

雷达成像技术

刘永坦 等著



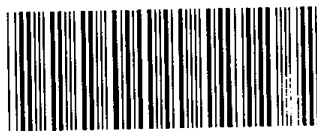
哈尔滨工业大学出版社

7405
L 6

465483

雷达成像技术

刘永坦 等著



00465483

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

本书系统地阐述了星载合成孔径雷达(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,第三章至第六章为合成孔径雷达(SAR)部分,第七章至第九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以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。

雷 达 成 像 技 术

Leida Chengxiang Jishu

刘永坦 等著

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

黑龙江省教委印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 12.875 字数 333 千字

1999年10月第1版 1999年10月第1次印刷

印数 1~1000

ISBN 7-5603-1441-4/TN·50 定价: 28.00 元

如发现印、装质量问题,请与本厂质量科联系调换。
地址:哈尔滨市南岗区兴路147号 邮编:150080

前 言

成像雷达的出现扩展了原始的雷达概念，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。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几个技术先进国家的重视，是新出现的竞争激烈、发展迅速的应用技术领域。

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的信息。成像雷达首先在军事应用上显示出优势，随着遥感技术的蓬勃发展，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、农林及海洋监测等方面。

成像雷达的形式和种类较多，大部分成像雷达在原理上是相通的。本书将介绍目前发展最快、应用最广泛的星载合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, 简称 SAR)和陆基逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, 简称 ISAR), 重点介绍这两种成像雷达的二维成像基本理论与技术、信号处理技术、系统总体技术和系统实现等内容，为进一步研究成像雷达奠定较坚实的基础。

全书共分为九章。第一章绪论，介绍成像雷达的分类、发展现状及应用；第二章系统地论述成像雷达的基本理论；第三章至第六章为合成孔径雷达(SAR)部分，其中，第三章介绍若干种 SAR 成像算法；第四章介绍 SAR 的数据校准，包括辐射校准和几何校准；第五章论述 SAR 系统的总体设计，包括各种雷达参数的选择；第六章介绍星载 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；第七章至第九章是逆合成孔径雷达(ISAR)部分，其中，第七章系统地论述 ISAR 运动补偿的原理，并给出了运动

补偿的几种方法；第八章给出 ISAR 的系统构成及设计思想；第九章论述 ISAR 系统补偿的原理及方法。

本书第三章成像算法、第四章数据校准和第五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。第六章中星载 SAR 地面仿真系统的设计、第七章与第八章中的大部分内容均系我们从事 SAR 与 ISAR 系统研究工作的成果。

参加本书撰写工作的还有许荣庆教授、赵淑清教授、王国林副教授。曹鹏志博士、张劲林博士为本书绘制了大量的插图，在此表示诚挚的感谢。

本书可以作为高等学校电子信息工程专业本科生以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。由于作者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

作者

1999 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 成像雷达的分类	3
1.3 成像雷达的发展及现状	7
1.3.1 合成孔径雷达	7
1.3.2 逆合成孔径雷达	9
1.4 成像雷达的应用	11
参考文献	16
第二章 合成孔径雷达成像原理	20
2.1 提高角分辨率原理	20
2.2 SAR 成像原理	21
2.2.1 非聚焦合成孔径角分辨	21
2.2.2 聚焦合成孔径角分辨	23
2.2.3 合成孔径雷达高角分辨率的多普勒分析	24
2.2.4 几种常见合成孔径雷达成像原理简介	26
2.3 ISAR 成像原理	28
2.4 混合 SAR-ISAR 成像原理	31
参考文献	33
第三章 SAR 成像算法	36
3.1 距离-多普勒算法	36
3.1.1 数据坐标和系统冲激响应	37
3.1.2 成像算法概述	40
3.1.3 距离徙动和聚焦深度	46
3.1.4 距离压缩处理	49
3.1.5 时域距离徙动补偿	51

3.1.6	频率域方位处理与二次距离压缩.....	55
3.2	成像辅助处理.....	62
3.2.1	纹斑噪声与多视处理.....	62
3.2.2	杂波锁定与自动聚焦.....	68
3.2.3	时频分析方法估计多普勒参数.....	72
3.2.4	解多普勒中心频率方位模糊.....	76
3.3	其它成像的处理算法.....	80
3.3.1	极坐标处理算法.....	80
3.3.2	波方程算法.....	87
3.3.3	Chirp Scaling 成像算法.....	91
3.4	卫星轨道与多普勒参数.....	97
3.4.1	用卫星轨迹和目标位置表示的多普勒参数.....	97
3.4.2	由卫星轨道及姿态参数求解多普勒参数.....	101
3.4.3	多普勒参数的简化模型.....	110
	参考文献.....	113
第四章	SAR 数据校准.....	117
4.1	辐射校准.....	117
4.1.1	辐射校准常用的一些基本概念.....	118
4.1.2	校准误差源.....	120
4.1.3	辐射误差模型.....	123
4.1.4	辐射校准技术.....	125
4.1.5	辐射校准处理.....	134
4.2	几何校准.....	143
4.2.1	几何校准的基本概念.....	143
4.2.2	几何失真源.....	144
4.2.3	几何校正.....	151
4.2.4	图像重合.....	157
	参考文献.....	160
第五章	星载 SAR 系统总体设计.....	163

5.1 轨道选择	163
5.1.1 基本考虑	163
5.1.2 重复轨道	164
5.1.3 漂移轨道	164
5.2 脉冲响应(IRF)特性	166
5.2.1 脉冲响应函数	166
5.2.2 峰值旁瓣比(PSLR)	169
5.2.3 虚假旁瓣比(SSLR)	170
5.2.4 积分旁瓣比(ISLR)	170
5.3 距离分辨与信号带宽选择	171
5.4 方位分辨与天线长度选择	171
5.5 模糊特性	172
5.5.1 方位模糊比	174
5.5.2 距离模糊比	175
5.6 测绘带与脉冲重复频率选择	177
5.7 数据格式和数据率	182
5.7.1 数据格式	182
5.7.2 数据率计算	184
5.8 辐射分辨率	184
5.9 辐射稳定性	185
5.10 动态范围	186
5.11 天线波束综合	186
5.12 SAR 雷达方程	187
5.12.1 点目标雷达方程	187
5.12.2 分布目标雷达方程	189
参考文献	190
第六章 星载 SAR 系统	193
6.1 雷达系统	194
6.1.1 定时与控制子系统	195

6.1.2	射频子系统	197
6.1.3	高功放子系统	200
6.1.4	天线子系统	201
6.1.5	数据子系统	204
6.1.6	电源子系统	206
6.2	数据下传与数据压缩	206
6.2.1	卫星平台与数据下传	207
6.2.2	数据压缩与分块浮点量化	208
6.3	星载 SAR 地面系统	213
6.3.1	地面接收站	213
6.3.2	信号处理考虑	215
6.3.3	数据备档及管理	224
6.4	星载 SAR 地面仿真系统	226
6.4.1	仿真目的与仿真系统构成	226
6.4.2	仿真系统工作原理	227
6.4.3	星载 SAR 目标仿真模型	238
6.4.4	信号仿真与处理	242
	参考文献	256
第七章	ISAR 信号处理	258
7.1	引言	258
7.2	ISAR 目标回波信号形式	260
7.2.1	阶跃跳频的情形	263
7.2.2	用于距离压缩的信号波形	264
7.2.3	Chirp 信号的 STRETCH 处理	264
7.2.4	ISAR 图像散焦的原因	266
7.3	互相关运动的补偿方法	267
7.3.1	互相关运动补偿距离和相位对准原理	268
7.3.2	互相关快速运动的补偿方法	270
7.3.3	两种相位对准方法的比较	272

7.3.4	成像结果.....	274
7.3.5	各种不理想因素对运动补偿精度的影响.....	275
7.4	运动补偿的精度要求及补偿误差的影响.....	277
7.4.1	运动补偿误差及其影响.....	277
7.4.2	互相关快速运动补偿方法的误差特性.....	280
7.4.3	方位向抽选及其对补偿误差的影响.....	283
7.5	积累互相关运动的补偿方法.....	284
7.5.1	积累互相关运动补偿原理.....	286
7.5.2	积累互相关运动补偿方法的误差特性.....	290
7.5.3	最佳积累脉冲数的确定.....	294
7.6	限幅互相关运动的补偿方法.....	295
7.6.1	限幅互相关运动的补偿原理.....	295
7.6.2	自适应限幅门限的选取.....	299
7.6.3	动态范围压缩的积累互相关运动补偿算法.....	299
7.7	优化运动补偿的方法.....	301
7.8	ISAR 成像算法.....	302
7.8.1	FFT 重建算法.....	302
7.8.2	旋转距离走动.....	304
7.8.3	极坐标格式重建算法.....	305
7.8.4	超分辨成像处理算法.....	307
	参考文献.....	317
第八章	ISAR 系统构成及设计考虑.....	320
8.1	引言.....	320
8.2	ISAR 系统.....	322
8.2.1	实验 ISAR 的技术指标.....	323
8.2.2	实验 ISAR 宽带系统.....	326
8.3	实验 ISAR 模拟信号源.....	327
8.3.1	概述.....	327
8.3.2	模拟信号源的技术难点.....	328

8.3.3 模拟信号源的系统构成.....	329
8.4 二次距离压缩	331
8.5 ISAR 作用距离	337
参考文献.....	339
第九章 ISAR 系统补偿.....	341
9.1 引言.....	341
9.1.1 驻定相位原理	342
9.1.2 成对回波理论	346
9.2 系统建模.....	351
9.2.1 信号产生及变频	352
9.2.2 功率放大器	353
9.2.3 延时系统	353
9.2.4 高频放大系统.....	354
9.2.5 去斜率混频器	354
9.2.6 中频放大器	356
9.2.7 正交解调器	357
9.2.8 视频放大器	358
9.2.9 系统噪声	359
9.3 失真的分类及其影响.....	360
9.3.1 宽带系统失真	360
9.3.2 窄带系统失真	365
9.3.3 对失真类型及其影响的总结	368
9.3.4 STRETCH 处理系统中各种失真的移变特性	370
9.4 I, Q 正交不一致性与其它失真的分离.....	373
9.4.1 点目标测试方法	373
9.4.2 复杂目标测试方法.....	376
9.5 宽带系统失真的相互分离.....	378
9.6 系统失真的补偿方法.....	385
9.6.1 I, Q 幅度不平衡的补偿	386

9.6.2 I, Q 相位不平衡的补偿.....	386
9.6.3 宽带系统失真的补偿方法.....	387
9.7 各种系统失真的测试与补偿结果.....	390
参考文献	397

第一章 绪 论

1.1 引言

大概从雷达诞生起，人们就希望在雷达屏幕上看到目标的真实图像，而不仅仅是一个尖头脉冲或一个亮点。为了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，而且已有各种地基的、机载的、星载的和航天飞机载的用于不同目的的合成孔径成像雷达。

作为有源系统，成像雷达不是像光学成像系统(无源的)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)，利用接收来自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的影响,因此,它又可以全天候工作。

可以认为,雷达成像的根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(和/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(或高低向)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^[41-45]、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。

成像雷达的形式和种类比较多(参见下节),大部分成像雷达在原理上是相通的。本书将重点介绍目前发展最快、应用最广的星载合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, 简称 SAR)和陆基逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, 简称 ISAR),主要介绍这两种二维成像的基本理论与技术、信号处理技术、系统总体技术和系统实现等方面的内容,为进一步研究成像雷达奠定较坚实的基础。

1.2 成像雷达的分类

成像雷达有多种,但大体上可以把成像雷达分成三大类,即实孔径成像雷达、合成孔径成像雷达和二者兼有的成像雷达。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(和/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(也可以称等效的极大孔径)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。

为了使我们对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,对成像雷达的分类可以有多种分法,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,其分类可粗可细。上述分类完全出于我们的理解和为了在本书中有一个统一表述而作的分类。下面就分别作以简要介绍。

实孔径阵列成像雷达早已被人们认识和熟悉,它主要利用雷达实际天线(或天线阵)来获得高分辨。当然,它也存在着发展和改进的问题^[1,2],只不过发展速度不像合成孔径雷达那样快。

合成孔径成像雷达与实孔径成像雷达相比有许多优点,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。例如从被测绘区域分,有条带测绘成像、聚束照射(或定点)成像和多普勒锐化,而条带测绘成像又可分成正侧视和斜侧视方式;从信号处理方式分,有聚焦和非聚焦两种;从雷达与目标之间的相对运动分,有

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。

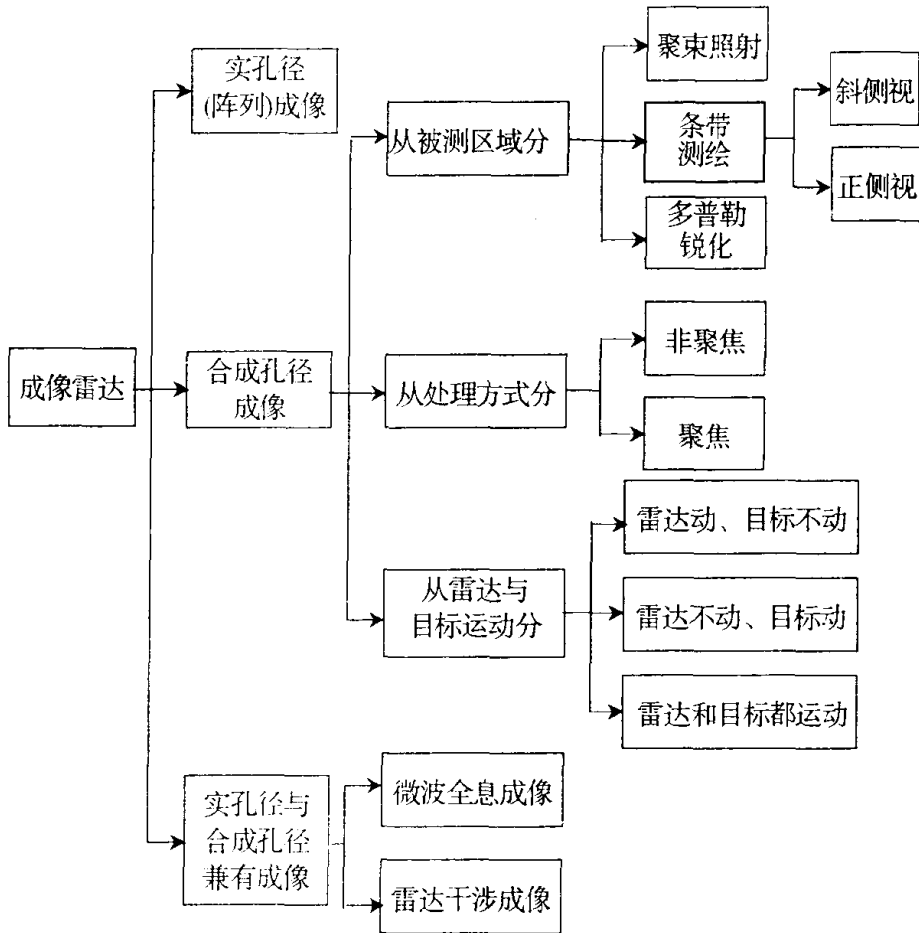


图 1-1 成像雷达分类

条带测绘的合成孔径雷达成像一般是指对与雷达飞行方向平行的条带(通常是地面)成像^[19,41]，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。随着雷达的运动，可以接收到被成像条带内的散射点沿雷达飞行方向(即方位向)的近似线性调频回波信号(通常此调频带宽比较大)，且沿雷达飞行方向相邻散射点虽然有近似相同调频参数的回

波信号, 但有不同的起止时间, 因此, 可利用方位向脉冲压缩技术获得相邻点方位向的高分辨。这种条带成像可采用正侧视方式, 也可采用斜侧视方式。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。

聚束照射(Spotlight)又称定点成像^[19,42], 其被成像区域小于实孔径天线波束照射的区域。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。同样, 它的横向(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。这种 SAR 可以获得很高的分辨率。

多普勒锐化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, 利用多普勒滤波器组就可以实现方位上的高分辨^[19,41]。

聚焦和非聚焦合成孔径处理的差别可以用图 1-2 来说明。聚焦

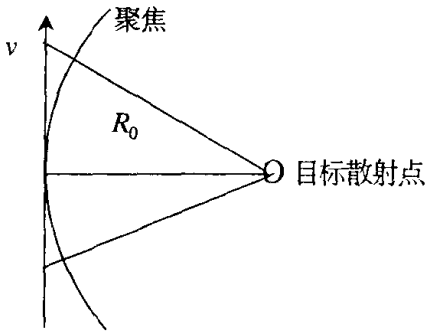


图 1-2 聚焦与非聚焦图

合成孔径是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。实际雷达飞行路线并非圆弧而是直线, 在成像处理时必须将直线孔径上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就叫聚焦处理,

否则就称非聚焦处理。显然, 聚焦处理要比非聚焦处理的分辨率高得多^[33]。

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, 有时人们为了与其它成像雷达有一定的区别, 常将此种成像雷达称为合成孔径雷达^[19,41], 而赋予其它形式或种类的成像雷达不同的名字。

雷达不动、目标动的成像雷达通常被人们称做逆合成孔径雷达 (Inverse synthetic aperture radar, 简称 ISAR)^[6-8,19,41,44,45]。SAR 与 ISAR