

# 海洋内波 SAR 影像成像理论

## Theory about synthetic aperture radar imaging of oceanic internal waves

李海艳, 杜 涛

(中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266003)

中图分类号: P731.24; TP79; P715.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2005)10-0086-04

SAR 是一种主动式微波成像传感器, 通过测量海面后向散射信号的幅值及其时间相位, 能产生海面后向散射强度在海面分布的图像。这种图像能极为详细地显示出海面后向散射强度变化的细节, 其分辨率为几米到几十米的数量级。此外, 由于 SAR 工作在微波波段, 即使在黑夜也能正常工作, 它发射的微波可以穿透云层, 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, 所以目前 SAR 已成为海洋观测的重要手段之一。

从 SAR 图像上提取内波要素的信息是内波探测的主要目的, 通过分析内波 SAR 图像可以认识和解

释内波的海表现形式<sup>[1]</sup>。内波波长和波向既可从图像中直接测量得到, 也可以通过计算内波的二维波谱获得<sup>[2]</sup>; 内波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<sup>[3]</sup>; 依据 SAR 影像计算的内波波速和发生深度<sup>[4]</sup>, 与实测结果较为吻合。

潮成内波是表面潮和海底地形共同作用产生的、具有多种影响的一种海洋内波<sup>[5]</sup>。通过海洋遥感手段, 尤其是星载 SAR, 对潮成内波和其他海洋内波进行观测具有很多优点。因此, 了解内波 SAR 影像的成像机制对研究海洋内波是很有益的。

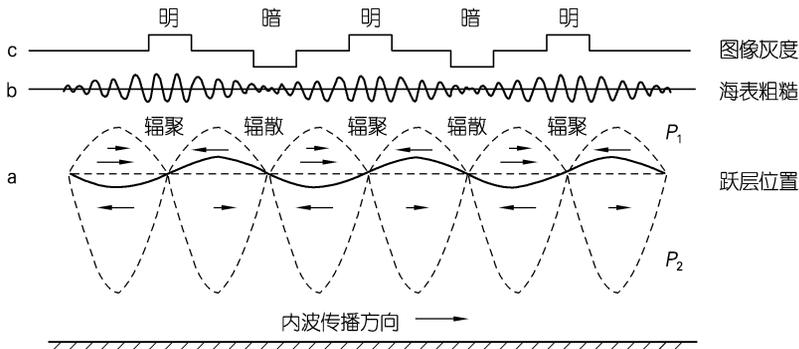


图 1 内波、表面波和 SAR 图像灰度关系

### 1 内波 SAR 影像成像过程

20 世纪 80 年代大量的实验和理论研究表明, SAR 对内波成像主要包含以下 3 个物理过程: (1) 内波在传播过程中引起表层流场发生辐聚辐散, 如图 1a; (2) 变化的表层流场通过调制海表微尺度波, 改变了海表的粗糙度, 如图 1b; (3) 粗糙度的改变影响了海面雷达后向散射的强度, 使 SAR 图像中的灰度值发生变化; 粗糙海表面的后向散射强度大, 在

SAR 图像上呈现亮条纹, 反之则呈现暗条纹, 如图 1c 所示。

收稿日期: 2003-10-22; 修回日期: 2004-05-31

基金项目: 山东省自然科学基金资助(Y2000E04); 微波成像技术国家重点实验室基金资助项目(51442020303JW1002)。  
 作者简介: 李海艳(1976), 女, 满族, 河北唐山人, 硕士研究生, 目前从事海洋内波合成孔径雷达研究, 电话: 0532-82032409



## 2 内波 SAR 影像成像理论

SAR 工作在微波段,由工作微波与海表微尺度波共振成像。凡能影响这种共振的海洋现象都可通过 SAR 成像。完整的海洋内波 SAR 影像成像理论应该包括内波动力特征和外部因素这两方面的影响。被广泛接受的内波 SAR 影像成像原理是 Alpers 于 1985 年提出的水动力学调制模式,它基于表层内波流场对海表微尺度波的作用,对观测到的 L-Band 内波 SAR 影像中亮暗相间的条纹进行了合理的解释。另一种理论进一步考虑了环境因素如表面膜等对内波 SAR 影像成像的影响,该理论认为在内波流场辐聚区表面膜聚集程度增加,因而有效地衰减了表面微尺度波,使雷达波后向散射强度减弱,导致在 SAR 图像上只出现暗条纹,而不是亮暗相间的条纹。

### 2.1 水动力学调制理论

在不考虑表面膜等环境因素的情况下,Alpers 最早提出了内波 SAR 影像成像的水动力学调制理论。1978 年 Valenzuela 指出:在雷达工作波长和入射角范围内,雷达波的后向散射以 Bragg 散射为主。70 年代前后提出的 Bragg 共振散射理论将标准化雷达散射截面与海表微尺度波波谱联系起来。基于以上这些理论,Alpers 发现:内波成像问题实际上是内波流场对海表微尺度波的调制改变了微尺度波的波谱,这种变化可通过雷达波后向散射截面强度的相应改变反映出来;由于观测到的内波波长远大于 Bragg 波,所以可以用弛豫时间(内波过境时,变化的内波流场产生的应力作用到海表微尺度波时,微尺度波的非平衡态能持续的时间。)近似来描述流和短表面波间的相互作用,用缓变流上短波的波作用量方程来描述内波流场对表面波的调制,并将波作用量方程和 Bragg 散射模式相结合,最终得到当流场方向与雷达视方向一致时,内波过境时雷达波后向散射截面与 Bragg 波波谱密度间的一阶关系。即,向散射截面  $\sigma$  与 Bragg 波的谱能密度、波作用量密度与内波流场梯度间的关系为:

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{\delta E}{E_0} = \frac{\delta N}{N_0} = \alpha \frac{\partial U}{\partial x}$$

其中  $\sigma_0$  是无内波经过时雷达波的后向散射截面,  $\delta\sigma$  是有、无内波经过时雷达波后向散射截面的改变量;  $E_0$  是无内波经过时 Bragg 波的能量密度,  $\delta E$  为有、无内波经过时表面波能量密度改变量;  $N_0$  是无内波经过时 Bragg 波波作用量,  $\delta N$  是有、无内波经过时 Bragg 波作用量的改变量。对于短表面波  $\alpha = -(4 + \mu)\beta$ ,  $\mu$  是 Bragg 波的群速度与相速度之比;  $\beta$  是弛豫率(弛豫时间的倒数);  $\frac{\partial U}{\partial x}$  是内波流场对表面

波的应变率。通过上式就把雷达波的后向散射截面与表面波的波谱和内波流场的梯度直接联系起来,可以解释内波 SAR 影像上清晰的亮暗相间的条纹。即,在内波流场梯度负值最大的地方,后向散射强度增加,在 SAR 上将出现亮条纹;反之,后向散射强度减弱,在 SAR 上将出现暗条纹。由于典型的线性内波应变率  $\frac{\partial U}{\partial x}$  是  $10^3 \text{ s}^{-1}$ , 弛豫时间  $\beta^{-1}$  是 40 s, 得到影像的对比度  $\delta\sigma/\sigma_0$  约为 0.2, 所以可以得到较清晰内波 SAR 图像。

自从 Alpers 的理论提出后,对内波 SAR 影像成像理论的研究又有了更深一步的发展。Thompson 等人于 1986 年在假定内波流场速度远远小于表面波群速度和内波流场的周期要远远大于表面波的弛豫时间的情况下,合理解释了 L 波段亮暗相间的内波 SAR 影像;同时指出: X 波段模式的结果比观测结果小一个量级,是由于理论里没有考虑内波对较大尺度(米量级)表面波的扰动对海表粗糙度的影响。1988 年 Gasparovic 等人进一步指出在受调制的表面波中只有一定波长的 Bragg 波受到内波流场的直接调制,如 L 波段的散射;短的 Bragg 波,如 X 波段的 Bragg 波由于弛豫时间太短,本质上并没有受到内波流场的直接调制。但是 X 波段的 Bragg 波将受到米尺度表面波的调制,它将骑行在米尺度的表面波上,使散射面倾斜,从而影响雷达波的后向散射。

1988 年 Thompson 等人强调指出 Alpers 所用的作用量方程源项中无非线性相互作用,非线性相互作用使能量由一个波段传到另一波段,这种效果是非常重要的;若有长表面波与内波流场相互作用产生较大的扰动时,这种扰动反过来会通过非线性或波的破碎产生毛细波影响短波谱。

考虑到低阶 Bragg 散射理论的不足, Roland 等<sup>[6]</sup>指出在计算后向散射截面时,应考虑完整的海洋表面波谱对 Bragg 散射的影响,并提出了改进的雷达波后向散射截面组合模式,它不仅包含了 Bragg 波对雷达波后向散射截面的直接贡献、长波对 Bragg 波的倾斜作用及风对海表 Bragg 波的影响,同时还兼顾了雷达波本身不同的波段、极化方式等对后向散射截面的影响。虽然此模式对于进一步解释内波 SAR 影像有很大的帮助,但计算繁琐且缺乏足够的技术支持。

虽然 Alpers 于 80 年代提出的基于水动力学调制的成像理论已被广泛接受并应用到内波 SAR 影像的分析中,在解释一些内波 SAR 影像的同时,其合理性也基本上得到了证明;而且,后来发展的改进模式更进一步地考虑了较长表面波的变化对雷达信号的影响,使该成像理论更加接近实际情况;但一些环境



因素如表面膜的影响,在该理论中还没有得到体现,因而内波 SAR 影像成像理论需要进一步发展。

## 2.2 内波 SAR 影像成像理论的进一步发展

### 2.2.1 表面膜对内波 SAR 影像成像过程的影响

有机物膜,即海表活性物质是海洋生物的副产品,它们在海表形成一层特别薄的膜。在低风速下,呈现为一块块的镜状区域。表面膜对表面微尺度波有很强的衰减作用,改变了海表的粗糙度,所以很容易被 SAR 观测到。

历史上,Ewing 于 1950 年首先提出用表面膜对表面波的作用来解释内波过境时的海表光滑区。80 年代,Ermakov 和 Pelinovsky 于 1982 年又进一步研究了存在表面膜时,内波对表面波的调制,提出了厘米尺度涟漪变平的量化模式。Ermakov 等指出:在微风条件下,可以观测到亮暗相间的条纹,这是因为在大陆架出现的内波流场重新分布表面膜,加强了某部分海区表面物质的积聚,同时使另一部分海区表面物质减少。

90 年代初 Ermakov 等<sup>[7]</sup>进一步发展了存在表面膜时,内波对海表微尺度波的调制理论。在波作用量平衡方程中考虑了膜的衰减作用,并和表面膜的守恒方程联立得到只考虑膜影响时表面波作用量的变化率  $K_f = (Y_0 - Y) / (B_0 - Y_0)$ 。其中  $Y, Y_0$ , 分别是内、无内波时,表面膜对微尺度波的衰减系数,  $B_0$  是无内波时弛豫率。该式量化了内波过境时表面膜对海表微尺度波的衰减作用。

当存在表面活性物质时,内波的海表现形式是动力学调制和膜调制共同作用的结果,但很难在方程中同时考虑这两种效果。Silva 等<sup>[8]</sup>基于前人的工作提出了克服此困难的一种方法:定义  $K = \delta N / N_0$ ,  $K$  是动力学和膜对短波的综合效果;假定动力学和膜的效果可以被独立地对待,组合常数  $K$  是动力学常数  $K_n$  和膜常数  $K_f$  的线性叠加。动力学常数  $K_n$  可以用 Alpers 理论中的形式;其中  $K_f$  利用 Ermakov 等<sup>[7]</sup>得到的结果。假定内波的特征尺度超过短表面波特征弛豫尺度(受内波流场扰动的表面波能量在风强迫和耗散的作用下达到新平衡的时间里表面波传播的距离),对于典型的海洋内波和厘米~分米范围的表面波,这个条件在海洋中很容易得到满足。Silva 等<sup>[8]</sup>的理论是基于 Alpers 理论并考虑表面膜对成像效果影响的一阶近似。以此理论为基础,Silva 对在伊比例亚大陆架南岸所观测到只暗内波 SAR 影像进行了较为合理的解释。

### 2.2.2 风对内波 SAR 影像成像过程的影响

作为环境因素,风对内波 SAR 影像的成像过程

是有一定影响的。在改进后的组合模式中<sup>[6]</sup>研究了迎风、逆风情况下雷达后向散射截面的变化,指出在这些情况下散射截面的不对称性,是由于长波对于 Bragg 波的调制作用引起的。在长波波前,微尺度波的振幅随着辐聚的表面流场在长波上升边缘的推移而增加,使海表粗糙度增加,雷达波的后向散射强度增强,波后的情况正相反。Ermakov 等<sup>[9]</sup>量化了风对表面波谱的影响,得到了与  $K_n, K_f$  并行的参数  $K_w = \frac{\beta - \beta_0}{\beta_0 - Y_0}$ 。考虑由于风速相对内波流场速度的改变,使经过内波场的表面波谱发生变化,可以解决大尺度内潮波成像问题。对大尺度内潮波(量级在几十千米以上)而言,海表微尺度波的尺度相对很小,所以内波流场的水动力学调制可以忽略,  $K$  是  $K_f$  和  $K_w$  的线性叠加,因而成像的长度尺度不受水动力学调制参数弛豫长度尺度的限制,可以对几十千米的海洋现象成像。Ermakov<sup>[9]</sup>等利用此理论合理解释 ERS-1 在伊比例亚大陆架所观测到大尺度内潮波 SAR 影像。

表面膜和风对内波 SAR 影像的影响,虽然也解释了一些现象,仍缺乏足够的实验数据支持,主要由于表面短波谱现在尚无确定的描述形式,缺少内波 SAR 观测和表面膜现场测量的同步数据。此外,在波作用量方程中没有考虑波波相互作用和波破碎项,所以表面膜对内波成像过程的影响需进一步的完善和发展。

综上所述,内波能在 SAR 上清晰的成像,决定性的因素是内波流场在海表产生的辐聚辐散对海表微尺度波的调制作用。此外,一些外部环境因素如,表面膜和风的影响也是需要考虑的。普遍接受的水动力学成像理论由于忽略了环境因素的影响,不能合理解释某些内波 SAR 影像。在此成像机理中,增加表面膜的影响后,即可合理解释所观测到只暗的内波 SAR 影像。而在量化了风对内波 SAR 影像成像过程的影响后,该理论可以合理解释大尺度内潮波的 SAR 影像。虽然内波 SAR 影像成像理论较为合理解释了一些现象,但在波作用量方程中没有考虑波波相互和波的破碎,且缺乏足够的实验数据验证已有的理论结果,所以内波 SAR 影像成像理论需要进一步的发展与完善。

#### 参考文献:

- [1] Liu A K, Chang Y S., Hsu M K. Evolution of nonlinear internal wave evolution in the East and South China Seas. [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 7 995- 8 008.
- [2] Porter D L, Thompson DR. Continental shelf param-

- eters inferred from SAR internal waves observations [J]. **J of Atmosphere and Oceanic Technology**, 1999, 16: 475– 487.
- [3] Li X F, Clemente Colon P, Friedman K S. Estimating oceanic mixed-layer depth from internal wave evolution observed from Radarsat-1 SAR[R]. University of Johns Hopkins: Johns Hopkins APL Technical Digest, 2000.
- [4] Brandt P, Rubino A, Quadfasel D, *et al.* Evidence for the influence of Atlantic-Ionian stream fluctuations on the tidally induced internal dynamics in the Strait of Messina[J]. **J Phys Oceanogr**, 1999, 29: 1071– 80.
- [5] 杜涛, 方欣华. 潮成内波在物理海洋和相关学科中的影响[J]. **海洋预报**, 2003, 20(4): 50– 55.
- [6] Roland A W, Volkmar W. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data[J]. **J Geophys Res**, 1997, 102: 25 237– 25 250.
- [7] Ermakov S A. Film slick on the surface and some mechanisms of their formation [J]. **Dynamics of Atmosphere and Oceans**, 1992, 16: 278– 304.
- [8] Da Silva J C B. Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf 1. short-period internal waves [J]. **J Geophys Res**, 1998, 103: 4 659– 4 686.
- [9] Ermakov S A. Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf 2. Internal tide waves [J]. **J Geophys Res**, 1998, 103: 8 033– 8 043.

( 本文编辑: 刘珊珊)