第 1 章　　绪 论

1.1　研究背景和意义

传统海洋测量采用岸基观测站、船只和浮标等方式进行海上单点测量，不可避免地存在很多不足之处，比如：①采样点少，只能获得有限的点的资料，无法获得综观全局的信息，同时很难保证采样点具有代表性；②费用较高，难以大范围进行；③海上作业受天气影响较大，仪器的布放、监测及回收都相当困难，使得资料往往无法定期获取；④对测量人员不易到达的海域，也难以取得资料。海洋遥感技术以其间接的、大范围的测量方式克服以上种种局限与困难，成为弥补传统测量方法不足的新手段。遥感技术与海洋学的结合也促使了交叉学科——卫星海洋学的诞生和发展，并日渐成为海洋科学的重要分支之一。

SAR 是一种主动式微波成像雷达，通过测量海面后向散射信号的幅值及其时间相位，并通过适当的处理之后，产生海面后向散射强度的图像（即雷达观测到的海面粗糙度）。这种图像能极为详细地显示出海面空间变化的细节，其分辨率为数米到数十米的数量级。此外，由于 SAR 工作在微波波段，即使在黑夜也能正常工作，它发射的微波还可穿透云层，因而测量不受恶劣天气的影响。这种全天候、全天时和高分辨率观测海洋的优势是可见光和红外传感器以及其他微波传感器所没有的。

在 SAR 用于海洋遥感测量之前，人们仅希望它能够对各类涌浪（波长数百米的规则海浪）、船尾流，或许还有碳氢化合物或漂浮碎屑所造成的海面油膜成像。但是事实表明，1978 年发射升空的、仅工作了三个月的美国 Seasat SAR 能揭示出包括内波和海底地形特征等更多的现象（Fu 和 Holt　1982）。由于海洋学家以前从未使用过这种雷达对海洋进行俯视观测，所以他们难以想到，集中在海面以下数十米以深的海洋动力学现象和地形特征能够以海面粗糙度的形式反映出来，并被 SAR 所成像。

对于 SAR 海洋遥感来说，在一定的雷达参数和轨道条件下，海面的粗糙程度是影响雷达后向散射的主要因素。它所测量的海面粗糙度是由数厘米到数十厘米的表面张力波和短重力波引起的。SAR 对海洋学感兴趣的任何特征或现象（如风、流、海浪、锋

需要全本请访问 www.ertongbook.com

面、海面油膜、涡、内波和水下地形等）的成像能力取决于这些特征或现象以各种不同方式改变海面粗糙度的程度，这为 SAR 海洋应用开辟了新的领域，同时也促使对上述现象的成像机制进行广泛深入的研究，使得 SAR 海洋遥感成为卫星海洋学的一个十分令人感兴趣的研究方向。

海面风场是海洋和大气的重要要素，星载微波散射计是迄今为止最主要的遥感测量全球海面风场的传感器，其风速、风向测量精度分别达到 ±2 m/s和 ±20°，测量数据已广泛地应用于海面风场、海浪场和天气预报以及海洋和大气研究等领域。但是，散射计测量的空间分辨率通常在 25 ~ 50 km，不能满足某些需要高空间分辨率风场数据的应用。此外，散射计无法测量近岸数十千米以内的海面风场。在近海（包括海湾、海峡、河口等）及岛屿和冰缘附近海域，风场在数百米到数千米的空间尺度内就有较大变化，空间分辨率较低的散射计不再适用。星载 SAR 则不同，它具有高空间分辨率（数米至数十米）测量海面风场的能力，能够提供大范围、高空间精度的海面风场信息，尤其适用于近海和岛屿以及冰缘附近海域海面风场以及局地风场的测量。 2002 年发射的欧洲 Envisat 卫星没有装载散射计，其上的 SAR 作为高分辨率散射计兼任海面风场测量之重任，更推动了 SAR 海面风场测量研究。

海面风场作用在海面的风应力直接影响到大气与海洋环流以及海气之间的相互作用，也是推算风驱海流运动规律和海面油污扩散等的不可或缺的参数条件。随着遥感技术的发展，利用 SAR 对海面风应力、阻力系数以及空气动力学粗糙长度等海洋和大气的动力特性进行大范围、高空间分辨率测量已成为可能。

SAR 在海洋学中的主要应用之一就是对海浪进行研究。实际上，最初 SAR 之所以引起海洋学家们的极大兴趣，在很大程度上是由于它能提供任何其他技术手段从未获得过的关于波浪场的空间数据。毫无疑问，它能对海浪成像，并给出符合实际的波长估算值。然而，对于海浪是否总能被成像，什么方向、多长波长的海浪适于 SAR 成像，图像中的海浪与实际海浪有多少差别等问题的认识是不易通过现场观测来验证的， SAR 海浪遥感仿真研究因此成为解决这一问题的重要手段。

海浪的研究对海上经济和军事活动具有十分重要的意义。海浪可以用一个二维方向谱进行描述，某时某地的海洋波浪场的所有统计特征均可从谱函数获取。星载 SAR 能实现多波段、多极化、多视向、多俯角观测海浪，提供大范围、高精度的实时动态海面波浪场信息和二维海浪方向谱资料。二维海浪谱的测量有助于对海浪这种复杂的随机过程的内部物理结构和外在统计特性进行研究，也可为港口、海岸工程以及海上石油平台建设提供必不可少的波高、波长和波向等相关参数。

内波是一种海洋中尺度现象，对海洋工程、海洋军事和海洋科学具有重要意义，但由于内波发生的随机性，采用常规观测方法获取长时间大范围的内波观测资料要比获取海面风场和海浪等其他海洋要素的观测资料困难得多，星载 SAR 因而成为内波探测极

为重要的技术手段。实际上， SAR 所观测的具有明显图像特征的海洋现象，除海面波浪外，最经常、最广泛呈现的现象就是内波。自 20 世纪 70 年代末开始，美国 Seasat、欧空局 ERS－1/2 和加拿大 Radarsat 等卫星上的 SAR 传感器获取了大量的内波图像，为内波研究提供了丰富的资料。内波大小、形状和频率不一，发生的深度也各不相同，而可以成像的仅占其中很小一部分，什么条件才是内波被 SAR 成像的有利条件？这些问题也需要由遥感仿真来予以回答。

此外，如果有可能建立 SAR 图像中的内波条纹特征与内波波要素之间的关系，那么就可从 SAR 图像中获取大量的信息，这些信息中有些是无法用常规测量技术获取的。经过多年的研究，人们对内波的 SAR 图像特征和内波的时空分布特征，已有较为充分的认识，如何从提取波长、波向等内波外在属性的研究中摆脱出来，进而对内波发生深度以及内波振幅等内波内在特性进行定量获取，是目前内波遥感以及内波研究尤为关注又亟需解答的问题。

1.2 国内、外研究现状

1.2.1 海面风场遥感

（1）海面风场遥感仿真

C 波段 VV 极化的 ERS－1/2 散射计海面风速反演模式—— CMOD4 是目前海面风场遥感的业务化运营模式之一。遥感仿真也表明它在不同海面风速、风向以及雷达入射角条件下的海面雷达后向散射截面与实测资料有较好的吻合（Stoffelen 1992）。

（2）海面风场遥感探测

ERS－1/2 卫星上装载着的散射计和 SAR 是两种采用相同极化方式、工作在相同波段的微波传感器，但却承担了不同的任务，非成像的散射计主要用于海面风场的测量，成像传感器 SAR 用于其他海洋现象的观测。 Alpers 和 Brummer（1994）在用 ERS－1 SAR 图像对海洋大气边界层涡旋的研究中，首次将 CMOD4 模式用于 SAR 的风速测量。其后，Vachon 和 Dobson（1996）对用该模式从 SAR 图像计算海面风速进行了较为系统的研究与评估，在风向已知的情况下，获得了与实测资料相比高于 ±1.5 m/s 的精度。Lehner 等（1998）从多数 SAR 图像中可见的风条纹中获取了海面风向信息，风向的误差仅为 ±5°，并用于 CMOD4 模式中计算风速。Horstmann 等（2000）利用与 ERS－1/2 SAR 有着不同极化方式的 RadarsatSAR 图像进行了海面风场反演研究，也获得了较好的结果。Vachon 和 Dobson（2000）则采用 CMOD－IFR2 模式对 Radarsat SAR 图像进行研究。Fetterer 等（1998）利用 ERS－1 SAR 图像对 CMOD4 和 CMOD－IFR2 模式进行了比较研究，与实测资料相比，反演风速的均方根误差分别为 1.1 m/s和1.3 m/s。国内在

这方面的研究才刚起步，到目前为止，仅王超和潘广东（2000）利用 SIR－C/X SAR 对南海海面风矢量进行了观测研究。

在海面风应力和阻力系数的遥感测量方面， Weissman 和 Graber（1999）利用散射计测得的风速对其进行估算，Grima 等（1999）不仅用 ERS－1/2 散射计计算了风应力，还将它作为环流模式的驱动力进行了敏感性研究，得到了较好的结果。目前还没有用 SAR 进行这方面研究的报道。

1.2.2 海浪遥感

（1）海浪遥感仿真

经过多年的研究与讨论，人们对 SAR 海浪成像的机理已经达成广泛的共识（Alpers 1981；K. Hasselmann 1985）。Alpers（1983）和 Bruning 等（1990）用 Monte－Carlo 方法分别对一维和二维 JONSWAP 海浪谱的 SAR 图像谱进行了仿真研究，K. Hasselmann 和 S. Hasselmann（1991）在包含倾斜调制、水动力调制和速度聚束调制等三种调制机制在内的 SAR 海浪成像机理的基础上，建立了海浪谱到 SAR 图像谱的非线性转换关系，并利用该关系对第三代海浪模式的 WAM 谱进行了 SAR 图像谱仿真研究，Zurk 和 Plant（1996）还对实际 SAR 图像谱和仿真 SAR 图像谱作了比较研究。这些研究对深入了解 SAR 海浪成像机理以及 SAR 图像谱与海浪谱的差异起到了重要作用，也为 SAR 图像谱的海浪谱反演提供了可能。

（2）海浪遥感探测

K. Hasselmann 和 S. Hasselmann（1991）的非线性转换关系是海浪谱反演的奠基之作，Bao 和 Zhou（1992）以及 Krogstad（1992）分别用不同的方法对该关系进行了重新推导。利用该关系，可以从 SAR 图像中反演得到海浪谱和海浪的波长、波向和波高（Bruning 等 1994；Hasselmann 等 1996；Plant 和 Zurk 1997；Monaldo 和 Beal 1998）。目前国际上使用信噪比定标后的 SAR 图像，采用线性（Plank 和 Zurk 1997）或非线性反演模式（如 Bruning 等，1994），以 WAM 谱作为输入谱计算波高。该方法需要假设图像的噪声分布。Engen 和 Johnsen（1995）还开发了利用交叉谱从 SAR 单视复图像中反演海浪谱的技术。以上反演方法中，均采用实测谱或海浪数值模式的预报后报谱作为输入谱。Mastenbroek 和 de Valk（1997）利用 ERS－1/2 上的散射计测得的风场结合参数化风浪谱反演 SAR 海浪图像中的风浪谱，将 SAR 图像谱中减去风浪谱和噪声谱后的剩余部分当作是有较长波长的涌浪谱。何宜军（1999）也用参数化海浪谱作为输入谱进行了海浪方向谱反演的研究。目前，星载 SAR 已成为全天候、全天时、高分辨率探测全球海浪的新的技术手段，并用于海浪数值预报模式（如 WAM）的数据同化中（Hasselmann 等 1994，1996）。

但是，星载 SAR 海浪遥感技术还存在着一些问题。海浪传播方向的 180° 不确定性

就是其中之一。除了使用作为输入谱的常规观测资料或海浪模式的预报谱外，目前只能使用单视复图像才能确定海浪的传播方向，其中有对单视复图像的每个个视（individual - look）图像进行时间序列分析的（Vachon 和 Raney 1989，1991），有对个视图像作图像谱相位移动处理的（Vachon 和 West 1992），也有计算个视图像间的交叉谱，用交叉谱的虚部确定海浪方向的（Engen 和 Johnsen 1995），其中，交叉谱方法是用得较多的，也是较为成功的一种。以上各种采用单视复图像确定海浪方向的方法，均需要对复图像进行分视（split - look）处理，获得 2 ~ 3 个个视图像，但由于星载 SAR 的相干积分时间较短（如 ERS - 1/2 和 Radarsat SAR 的名义积分时间约为 0.6 s，JERS - 1 SAR 的名义积分时间小于 1.7 s，而其实际相干积分时间比名义积分时间还要短），分视处理非常困难（Ouchi 等 1999）。此外，由于在单视复图像中无法直观地观察到海浪条纹，需要将它转化为一般实图像才能确定该幅图像是否含有海浪信息及其所处位置。这些都不利于海浪探测的业务化运作在 Mastenbroek 和 de Valk（1997）的参数化方法中，风浪谱的传播方向由风向确定，是一种新的思路，不过其中涌浪谱 180°方向模糊问题仍然无法解决。为此，开发一种简便易行的波向确定技术非常必要。

1.2.3 内波遥感

（1）内波遥感仿真

人们利用 SAR 对内波的观测几乎是与对海浪的观测同时进行的（Elachi 和 Apel 1976），但是内波的成像机理却是在较晚的时候才被揭示出来（Alpers 1985）。Thompson 和 Gasparovic（1986）对内波在 L 波段和 X 波段 SAR 图像上的特征进行了仿真研究，并与内波在这两个波段的 SAR 图像中的实际特征作了比较，验证了 Alpers（1985）的理论：SAR 对内波的成像机理包括波流相互作用、水动力相互作用和 Bragg 相互作用。Liu（1988）采用 KdV 方程和二层海洋模型对纽约湾的非线性内波的演化过程进行了数值模拟，得到了与实验结果一致的结论其后，Liu 等（1998）又通过数值模拟的方式对 SAR 图像上的下降型内波和上升型内波不同的图像特征作了解释，并提出了这两种类型内波在跃层深度等于水深一半处相互转换的观点。

星载 SAR 对内波探测的能力与 SAR 工作波段、极化方式和雷达波束入射角等雷达参数密切相关。Schmullius 和 Evans（1997）曾利用 SIR - C/X SAR 多波段多极化资料讨论了内波遥感的最佳雷达波段和极化方式。由于资料的限制，他们无法比较全面地分析内波遥感的最佳雷达参数。此外，在相同的雷达参数条件下，会出现某些海域的内波能被 SAR 成像，另一些海域的内波不能被成像的情况，甚至在同一海域，也会出现类似的情况模拟仿真是研究星载 SAR 内波遥感最佳雷达参数和最佳海洋环境的一种重要技术手段，但目前国内、外未曾开展此项工作。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（2）内波遥感探测

从 SAR 图像上提取内波波要素的信息是内波探测的目的，内波的波长和波向容易从图像中直接测量得到，也可以通过计算内波的二维波谱而获得（Liu 等 1998；Hsu 和 Liu 2000）。内波的波速可以在已知跃层深度的情况下，利用内波的弥散关系计算出来（Alpers 和 Salusti 1983；Zheng 等 1993）。Porter 和 Thompson（1999）以及 Li 等（2000）利用关于内波产生的半日潮假定和内波的弥散关系，从 SAR 内波图像中计算了内波的波速和发生深度，与实测结果较为吻合。内波的振幅则是一个难以测量的量，Apel 和 Gonzalez（1983）曾经对此进行过研究，但至今还没有合适的办法从 SAR 图像中获取。

1.3 研究内容

1.3.1 海面风场遥感

（1）海面风场遥感仿真

为了将 CMOD4 模式用于 HH 极化的 Radarsat SAR 图像风场反演，对该模式在不同海面风速、风向、雷达入射角、极化条件下的海面雷达后向散射截面以及不同的极化比模式进行了遥感仿真。

（2）海面风场遥感探测

结合散射计风速反演模式和极化比模式，利用 Radarsat SAR 图像开展了海南省附近海域近岸海面风场遥感探测研究，借助 SAR 图像纹理特征解决了风向 180° 不确定性，同时对几种不同模式反演海面风速的精度作了比较（杨劲松等 2001a）。此外，利用反演的海面风速对海面阻力系数、风应力以及空气动力学粗糙长度等海洋和大气要素进行了估算（杨劲松等 2001b）。

1.3.2 海浪遥感

（1）海浪遥感仿真

利用 Hasselmann 非线性转换关系，对适合我国海区的文氏二维海浪谱的 SAR 图像谱进行了仿真研究，并对图像谱特征以及倾斜调制、水动力调制、距离向聚束调制和速度聚束调制等四种调制传递函数在 SAR 海浪成像中的作用进行了讨论（Yang 等 1998；杨劲松等 1999）。

（2）海浪遥感探测

从海浪传播理论入手，利用海浪的弥散关系，给出了一种直接由 SAR 实图像消除海浪波向 180° 不确定性的方法（Yang 等 2001a）。以文氏海浪谱为输入谱，采用逐次

迭代方法对 Hasselmann 非线性转换关系进行逆向求解，从经过辐射定标的 SAR 图像反演得到了二维海浪谱，并利用海浪谱得到了海浪波长、波向和波高（杨劲松等 2001）。利用台湾东北部海域海浪的 ERS－1 SAR 图像进行了实例研究，对该方法进行了验证。

1.3.3 内波遥感

（1）内波遥感仿真

根据星载 SAR 内波成像机理，建立了包括 KdV 方程、作用量平衡谱方程和 Bragg 散射在内的 SAR 内波遥感仿真模型，模拟内波引起的海面雷达后向散射截面的变化，并在此基础上探讨内波 SAR 图像特征、SAR 内波探测与内波振幅和跃层等的关系，以及 SAR 内波遥感的最佳雷达参数（Yang 等 2001b）。

（2）内波遥感探测

在上述内波遥感仿真模型基础上，建立了 SAR 图像中内波亮暗条纹间距与孤立内波半振幅宽度之间的关系，并给出了计算内波振幅的方法。同时，利用 ERS－1 SAR 图像对台湾东北部海域内波波速、深度和振幅进行了实例研究（Yang 等 2001c）。

1.4 创新点

（1）海浪传播方向的确定

利用星载 SAR 图像获取海浪谱时，存在海浪传播方向的 180。不确定性。目前国际上仍未找到直接由 SAR 图像确定海浪传播方向的方法，仅能借助于常规观测资料和 SAR 复图像。本书根据海浪传播理论和海浪的弥散关系，提出了由 SAR 图像确定海浪传播方向的一种方法，解决了这一技术难题。

（2）海浪波高的计算

波高是海浪的一个重要要素。本书提出了由星载 SAR 图像计算海浪波高的一种新方法。该方法使用辐射定标后的 SAR 图像，采用非线性反演模式，以文氏海浪谱作为输入谱计算波高。目前国际上使用信噪比定标后的 SAR 图像，采用线性（Plank 和 Zurk 1997）或非线性反演模式（Bruning 等 1994），以 WAM 谱作为输入谱计算波高。与国外的计算方法相比，该方法不用假设图像的噪声分布，以文氏海浪谱作为输入谱，计算更方便，更适合中国海区。

（3）内波的遥感仿真

星载 SAR 对内波探测的能力与 SAR 工作波段、极化方式和雷达波束入射角等雷达参数以及内波传播方向、振幅、跃层深度和跃层相对密度差等密切相关。模拟仿真是对此进行研究的一种重要技术手段，但国内、外未曾开展此项工作。本书通过对内波的遥

感仿真研究，较为系统地分析了 SAR 内波探测的最佳雷达参数以及 SAR 内波探测与内波传播方向、振幅和跃层等的关系。

（4）内波振幅的计算

内波的振幅很难测量，至今尚无合适的办法从 SAR 图像中获取。本书根据星载 SAR 内波成像机理，利用 KdV 方程、作用量平衡谱方程和 Bragg 散射理论，推导出 SAR 图像中内波亮暗条纹间距与孤立内波半振幅宽度之间的关系，并利用该关系给出了从 SAR 图像中计算内波振幅的方法。

第 2 章　SAR 海洋遥感基本原理

2.1　引言

SAR 是一种高分辨率的脉冲 - 多普勒成像雷达，与靠增加天线长度提高方位分辨率的真实孔径雷达（Real Aperture Radar，RAR）不同，它利用散射信号的多普勒频移获得较高的方位分辨率，同时以发射压缩的微波短脉冲获得较高的距离分辨率，使其以卫星或航天飞机为平台对地进行观测成为可能。

由于 SAR 对地观测的方式为侧视，即沿垂直于平台运动方向斜向下进行观测，因此它只能接收来自地面或海面等目标的后向散射波，其他方向的散射或反射波不能被其接收。对于 SAR 海洋遥感来说，在一定的雷达参数和轨道条件下，海面的粗糙程度是影响雷达后向散射的主要因素。诸如风、流、海浪、锋面、海面油膜、涡、内波和水下地形等海洋要素的 SAR 遥感，均建立在改变海面粗糙程度的基础上。

本章将对 SAR 海洋遥感的基本理论作简要论述，其中包括 SAR 的合成孔径技术及其对静止和运动点目标的成像原理、海面微波散射的基本概念以及 Bragg 散射模型和二尺度散射模型。这些内容是以后各章的基础。

2.2　雷达成像几何关系

图 2.1 是一般成像雷达系统的成像示意图。在观测方向上，从雷达到地面的距离称为斜距 (R)，斜距在地面上的投影称为地距，平行于雷达运动轨迹的方向称为方位向，与之垂直的方向称为距离向。如图 2.1，雷达天线发射微波脉冲，以入射角 θ 侧视照射天底轨道一侧的被测表面，微波脉冲在仰角方向的波束宽度为 β_e。这种侧视设计是为了消除天底轨道两侧由两个等距对称点产生的左右模糊。当观测平台在其高度为 H 的轨道上运行时，雷达沿方位向画出一条连续的观测带。观测带的刈幅宽度 S_R 由下式给出：

$$S_R \approx \frac{H\beta_e}{\cos^2\theta} = \frac{\lambda_R H}{W_R \cos^2\theta} \tag{2.1}$$

式中，λ_R 为雷达波长；W_R 为雷达天线宽度。

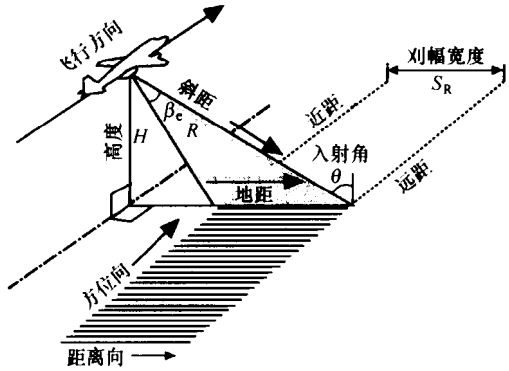


图 2.1　雷达成像示意图

以上假设 $\beta_e \ll 1$，并且不考虑地球的曲率。对于 Seasat SAR，$\lambda_R = 23$ cm，$H = 800$ km，$\theta = 23°$，$W_R = 2.16$ m，其观测带的刈幅宽度约为 100 km。

2.3　真实孔径雷达的分辨率

2.3.1　距离分辨率

距离分辨率指距离向上可分辨的两点的最小距离。如果两点间的距离为 x_r，则两点的回波时间差为

$$\Delta t = \frac{2x_r}{c}\sin\theta \tag{2.2}$$

式中，c 为光速。

由于雷达可分辨的最小时间差等于其脉冲的持续时间 τ_R，因此距离分辨率为

$$\rho_r = \frac{c\tau_R}{2\sin\theta} \tag{2.3}$$

由式(2.3)可知，要获得 25 m 的距离分辨率，所需要的脉冲约为 10^{-8} s。如此短的脉冲不可能有足够的能量把回波信号提高到噪声电平以上，因为回波信号能量与发射功率的 R^{-4} 倍成比例。这就需要采用脉冲压缩技术，将长脉冲压缩为非常短的脉冲，以

便获得高的距离分辨率（斯科尔尼克　1978）。

2.3.2　方位分辨率

方位分辨率指沿一条方位线，也就是在一条等延迟线上，可分辨的两点的最小距离。显然，方位分辨率等于天线足迹的宽度，因为在天线扫描跨越足迹宽度区间的时段内，所有足迹内沿扫描线上的点的雷达回波同时到达接收天线。

根据天线理论，雷达方位向波束宽度 β_a 与发射天线的长度 L_R 成反比，即

$$\beta_a = \frac{\lambda_R}{L_R} \tag{2.4}$$

于是，距离 R 处的方位分辨率为

$$\rho_{Ra} = \beta_a R = \frac{\lambda_R H}{L_R \cos\theta} \tag{2.5}$$

这意味着要获得高方位向分辨率必须增加天线长度（杨士中　1981）。

一般来说，SAR 工作在 3～30 cm 的波长范围内，高度大约为 750 km 的低轨道卫星，即使星下点要达到 100 m 的地面分辨率也要求天线的长度在 225 m～2.25 km 之间。目前的空间技术显然做不到这一点。因此，当分辨率要求很高时，真实孔径雷达不能用于卫星轨道。

2.4　SAR 工作原理

2.4.1　合成孔径原理

为了提高方位分辨率，雷达工程师使用了合成孔径技术，利用该技术通过实际天线运动时，接收一系列连续波束，产生一个理想的天线，称为“合成孔径”，它是 SAR 的基础。首先，雷达飞越成像区域时，记录一系列连续信号，并保证整个过程中目标在天线波束以内；其次，信号序列必须处理成可识别的图像，图像中每个目标在处理过程中都是“聚焦的”。

合成孔径原理可以用两种方法解释，其结果是一样的，这两种方法分别是合成列阵法和 Doppler 合成法（Elachi　1987）。为了充分阐述合成孔径原理，以下对这两种方法都加以说明。

（1）合成列阵法

假定天线长度为 L_R 的雷达传感器以速度 V 移动，目标 P 从进入波束照射区到离开

需要全本请访问 www.ertongbook.com

该波束照射区的时间 T_S 内，其雷达回波的振幅和相位均被记录下来，然后在处理器中通过积分运算合成为一个线列阵，时间 T_S 也因此被称为合成孔径时间或积分时间（图 2.2）。天线在合成孔径时间内的移动距离 VT_S，称为合成孔径长度 L_{eff}，它相当于一个大的真实孔径雷达的天线长度，等于雷达波束在地面上方位向的照射宽度，即

$$L_{\text{eff}} = \frac{R\lambda_{\text{R}}}{L_{\text{R}}} \tag{2.6}$$

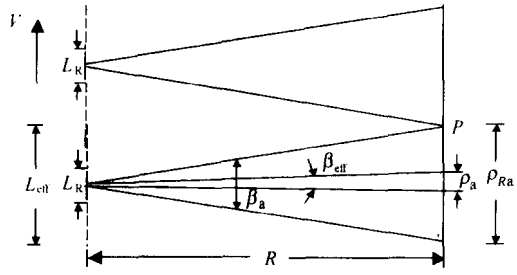


图 2.2　波束宽度和方位分辨率示意图

由于合成孔径的形成需要双程路径，即雷达信号在发射和接收的过程中均产生了相移，所以其方位向有效波束宽度 β_{eff} 是相同长度 RAR 的一半，即

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{\lambda_{\text{R}}}{2L_{\text{eff}}} \tag{2.7}$$

于是，由式（2.6）和式（2.7）可得 SAR 的方位分辨率为

$$\rho_{\text{a}} = \beta_{\text{eff}}R = \frac{L_{\text{R}}}{2} \tag{2.8}$$

这是 SAR 所能达到的最佳方位分辨率，它仅仅是构成合成孔径的实际天线长度的一半，与距离和波长无关，并且越小的（而不是越大的）实际天线孔径所能达到的方位分辨率越高。这一点可以这样理解：天线越小，雷达波的地面足迹越大，形成的合成孔径越长，相当于获得了很长的实际天线，从而达到更好的方位分辨率。雷达距离越远，地面足迹越大，合成孔径也越长，从而抵消了距离增加对分辨率的负面影响。实际天线的尺寸减小到何种程度要受产生足够信号功率的限制，但是非常高的分辨率在理论上是可能的。

当然，实际 SAR 的分辨率一般介于其天线长度的一半到一倍之间。如果为了降低斑点而采取多视处理，则方位分辨率也会降低。

（2）Doppler 合成法

如图 2.3，当雷达飞越目标时，随着 P 进入波束，来自 P 的回波先有一个正的 Doppler 频移，然后频移逐渐降为零，随着 P 退出波束，频移逐渐变为负值。如果雷达发射信号的频率为 f_0，则来自 P 的回波谱覆盖 $f_0 \pm f_D$ 波段，其带宽 $2f_D$ 称为 Doppler 带宽，其中 f_D 的大小为

$$f_D = \frac{2V}{\lambda_R}\sin\frac{\beta_a}{2} \approx \frac{V\beta_a}{\lambda_R} \tag{2.9}$$

利用式（2.4），可得

$$f_D = \frac{V}{L_R} \tag{2.10}$$

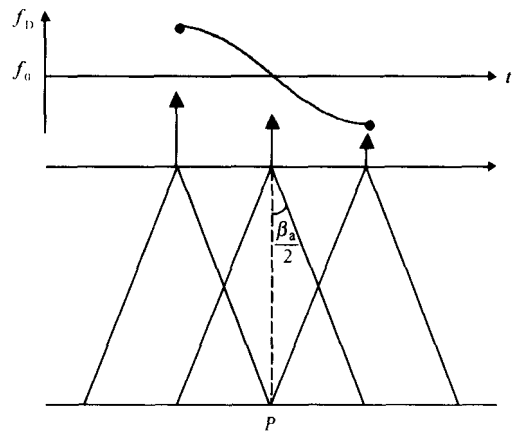


图 2.3　目标的 Doppler 频移

考虑 P 附近的一个目标点 P'，它们在方位向上的距离为 x_a。P' 点的 Doppler 频移特性与 P 点相同，只有一个时间差 $t_a = \frac{x_a}{V}$。理论上，通过对带宽为 $B_D = 2f_D$ 的信号进行处理，所能分辨的最短时间差为

$$t_{min} = \frac{1}{B_D} = \frac{1}{2f_D} = \frac{L_R}{2V} \tag{2.11}$$

于是，最佳的方位分辨率为

$$\rho_a = Vt_{min} = \frac{L_R}{2} \tag{2.12}$$

这与式（2.8）是一样的，表明 P 和 P' 两点能被雷达区分的最短距离为 $\frac{L_R}{2}$。

2.4.2 脉冲重复频率

实际应用中，SAR 使用的是一系列脉冲，而不是连续信号。发射脉冲的脉冲重复频率（PRF）要足够高，根据 Nyquist 采样判据，PRF 至少必须是最大 Doppler 频移的两倍（Harger 1970；Hovanessian 1980），即

$$\mathrm{PRF} \geqslant 2f_{\mathrm{D}} = \frac{2V}{L_{\mathrm{R}}} \tag{2.13}$$

这意味着雷达每移动半个天线长度，至少必须采一次样（发射一个脉冲）。例如，低高度地球轨道卫星的轨道速度为 7 km/s，长度为 10 m 的天线，相应的 PRF 的最小值为 1.4 kHz。

另一方面，连续的脉冲之间应相隔足够远，以保证在任何时刻只能有一个脉冲照射在被测表面上，否则在距离向采样过程中，从不同的照射区域（如近距和远距）反射回来的两个连续脉冲将被同时接收因而产生模糊（Harger 1970；Hovanessian 1980）由图 2.4 可知

$$\frac{c}{2\mathrm{PRF}} \geqslant R_S = S_{\mathrm{R}}\sin\theta \tag{2.14}$$

整理后得到

$$\mathrm{PRF} \leqslant \frac{c}{2S_{\mathrm{R}}\sin\theta} \tag{2.15}$$

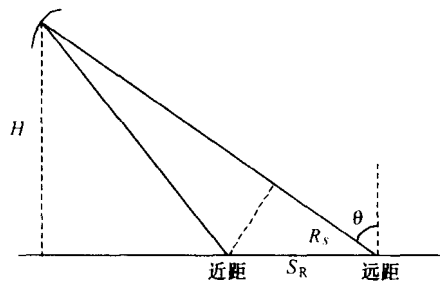


图 2.4 距离向采样示意图

式（2.13）和式（2.15）给出了 PRF 的上下限，这是避免产生模糊所必须的。要同时满足这两个条件，必须

$$\frac{2V}{L_R} \leqslant \mathrm{PRF} \leqslant \frac{c}{2S_R \sin\theta} \tag{2.16}$$

将式（2.1）代入上式中，可以得到天线面积 $L_R W_R$ 的下限（谢寿生和徐永进 1987）

$$L_R W_R \geqslant \frac{4HV\lambda_R \sin\theta}{c\cos^2\theta} \tag{2.17}$$

如果将式（2.8）或式（2.12）代入式（2.16）中，则得到刈幅宽度（S_R）与方位分辨率（ρ_a）的相互制约关系

$$\frac{S_R}{\rho_a} \leqslant \frac{c}{2V\sin\theta} \tag{2.18}$$

因此，在改善方位分辨率和获得较宽刈幅宽度两方面要综合考虑（罗滨逊 1989）。

2.4.3 固定点目标的回波

如图 2.5，假设载机以速度 V 匀速前进，而目标不动，于是在雷达波束的照射范围内，目标 P 在任意时刻 t 离雷达的距离 $\mathscr{R}(t)$ 为

$$\begin{aligned}\mathscr{R}(t) &= (R_0^2 + V^2t^2)^{1/2} \\ &\approx R_0 + \frac{V^2t^2}{2R_0}\end{aligned} \tag{2.19}$$

式中，R_0 为 $t=0$ 时刻的参考距离，并考虑到关系 $Vt \ll R_0$。

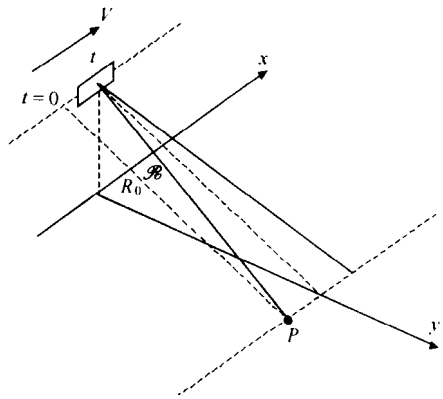


图 2.5 固定点目标成像示意图

如果雷达发射振幅为 A_t 的信号由下式表示

$$S_t(t) = A_t \exp\left(i\frac{2\pi ct}{\lambda_R}\right) \tag{2.20}$$

则经目标散射后的由雷达接收到的回波信号为

$$\begin{aligned} S_r(t) &= A_r \exp\left[i\frac{2\pi c}{\lambda_R}\left(t - \frac{2\mathscr{R}(t)}{c}\right)\right] \\ &\approx A_r \exp\left[i\left(-\frac{4\pi R_0}{\lambda_R} + \frac{2\pi ct}{\lambda_R} - \frac{2\pi V^2 t^2}{R_0 \lambda_R}\right)\right] \end{aligned} \tag{2.21}$$

这是一个线性调频信号，其中， A_r 为回波信号的复振幅，包括振幅和相位，它载有目标后向散射截面的信息（谢寿生和徐永进 1987; Fitch 1988）。该信号经过处理以后，可以得到反映目标后向散射截面的 SAR 图像。

2.4.4 目标运动的影响

以上的讨论均假设目标 P 静止不动。当目标 P 运动时，对 SAR 成像是有不利影响的。如图 2.6，假定目标在距离向存在速度分量 u_r 和加速度分量 a_r，在方位向存在速度分量 u_a 和加速度分量 a_a。

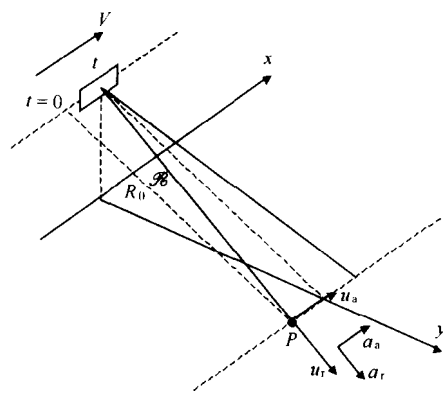


图 2.6 运动目标成像示意图

此时，在雷达波束的照射范围内，目标 P 在任意时刻 t 离雷达的距离 $\mathscr{R}(t)$ 为

$$\begin{aligned} \mathscr{R}(t) &= \left[(R_0 + u_r t + \frac{1}{2}a_r t^2)^2 + (Vt - u_a t - \frac{1}{2}a_a t^2)^2\right]^{1/2} \\ &\approx R_0 + u_r t + \left[a_r R_0 + (V - u_a)^2\right]\frac{t^2}{2R_0} \end{aligned}$$

$$\approx R_0 + \frac{V^2 t^2}{2R_0} + u_r t + (a_r R_0 - 2u_a V)\frac{t^2}{2R_0} \tag{2.22}$$

以上近似，用到了关系 $Vt \ll R_0$，$u_a \ll V$ 和 $u_r \ll V$，并略去了 t 的高次项（Raney 1971）。

将式（2.22）与式（2.19）进行比较，可知，式（2.22）多出了两项，这两项包括 u_r、u_a 和 a_r 的贡献，而相比之下 a_a 对 $\mathscr{R}(t)$ 的影响很小，可以不予考虑。

于是，由于目标的运动，使雷达接收到的回波信号变为

$$S_r(t) \approx A_r \exp\left[i\left(-\frac{4\pi R_0}{\lambda_R} + 2\pi \frac{c - 2u_r}{\lambda_R} t - 2\pi \frac{V^2 + a_r R_0 - 2u_a V}{R_0 \lambda_R} t^2 \right) \right] \tag{2.23}$$

下面分别讨论 u_r、u_a 和 a_r 对 SAR 成像的影响。

（1）来自 u_r 的影响

距离向的运动速度 u_r 将会产生方位向图像位移、距离向模糊和振幅衰减三种效应（罗滨逊 1989）。

其中方位向图像位移是由来自距离方向上运动的目标的反射信号中掺入了 Doppler 位移而产生的，这意味着除了由于卫星的运动而产生的线性衰减频移外，以速度 u_r 背离雷达而运动的目标的每一反射都有 $\frac{2u_r}{\lambda_R}$ 的频率衰减。在孔径合成过程中，这种情况使得目标不能落在图像合适的位置上，而要朝负的方位向偏移。同样，如果目标向着雷达运动，其图像上的位置则向着正的方位向偏移。假定雷达平台的航速与其地面速度相同，位移 Δx 可由下式给出（Raney 1971；Allan 1983）：

$$\Delta x = -\frac{R u_r}{V} \tag{2.24}$$

要使方位向图像位移忽略不计，即要求 $|\Delta x| < \rho_a$，必须满足条件

$$|u_r| < \frac{V \rho_a}{R} \tag{2.25}$$

当 u_r 值足够大，使得在雷达波束通过目标上空的时间（即合成孔径时间）内，该目标能通过一个或多个距离分辨单元，这种距离向移动，使图像产生距离向模糊（Raney 1971）。为了避免距离向模糊，在合成孔径时间内的目标位移距离必须小于距离向分辨率，即

$$\frac{L_{eff} |u_r|}{V} < \rho_r \tag{2.26}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com