

王文钦◎著

# 多天线合成孔径雷达 成像理论与方法

DUOTIANXIAN HECHENG KONGJING LEIDA  
CHENGXIANG LILUN YU FANGFA



國防工業出版社

National Defense Industry Press

# 多天线合成孔径雷达成像 理论与方法

王文钦 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

多天线合成孔径雷达成像理论与方法 / 王文钦著.  
—北京:国防工业出版社,2010.12

ISBN 978-7-118-07192-4

I. ①多... II. ①王.. III. ①合成孔径雷达-图像处理 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 003022 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/32 印张 10½ 字数 300 千字

2010 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是20世纪雷达技术最重要的进展,它是一种利用多普勒效应和脉冲压缩技术实现二维高分辨遥感的微波成像雷达。虽然SAR已广泛应用于军事侦察、农业勘查、环境监测、地质勘探和灾情调查等方面,但传统的工作体制和成像模式仍无法满足日益深化的军事和民用遥感应用对高分辨力、宽测绘带宽和短重访时间的需求。因此,开展新体制多天线SAR成像理论与方法研究就显得尤为重要。

多天线SAR可分为单站式多天线SAR和分布式多天线SAR两种。前者指使用多个天线的单站SAR系统,主要包括距离向多天线SAR、方位向多天线SAR、线阵SAR和MIMO(Multiple-Input and Multiple-Output)SAR;后者指使用分布式多个独立天线的双/多站SAR系统,主要包括双站SAR和分布式多站SAR。单站式多天线可以在保持一定方位向分辨力的前提下获得更宽的测绘带,或在保持一定测绘带宽的前提下获得更高的方位向分辨力。分布式多天线SAR具有良好的抗干扰和抗截获能力,并能获取成像目标更丰富的RCS(Radar Cross Section)信息。因此,多天线SAR成像已成为当前微波成像研究领域的热点课题,涌现出了许多新的成像理论与方法,但这些研究主要集中在成像处理算法方面。然而,对多天线SAR波形复用与设计、系统构建和“三大”(时间、空间和相位)同步等关键核心问题的研究还较少,也未见这方面的系统性论述书籍(专著)面市。

本书旨在总结作者在多天线SAR成像领域的多年研究成果,并吸取国内外的最新研究成果,比较系统和全面地论述多天线SAR成像理论与方法。在内容上,力求反映当前多天线SAR成像的发展现状,着

重阐述系统原理和成像方法;在叙述上,注重理论推导、图形图表和仿真计算相结合,力求思路清晰。本书力求实现学术性和参考性的有效结合,希望能为广大博(硕)研究生和其他科技人员研究多天线 SAR 成像起到抛砖引玉的作用。

本书以新体制多天线 SAR 的关键技术为主线,阐述多天线 SAR 成像理论与信号处理方法。全书共分 9 章。第 1 章是绪论,介绍多天线 SAR 的基本概念、发展历史与现状,以及本书的内容安排。第 2 章介绍多天线 SAR 成像的基本知识。第 3 章和第 4 章分别讨论方位向多天线 SAR 和距离向多天线 SAR 成像。第 5 章讨论方位向和距离向联合多天线 SAR 成像。第 6 章和第 7 章分别讨论针对分布式多天线 SAR 的时间与相位同步和空间同步问题。第 8 章讨论多天线 SAR 的成像处理问题。第 9 章讨论多天线 MIMO SAR 三维成像问题,是本书多天线 SAR 成像的补充与扩展。

最后要感谢所有在本书编写过程中给予帮助和支持的人们。感谢彭启琮教授和蔡竞业教授多年来给予作者的支持与鼓励,同时感谢作者家人的支持。为了保证本书的系统性和完整性,引用了部分其他学者的研究成果(均作了明确标注),在此一并致谢。

本书涉及的部分研究工作受到了教育部博士点新教师基金(No. 200806141101)、遥感科学国家重点实验室开放研究基金(No. OFSLRSS201011)、毫米波国家重点实验室开放研究基金(No. 200914)和中国科学院海洋波动与环流重点实验室开放研究基金(No. KLOCAW0809)等的资助,在此表示衷心感谢。

本书是作者对多天线 SAR 成像的研究心得和认识的总结,由于水平和经验有限,疏漏之处在所难免,恭请读者批评指正。

王文钦  
2010 年 8 月于成都

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 多天线 SAR 的基本概念 .....	1
1.1.1 分布式多天线 SAR 简介.....	1
1.1.2 单站式多天线 SAR 简介.....	2
1.2 多天线 SAR 的研究现状与发展趋势 .....	3
1.2.1 分布式多天线 SAR 成像的研究现状.....	3
1.2.2 单站式多天线 SAR 成像的研究现状.....	7
1.2.3 多天线 SAR 的关键技术问题.....	9
1.3 本书内容概要.....	9
参考文献.....	11
<b>第 2 章 多天线 SAR 成像基础</b> .....	16
2.1 卷积与相关 .....	16
2.1.1 卷积 .....	16
2.1.2 相关 .....	19
2.1.3 卷积与相关的比较 .....	20
2.2 采样与插值 .....	21
2.2.1 采样 .....	21
2.2.2 插值 .....	22
2.2.3 混叠 .....	24
2.3 线性调频与匹配滤波 .....	25

2.3.1	驻定相位原理 .....	25
2.3.2	线性调频脉冲波形 .....	26
2.3.3	匹配滤波器 .....	27
2.3.4	脉冲压缩 .....	30
2.4	雷达模糊函数 .....	31
2.4.1	模糊函数定义 .....	31
2.4.2	模糊函数的基本性质 .....	33
2.5	SAR 的成像原理 .....	33
2.6	SAR 成像的主要技术指标 .....	35
2.6.1	空间分辨率 .....	35
2.6.2	测绘带宽 .....	36
2.6.3	系统灵敏度 .....	36
2.6.4	模糊比 .....	37
2.7	SAR 点目标回波模型 .....	40
2.8	SAR 基本成像处理算法简介 .....	42
2.8.1	CS 成像算法推导 .....	43
2.8.2	CS 成像算法仿真 .....	47
2.9	小结 .....	49
	参考文献 .....	49
<b>第3章</b>	<b>方位向多天线 SAR 成像</b> .....	<b>52</b>
3.1	分辨率与测绘带之间的制约关系 .....	53
3.1.1	最小天线面积限制 .....	53
3.1.2	宽测绘带与高方位向分辨率矛盾 .....	54
3.2	单相位中心多天线 SAR 成像 .....	55
3.2.1	基本成像原理 .....	56
3.2.2	基本信号模型与预处理算法 .....	57
3.3	多相位中心多天线 SAR 成像 .....	60

3.3.1	基本成像原理 .....	61
3.3.2	方位向非均匀采样问题 .....	62
3.3.3	方位向非均匀采样信号的重构处理 .....	66
3.4	方位向多天线 SAR 的模糊比分析 .....	70
3.4.1	单相位中心多天线 SAR 的模糊比分析 .....	70
3.4.2	多相位中心多天线 SAR 的模糊比分析 .....	72
3.5	方位向多天线 SAR 的系统灵敏度分析 .....	73
3.6	方位向多天线 SAR 运动目标成像 .....	74
3.6.1	信号模型 .....	75
3.6.2	基于简化分数阶傅里叶变换的运动目标检测 算法 .....	80
3.6.3	仿真结果 .....	84
3.6.4	几点讨论 .....	85
3.7	小结 .....	88
	参考文献 .....	88

## 第 4 章 距离向多天线 SAR 成像 .....

4.1	常规距离向多天线 SAR 的成像原理 .....	93
4.1.1	基本成像原理 .....	93
4.1.2	回波信号模型 .....	94
4.2	MIMO SAR 正交波形分析与设计 .....	97
4.2.1	正交多相码波形 .....	98
4.2.2	具有大时间—带宽积的频分 LFM 波形 .....	100
4.2.3	正交频分复用波形 .....	108
4.3	基于距离向多天线和 OFDM 的宽测绘带成像方法 .....	113
4.3.1	基本原理 .....	114
4.3.2	匹配滤波与多波束形成处理 .....	116
4.3.3	数值仿真结果 .....	119



4.4	距离向多天线 SAR 系统性能分析 .....	123
4.4.1	系统灵敏度分析 .....	123
4.4.2	模糊比分析 .....	123
4.4.3	仿真结果分析 .....	125
4.5	小结 .....	126
	参考文献 .....	126
<b>第5章</b>	<b>方位向和距离向联合多天线 SAR 成像 .....</b>	<b>130</b>
5.1	空时编码 MIMO-OFDM SAR 高分辨成像方法 .....	130
5.1.1	基本原理 .....	131
5.1.2	方位向空时编码方法 .....	132
5.1.3	距离向“多发多收”方法 .....	134
5.1.4	距离向波束形成方法 .....	135
5.1.5	方位向信号处理方法 .....	139
5.1.6	数值仿真结果 .....	143
5.2	基于 MIMO-OFDM SAR 的动目标检测与成像 .....	147
5.2.1	回波信号模型 .....	148
5.2.2	运动目标检测与定位 .....	150
5.2.3	天线配置模式讨论 .....	153
5.3	小结 .....	155
	参考文献 .....	155
<b>第6章</b>	<b>多天线 SAR 时间和相位同步方法 .....</b>	<b>159</b>
6.1	相位噪声的时域建模与仿真 .....	160
6.1.1	相位噪声的基本特性 .....	161
6.1.2	现有的相位噪声模型 .....	166
6.1.3	时域相位噪声模拟模型 .....	168
6.1.4	数值仿真结果 .....	170

6.2	相位和时间同步误差对成像的影响分析	172
6.2.1	相位同步误差对成像的影响分析	172
6.2.2	时间同步误差对成像的影响分析	175
6.3	基于直达波信号的时间和相位同步方法	178
6.3.1	时间同步方法	179
6.3.2	相位同步方法	183
6.3.3	同步精度估计与分析	187
6.3.4	成像仿真结果	189
6.4	基于 GPS 和自聚焦算法的时间和相位同步方法	190
6.4.1	基于 GPS 信号的时间和相位同步方法	191
6.4.2	GPS PPS 信号的预测与平滑处理	196
6.4.3	残余时间同步误差补偿	200
6.4.4	残余相位同步误差补偿	203
6.4.5	同步性能仿真分析	206
6.5	基于同步通信链路的时间和相位同步方法	207
6.5.1	基于双向通信链路的同步方法	207
6.5.2	双向通信链路的同步精度分析	208
6.5.3	基于单向通信链路的同步方法	210
6.5.4	单向通信链路的同步精度分析	214
6.6	小结	216
	参考文献	217
<b>第 7 章</b>	<b>多天线 SAR 空间同步方法</b>	<b>221</b>
7.1	空间同步误差及其对 SAR 成像的影响	222
7.1.1	分布式多天线 SAR 的空间同步问题及其要求	222
7.1.2	空间同步问题对双站 SAR 成像的影响	223
7.1.3	空间同步问题对分布式 InSAR 成像的影响	227

7.2	脉冲追赶式空间同步方法	229
7.3	基于波束指向控制的空间同步方法	231
7.3.1	基于双向滑动聚束模式的空间同步方法	232
7.3.2	基于反向滑动聚束模式的空间同步方法	233
7.3.3	基于宽波束模式的空间同步方法	234
7.4	基于多波束接收的空间同步方法	235
7.5	多天线 SAR 天线姿态测量方法	239
7.6	小结	243
	参考文献	244
<b>第 8 章</b>	<b>多天线 SAR 成像处理</b>	<b>248</b>
8.1	几何模式与信号模型	249
8.1.1	“空不变”与“空变”工作模式	249
8.1.2	系统参数分析与设计	252
8.2	系统成像性能分析	255
8.2.1	距离向分辨率	255
8.2.2	方位向分辨率	256
8.2.3	仿真结果	258
8.3	方位向空变特性分析	261
8.3.1	方位向多普勒特性	261
8.3.2	点目标回波信号的二维频谱特性	263
8.3.3	数值仿真结果	268
8.4	“空变”模式下的运动误差补偿	269
8.4.1	基于地面转发器的硬件补偿方法	269
8.4.2	基于信号处理的软件补偿方法	276
8.5	基于等效合速度的改进 NCS 成像算法	283
8.5.1	引言	283
8.5.2	信号模型与处理算法	284

8.5.3 仿真结果 .....	288
8.6 小结 .....	290
参考文献 .....	291
<b>第9章 多天线 MIMO SAR 三维成像 .....</b>	<b>296</b>
9.1 MIMO SAR 三维成像的一般信号模型 .....	297
9.2 下视 MIMO-OFDM SAR 三维成像方法 .....	299
9.2.1 引言 .....	299
9.2.2 下视 MIMO-OFDM SAR 的基本原理 .....	301
9.2.3 回波信号模型 .....	303
9.2.4 三维成像处理 .....	304
9.2.5 三维成像性能分析与仿真 .....	307
9.3 侧视 MIMO-OFDM SAR 三维成像方法 .....	310
9.3.1 引言 .....	310
9.3.2 侧视 MIMO-OFDM SAR 三维成像的基本 原理 .....	313
9.3.3 信号模型与信号处理 .....	313
9.3.4 系统性能与成像指标分析 .....	315
9.4 讨论与补充 .....	316
9.5 小结 .....	318
参考文献 .....	318
<b>缩略词表 .....</b>	<b>321</b>

# 第1章 绪 论

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是20世纪雷达技术最重要的进展,它主要利用距离向脉冲压缩技术和方位向孔径合成方式实现观测区域的二维高分辨成像<sup>[1]</sup>。虽然SAR已广泛应用于军事侦察、农业勘查、环境监测、地质勘探和灾情调查等方面,但是传统的工作体制和成像模式仍无法满足日益深化的遥感应用对高分辨力、宽测绘带宽和短重访时间的需求。因此,开展新体制多天线SAR成像技术研究就显得尤为重要。本章主要介绍多天线SAR的相关背景及研究动态,主要内容安排如下:1.1节介绍了本书对多天线SAR的定义及其基本概念;1.2节讨论了多天线SAR的研究现状与发展趋势;1.3节概述了本书的主要内容和结构安排。

## 1.1 多天线 SAR 的基本概念

常规SAR的发射机和接收机安装在同一平台上,并共用一副天线。本书中的多天线SAR包括分布式多天线的双/多站SAR和集中式多天线/多波束(本书统称多天线)的单站SAR<sup>[2]</sup>。下面,分别加以简要介绍。

### 1.1.1 分布式多天线 SAR 简介

分布式多天线SAR(简称分布式SAR)是指将发射和接收天线放置在不同平台上的双/多站SAR系统,其核心是双站SAR<sup>[3]</sup>。与传统的单站SAR相比,分布式SAR的优势主要体现在以下几个方面。

#### 1. 避免了单站SAR的很多固有缺陷

由于收发天线分置,分布式SAR可以解决单站SAR的很多固有

缺点<sup>[4]</sup>。首先,由于受功率、分辨力和测绘带宽之间的约束关系限制,单站 SAR 很难同时实现高分辨力和大测绘带成像。尽管单站 SAR 可采用 Spotlight 和 ScanSAR 两种模式来提高分辨力和增大测绘带宽,但它们都不可避免地带来了新的问题:前者不能在方位向获得连续的图像,后者会导致方位向分辨力下降。但是,分布式 SAR 通过结合多个接收机的回波数据,可以获得同时具备高分辨力和宽测绘带的 SAR 图像。第二,对于干涉应用,分布式 SAR 可避免重复轨迹单站 SAR 存在的受时间去相关影响问题,而且可以实现单站 SAR 难以实现的长基线,从而可获得更高的测量精度。第三,单站 SAR 不能实现前视和后视成像,而分布式 SAR 可实现前视甚至后视成像。

## 2. 抗干扰和抗截获能力强

分布式 SAR 的发射机可布放在卫星或高空无人机上,而接收机可只接收信号,这对军事应用具有重要意义。由于接收机的静默工作方式,敌方很难对其实施有效的干扰或攻击。

## 3. 获取的目标信息更为丰富

分布式 SAR 可以从不同的角度获取目标的雷达截面积(Radar Cross Section, RCS)信息,而单站 SAR 只能获取目标的后向 RCS 信息。因此,相比于单站 SAR,分布式 SAR 可以通过选取适宜的双站角来获取目标更丰富的 RCS 信息,这对隐身目标探测和复杂场景成像应用具有重要意义。

然而,分布式多天线 SAR 又带来了一系列技术难题,尤其是“三大同步”问题<sup>[5]</sup>:时间同步,即发射机和接收机必须在工作时间上保持同步;相位同步,由于 SAR 成像是一种长时间的相干积累过程,因此要求系统具有很好的相干性;空间同步或波束同步,即发射和接收天线波束必须同时照射到同一区域。

### 1.1.2 单站式多天线 SAR 简介

随着对 SAR 技术的研究不断深入,各种新的应用需求不断提出,同时对系统性能的要求也越来越高。例如,用户总是希望 SAR 图像具有高分辨力的同时又有很宽的测绘带,但这两个指标相互制约,不能同时提高。一种解决思路是采用单站式多天线 SAR 方式来增加系统采

集信号的空间维数,可在保持一定的方位向分辨力的前提下允许系统扩大测绘带宽,或在保持一定测绘带宽的前提下获得更高的方位向分辨力。如图 1-1 所示,相应的实现方式又可分为距离向多天线<sup>[5]</sup>、方位向多天线<sup>[6]</sup>和距离向与方位向联合多天线<sup>[7]</sup>等,而方位向多天线又可分为单相位中心多天线和多相位中心多天线两种。

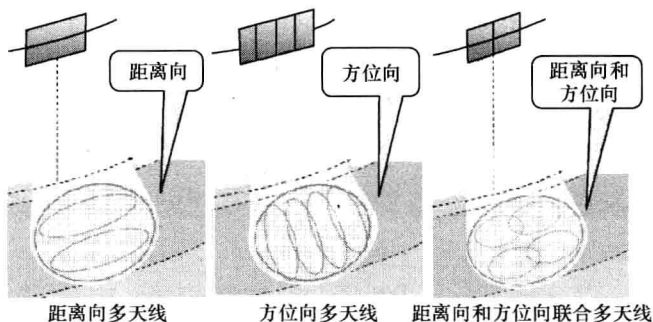


图 1-1 单站式多天线 SAR 的成像模式示意图

需要说明的是,也可以采用基于双/多站 SAR 的宽测绘带、高分辨成像解决方案,即利用一个雷达平台发射信号,而利用多个雷达平台同时接收信号。这样也可增加空间维的信号采样,从而可获得更宽的测绘带宽和更高的分辨力。

## 1.2 多天线 SAR 的研究现状与发展趋势

### 1.2.1 分布式多天线 SAR 成像的研究现状

由于分布式多天线 SAR 的核心是双站 SAR,所以这里主要讨论双站 SAR 成像的研究现状。

#### 1. 国外研究现状

双站 SAR 的研究开始于 20 世纪 70 年代,当时美国学者研究了双站雷达的成像处理、数据校正<sup>[8]</sup>和自同步问题<sup>[9]</sup>。2002 年,英国工程师利用铯原子钟作同步源进行了机载双站 SAR 试验。2003 年,德国 FGAN 研究所成功获得了清晰的双站 SAR 图像。2004 年召开的欧洲

合成孔径雷达年会专门设立了3个双站 SAR 讨论专题。随后,国外进行了一系列的机载双站 SAR 试验,获得了大量试验图像,如图 1-2 所示。

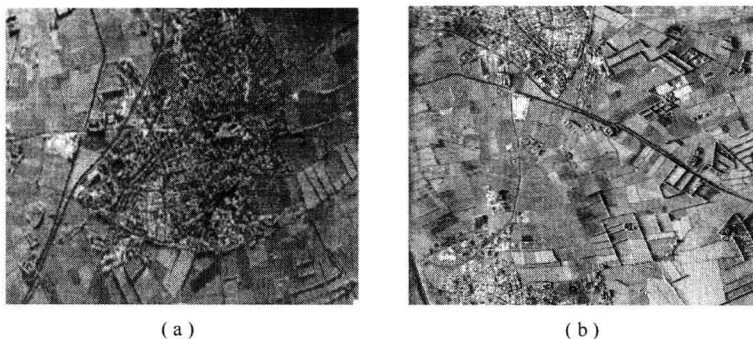


图 1-2 典型的双站 SAR 试验图像

(a)德国 DLR 的机载双站 SAR 图像;(b)德国 FGAN 的双站 SAR 伪彩图。

目前,国外的相关研究主要集中在以下几个方面。

#### 1) 回波信号建模与成像处理算法

文献[10]利用球面 Hankel 方程分解方法推导出双站 SAR 的波数域解析式,但该结论只适用于等速平飞的条带式双站 SAR 系统。文献[11]提出一种快速双站 SAR 卷积反投影算法,将计算复杂度从 $O(N^3)$ 降到 $O(N \log_2 N)$ 。文献[12]提出一种适用于发射机或接收机固定不动模式双站 SAR 的非线性 CS(Chirp Scaling)算法,该算法把斜距在多普勒零点处作三次泰勒近似,先在时域校正距离走动再在多普勒域校正距离弯曲,而时域校正引起的多普勒频率空变问题则利用三次相位补偿因子校正。文献[13]对该算法做了进一步改进。

文献[14]借鉴地震学中的双站采集思想,得到将双站 SAR 转换为单站 SAR 的数学表达式。文献[15]把收发斜距分别在各自的驻定相位点作二阶泰勒级数近似,然后用驻定相位点法求出其多普勒频域表达式。该算法的一个主要缺点是所推导的多普勒频域表达式作了很多近似处理。文献[16]用数值计算方法在二维频域把目标点的坐标进行线性变换,使回波信号的二维频域表达式中只包含变换后坐标的线性相位,然后利用类似单站 SAR 的距离徙动算法。文献[17]进一步推



导出双站 SAR 通用几何模式下的点目标二维谱,它由二维频域的幂级数构成,且谱的精度由级数的项数来控制。此外,一些学者还分别从波数域<sup>[18]</sup>或其他角度<sup>[19,20]</sup>探讨了双站 SAR 的成像算法。

## 2) 运动误差分析与补偿

为了实现 SAR 方位向的高分辨力成像,必须保证雷达平台运动轨迹的高度精确性和稳定性。因为双站 SAR 的收发平台可以独立运动,所以双站 SAR 的运动误差问题远比单站 SAR 复杂。目前的研究思路主要有两类。一类是基于运动传感器的硬件补偿,具有响应速度快和短时间内测量精度高的优点,但长时间工作会产生误差积累问题。文献[21]提出一种基于惯性测量单元以及全球定位系统(Global Positioning Systems, GPS)的机载双站 SAR 运动补偿方法。另一类则是基于信号处理的软件补偿,如相位梯度自聚焦法(Phase Gradient Autofocus, PGA)算法<sup>[22]</sup>、最小二乘法<sup>[23]</sup>和最小熵法<sup>[24]</sup>。其中,实用性最强的是 PGA 算法,它可以校正任意阶的相位误差,一般在迭代 5 次~6 次后就可收敛,但该算法对信噪比的要求较高。文献[25]分析了低频相位误差对机载双站 SAR 成像的影响,并利用改进的 PGA 算法对散焦的点目标回波进行聚集处理。

## 3) 同步误差分析与补偿

制约着双站 SAR 实用化的瓶颈问题是时间、空间和相位同步问题。Auterman<sup>[26]</sup>分析了静态条件下独立同分布的两个振荡器所产生的相位噪声谱。Krieger 等人<sup>[5]</sup>分析了静态条件假设下星载双站 SAR 的相位噪声影响<sup>[27]</sup>,并提出一种基于同步链路的频率同步补偿方法<sup>[28]</sup>。

## 4) 系统设计与试验验证

Moccia 等人<sup>[29]</sup>研究了由 SAR2000 和 BISSAT 组成的星载双站 SAR 系统性能,并进而对非合作式星载双站 SAR 的轨道设计、波束重叠、基线测量和多普勒问题作了详细分析<sup>[30]</sup>。Krieger 等人<sup>[31]</sup>针对双/多站 SAR 在监控、宽测绘带成像和干涉测量等应用讨论了时间/相位同步、卫星轨道选择和信号处理等方面的问题。

此外,国外也陆续开展了一系列试验研究。2002 年,英国 Yates 和 Horne 等人<sup>[32]</sup>进行了机载双站 SAR 试验,得到在不同双站角下的图