

合成孔径雷达海洋内波 遥感探测技术与应用

HECHENG KONGJING LEIDA HAIYANG NEIBO YAOGAN TANCE JISHU YU YINGYONG

范开国 周晓中 徐青 傅斌 韩利 付春龙 © 著



海洋出版社

合成孔径雷达海洋内波 遥感探测技术与应用

范开国 周晓中 徐 青
傅 斌 韩 利 付春龙 著

海洋出版社

2017年·北京

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达海洋内波遥感探测技术与应用 / 范开国等著.

— 北京 : 海洋出版社, 2017. 2

ISBN 978 - 7 - 5027 - 9685 - 3

I. ①合… II. ①范… III. ①合成孔径雷达 - 应用 - 海洋 - 内波 - 探测 IV. ①P731. 24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 018457 号

责任编辑: 赵娟

责任印制: 赵麟芬

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

2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 9.25

字数: 200 千字 定价: 59.00 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

谨以此书献给中国人民解放军建军90周年!

(1927—2017 年)

前 言

海洋内波是整个海洋中能量收支和平衡的一个重要物理过程，它在海水水平和垂直交换过程中对动量与热量的输送起着重要作用，甚至是决定性的作用。此外，海洋内波对潜艇活动、声呐装备、水中武器和海战场等都有重要影响。从20世纪40年代开始人们就十分重视对海洋内波的观测和研究。但是，由于海洋内波与表面波相比存在许多特别之处，使得对海洋内波的观测比对表面波的测量困难得多。遥感手段的引入使得这一情况得以改变，尤其是随着合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）海洋遥感理论不断完善和SAR海洋遥感探测技术的迅猛发展，利用SAR遥感图像可以对海洋内波进行定性和定量分析，从而进一步加强我们对海洋内波的认识。SAR已成为海洋内波观测的重要技术手段之一。

目前，围绕SAR海洋内波遥感成像理论、遥感图像处理与应用等领域的专著已有一些，但各有侧重。本书主要以作者近年来对SAR海洋内波（主要针对内孤立波）遥感研究的成果为基础，从SAR海洋遥感的基本原理出发，有机结合SAR海洋内波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海洋内波遥感探测技术与应用方面的研究。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。

本书由范开国和周晓中执笔完成初稿的撰写，付春龙、甘锡林、张双尚、张婵、邵浩、周维华、孟雷、施英妮、曹鹏、韩利和樊旭艳等（以姓氏笔画为序）参加了本书部分章节的修改，徐青和傅斌完成了本书的校订。

在本书撰写过程中，中国人民解放军91039部队、61741部队、61922部队、国家海洋局第二海洋研究所、中国海洋大学和河海大学等单位的领导、同事给予了支持与鼓励；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的联合资助。谨此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中的错误和不当之处在所难免，欢迎读者指正。

作 者

2016年6月6日

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
2.4 SAR 系统参数	8
2.5 SAR 多视处理	10
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 海洋内波遥感探测技术现状概述	23
第4章 SAR 海洋内波遥感成像机理	28
第5章 SAR 海洋内波遥感成像理论	32
5.1 海洋动力学方程	32
5.2 波流相互作用理论	35
5.3 雷达海面后向散射成像理论	36
第6章 海洋内波 SAR 遥感图像特征	38
6.1 海洋内波特征	40
6.2 海洋内波 SAR 遥感图像特征	48
6.3 影响 SAR 海洋内波遥感成像的主要因素	70
6.4 大气内波 SAR 遥感图像特征	72
第7章 SAR 海洋内波遥感探测技术与应用	75
7.1 半振幅宽度、波长和波向探测技术与应用	75
7.2 波速探测技术与应用	86

7.3 跃层深度探测技术与应用	92
7.4 内波振幅探测技术与应用	95
7.5 基于海面微波散射成像理论的探测技术与应用	101
第8章 南海 SAR 海洋内波统计特征	112
8.1 统计数据	112
8.2 统计方法	114
8.3 统计特征	117
第9章 结论与展望	127
9.1 结论	127
9.2 展望	127
参考文献	130

第 1 章

引 言

海洋内波(Oceanic Internal Wave)是发生在稳定层化的海洋内部、频率介于惯性频率($f = 2\Omega\sin\varphi$)和浮力频率(Brunt - Väisälä),忽略热力效应下表达式为 $N(z) = \left[-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho(z)}{dz} \right]^{1/2}$, 之间的一种波动现象,其最大振幅出现在海洋内部(Phillips, 1977; 叶安乐等, 1992)。由于海洋内波的主要恢复力是浮力和重力,因此在地球流体力学中内波又称为重力内波,考虑流体稳定层结和地球旋转效应作用下的内波则称为惯性重力内波。

海洋内波在海洋的物质、动量和能量传输中扮演着重要角色,内波研究在整个海洋动力学理论研究中占有重要地位。不仅如此,海洋内波还与海洋声学、海洋生物学、海洋光学、海洋沉积学和海洋工程学等学科有着密切的联系,对水下潜艇航行、海洋观测也有显著影响(徐肇廷, 1999)。此外,我国沿海是海洋内波多发区(Hsu et al., 2000),因此,海洋内波的研究对我国海洋科学的理论研究,海洋资源的保护、开发和利用及海洋军事等方面均具有重要的意义。

海洋内波覆盖很宽的尺度范围:低频内波的波长具有十几千米甚至几百千米,传播速度可达每秒几米,振幅可达 100 m 以上;高频内波的周期可从 5 ~ 10min 至 2 ~ 5h 不等,波长为几百米到几千米,传播速度则有每秒几十厘米的量级,振幅有 10 ~ 20m (徐肇廷, 1999)。经常观测到的海洋内波是一种被称为内孤立波(Solitary Wave 或 Soliton)的特殊类型,这种内波是在非线性作用和频散作用相平衡的情况下产生的。非线性作用使得内波波形变陡,频散作用使得内波波形展平,两种作用平衡将使得内波波形保持不变(Ostrovsky and Stepanyants, 1989; 伍荣生, 1990)。

直接观测是海洋内波研究的最佳手段,例如利用锚系可以测量内波的时空特征,包括内波波长、振幅、传播方向和速度等(陈守虎等, 2004)。然而,锚系观测不仅范

围小、耗资大,而且在浅海区域容易受到人类活动的影响而丢失数据。此外,在海洋内波现场观测实验过程中,时空布局合理才能观测到内波,且需要在若干观测点上采集垂直分布的温、盐、流时间序列数据,时间长度不能过短(一般取两周时间),并且由于只能在若干观测点进行测量,某些内波的重要参数,诸如波长、传播方向等不易获得。可见,海洋内波现场观测实验成本昂贵,且只能进行少量、局部采样,开展大面积、长期的观测是不现实的,并且由于海洋内波发生的随机性很大,现场观测只是偶尔遇到。

遥感手段的引入使得这一情况得以改变(Ostrovsky and Stepanyants, 1989)。由于可见光海洋内波遥感在很大程度上受天气与海况的限制,从而未能得到广泛应用。工作在微波波段的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候、高分辨率、宽刈幅成像的优势,并且SAR遥感图像包含着十分丰富的海洋信息,任何改变海表面粗糙程度的海洋现象或特征都可以成像于SAR遥感图像,这使得SAR海洋内波遥感研究受到广泛关注。

SAR海洋内波遥感研究最早始于SAR遥感图像上内波调制条纹的发现(Elachi and Apel, 1976; Apel and Gonzanlez, 1983),之后1978年发射的Seasat卫星证实了SAR遥感图像具有研究海洋内波的能力(Fu and Holt, 1982, 1984)。1985年,Alpers提出了SAR海洋内波遥感成像机理,为实现SAR海洋内波遥感定量化研究迈出了重要的一步(Alpers, 1985)。Porter和Thompson(1999)利用COM(Coastal Mixing and Optics Program)实验获取的SAR遥感图像开展了海洋内波参数反演,并通过与现场同步实测数据对比,验证了SAR海洋内波遥感探测技术的可行性和可靠性。

历史上为了开展SAR海洋内波遥感研究,曾有过多次联合观测实验。1984年8月27日至9月7日,SAR内波特征实验(SAR Internal Wave Signature Experiment, SARSEX)在纽约湾进行,这是第一次在实验中寻找内波场、海水层化特性和气象条件与SAR海面后向散射强度之间的定量关系。1992年夏天,美-俄联合内波实验(Joint U. S. - Russia Internal Wave Experiment, JUSREX)在长岛(Long Island)附近海域开展(Gasparovic et al., 1992),这次实验的目的与SAR内波特征实验类似,但获得了许多同步的机载和星载SAR遥感图像,对内波的产生、传播和消散过程有了更加详尽的了解。2001年,美国、俄罗斯、日本、韩国、新加坡和中国等在南海联合开展了亚洲海洋国际声学实验(Asian Seas International Acoustics Experiment, ASIAEX),获得了一系列海洋内波SAR遥感图像和声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profilers,

ADCP)等海上同步测量数据,在内波传播演变机制和内波对海洋声波传播影响等方面取得了重要成果,掀起了南海海洋内波卫星遥感研究的热潮。

目前,欧空局、加拿大、德国空间局及意大利等国家和地区的 ERS、Radarsat、Envisat、TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 等星载、机载 SAR 传感器获得了世界各海区大量的海洋内波遥感图像,为海洋内波研究提供了丰富的资料。例如,利用海洋内波 SAR 遥感图像可以直接获得海洋内波的空间位置及波长、波向、波包间距等水平向参数信息,进而分析其波源;还可以结合现场观测、历史资料等获得内波的波速、跃层深度、海水密度差和内波振幅等海洋内波垂向参数(范开国等,2010)。因此,SAR 在海洋内波遥感探测研究方面具有独特的应用价值和发展潜力,可以极大地丰富人们对海洋内波的认识。

为方便读者对 SAR 海洋内波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,对海洋内波 SAR 遥感成像机理与理论、遥感图像特征和遥感探测技术与应用进行了更为详细的介绍。本书最后对 SAR 海洋内波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 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。

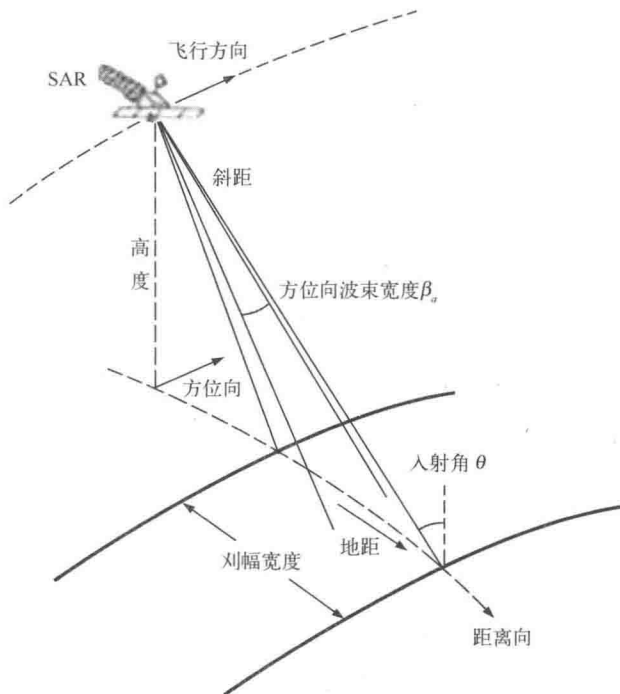


图 2.1 星载 SAR 遥感成像示意图

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(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。脉冲压缩技术的主要方法是: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:

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

其瞬时频率 f 为:

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

式中, f_c 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 $f_c - |K_c| \frac{T_p}{2}$ 变化到 $f_c + |K_c| \frac{T_p}{2}$, 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:

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

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。

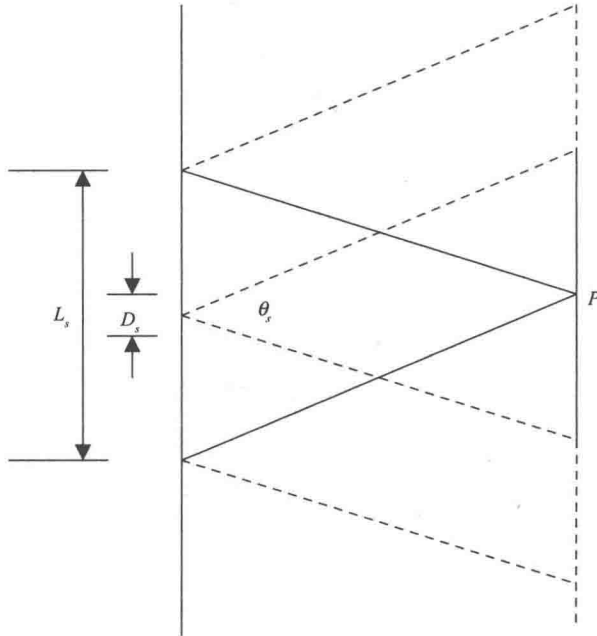


图 2.2 合成孔径示意图

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：

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

当式(2.11) $\theta_s = 0$ 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。

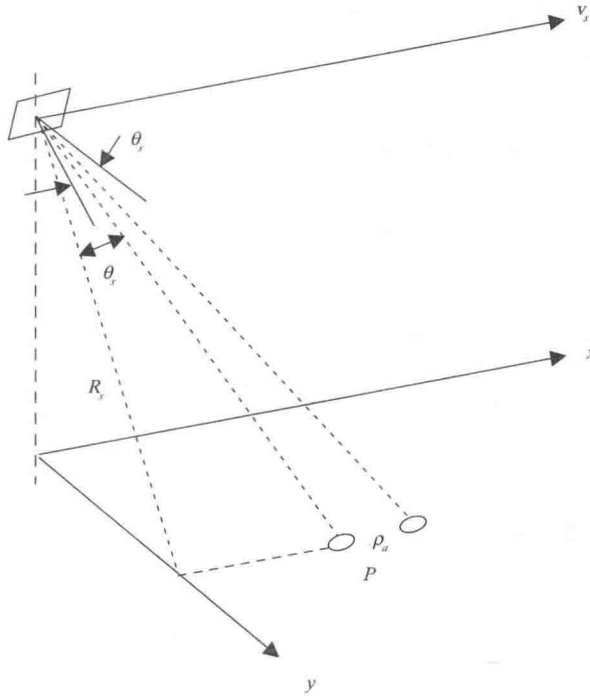


图 2.3 合成孔径示意图

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($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)； 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 波段和 C 波段。

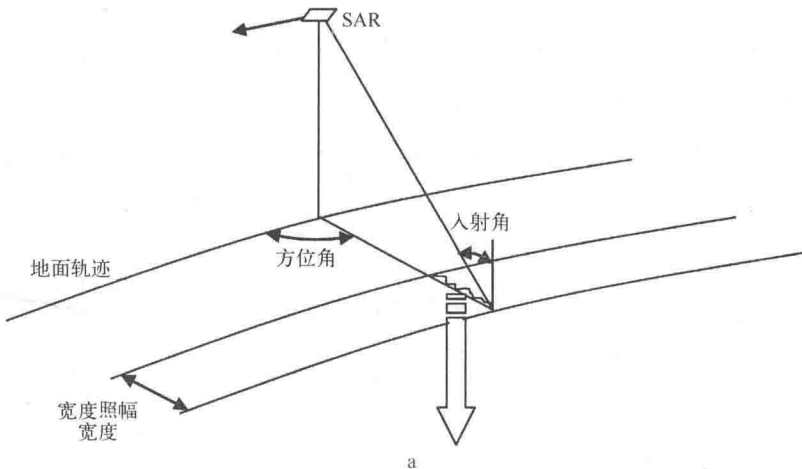
2.4.2 极化

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 极化表示水平发射和垂直接收，VH 极化则表示垂直发射和水平接收。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 2.4(a)说明了入射角、方位角等与地球曲率的关系。此模型假设有一定坡度的地形，与此对照，图 2.4(b)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。



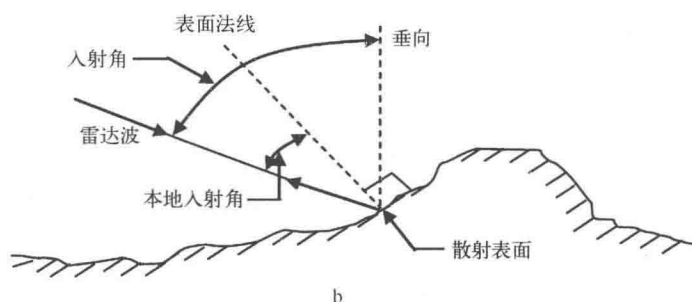


图 2.4 SAR 系统成像机理(a)与本地入射角(b)

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。

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。

SAR 图像中斑点噪声的降低过程比较复杂 (Ulaby et al., 1982)。通常把 SAR 设计成长的合成天线(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，然后把它们平均处理成“多视”图像，这个过程称为多视处理。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。