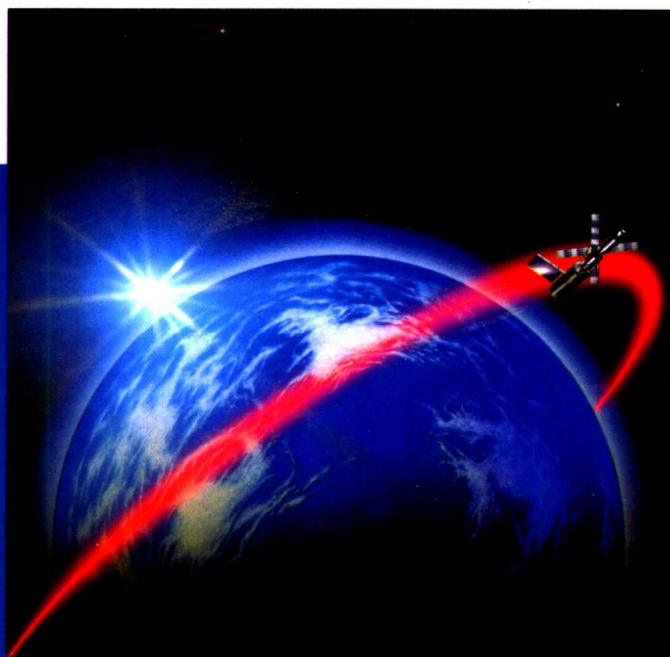


# 星载合成孔径雷达导论

## Introduce to the Spaceborne Synthetic Aperture Radar

袁孝康 著

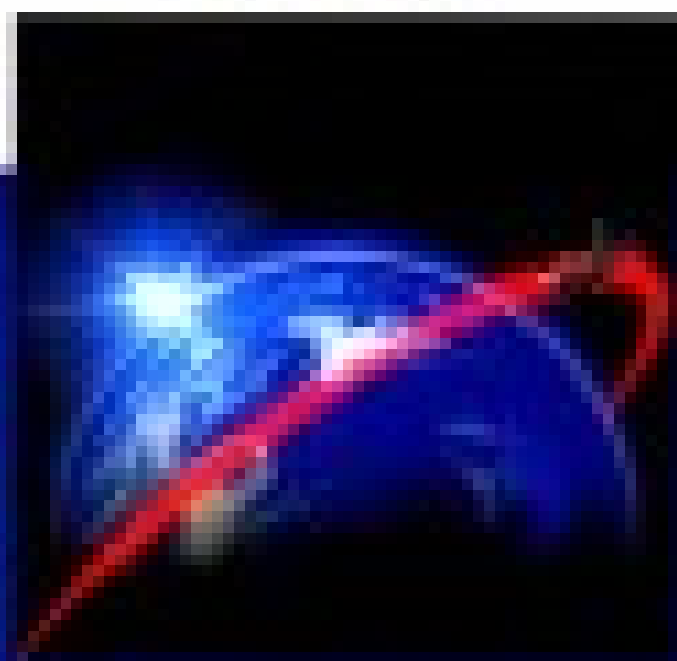


国防工业出版社

# 星载合成孔径雷达导论

Introduce to the Spaceborne  
Synthetic Aperture Radar

张永清 著



国防工业出版社

# 星载合成孔径雷达导论

## Introduce to the Spaceborne Synthetic Aperture Radar

袁孝康 著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

星载合成孔径雷达导论/袁孝康著. —北京:国防工业出版社,2003.1

ISBN 7-118-02967-X

I. 星... II. 袁... III. 卫星载雷达:合成孔径雷达 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 077972 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 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11½ 286 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1-2500 册 定价:29.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植  
顾问 黄 宁  
主任委员 刘成海  
副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋  
秘书长 张又栋  
副秘书长 彭华良 蔡 镛  
委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成  
(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生  
何新贵 佟玉民 宋家树 张立同  
张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇  
崔尔杰 韩祖南 舒长胜

# 前 言

合成孔径雷达是一种全天候、全天时的现代高分辨率微波遥感成像雷达,自 20 世纪 50 年代发明以来,已经获得飞跃式的发展。以飞机为平台的机载合成孔径雷达已被广泛应用。以卫星为平台的星载合成孔径雷达获得极大的成功,更是在世界范围内掀起了发展主动微波遥感对地观测卫星的热潮。在军事侦察、地形测绘、植被分析、海洋及水文观测、环境及灾害监视、资源勘探以及地壳微变检测等领域内,合成孔径雷达发挥了越来越重要的作用。多频段、多极化、可变视角和可变波束的多模式合成孔径雷达已经成为现实,超高分辨率和宽测绘带宽正在成为合成孔径雷达进一步发展的热点,干涉式合成孔径雷达的成功提供了全球地形测绘和地壳微变检测的强有力手段,用合成孔径雷达检测动目标并对其成像的技术已经获得突破性进展,辐射校准、极化校准、干涉(相位)校准技术的成功把合成孔径雷达对地遥感技术推向了精密的定量遥感的新阶段。

有关合成孔径雷达的文章是大量的,但大多散见于各种期刊和会议文集之中。我国也曾出版过几本合成孔径雷达专著,本人从中受到许多教益,但出书时间较早,许多新技术未能得到反映,且主要针对机载合成孔径雷达加以论述。新近虽有星载合成孔径雷达专著问世,但仍然难以满足国内科研和教学的需求。这里奉献给读者的,是一本较全面和深入阐述合成孔径雷达系统理论和设计原理的学术专著。以星载合成孔径雷达为重点,作者抱定的写作宗旨是:学术思想力求新颖,高新技术内容丰富,内容具体、实用,能较好体现作者的研究成果和独到见解,在物理概念的阐述上



力求深入浅出、易于理解,在数学关系式及其推演上既要严谨又要简明,使本书尽可能达到理论性、实践性、系统性和可读性俱佳的境地。全书共分 12 章,包括概述,卫星轨道设计基础,SAR 数字成像处理,分辨特性,SAR 方程,模糊性,Scan SAR 与 Spotlight SAR,InSAR,动目标检测,目标像元定位,SAR 校准和 SAR 数据传输等内容,对于从事军事电子学、对地观测、微波遥感和空间技术工作的科研技术人员,有关高等学校教师、研究生和高年级学生具有参考阅读价值。

在本书写作和出版过程中得到了中国工程院孙敬良院士、上海大学李英教授、上海无线电设备研究所高峰研究员的大力支持、鼓励和帮助,也得到了我的妻子诸惠芬高级工程师的热情鼓励 and 大力支持。在此,对他们一并表示诚挚的感谢和崇高的敬意。

受作者水平限制,书中可能有不少缺点和错误,请读者不吝批评指正。

作 者

# 目 录

第 1 章 合成孔径雷达概述 .....	1
1.1 原理 .....	1
1.1.1 合成孔径的形成 .....	1
1.1.2 信号特征和分辨率 .....	3
1.1.3 SAR 的工作特点 .....	5
1.2 组成 .....	6
1.3 性能 .....	8
1.3.1 空间性能参数 .....	8
1.3.2 辐射性能参数 .....	9
1.3.3 技术性能参数 .....	9
1.3.4 几点说明 .....	10
1.3.5 实例 .....	11
1.4 设计要求 .....	12
1.4.1 任务要求 .....	13
1.4.2 工作频率和极化 .....	13
1.4.3 天线尺寸和脉冲重复频率 .....	14
1.4.4 天线波束的电扫描和波束成形 .....	15
1.4.5 发射信号的频宽 .....	16
1.4.6 观测模式 .....	17
1.5 发展现状和未来 .....	20
1.5.1 发展现状 .....	20
1.5.2 未来展望 .....	24
参考文献 .....	31

<b>第 2 章 卫星轨道设计基础</b> .....	33
2.1 卫星轨道的基本概念 .....	34
2.1.1 卫星轨道的零级近似解 .....	34
2.1.2 卫星轨道摄动 .....	36
2.1.3 卫星轨道分类和特点 .....	38
2.2 地面覆盖特性 .....	40
2.2.1 卫星与地面目标的角度关系 .....	41
2.2.2 瞬时视场面积的计算 .....	42
2.2.3 面积覆盖速率的计算 .....	44
2.3 SAR 卫星轨道选择 .....	45
2.4 SAR 卫星轨道设计方法 .....	48
2.4.1 太阳同步冻结轨道设计 .....	48
2.4.2 太阳同步重复轨道设计 .....	49
参考文献 .....	56
<b>第 3 章 合成孔径雷达的数字成像处理</b> .....	57
3.1 星载 SAR 的信号模型 .....	58
3.1.1 回波信号波形表示式 .....	59
3.1.2 以二维格式表示一维波形 .....	60
3.1.3 脉冲响应函数 .....	61
3.1.4 扩展目标响应函数 .....	63
3.1.5 目标场的重构 .....	63
3.1.6 方位信号的相位历程 .....	64
3.2 数字成像处理基础 .....	67
3.2.1 数字成像处理算法 .....	67
3.2.2 数字成像处理过程 .....	69
3.2.2.1 相关处理前的点目标响应 .....	69
3.2.2.2 距离压缩 .....	71
3.2.2.3 方位压缩 .....	72
3.2.2.4 多视处理 .....	79

3.2.3	数字成像处理实现 .....	81
3.3	变换线性调频尺度的精密成像算法 .....	83
3.3.1	变换线性调频尺度原理 .....	83
3.3.2	SAR 原始信号描述 .....	84
3.3.3	变换线性调频尺度算法 .....	89
3.4	多普勒参数估值 .....	95
3.4.1	多普勒参数误差对图像质量的影响 .....	95
3.4.2	回波多普勒频率的计算 .....	97
3.4.3	多普勒参数自动估值 .....	102
3.5	运动效应与误差补偿 .....	109
3.5.1	轨道运动误差 .....	110
3.5.2	姿态误差 .....	113
3.5.3	运动误差补偿 .....	116
	参考文献 .....	118
<b>第4章 合成孔径雷达的分辨特性 .....</b>		<b>120</b>
4.1	空间分辨特性 .....	120
4.1.1	距离分辨率 .....	121
4.1.2	方位分辨率 .....	122
4.2	辐射分辨特性 .....	125
4.2.1	图像强度的概率分布 .....	125
4.2.2	辐射分辨率定义 .....	127
4.2.3	指定图像强度的错误概率 .....	128
4.2.4	系统热噪声的影响 .....	132
4.2.4.1	热噪声对错误概率的影响 .....	132
4.2.4.2	热噪声对辐射分辨率的影响 .....	133
4.3	分辨体积与图像可懂度 .....	135
4.3.1	分辨体积的概念 .....	135
4.3.2	可懂度试验 .....	136
4.3.3	分辨率的等效关系 .....	136

参考文献 .....	137
<b>第 5 章 合成孔径雷达方程 .....</b>	<b>139</b>
5.1 合成孔径雷达方程推导 .....	140
5.1.1 决定回波信号功率的雷达方程 .....	140
5.1.2 决定检测前信噪比的雷达方程 .....	142
5.1.3 决定检测后信噪比的雷达方程 .....	144
5.1.4 决定发射机平均功率的雷达方程 .....	145
5.1.5 决定噪声等效后向散射系数的雷达方程 .....	145
5.2 合成孔径雷达方程讨论 .....	146
5.2.1 用于计算的简化雷达方程 .....	146
5.2.2 $\sigma^0$ 的决定 .....	147
5.2.3 损耗因子 .....	151
参考文献 .....	155
<b>第 6 章 合成孔径雷达的模糊性 .....</b>	<b>156</b>
6.1 模糊性的来源 .....	156
6.1.1 距离模糊性 .....	157
6.1.2 方位模糊性 .....	157
6.1.3 补充说明 .....	158
6.2 模糊性设计约束 .....	159
6.2.1 天线的最小面积 .....	159
6.2.2 选取 $F_r$ 的限制条件 .....	161
6.3 模糊比的计算 .....	162
6.4 距离模糊性的抑制 .....	169
6.5 方位模糊性的抑制 .....	174
6.5.1 方位信号特性分析 .....	174
6.5.1.1 方位信号模型 .....	174
6.5.1.2 方位信号的性质 .....	176
6.5.2 理想滤波器概念 .....	179

6.5.2.1	匹配滤波器的缺陷	179
6.5.2.2	理想滤波器的构成	180
6.5.3	用理想滤波器抑制方位模糊性	181
	参考文献	185
<b>第7章</b>	<b>波束扫描与聚束式合成孔径雷达</b>	187
7.1	扫描覆盖特性	188
7.1.1	扫描周期	188
7.1.2	波束驻留时间与方位分辨率	189
7.1.3	波位数	189
7.1.4	扫描范围及其限制	190
7.1.5	观测带宽度	191
7.1.6	波束宽度随扫描角变化的情况	192
7.2	发射功率	192
7.3	数据率	194
7.4	设计考虑	195
7.4.1	波束控制与成像处理能力要求	195
7.4.2	应注意的问题	195
7.5	计算例子	197
7.6	波束扫描的实现	201
7.6.1	Radarsat 的波导缝隙天线阵	201
7.6.2	SIR-C/X-SAR 的有源微带天线阵	204
7.7	聚束式工作模式	208
7.7.1	分辨率	208
7.7.2	覆盖特性	209
7.7.3	成像处理方法	210
	参考文献	212
<b>第8章</b>	<b>干涉式合成孔径雷达</b>	214
8.1	基本原理	215

8.1.1	双天线 InSAR	215
8.1.1.1	距离向双天线 InSAR	215
8.1.1.2	方位向双天线 InSAR	217
8.1.1.3	距离及方位向双天线 InSAR	218
8.1.2	重复通过 InSAR	218
8.1.3	差分式 InSAR(D-InSAR)	219
8.1.4	InSAR 的数据处理	220
8.2	测高精度	221
8.2.1	测高误差的一般表示式	221
8.2.2	各误差分量的表示式	223
8.2.3	误差分析	223
8.2.3.1	$\sigma_1$ 误差项	223
8.2.3.2	$\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 误差项	228
8.2.3.3	$\sigma_4$ 误差项	229
8.2.3.4	$\sigma_5$ 误差项	229
8.3	回波信号的去相关效应	229
8.3.1	相关性的一般表示方法	229
8.3.2	热噪声引起的去相关	230
8.3.3	空间基线的去相关	231
8.3.4	旋转引起的去相关	233
8.3.5	时间去相关	234
8.3.6	去相关效应引起的相位测量误差	235
8.4	测角误差与滤波	236
8.5	临界基线与最佳基线	239
8.5.1	临界基线	239
8.5.2	最佳基线	240
8.5.3	基线长度的计算	240
8.6	相位解缠	241
	参考文献	245
<b>第 9 章</b>	<b>在合成孔径雷达中检测动目标</b>	<b>248</b>

9.1 用反射率频移法检测动目标 .....	249
9.1.1 回波信号的方位功率谱 .....	249
9.1.2 静目标的反射率频移 .....	249
9.1.3 用反射率频移法检测动目标 .....	251
9.2 用多视图图像位移检测动目标 .....	254
9.3 用多天线多通道技术检测动目标 .....	258
9.4 干涉雷达海浪成像 .....	260
参考文献 .....	264
<b>第 10 章 合成孔径雷达对地面目标定位 .....</b>	<b>266</b>
10.1 距离—多普勒信息定位原理 .....	267
10.2 目标相对位置的解析公式 .....	269
10.3 目标距离和多普勒参数的决定 .....	271
10.3.1 目标距离的决定 .....	271
10.3.2 回波多普勒频率的决定 .....	273
10.4 卫星位置和速度的决定 .....	273
10.4.1 坐标系的选择和变换 .....	274
10.4.2 卫星在 $O_e x_1 y_1 z_1$ 坐标系中的位置和速度 .....	275
10.4.3 卫星在 $O_e x_4 y_4 z_4$ 坐标系中的位置和速度 .....	277
10.4.4 在 $Oxyz$ 坐标系中的相对速度分量 .....	277
10.4.5 卫星(星下点)的经纬度 .....	277
10.5 目标位置的经纬度及其计算步骤 .....	278
10.5.1 目标位置的经纬度 .....	278
10.5.2 目标位置的计算步骤 .....	280
10.6 定位误差分析 .....	281
10.6.1 决定相对位置的误差 .....	281
10.6.2 决定星下点位置的误差 .....	284
10.6.3 目标的绝对定位误差 .....	285
10.6.4 其他误差因素的影响 .....	285
10.6.5 误差合成 .....	286



10.6.6	定位精度评估 .....	287
参考文献	.....	288
<b>第 11 章</b>	<b>合成孔径雷达校准</b> .....	289
11.1	雷达图像质量评价 .....	290
11.1.1	基于点目标的图像质量评价 .....	290
11.1.2	基于面目标的图像质量评价 .....	292
11.1.3	基于几何校正的图像质量评价 .....	293
11.2	辐射校准 .....	294
11.2.1	内部校准 .....	295
11.2.2	外部校准 .....	296
11.2.2.1	天线方向图和发射功率的测量 .....	296
11.2.2.2	使用参考面目标的校准 .....	297
11.2.2.3	使用参考点目标的校准 .....	299
11.2.3	校准误差 .....	309
11.3	极化校准 .....	310
11.4	干涉雷达校准 .....	314
11.5	有源雷达校准器 .....	315
参考文献	.....	320
<b>第 12 章</b>	<b>合成孔径雷达数据传输</b> .....	322
12.1	数传速率的决定 .....	323
12.1.1	决定数传速率的因素 .....	323
12.1.2	SAR 原始视频信号的数据率 .....	323
12.1.3	数传速率 .....	324
12.2	降低数据速率的方法 .....	324
12.2.1	缓存器的应用 .....	324
12.2.2	分路传输 .....	325
12.2.3	雷达信号数据压缩 .....	325
12.3	调制方式的选择 .....	329