



装备学院 · 学术专著

合成孔径雷达对抗技术

Electronic Countermeasure Technology to Synthetic Aperture Radar

贾鑫 等著

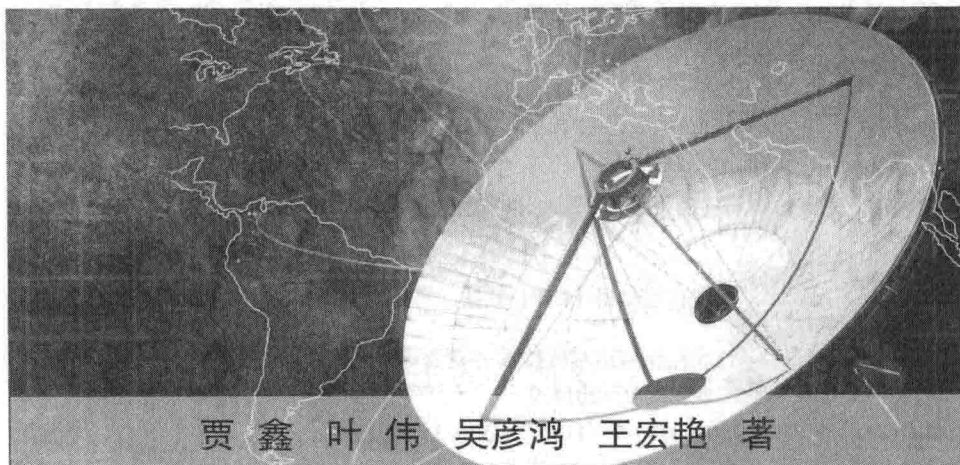


国防工业出版社

National Defense Industry Press



合成孔径雷达对抗技术



贾鑫 叶伟 吴彦鸿 王宏艳 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

合成孔径雷达对抗是电子对抗领域的前沿性研究课题。本书专门论述合成孔径雷达对抗技术,较系统地论述了合成孔径雷达的电子对抗技术方法体系、基本理论和技术发展脉络,内容新颖,理论性和实用性较强。全书共分5章,内容包括:绪论,合成孔径雷达基础,合成孔径雷达的电子侦察技术,合成孔径雷达的干扰技术、合成孔径雷达的干扰抑制处理技术等内容。书中图文并茂,便于读者理解和掌握基本方法和理论。

本书可作为从事电子信息对抗、合成孔径雷达信号处理、雷达系统研究的技术人员和科研院所相关研究人员的参考书,也可作为高等院校电子信息对抗、雷达等相关专业的教师、高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达对抗技术 / 贾鑫等著. —北京:国防工业出版社, 2014.9

ISBN 978 - 7 - 118 - 09658 - 3

I. ①合... II. ①贾... III. ①合成孔径雷达 - 雷达对抗 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 212147 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 13 1/4 字数 236 千字

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 35.00 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

雷达和无线电通信的发明,扩大了陆海空战场空间,改变了战争形态,同时也推动了电子对抗技术的快速发展。随着电子技术和信号处理技术的迅猛发展,雷达技术在不断进步。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为现代雷达的杰出代表,早在 20 世纪 50 年代以虚拟阵列的形式突破了传统雷达的一维测量,进入了二维成像的时代;在随后的几十年里突飞猛进,以相参干涉、多频段、多极化等多参量技术为支撑跨入了三维成像的遥感时代。由于它不受云、雾、雨、雪和黑夜等自然条件的限制,具有独特的全天候、全天时、多波段、多极化等特点;工作在特定波段的合成孔径雷达还能够透过常规伪装(树木、伪装网等)对伪装隐蔽下的目标成像,发现掩体中的目标,甚至可以透过地表和植被获取地下目标信息,还可实现对机动目标的成像识别。使其在军事应用上尽显优势,已广泛地应用于军事侦察、情报搜索、战场监视、攻击引导、打击效果评估、地形测绘和武器制导等任务,使其一跃成为现代军事侦察的主要工具。近年来基于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术的合成孔径雷达受到广泛的关注,2007 年德国学者 Ender 首先提出了 MIMO-SAR 系统的概念,MI-MO-SAR 是 MIMO 技术与合成孔径雷达相结合的多功能雷达。以阵列信号处理理论为基础的数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)技术在合成孔径雷达领域不断得到应用,可显著增大空时自由度,大大提高合成孔径雷达的成像性能,同时获得极好的抗干扰性能。可以预见,采用数字阵列技术体制的 DBF-SAR 将是合成孔径雷达发展的趋势。鉴于合成孔径雷达技术的不断进步,以及在军事应用领域的不断扩展,合成孔径雷达对抗将成为电子对抗技术学科的一个重要研究领域。

合成孔径雷达对抗是指为阻止或削弱敌方合成孔径雷达系统有效利用电磁频谱而采取的电子对抗措施。与对用于检测目标、估计目标位置及运动参数的传统雷达的对抗不同,主要是通过电子干扰手段破坏雷达成像或降低雷达图像的质量,使敌方不能从雷达图像中检测、识别目标及获得有用信息。

在本书的编写过程中,我们特别注重内容的基础性、系统性、新颖性和实用性,能较好体现作者的研究成果和学术见解。书中相关理论推导在力求准确和严密的基础上,重点突出基本原理和方法的论述,力求呈现给读者解决问题的方法体系和思路以及技术发展的脉络,便于读者理解。

本书是笔者及其所负责的课题组十多年来在合成孔径雷达对抗领域研究工作的全面总结。全书围绕合成孔径雷达的电子对抗问题,系统地论述了合成孔径雷达对抗的基本概念、基本原理和主要对抗方法与技术,合成孔径雷达的干扰抑制处理技术等内容。全书共分5章。第1章为绪论,主要论述合成孔径雷达基本概念与原理,电子对抗基本概念与技术体系,合成孔径雷达对抗的概念、基本方法和主要问题等内容;第2章为合成孔径雷达基础,重点阐述合成孔径雷达基础理论、工作模式、典型成像处理算法、合成孔径雷达成像的几何特性、合成孔径雷达图像目标几何特征、合成孔径雷达图像目标定位、合成孔径雷达方程、典型合成孔径雷达系统等内容;第3章为合成孔径雷达的电子侦察技术,本章针对合成孔径雷达信号电子侦察和工作模式辨识问题,重点论述合成孔径雷达的电子侦察方程、合成孔径雷达的电子侦察信号模型、合成孔径雷达的电子侦察信号处理方法、合成孔径雷达工作模式的辨识方法等内容;第4章为合成孔径雷达的干扰技术,重点论述对合成孔径雷达系统的电子干扰原理、干扰分类、干扰图像特征、几种重要的干扰技术、干扰方程、干涉合成孔径雷达的电子干扰技术等内容;第5章为合成孔径雷达的干扰抑制处理技术,重点论述基于频域识别的陷波滤波法、基于干扰信号参数建模与参数估计的滤波法和基于小波包的自适应滤波方法,以及干扰抑制效果评估等内容。

合成孔径雷达对抗是电子对抗领域的前沿课题,许多问题仍处于深入研究阶段。本书在课题组成员十多年的研究成果基础上,由贾鑫担任主编并设计了本书的总体框架和章节内容,叶伟、吴彦鸿、王宏艳等课题组成员参加撰写完成。在撰写的过程中参考了学生王宏艳、刘淑茜、尹灿斌、贾丽、刘红娅、陈颖颖、胡华超、李云涛、张佳的博士、硕士学位论文,课题组朱卫纲、曲卫、潘显俊、何永华、唐晓婧等成员参加了部分章节的校对、绘图工作,并提出了许多修改意见;在撰写的过程中还参考了不少中外相关文献和网上资料,作者在此一并表示感谢。另外,感谢国防工业出版社编辑在本书的撰写过程中给予的指导和编辑过程中付出的辛勤劳动。

由于近年来新体制合成孔径雷达系统的出现,大大提高了其抗干扰能力,增加了电子对抗的难度。本书无意亦无力顾及问题的各个方面,很难反映合成孔

径雷达对抗技术发展的全貌,期望对一些内容进行更深入了解的读者请参阅相关的专著和文献。此外,限于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者谅解和批评指正。

贾鑫

2014年6月于北京

第1章 绪论	1
1.1 SAR 基本概念与原理	1
1.1.1 SAR 基本概念	1
1.1.2 SAR 技术发展	4
1.1.3 SAR 成像原理	7
1.2 电子对抗概念与技术体系	9
1.2.1 电子对抗概念	10
1.2.2 电子对抗分类	11
1.2.3 电子对抗技术体系	11
1.3 SAR 对抗概念与基本方法	13
1.3.1 SAR 对抗基本概念	13
1.3.2 SAR 对抗基本方法	13
1.3.3 SAR 对抗基本问题	15
第2章 合成孔径雷达基础	17
2.1 概述	17
2.2 SAR 发展历程	17
2.3 SAR 数据获取	22
2.3.1 SAR 数据获取几何关系	22
2.3.2 SAR 数据获取模式	24
2.4 SAR 成像关键技术	27
2.4.1 距离模型	27
2.4.2 距离徙动模型	29
2.4.3 回波信号模型	31
2.4.4 多普勒参数估计	33
2.5 典型 SAR 成像处理算法	37
2.5.1 距离—多普勒算法	38

2.5.2	Chirp Scaling 算法	39
2.5.3	Specan 算法	44
2.6	SAR 成像的几何特性	45
2.6.1	透视收缩	45
2.6.2	顶底位移	46
2.6.3	雷达阴影	46
2.7	SAR 图像目标几何特征	47
2.8	SAR 图像目标定位	49
2.8.1	距离—多普勒信息定位法	50
2.8.2	SAR 波束中心点目标定位解析法	50
2.9	SAR 方程	52
2.10	SAR 分辨特性	55
2.11	典型 SAR 系统	57
第3章	合成孔径雷达的电子侦察技术	69
3.1	概述	69
3.2	SAR 的电子侦察方程	69
3.3	SAR 的电子侦察信号模型	73
3.3.1	信号带宽与模型	73
3.3.2	线性调频信号时频特征	75
3.3.3	SAR 的电子侦察信号模型	77
3.4	SAR 的电子侦察信号处理	79
3.4.1	脉冲宽度估计	79
3.4.2	线性调频信号频率参数估计	89
3.4.3	脉冲重复频率 (PRF) 估计	99
3.5	SAR 工作模式辨识	103
3.5.1	工作模式特征参数计算	103
3.5.2	工作模式辨识算法	114
第4章	合成孔径雷达的干扰技术	117
4.1	概述	117
4.2	SAR 的干扰原理	117
4.2.1	SAR 的干扰原理	117
4.2.2	SAR 的干扰分类	120
4.3	干扰信号的 SAR 图像特征	121
4.3.1	非相干干扰的 SAR 图像特征	121

4.3.2	部分相干干扰的 SAR 图像特征	122
4.3.3	二维相干干扰的 SAR 图像特征	125
4.4	SAR 的干扰技术	127
4.4.1	噪声干扰	127
4.4.2	混沌控制干扰	130
4.4.3	数字储频转发干扰	133
4.4.4	弹射式干扰	139
4.4.5	数字图像合成干扰	151
4.5	SAR 的干扰功率计算	153
4.5.1	功率增益计算模型	153
4.5.2	干扰功率计算	155
4.6	InSAR 的干扰技术	160
4.6.1	InSAR 三维成像原理	160
4.6.2	InSAR 的干扰方法与原理	163
4.6.3	InSAR 的干扰效果仿真	166
第 5 章	合成孔径雷达的干扰抑制处理技术	175
5.1	概述	175
5.2	基于频域识别的陷波滤波法	175
5.2.1	窄带干扰信号检测	176
5.2.2	陷波滤波器	178
5.3	基于 AR 模型的滤波法	178
5.3.1	AR 模型	178
5.3.2	基于 AR 模型的滤波法	179
5.3.3	AR 模型阶数确定	181
5.4	基于小波包的自适应滤波法	182
5.4.1	小波分析	182
5.4.2	小波包分解	183
5.4.3	基于小波包的自适应滤波	185
5.5	干扰抑制效果评估	188
5.5.1	干扰抑制效果评估指标	188
5.5.2	评估指标计算方法	196
5.5.3	仿真评估实验	199
参考文献		202

第1章 绪 论

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种具有高分辨率的成像雷达,它充分利用了脉冲压缩技术、合成孔径原理以及信号处理方法,能够以真实小孔径天线获取地表的二维高分辨雷达图像。它可以装载在空间、空中飞行平台上,与可见光成像、红外探测、激光探测等光学观测手段不同,不受云、雾、雨、雪和黑夜等自然条件的限制,可以实现全天时、全天候对地观测。工作在特定波段的合成孔径雷达还能够透过常规伪装(树木、伪装网等)对伪装隐蔽下的目标成像,发现掩体中的目标,甚至可以透过地表和植被获取地下目标信息,还可实现对机动目标的成像识别。这些特点使其在军事应用上尽显优势,并已被广泛地应用于军事侦察、情报搜索、战场监视、攻击引导、打击效果评估、地形测绘和武器制导等作战任务。鉴于合成孔径雷达军事应用领域的不断扩展,合成孔径雷达对抗也成为了电子对抗领域的重要研究内容。

全书围绕合成孔径雷达的对抗问题,系统地论述了合成孔径雷达对抗的基本概念和基本原理、主要对抗方法和技术、合成孔径雷达的干扰抑制处理技术等内容。本章作为全书的开篇绪论,将主要论述三个方面的问题:① 合成孔径雷达基本概念与原理;② 电子对抗基本概念与技术体系;③ 合成孔径雷达对抗概念、基本方法和主要问题。

1.1 SAR 基本概念与原理

1.1.1 SAR 基本概念

在常规雷达系统中,角度分辨率由电磁波辐射波长和天线尺寸之比决定。而图像空间分辨率等于角度分辨率与雷达传感器至地球表面的距离之积,这样当雷达传感器增加高度时,如果不增加天线尺寸,空间分辨率就会降低。为了不增加天线尺寸而又获得高分辨率,需要采用合成孔径技术。SAR 正是利用装载在空中或空间飞行平台上的小尺寸天线与目标之间的相对运动,来获得有效的多普勒带宽,并通过相干信号处理的方法来实现方位向和距离向的二维高分辨

成像。合成孔径雷达的方位向是指雷达测绘带内沿雷达运动的方向,距离向是指测绘带内与航迹垂直的方向。图 1.1 给出了侧视 SAR 工作过程示意图。

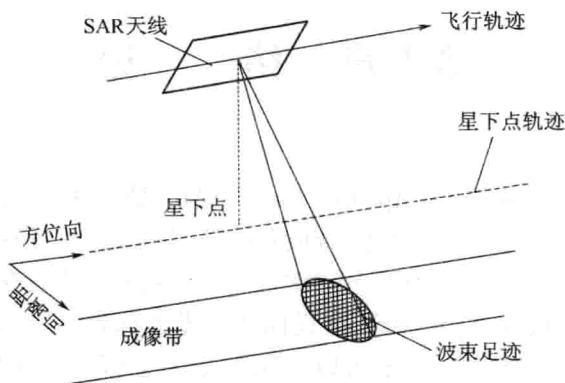


图 1.1 侧视 SAR 工作过程示意图

当雷达传感器随着平台运动时,小物理天线在空间等间隔地发射并接收雷达信号,天线顺序地从一个空间位置移动到下一个位置,形成了一个虚拟的长孔径。传感器与目标之间的距离变化引起回波信号的相位变化,使方位向回波多普勒信号呈线性调频规律变化,形成与距离向发射信号相似的方向向大带宽信号,信号处理器对顺序采集的一组雷达回波数据进行正确的相移和叠加,就能够形成窄的波束,获得极高的方位分辨率,从而得到高分辨率图像。

SAR 具有三个重要的特性:① 全天时和全天候成像;② 几何分辨率与传感器高度及波长无关;③ 在电磁频谱中微波波段具有独有的信号数据特性。

SAR 系统的数据流程如图 1.2 所示。

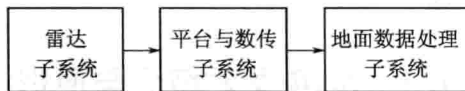


图 1.2 SAR 数据流程示意图

雷达发射机按照预先编程的脉冲持续时间和脉冲重复周期发射某种频率编码或相位编码相干脉冲信号,尤其以频率编码最为常用。频率编码可以分为线性与非线性调频两类。雷达接收机接收地面回波信号,其工作脉冲与回波信号的时序如图 1.3 所示。

雷达接收的地面回波信号经编码后,由数传设备发送给地面数据处理系统,经地面数据处理系统进行成像处理生成图像产品。

按照装载的平台不同,合成孔径雷达可分为星载合成孔径雷达、机载合成孔

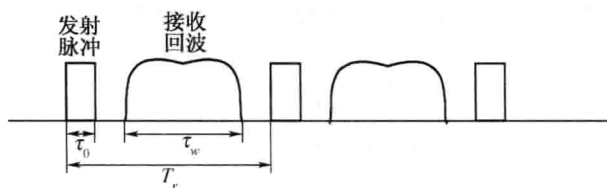


图 1.3 SAR 工作脉冲及回波时序示意图

径雷达、无人机载合成孔径雷达、弹载合成孔径雷达等类型;按照观测模式的不同可分为条带(Stripmap)、聚束(Spotlight)和扫描(Scan)等模式,它们的信号处理原理和方法相同或类似;按照雷达波束指向与雷达运动方向的夹角不同,可分为正侧视模式、斜视模式和前视模式等。

合成孔径雷达发射的电磁波有多种极化方式,例如:发射和接收都采用水平极化(HH)方式;发射和接收都采用垂直极化(VV)方式;发射水平极化和接收垂直极化(HV)的交叉极化方式;发射垂直极化和接收水平极化(VH)的交叉极化方式等。

在合成孔径雷达系统中,分辨率用地面距离分辨率和方位分辨率两个参数来表示。距离分辨率定义为距离向分辨相邻两个散射点的最小距离;而方位分辨率定义为方位向分辨相邻两个散射点的最小距离。

雷达的斜距分辨率为

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (1.1)$$

式中: B 为雷达发射信号带宽; c 为光速。在对地面成像中,我们更关注的是垂直于飞行轨迹方向的沿地表的地面距离分辨率。SAR 成像几何关系如图 1.4 所示。

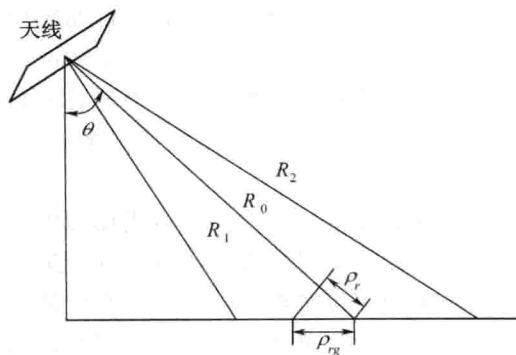


图 1.4 SAR 成像几何示意图

对于机载 SAR,若入射角为 θ ,则地面距离分辨率为

$$\rho_{rg} = \frac{\rho_r}{\sin\theta} = \frac{c}{2B_r \sin\theta} \quad (1.2)$$

对于星载 SAR,则地面距离分辨率为

$$\rho_{rg} = \rho_r \cdot \frac{R_e + h}{R_e} \cdot \cos\theta \quad (1.3)$$

式中: R_e 为地球半径; h 为卫星飞行高度。可见在星载情况下,由于地球曲率的影响, ρ_{rg} 和 ρ_r 有较大的差别,因此对星载 SAR 图像需要进行距离向的几何校正。

总之,无论机载还是星载 SAR 系统,它的斜距分辨率仅与雷达发射信号的带宽有关,而地面距离分辨率还与入射角等几何参数有关。

目前合成孔径雷达信号处理采用数字处理方式,采集到的原始数据为一个二维数组。数组中的每一行数据为接收回波脉冲的各个采样点的值,每一列的数据为雷达在不同的空间位置处接收回波脉冲的相应的采样点值。这样,二维数组的行方向就是距离向,列方向就是方位向。

1.1.2 SAR 技术发展

1951 年美国 Goodyear 宇航公司的 Carl Wiley 第一次发现了侧视雷达通过利用回波的多普勒频移可以改善方位分辨率,即“多普勒波束锐化(DBS)”的概念。通过分析雷达运载平台(如飞机、卫星等)与地面目标间由于相对运动所产生的多普勒频率来提高方位分辨率,宣告了合成孔径雷达技术的诞生;在以后的几年间,该技术取得了一系列的研究成果。1952 年伊利诺斯(Illinois)大学的 C. W. Sherwin 等人在机载雷达对地表成像的实验中也发现了多普勒波束锐化现象,从而在实验上证实了这一概念。1953 年夏,在美国密歇根大学(University of Michigan)举办的暑期讨论会上,许多学者提出了利用载机运动的方式,可实现雷达的真实天线综合大尺寸的线性天线阵列的新概念,即合成孔径的概念。会上还制定了合成孔径雷达的发展计划,该计划促使了第一个合成孔径雷达实验系统的诞生。

在 50 年代中后期,合成孔径雷达成像只能运用模拟电子处理器来进行,因此大容量信号的存储和处理成为实现合成孔径原理的关键。美国密歇根大学雷达和光学实验室的科学家发现了可将雷达数据记录在胶片上,并利用透镜组完成合成孔径信号处理的方法。1957 年 8 月,他们研制的合成孔径雷达进行了飞行试验,并获得了第一张全聚焦合成孔径雷达图像,这一成果宣告了合成孔径雷

达技术成功地从理论走向实践。此后,合成孔径雷达被应用到很多民用领域,如测绘地形图、海洋学以及冰川等研究领域。

到70年代,电子技术,特别是大规模集成电路的飞速发展,使得合成孔径雷达的数字成像处理成为可能。由于数字成像系统具有数据处理灵活、便于误差校正、可实时处理的优点,数字成像处理逐渐成为合成孔径雷达处理器的主流。随着大容量合成孔径雷达信号存储和处理问题的解决,人们就可以将雷达安装在卫星上对地面进行大面积成像。1978年6月,美国国家航空航天局(NASA)发射了装载有合成孔径雷达系统的 Seasat-A,开创了星载合成孔径雷达的历史。Seasat-A 为 L 波段、固定入射角、4 视 23m 分辨率和 HH 极化。它的任务是论证海洋动力学测量的可靠性,在其短短的三个月工作时间内向地面传回了有关陆地、海洋和冰面的图像数据。

在 Seasat-A 取得重大成功之后,美国 NASA 利用航天飞机分别于 1981 年 11 月、1984 年 10 月和 1994 年 4 月将 SIR-A、SIR-B 和 SIR-C/X-SAR 送上了太空。SIR-A 与 SIR-B 功能都与 Seasat-A 相类似,不同的是 SIR-B 具有可改变天线指向的功能并增加了区域重复观测的频率。SIR-C/X-SAR 引入了很多新技术,它具有 L、C 和 X 三个波段,较大的波束角扫描范围,并在 L 和 C 两个波段中可获得全极化的图像。

同一时期,加拿大、日本、欧洲空间局(ESA)和俄罗斯也都先后成功地发射了自己的合成孔径雷达卫星。苏联于 1991 年 3 月发射了 Almaz-1,它工作在 S 波段,可变视角,拥有 2 视 15m 的分辨率;日本于 1992 年 2 月发射了 JERS-1,工作在 L 波段,固定视角且分辨率为 4 视 30m;欧洲空间局分别于 1991 年 7 月和 1995 年 4 月发射了地球遥感卫星 ERS-1 和 ERS-2,该合成孔径雷达系统采用 C 波段,3 视 25m 的分辨率,并有全系统校准能力,提高了图像质量;加拿大也于 1995 年 11 月发射了 Radarsat-1,工作在 C 波段,多模式,可变视角且有 4 视 28m 分辨率,同时该系统可通过扫描工作模式(ScanSAR)获得较大的测绘带宽,2007 年 12 月又发射了 Radarsat-2,分辨率可达到 3m。各国在星载合成孔径雷达上的大力投入标志着合成孔径雷达的发展进入了太空领域。

美国著名的长曲棍球(Lacrosse1)军事侦察卫星由航天飞机于 1988 年 12 月发射入轨,轨道倾角 57° ,近地点 680km,主要用于小范围高分辨率成像,可以精确获得局部战场重要的信息,聚束成像模式方位分辨率能达到 1m;后来,美国又先后于 1991 年、1997 年、2000 年和 2005 年发射了四颗军用合成孔径雷达卫星(Lacrosse2&3&4&5),这些星载合成孔径雷达具有双侧视功能,每天绕地球 12~14 周,能够实现 0.3m 分辨率的全球侦察,并能发现隐藏在森林中的坦克和地空导弹。在 2003 年伊拉克战争中美军使用了 Lacrosse2&3&4,每颗卫星每天经过

伊拉克上空两次,为美军获取了大量的军事情报。

由德国宇航中心(DLR)和 BMBF 联合实施研制的 TerraSAR-1 是由两颗分别工作在 X 波段和 L 波段的合成孔径雷达卫星组成的双星星座,分别于 2005 年 6 月和 2006 年 3 月发射,选用太阳同步轨道,轨道高度 514km,每天绕地球 15 周,它的聚束模式可以获得 $10\text{km} \times 5\text{km}$ 区域上的 $(1.5\text{m} \sim 3.5\text{m}) \times 1\text{m}$ 的高分辨率图像。同时与英国合作研制的 TerraSAR-2 分辨率可达 1m。

德国于 2006 年 12 月发射的军用合成孔径雷达卫星系统 SAR-lupe,采用五颗卫星组成星座系统,通过姿态控制实现可变视角功能和聚束工作模式,其聚束模式分辨率优于 1m。

意大利空间局和法国合作研制的 Cosmos-Skymed 小卫星星座于 2007 年 6 月发射,该系统聚束模式分辨率为 1m,主要用于对地中海地区进行环境监测、灾害监视和军事侦察任务。

德国于 2010 年 6 月发射了 TanDEM-X,由四颗 X 波段 SAR 卫星组成,与 TerraSAR 编队飞行,执行绘制全球最精确的 3D 地图任务,精度优于 2m。

中国科学院电子学研究所于 1976 年率先开展了合成孔径雷达技术研究,并于 1979 年成功研制机载合成孔径雷达样机和光学处理器,获得了第一批合成孔径雷达图像。随后在 1983 年成功研制了单通道,HH 极化,单侧视机载合成孔径雷达系统。1987 年成功研制了机载多条带、多极化、双侧视,可变视角机载合成孔径雷达系统,并开始了雷达信号数字存储和处理技术的研究。1990 年成功研制了机载合成孔径雷达实时数字成像处理器,获得了我国第一批实时数字成像处理的机载合成孔径雷达图像。1998 年成功研制了星载合成孔径雷达系统样机,2001 年成功研制星载多频段、多极化、多模式星载合成孔径雷达演示样机。

随着 ADC、FPGA 和 DDS 芯片等超大规模集成电路的发展,以阵列信号处理理论为基础的数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)技术在合成孔径雷达领域不断得到应用。数字阵列合成孔径雷达收发波束通过使用 DBF 技术,可显著增大空时自由度,大大提高合成孔径雷达的成像性能,同时获得极好的抗干扰性能。2006 年德国学者通过地面试验系统进行了 DBF-SAR 系统试验,比较了传统单发单收 SAR 与方位向 DBF-SAR 的成像结果,同时指出 DBF-SAR 系统通道不平衡所带来的影响,估计相位误差并进行补偿,验证了 DBF 的性能。2008 年,德国学者 Krieger 结合数字 T/R 组件技术,引入多维波形编码,提出收发 DBF-SAR 系统,利用发射 DBF 技术发射多波束,同时使用接收 DBF 技术处理回波,形成了收发 DBF 的脉内波束指向(Intra-pulse Beam Steering)模式。距离向 DBF 技术使用自适应波束形成算法还可以解决地面高度变化对 DBF-SAR 的

影响。另外,德国学者 Klare 等也利用收发数字波束形成,研究了试验系统 AR-TINO (Airborne Radar for Three-dimensional Image and Nadir Observation),该系统基于 SAR 和垂直航迹稀疏多发多收 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 天线原理实现三维成像。

近年来基于 MIMO 技术的合成孔径雷达受到广泛的关注,2007 年德国学者 Ender 提出了 MIMO-SAR 系统的概念。MIMO-SAR 可以看做是 MIMO 技术在 SAR 上的应用,是 MIMO 体制与合成孔径雷达相结合后的多功能雷达。如果使用的是分布式 SAR,不同卫星发射不同正交信号,那么分布式 MIMO-SAR 可看做分布式 MIMO 雷达。如果将某一 SAR 平台天线分割成多个子孔径,不同子孔径发射不同信号,那么该 MIMO-SAR 系统可看做紧凑式 MIMO 雷达。

国外最早开始 MIMO-SAR 方面的研究,提出了发射正负线性调频信号的多发多收系统,该系统使用两孔径天线同时发射正负线性调频信号,对接收回波使用相应的匹配滤波器分离信号。Kim 在 2007 年首次提出将 Alamouti 空时编码应用在 MIMO-SAR 上,空时编码技术在抑制干扰方面具有较好的优势,利用时间维的冗余信息,理论上可以解决多发射信号之间的干扰问题,Krieger 将 DBF 应用于 MIMO-SAR,提出多维波形编码的概念。

2013 年,中国科学院吴一戎院士提出了多维度 SAR 的概念,就是在一定约束条件下,以 SAR 的基本观测方式在极化、频率、角度和时相空间中的至少两个空间内,分别获得多个观测量集合的联合观测技术手段。多维度 SAR 通过信号与信息综合处理,有可能更准确地区分被观测对象的不同散射机理,进而更准确地获得其几何和物理特征。可以预见,在一定约束条件下,获取极化、频率、角度和时相空间中多个空间的联合观测量,是未来 SAR 成像技术及其应用发展的重要趋势。

干涉极化、层析 (Tomography)、动目标检测、数字波束形成,这些从多方面表现出了合成孔径雷达发展的方向。未来合成孔径雷达系统主要基于软件,系统最核心的技术是高度一体化的信号处理技术,它能处理控制信号和实时接收的数据。因此基于软件的合成孔径雷达可以认为是一部高度自动化的雷达。

1.1.3 SAR 成像原理

SAR 成像实际上就是从雷达回波信号中提取地面目标的后向散射系数 σ 的二维分布。假如用 r 表示距离向位置, x 表示方位向位置, $\sigma(x, r)$ 表示目标的后向散射系数 σ 的二维分布, $\hat{\sigma}(x, r)$ 表示雷达图像,那么 SAR 的成像原理可以用回波产生和成像处理两个过程来描述,如图 1.5 所示。

图 1.5(a) 描述了雷达回波信号产生的过程,即可以把雷达接收的回波信号

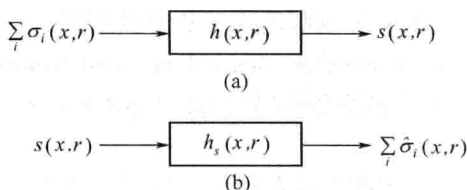


图 1.5 SAR 成像原理图

看成是地面目标的后向散射系数通过二维线性系统。雷达接收的回波信号可表示为

$$s(x, r) = \sigma(x, r) \otimes h(x, r) \quad (1.4)$$

式中： $\otimes$ 为二维卷积。在一定的条件下，距离向时间的“快”变化与方位向时间的“慢”变化可以分开考虑，这样系统的冲击响应函数 $h(x, r)$ 可以分解成方位向和距离向冲击响应的卷积，即

$$h(x, r) = h_a(x, r) \otimes h_r(x, r) \quad (1.5)$$

图 1.5(b)描述了 SAR 成像处理过程，可以看做是求解 $\sigma(x, r)$ 的过程，则整个 SAR 处理过程可以看做二维解卷积的过程。雷达图像可表示为

$$\hat{\sigma}(x, r) = s(x, r) \otimes h_s(x, r) \quad (1.6)$$

式中： $\otimes$ 为二维卷积。

综上所述，SAR 成像可用图 1.6 所示的模型描述。

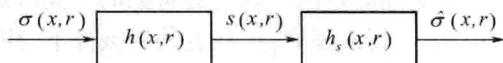


图 1.6 SAR 成像模型

在 SAR 成像处理中通常采用匹配滤波技术来完成二维解卷积。但是不可分离的二维处理过程计算量大，存储量大，不能满足实时处理的要求。通常考虑将二维处理过程分解为两个一维处理过程，这种方法称为可分离的二维处理。但是可分离的处理方法基于的前提是：SAR 回波信号在距离向和方位向满足解耦的条件。在通常的情况下，距离向信号是时间的快变化函数，方位向信号为时间的慢变化函数，两者的变化快慢程度相差 $10^4 \sim 10^5$ 数量级，因此 $h_s(x, r)$ 可以分解为一维系统 $h_a^{-1}(x, r)$ 和 $h_r^{-1}(x, r)$ 的级联。但在星载 SAR 情况下，由于距离徙动(Range Migration)影响的增加，式(1.5)中的 $h_a(x, r)$ 不再是一维的函数，而是二维函数，所以在进行方位压缩之前，必须先进行距离徙动校正，使它满足一维处理的条件。

距离徙动是星载合成孔径雷达成像中的一个重要概念，它是指在一个合成