

C 波段机载合成孔径雷达海面风场反演新方法*

艾未华^{1)2)†} 严卫¹⁾ 赵现斌¹⁾ 刘文俊¹⁾ 马烁¹⁾

1) (解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

2) (南京信息工程大学, 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

(2012年6月26日收到; 2012年11月14日收到修改稿)

针对基于散射计地球物理模型函数的机载合成孔径雷达 (SAR) 海面风场反演中存在的风向获取依赖于图像风条纹或数值预报、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, 进而影响机载 SAR 海面风场反演精度等问题, 本文根据机载 SAR 对海探测特点, 研究一种适用于 C 波段机载 SAR 的海面风场反演新方法. 利用 SAR 图像距离向不同入射角的后向散射系数, 依据地球物理模型构造最小代价函数, 通过代价函数的求解直接从机载 SAR 数据同时反演出海面风速和风向. 利用论文提出的海面风场反演方法分别对仿真 SAR 数据和实测 C 波段机载 SAR 数据进行风向、风速的反演误差分析及试验验证. 研究表明, 该方法适用于机载 SAR 海面风场反演, 可不依赖背景风向直接反演出精度较高的风速和风向; 雷达后向散射系数误差是决定海面风速、风向反演精度的关键因素, 辐射定标精度越高则反演误差越小; 海面风速反演误差随着风速的提高而增大, 当海面风速大于 18 m/s 时, 风速反演误差显著增加, 而海面风向的反演误差与风速无明显关系.

关键词: 机载合成孔径雷达, 海面风场, 多入射角

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.068401

1 引言

海面风场是海洋上层运动的主要动力来源, 几乎与海洋中所有的物理过程关系密切, 是研究海洋动力过程的重要要素. 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种主动式微波成像雷达, 具有全天候、全天时、高空间分辨率等特点, 通过测量海面后向散射信号获取海面图像, 可用于提取高精度的海面风场. 相对于星载微波散射计和微波辐射计等海面风场遥感观测手段^[1,2], SAR 反演海面风场具有高精度和高空间分辨率的特点, 尤其适用于海岸带和岛屿区的观测. 海面风场遥感探测的主要平台是卫星, 受轨道的限制, 星载 SAR 探测不能满足定时定点的需求; 机载 SAR 机动性好, 空间分辨率高, 可对区域海面风场实施精细化探测. 利用 SAR 探测数据反演海面风场, 通常需先获取海面风向, 再将已知相对风向、定标的后向散射

系数以及入射角作为不同波段地球物理模型函数 (GMF, geophysical model function) 的输入^[3,4], 通过迭代计算得到海面风速. 通常利用数值预报值、散射计的海面风向、SAR 图像的风条纹反演风向等作为地球物理模型函数的相对风向输入^[5-9], 通过分析解算得到 SAR 海面风场. 由于数值预报值和散射计的海面风向空间分辨率相对较低, 且与机载 SAR 探测时间不一致, 影响 SAR 海面风场反演的精度. SAR 图像上黑白相间的风条纹轴线方向与海面风矢量的方向基本一致^[10-12], 借助二维 FFT 法^[13,14]、局部梯度法^[14,15]、小波分析法^[16-20]、正则化^[21,22]等方法, 通过提取 SAR 图像上的风条纹信息获取海面风向. 但据统计, 大约仅有 60% 左右 SAR 图像可利用风条纹等信息反演出海面风向^[23,24], 该方法应用于海面风场反演时, 尤其是业务化应用时存在较大的局限性. 文献 [25] 提出基于 SAR 图像多普勒平移的贝叶斯海面风场反演方法, 但该方法也需要背景场先验信息. 因此, 将

* 国家自然科学基金 (批准号: 41005018)、江苏省气象探测与信息处理重点实验室基金 (批准号: KDXS1106)、解放军理工大学预先研究基金和气象海洋学院基础理论基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: awh1979@126.com

以上已有 SAR 海面风场反演方法应用于机载平台时, 存在风向信息获取依赖于 SAR 图像风条纹或数值预报值、散射计风向等背景场资料的问题, 较低的风向精度和时空分辨率又影响机载 SAR 海面风速反演精度. 另外, 在没有明显风条纹和无法获取 SAR 探测区域海面背景风向时, 基于散射计地球物理模型函数的海面风场反演方法则无法实施. 因此, 为解决以上问题, 需针对机载 SAR 对海探测特点研究一种新的海面风场反演方法.

机载 SAR 相对于星载 SAR 具有的机动灵活、入射角范围较宽和可实现对固定区域连续观测等特点, 由于平台高度较低, 刈幅通常仅有几公里, 在海面几公里范围内的风向和风速也基本一致, 因此可根据机载 SAR 探测特点, 考虑利用 SAR 图像在距离向不同入射角的后向散射系数, 结合地球物理模型函数, 研究一种新的适用于 C 波段机载 SAR 的海面风场反演方法, 直接从雷达后向散射系数本身反演出精度较高海面风速和风向, 解决依赖风条纹和背景场风向资料的问题, 为机载 SAR 海面风场探测的业务化提供支持.

2 C 波段机载 SAR 海面风场反演原理及方法

2.1 CMOD 模式

CMOD (C-band models) 系列模式是根据雷达对海探测的基本原理设计, 最初用于散射计的海面风速反演, 目前是 C 波段 SAR 海面风速反演的主要模式. CMOD 模式以实际测量值为基础确定相关系数, 明确了 VV 极化的 SAR 后向散射系数与相对风向、风速和入射角之间的定量函数关系. CMOD5 模式^[26]是欧洲中长期预报中心 (ECMWF, European Centre For Medium-Range Weather Forecasts) 针对已有 C 波段 VV 极化微波散射计改进提出的经验公式, 其形式如下

$$\sigma_{\text{VV}}^0(\theta, \phi, u) = 10^{A(u, \theta)} (1 + B(u, \theta) \cos(\phi) + C(u, \theta) \cos 2\phi), \quad (1)$$

式中, σ_{VV}^0 表示 VV 极化雷达后向散射系数, ϕ 表示风向相对于雷达视向的相对风向, $A(u, \theta)$, $B(u, \theta)$ 和 $C(u, \theta)$ 表示由海面 10 m 高度处风速、相对风向、极化方式、雷达频率和入射角决定的系数. 由于 CMOD5 模式已经在星载 SAR 上业务化应用, 模

式中风速、风向与雷达后向散射系数的一一对应关系可作为雷达后向散射系数仿真的理论依据. (1) 式表明, 在已知雷达后向散射系数、海面风向和相关系数的情况下, 利用 CMOD 模型函数可以唯一地求取海面风速, 因此应用该模型函数求取 SAR 海面风速时必须已知海面风向. 由于 SAR 图像的海面风向获取依赖于风条纹和背景资料, 存在风向精度低、与 SAR 图像时空分辨率不匹配等问题, 从而增大了 CMOD 模型反演海面风速的误差, 这是目前 SAR 海面风场反演中存在的主要问题.

2.2 机载 SAR 海面风场反演原理

由 (1) 式可知, 当地球物理模型函数的输入为后向散射系数 σ^0 , 入射角以及相关系数时, 其输出存在风速和风向两个变量. 图 1 中各曲线表示海面风速 10 m/s, 相对风向 135°, 入射角 35° 时, 利用 CMOD5 地球物理模型函数仿真得到的 VV 极化 σ^0 所满足的风速与风向的关系, 显然对于固定的单个 σ^0 , 海面风速和风向的解可能存在无数多组.

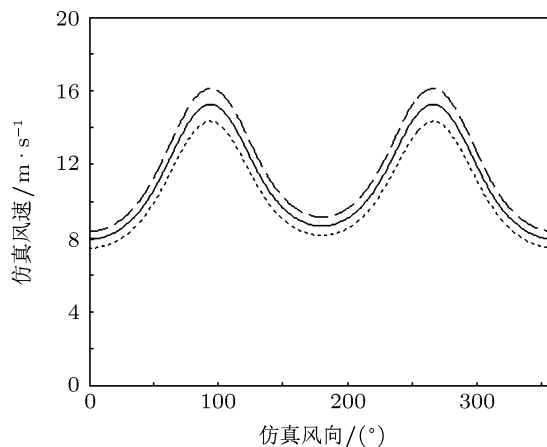


图 1 CMOD5 模型的仿真风速、风向 (点线表示 $0.9\sigma^0$, 虚线表示 $1.1\sigma^0$)

在假设多个观测点海面风场基本一致的情况下, 如果能得到多组不同入射角观测的 SAR 后向散射系数, 即可以联立多个地球物理模型函数, 通过求解 (2) 式所示的非线性方程组同时得到海面风速和风向, 而不依赖于背景风向. 例如, 微波散射计可同时获取同一探测区域的多个后向散射系数 σ^0 , σ^0 与风速、风向有关, 通过多组不同入射角、方位角和极化方式测量得到的 σ^0 确定海面风速和风向, ERS 卫星的微波散射计有三个天线, 可利用测量得到的三组 σ^0 精确反演出海面风场.

$$\sigma_1^0(\theta_1, \phi_1, u) = 10^{A(u, \theta_1)} (1 + B(u, \theta_1) \cos(\phi_1))$$

$$\begin{aligned}
 &+ C(u, \theta_1) \cos 2\phi_1), \\
 &\vdots \\
 \sigma_n^0(\theta_n, \phi_n, u) = &10^{A(u, \theta)} (1 + B(u, \theta_n) \cos(\phi_n) \\
 &+ C(u, \theta_n) \cos 2\phi_n). \quad (2)
 \end{aligned}$$

因此, 基于此基本思想, 可以考虑通过获取机载 SAR 不同入射角的多组后向散射系数直接反演出海面风速和风向. 如图 2 所示, A, B, C 三点为距离向上的三个观测点, 显然它们的入射角不同, 由 CMOD 模型函数可知, 相应的后向散射系数观测值 σ_{vv}^0 亦各不相同. 由于星载 SAR 运行轨道固定, 虽然可获取 A, B, C 点测量值, 但由于轨道高且刈幅宽, 不同观测点的海面风向和风速差别较大, 通常难以满足 (2) 式的成立条件. 机载 SAR 飞行高度低, 例如在飞行高度 5000 m, 入射角 $35^\circ-45^\circ$ 时, 其刈幅宽度不到 2 km. 在此范围内, 完全可以假设 A, B, C 三点海面风速和风向是一致的, 从而可以通过 (2) 式反演出海面风速和风向. 因此, 可以利用机载 SAR 的工作特点, 在假设 SAR 距离向观测区域风场基本一致情况下, 研究一种新的适用于 C 波段机载 SAR 的高精度海面风场反演方法.

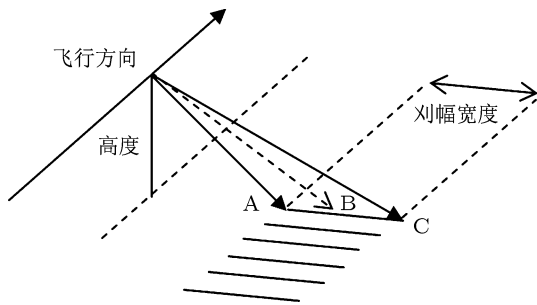


图 2 机载 SAR 对海观测示意图

2.3 机载 SAR 海面风场反演方法

为求解 (2) 式的不同入射角地球物理模型函数的方程组, 假设方程组中各等式的风速和风向相同, 即在 SAR 观测刈幅宽度范围内海面风场基本一致, 构建如 (3) 式所示的最小代价函数, 通过代价函数的求解直接得到海面风速和风向. σ_1^m, σ_2^m 和 σ_3^m 是利用 CMOD5 模型计算得到的后向散射系数值, σ_1^0, σ_2^0 和 σ_3^0 是机载 SAR 的实际观测值. 由于 σ_1^0, σ_2^0 和 σ_3^0 是距离向不同入射角的值, 因此其对应的相对风向 ϕ_1, ϕ_2 和 ϕ_3 的值相同, 但入射角 θ_1, θ_2 和 θ_3 各不相同.

$$J_{\text{Cost}}(\theta, \phi, u)$$

$$\begin{aligned}
 &= (\sigma_1^m(\theta_1, \phi_1, u) - \sigma_1^0(\theta_1, \phi_1, u))^2 \\
 &+ (\sigma_2^m(\theta_2, \phi_2, u) - \sigma_2^0(\theta_2, \phi_2, u))^2 \\
 &+ (\sigma_3^m(\theta_3, \phi_3, u) - \sigma_3^0(\theta_3, \phi_3, u))^2. \quad (3)
 \end{aligned}$$

因此, 海面风场反演实际上是在已知 SAR 观测值、入射角和飞行方位角的条件下, 寻找合适的风速、风向值, 使得 (3) 式的代价函数值最小. 可通过求目标代价函数关于风速和风向的梯度, 令梯度值为零从而使代价函数获得最小值, 得到满足条件的风速和风向, 如 (4) 式所示.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_{\text{Cost}}(\theta, \phi, u)}{\partial u} &= \sum_{i=1}^3 2(\sigma_i^m - \sigma_i^0) \frac{\partial \sigma_i^m}{\partial u} = 0, \\
 \frac{\partial J_{\text{Cost}}(\theta, \phi, u)}{\partial \cos(\phi)} &= \sum_{i=1}^3 2(\sigma_i^m - \sigma_i^0) \frac{\partial \sigma_i^m}{\partial \cos(\phi)} \\
 &= 0. \quad (4)
 \end{aligned}$$

在实际风场反演中, 目标代价函数 (4) 式一般存在 2 或 4 个局部最小值. 每个局部最小值对应风速和风向为一个模糊解, 因此要得到惟一的真实解, 需进行风向去模糊处理. 实际上对于 (3) 式和 (4) 式的非线性方程组的求解复杂度较高, 通常采用数值方法求解. 传统的数值方法理论上要求求解过程必须在整个风速、风向二维空间内按一定的搜索间隔逐点计算目标函数值并进行比较, 寻找局部极小值点. 此过程目标代价函数的计算较为复杂, 致使整个反演过程运算量大. 本文在梯度表示 (3) 式和 (4) 式基础上, 运用双精度搜索法进行最优化求解, 求取目标代价函数极小值, 从而得到海面风速和风向模糊解, 分为粗搜索和精搜索两个主要步骤. 粗搜索在风矢量二维空间中以较大的步长搜索到目标函数的几个局部极小值, 实现模糊解的粗略定位, 并按目标函数值由小到大截取前若干个模糊值. 在每个模糊解的附近区域, 以较小的步长精搜索到目标函数的极小值点, 实现模糊解的精确定位. 对精搜索得到的几个模糊解按目标函数值从小到大进行排列, 截取前几个模糊解, 作为风矢量的最终模糊解.

2.4 风向模糊去除

SAR 反演海面风向的模糊问题是利用 CMOD 地球物理函数模型求解风速、风向时存在的固有问題. 目前, 去除风向模糊主要利用数值预报值、海上浮标或落山风等特殊海洋现象去除^[10]. 多极化技术是雷达成像技术的重大进步, 也是当前海洋 SAR 发展的方向, 可用于海面风场反演方法的

改进 [27,28]. 多极化 SAR 通过测量目标每一个分辨单元内的散射回波, 获得与目标散射相关的极化散射矩阵, 其极化信息可用于去除海面风向模糊 [29]. 多极化 SAR 包含 VV, HH, VH 和 HV 四个通道的极化数据, 用散射矩阵可表示为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

定义极化相关系数:

$$\rho_{VVVH} = \frac{\langle S_{VV} \cdot S_{VH}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{VV}|^2 \rangle \langle |S_{VH}|^2 \rangle}}. \quad (6)$$

利用极化相关系数 ρ_{VVVH} 与相对风向 ϕ 之间的关系可以实现海面风向模糊的去除. 若 ρ_{VVVH} 的实部小于 0, 虚部大于 0, 则 $180^\circ < \phi < 270^\circ$; 若 ρ_{VVVH} 的实部大于 0, 虚部大于 0, 则 $270^\circ < \phi < 360^\circ$; 若 ρ_{VVVH} 的实部小于 0, 虚部小于 0, 则 $0^\circ < \phi < 90^\circ$; 若 ρ_{VVVH} 的实部大于 0, 虚部小于 0, 则 $90^\circ < \phi < 180^\circ$.

3 仿真研究及误差分析

3.1 反演流程

由以上分析可知, 采用本文提出的机载 SAR 海面风场反演方法, 利用 σ_{VV}^0 直接获得高精度和高空间分辨率的海面风速和风向, 反演流程如图 3 所示. 对观测的机载 SAR 图像进行辐射定标, 将不同入射角的后向散射系数 σ_1^0, σ_2^0 和 σ_3^0 代入 (3) 式或 (4) 式, 利用搜索算法进行最优化求解, 求取目标代价函数极小值, 从而得到海面风场模糊解, 并借助辅助数据或极化信息等方式去除风向模糊, 从而确定真实的海面风速和风向. 本文利用仿真机载 SAR 数据进行风场反演, 通过引入随机噪声, 分析反演精度及 SAR 定标误差对反演结果的影响; 同时, 对实测 C 波段机载 SAR 数据进行海面风场反演, 并将实测数据反演结果与 NCEP 再分析资料、测量船实测的海面风速与风向对比, 验证方法的有效性.

3.2 数据仿真及反演误差分析

SAR 对海探测的后向散射系数主要是由海表面厘米尺度的表面波与电磁波发生布拉格共振引起, 入射角的范围通常为 20° — 70° , 由于机载 SAR 观测高度较低, 为得到较大刈幅, 通常采用较大范围入射角. 为从理论上分析本文方法的有效性以及风速、风向反演结果对后向散射系数误差的

敏感性, 以海面风速、风向和不同入射角为输入, 利用 CMOD5 地球物理模型仿真得到多个入射角的机载 SAR 后向散射系数 σ_{VV}^0 , 并引入随机噪声 σ_{noise}^0 , 利用含噪声的后向散射系数进行海面风场反演, 统计分析海面风速和风向的反演误差, 其中 $\sigma_{VV}^0 = \sigma_m^0 + \sigma_{noise}^0$, σ_m^0 表示 CMOD5 计算得到的后向散射系数值.

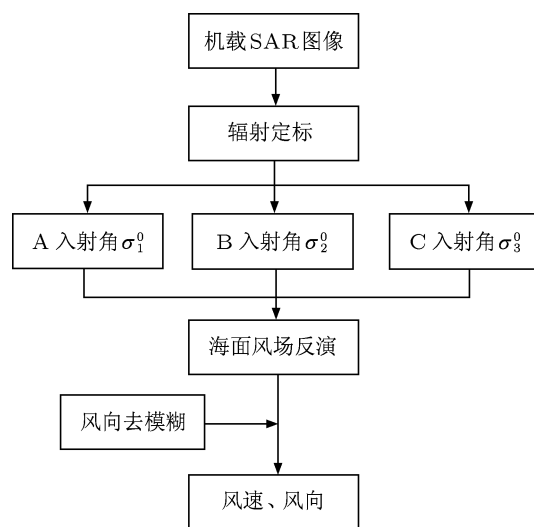


图 3 机载 SAR 海面风场反演流程图

以风速 10 m/s、风向 78° , 入射角 $35^\circ, 40^\circ$ 和 45° 为例, 利用 CMOD5 仿真雷达后向散射系数, 采用本文提出的方法反演海面风速和风向, 其中三个入射角的观测值噪声电平 σ_{noise} 均为 0 或 1.0 dB, 反演结果如表 1 所示. 在 $\sigma_{noise} = 0$ dB 时, 即观测值无噪声污染, 依据代价函数值的大小, 去除风向模糊后, 风速、风向的反演值分别为 9.99 m/s 和 77.89° , 与实际值非常接近; 在 $\sigma_{noise} = 1.0$ dB 时, 噪声的存在使得海面风速和风向反演的值出现偏差, 即风速 10.29 m/s 和风向 65.91° 为反演值.

噪声的存在直接影响 SAR 海面风场反演结果, 为分析机载 SAR 噪声电平 σ_{noise}^0 值对海面风场反演结果的影响, 假设 σ_{noise}^0 在 [0, 3.0] dB 范围取值, SAR 数据的仿真条件取风速 10 m/s, 风向 78° , 入射角 $35^\circ, 40^\circ$ 和 45° , 利用本文方法计算不同噪声电平的海面风速、风向反演精度, 结果如图 4 所示. 从图 4 可看出, 随着 SAR 后向散射系数定标误差的增大, 海面风速、风向的反演误差均明显增大, 反演误差与噪声电平基本呈正比关系. 风速、风向反演的基础是地球物理模型, 而模型函数中海面风速和风向均是雷达后向散射系数的变量. 因此, 机载 SAR 数据的定标精度是影响海面风速、风向反演精度的关键因素.

表 1 仿真 SAR 数据的海面风速、风向反演结果 (风速 10 m/s、风向 78°)

序号		1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{\text{noise}} = 0 \text{ dB}$	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	9.41	9.99	9.41	9.99	9.89	9.89	9.50	9.31
	风向/ $^{\circ}$	288.10	77.89	71.90	282.11	283.11	76.89	287.10	70.90
	$J_{\text{cost}}/10^{-10}$	1.24	1.27	1.34	1.43	10.50	10.99	14.13	14.72
$\sigma_{\text{noise}} = 1.0 \text{ dB}$	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	10.29	10.29	10.48	10.48	10.58	10.58	10.77	10.77
	风向/ $^{\circ}$	294.09	65.91	67.41	292.59	291.59	68.41	290.09	69.90
	$J_{\text{cost}}/10^{-7}$	16.55	16.55	16.58	16.58	16.79	16.80	16.90	16.90

为衡量机载 SAR 辐射定标精度确定时海面风场反演效果, 仿真研究各种风速、风向条件下机载 SAR 海面风场反演误差. 假设机载 SAR 定标精度为 1.0 dB, 入射角取值为 35°, 40° 和 45°, 风速范围 0—25 m/s, 风向范围 0—359°. 机载 SAR 观测的噪声电平 σ_{noise}^0 为一个随机值, 为分析论文提出的反演方法在实际业务中的适用性, 随机模拟 σ_{noise}^0 值并统计分析 σ_{noise}^0 对风速、风向反演精度的影响, 其中 σ_{noise}^0 取 [0, 1.0] dB 范围的随机数, 反演结果如图 5 和图 6 所示.

图 5 为海面风向反演的误差散点图 (图 5(a)) 和在不同风速、风向条件下的风向误差绝对值的分布图 (图 5(b)). 由风向误差散点图可知, 在风向为 0—359° 范围内, 海面风向的反演误差基本在一定范围内, 平均误差为 10.24°, 均方根误差为 10.76°. 由图 5(b) 可看出, 在不同海面风速、风向条件下, 海面风向反演的误差绝对值在海面风向 180° 附近呈对称分布, 这是由地球物理模型函数中相对风向的余弦函数所致, 且风向误差与风速的大小无明显相关性.

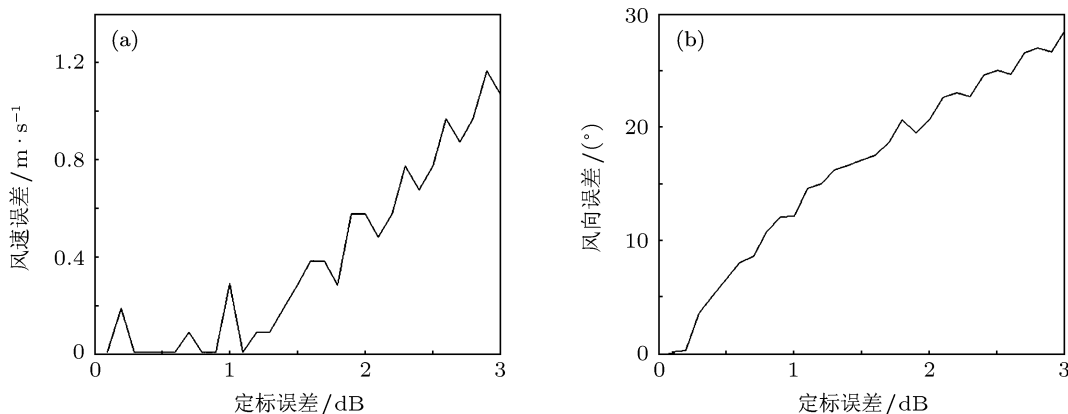


图 4 定标误差在 [0—3.0] dB 时海面风场反演误差 (a) 风速误差; (b) 风向误差

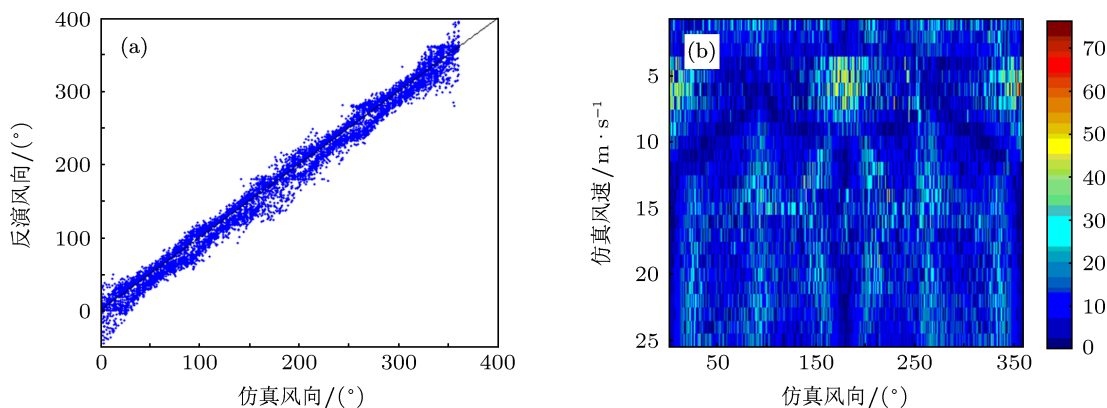


图 5 海面风向反演误差 (a) 误差散点; (b) 误差绝对值分布

图 6(a), (b) 分别为海面风速反演的误差散点图和不同风速、风向条件下的风速误差绝对值的分布图, 其中海面风速反演平均误差为 0.85 m/s, 均方根误差为 1.54 m/s. 图 6(a) 中海面风速的反演误差在总体趋势上随着风速的增大而增大, 尤其当海面风速大于 18 m/s 时误差明显增大; 海面风速小于 18 m/s 的平均误差为 0.63 m/s, 均方根误差为 0.79 m/s; 而当海面风速在 18—25 m/s 范围时, 海面风速的平均误差为 1.42 m/s, 均方根误差达到了 2.98 m/s, 并且出现很多误差较大的点, 误差最大值达到 15.68 m/s. 由图 6(b) 可知, 海面风速误差绝对值较大的地方出现在风速大于 18 m/s, 风向在 180° 和 360° 附近. 因此, 本文提出的海面风场反演方法比较适用于中低风速的海况, 对于高风速情况可能会产生较大的反演误差. 这是由于随着海面风速的增大, 后向散射系数的值将增大, 在相同定标精度情况下则可能产生更大风速反演误差. 该结论与文献 [30, 31] 中关于 SAR 辐射定标精度对海面风场反演误差的研究结论一致.

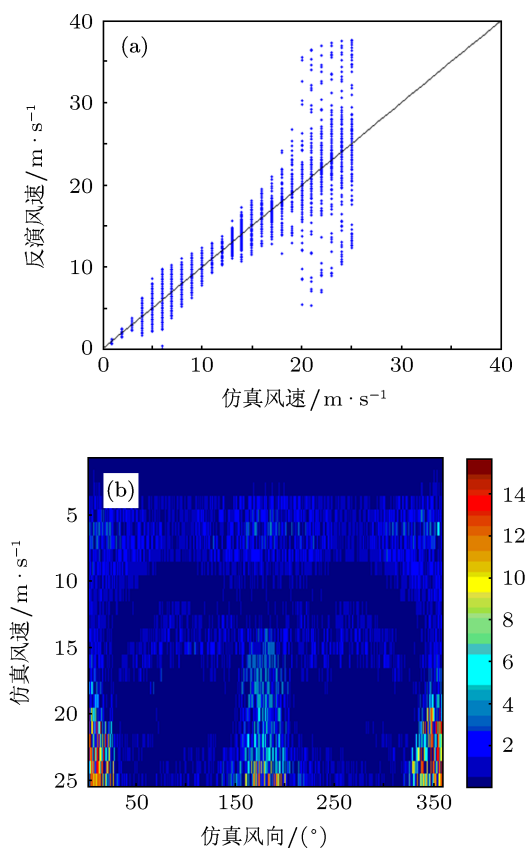


图 6 海面风速反演误差 (a) 误差散点; (b) 误差绝对值分布

由以上仿真分析可知, 本文提出的 C 波段机载 SAR 海面风场反演新方法利用机载 SAR 图像距离

向的多个入射角的后向散射系数, 结合地球物理模型函数, 可不依赖背景场资料, 在中低风速条件下反演出高精度的海面风速和风向, 且定标精度是影响海面风速、风向反演效果的关键因素.

4 实例研究及验证分析

4.1 试验数据

为进一步验证论文提出方法的有效性, 利用机载 SAR 实测数据进行反演试验, 本文采用的试验数据是机载 C 波段 SAR 探测数据, 探测时间为北京时间 2009 年 3 月 9 日 10 时, 调查船实测风速 8.3 m/s, 风向 26° (海面 10 m 高度处), 位于北纬 19°, 东经 111° 附近. NCEP 再分析资料的空间分辨率经纬度网格距为 1° × 1°, 每隔 6 h 发布一次. 机载 SAR 探测时间为北京时间 10 时, 与之间相关的 NCEP 资料时间应为世界时 00 时和 06 时, 如图 7 所示.

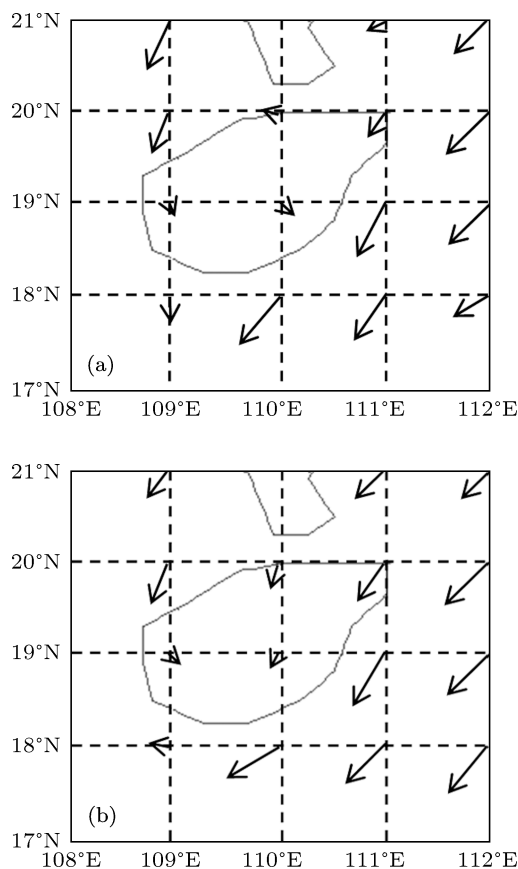


图 7 NCEP 资料风场图 (a) 00 时; (b) 06 时

由图 7 可知, 海面上大片区域的风向基本是一致的, 为东南风向; 由于受到建筑物等影响, 海岛内

风向发生改变, 风速减小. NCEP 再分析资料提供的海面风场时间和空间分辨率较低, 无法直接得到机载 SAR 探测区域的风向信息, 但可分析出总的海面风场趋势, 也用于去除风向的 180° 模糊. 因此, 我们取与 SAR 探测区域空间距离最为接近的网格点, 即北纬 19°, 东经 111° 点上的海面风向进行比对, 该点的 00 时风速 7.56 m/s, 风向 24.19°, 06 时风速 7.0 m/s, 风向 25.46°.

4.2 结果及分析

对定标后的 C 波段 VV 极化机载 SAR 图像在北纬 19°, 东经 111° 附近的多个区域进行海面风场反演试验, 并将反演结果与调查船实测风速、风向以及 NCEP 资料进行比对. 图 8 为 2009 年 3 月 9 日两幅机载 SAR 图像的距离向后向散射系数在方位向的平均值与不同入射角仿真的后向散射系数

比对图, 实线表示 SAR 图像后向散射系数由远观测点到近观测点的变化, 即入射角是由大到小变化, 虚线表示利用 CMOD5 仿真的雷达后向散射系数值, 仿真所用风向与风速均为浮标值, 入射角与机载 SAR 探测入射角一致. 由该图可知, 机载 SAR 后向散射系数值随着入射角的增大在减小, 其变化趋势与仿真的后向散射系数基本一致, 但也存在一定的偏差. 图 8(b) 中 SAR 观测值曲线偏离仿真值曲线的程度大于图 8(a), 其反演的海面风速、风向的误差也较大, 如表 2 所示. 机载 SAR 距离向的后向散射系数在不同入射角情况下相差较大, 但近观测点与远观测点的距离不到 2 km, 因此可认为该区域海面风速、风向基本一致, 即可通过多个地球物理模型函数联立求解出海面风场, 这也是本文所提出的机载 SAR 海面风场反演方法的物理基础.

表 2 为利用本文方法反演的机载 SAR 海面风速、风向结果, 以及调查船观测值和 NCEP 数据, 其

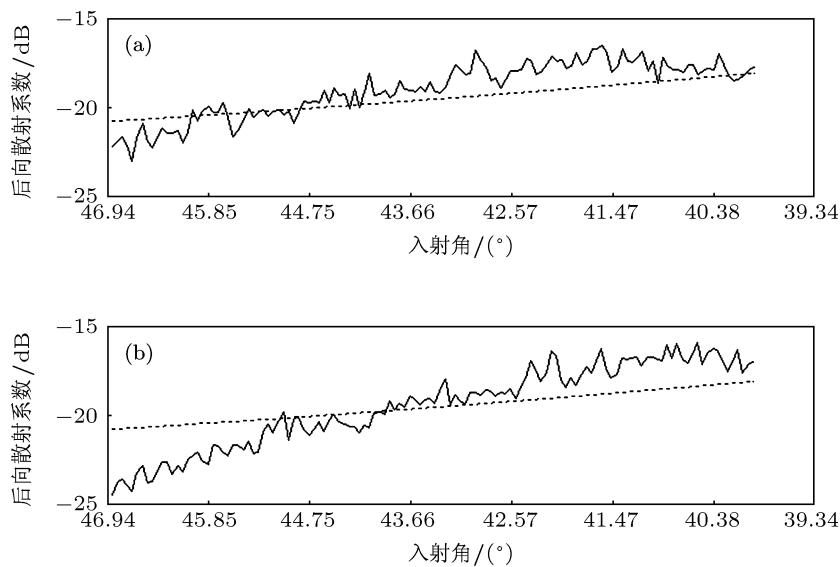


图 8 机载 SAR 探测数据与不同入射角仿真数据 (a) 数据 030901; (b) 数据 030911

表 2 机载 SAR 数据海面风场反演结果 (2009-03-09)

数据	海面风速/m·s ⁻¹				海面风向/(°)			
	反演值	NCEP 资料		调查船观测值	反演值	NCEP 资料		调查船观测值
		00 时	06 时			00 时	06 时	
030901	8.91				32.76			
030902	8.81				34.18			
030903	9.60				27.31			
030911	9.31	7.56	7.0	8.3	33.91	24.19	25.46	26
030912	9.40				33.39			
030921	8.92				36.54			
030922	8.72				36.14			
RMS		0.92				8.61		

中 NCEP 资料取北纬 19° , 东经 111° 点风速、风向. 海面风速反演结果与调查船观测值的平均误差为 0.79 m/s , 均方根误差为 0.92 m/s ; 海面风向反演结果与调查船观测值的平均误差为 7.46° , 均方根误差为 8.61° . 由于 NCEP 数据和调查船实测数据在空间和时间有较大差别, 因而出现海面风速和风向的不一致. 实测数据的反演结果验证了本文提出的海面风场反演方法的有效性, 与模拟仿真结论一致, 适用于 C 波段机载 SAR 海面风场的反演.

5 结论

传统的星载 SAR 海面风场反演需已知海面风向作为地球物理模型函数的输入, 依赖数值模式值、浮标和散射计等背景场风向以及风条纹, 在应用于高分辨率的机载 SAR 图像时存在时空分辨率不匹配的问题, 从而严重影响了机载 SAR 海面风场的反演结果. 本文提出 C 波段机载 SAR 海面风场反演新方法, 针对机载 SAR 对海探测特点, 利用 SAR 图像距离向多个入射角的后向散射系数, 通过联立多个地球物理模型函数, 构建最小代价函数, 直接反演出海面风速和风向, 解决了传统星载 SAR 海面风场反演方法应用于机载平台时存在的问题, 提高了海面风速、风向的空间分辨率及反演精度.

仿真研究表明, 该方法适用于中低风速条件的机载 SAR 海面风场反演, 当海面风速大于 18 m/s 时可能会产生较大的反演误差. 仿真数据和实测数据的反演结果均验证了该方法的有效性, 经过适应性改进后可直接应用于机载 SAR 海面风场探测业务中. 但定标精度是影响风场反演效果的关键因素, 因此, 要提高海面风速、风向的反演精度需通过内定标和外定标等方式提高机载 SAR 数据的定标精度. 星载 SAR 的刈幅通常有几百公里, 在采用本文所提方法时, 即使选择较小的入射角间隔, 不同观测点的距离亦有几十公里. 因此, 该方法在应用于星载 SAR 时应选择海面风场在空间变化较为缓慢的海况, 对于近岸的海面风场观测则可能会出现较大反演误差; 而机载 SAR 的分辨率高, 刈幅窄, 尤其适用于海岸带和岛屿区的海面风场反演.

下一步, 我们将获取更多 SAR 数据, 通过反演试验充分验证本文提出方法的有效性; 利用机载 SAR 平台的机动灵活特性, 将研究不同观测视角下的海面风场反演方法, 并进一步开展高风速条件下的海面风场反演误差校正研究.

感谢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、调查船观测结果及机载 SAR 数据定标方面给予的支持.

- [1] Zhang L, Huang S X, Zhong J, Du H D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7479 (in Chinese) [张亮, 黄思训, 钟剑, 杜华栋 2010 物理学报 **59** 7479]
- [2] Martine S 2004 *An Introduction to Ocean Remote Sensing* (Cambridge: Cambridge University Press) pp201–207
- [3] Lin H, Xu Q, Zheng Q 2008 *Prog. Nat. Sci.* **18** 913
- [4] Zecchetto S, Biasio D 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 2983
- [5] Horstmann J, Koch W, Lehner S, Tonboe R 2000 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **38** 2122
- [6] Thompson D R, Beal R C 2000 *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* **21** 58
- [7] Monaldo F 2000 *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* **21** 75
- [8] Cameron I, Lumsdon P, Walker N, Woodhouse I 2006 *In Proceedings of SEASAR: Advances in SAR Oceanography from ENVISAT and ERS Missions* Frascati, Italy, January 23–26, 2006 1
- [9] Lehner S, Pleskachevsky A, Bruck M 2012 *Int. Geosci. Remote Sens.* **33** 7337
- [10] Yang J S 2005 *SAR Remote Sensing Techniques of Sea Surface Wind, Surface Wave and Internal Wave* (Beijing: Ocean Press) pp31–32 (in Chinese) [杨劲松 2005 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) 第 31–32 页].
- [11] Apel J R 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 16269
- [12] Levy G 1998 *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 1437
- [13] Vachon P W, Dobson F W 1996 *The Global Atmosphere and Ocean System* **5** 177
- [14] Ynag J S, Huang W G, Zhou C B 2001 *J. Remote Sens.* **5** 13 (in Chinese) [杨劲松, 黄韦良, 周长宝 2001 遥感学报 **5** 13]
- [15] Wolfgang K 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 702
- [16] Zhang R W, Yan W, Ai W H, Ma S 2011 *J. Microwaves* **27** 79 (in Chinese) [张日伟, 严卫, 艾未华, 马烁 2011 微波学报 **27** 79]
- [17] Gladeston C L, Daniela M U, Fátima N S 2010 *Sensors* **10** 5994
- [18] Ai W H, Kong Y, Zhao X B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148403 (in Chinese) [艾未华, 孔毅, 赵现斌 2012 物理学报 **61** 148403]
- [19] Kong Y, Zhao X B, Ai W H, Han D, Xue J 2011 *J. PLA Univ. of Sci. and Tech.* **12** 301 (in Chinese) [孔毅, 赵现斌, 艾未华, 韩丁, 薛剑 2011 解放军理工大学学报 **12** 301]
- [20] Biasio F D, Zecchetto S 2012 *Euro. J. Remote Sens.* **45** 141
- [21] Jiang Z H, Huang S X, Shi H Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 108402 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 石汉青 2010 物理学报 108402]
- [22] Jiang Z H, Huang S X, He R, Zhou C T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068401 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 何然, 周晨腾 2011 物理学报 **60** 068401]
- [23] Levy G, Brown R A 1998 Ed. by Brown R A. *Earth Ocean and Space* 128
- [24] Horstmann J, Lehner S, Koch W, Tonboe R 2000 *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* **21** 100
- [25] Mouche A A, Collard F 2012 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **50** 2901
- [26] Hersbach H, Stoffelen A, Haan S D 2007 *J. Geophys. Res.* **112** 3006

- [27] Zhang B, Perrie W 2012 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **93** 531
[28] Zhang B, Perrie W, He Y 2011 *J. Geophys. Res.* **116** C08008
[29] Zhang B, Perrie W, Vachon P W, Li X, Pichel W G, Guo J, He Y 2012 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **50** 1
[30] He Y J, Perrie W, Zou P W 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **43** 1453
[31] Zhao X B, Kong Y, Yan W, Ai W H, Liu W J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148404 (in Chinese) [赵现斌, 孔毅, 严卫, 艾未华, 刘文俊 2012 物理学报 **61** 148404]

A new ocean surface wind field retrieval method from C-band airborne synthetic aperture radar*

Ai Wei-Hua^{1)2)†} Yan Wei¹⁾ Zhao Xian-Bin¹⁾ Liu Wen-Jun¹⁾ Ma Shuo¹⁾

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)

(Received 26 June 2012; revised manuscript received 14 November 2012)

Abstract

Wind direction retrieval depending on other background sources, e.g., the visible wind-induced streaks, numerical weather prediction model data, scatterometer data and buoy data is the key problem existing in the ocean wind field retrieval using airborne synthetic aperture radar (SAR) data based on geophysical model function which influences the wind speed and direction retrieval accuracies. To solve this problem, a new ocean wind field retrieval method is proposed, with which the wind speed and direction are estimated simultaneously through using the normalized radar cross sections corresponding to different incidence angles and geophysical model function according to the sounding characteristics of airborne SAR. To evaluate the ocean wind field retrieval errors and effects, the simulated data and C band airborne SAR data are used to obtain the wind speed and direction by the proposed method. The verification results show that the wind field retrieval method is suited to retrieve highly accurate wind speed and direction from airborne SAR sounding data without other background sources. The major error can be explained by the insufficient accuracy in calibration of the NRCS for wind speed and wind direction retrieval. The wind speed error increases with the value of speed increasing and at high wind speeds exceeding 18 m/s the error increases distinctly. The value of wind speed has no obvious influence on wind direction retrieval accuracy.

Keywords: airborne SAR, ocean surface wind, multi-incidence

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.068401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41005018), the Foundation of Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, China (Grant No. KDXS1106), the PLA University of Science and Technology Foundation of China and the Institute of Meteorology and Oceanic of PLA University of Science and Technology Foundation of China.

† Corresponding author. E-mail: awh1979@126.com