天线	166
6.2.4	Vivaldi 天线	169
6.2.5	双锥天线及其变形	170
6.3	几种超宽带天线性能的比较与选择	171
6.3.1	几种超宽带天线的性能比较	171
6.3.2	超宽带穿墙雷达天线的选择	172
6.4	平面螺旋天线的理论与设计	175
6.4.1	平面螺旋天线的基本理论	175
6.4.2	平面螺旋天线辐射器仿真与优化设计	181
6.4.3	反射腔的设计	183

6.4.4	平面螺旋天线馈电线的阻抗匹配	186
6.4.5	平面等角螺旋天线系统的仿真结果	192
6.5	阿基米德平面螺旋天线的原理与设计	195
6.5.1	阿基米德平面螺旋天线原理	195
6.5.2	阿基米德平面螺旋天线的设计	197
6.5.3	阿基米德平面螺旋天线的测试结果	200
6.6	超宽带 TEM 喇叭天线的原理与设计	202
6.6.1	TEM 喇叭天线与平面螺旋天线的比较	202
6.6.2	TEM 喇叭天线的原理概述	204
6.6.3	小张角 TEM 喇叭的理论模型	204
6.6.4	TEM 喇叭天线的高低频性能的改善及 馈电方法	206
6.6.5	恒阻抗 TEM 喇叭天线的设计及仿真 结果	208
6.6.6	加脊 TEM 喇叭天线的仿真设计	212
6.7	球形和锥形加载单极子天线	215
6.7.1	球形和锥形加载单极子天线简介	215
6.7.2	球形和锥形加载单极子天线理论分析	216
6.7.3	球形和锥形加载单极子天线数值计算 与实测结果	220
	参考文献	225
第7章	超宽带雷达发射技术	228
7.1	几种宽带信号产生技术	229
7.1.1	冲激脉冲(窄脉冲)产生技术	229
7.1.2	脉冲步进频信号合成源	245
7.1.3	线性与非线性调频源	252
7.2	固态功率放大合成技术	263

7.3	超宽带雷达发射机调制理论与技术	265
7.3.1	UWB 系统与其他系统间的相互干扰及影响	265
7.3.2	时间间隔调制理论	269
7.3.3	时间间隔调制信号功率谱分析	272
7.3.4	不同调制编码功率谱的仿真	275
	参考文献	279
第 8 章	外差式超宽带雷达接收机技术	282
8.1	超宽带雷达接收机概述	282
8.1.1	宽带、超宽带雷达接收机的几种形式	283
8.1.2	外差式超宽带雷达接收机的特点和性能参数	284
8.2	外差式超宽带接收机系统的设计	288
8.2.1	系统设计的总体考虑	288
8.2.2	模拟接收机系统分析与参数计算	291
8.2.3	模拟接收机各级电路增益分配与噪声分配	299
8.2.4	接收机本振源合成技术	302
8.2.5	外差式超宽带接收机的仿真设计与半实物测试平台	308
8.3	外差式超宽带接收机相位校准技术	319
8.3.1	外差式超宽带接收机相位校准方法	319
8.3.2	接收机幅相校准方案及实现技术	322
8.4	外差式超宽带接收机本振源优化设计及研制结果	327
8.4.1	基于 DDS 的超宽带本振源的优化组合与仿真	327