

# 基于同步风场的机载 SAR 海浪参数反演方法

戈书睿<sup>1</sup>, 艾未华<sup>1,2</sup>, 袁凌峰<sup>3</sup>, 程玉鑫<sup>1</sup>, 马 烁<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 海军海洋水文气象中心, 北京 100071)

**摘要:** 针对机载合成孔径雷达(SAR)对海探测特点, 采用多入射角法从 SAR 数据本身得到与海浪参数反演区域时空匹配的同步海面风速和风向, 并结合线性变换关系, 计算得到海浪初猜谱对应的仿真 SAR 图像谱, 将仿真 SAR 图像谱和观测 SAR 图像谱输入代价函数中进行迭代运算, 通过非线性方程的解算得到最适海浪谱; 采用交叉谱法去除海浪传播 180°方向模糊, 最终得到海浪参数。论文提出的基于同步风场的机载 SAR 海浪参数反演方法, 充分利用了机载 SAR 海洋环境探测的优势, 解决了传统 SAR 海浪参数反演中初猜谱构造依赖外部风场的问题, 机载同步飞行试验的海浪参数反演结果与浮标观测值的有效波高、波向的均方根误差分别为 0.23 m 和 13.23°, 验证了该方法的有效性, 可为机载 SAR 海浪参数反演业务化提供支持。

**关键词:** 机载合成孔径雷达(SAR); 初猜谱; 交叉谱; 同步风场; 海浪参数反演

中图分类号: P732.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)11-0138-10

doi: 10.11759/hyxx20160204001

海浪是海洋环境的一个重要因素, 与人类的海上和海岸带活动息息相关。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得。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的建设提供必不可少的波高、波长和波向等相关参数。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动微波遥感成像雷达, 在真实孔径雷达的基础上, 采用合成孔径技术完成了方位向分辨率的提高, 使其能够更准确地探测海面<sup>[1]</sup>。高分辨率的特征决定了 SAR 对海面粗糙度引起的后向散射截面变化非常敏感, 可在 SAR 图像上直观地看到海浪的纹理特征。目前, 卫星是搭载 SAR 的主要平台, 但星载 SAR 受轨道限制, 探测难以满足定时定点的需求。高机动性的机载 SAR 可以弥补星载 SAR 时空上不能满足特定需求的不足, 实现全天候、全天时、不间断地对指定区域观测<sup>[2-3]</sup>。机载 SAR 相对于星载 SAR 具有机动灵活、高时空分辨率、入射角范围较宽和可实现对固定区域连续观测等特点<sup>[4-5]</sup>。近年来, 随着飞机包括无人机技术的飞速发展, 机载 SAR 探测成本进一步降低, 其应用更为广泛。

经过多年的研究, SAR 对海浪探测机制原理和

海浪反演算法取得了突破和发展。Hasselmann 和 Hasselmann<sup>[6]</sup>在同时考虑了线性的流体力学调制和倾斜调制以及非线性的速度聚束效应的基础上, 建立了海浪谱到 SAR 图像谱的非线性转换关系, 构造代价函数并采用迭代运算求最小值, 利用海浪数值预报结果作为初猜谱, 实现了 SAR 图像谱反演海浪方向谱, 该方法被称为 MPI 法(初猜谱法)。Bruning 等<sup>[7]</sup>改进了 MPI 法中的非线性求逆过程, 使运算时间缩短; Hasselmann 等<sup>[8]</sup>修改了价值函数并加入一个迭代环重新计算初猜谱, 使 MPI 算法更易收敛; Mastenbroek 等<sup>[9]</sup>提出半参数化反演方法(SPRA), 利用 SAR 波模式数据图像谱与同时获取的 ERS 散射计风矢量来估计风浪谱; Schulz-Stellenfleth 等<sup>[10]</sup>提出一种改进的非线性反演算法, 将 MPI 法和交叉谱法有机结合, 既可获得完整的海浪方向谱, 又消除了传播方向的 180°模糊; Schulz-Stellenfleth 等<sup>[11]</sup>提出

收稿日期: 2016-02-04; 修回日期: 2016-05-12

基金项目: 江苏省气象探测与信息处理重点实验室基金(KDXS1307); 国家自然科学基金(41475019, 41306187, 41505016)

[Foundation: Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, No.KDXS1307; National Natural Science Foundation of China, No.41475019, No.41306187, No.41505016]

作者简介: 戈书睿(1993-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事海洋遥感研究, 电话: 15996206607, E-mail: geshurui@126.com; 艾未华, 通信作者, E-mail: awhzjx@126.com

一个从 ERS-2SAR 波模式数据直接反演海浪参数的经验算法 CWAVE, 不需要第一猜测谱; 何宜军等<sup>[12]</sup>利用两种线极化图像信息将有关弱极化项剔除(流体动力学调制), 获得了仅包含倾斜项和极化调制项的雷达成像公式, 并在此基础上, 形成了利用海浪斜率谱反演海浪波长、波向和波高信息的新方法; 孙建等<sup>[13]</sup>提出利用 SAR 图像模式数据和对 SAR 图像谱处理得到的海面风向进行表面波参数反演; Li<sup>[14]</sup>提出一个应用 ENVISAT ASAR 波模式数据的经验算法 CWAVE\_ENV; 谢涛等<sup>[15]</sup>基于明暗恢复形状(SFS)技术, 提出一种依赖于调制传递函数的 SAR 海浪参数反演方法。

目前, MPI 法已被多家海洋预报中心采用, 并进行了业务化运行, 如欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和德国气象中心(DWD)。这些海洋预报中心本身可运行大型的海洋预报模式, 可为 MPI 法提供较为准确、全面的初猜谱。但是获得海浪预报模式的初猜谱较为复杂, 且全球海浪预报模式运行时间过长, 对于其他机构或学者而言, 获得初猜谱的难度较大。在不能获得海浪预报模式作为初猜谱时, 通常使用时空匹配的海面风场信息作为先验信息构造初猜谱<sup>[9]</sup>。

风场信息的获得通常依赖于 NCEP 再分析资料或散射计、微波辐射计等获取的海面风场探测资料。NCEP 再分析资料时空分辨率较差, 常不能满足探测海域高精度风场信息的需要; 若平台未能同时携带散射计、微波辐射计等可探测海面风场的载荷, 那么探测海域则无法获得时空匹配风场信息<sup>[16]</sup>。在星载 SAR 海面风场反演中, 存在风向依赖于图像风条纹、数值预报、散射计数据和浮标等背景场资料, 风向与 SAR 图像时空分辨率不匹配, 进而影响星载 SAR 海面风场反演精度等问题。现有的海浪参数反演算法, 或受制于载荷的局限性, 不能提供时空匹配的风场信息作为初猜谱先验信息, 影响反演海浪谱结果精度; 或受制于海浪预报模式的模拟时间过长, 不利于 SAR 探测海浪信息反演的精细化和业务化实施。

机载 SAR 平台高度低, 具有探测机动灵活, 高空分辨率等特点, 可以获取波长相对较小的风浪信息, 得到较为完整的海浪方向谱, 实现对指定区域海面实施精细化探测。根据机载 SAR 探测图像距离向入射角变化明显的特点, 采用多入射角法反演海面风场, 可从 SAR 数据本身反演得到高精度的同

步海面风场, 有效弥补星载 SAR 在海面风场探测方面存在的不足, 解决传统 MPI 海浪参数反演中同步海面风场信息获取困难和初猜谱构造依赖外部风场等问题, 有利于海浪参数反演精度的提高和业务化运行。因此, 本文根据机载 SAR 对海探测特点, 采用多入射角法反演海面风场, 据此得到高精度的同步海面风场信息, 采用 MPI 海浪反演算法, 结合海浪谱模型与方向函数构造海浪初猜谱, 根据 SAR 图像谱到海浪谱的非线性变换关系, 计算得到海浪初猜谱对应的仿真 SAR 图像谱, 将仿真 SAR 图像谱和观测 SAR 图像谱输入代价函数中进行迭代运算, 直至代价函数收敛到小于设定阈值, 输出最适海浪谱, 并利用交叉谱法去除海浪传播 180°方向模糊, 最终得到海浪参数。

## 1 SAR 对海浪成像理论和机制

### 1.1 SAR 对海浪成像理论基础

海面的雷达后向散射截面是 SAR 海洋遥感的重要物理参数, SAR 图像可认为是雷达后向散射截面的时空分布图。SAR 对海探测时的入射角范围主要在 20°~70°, 其回波信号主要来自海洋表面微尺度波引起的 Bragg 散射。根据 Bragg 散射理论模型<sup>[17-18]</sup>, 当入射角为  $\theta$ 、波长为  $\lambda_r$  的雷达波, 探测到的海浪上波长为  $\lambda_B = \frac{\lambda_r}{2 \sin \theta}$  的微尺度波时, 则发生 Bragg 共振散射, 波长为  $\lambda_B$  的波也称为 Bragg 波。

海表面是由各种振幅与波长的波叠加而成, 其波数谱是连续的, 要研究海面电磁波的散射, 必须根据不同尺度的海面波动对散射的不同作用对其进行分离, 这是研究 SAR 成像的基础。通常利用双尺度模式来研究后向散射。双尺度散射也称组合表面散射, 建立在 Bragg 散射模型的基础上, 它假定海面由大小两种尺度的波浪组合而成, 微尺度波与雷达波的波长同量级, 叠加在长波之上, 影响后向散射回波的强度和相位, 而长波则通过其倾斜的波面调制微尺度波, 改变雷达波的当地入射角, 从而对雷达的后向散射截面产生影响。

### 1.2 实孔径雷达对海浪成像机理

长波通过对 Bragg 波的调制作用在真实孔径雷达(RAR)上成像, 这种调制称为 RAR 调制。对于一个运动的海面, SAR 成像理论是基于 RAR 的成像理论基础之上, 随时间  $t$  变化的海表面高度和本地雷达

散射截面可以表示成传播波成分的叠加, 即:

$$\sigma(r, t) = \bar{\sigma} \left( \sum_K m_K \exp[i(\mathbf{K}r - \omega t)] + c.c \right)$$

$$\zeta(r, t) = \sum_K \zeta_K \exp[i(\mathbf{K}r - \omega t)] + c.c$$

其中,  $\bar{\sigma}$  表示雷达后向散射截面的平均值,  $\omega = \sqrt{gk}$  为重力波角频率, 表示深水区域的角频率,  $\zeta_K$  为波面的傅里叶系数,  $\mathbf{K} = (K_x, K_y)$  为长波波矢量,  $r = (x, y)$  为平面直角坐标,  $m_K$  表示散射截面调制系数,  $c.c$  为复共轭。其中,  $m_K = T_K^R$ ,  $T_K^R$  为 RAR 调制传递函数, 可分解为倾斜调制函数, 水动力调制函数和距离向聚束调制函数<sup>[6, 19]</sup>, 即:

$$T_K^R = T_K^t + T_K^h + T_K^{rb} \quad (1)$$

基于海浪谱理论, 可以推导出海浪方向谱  $F_K$  与 RAR 图像谱  $P_K^R$  的变换关系<sup>[6]</sup>, 其中上标 S、R 分别表示 SAR、RAR:

$$P_K^R = \frac{1}{2} \left( \left| T_K^R \right|^2 F_K + \left| T_{-K}^R \right| F_{-K} \right) \quad (2)$$

(2)式即为 RAR 对静止海面成像时, 海浪谱到图像谱的转换。

### 1.3 SAR 对海浪成像机理

由于海面处于不断运动中, 需要考虑后向散射元位置的变化  $\xi$  以及方位向上的模糊展宽  $\Delta x$ 。综合考虑运动效应, 由于速度聚束模式下的 SAR 与 RAR 图像之间的关系相对简单, 即将在 RAR 图像平面上的位置  $r'$  上的像元映射到 SAR 图像平面上与之对应的  $r = r' + \xi(r')$  上。那么在线性情况下<sup>[20]</sup>:

$$I_K^S = T_K^S \zeta_K + (T_{-K}^S \zeta_{-K})^*$$

图像谱为:

$$P_K^S = \frac{1}{2} \left( \left| T_K^S \right|^2 F_K + \left| T_{-K}^S \right| F_{-K} \right)$$

Hasselmann 等<sup>[6]</sup>得出了 SAR 图像谱到海浪方向谱的非线性变换关系:

$$P_K^S = \frac{1}{4\pi^2} \exp(-k_x^2 \beta f^v(0)) \int \exp(-i\mathbf{K}r) \exp(k_x^2 \beta^2 f^v(r)) \{1 + f^R(r) + ik_x \beta (f^{Rv}(r) - f^{Rv}(-r)) + k_x^2 \beta^2 [f^{Rv}(r) - f^{Rv}(0)][f^{Rv}(-r) - f^{Rv}(0)]\} d^2r \quad (3)$$

对图像谱到海浪谱的非线性变换关系式中第二个指数项做 Taylor 展开可得:

$$P^S(\mathbf{K}) = \exp(-k_x^2 \xi^2) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=2n-2}^{2n} (k_x \beta)^m P_{n,m}^S(\mathbf{K}) \quad (4)$$

(4)式即 SAR 对海浪成像的完全非线性关系的表达式。

经过一系列的变换和近似, 可以得到一个准线性近似:

$$P_{ql}^S = P_{ql}^R + P_{ql}^{vb} + P_{ql}^{int} \quad (5)$$

其中,  $P_{ql}^R$  为 RAR 项,  $P_{ql}^{vb}$  为速度聚束项,  $P_{ql}^{int}$  为相互作用项。

## 2 基于同步风场的机载 SAR 海浪参数反演原理与方法

### 2.1 反演方案

基于同步风场的机载 SAR 海浪参数反演总体反演流程如图 1 所示。首先, 对单视复数据作预处理, 提取强度数据, 并作去噪、滤波、傅里叶变换等处理得到反演所需的 SAR 图像谱, 用于反演海浪参数; 对虚部信息进行多视处理, 计算得到海浪交叉谱, 用于去除波向 180°模糊。其次, 根据机载 SAR 探测图像距离向入射角变化明显的特点, 采用多入射角法反演海面风场, 并构造初猜谱; 然后利用海浪谱到 SAR 图像谱的非线性变换关系, 计算得到初猜谱对应的仿真 SAR 图像谱。将仿真 SAR 图像谱和观测 SAR 图像谱输入代价函数中; 当代价函数小于设定的阈值时, 表明收敛, 从而迭代结束。否则, 对海浪谱进行调整, 重复上述迭代过程, 直到代价函数收敛到小于设定阈值, 输出最适海浪谱, 并采用 SAR 单视复数据经处理得到交叉谱虚部判断海浪传播方向, 最终获得海浪方向谱, 经进一步计算得到海浪波长、有效波高等海浪参数。有效波高与海浪方向谱的零阶矩有关, 它与海浪方向谱存在如下关系:

$$H_s = 4.0 \sqrt{\int F(k) dk} \quad (6)$$

式中,  $F(k)$  表示波数域下的海浪方向谱, 具体海浪传播方向结合飞机飞行方向校正得到。

### 2.2 基于同步风场信息的初猜谱构造

初猜谱的准确程度直接影响海浪谱的反演精度, 构造初猜谱的关键步骤是获得准确的风场信息。机载 SAR 飞行高度低, 观测带的刈幅宽度通常只有几公里, 而海面上几公里的风速、风向可认为基本一致。图 2 为机载 SAR 飞行试验示意图, 斜距为  $R$ , 高度为  $H$ , A、B、C 三点为距离向上的三个观测点, 入射角  $\theta$  由 A 到 C 逐渐增大。机载 SAR 获得的观测后向散射系数在距离向随入射角变化明显。根据这一特点, 针对多入射角的 SAR 观测数据, 利用 SAR 图

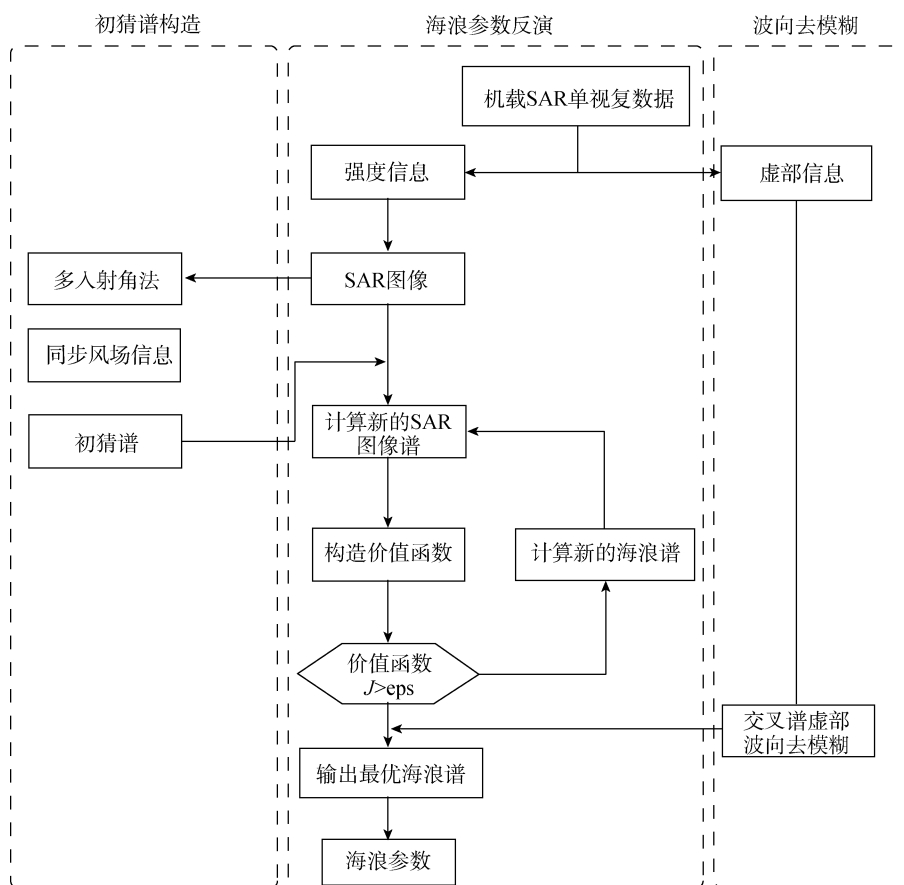


图 1 基于同步风场的机载 SAR 海浪参数反演流程图

Fig. 1 Flowchart of airborne synthetic aperture radar (SAR) wave parameters retrieval based on synchronous wind field

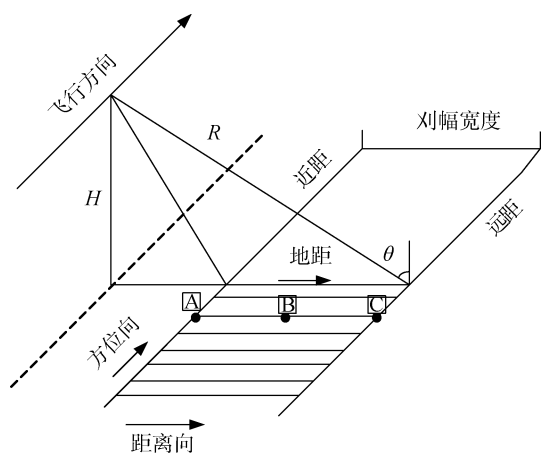


图 2 机载 SAR 飞行示意图

Fig. 2 Schematic of airborne SAR flight

像距离向不同入射角的后向散射系数的变化趋势, 联立不同入射角的地球物理模型, 构建最小代价函数, 通过代价函数的求解可直接从机载 SAR 数据中同时反演出海面风速和风向, 从而解决其他初猜谱海浪参数反演方法无法获得同步风场信息的问题,

为构造准确的初猜谱以及 SAR 海浪参数探测反演提供基础<sup>[5]</sup>。

得到探测区域 SAR 海面风场信息后, 根据海浪谱模型与方向函数构造初猜谱。采用 JONSWAP 谱作为海浪频谱和“cos-2s”型方向函数构造海浪方向谱, 海浪方向谱可表示成为海浪频谱与方向函数的乘积, 即:

$$F(\omega) = S(\omega)G(\omega, \theta) \quad (7)$$

其中,  $S(\omega)$  为海浪频谱;  $G(\omega, \theta)$  为方向函数, 与海浪的传播方向有着密切的联系。

JONSWAP 谱为充分成长型的风浪频谱, 其表达式如下:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \frac{1}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right] r^{\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\sigma^2\omega_0^2}\right]}$$

其中, 无因次常数  $\alpha$  表征风浪能量大小, 其为无因次风区  $\tilde{x} = gx/U^2$  的函数,  $x$  为风区,  $U$  为 10 m 高度处的风速;  $g$  为重力加速度;  $\omega_0$  为谱峰频率, 依赖于风速, 且根据深水风浪频散关系  $\omega^2 = gK$  ( $K$  为波

数), 可得  $\omega_0 = \frac{g}{c_0}$ ;  $r$  为谱峰升高因子。

方向函数采用 Longuet-Higgins 提出的“cos-2s”型, 如下:

$$G(\omega, \theta) = F(s) \cos^{2s} \frac{1}{2}(\theta - \theta_m)$$

$$\text{其中 } F(s) = 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)}, \Gamma(s) = \int_0^\infty t^{s-1} e^{-t} dt。$$

$\theta_m$  为海浪传播主波方向;  $\Gamma$  为伽玛函数;  $s$  为角散系数, 是  $\omega$  的函数。Hasselmann 等根据 JONSWAP 观测资料对  $s$  提出了经验关系式:

$$s = s_0(\omega/\omega_0)^\mu$$

当  $\omega \geq 1.05\omega_0$  时,  $s_0 = 9.77 \pm 0.43$ ,  $\mu = -(2.33 \pm 0.66) - (1.45 \pm 0.45)(U/c_0) - 1.17$ ; 当  $\omega \leq 1.05\omega_0$  时,  $s_0 = 6.97 \pm 0.83$ ,  $\mu = 4.06 \pm 0.22$ 。

根据  $K$ 、 $\omega$ 、波长和具有谱峰频率的波所具有的相速  $c_0$  之间的代数关系, 利用  $U$  和  $c_0$ , 可确定海浪的频率方向谱与波数谱的关系<sup>[21]</sup>。

### 2.3 MPI 算法

已知海浪方向谱  $F_K$  到图像谱  $P_K$  的非线性转换关系:

$$P_K^S = \frac{1}{4\pi^2} \exp(-k_x^2 \beta f^v(0)) \int \exp(-iKr) \exp(k_x^2 \beta^2 f^v(r)) \{1 + f^R(r) + ik_x \beta (f^{Rv}(r) - f^{Rv}(-r)) + k_x^2 \beta^2 [f^{Rv}(r) - f^{Rv}(0)][f^{Rv}(-r) - f^{Rv}(0)]\} d^2r \quad (8)$$

采用逐次迭代法对积分方程式进行求解, 先构造代价函数  $J$ , 求解得到  $F(k)$  为最适海浪谱<sup>[6]</sup>。代价函数为:

$$J = \int \left[ \frac{P(k) - \hat{P}(k)}{P(k)} \right]^2 dk + \mu \int \left[ \frac{F(k) - \hat{F}(k)}{B + \hat{F}(k)} \right]^2 dk \quad (9)$$

其中  $\hat{P}(k)$  为观测 SAR 谱,  $P(k)$  为最优 SAR 谱,  $\hat{F}(k)$  为初猜谱,  $F(k)$  为最适海浪谱。代价函数分为两个部分, 一个是观测 SAR 谱与最优 SAR 谱的差值, 另一个是初猜谱与最适海浪谱的差值。要使代价函数最小就意味着要使反演得到的海浪谱与初猜谱最接近, 同时满足仿真的 SAR 谱与观测得到的 SAR 谱最接近。 $\mu$  是权重系数,  $B$  是一个小正数, 避免当时  $\hat{F}(k) = 0$ , 代价函数无穷大。

### 2.4 基于单视复数据虚部去除波向 180°模糊

SAR 观测到的图像谱是沿两个方向传播的对称谱, 所以仅从 SAR 图像谱出发, 无法确定海浪

传播方向, 海浪传播 180°模糊是 SAR 海浪参数反演中存在固有问题。SAR 单视复数据中虚部部分包含相位信息, 其积分时间相对于海浪周期来说是非常短的, 因此根据复数据虚部相位的变化能够判断海浪在积分时间内的传播方向。通常利用交叉谱虚部谱去除 SAR 图像中海浪传播方向 180°模糊问题<sup>[22]</sup>, 反映在交叉谱中即虚部谱的正值代表海浪传播方向。

SAR 对目标进行探测, 从开始探测到探测结束的时间叫做合成孔径时间, 记为  $T_s$ , 此段时间内 SAR 会将雷达回波的振幅与相位记录下来。在每一个  $T_s$  内, 都可以形成一个 SAR 图像, 也称为视。利用多视技术可以把一个  $T_s$  分为两个或几个子时间间隔, 每一个时间间隔内可处理得到一个 SAR 图像, 再对两个子视之间的交叉相关函数进行傅里叶变换, 则得到两视之间的 SAR 交叉谱:

$$\begin{aligned} \Phi_{I_1, I_2}^{\Delta t}(k) = & \frac{1}{4\pi^2} \exp(-k_x^2 \beta^2 f^v(0)) \int_{R^2} \exp(-ikx) \exp(k_x^2 \beta^2 f^v(x)) \\ & \{1 + f^R(x) + ik_x \beta (f^{Rv}(x) - f^{Rv}(-x)) + \\ & k_x^2 \beta^2 [f^{Rv}(x) - f^{Rv}(0)][f^{Rv}(-x) - f^{Rv}(0)]\} d^2x \quad (10) \end{aligned}$$

图 3 为机载 SAR 探测多视处理示意图。如图所示, 两子视图之间中心时间差为  $\Delta t$ , 飞机以速度  $v$  沿方位向飞行, 方位向和距离向投影到 SAR 图像上分别为  $x, y$  轴, 海浪传播方向与距离向夹角为  $\alpha$ , 海浪传播速度为  $V$ , 那么  $\Delta t$  时间内海浪沿  $x, y$  轴移动距离分别为:

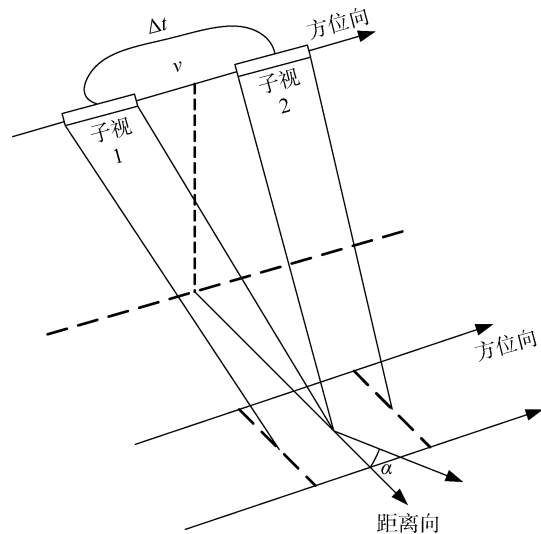


图 3 多视处理示意图

Fig. 3 Schematic of multi-view processing

$$\Delta x = V \Delta t \sin \alpha$$

$$\Delta y = V \Delta t \cos \alpha$$

因此可以利用海浪在子视图之间相对位置来反演海浪参数,  $\Psi(f)$  虚部的正值项代表波向, 负值项代表与其  $180^\circ$  模糊对应的波向, 去除负值项后即可得到海浪的传播方向。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 实验数据

为了检验论文提出方法的有效性, 利用机载 SAR 实测数据和海上浮标数据进行海浪参数反演试验。实验数据是机载 SAR 探测的 C 波段 VV 极化数据, 探测时间为北京时间 2014 年 11 月 22 日 15 时 27 分, 机载 SAR 探测区域和调查船所在区域均位于  $19^\circ\text{N}$ ,  $112^\circ\text{E}$  附近, 试验飞机飞行高度约 8 100 m, 飞行速度约 138 m/s, 飞行方向为  $45^\circ$  (以正北为  $0^\circ$ ), 图像中心入射角为  $43^\circ$ , 距离向分辨率为 1.76 m, 方位向分辨率为 1.80 m。比对验证数据为布放的波浪骑

士浮标获取的海浪波向、有效波高数据以及试验区域内观测船测量得到的海面风速、风向数据。

#### 3.2 结果与分析

根据反演流程, 先对定标后的 SAR 强度图像采用多入射角法反演风速和风向, 再应用海浪参数反演方法得到有效波高和波向。将风速、风向反演结果与调查船实测风速风向进行比较, 计算得到风场反演结果与实测值的均方根误差; 将反演得到的有效波高、波向与相应的浮标数据进行比对, 计算得到海浪参数反演结果与实测值的均方根误差。从表 1 可看出, 海面风速反演结果与实测值的均方根误差为 0.96 m/s, 海面风向反演结果与实测值的均方根误差为  $18.84^\circ$ ; 有效波高均方根误差为 0.23 m, 波向均方根误差达到了  $13.23^\circ$ 。试验数据的反演结果验证了本文提出的海浪参数反演方法的有效性, 能够较好满足实际应用需求, 适用于机载 SAR 海浪参数反演的业务化运用。

表 1 机载 SAR 数据海面风场和海浪参数反演结果

Tab. 1 Inversion results of sea-surface wind field and sea-wave parameters on airborne synthetic aperture radar (SAR) data

数据标号	海面风速(m/s)		海面风向( $^\circ$ )		有效波高(m)		波向( $^\circ$ )	
	反演	调查船观测	反演	调查船观测	反演	浮标观测	反演	浮标观测
112201	6.72	8	26.89	45	2.06	1.88	105.1	85.3
112202	6.81	8	26.57	45	1.86	1.88	91.7	85.3
112203	7.01	8	26.53	45	1.75	1.88	85.5	85.3
112204	7.11	8	25.46	45	2.20	1.88	96.2	85.3
112205	7.30	8	25.01	45	1.78	1.88	83.2	85.3
112206	6.99	8	26.73	45	1.87	1.88	106.4	85.3
112207	7.40	8	26.31	45	2.32	1.88	70.3	85.3
112208	7.21	8	25.83	45	2.13	1.88	98.6	85.3
均方根误差	0.96		18.84		0.23		13.23	

对定标后的 SAR 强度图像采用多入射角法, 可反演得到同步风场信息。图 4 为利用多入射角法反演得到的海面风场图像。

以标号为 112201 的数据为例, 根据反演流程, 将同步 SAR 图像反演得到的风场信息, 结合海浪谱模型与方向函数构造海浪初猜谱, 如图 5 所示。

在此基础上, 对初猜谱和 SAR 图像采用 MPI 算法进行海浪参数反演, 并结合交叉谱方法去除海浪传播的  $180^\circ$  模糊, 最终反演得到海浪谱, 如图 6 所示, 其中图 6a 为机载 SAR 观测图像, 图 6b 为反演得到的二维海浪谱。图 7 为单视复数据虚部交叉谱与去

模糊后交叉谱, 通过去模糊处理可以得到图 6 所示的无波向模糊的海浪谱。海浪谱通过进一步计算得到的波向为  $105.1^\circ$ , 有效波高为 2.06 m; 对应的随船携带布放的浮标波向为  $85.3^\circ$ , 有效波高为 1.88 m; 波向反演结果与浮标观测值的偏差为  $19.8^\circ$ , 有效波高反演结果与浮标观测值偏差为 0.18 m, 相对误差为 9%。

通过上述反演结果可知, 本文提出的海浪参数反演新方法, 适用于机载 SAR 海浪参数的反演, 利用时空匹配的同步风场信息, 能够较好的补偿 SAR 探测海浪缺失的部分信息, 而交叉谱方法的运用解决了海浪传播的波向模糊问题。

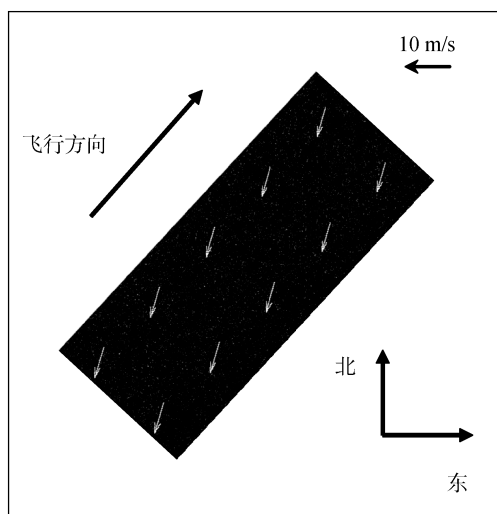


图 4 海面风场反演图像  
Fig. 4 Image of sea-surface wind field retrieval

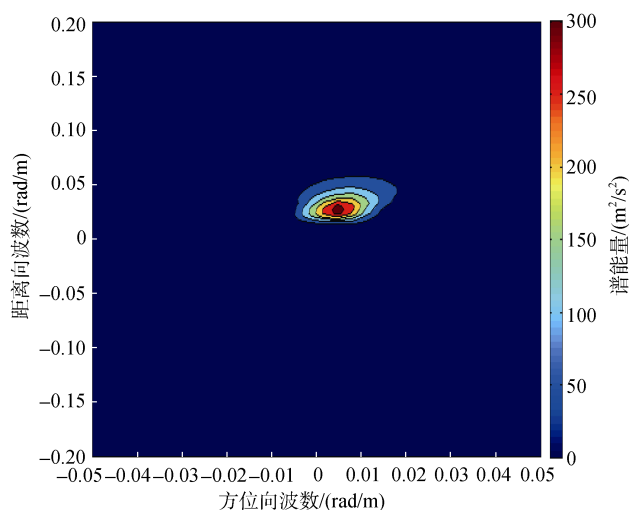


图 5 同步风场信息构造的初猜谱  
Fig. 5 First-guess spectrum structured by synchronous wind field

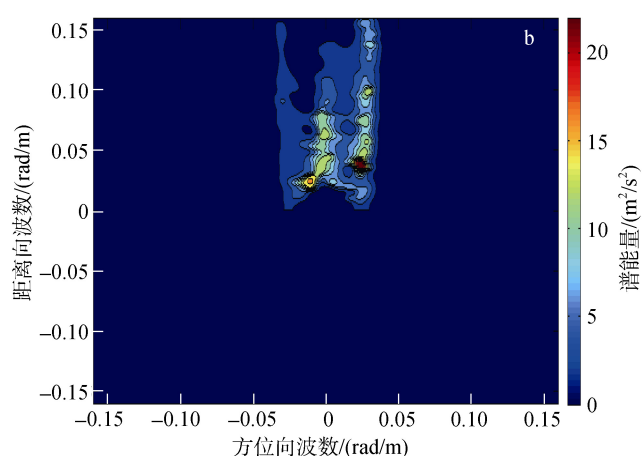
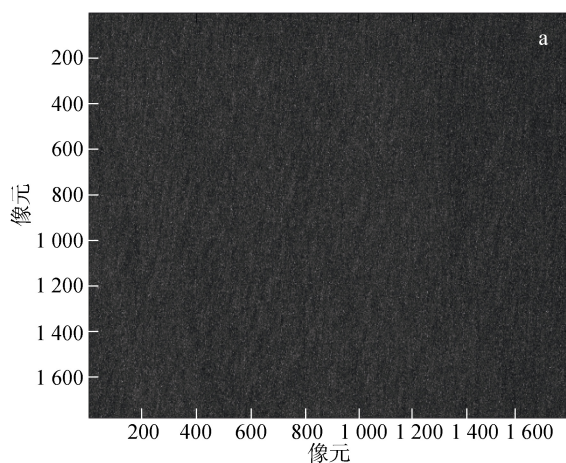


图 6 112201 号 SAR 数据探测图像与反演的海浪谱  
Fig. 6 112201 SAR data detection image and inversion of the sea-wave spectrum.

a. SAR 图像; b. 海浪谱  
a. SAR image spectrum and b. sea-wave spectrum

## 4 结论与展望

传统 SAR 海浪参数反演需要初猜谱补偿海浪信息, 依赖于海浪预报模式值, 开展业务化运用时不能实时提供初猜谱信息; 或者依赖于散射计或其他测风载荷获得的风场信息、NCEP 资料数值模拟风场, 存在时空不匹配、精度难以保证等问题, 导致初猜谱信息不够精确, 从而严重影响了机载 SAR 海浪参数反演结果。本文针对机载 SAR 对海探测特点, 提出一种机载 SAR 海浪参数反演新方法。以 SAR 图像反演的同步高精度海面风场信息为基础, 构建初猜谱, 再通过 SAR 与海浪非线性反演关系, 构造代价函数, 完成海浪谱反演, 最后以交叉谱方法实现波向  $180^\circ$

去模糊, 最终得到海浪参数, 并利用已有的机载 SAR 单视复数据和同步观测浮标数据对反演方法进行了试验验证。结果表明: 与浮标数据对比, 反演得到的海浪有效波高偏差为 0.12 m, 均方根误差为 0.23 m; 波向偏差为  $6.83^\circ$ , 均方根误差为  $13.23^\circ$ , 验证了本文提出的基于同步风场的机载 SAR 海浪参数反演方法的有效性, 有效解决了机载 SAR 海浪反演方法中初猜谱构造的问题, 提高了海浪参数的空间分辨率和反演精度, 为机载 SAR 海浪参数反演业务化应用提供支撑。

论文提出的海浪参数反演方法是为解决机载 SAR 海洋环境探测系统研制过程中遇到的实际工程问题提出的, 通过从 SAR 数据本身反演出时空匹配

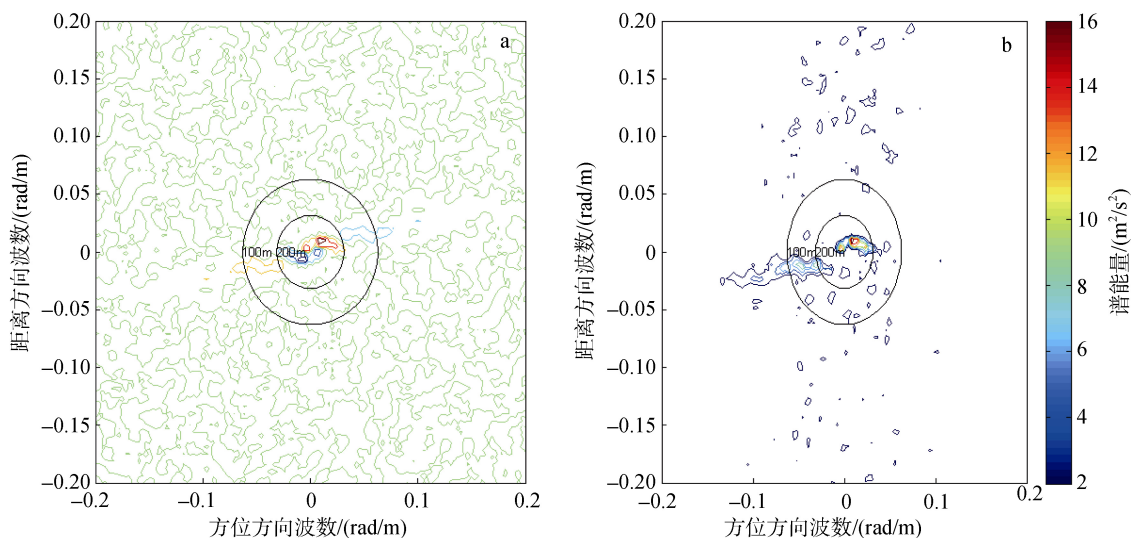


图7 112201号 SAR 数据交叉谱数据(a)虚部图像(b)去除虚部负值后的图像

Fig. 7 112201 SAR cross-spectrum data (a) Imaginary part image and (b) data after removing negative values

的海面风场构造初猜谱, 解决了传统海浪参数反演中初猜谱构造依赖外部辅助数据的问题, 并结合 MPI 和交叉谱方法实现了机载 SAR 海浪参数的快速高精度反演, 对于机载 SAR 海洋环境探测的业务化具有重要意义。但受客观条件的限制, 本文仅开展了中等海况条件下的探测试验, 使用的机载 SAR 数据量较少, 不能完全反映不同海况条件下海浪参数反演情况, 后续我们将进一步开展不同海况条件下的海上飞行试验研究。

致谢: 感谢中国科学院电子学研究所和中国电子科技集团公司第三十八研究所提供的机载 SAR 试验数据、浮标数据和调查船观测结果及在机载 SAR 数据定标方面给予的支持。

#### 参考文献:

[1] Martine S. An Introduction to Ocean Remote Sensing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 201-207.

[2] 张亮, 黄思训, 钟剑, 等. 基于降雨率的 GMF+RAIN 模型构建及在台风风场反演中的应用[J]. 物理学报, 2010, 59: 74-79.  
Zhang Liang, Huang Sixun, Zhong Jian, et al. New GMF + RAIN model based on rain rate and application in typhoon wind retrieval[J]. Acta Phys Sin, 2010, 59: 74-79.

[3] 艾未华, 孔毅, 赵现斌. 基于小波的多极化机载合成孔径雷达海面风场反演[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 465-473.  
Ai Weihua, Kong Yi, Zhao Xianbin. Ocean surface wind direction retrieval from multi-polarization air-

borne SAR based on wavelet[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(14): 465-473.

[4] 赵现斌, 严卫, 孔毅, 等. 机载 C 波段全极化 SAR 海面风矢量反演理论研究及实验验证[J]. 物理学报, 2013, 62: 138402.  
Zhao Xianbin, Yan Wei, Kong Yi, et al. Theoretical research and experimental verification for ocean surface wind vector retrieval from airborne C-band fully polarimetric SAR[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62: 138402.

[5] 艾未华, 严卫, 赵现斌, 等. C 波段机载合成孔径雷达海面风场反演新方法[J]. 物理学报, 2013, 62: 68401.  
Ai Weihua, Yan Wei, Zhao Xianbin, et al. A new ocean surface wind field retrieval method from C-band airborne synthetic aperture radar[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62: 68401.

[6] Hasselmann K, Hasselmann S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion[J]. Geophys Res, 1991, 96: 10713-10729.

[7] Brüning C, Hasselmann S, Hasselmann K, et al. A first evaluation of ERS-1 synthetic aperture radar wave mode data[J]. The Glob Atmos and Ocean System, 1994, 2: 61-98.

[8] Hasselmann S, Brüning C, Hasselmann, et al. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra[J]. Geophys Res, 1996, 101: 16615-16629.

[9] Mastenbroek C, Valk C. A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar[J]. Geophys Res, 2000, 105: 3497-3516.

[10] Schulz-Stellenfleth J, Lehner S, Hoja D. A parametric



- scheme for the retrieval of two-dimensional ocean wave spectra from synthetic aperture radar look cross spectra[J]. *Geophys Res*, 2005, 110: 297-314.
- [11] Schulz-Stellenfleth J, König Th, Lehner S. An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data[J]. *Geophys Res*, 2007, 112: 10182-10190.
- [12] He Yijun, Zhang Bin, Perrie W. Remote sensing of ocean waves by a long-track interferometric synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(C10): 157-165.
- [13] Sun Jian, Kawamura H. Retrieval of surface wave parameters from SAR images and their validation in the coastal seas around Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65: 567-577.
- [14] Li Xiaoming, Lehner S, Bruns T. Simultaneous measurements by advanced SAR and radar altimeter on potential improvement of ocean wave model assimilation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51: 2892-2903.
- [15] 谢涛, 方贺, 陈伟, 等. 基于 SFS 技术的全极化 SAR 图像海浪反演机制[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37: 259-263.  
Xie Tao, Fang He, Cheng Wei, et al. Analysis of the Arctic sea ice total deformation rates based on SAR remote sensing [J]. *Journal of Wut*, 2015, 37: 259-263.
- [16] 赵现斌, 严卫, 孔毅, 等. 机载 SAR 探测图像中归一化雷达截面随入射角变化规律应用[J]. *物理学报*, 2015, 62: 1869-1880.  
Zhao Xianbin, Yan Wei, Kong Yi, et al. Application research for change rule of normalized radar cross section changes with incidence angle in airborne SAR sounding image[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 1869-1880.
- [17] 董玫, 赵永波, 张守宏. 米波段下海面多径模型研究[J]. *电子学报*, 2009, 36(6): 1373-1377.  
Dong Mei, Zhao Yongbo, Zhang Shouhong. The analysis of the multipath model under the VHF band at sea[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 36: 1373-1377.
- [18] 乌拉比, 穆尔, 冯健超. 微波遥感(第二卷): 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论[M]. 黄培康, 汪一飞, 译. 北京: 科学出版社, 1987.  
Ulaby, Moore, Feng Jianchao. *Microwave Remote Sensing (Volume 2): Scattering of Radar Remote Sensing and Surface Targets, Radiation Theory*[M]. Translated, Huang Peikang, Wang Yifei. Beijing: Science Press, 1987.
- [19] 李海艳, 杜涛. 海洋内波 SAR 影像成像理论[J]. *海洋科学*, 2005, 29(10): 86-89.  
Li Haiyan, Du Tao. Theory about synthetic aperture radar imaging of oceanic internal waves[J]. *Marine Sciences*, 2005, 29(10): 86-89.
- [20] 杨劲松. 合成孔径雷达海面风场、海浪和海洋内波遥感技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 48-54.  
Yang Jinsong. *SAR Remote Sensing Techniques of Sea Surface Wind, Surface Wave and Internal Wave*[M]. Beijing: Ocean Press, 2005: 48-54.
- [21] 孙建. SAR 影像的海浪信息反演[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.  
Sun Jian. The retrieval of ocean wave information from SAR images[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [22] Engen G, Johnsen H. SAR-ocean wave inversion using image cross spectra[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 1047-1056.

# A method for retrieving ocean-wave parameters from airborne synthetic aperture radar imagery based on synchronization information of the wind field

GE Shu-rui<sup>1</sup>, AI Wei-hua<sup>1, 2</sup>, YUAN Ling-feng<sup>3</sup>, CHENG Yu-xin<sup>1</sup>, MA Shuo<sup>1</sup>

(1. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Hydrologic and Meteorological Center of Navy, Beijing 100071, China)

**Received:** Feb. 23, 2016

**Key words:** airborne synthetic aperture radar; first-guess spectrum; cross-spectra; ocean-surface wind field; ocean-wave parameter retrieval

**Abstract:** Airborne synthetic aperture radar (SAR), which has flexible characteristics, is an effective means of obtaining regional ocean-wave parameters. These regional ocean-wave parameters are the most fundamental and important marine environmental parameters in dynamic marine processes. Based on the sounding characteristics of airborne SAR, the first-guess spectrum is constructed by combining ocean-wave spectrum model, direction function with the synchronous wind speed and wind direction which match with the inversion region of ocean wave parameters temporally and spatially. The synchronous wind speed and wind direction can be obtained from the SAR data itself using the multi-incidence angle method. Next, a simulated SAR image corresponding with the first-guess spectrum can be produced based on the nonlinear image relations between the ocean-wave direction spectrum and the SAR image spectrum. The simulated observed SAR image spectrums are combined as an iterative operation, and the most suitable wave spectrum can be obtained by solving the nonlinear equation. Finally, the wave parameters are obtained using the cross-spectra method, which is used for eliminating the 180° direction ambiguity of ocean-wave propagation. This study proposes a method of retrieving ocean-wave parameters from airborne SAR imagery based on the synchronization information of the wind field. This method entirely utilizes the advantage of airborne SAR in the marine environment by solving the problem of the first-guess spectrum structure that is dependent on external wind field in traditional SAR wave parameter inversion. Airborne ocean-wave parameter inversion results from synchronized flight tests and survey ship observations yield root-mean-square errors for significant wave height and wave direction of 0.23 m and 13.23°, respectively. These errors verify the validity of the proposed method and provide support for the using ocean-wave parameters retrieved from airborne SAR imagery.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)