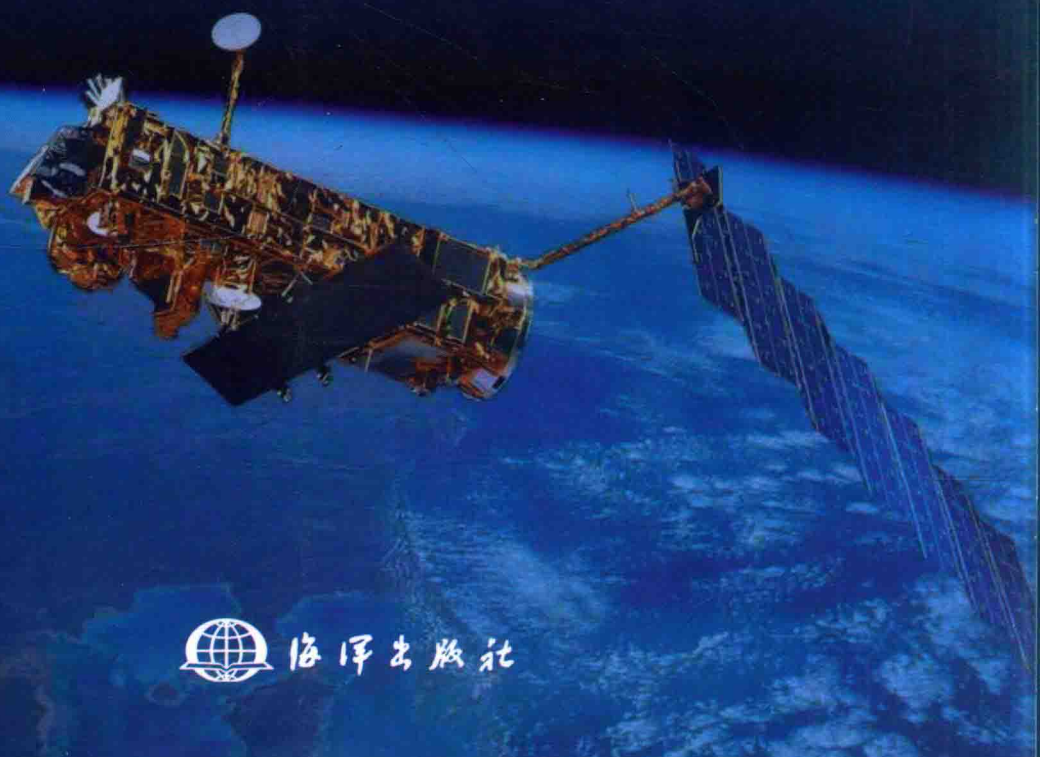


合成孔径雷达浅海水深 遥感探测技术与应用

傅 斌 范开国 陈 鹏 史爱琴 王小珍◎著



海洋出版社

合成孔径雷达浅海水深遥感探测 技术与应用

傅斌 范开国 陈鹏 史爱琴 王小珍 著

海洋出版社

2015年·北京

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达浅海水深遥感探测技术与应用 / 傅斌, 范开国等著. — 北京: 海洋出版社, 2015. 12

ISBN 978 - 7 - 5027 - 9280 - 0

I. ①合… II. ①傅… III. ①遥感技术 - 应用 - 合成孔径雷达 - 海洋遥感 IV. ①P715.7 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 253072 号

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

北京华正印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 7.25

字数: 130 千字 定价: 34.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 遥感图像包含着十分丰富的海洋信息, 任何改变海面粗糙程度的海洋现象或特征都可以成像于 SAR。利用这些 SAR 遥感图像, 可以对浅海水深、海洋内波、海浪、海洋流场特征 (海洋涡旋、锋面、边界流等) 和海面风场及其之间的相互作用进行定性、定量分析, 从而进一步加强我们对海洋的认识。此外, SAR 遥感图像还可用于对海冰、海面溢油、海上船舰和海岸带变迁等的监测, 这使得 SAR 在海洋学研究、海洋环境、海洋资源管理及防灾减灾等方面具有独特的应用价值和发展潜力。随着 SAR 遥感技术的迅猛发展和 SAR 海洋遥感理论的不完善, SAR 已成为卫星海洋遥感观测的重要技术手段之一。

目前, 围绕 SAR 遥感成像理论、SAR 遥感图像处理与应用等领域的专著已有一些, 但各有侧重。本书主要从 SAR 海洋遥感的基本原理出发, 以作者的研究成果为基础, 有机结合 SAR 浅海水深遥感成像机理和理论、遥感图像特征和具有代表性的国内外最新研究成果, 系统介绍 SAR 浅海水深遥感探测技术与应用研究。本书的撰写注重理论与实际应用的结合, 从而更便于读者系统掌握理论知识和开展实际应用。

本书由范开国执笔完成初稿的撰写, 国家海洋局第二海洋研究所傅斌、陈鹏、史爱琴、王小珍和河海大学徐青参加了本书的修改, 傅斌和范开国共同完成了本书的最后修订和定稿。在本书撰写过程中, 范开国所在单位的有关领导、同事和国家海洋局第二海洋研究所研究人员给予了鼓励和支持。本书的出版得到国家自然科学基金 (No. 41106155、No. 41576168) 和卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金 (No. SOED1407) 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
2015 年 1 月 18 日

目 录

第1章 引 言	1
第2章 SAR 基本概念	3
2.1 SAR 成像几何关系	3
2.2 脉冲压缩原理	4
2.3 合成孔径原理	5
2.4 SAR 系统参数	7
2.5 SAR 多视处理	9
第3章 SAR 海洋遥感基本原理	11
3.1 海面微波散射	11
3.2 海面微波散射模型	13
3.3 SAR 遥感图像预处理	19
3.4 SAR 浅海水深遥感探测技术现状概述	23
第4章 SAR 浅海水深遥感成像机理	26
第5章 SAR 浅海水深遥感成像理论	28
5.1 水动力学方程	28
5.2 波流相互作用理论	29
5.3 雷达海面微波后向散射成像	30
第6章 SAR 浅海水深遥感图像特征	32
6.1 台湾浅滩 SAR 浅海水深遥感图像特征分析	32
6.2 基隆岛 SAR 浅海水深遥感图像特征分析	36
6.3 曾文溪 SAR 浅海水深遥感图像特征分析	41
6.4 辽东浅滩 SAR 浅海水深遥感图像特征分析	43
6.5 登州浅滩 SAR 浅海水深遥感图像特征分析	45
6.6 珠江口 SAR 浅海水深遥感图像特征分析	47
6.7 影响 SAR 浅海水深遥感成像的主要因素	49

第7章 SAR 浅海水深遥感探测技术与应用	52
7.1 水深估测系统	52
7.2 直接逆向求解的反演技术	55
7.3 基于海面微波散射成像的反演技术	62
7.4 基于波数谱平衡方程的反演技术	70
7.5 基于海浪谱的反演技术	72
7.6 基于多时相的水深分布提取方法	78
7.7 SAR 台湾浅滩水下沙丘迁移监测方法	82
7.8 SAR 珠江口浅海水深变化监测方法	84
7.9 基于 ATL/SAR 的浅海水深遥感探测技术	90
第8章 总结与展望	98
8.1 总结	98
8.2 展望	98
参考文献	101

第 1 章

引 言

浅海水深是海洋环境的重要因素。浅海水深的测量对浅海石油勘测与开采、海底输油管道与通信电缆的埋设、海上交通运输与海洋渔业、海水养殖、近海经济和海洋救护等具有十分重要的意义，同时也是军事海洋环境研究的一项重要内容。

传统的浅海水深测量主要依靠以船只为平台的现场测量，采用声呐技术进行(梁开龙, 1995)。随着现代技术的发展，浅海多波束扫描仪广泛应用于浅海水深的测量中(刘忠臣等, 2005)。这种现场测量方法主要以点、线、面等测量方式获得数据，精度高，但是测量范围小、周期长、耗资大，而且对船只无法到达或有争议的海域无法进行测量，这些不足大大制约了广大浅海海域的水深测量。

人们一直在寻找一种既快捷又便宜的浅海水深测绘方法。随着遥感技术的发展，科研人员提出了浅海水深遥感测量的新方法。自 20 世纪 70 年代开始，国内外对利用海水的可见光遥感反射率(张骞, 1988; Philopt, 1989)、高光谱(可见光/近红外)的遥感辐亮度(施英妮等, 2008)及激光测距技术(陈卫标等, 2004)等水深遥感测量方面做了不少探索，并取得了一定的成果。然而采用上述遥感技术进行浅海水深探测，只能在水色清澈的海域和白天进行，由于不能穿透云层等缺点限制了可见光水深遥感测量技术的发展(林敏基, 1991; Hennings, 1998)。

随着卫星遥感技术的进一步发展，合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的出现引起了全球海洋界的高度重视。SAR 是利用雷达与探测目标之间的相对运动产生的多普勒(Doppler)效应，将尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成一个较大等效天线孔径的一种主动式微波成像雷达，其波长较长，可以不受云层和天气因素的影响对海洋表面进行测量，又因为是主动发射微波的，所以也不受白天黑夜的影响(刘永坦, 1999; 魏钟铨, 2001)。这种全天候、全天时和高分辨率(数米至数十米)的海

洋遥感观测的优势是可见光、高光谱及其他微波遥感所无法比拟的。此外, SAR 在不同波段、不同极化方式、不同视向和俯角下可得到目标的高分辨率雷达图像, 为人们提供非常有用的目标信息, 因此 SAR 被认为是最有效、最有潜力的传感器之一, 在海洋遥感研究领域得到极为广泛的应用。

SAR 主要通过和工作波长接近的海表面微尺度波共振而测量海面后向散射信号的幅值和时间相位信息, 产生表征海面后向散射强度的高分辨率遥感图像 (Valenzuela, 1978; Wright and Short, 1984), 因此它不依赖于海底的反射信号, 即使在海水浑浊时也能对海面成像。凡是能够影响到海表面微尺度波动分布的海洋、大气过程均被 SAR 遥感成像。浅海水深作用下的海表层流场改变海表面微尺度波的空间分布, 所以记录瞬时海表面微尺度波动分布的 SAR 遥感图像包含浅海水深信息 (De Loor, 1981; Fu and Holt, 1982; 董庆等, 1997; Zhou et al., 1999)。

1969 年 De Loor 最早发现真实孔径雷达 (Real Aperture Radar, RAR) 遥感图像中有浅海水深信息 (De Loor, 1981)。其后, 美国、欧空局、加拿大、德国空间局和意大利等国家和地区发射 Seasat - A、ERS - 1/2、Radarsat - 1、Envisat、TerraSAR - X、Radarsat - 2 和 COSMO - SkyMed - 1 卫星的 SAR 遥感图像均显示了较丰富的浅海水深信息。基于 SAR 浅海水深遥感图像, 国内外科学家为了解 SAR 浅海水深遥感成像机理和开发 SAR 浅海水深遥感探测技术, 相继进行了一系列的现场实验和理论研究, 取得了巨大的进步。目前, SAR 已成为浅海水深遥感探测的重要技术手段 (郭华东, 2000; Hesselmans et al., 2000; Calkoen et al., 2001; Huang and Fu, 2004; Jackson and Apel, 2004; 张杰, 2004; Fan KG et al., 2007)。

利用 SAR 遥感图像探测浅海水深, 具有覆盖面广、费用低、周期短以及便于进行动态监测等优势, 特别适合对精度要求不高、生态变化敏感的广阔浅海海域进行浅海水深探测。从 SAR 浅海水深遥感图像中提取的第一手浅海水深信息, 构建浅海水深草图, 可为常规测量提供最优的测量方案。并且可以用于浅海水深的检测, 支持国家和地方政府部门进行管理、检测和保护广大沿岸浅海区域。

为方便读者对 SAR 浅海水深遥感探测技术与应用领域有更加全面和深入的了解, 本书第 1 章、第 2 章主要介绍与之相关的 SAR 基本概念和 SAR 海洋遥感基本原理。在本书的后续章节中, 将对浅海水深 SAR 遥感成像机理、遥感成像理论、遥感图像特征和遥感探测技术与应用进行更为详细的介绍。本书的最后对 SAR 浅海水深遥感探测技术与应用进行了总结和展望。

第 2 章

SAR 基本概念

2.1 SAR 成像几何关系

图 2.1 是星载 SAR 系统的成像示意图。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 天线发射微波脉冲，脉冲展宽为方位向波束宽度 β_a ，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。

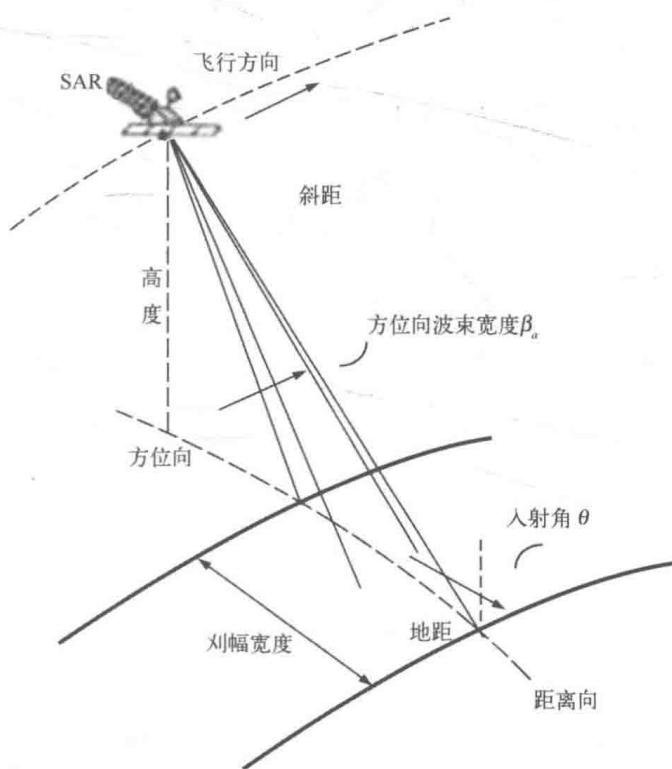


图 2.1 星载 SAR 遥感成像示意图

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 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:

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

其瞬时频率 f 为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi f_e t + \pi K_c t^2)}{dt} = f_e + K_c t, \quad |t| \leq \frac{T_p}{2} \quad (2.2)$$

式中, f_e 为载频, K_c 称为脉冲压缩率。 $K_c > 0$ 时,称逆脉冲压缩; $K_c < 0$ 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:

$$B = |K_c| T_p \quad (2.3)$$

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:

$$\rho_r = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} = \frac{c}{2|K_c| T_p} \quad (2.4)$$

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:

$$PCR = \frac{T_p}{\frac{1}{B}} = T_p B = |K_c| T_p^2 \quad (2.5)$$

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，假设其实际的天线尺寸为长 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。

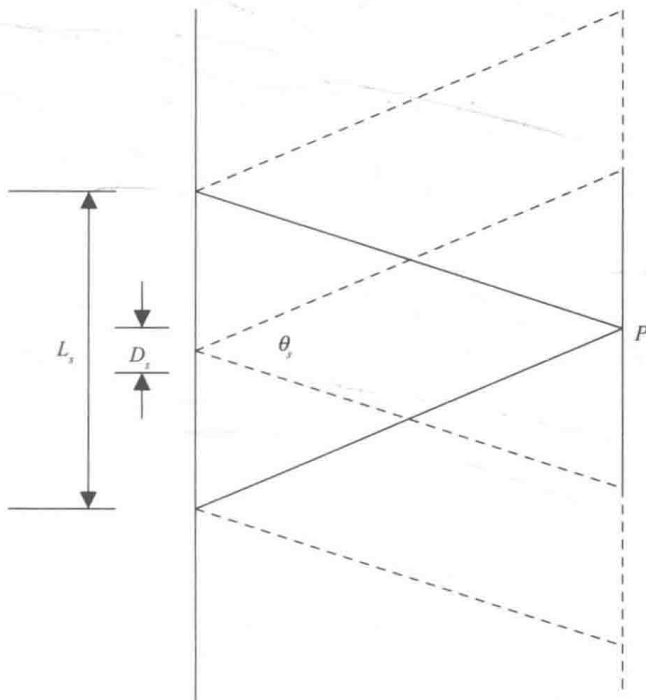


图 2.2 合成孔径示意图

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：

$$L_s = R_s \theta_s = \frac{R_s \lambda}{D_s} \quad (2.6)$$

这样，可以达到的合成孔径雷达的方位分辨率为：

$$\rho_a = \frac{R_s \lambda}{2L_s} = \frac{D_s}{2} \quad (2.7)$$

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：

$$f_D = \frac{2v_s \sin \theta_s}{\lambda} \quad (2.8)$$

其多普勒增量为：

$$\Delta f_D = \frac{2v_s \cos \theta_s}{\lambda} \Delta \theta_s \quad (2.9)$$

而多普勒频率分辨与滤波器时间常数 T_D 存在如下关系：

$$\Delta f_D \approx \frac{1}{T_D} \quad (2.10)$$

合并式(2.9)和式(2.10)，得到方位向分辨率为：

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

上式当 $\theta_s = 0$ 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：

$$T_D = \frac{R_s B_s}{v_s} = \frac{R_s \lambda}{v_s D_s} \quad (2.12)$$

这样，将式(2.12)代入式(2.11)，即可得到方位向分辨率为：

$$\rho_a = \frac{D_s}{2} \quad (2.13)$$

这与前面合成天线阵的结果式(2.7)是相同的。

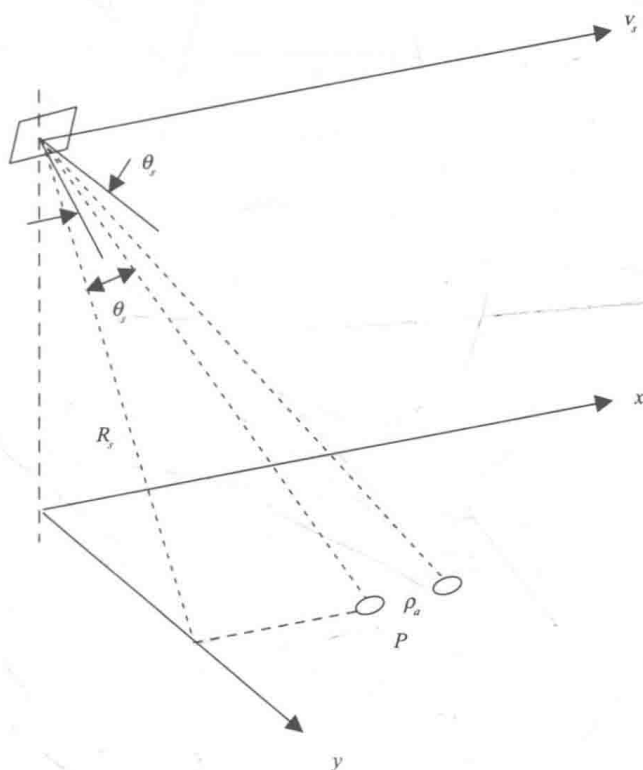


图 2.3 合成孔径示意图

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，对任一给定的 SAR 系统而言，发射波的极化和入射角、方位角等也是已知常数。除此之外，系统参数还会影响生成图像的质量(杨士中，1981)。

2.4.1 波长、频率、波数

雷达的波长、频率和波数是相互联系的，如式(2.14)和式(2.15)所示：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.14)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.15)$$

式中, c 为光速(3×10^8 m/s), f 为频率, k 为波数。

波长、频率、波数是 SAR 系统的重要参数。短波长系统的空间分辨率高, 能量要求也高, 因此早期的机载 SAR 系统常用短波长(K、X)波段, 而星载 SAR 在综合考虑后一般采用 L 和 C 波段。

2.4.2 极化

SAR 遥感中现有的系统主要采用线极化波, 在极化 SAR 中采用两个正交的线极化通道同时收发信号, 这两个正交线极化通常设计成垂直发射或水平发射的极化波。同理, SAR 系统也可接收垂直或水平极化的电磁波。

其中, 水平极化指的是电场矢量与入射面垂直, 而垂直极化指电场矢量与入射面平行。一般用 HH 极化表示雷达图像中的水平发射和水平接收, VV 极化表示垂直发射和垂直接收, HV 极化则表示水平发射和垂直接收, 反之亦然。HH 和 VV 通常意义上称为同极化, 而 HV 和 VH 称为交叉极化。

2.4.3 入射角

入射角定义为雷达入射波束与当地大地水准面垂线间的夹角。入射角是影响雷达后向散射及图像上目标物因叠掩或透视收缩产生位移的主要因素。一般来说, 来自分散的散射体的反射率随着入射角的增加而降低。图 2.4a 说明了入射角、方位角等与地球曲率的关系。此模型假设了有一定坡度的地形。与此对照, 图 2.4b 给出了“本地入射角”。表面粗糙度的变化是本地入射角的函数, 本地入射角的改变会影响雷达的后向散射, 这取决于目标物的粗糙度和其变化的程度。

2.4.4 方位角

SAR 方位角指的是入射平面与 SAR 飞行方向之间的夹角。方位角对后向散射回波有很大影响。当地物不对称且飞行平行于构造主轴线时, 回波很强; 而当雷达照射方向与地物走向平行时, 回波较弱。

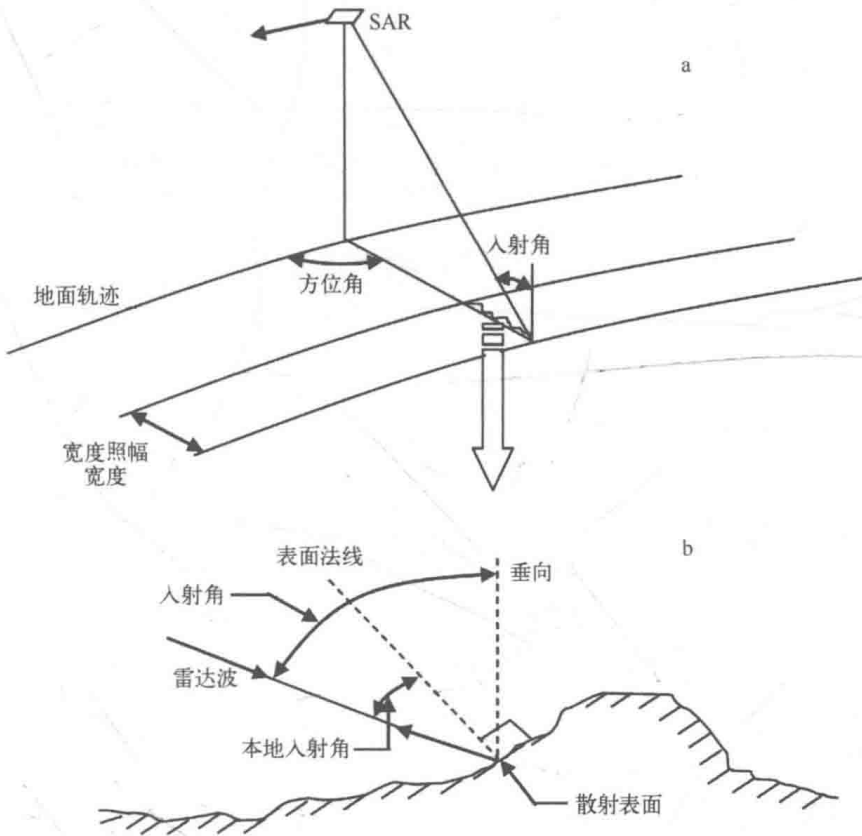


图 2.4 SAR 系统成像机理(a)与本地入射角(b)

2.5 SAR 多视处理

信号的相干性是 SAR 能够提高角分辨率的关键,但是用相干电磁波照射目标会使图像产生斑点噪声,使图像信噪比下降。由于海面散射一般较弱,斑点在 SAR 海洋图像中的存在,在一定程度上使信号掩盖在斑点之中,使解译者难以区分各种海洋现象。所以在许多时候,数字图像中都需要采用平滑或自适应滤波器等方法来加以消除。

合成孔径雷达中斑点的降低比较复杂(Ulaby, 1982)。通常把合成孔径雷达设计为长的合成天线(或较大带宽)。间距相同的发射脉冲受到了经过发射信号波束宽度的地物的拦截,由天线接收生成与多普勒有关的信号,然后把多个孔径返回的每一个信号储存起来做进一步的处理。把这些非相关的独立图像或 SAR 处理的同一景内的子图像称作“多视”。通常选择一组“单视”来对图像进行处理,而把“单视”平均处理成“多视”图像的过程,称为多视处理。

由于多视处理仅用到整个带宽的一部分，所以处理后的图像空间分辨率也降低了。多视处理能有效地抑制斑点噪声，但却是以牺牲系统分辨率为代价的。一般地讲，对于 N 视处理，各子视的带宽是整个多普勒带宽的 $1/N$ ，它的分辨率也将是全孔径单视处理(使用整个多普勒带宽)的 $1/N$ 。多视处理也能有效地提高信噪比， N 视处理后的图像相应的信噪比也提高了 \sqrt{N} 倍。

第 3 章

SAR 海洋遥感基本原理

3.1 海面微波散射

3.1.1 散射截面

目标的雷达散射截面 σ 的物理意义可以解释为：从远处观察目标物的散射强度，可用一表面面积度量，其大小为以入射场强度的球散射体在该观察点处截得功率与散射场相同时所需截面的大小(郭华东，2000)。 σ 是入射场方向和散射场方向的函数，并且与雷达入射波和散射波的极化有关。

当目标为分布目标时， σ 具有统计意义。为方便起见，一般采用单位表面积 of 雷达散射截面 σ^0 ，即归一化雷达后向散射截面(Normalized Radar Cross Section, NRCS)。 σ^0 是一个无量纲散射系数：

$$\sigma^0 = \frac{\langle \sigma \rangle}{A_0} \quad (3.1)$$

式中， $\langle \rangle$ 表示统计平均， A_0 为照射面积，对应于雷达分辨单元内所包含的海表面的平均值(朗 M W, 1983; 斯图尔特, 1992)。 σ^0 随表面粗糙度的增大而增大，随雷达入射角的减小而增大。归一化雷达后向散射截面(雷达后向散射系数、雷达海面后向散射强度)通常用分贝表示：

$$\sigma^0 [\text{dB}] = 10 \lg \sigma^0 [\text{功率比}] \quad (3.2)$$

雷达对海洋进行观测时，海水的介电性质影响了电磁辐射的穿透深度。在主动遥感雷达所采用的微波频率上，微波雷达对海水的穿透很浅，深度约为 0.1 mm ~ 10 cm，所以雷达后向散射几乎全部发生在海面(罗滨逊，1989)。