“十三五”国家重点出版物出版规划项目

深远海创新理论及技术应用丛书

HECHENG KONGJING LEIDA HAISHANG
JIANCHUAN YAOGAN TANCE JISHU YU YINGYONG

合成孔径雷达海上舰船遥感探测技术与应用

陈　鹏　范开国　李晓明　南明星　顾艳镇　张晓萍　著



海洋出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

合成孔径雷达海上舰船遥感探测技术与应用

陈　鹏　范开国　李晓明
南明星　顾艳镇　张晓萍　著

常州大学图书馆
藏书章

海洋出版社
2019年·北京

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达海上舰船遥感探测技术与应用 / 陈鹏，范开国等著. —北京：海洋出版社，2019.3

ISBN 978-7-5210-0282-9

Ⅰ.①合… Ⅱ.①陈… Ⅲ.①合成孔径雷达-应用-海洋遥感-遥感技术 Ⅳ.①TN958②P715.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 285202 号

丛书策划：郑跟娣

责任编辑：赵 娟

责任印制：赵麟苏

海洋出版社 出版发行

http://www.oceanpress.com.cn

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编：100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店北京发行所经销

2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

开本：787 mm×1092 mm 1/16 印张：12 彩页：2

字数：230 千字 定价：95.00 元

发行部：62132549 邮购部：68038093 总编室：62114335 编辑室：62100068

海洋版图书印、装错误可随时退换

前　言

21 世纪是海洋的世纪，也是世界航天活动蓬勃发展的新世纪。海洋和卫星遥感是重要的发展领域和科技发展的前沿技术阵地。当前，随着国家大力推动“海洋强国”战略和“海上丝绸之路”建设，我国海洋安全战略地位日益突出、海洋权益争端更加激烈。捍卫祖国主权、保卫领土安全，迫切需要提高我国海洋监测与监视能力，这也是海洋科学界面临的一项重要任务。

海上舰船遥感探测是海洋监视的重要内容，合成孔径雷达（SAR）具有全天时、全天候、高分辨率、宽刈幅的海洋监测优势，已成为海上船舰遥感探测的有效手段之一，SAR 海上舰船遥感探测亦成为 SAR 海洋遥感领域的研究热点和 SAR 遥感数据最重要的海洋监测应用之一，受到世界各国的广泛关注。

目前，围绕 SAR 海上舰船遥感探测研究的专著已有一些，但各有侧重。本书主要综合作者及其研究团队近年来 SAR 海上舰船遥感探测研究成果，从 SAR 海上舰船遥感成像机理、SAR 海上舰船遥感图像特征、海上舰船目标与尾迹遥感探测、海上舰船特征参数遥感探测、海上舰船目标遥感分类识别等方面，系统介绍了准实用化的单极化 SAR 海上舰船遥感探测技术与应用。本书的撰写注重理论和实际应用的结合，便于读者系统掌握理论知识和开展实际应用。随着我国 SAR 卫星遥感技术的不断发展，对于推动多波段、多（全）极化 SAR 和极化干涉 SAR 海上舰船遥感探测研究的深入开展和我国 SAR 海洋遥感业务化应用具有重要意义。

本书由范开国和陈鹏执笔完成初稿的撰写，王亚锋、史爱琴、付春龙、李春霞、李晓明、张晓萍、胡晓华、南明星、施英妮、顾艳镇和郭飞（以姓氏笔画为序）等参加了本书部分章节的修改，陈鹏和范开国完成了本书的校订。在本书撰写过程中，自然资源部第二海洋研究所、国家卫星海洋应用中心、中国海洋大学和中国科学院遥感与数字地球研究所、中国人民解放军 32021 部队、中国人民解放军 61741 部队、

中国人民解放军91039部队等单位的领导和同事给予了支持和鼓励；本书的出版得到国家自然科学基金（No. 41606107，No. 41576168，No. 41476088）、山东省自然科学基金（No. ZR2017LD014）和卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金的联合资助。谨此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现错误和不当之处，欢迎读者指正。

作　者

2019年2月10日

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第1章　引　言 …… 1

第2章　SAR基本概念 …… 4

2.1　SAR成像几何关系 …… 4

2.2　脉冲压缩原理 …… 5

2.3　合成孔径原理 …… 6

2.3.1　天线阵列概念 …… 6

2.3.2　多普勒频移概念 …… 7

2.4　SAR系统参数 …… 8

2.4.1　波长、频率、波数 …… 9

2.4.2　极化 …… 9

2.4.3　入射角 …… 9

2.4.4　方位角 …… 10

2.5　SAR多视处理 …… 10

第3章　SAR海上舰船遥感探测研究概述 …… 12

3.1　SAR海上舰船目标遥感探测研究概述 …… 12

3.2　SAR海上舰船尾迹遥感探测研究概述 …… 17

3.3　SAR海上舰船遥感探测系统概述 …… 18

3.3.1　加拿大OMW系统 …… 19

3.3.2　美国AKDEMO系统 …… 20

3.3.3　欧盟SUMO系统 …… 20

3.3.4　欧盟VDS系统 …… 20

3.3.5　挪威Eldhuset系统 …… 21

3.3.6　英国MaST系统 …… 22

3.3.7 法国 CLS 系统 …… 22
3.3.8 中国 SAR 舰船目标探测系统 …… 23
第 4 章 SAR 海上舰船遥感成像机理 …… 25
4.1 SAR 海面遥感成像机理 …… 25
4.1.1 散射截面 …… 25
4.1.2 镜面反射与海面后向散射 …… 26
4.1.3 海面粗糙度 …… 26
4.2 SAR 海上舰船目标遥感成像机理 …… 27
4.3 SAR 海上舰船尾迹遥感成像机理 …… 29
4.3.1 湍流尾迹 SAR 遥感成像机理 …… 31
4.3.2 内波尾迹 SAR 遥感成像机理 …… 31
4.3.3 窄“V”形尾迹 SAR 遥感成像机理 …… 32
4.3.4 开尔文尾迹 SAR 遥感成像机理 …… 32
第 5 章 SAR 海上舰船遥感图像特征 …… 34
5.1 SAR 海上舰船目标遥感图像特征 …… 34
5.2 不同类型舰船目标 SAR 遥感图像特征分析 …… 36
5.2.1 货船 SAR 遥感图像特征 …… 36
5.2.2 油船 SAR 遥感图像特征 …… 39
5.2.3 集装箱船 SAR 遥感图像特征 …… 42
5.2.4 护卫舰 SAR 遥感图像特征 …… 45
5.2.5 驱逐舰 SAR 遥感图像特征 …… 46
5.2.6 航空母舰 SAR 遥感图像特征 …… 47
5.3 舰船目标 SAR 几何特征统计分析 …… 49
5.3.1 长度宽度测量精度分析 …… 49
5.3.2 主要影响因素分析 …… 50
5.4 舰船目标 SAR 散射特征统计分析 …… 53
5.5 SAR 海上舰船尾迹遥感图像特征 …… 54
5.5.1 湍流尾迹 SAR 遥感图像特征 …… 56
5.5.2 内波尾迹 SAR 遥感图像特征 …… 62

5.5.3 窄“V”形尾迹SAR遥感图像特征 …… 65
5.5.4 开尔文尾迹SAR遥感图像特征 …… 65
5.6 影响SAR海上舰船目标遥感成像的主要因素 …… 70
5.6.1 舰船因素 …… 70
5.6.2 海况因素 …… 70
5.6.3 雷达参数 …… 72
5.6.4 SAR遥感图像因素 …… 77
5.7 影响SAR海上舰船尾迹遥感成像的主要因素 …… 79
5.7.1 舰船因素 …… 79
5.7.2 海况因素 …… 80
5.7.3 雷达参数 …… 80
第6章 SAR海上舰船遥感探测技术与应用 …… 83
6.1 SAR海上舰船目标遥感探测技术与应用 …… 83
6.1.1 SAR海上舰船目标遥感探测技术基础 …… 83
6.1.2 SAR海上舰船目标遥感探测技术 …… 86
6.1.3 SAR海上舰船目标遥感探测应用 …… 108
6.1.4 小结 …… 117
6.2 SAR海上舰船尾迹遥感探测技术与应用 …… 117
6.2.1 SAR海上舰船尾迹遥感探测技术 …… 119
6.2.2 SAR海上舰船尾迹遥感探测应用 …… 122
6.2.3 小结 …… 125
第7章 SAR海上舰船特征参数遥感探测技术与应用 …… 127
7.1 长度特征提取技术与应用 …… 127
7.1.1 扫描法 …… 127
7.1.2 最小二乘法 …… 128
7.1.3 探测实例 …… 129
7.2 宽度特征提取技术与应用 …… 132
7.3 周长和面积特征提取技术与应用 …… 133
7.4 舰船散射特征提取技术与应用 …… 134
7.5 船只吨位提取技术与应用 …… 139

7.6 运动参数提取技术与应用 …… 140
7.6.1 利用湍流尾迹提取航速 …… 140
7.6.2 利用内波尾迹提取航速 …… 141
7.6.3 利用窄“V”形尾迹提取航速 …… 143
7.6.4 利用开尔文尾迹提取航速 …… 144
7.7 小结 …… 145
第8章 SAR海上舰船目标遥感分类识别技术与应用 …… 147
8.1 SAR海上舰船目标分类识别原理 …… 147
8.1.1 舰船目标长度特征分类识别原理 …… 148
8.1.2 舰船目标长宽比特征分类识别原理 …… 149
8.1.3 舰船目标面积长度比特征分类识别原理 …… 150
8.1.4 舰船目标结构散射特征分类识别原理 …… 152
8.2 SAR海上舰船目标遥感分类识别技术 …… 154
8.2.1 基于长度和长宽比的分类识别技术 …… 154
8.2.2 基于长度和结构特征的分类识别技术 …… 155
8.2.3 基于长宽比和结构特征的分类识别技术 …… 155
8.2.4 基于目标结构散射特征的分类识别技术 …… 155
8.2.5 基于分级分类信息的分类识别技术 …… 156
8.2.6 基于模板匹配的分类识别技术 …… 158
8.3 SAR海上舰船目标遥感分类识别应用 …… 160
8.3.1 实例数据信息简介 …… 160
8.3.2 基于分级分类信息的分类识别应用 …… 160
8.3.3 基于模板匹配的分类识别应用 …… 163
8.4 小结 …… 164
第9章 总结与展望 …… 166
9.1 总结 …… 166
9.2 展望 …… 167
参考文献 …… 168
彩 图 …… 185

第1章

引　言

海上舰船是人类在海洋上活动的平台，同时也是海洋上最活跃的因子之一，人类通过舰船来探索海洋，同时也通过舰船来控制海洋。每天在海洋上活动的舰船不计其数，它们进行着运输、勘测、遥测、科考和军事等诸多方面的工作。

海上舰船的监测与监视是世界各沿海国家的传统任务，通过海上舰船监测，能够随时快速准确地获得海上舰船的位置，进而获得舰船的大小、类型、航向和航速等信息。海上舰船目标监测，特别是海上舰船分类识别，在海上交通运输、渔业管理、海洋权益维护等方面，以及在国防事业发展、领土保卫等军事领域均起着重要的作用。因此，迫切需要提高海上舰船的海洋监测与监视能力。

我国是海洋大国，海洋资源丰富，拥有漫长的海岸线和大面积的海上专属经济区，并且我国周边海洋军事环境恶劣，迫切需求新的海上舰船监测与监视手段。随着卫星遥感探测技术的发展，越来越多的可见光、热红外和合成孔径雷达(SAR)卫星遥感信息被用于海上舰船的遥感探测与分类识别。但是，由于可见光和热红外受自然条件制约较大，无法开展全天时、全天候的海上舰船遥感探测。工作在微波波段的SAR具有全天时、全天候、高分辨率、宽刈幅海洋表面遥感成像优势，成为海上舰船遥感探测的最有效手段之一，SAR海上舰船遥感探测已成为SAR海洋遥感领域的研究热点，是SAR遥感数据最重要的海洋监测应用之一，受到世界各国的广泛关注(Richard et al.，2001)。

星载SAR海上舰船遥感探测研究已有近40年的历史。自1978年美国宇航局发射Seasat-1卫星以来，科学家们获得了大量高分辨率的SAR遥感图像，船体及其船尾迹

在一些遥感图像中清晰可见。世界各国对利用 SAR 进行海上舰船及其尾迹检测都十分重视，SAR 海上舰船遥感探测能力迅速引起了各国的高度关注，并相继投入了大量的人力和财力开展了 SAR 遥感图像海面背景分布研究(Jakeman et al., 1973, 1976; Ward, 1981; Jao, 1984; Sekine et al., 1990; Quelle et al., 1993; Lombardo et al., 1994, 1995; Jahangir et al., 1996; Roberts et al., 2000)、海上舰船遥感探测和分类识别技术研究(Eldhuset, 1988; Henschel et al., 1998; Jiang, 2000; Vachon et al., 2000; Kourti et al., 2001; Schwartz et al., 2002)。其中，SAR 海上舰船遥感探测技术发展相对成熟，可归纳为两大类，即基于参数化的阈值探测技术和非参数化的探测技术，并且精度可达到 80%以上。而 SAR 海上舰船目标遥感分类识别技术，尚未达到实际应用的水平。

目前发展的 SAR 海上舰船检测算法和系统大都集中在单波段、单极化数据。利用传统的单极化(HH、HV、VH 或 VV)SAR 数据进行海上舰船检测通常有两种方法：一种是直接识别舰船信号的目标识别法；另一种是船尾迹检测方法。

早在 1986 年，挪威国防研究院(NDSR)与欧空局(ESA)开展了名为“舰船和舰船尾迹 SAR 检测”的研究项目(Skoelv et al., 1988)。同年，Lyden 等(1986)对 SAR 遥感图像上舰船尾迹的类别及其产生机理进行了分析。Murphy(1986)则提出了 SAR 遥感图像船尾迹检测方法，利用 SAR 遥感图像进行海上舰船及其尾迹检测的研究得到迅速发展。其中，以美国军方为先导的科学家，80 年代初就通过实施“海上舰船探测计划”“X 波段 SAR 海洋非线性实验”和“海军现场实验”等系列海上实验，系统地研究 SAR 海上舰船目标与舰船尾迹的遥感成像机理，并分析了海上舰船航行参数、海洋环境与舰船尾迹的内在关系。苏联、德国、加拿大、挪威和欧空局等国家和地区也相继开展了“舰船和舰船尾迹 SAR 检测”等海上舰船 SAR 遥感探测实验。通过大量的海上实验和理论研究，完成了 SAR 图像上舰船尾迹的类别及其产生机理分析(Lyden et al., 1986)，提出了 SAR 图像尾迹检测方法(Murphy, 1986)。此后，人们对海上舰船的 SAR 遥感成像机理、SAR 海上舰舰船尾迹的类别及产生机理、SAR 海上舰船目标与尾迹遥感探测技术研究得到了迅速发展(Lyden et al., 1988)。

利用 SAR 检测舰船及其船尾迹并提取舰船特征已发展成为不同气象条件下监视海上舰船的主要手段之一。研究表明，舰船检测和船尾迹检测两种方法均存在各自的优缺点(范义, 2005; 李海艳, 2007)。利用 SAR 遥感图像直接进行海上舰船检测的优势

需要全本请访问 www.ertongbook.com

主要体现在：①如果船只稳定或者缓慢运动时，船尾迹则难以观测到，但是舰船目标的回波在任何情况下都存在；②在不同的海面风速和海况下，舰船目标比尾迹目标更稳定，船只的雷达海面后向散射较强，但船尾迹与雷达参数和海况等有关，船尾迹会随着海况、船速和船向发生改变；③机动舰船尾迹的形状是变化的；④海上舰船直接检测简单有效，已得到较好的结果，尾迹检测比较费时。

利用SAR遥感图像船尾迹进行海上舰船检测的优势主要体现在：①船尾迹覆盖面积大，可延伸几千米，持续存在几小时；②运动船只的方位向模糊使海面杂乱回波增强，增加了直接进行船只检测的难度，而船尾迹不受方位模糊的影响；③如无运动偏移，船尾迹则可以显示船只的真正位置，即在尾迹的尖端；④根据舰船在方位向的偏移量和利用SAR遥感图像船尾迹的长度和夹角等特征，还可以提取海上舰船运动目标参数和航向信息，甚至在一定条件下还可以检测到近水面的水下运动目标；⑤如果SAR遥感图像的分辨率比较低，而舰船目标很小，在SAR遥感图像上很难分辨，甚至舰船可能淹没在海洋背景杂波中，但舰船尾迹的尺度比舰船本身大得多，在SAR图像上易被辨别，从而探测船尾迹比探测舰船目标本身信号更容易，能更加有效地提高海上舰船目标探测的准确率，减小虚警率。

目前，欧空局、加拿大、德国空间局和意大利等国家和地区的ERS、Radarsat、Envisat、TerraSAR-X、COSMO-SkyMed和Sentinel-1 A/B等星载、机载SAR传感器获得了大量的海上舰船遥感图像，为开展SAR海上舰船遥感探测技术与应用研究提供了丰富的资料，并为建立星载SAR海上舰船遥感探测识别示范系统奠定了基础，为有关部门进行大范围、全天候海上舰船监测提供新的技术手段，大大提高了海上舰船的监测与监视能力。

为方便读者对SAR海上舰船遥感探测技术与应用领域有更加全面和深入的了解，本书首先介绍与之相关的一些SAR基本概念和SAR海洋遥感基本原理。在本书后续章节中，对SAR海上舰船遥感成像机理、SAR海上舰船目标和尾迹遥感图像特征、SAR海上舰船目标和尾迹遥感探测技术与应用、SAR海上舰船特征参数遥感探测技术与应用和SAR海上舰船目标遥感分类识别技术与应用进行更为详细的介绍。本书最后对SAR海上舰船遥感探测研究进行了总结和展望。

第 2 章

SAR 基本概念

2.1 SAR 成像几何关系

图 2.1 是星载 SAR 遥感成像示意图。在观测方向上，从卫星到地面的距离称为斜距，斜距在地面上的投影称为地距，平行于卫星飞行轨迹的方向称为方位向，与之垂直的方向称为距离向。斜距方向与法线方向的夹角称为雷达波束的入射角 θ。SAR 天线

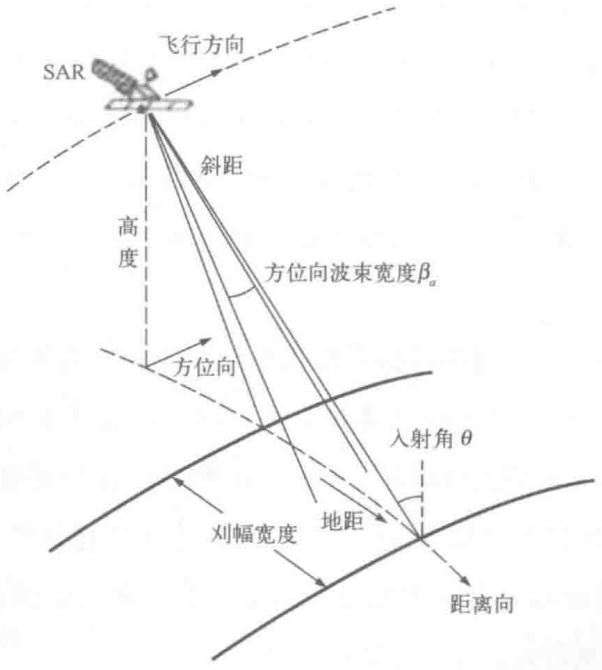


图 2.1　星载 SAR 遥感成像示意图

发射微波脉冲，脉冲展宽为方位向宽度为 β_a 的波束，当卫星在其高度为 H 的轨道上运行时，SAR 沿方位向画出一条连续的观测带。

2.2　脉冲压缩原理

对于简单的脉冲(单频)发射波，其持续时间 T_p 越短，对应距离向分辨率越高。理论上讲，缩短脉冲时间可以提高分辨率，但如果脉冲持续时间过短，回波信号的能量或平均功率 P_w 过低，信噪比(Signal to Noise Ratio，SNR)达不到要求，同样不利于在噪声背景下的检测信号。

为了解决发射脉冲持续足够长的时间以维持信号的功率水平，同时还能不降低距离分辨率的问题，SAR 系统普遍采用了脉冲压缩技术。脉冲压缩的主要方法是：发射脉冲不再是简单脉冲，而是在幅度或相位上按波形进行调制，在接收端经过压缩处理使得接收脉冲似乎是由短脉冲产生的。

假定具有线性频率的脉冲波形为：

$$s(t) = \cos(2\pi f_e t + \pi K_c t^2), \qquad |t| \leqslant \frac{T_p}{2} \tag{2.1}$$

其瞬时频率 f 为：

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{2\pi}\frac{\mathrm{d}(2\pi f_e t + \pi K_c t^2)}{\mathrm{d}t} = f_e + K_c t, \qquad |t| \leqslant \frac{T_p}{2} \tag{2.2}$$

其中，f_e 为载频；K_c 为脉冲压缩率，$K_c>0$ 时称为逆脉冲压缩，$K_c<0$ 时称为顺脉冲压缩。由于 $s(t)$ 的频率范围从 $(f_e-|K_c|\frac{T_p}{2})$ 变化到 $(f_e+|K_c|\frac{T_p}{2})$，则带宽为：

$$B = |K_c| T_p \tag{2.3}$$

信号理论指出带宽为 B 的信号可以等价处理为持续时间为 $\tau=\frac{1}{B}$ 的脉冲。这样脉冲压缩技术可以达到的距离向分辨率为：

$$\rho_\tau = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} = \frac{c}{2|K_c|T_p} \tag{2.4}$$

可以定义脉冲压缩比 PCR 为压缩前简单脉冲对应长度与压缩后等脉冲压缩之比：

$$\mathrm{PCR} = \frac{T_p}{\frac{1}{B}} = T_p B = |K_c| T_p^2 \tag{2.5}$$

由此可见，脉冲压缩比为发射脉冲的时间带宽积，它反映了脉冲压缩引起的距离分辨率的改进，这种改进可以高达10^5。

2.3 合成孔径原理

在距离向进行压缩处理以改善距离向分辨率的同时，我们同样需要一种技术进行方位向压缩。利用天线在飞行过程中不同位置的回波信号，可以实现方位向分辨率达到一个大孔径天线系统应有的分辨率。由于这样一个大孔径天线的物体实际上并不存在，而是由实际的小孔径天线合成得到的概念上的系统，这就是所谓的合成孔径天线，对应的合成孔径技术是 SAR 最根本的技术。

合成孔径的概念可以从两个方面来进行理解：一是天线阵列概念；二是多普勒频移概念。

2.3.1 天线阵列概念

对合成孔径雷达，假设其实际天线尺寸长为 D_s，为改善其方位分辨率，可以利用雷达飞行过程合成长度为 L_s 的天线。图 2.2 为合成孔径示意图。

假设地面有一目标 P(斜距 R_s)，天线波束中心与正侧视存在一个角度 θ_s，由于有这一角度的存在，雷达飞行过程中有一段长为 L_s 的范围内能够接收到目标的回波信号，我们把它定义为合成孔径长度，对应雷达波长 λ，有：

$$L_s = R_s \theta_s = \frac{R_s \lambda}{D_s} \tag{2.6}$$

这样，可以达到的合成孔径雷达的方位分辨率为：

$$\rho_a = \frac{R_s \lambda}{2L_s} = \frac{D_s}{2} \tag{2.7}$$

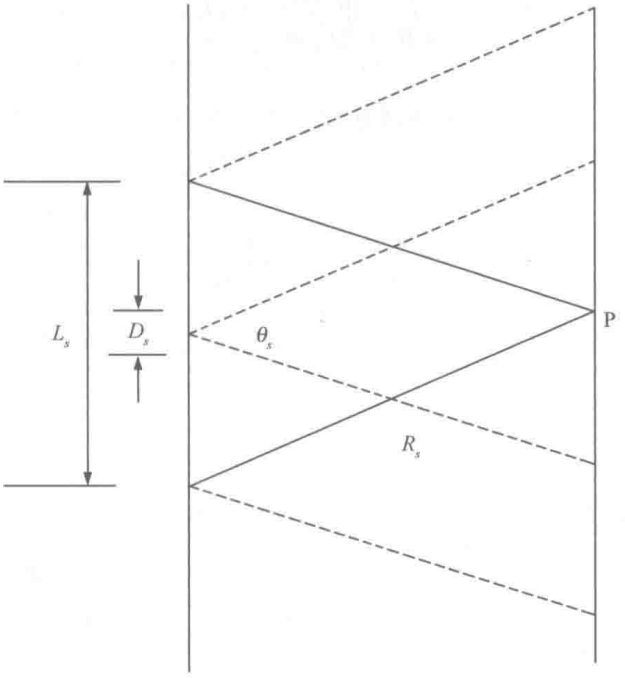


图 2.2　合成孔径示意图

2.3.2　多普勒频移概念

在频率域分析雷达回波信号，可以发现其频率发生变化，这种频移是由天线和反射目标之间的相对运动造成的，称为多普勒频移。如图 2.3 所示，雷达平台以速度 v_s 飞行，对于长度为 D_s 的雷达天线，其近似波束宽度为 $B_s=\lambda/D_s$。两个点目标 P 和 Q 在地面沿 x 向距离为 ρ_a，因为这两个点目标相应于运动雷达航迹存在不同的角度，也就存在着多普勒频移差。其中一个点目标的多普勒频移可表示为：

$$f_D=\frac{2v_s\sin\theta_s}{\lambda} \tag{2.8}$$

其多普勒增量为：

$$\Delta f_D=\frac{2v_s\cos\theta_s}{\lambda}\Delta\theta_s \tag{2.9}$$

而多普勒频率分辨与滤波器时间常数 T_D 存在如下关系：

$$\Delta f_D\approx\frac{1}{T_D} \tag{2.10}$$

合并式(2.9)和式(2.10)，得到方位向分辨率为：

$$\rho_a = R_s \cdot \Delta\theta_s = \frac{\lambda R_s}{2T_D v_s \cos\theta_s} \tag{2.11}$$

式(2.11)当 $\theta_s = 0$ 时，成为正侧视 SAR。在正侧视条件下，多普勒滤波器时间常数可取：

$$T_D = \frac{R_s B_s}{v_s} = \frac{R_s \lambda}{v_s D_s} \tag{2.12}$$

这样，将式(2.12)代入式(2.11)，即可得到方位向分辨率为：

$$\rho_a = \frac{D_s}{2} \tag{2.13}$$

这与前面合成天线阵的结果式(2.7)是相同的。

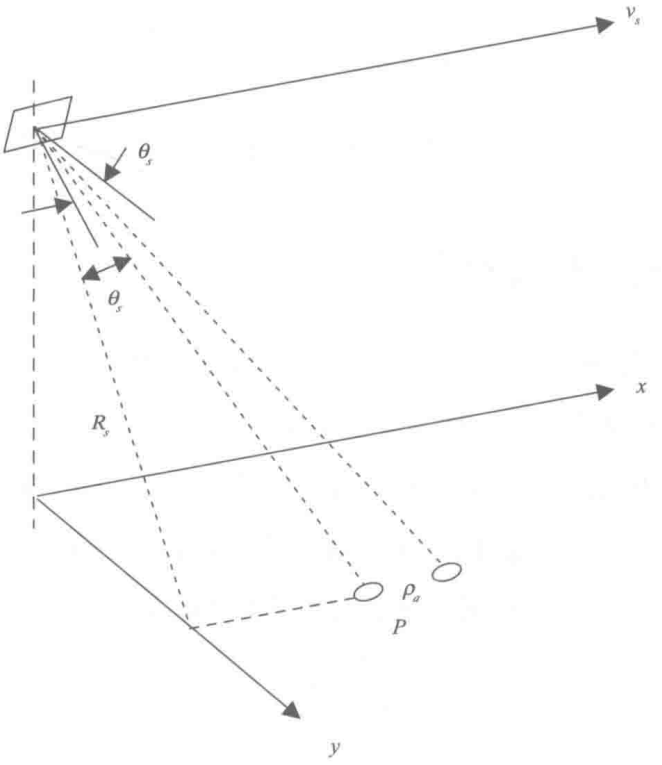


图 2.3　合成孔径示意图

2.4　SAR 系统参数

SAR 系统对目标的成像与雷达波的频率、极化和 SAR 成像几何关系有关。遥感应用的 SAR 系统通常采用特定的波长，从而也就确定了雷达的特定频率。当然，对任一

需要全本请访问 www.ertongbook.com