



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书
航天科学与工程专著系列

Radar Imaging Technology
雷达成像技术

刘永坦 著



国家出版基金资助项目 · “十二五”国家重点图书
航天科学与工程专著系列

Radar Imaging Technology
雷达成像技术

刘永坦 著

 哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书系统地阐述了合成孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR)二维成像的基本理论与技术、信号处理技术、系统总体技术、系统实现及应用,为进一步研究成像雷达奠定较坚实的基础,全书共九章,前两章集中介绍成像雷达的概念及成像雷达的基本理论,第3章至第6章为合成孔径雷达(SAR)部分,第7章至第9章为逆合成孔径雷达(ISAR)部分。

本书可以作为高等学校电子信息工程专业本科生及信息与通信工程学科研究生的教学用书,还可供从事成像雷达技术研究的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

雷达成像技术/刘永坦著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.3

(航空航天精品系列图书)

ISBN 978-7-5603-4032-6

I. ①雷… II. ①刘… III. ①雷达成像—高等学校—教材 IV. ①TN957.52



中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 052409 号

责任编辑 甄森森

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 22 字数 560 千字

版 次 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4032-6

定 价 49.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

近年来,雷达成像技术及其应用得到持续发展。作为有源系统,成像雷达具有全天候、全天时工作能力,可在不同频段、不同极化下得到目标的高分辨率图像,为人们提供各种有用信息。成像雷达首先在军事应用上显示出优势,随着遥感技术的发展,它又很快作为微波遥感的重要工具,广泛应用于国民经济的各个领域,如地形测绘、地质研究、防灾减灾、农林及海洋监视等方面。

全书共分九章。第 1 章绪论,介绍成像雷达分类、发展现状及应用;第 2 章介绍成像雷达的基本理论,包括提高距离分辨率和方位分辨率的原理、逆合成孔径雷达(ISAR)成像运动补偿和成像算法,以及合成孔径雷达(SAR)成像基本方法等;第 3 章重点介绍合成孔径雷达成像原理与算法;第 4 章论述 SAR 系统的总体设计,包括各种雷达参数的选择;第 5 章介绍星载 SAR 系统,并给出星载 SAR 地面仿真系统的构成及星载 SAR 目标仿真模型;第 6 章介绍干涉 SAR 成像的基本原理和方法;第 7 章至第 9 章是 ISAR 部分,其中第 7 章系统地论述 ISAR 运动补偿的原理,并给出运动补偿的几种方法;第 8 章重点介绍机动目标 ISAR 成像的原理与方法;第 9 章论述 ISAR 系统补偿的原理及方法。

本书第 3 章成像算法和第 4 章系统的总体设计中的部分内容均参考了已发表的有关 SAR 成像方法与理论方面的文献。第 5 章中星载 SAR 地面仿真系统的设计,第 6 章、第 7 章、第 8 章与第 9 章中大部分内容均来自本单位从事 SAR 和 ISAR 系统研究工作的成果。

本书由哈尔滨工业大学刘永坦教授著,姜义成、王勇、张云参与了本书的撰写工作。同时感谢许荣庆、赵淑清、王国林等对本书撰写所做的工作和支持。

本书可作为高等学校电子信息类本科生以及信息与通信工程相关学科研究生的教学用书,还可供从事成像雷达技术研究的科技工作者参考。由于作者水平有限,书中难免还存在一些缺点和不足之处,殷切希望读者批评指正。

作者

2014 年 2 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 成像雷达的分类	2
1.3 成像雷达的发展及现状	7
1.3.1 合成孔径雷达	8
1.3.2 逆合成孔径雷达	13
1.4 成像雷达的应用	16
第 2 章 雷达成像基本原理	22
2.1 引 言	22
2.2 提高角度分辨率原理	23
2.3 一维距离像原理	24
2.3.1 一维距离像的特性分析	24
2.3.2 散射点距离移动	26
2.4 ISAR 成像原理	28
2.4.1 ISAR 成像的基本原理	28
2.4.2 ISAR 运动补偿	30
2.4.3 ISAR 成像算法	30
2.4.4 机动飞行目标 ISAR 信号处理	31
2.5 SAR 成像原理	31
2.5.1 SAR 成像基本几何模型	31
2.5.2 非聚焦合成孔径角分辨	32
2.5.3 聚焦合成孔径角分辨	33
2.5.4 SAR 高角分辨率的多普勒分析	34
2.6 混合 SAR - ISAR 成像原理	36
第 3 章 SAR 成像算法	38
3.1 距离 - 多普勒算法	38
3.1.1 成像算法概述	40
3.1.2 距离徙动和聚焦深度	44
3.1.3 距离压缩处理	45

3.1.4	时域距离徙动补偿·····	47
3.1.5	频率域方位处理与二次距离压缩·····	49
3.2	成像辅助处理·····	54
3.2.1	纹斑噪声与多视处理·····	54
3.2.2	杂波锁定与自动聚焦·····	58
3.2.3	时频分析方法估计多普勒参数·····	60
3.2.4	解多普勒中心频率方位模糊·····	64
3.3	其他成像的处理算法·····	66
3.3.1	极坐标处理算法·····	66
3.3.2	波方程算法·····	71
3.3.3	Chirp Scaling 成像算法·····	74
第4章	星载 SAR 系统总体设计 ·····	79
4.1	轨道选择·····	79
4.1.1	基本考虑·····	79
4.1.2	重复轨道·····	79
4.1.3	漂移轨道·····	80
4.2	脉冲响应(IRF)特性·····	80
4.2.1	脉冲响应函数·····	80
4.2.2	峰值旁瓣比(PSLR)·····	82
4.2.3	虚假旁瓣比(SSLR)·····	83
4.2.4	积分旁瓣比(ISLR)·····	83
4.3	距离分辨与信号带宽·····	83
4.4	方位分辨与天线·····	84
4.5	模糊特性·····	85
4.5.1	方位模糊比·····	85
4.5.2	距离模糊比·····	86
4.6	测绘带与脉冲重复频率·····	88
4.7	数据格式和数据率·····	91
4.7.1	数据格式·····	91
4.7.2	数据率计算·····	93
4.8	辐射分辨率·····	93
4.9	辐射稳定性和动态范围·····	94
4.10	天线波束综合·····	94
4.11	SAR 雷达方程·····	95

4.11.1	点目标雷达方程	95
4.11.2	分布目标雷达方程	96
第 5 章	星载 SAR 系统	98
5.1	雷达系统	98
5.1.1	定时与控制子系统	99
5.1.2	射频子系统	101
5.1.3	高功放子系统	103
5.1.4	天线子系统	104
5.1.5	数据子系统	106
5.1.6	电源子系统	108
5.2	数据下传与数据压缩	108
5.2.1	卫星平台与数据下传	109
5.2.2	数据压缩与分块浮点量化	110
5.3	星载 SAR 地面系统	113
5.3.1	地面接收站	113
5.3.2	信号处理考虑	115
5.3.3	数据备档及管理	121
5.4	星载 SAR 地面仿真系统	123
5.4.1	仿真目的与仿真系统构成	123
5.4.2	仿真系统工作原理	124
5.4.3	星载 SAR 目标仿真模型	133
5.4.4	信号仿真与处理	135
第 6 章	干涉 SAR 成像原理与算法	146
6.1	InSAR 基本原理	146
6.1.1	InSAR 测量原理	146
6.1.2	InSAR 测量中的平地效应	148
6.1.3	影响 InSAR 相干性的各种因素	148
6.2	干涉图的仿真	149
6.3	InSAR 干涉图的处理	153
6.3.1	干涉图像的配准	156
6.3.2	干涉平地效应的去除	160
6.3.3	干涉图的滤波	161
6.4	干涉图的二维相位解缠	166
6.4.1	一维相位解缠基本原理	166

6.4.2	二维相位解缠基本原理	167
6.4.3	基于匈牙利算法的二维相位解缠	170
6.4.4	最小二乘相位解缠法	172
6.4.5	相位解缠结果的验证	176
第7章	ISAR 信号处理	181
7.1	引言	181
7.2	ISAR 目标回波信号形式	182
7.2.1	阶跃跳频的情形	184
7.2.2	用于距离压缩的信号波形	185
7.2.3	Chirp 信号的 STRETCH 处理	185
7.2.4	ISAR 图像散焦的原因	186
7.3	互相关运动的补偿方法	187
7.3.1	互相关运动补偿距离和相位对准原理	188
7.3.2	互相关快速运动的补偿方法	189
7.3.3	两种相位对准方法的比较	191
7.3.4	成像结果	192
7.3.5	各种不理想因素对运动补偿精度的影响	193
7.4	运动补偿的精度要求及补偿误差的影响	195
7.4.1	运动补偿误差及其影响	195
7.4.2	互相关快速运动补偿方法的误差特性	197
7.4.3	方位向抽选及其对补偿误差的影响	199
7.5	积累互相关运动的补偿方法	200
7.5.1	积累互相关运动补偿原理	201
7.5.2	积累互相关运动补偿方法的误差特性	204
7.5.3	最佳积累脉冲数的确定	207
7.6	限幅互相关运动的补偿方法	208
7.6.1	限幅互相关运动的补偿原理	208
7.6.2	自适应限幅门限的选取	210
7.6.3	动态范围压缩的积累互相关运动补偿算法	211
7.7	优化运动补偿的方法	212
7.8	ISAR 成像算法	213
7.8.1	FFT 重建算法	213
7.8.2	旋转距离走动	214
7.8.3	极坐标格式重建算法	215

7.8.4	超分辨成像处理算法	217
第 8 章	机动目标 ISAR 成像算法	224
8.1	基于距离-多普勒方法的实测数据 ISAR 成像及分析	225
8.2	机动目标 ISAR 成像原理与方法	227
8.3	基于信号分解的机动目标 ISAR 成像方法	230
8.3.1	信号分解原理	231
8.3.2	自适应 Chirplet 分解的优化方法	231
8.3.3	基于自适应 Chirplet 分解的 ISAR 成像方法	233
8.3.4	修正自适应 Chirplet 分解法及其应用	236
8.3.5	修正自适应 Chirplet 分解的快速算法	240
8.3.6	基于修正自适应 Chirplet 分解的机动目标 ISAR 成像 ..	244
8.4	基于时频分布的机动目标 ISAR 成像方法	246
8.4.1	线性时频分布	246
8.4.2	双线性时频分布	247
8.4.3	基于重排时频分布的机动目标 ISAR 成像	249
8.5	机动目标 ISAR 成像的超分辨方法	251
8.5.1	基于 RELAX 技术的超分辨方法	251
8.5.2	基于 APES 技术的超分辨方法	252
8.5.3	实测数据超分辨 ISAR 成像结果	254
8.6	舰船目标 ISAR 成像算法	255
8.6.1	舰船运动及回波模型	255
8.6.2	目标三维转动分析	258
8.6.3	基于图像处理的舰船目标运动估计	265
8.6.4	外场实测数据舰船目标成像结果	273
第 9 章	ISAR 系统设计及补偿	275
9.1	引 言	275
9.2	ISAR 系统	276
9.2.1	实验 ISAR 的技术指标	277
9.2.2	实验 ISAR 宽带系统	279
9.3	实验 ISAR 模拟信号源	280
9.3.1	概述	280
9.3.2	模拟信号源的技术难点	281
9.3.3	模拟信号源的系统构成	282
9.4	二次距离压缩	283

9.5 ISAR 作用距离	287
9.6 ISAR 系统补偿	289
9.6.1 驻定相位原理	290
9.6.2 成对回波理论	293
9.6.3 失真的分类及其影响	296
9.6.4 I/Q 正交不一致性与其他失真的分离	305
9.6.5 宽带系统失真的相互分离	308
9.6.6 系统失真的补偿方法	313
9.6.7 各种系统失真的测试与补偿结果	316
参考文献	323
名词索引	339

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

雷达是 20 世纪 30 年代由于二战中的军事需求发展起来的,最初用于跟踪恶劣天气及黑夜中的飞机和舰船,然而图像上仅仅是一个亮点。为更好地发挥雷达的作用,人们一直在努力寻求提高分辨率的新方法。信息论在雷达领域中的应用和宽带微波技术及现代信号处理的不断发展,以及全息成像理论的完善,导致了各种形式的高分辨率成像雷达的诞生和发展。这使得人们真的在雷达屏幕上看到了目标的图像,实现了人们最初的愿望。

成像雷达的出现扩展了原始的雷达(Radar=Radio detection and ranging)概念,使它具有对运动目标(飞机、导弹等)、区域目标(地面等)进行成像和识别的能力,并在微波遥感应用方面表现出越来越大的潜力,为人们提供越来越多的有用信息。它对国防技术现代化、国民经济建设具有十分重要的意义。因此成像雷达技术越来越受到国际上技术先进国家的重视,是竞争激烈、发展迅速的技术领域。现在不仅已有各种实孔径成像雷达,而且已有各种地载、机载、星载雷达,及双基、多基雷达等用于不同目的的合成孔径雷达。

作为有源系统,成像雷达不是像光学成像系统(无源)那样利用目标对阳光的反射信息成像,而是主动向目标发射电磁波(微波范围,从分米波到毫米波),利用接收由目标反射回来的信号进行成像。因此成像雷达具有全天时工作的能力。另外,无论是云、雾或雨对微波都无严重影响,因此,它又可以全天候工作。

可以认为,雷达成像的基本原理是采用各种方法提高雷达的诸维分辨率,使其分辨单元的尺寸与被成像的目标尺寸相比小得多,从而可得到目标不同部位的信息,以构成雷达图像。一般情况下,成像雷达是利用发射宽带信号来获得高的径向(即距离向)分辨率,利用雷达大的实孔径天线或雷达与目标的相对运动等效的极大孔径来获得高的方位向(或俯仰向)分辨率,从而获得高分辨的目标像。这时的成像雷达系统在径向表现为带通特性,而在方位向则表现为低通特性。由此造成雷达所成的目标像与普通光学像有一定的差别。

成像雷达与常规雷达相比在系统构成上有其自身的特点。像常规雷达一

样,成像雷达也有天线子系统、射频子系统(发、收和频综)、控制子系统、信号处理子系统、跟踪子系统(跟踪雷达)和显示子系统。除此之外,对于空载成像雷达,根据需要还会有数据管理子系统、数据下传子系统和地面站子系统等。成像雷达最大的特点是数据率高、数据量大、信号处理(含辅助数据处理和成像处理)复杂、处理的实时性很难保证。目前,随着大容量、高速并行计算机技术的迅速发展,雷达信号处理实时性问题的研究获得了很大的进展。在几个技术先进的国家,已在某些成像雷达信号处理速度方面实现了实时性。当然,如果要求更高的图像质量和某些信息的提取,则会要求更高的实时性。

1.2 成像雷达的分类

成像雷达的种类繁多,大体上可以分为三大类,即实孔径成像雷达、合成孔径成像雷达和两者兼有的成像雷达。前两种类型的成像雷达获得高距离向分辨率的方法是一致的,通常是靠发射宽带信号,接收时采用各种脉冲压缩技术。在获得方位向(或俯仰向)分辨率的方法上,实孔径成像是通过实际天线的波束宽度来获得角分辨的(有人称此为无线电摄像机),而合成孔径成像则是利用雷达与目标之间的相对运动所产生的目标上两个相邻位置点之间的多普勒频移增量(也可以称等效孔径)来实现高的角分辨率的。第三种类型的成像雷达除利用合成孔径原理获得某一角度维高分辨外,还利用实天线孔径获得距离(如微波全息成像)或另一角度维(如雷达干涉仪成像)的高分辨信息。

为了使我们成像雷达有一个宏观的了解,图 1.1 给出了各种成像雷达的基本分类。

事实上,由于成像目的及出发点的不同,且不同研究人员会根据自己的理解和意愿给出各自的分类形式,所以对成像雷达有多种分类方法。图 1.1 中的分类方法完全出于我们的理解及为本书后续讨论成像原理过程中的统一表述而得出的分类方法,简要介绍如下。

实孔径(阵列)成像雷达

该雷达早已被人们认识和熟悉,该雷达根据天线各阵元或反射面各点发射或接收信号的相干叠加成窄波束,其距离分辨率取决于雷达信号的带宽,而横向分辨率取决于该雷达的工作波长、天线孔径和目标距离,且随目标距离的增加,横向距离分辨率逐渐变差。实孔径(阵列)成像雷达的横向分辨率十分有限,难以观测目标的精细结构,且为了提高横向分辨率而增加实孔径是十分困难的,不仅制造成本增加且工艺复杂难于实现,因此方位向的测绘范围受到实孔径的限制。

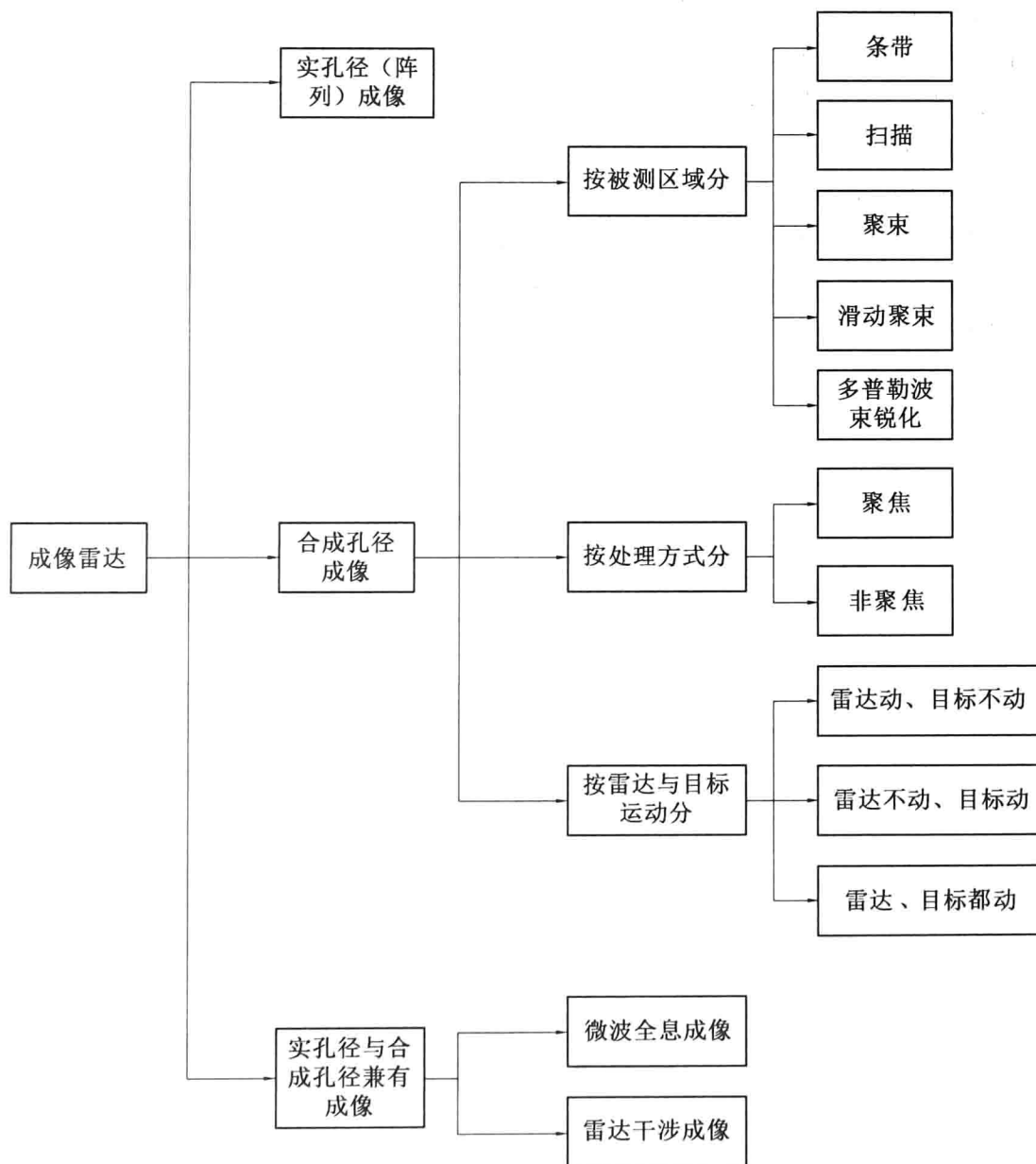


图 1.1 成像雷达分类

合成孔径成像雷达

与实孔径成像雷达相比有很多优点,因此合成孔径雷达发展非常迅速,且随着合成孔径原理的不断推广,各种不同功能、不同形式和不同用处的新体制合成孔径雷达层出不穷。例如,按被测绘区域划分,有条带测绘成像、扫描成像、聚束照射(或定点)成像、滑动聚束成像和多普勒波束锐化;按信号处理方式划分,有聚焦和非聚焦两种;而按雷达与目标之间的相对运动情况可分为雷达动、目标不动的成像,雷达不动、目标动的成像和雷达、目标都动的成像三种。

条带合成孔径雷达(Stripmap SAR):一般是指随着雷达平台的移动,天线保持不变,对与雷达飞行方向平行的条带(通常是地面)成像,条带宽度在数公里至百公里左右(根据雷达载体不同和需要而定),而目前一次成像的条带长可达数十公里或数百公里,如图 1.2 所示。该模式对于地面的条带成像,其条带的长度仅取决于雷达移动的距离,而方位向的分辨率由天线的长度决定。对于条带式成像模式来讲,可采用正侧视或者斜侧视。正侧视是指雷达天线波束指向与雷达运动方向垂直,斜侧视指雷达天线波束指向与雷达运动方向有一个小于 90° 的夹角。

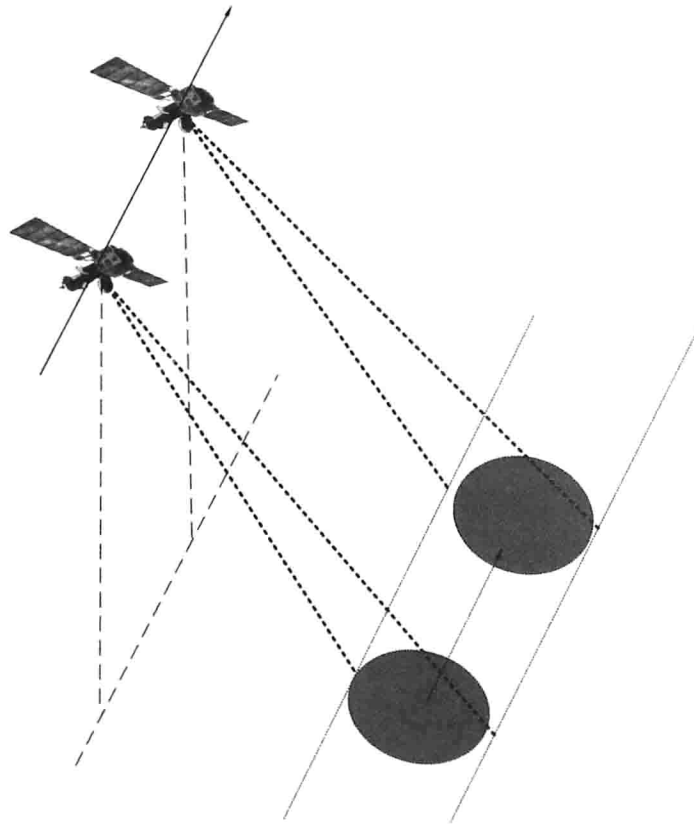


图 1.2 条带 SAR 成像示意图

扫描合成孔径雷达(Scan SAR):这种成像模式的主要特点在于,在一个合成孔径时间内,天线会沿着距离向进行多次扫描,如图 1.3 所示。通过这种方式成像是以牺牲横向分辨率为代价,实现超宽带测绘带成像。ScanSAR 成像过程中,多个子波束切换次序及波束照射地面位置,其总测绘带宽度等于各自测绘带宽度和。且粗略分析可知,总测绘带宽度的增加倍数等于横向分辨率的下降倍数。因此,扫描模式能够获取的最佳方位分辨率等于条带模式下的方位分辨率与测绘带条数的乘积。

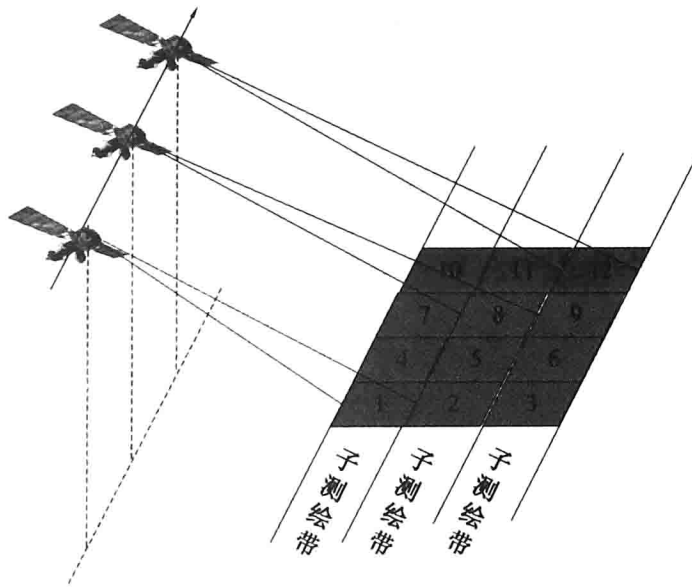


图 1.3 扫描 SAR 成像示意图

聚束合成孔径雷达(Spotlight SAR): 通过扩大地面感兴趣区域的天线照射角度,可以提高条带模式的分辨率,其照射区域小于实孔径天线波束照射区域,如图 1.4 所示。在采集成像回波信号时间内,要保证雷达的波束始终照射被成像区域,一般通过控制天线波束指向,使其随着雷达飞过照射区域而逐渐调整来实现。因此,该模式成像雷达的横向(方位和/或俯仰向)分辨率是利用目标上横向相邻散射点的多普勒历史(或增量)差别获得的,与条带式合成孔径雷达相比,具有较高的方位分辨率。

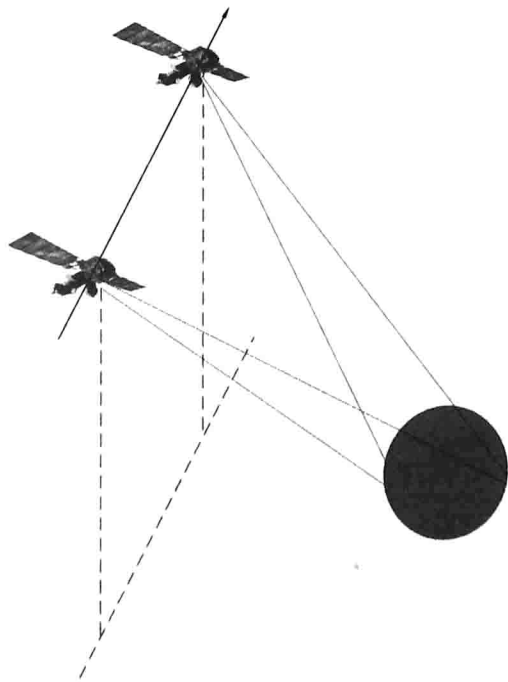


图 1.4 聚束 SAR 成像示意图

滑动聚束合成孔径雷达(Sliding Spotlight SAR):该模式介于条带模式与聚束模式之间,雷达波束在地面成像区域的方位向上以低于雷达平台方位向移动速度的速度移动,其虚拟焦点距离成像区域的远近对方位向分辨率和成像区域的大小有很大影响,如图 1.5 所示。当虚拟焦点处于场景中心(即天线波束在地面的移动速度为零)时,雷达成像模式

为聚束式；当虚拟焦点处于无穷远（即天线波束在地面的移动速度为平台速度）时，雷达成像模式为条带式。当天线波束的速度介于零与平台速度之间时，对于同样尺寸的天线，滑动聚束 SAR 的方位向分辨率要高于条带 SAR，这主要是由于滑动聚束 SAR 方位向相干积累时间较长造成的。

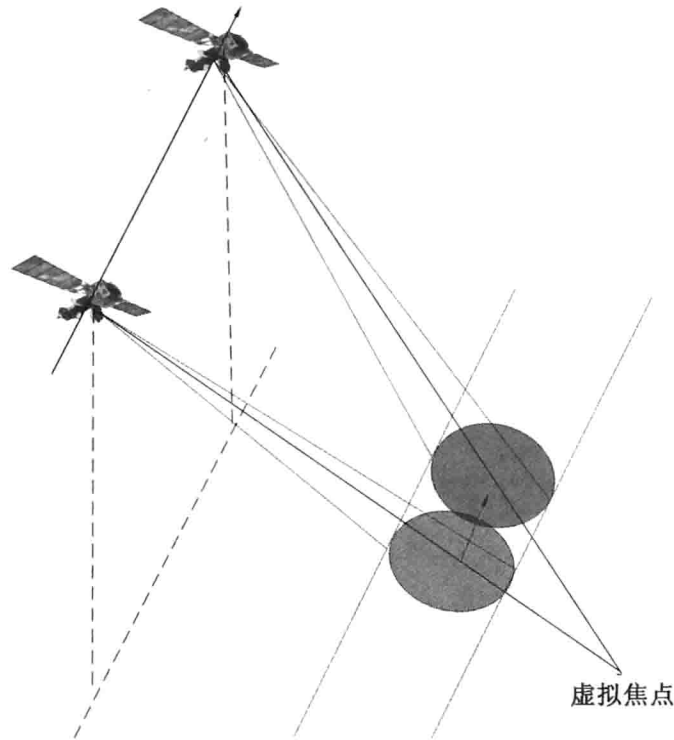


图 1.5 滑动聚束 SAR 成像示意图

多普勒波束锐化(Doppler beam sharpening):是指雷达的运动造成在同一距离分辨单元内不同方位上的散射点的多普勒频率不同,通过多普勒分析将同一波束内的回波按方位不同分成一组“多普勒波束”,而将原波束宽度和“多普勒波束”宽度的比值称为“锐化比”,且利用多普勒滤波器组就可以实现方位上的高分辨。

聚焦成像与非聚焦成像:聚焦合成孔径是指以目标散射点为圆心、距离 R_0 为半径的圆弧,因此,在圆弧上任一点接收到的回波信号可以同相叠加获得高分辨率成像。实际雷达飞行线路并非圆弧而是直线,在成像处理时必须将直线孔径上的各点与圆弧孔径之间相位差补偿掉。通常将含有这种补偿的成像处理叫做聚焦处理,否则就称为非聚焦处理。显然,聚焦处理要比非聚焦处理的分辨率高得多。

雷达动、目标不动的成像雷达:是最普遍意义下的合成孔径雷达,有时人们为了与其他成像雷达相区别,通常将此种成像雷达称为合成孔径雷达(Synthetic

Aperture Radar, SAR),而给予其他形式或种类的成像雷达不同的名称。

雷达不动、目标动的成像雷达:通常被人们称为逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)。SAR 与 ISAR 虽然在原理上是相通的,但由于需要成像的目标不同,因此其成像处理的难点和复杂程度也不相同。SAR 一般是针对合作的固定目标(地球表面),相对容易一些。但由于 SAR 通常针对大面积成像,系统回波数据量较大,所以在信号处理方面较为复杂。ISAR 则一般针对非合作目标(如飞机、导弹等),相对与固定目标来讲较难成像,尤其在运动补偿方面更是如此。由于 ISAR 成像的目标比较小,故要求更高的分辨率。另外,ISAR 可以对单一目标成像,也可以对多目标成像。当同时对多目标进行 ISAR 成像时,其数据量同样会很大,其信号处理将会更加复杂。

雷达、目标都动的成像雷达:被称为混合 SAR-ISAR。机载雷达或星载雷达对运动目标(船或飞机)的成像就属于这一种成像方式。事实上,在地球范围内对离地球较近的行星成像的天文雷达也属于此类。

实孔径与合成孔径兼有成像雷达

这种雷达是成像雷达发展的一种必然产物。它同样受到人们的广泛关注,并具有潜在的应用价值。如微波全息(矩阵)雷达和合成孔径雷达干涉仪就属于此类。

微波全息(矩阵)雷达:是一种既含有合成孔径成像又有实孔径成像的雷达。这种雷达在方位向运用合成孔径原理获得高分辨;而在距离向则利用阵列天线获得的全息数据得到高分辨。因此,此种雷达不需要采用宽带发射信号,当然,它的作用距离也不可能太远。

合成孔径雷达干涉仪:是另一种既含有合成孔径成像又有实孔径成像的雷达。它的距离和方位维成像是普通的 SAR 成像过程,而目标的高度(俯仰)信息是利用两套天线接收信号相干涉(差拍)获得的,两套天线的连线和波束是与水平孔径几乎垂直。这种成像雷达实际上是三维成像雷达,主要用在地形测绘中。它的作用距离可以很远,如机载或星载方式工作。

1.3 成像雷达的发展及现状

合成孔径雷达在成像雷达中占有绝对重要的地位,有着广泛的应用前景和发展潜力,而逆合成孔径雷达是合成孔径雷达发展过程中的一个重要分支。因此,本节将重点回顾一下这两种一脉相承的成像雷达的发展历程及现状。