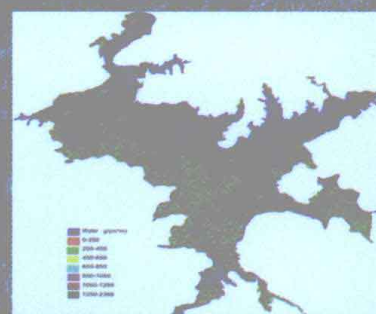
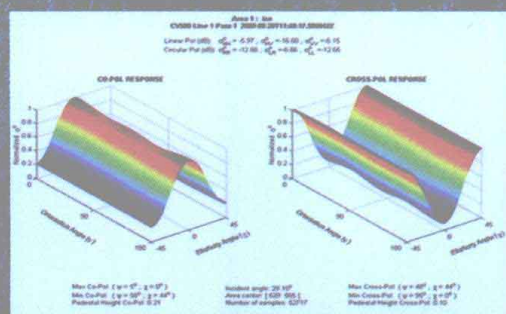
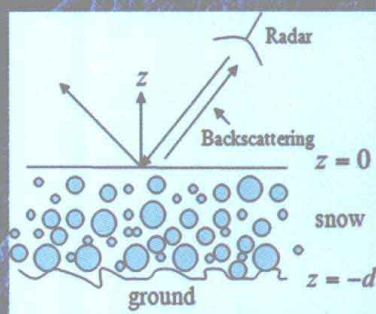


合成孔径雷达地表参数反演模型与方法

李震 廖静娟 等著



科学出版社

合成孔径雷达地表参数 反演模型与方法

李 震 廖静娟 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

随着合成孔径雷达(SAR)理论和应用的深入,SAR 的研究由定性分析向地表参数定量反演方向发展。在国家 863、973 和自然科学基金支持下,作者在 SAR 地表参数反演研究取得了系列研究成果,本书从 SAR 应用的原理与基本方法出发,介绍了极化 SAR 和干涉 SAR 原理和数据处理方法,在多种地物目标散射模型基础上阐述了针对土壤、植被、积雪、冰川和冻土的模型和参数反演方法等研究成果。

本书内容丰富,图文并茂,可供从事雷达遥感研究、定量遥感基础研究、遥感技术与应用研究的专家、学者、大专院校师生以及相关领域的人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达地表参数反演模型与方法/李震等著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-032414-6

I. ①合… II. ①李… III. ①合成孔径雷达-雷达回波-研究 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 194788 号

责任编辑:彭胜潮 马云川 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 10 月第一次印刷 印张:26

印数:1—2 500 字数:597 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书出版由下列项目资助：

科学技术部国家重点基础研究发展计划(973 计划)

- 空间观测全球变化敏感因子的机理与方法(2009CB723901)
- 北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响与适应对策(2010CB951403)

科学技术部国家高技术研究发展计划(863 计划)

- 面向对象的高可信 SAR 处理系统(2011AA120403)

前 言

从 20 世纪 50 年代合成孔径雷达(SAR)概念诞生,60 年代第一个 SAR 系统问世,经过 50 年的发展,SAR 系统无论在理论方法,还是在系统指标上都产生了巨大的进步,尤其是在欧洲空间局于 1991 年以后陆续发射了 ERS-1/2/EnviSat 系列卫星,1994 年美国航天飞机 SIR-C/X-SAR 两次成功对地观测实验,以及 1995 年具有多种成像模式的加拿大商业 SAR 卫星 Radarsat-1 发射以来,对 SAR 的基础理论研究、应用有了重要进展,而 2000 年航天飞机的雷达地形测图计划(SRTM)提供了全球 80% 地表三维地形信息,给科学界带来了巨大的惊喜。近年来,意大利 COSMO-SkyMed 和德国 Terra SAR-X 提供了更高分辨率 SAR 数据,为更精细对地观测提供了条件。而 ALOS 以实验模式和 Radarsat-2 以商业模式提供全极化 SAR 数据,为更广泛对地观测提供了可能。

近年来,定量分析遥感机理,建立定量反演模型,不断发展和深入研究 SAR 的定量应用方法,成为提高遥感应用水平的重要途径。但是 SAR 的定量化应用存在一系列问题,需要在理论分析、反演技术和应用方法上进行深入的研究。笔者在 SAR 地表参数反演的模型方法和应用研究方面,在国家科学技术部 973 计划、863 计划、自然科学基金项目和中国科学院知识创新工程重要方向性项目的支持下,针对 SAR 地表参数反演的问题,就 SAR 的散射模型、数据处理以及土壤、植被、积雪、冰川和冻土等地表参数反演方法和应用方面开展了一系列的研究。本书是作者在 SAR 地表参数反演研究方面取得的系列研究成果的总结。

全书共 8 章。第 1 章简要介绍 SAR 的原理与方法,包括成像基本原理,影像的几何校正和辐射校正方法及成像与数据处理的高新技术;第 2 章主要针对极化 SAR 的基础问题和极化 SAR 应用的一些关键技术,包括极化定标、滤波、地形校正和目标分解方法进行了阐述;第 3 章介绍干涉 SAR 的数据处理方法和应用,主要包括干涉数据配准、解缠、高程重建及极化干涉处理方法与应用;第 4 章介绍典型地物目标散射模型,从随机粗糙面散射模型、离散随机介质散射模型两方面考虑,给出一些典型地物的散射模型;第 5 章介绍地表土壤水分反演,根据土壤水分反演中常用的散射模型,给出利用单极化、多极化数据反演裸露地表和植被覆盖地表土壤水分的一些研究成果;第 6 章阐述湿地植被生物量反演模型与方法,分析湿地植被特征,建立湿地植被生物量反演模型与方法,给出 SAR 生物量反演实例,并说明生物量反演的不确定性;第 7 章讲述冰川与冻土变化探测,给出冰川流速、冰川地形变化、冻土变化探测的研究成果;第 8 章介绍 SAR 雪冰制图与参数反演,分析冰雪的后向散射特性,给出 SAR 图像的地物分类,冰川表面识别和积雪参数反演等内容的研究成果。

本书第 1 章由张平、李震编写,第 2 章由田帮森、黄磊、张平编写,第 3 章由周建民、郭明编写,第 4 章由田帮森、李震编写,第 5 章由陈权、李震编写,第 6 章由廖静娟、沈国状编写,第 7 章由李震、周建民、邢强、谢酬编写,第 8 章由黄磊、李震、田帮森编写。全书由李

震、张平统一定稿。

本书是作者针对合成孔径雷达定量应用的问题,从理论和原理方法出发,介绍了成像理论和技术,极化和干涉 SAR 的数据处理方法,并以几种地物目标为例对几年来 SAR 参数反演模型与方法研究进行的总结。郭华东研究员、施建成研究员和邵芸研究员对作者从事的研究给予了热情的鼓励和指导。研究工作中,作者得到了李小文院士、李增元研究员的支持和帮助,科学出版社彭胜潮编审为本书的出版付出了辛勤的劳动。

由于作者的水平有限,加上 SAR 定量化研究和应用是国际遥感科学研究的前沿焦点领域,新技术新方法在不断发展,书中难免存在疏漏和不足,敬请读者不吝指教。

李 震

2011 年 1 月于北京

目 录

前言

第 1 章 SAR 原理与方法	1
1.1 SAR 成像基本原理	1
1.1.1 脉冲压缩技术与距离分辨率	2
1.1.2 合成孔径原理与方位向分辨率	3
1.1.3 SAR 成像处理与算法	5
1.1.4 SAR 自聚焦算法	12
1.2 SAR 图像几何校正	16
1.2.1 SAR 图像几何特性	16
1.2.2 几何处理模型与方法	17
1.3 SAR 图像辐射校正	24
1.3.1 相对定标与绝对定标	24
1.3.2 内定标与外定标	25
1.3.3 SAR 定标处理原理与方法	26
1.3.4 地形辐射校正	33
1.3.5 相干斑噪声处理方法	37
1.4 SAR 成像与数据处理新技术	41
1.4.1 成像新技术	42
1.4.2 数据处理新技术	45
参考文献	52
第 2 章 极化 SAR 数据基础	58
2.1 极化 SAR 基础	58
2.1.1 极化电磁波	58
2.1.2 目标的极化散射矩阵	61
2.1.3 极化合成与极化响应	67
2.2 全极化 SAR 定标	69
2.2.1 Whitt 定标算法	70
2.2.2 Quegan 定标算法	73
2.3 极化数据滤波	75
2.3.1 极化 SAR 滤波原则	75
2.3.2 精细极化 Lee 滤波	76
2.3.3 改进 Lee-Sigma 滤波	77
2.4 极化 SAR 地形辐射校正	79

2.4.1 基于极化响应的估算方法·····	80
2.4.2 基于极化分解的估算方法·····	81
2.4.3 基于圆极化协方差矩阵的估算方法 ·····	83
2.4.4 全极化 SAR 地形辐射纠正实验 ·····	84
2.5 极化目标分解·····	86
2.5.1 相干目标极化分解 ·····	86
2.5.2 非相干目标极化分解 ·····	91
参考文献 ·····	95
第3章 干涉 SAR 数据处理方法和应用 ·····	97
3.1 干涉 SAR 基本原理 ·····	97
3.1.1 干涉 SAR 基本原理 ·····	97
3.1.2 干涉 SAR 处理流程 ·····	102
3.2 干涉 SAR 数据处理 ·····	103
3.2.1 干涉复数据对配准 ·····	103
3.2.2 干涉 SAR 数据滤波算法 ·····	104
3.2.3 相位解缠 ·····	108
3.3 干涉 SAR 应用 ·····	119
3.3.1 数字高程模型重建·····	120
3.3.2 地表微小形变探测·····	121
3.3.3 干涉 SAR 新技术 ·····	123
3.4 极化干涉 SAR 方法与应用 ·····	130
3.4.1 极化干涉原理 ·····	130
3.4.2 相干最优化 ·····	133
3.4.3 植被高度反演模型·····	138
3.4.4 植被高度反演算法·····	142
3.4.5 常见极化干涉 SAR 应用 ·····	148
参考文献·····	155
第4章 典型地物目标散射模型 ·····	160
4.1 概述 ·····	160
4.1.1 Green 函数与积分方程理论 ·····	160
4.1.2 矢量辐射传输理论基础 ·····	161
4.2 随机粗糙面散射模型 ·····	170
4.2.1 小扰动模型 ·····	170
4.2.2 基尔霍夫模型 ·····	172
4.2.3 积分方程模型 ·····	173
4.3 离散随机介质散射模型 ·····	177
4.3.1 植被电磁散射模型·····	177
4.3.2 积雪电磁散射模型·····	188

参考文献	206
第 5 章 地表土壤水分反演	209
5.1 SAR 反演土壤水分基础	209
5.1.1 土壤参数特性	210
5.1.2 土壤和植被介电常数模型	215
5.1.3 相关参数的地面测量方法	218
5.1.4 与土壤水分相关的散射观测系数	219
5.2 土壤水分反演中常用的经验和半经验模型	221
5.2.1 经验模型	221
5.2.2 半经验模型	222
5.3 裸露地表土壤水分反演	224
5.3.1 单极化、多时相 SAR 反演土壤水分变化	224
5.3.2 多极化、多角度 SAR 反演土壤水分	233
5.4 植被覆盖地表土壤水分反演	241
5.4.1 单极化和多极化 SAR 反演土壤水分	241
5.4.2 基于全极化 SAR 的地表土壤水分反演	254
5.4.3 极化干涉 SAR 地表土壤水分反演	255
参考文献	258
第 6 章 湿地植被生物量反演模型与方法	262
6.1 概述	262
6.2 湿地植被特征	266
6.2.1 湿地植被生态特征	266
6.2.2 湿地植被散射特征	267
6.2.3 湿地植被极化特征	270
6.3 湿地植被生物量反演模型与方法	275
6.3.1 湿地植被生物量的遥感估算方法	275
6.3.2 植被散射模型	280
6.3.3 模型的适应化	284
6.3.4 基于神经网络的生物量反演方法	286
6.4 SAR 反演湿地生物量实验	287
6.4.1 单波段、单极化 SAR 反演湿地生物量	287
6.4.2 多波段、多极化 SAR 反演湿地生物量	288
6.4.3 基于 TM 和 SAR 的生物量反演	294
6.5 湿地生物量反演的不确定性	303
6.5.1 湿地生物量遥感反演的误差与局限	303
6.5.2 湿地植被生物量反演的 SAR 系统参数选择	304
参考文献	305

第 7 章 冰川与冻土变化探测	309
7.1 概述	309
7.2 干涉 SAR 探测冰川运动速度	309
7.2.1 干涉 SAR 探测冰川运动原理	309
7.2.2 干涉 SAR 探测冰川运动方法	310
7.2.3 冰川运动参数提取结果验证	323
7.3 冰川体积变化探测	327
7.3.1 概述	327
7.3.2 冰川体积变化探测方法	328
7.3.3 冰川体积变化探测实验	333
7.4 冻土变化探测	341
7.4.1 干涉 SAR 冻土形变探测原理	341
7.4.2 干涉 SAR 探测冻土形变	344
参考文献.....	361
第 8 章 SAR 雪冰制图与参数反演	366
8.1 雪冰的后向散射特性	366
8.1.1 干雪的后向散射	367
8.1.2 湿雪的后向散射	367
8.1.3 冰的后向散射	368
8.2 SAR 图像的雪冰分类	369
8.2.1 基于极化信息的分类	370
8.2.2 基于干涉信息的雪冰分类	380
8.3 冰川表面特征分析与识别	383
8.3.1 冰川表面特征与极化响应	384
8.3.2 冰川雪线探测	386
8.4 积雪参数反演	389
8.4.1 积雪湿度反演	389
8.4.2 雪水当量反演	392
参考文献.....	400

第 1 章 SAR 原理与方法

合成孔径雷达是一种全天时、全天候的空间微波遥感成像雷达,雷达回波受系统性能指标和目标散射与几何特性的影响,辐射校准后的 SAR 图像是目标特征的综合反映。本章我们将首先给出 SAR 的成像原理,介绍几种通用的 SAR 成像算法和自聚焦算法,然后从几何和辐射两方面对 SAR 相关处理方法进行讨论,最后给出近期 SAR 系统及信号处理方面的几种新技术。

1.1 SAR 成像基本原理

SAR 能同时实现对地面目标的距离向和方位向的高分辨率成像(Curlander and McDonough, 1991)。距离向的高分辨率是通过发射大的时间带宽积(time bandwidth product, TBP)的线性调频脉冲信号,经过回波信号的脉冲压缩来实现的;方位向的高分辨率是利用雷达平台与照射目标之间的相对运动,使地面目标散射的回波成为近似的线性调频信号,通过脉冲压缩技术来实现的,方位压缩过程等效于等间隔的天线阵元在空间上合成一个长的实孔径天线,即合成孔径的概念。图 1.1 为合成孔径雷达成像几何关系图。

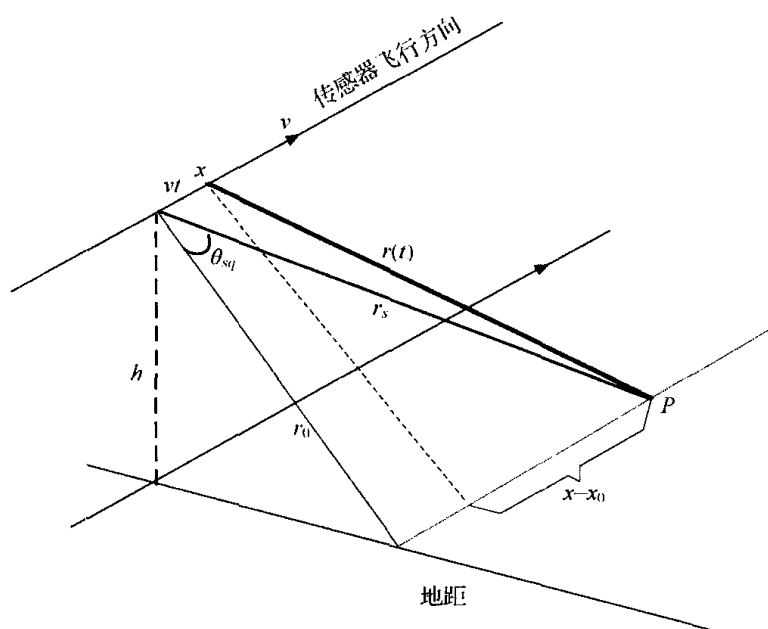


图 1.1 合成孔径雷达成像几何关系

如图 1.1 所示中,飞行器以速度 v 沿航向匀速直线运动飞行,飞行过程中,SAR 以脉冲重复时间(pulse repetition time, PRT)为周期,发射大时间带宽积(TBP)的脉冲信号照射成像区域,目标 P 与飞行器任意时刻 x 位置的距离为 $r(t)$ 。常规 SAR 天线通常收发

共用,雷达发射一个脉冲后关闭发射机,开启接收机接收雷达回波。在每个脉冲重复时间内接收的回波信号,对应于与回波信号传播时间有关的延迟。由于信号以光速传播,因此将距离时间称为快时间,而将方位时间(与脉冲重复时间相对应的的时间)称为慢时间。由于雷达从发射信号到采集接收完回波所需的时间一般远小于脉冲重复时间,因此近似认为雷达在一个脉冲重复周期内方位位置保持不变,习惯称为走-停式的假设(张澄波, 1989),这个假设的好处在于可将距离快时间和方位慢时间独立分析。

1.1.1 脉冲压缩技术与距离分辨率

SAR 在距离向利用脉冲压缩技术提高距离分辨率。这种体制采用宽脉冲发射以提高发射的平均功率,保证足够大的作用距离;而接收时采用相应的脉冲压缩算法获得窄脉冲,以提高距离分辨率,以此来解决雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾。下面以成像场景内一组在相同方位向不同距离向位置的点目标为分析对象,进行距离向处理说明。如图 1.2 所示,距离向成像二维几何关系选取斜距平面为 r - x 平面, r_0 为测绘带中心斜距, w_r 为斜距方向测绘带宽度。

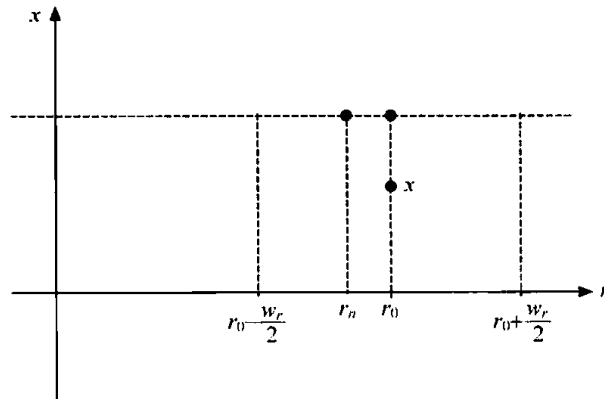


图 1.2 距离向成像二维几何关系

在理想情况下,目标距离向回波信号为

$$f_0(t) = \sum_n \sigma_n \delta\left(t - \frac{2r_n}{c}\right) \quad (1.1)$$

雷达发射波形为 $g(t)$, 以 $g(t)$ 照射距离测绘带内场景,则雷达接收的回波信号为

$$s(t) = \sum_n \sigma_n g\left(t - \frac{2r_n}{c}\right) \quad (1.2)$$

式中, σ_n 和 r_n 分别为第 n 个目标的反射系数和距离; c 为电波传播速度; $2r_n/c$ 为发射信号从雷达传到第 n 个目标再返回到雷达的往返延时,理想目标函数用 $f_0(t)$ 表示,可将式(1.2)写为

$$s(t) = f_0(t) \otimes g(t) \quad (1.3)$$

式中, $\otimes$ 表示时域卷积。

距离向通常采用匹配滤波算法,实际的回波信号附加有噪声信号干扰,若噪声信号为零均值广义平稳白噪声,采用匹配滤波器对回波信号进行滤波可以得到高信噪比。对距

离向回波信号式(1.3)进行傅里叶变换,得

$$S(f) = G(f) \sum_n \sigma_n \exp\left(-j2\pi f \frac{2r_n}{c}\right) \quad (1.4)$$

匹配滤波参考函数为 $G(f)$ 的复共轭

$$S_0(f) = G^*(f) \quad (1.5)$$

匹配滤波后的信号为

$$s_M(t) = \sum_n \sigma_n \text{psf}_t\left(t - \frac{2r_n}{c}\right) \quad (1.6)$$

式中

$$\text{psf}_t = F^{-1}[|G(f)|^2] \quad (1.7)$$

合成孔径雷达通常采用线性调频信号,假设发射信号为

$$g(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi K_r t^2) \quad (1.8)$$

式中, T_p 发射脉冲时宽; f_c 为发射信号中心频率; K_r 为调频斜率。

经过脉冲压缩之后的距离向信号为

$$s_M(t) = \sum_n \sigma_n \text{sinc}\left[\pi B_r \left(t - \frac{2r_n}{c}\right)\right] \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2r_n}{c}\right) \quad (1.9)$$

式中, B_r 为发射信号带宽。

从上式可以看出,压缩后的距离向信号的轮廓由 sinc 函数决定,因此由 sinc 函数的主瓣宽度可以得到合成孔径雷达的距离向分辨率为(Curlander and McDonough, 1991)

$$\rho_r = \frac{c}{2B_r} \quad (1.10)$$

1.1.2 合成孔径原理与方位向分辨率

雷达安装在运动平台(如飞机或卫星)上,以一定的频率不断地发射和接收电磁波脉冲,每发射一次脉冲时的天线位置视为阵列天线的单元振子位置,最后将这些位置上不同时存在的单元振子组合起来,形成一个等效的大孔径天线,从而得到提高的方位分辨率。可以利用真实孔径阵列的概念来解释合成孔径原理(张澄波, 1989)。如图 1.3(a),真实天线阵的 n 个阵元距目标的距离为 r_n , 对应的回波传输延迟分别为 A_n , 将不同阵元的信号相干叠加便可对目标聚焦。合成孔径的概念与真实孔径天线阵相似,也是将各个阵元的信号经过相位补偿后同相相加来实现对目标的聚焦。区别在于这些阵元并不是物理上实在的,而是通过小尺寸天线的移动形成等效的天线(刘永坦, 2003)。如图 1.3(b)所示,在移动的过程中将不同位置处的信号记录下来,等记录到一定数目的阵元信号后,对其进行相位补偿,并对某处目标的信号相干叠加,实现对该点的聚焦。

在图 1.3(b)中,天线实际尺寸为 D , 波束宽度为 $\frac{\lambda}{D}$, λ 为发射信号波长。合成天线阵的长度 L_s 等于天线的真实波束完整扫过目标点时天线所经过的路程,因此

$$L_s = \frac{\lambda}{D} \cdot r_0 \quad (1.11)$$

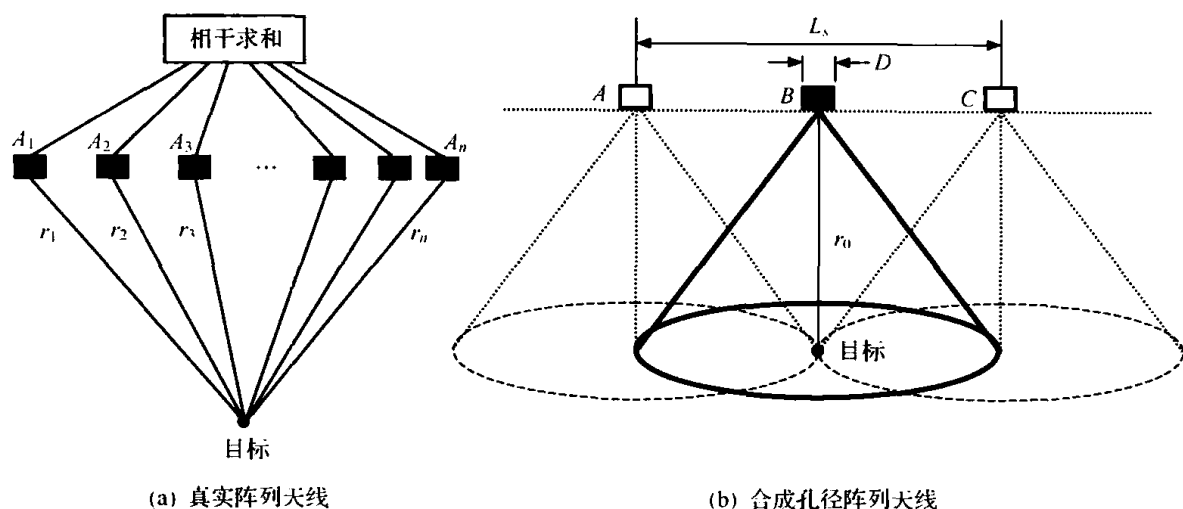


图 1.3 真实阵列与合成孔径示意图

与真实阵列同时发射和接收不同,在合成天线阵列条件下,各个天线单元先后依次发射和接收,因此,各单元之间的相位差是收发双程距离差所引起的,这相当于阵列加长了一倍,所以合成孔径的波束宽度为

$$\beta_s = \frac{\lambda}{2 \cdot L_s} \quad (1.12)$$

对应的方位向的空间分辨率为

$$\rho_a = \beta_s \cdot r_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot r_0} \cdot r_0 = \frac{D}{2} \quad (1.13)$$

合成孔径原理也可以从方位向多普勒历史的角度来分析。图 1.4 是 SAR 的斜平面几何关系模型。飞行平台以速度 v 沿 x 方向作匀速直线运动,雷达以正侧视方式工作。

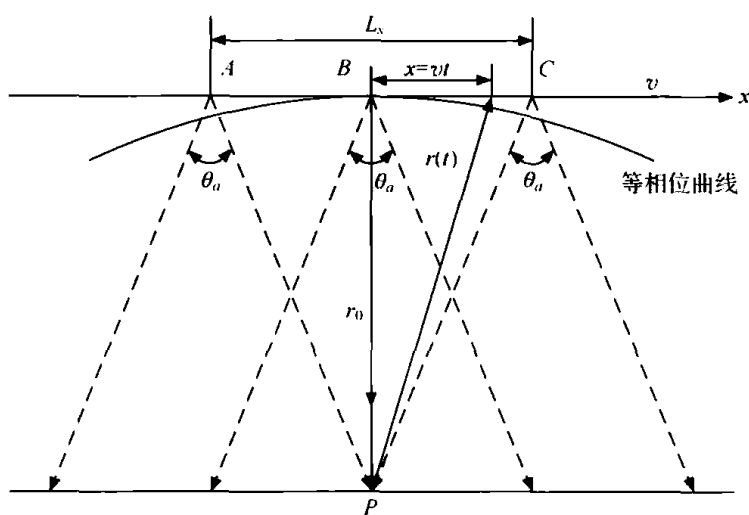


图 1.4 SAR 正侧视斜平面几何关系模型

假设目标与雷达天线相位中心的最近距为 r_0 , 令此刻 $t=0$, 则任意 t 时刻目标的斜距为

$$R(t; r_0) = [r_0^2 + (vt)^2]^{\frac{1}{2}} = r_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2 t^2}{2r_0^2} - \frac{v^4 t^4}{8r_0^4} + \dots\right) \approx r_0 + \frac{v^2 t^2}{2r_0} \quad (1.14)$$

由此得到目标 P 的回波相位历程

$$\phi(t) = -2\pi \cdot \frac{r(t; r_0)}{\lambda} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_0 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{v^2 t^2}{r_0} \quad (1.15)$$

式中, 第一项为 r_0 引起的固定相位项; 第二项是随时间变化的相位项。对式(1.15)求导即可得到回波的瞬时多普勒频率

$$f_d(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = -\frac{2v^2}{\lambda \cdot r_0} \cdot t \quad (1.16)$$

可见, 回波的瞬时多普勒频率是 t 的线性函数, 具有线性调频特性, 其调频斜率为

$$f_R = -\frac{2v^2}{\lambda \cdot r_0} \quad (1.17)$$

合成孔径时间为

$$T_a = \frac{L_s}{v} = \frac{\lambda \cdot r_0}{v \cdot D} \quad (1.18)$$

因此回波信号的多普勒带宽为

$$B_d = f_R \cdot T_a = \frac{2v}{D} \quad (1.19)$$

对应的方位向分辨率为(刘永坦, 2003)

$$\rho_h = \frac{v}{B_d} = \frac{D}{2} \quad (1.20)$$

式(1.13)与式(1.20)相同, 结论表明条带 SAR 的方位向理论分辨率与作用距离以及发射波长都无关, 只与天线的方位向尺寸有关。需要注意, 聚束模式 SAR 的方位分辨率只由雷达工作波长和视线角转过的范围决定, 天线的方位向尺寸不再限制分辨率的提高(Carrara et al., 1995)。

1.1.3 SAR 成像处理与算法

由于点目标回波的冲激响应在距离、方位向的二维耦合, 成像区域内各点的回波轨迹在二维时域是相互交错的, 因此时域的二维相关处理只能逐点进行, 运算量大而且效率低。考虑到算法的可实现性, 通常根据驻留相位原理, 利用时间带宽积较大的线性调频信号的性质, 将回波信号近似转换到频域处理(保铮等, 2005)。各种算法对耦合的逼近程度以及由此产生的计算量、存储量要求都不相同, 主要的算法有两类: 一类是一维频域处理, 即将回波信号转换到距离-多普勒域处理, 如 R-D 算法(Bennett and Cumming, 1980)、子孔径算法等; 另一类为二维频域处理, 即将信号转换到距离、方位向的二维频域进行处理, 如波数域算法(Bamler, 1995)、CS 算法(Runge and Bamler, 1992; Raney et al., 1994)等。

1. 距离-多普勒算法(R-D 算法)

雷达发射序列的数学表达式为

$$s(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(\tau - n \cdot \text{PRT})$$

$$g(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi K_r \tau^2) \quad (1.21)$$

式中, K_r 为雷达发射的线性调频信号的调频斜率。

雷达回波信号由发射信号波形、天线方向图、雷达视角等因素共同决定, 单点目标雷达回波信号可写成

$$s_r(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot w \cdot g(\tau - n \cdot \text{PRT} - \tau_n) \quad (1.22)$$

式中, σ 为点目标后向散射系数; w 为天线方向图双向幅度加权; $\tau_n = \frac{2r(t; r_0)}{c}$ 为雷达发射第 n 个脉冲时的点目标的回波延迟时间; t 为方位向时间, 代入式(1.22)为

$$s_r(\tau) = \sum_n \sigma \cdot w \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - n \cdot \text{PRT} - 2r(t; r_0)/c}{T_p}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left[\tau - n \cdot \text{PRT} - \frac{2r(t; r_0)}{c}\right]^2\right\} \\ \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t; r_0)\right] \cdot \exp[j2\pi f_c (\tau - n \cdot \text{PRT})] \quad (1.23)$$

式(1.23)是单点目标回波信号模型。方位向时间 t 远大于距离向时间 τ , 假设 SAR 满足“停-走-停”模式, 定义 t 为慢时间变量, τ 为快时间变量, 由此, 一维回波信号可以写成二维形式, 正交解调去除载波后, 单点目标的回波可写成

$$s_r(t, \tau; r_0) = \sigma \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - 2r(t; r_0)/c}{T_p}\right] \\ \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left[\tau - \frac{2r(t; r_0)}{c}\right]^2\right\} \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_s}\right) \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t; r_0)\right] \quad (1.24)$$

1) 正侧视 R-D 算法

正侧视模式下, 雷达发射信号如式(1.21), 接收单点目标回波信号为式(1.24), 当合成孔径长度远远小于斜距时, 即 $x - x_0 \ll r_0$ 时, 有

$$r(t; r_0) = \sqrt{r_0^2 + (x - x_0)^2} \approx r_0 + \frac{(vt - x_0)^2}{2r_0} \quad (1.25)$$

式中, v 为飞行速度。

将点 P 参数代入式(1.24), 得到点目标 $P(x_0, r_0)$ 的回波为

$$s_r(t, \tau; r_0) = \sigma \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - 2r(t; r_0)/c}{T_p}\right] \\ \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left[\tau - \frac{2r(t; r_0)}{c}\right]^2\right\} \cdot \text{rect}\left(\frac{t - t_0}{T_s}\right) \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t; r_0)\right] \quad (1.26)$$

将式(1.26)沿距离向作傅里叶变换(FT), 得

$$sD(t, f_r; r_0) = C_1 \cdot \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right)$$

$$\cdot \exp\left[-j \frac{4\pi f_r}{c} r(t; r_0)\right] \cdot \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_s}\right) \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t; r_0)\right] \quad (1.27)$$

式中, C_1 为复常数; f_r 为距离向频率; $B_r = K_r T_p$ 为发射信号的带宽; $t_0 = x_0/v_0$ 。

在距离频域进行距离压缩, 相应的匹配滤波函数为 $H_r(f_r) = \exp\left(j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right)$, 沿距离向作傅里叶反变换(IFT)回到二维时域

$$s_{r_{re}}(t, \tau; r_0) = C_2 \cdot \sigma \cdot \text{sinc}\left\{\pi B_r \left[\tau - \frac{2r_0}{c} - \frac{v^2(t-t_0)^2/r_0}{c}\right]\right\} \\ \cdot \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_s}\right) \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t; r_0)\right] \quad (1.28)$$

距离压缩后信号呈 sinc 函数形状, 该 sinc 函数包络沿方位位置不同, 产生不同的时延, 造成距离向和方位向的耦合, 即距离徙动现象(range cell migration, RCM)。由于在时域各点目标的距离徙动曲线是相互交错的, 所以不能统一校正, 但在方位频域, 相同距离的所有目标距离徙动曲线重合, 此时可以统一校正距离徙动。将式(1.28)沿方位向作 FT, 进入 R-D 域, 根据驻留相位原理, 信号为

$$Sd(f_a, \tau; r_0) = C_3 \cdot \sigma \cdot \text{sinc}\left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2r_0}{c} - \frac{\lambda f_a^2}{c f_R}\right)\right] \cdot \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_d}\right) \\ \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi r_0}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_a^2}{f_R}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_a t_0) \quad (1.29)$$

式中, f_a 为方位向频率; f_R 为多普勒调频率; $B_d = |f_R \cdot T_s|$ 是多普勒带宽, 在 R-D 域进行插值校正距离徙动, 距离徙动校正后的信号为

$$Sd(f_a, \tau; r_0) = C_4 \cdot \sigma \cdot \text{sinc}\left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2r_0}{c}\right)\right] \cdot \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_d}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f_a^2}{f_R}\right) \quad (1.30)$$

将式(1.30)乘上方位向匹配滤波函数 $H_a(f_a) = \exp\left(j\pi \frac{f_a^2}{f_R}\right)$, 进行方位压缩, 并沿方位向作 IFT, 得到最终的成像结果为

$$s_{r\text{-remecar}}(t, \tau; r_0) = C \cdot \sigma \cdot \text{sinc}\left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2r_0}{c}\right)\right] \cdot \text{sinc}(\pi B_d t) \quad (1.31)$$

2) 斜视 R-D 算法

在斜视情况下, 距离徙动现象较为明显, 同一距离上的目标的回波可能分布在多个距离波门上, 需通过距离徙动校正, 才能将二维处理分解成两个一维处理(Jin and Wu, 1984)。而星载情况下由于地球自转和卫星轨道的影响也会出现较为明显的距离徙动, 下面以斜视情况介绍距离徙动的校正。斜视模式下的 SAR 系统天线相位中心与目标的斜距关系为

$$r(t) = \sqrt{r_s^2 + (vt)^2 - 2vt \cdot r_s \cdot \sin\theta_{sq}} \quad (1.32)$$

式中, $r_s = \frac{r_0}{\sin\theta_{sq}}$ 。将沿方位向作傅里叶变换, 进入二维频域

$$SD(f_a, f_r; r_0) = C_2 \cdot \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{f_r}{K_r T_p}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_a}{K_a T_s}\right) \cdot \exp[-j\psi(f_a, f_r; r_0)] \quad (1.33)$$