

针对 C 波段组网 SAR 卫星的风场优化反演方法研究

万 勇¹, 时晓磊², 戴永寿¹

(1. 中国石油大学(华东), 海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东), 控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 地球物理模型函数是一种常被用于同极化合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)的风场反演方法。在使用该方法提取 SAR 数据的风速时, 需要将风向作为输入信息, 这导致反演风速的精度受风向精度的影响, 且使 SAR 风场反演无法独立完成。为了解决这些问题, 通过数值模拟获取仿真的组网 SAR 卫星数据, 3 颗 SAR 同时以不同的入射角观测同一海面。针对仿真的组网 SAR 卫星数据, 发展了一种风场优化反演方法, 可以在不输入风向的前提下反演风速, 提供参考风向还可以进一步提高风场反演的精度。

关键词: 组网卫星; 合成孔径雷达; 风场反演

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2021)05-0074-13

DOI: 10.11759/hyxx20201105003

海面风场是海洋上层运动的主要动力来源, 与海洋中多数的物理过程密切相关, 在海洋动力学中, 它是形成海面波浪的直接动力, 也是区域和全球海洋环流的重要动力来源。因此, 快速、准确地获取海面风场信息, 有助于对海洋环境乃至全球气候变化做出更科学的判断和预报。

目前的海面风场信息观测方式有岸基观测站、船只、浮标、散射计及合成孔径雷达。其中, 岸基观测站、船只、浮标的观测范围有限且是单点分布, 维护成本较高, 无法实现大范围观测; 随着卫星遥感技术的发展, 散射计被应用到海洋风场探测领域, 可以在短时间内获取大面积的海面风场数据, 是比较成熟的风场信息观测方式, 但其空间分辨率较低且近海岸风场反演的精度较差^[1]。随着合成孔径雷达技术的发展, 星载合成孔径雷达可以实现全天候、全天时观测, 具有较高的空间分辨率(可达数米至数十米), 弥补了散射计的不足, 合成孔径雷达是目前乃至未来实现海面风场大范围观测的主要手段^[2]。

地球物理模型函数(geophysical model function, GMF)是比较成熟且使用较多的提取 SAR 风场信息的方法, 首先被应用于散射计。散射计利用不同的方位角对同一海面单元进行多次观测, 根据最大似然估计建立基于 GMF 的代价函数, 获取可能的风速、风向组合, 筛选出最优解^[3]。合成孔径雷达的观测方位角是固定的, 无法在短时间内对同一海面单元进

行多次观测, 所以无法使用与散射计相同的方法从 SAR 数据中获取风场。但是, 如果将风向作为初始化信息, 则地球物理模型函数中的入射角、相对风向(风向与雷达观测方向的夹角)确定, 从而可以确定风速^[4]。风向的获取方法至少有 3 种: 1) 利用 SAR 图像中的线性纹理信息获取海面风向; 2) 利用数值预报模式获得风向; 3) 通过散射计获取风向信息。

早期大量的观测和研究表明, 大气边界层涡旋的轴线方向与海面风矢量的方向基本一致, 在 SAR 图像上表现为具有线性纹理特征的风条纹^[5]。对图像进行二维傅里叶变换可以得到风向, 但存在 180°模糊。并且, 在获得的海面 SAR 图像中, 具有风条纹信息的 SAR 图像大约占 60%^[6]。

Monaldo^[7]利用海军实用全球大气预测系统(NOGAPS)与 SeaWinds 散射计的风向作为初始风向提取 SAR 数据的风速, 前者反演风速与 SeaWinds 风速相比的均方根误差(root mean square error, RMSE)为 1.78 m/s, 后者为 1.36 m/s。在使用数值预报模式或散射计的风向数据提取风速时, 风向数据的空间分辨

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2021-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405600)

[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1405600]

作者简介: 万勇(1979—), 男, 湖北松滋人, 博士, 副教授, 主要从事 SAR 海浪风场探测相关研究, E-mail: wanyong@upc.edu.cn; 时晓磊(1996—), 通信作者, 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事信号检测与处理研究, E-mail: beyourself_lei@163.com

率较低, 需要将风向插值到 SAR 图像的各像元上, 忽略了许多小尺度上的风向变化, 从而影响风速的精度。同时, 风向数据的获取时间可能与 SAR 图像的获取时间不同, 时间差越大, 对风速精度的影响越大^[7-8]。

在使用地球物理模型函数从 SAR 图像中提取风场信息时, 需要输入风向数据, 而上述风向被用于风场反演时存在各种问题。针对风场反演中存在的问题, 本文提出了组网 SAR 卫星的一种工作模式, 在该模式下多颗星载 SAR 同时以不同入射角观测同一海面。目前在轨的组网卫星无法实现多颗 SAR 同时以不同入射角观测同一海面, 因此, 本实验通过 SAR 成像仿真的方法获取了组网 SAR 卫星数据, 并建立了适用于组网 SAR 卫星数据的风场优化反演方法。该方法可以在不输入风向的条件下提取风速信息, 但是在中高海况下的风速反演精度较低。在一定条件下, 将海浪方向作为参考风向用于筛选结果, 可以获得较准确的风向信息, 并进一步提高风速的精度。

1 数据源

目前, 在轨的组网卫星无法实现多颗 SAR 同时以不同入射角观测同一海面。针对这种情况, 本文采用 SAR 成像仿真技术模拟了组网 SAR 卫星数据, 以此作为后续研究的基础数据。

1.1 SAR 成像仿真的基本原理

SAR 成像仿真由海浪谱模拟、海面模拟、SAR 回波模拟、SAR 海面成像等步骤组成, 具体实现流程如图 1。

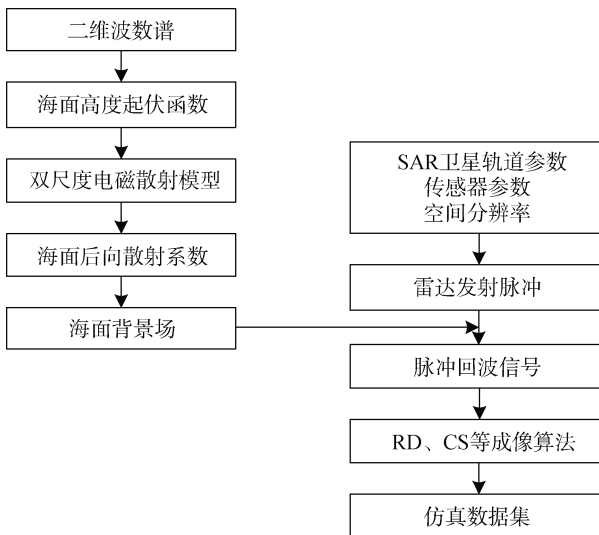


图 1 SAR 成像仿真流程图

Fig. 1 Flowchart of SAR imaging simulation

SAR 成像仿真的第一个工作是海浪谱模拟, 海浪谱模拟是海面模拟的前提。常用的海浪谱有 PM 谱^[9]、JONSWAP 谱^[10]、E 谱^[11], 本文选用 E 谱进行海浪谱模拟, E 谱描述的是全波数谱。E 谱的低波数部分(B_l)如下:

$$B_l = \frac{\alpha_p}{2} \cdot \frac{c_p}{c} \cdot F_p, \quad (1)$$

其中, α_p 是长波的平衡区域参数, c_p 是与峰值波数对应的相速度, c 代表相速度, F_p 是长波边缘效应函数。E 谱的高波数部分(B_h)如下:

$$B_h = \frac{\alpha_m}{2} \cdot \frac{c_m}{c} \cdot F_m, \quad (2)$$

其中, α_m 是短波的平衡区域参数, c_m 代表最小波相速度, c 代表相速度, F_m 是短波边缘效应函数。全波数谱(S)如下:

$$S = k^{-3}(B_l + B_h), \quad (3)$$

其中, k 代表海浪波数。实际海浪除了沿主波方向传播外, 还向其他方向扩散, 因此, 第一项工作是需要借助方向函数描述不同传播方向的海浪。将一维海浪谱乘以归一化的方向函数即可得到二维海浪方向谱, 然后根据重力色散关系, 把二维海浪方向谱转换为二维波数方向谱。本文选用的方向函数(f)如下:

$$f(k, \varphi) = \frac{1}{2\pi} [1 + \Delta(k) \cos(2\varphi)], \quad (4)$$

其中, φ 代表与风向相对的海浪方向, 即风向与浪向的夹角。波数方向 E 谱(E)可由全波数谱和方向函数表示, 如下:

$$E(k, \varphi) = S \cdot f(k, \varphi) / k. \quad (5)$$

第二项工作是海面模拟, 海面模拟为海面后向散射系数的计算提供背景场。之后, SAR 才能对海面发射电磁波并接收回波, 从而结合电磁散射模型计算海面后向散射系数。本文采用蒙特卡罗方法即线性滤波法模拟二维海面^[12]。

第三项工作是 SAR 回波模拟。在模拟海面回波数据的过程中, 有两个需要解决的关键问题: 海面后向散射系数的计算、海面回波信号的生成。本文选用双尺度电磁散射模型计算海面后向散射系数, 规定 SAR 的波段为 C 波段, 极化方式为 VV 极化, SAR 的具体系统参数如表 1 所示。模拟回波信号的算法有时域算法和频域算法两种。频域算法计算量相对较小, 但在生成海面回波信号的过程中无法引入速度聚束效应, 生成的海面回波信号精度受限。时域算法模拟的是 SAR 接收机的真实工作过程, 能够

获取原始回波信号,虽然计算量大,但生成的海面回波信号最为准确^[13]。由于对精度的需求,本文选用时域算法,假定 SAR 工作方式为正侧视,模拟海面回波信号。

最后一个工作是 SAR 海面成像。本文采用距离多普勒(range Doppler, RD)成像算法对海面回波信号进行成像处理,得到海面的 SAR 图像。RD 算法包括 3 个关键步骤:距离向压缩、距离徙动校正、方位向压缩。

通过上述流程获取的仿真 SAR 图像符合 SAR 探测海面的原理,且可用于实验研究^[14]。本文使用的实验数据如表 2 所示。在优化风速反演模型时,本文使用了仿真的单星 SAR 数据。为保证优化模型对仿真 SAR 数据的适用性,本文模拟了多种条件的 SAR 数据,条件如下:入射角为 20°~60°、相对风向为 0°~360°、风速为 1~30 m/s。在进行多人射角风场反演时,本文模拟了 3 颗星载 SAR 同时以不同入射角观测同一片海面,观测海面时的风速为 1~30 m/s、相对风向为 0°~180°,3 颗星 SAR 的入射角分别为:31°~40°、41°~50°、51°~60°。

表 1 星载 SAR 系统参数

Tab. 1 Spaceborne SAR system parameters

参数名	参数值	参数名	参数值
载波频率	6 GHz	脉冲宽度	10 μs
采样频率	200 MHz	线性调频带宽	100 MHz
波束入射角	20°~60°	极化方式	VV 极化
SAR 平台高度	530 km	分辨率	4 m; 4 m
天线长度	8 m	SAR 平台速度	7 600 m/s
轨道半长轴	6 870.14 km	升交点赤经	-60
轨道扁率	0.003	近地点幅角	160°
轨道倾角	97.42°	飞经升交点时刻	0

表 2 实验数据集

Tab. 2 Experimental datasets

数据集编号	入射角	相对风向	风速/(m·s ⁻¹)
1	20°~60°	0°~360°	1~30
2	31°~40°	0°~180°	1~30
3	41°~50°	0°~180°	1~30
4	51°~60°	0°~180°	1~30

2 组网 SAR 卫星风场优化反演

2.1 理论背景

目前,地球物理模型函数是 C 波段 SAR 数据海面风速反演的常用方法。该模型是通过统计大量的

雷达后向散射系数与相应位置的浮标或者数值预报模式资料而建立的经验模型,它描述了雷达入射角、风速、相对风向和后向散射系数之间的关系。目前常用的地球物理模型函数主要有 CMOD4、CMOD-IFR2、CMOD5 和 CMOD5.N。CMOD4 是欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecast, ECMWF)根据 ERS-1 卫星上搭载的 C 波段散射计结合数值预报模式风场数据拟合得到的风场反演模型,后来被证实同样可用于 C 波段同极化 SAR 数据,是目前最具代表性的地球物理模型函数^[15]; CMOD-IFR2 是法国海洋开发研究院根据 NOAA 浮标数据和 ERS 系列数据开发的适用于 C 波段同极化 SAR 数据的地球物理模型函数^[16]; Hersbach 等在 CMOD4 基础上开发得到更适用于高风速海况的 CMOD5,该模型在台风、飓风等高海况下表现出较好的风速反演效果^[17]; CMOD5.N 是对 CMOD5 的 28 个可调系数进行重新拟合得到的模型,一方面修正了 CMOD5 存在的 0.5 m/s 的低估偏差,另一方面因其针对中性风设计,更能代表海表状况,避免了大气分层可能带来的误差^[18]。

本文选择 CMOD5.N 作为研究的基础模型,CMOD5.N 的函数形式如下:

$$\sigma^0 = B_0 (1 + B_1 \cos \phi + B_2 \cos 2\phi)^{1.6}, \quad (6)$$

其中, σ^0 为后向散射系数, ϕ 为相对风向, B_0 、 B_1 和 B_2 为风速 v 和入射角 θ 的函数。

在 SAR 风场反演中,直接使用 CMOD 需要输入风向数据。因此,风速反演精度受风向精度的影响。散射计能以不同的方位角对同一海面进行多次有效观测,因此,可以利用极大似然估计技术同时提取出风速和风向。利用这一原理,将 ENVISAT ASAR 图像分割为多个 25 km×25 km 的单元,相邻单元之间的入射角差大于 1°。在已知其他相关参数的情况下,根据相邻单元入射角的差异建立代价函数,通过一系列求解过程获取风矢量^[19]。该方法为 SAR 风场反演提供了新的思路。但该方法仅适用于风场分布均匀且变化相对缓慢的海况,且需要外部风向数据来确定唯一解。将该方法应用于星载 SAR 数据时,需要保证相邻子图像的入射角度不同,相邻子图像的范围相对较大,风场反演的分辨率较低。

利用组网 SAR 卫星观测海面,获得同一海域不同入射角下的 SAR 数据,可以保证不同 SAR 数据之间海面风场的一致性。因此,将多人射角风场反演方

法应用于组网 SAR 卫星数据时, SAR 风场反演的分辨率不受入射角差异的限制, 且可处理的 SAR 数据不受海况约束。

2.2 星载 SAR 真实数据的风速反演

为了确定 GMF 对仿真 SAR 数据的适用性, 本文先验证了将 GMF 应用于真实 SAR 数据时的风速反演精度, 使用 CMOD5.N 提取了 RADARSAT-2 数据和 Sentinel-1A 数据的风速信息, 在提取过程中输入的风向数据为 ECMWF 风向。最后, 使用 ECMWF 风速验证反演风速的准确性。在海面风速为 3~13 m/s 的海况下, 风速反演的 RMSE 为 0.86 m/s, 满足海面风速反演的精度要求。反演风速和 ECMWF 风速之间的对比如图 2 所示。

2.3 星载 SAR 仿真数据的风速反演

为了验证 CMOD5.N 对星载 SAR 仿真数据的适用性, 本文处理了入射角为 20°~60°、风速为 1~30 m/s 的仿真 SAR 数据。根据不同的入射角将数据分成 41 组, 使用 CMOD5.N 提取每组数据的风速信息, 然后将反演风速与实际风速进行对比。部分对比结果如图 3 所示。

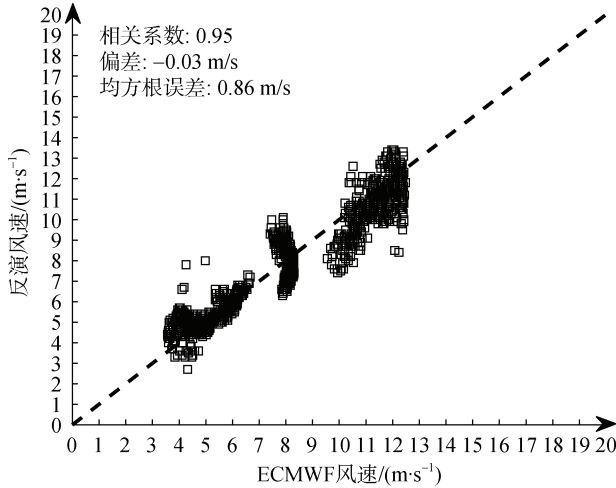


图 2 反演风速与 ECMWF 风速的对比结果

Fig. 2 Comparison result of inverted wind speed and ECMWF wind speed

从图 3 中可以发现: 当实际风速大于 10 m/s 时, 反演风速与实际风速的差值逐渐增大。这是因为仿真的后向散射系数与实际的后向散射系数不完全一致, 当入射角为 40°, 相对风向为 45°时, 后向散射系数与风速的关系如图 4 所示。

CMOD5.N 是一个拟合真实 SAR 数据与海面风场信息的经验函数, 假设 CMOD5.N 中的后向散射系数

与输入参数之间的关系和现实世界是一样的。从图 4 中可以看到: 当风速超过 10 m/s 时, 仿真后向散射系数增长率逐渐小于真实后向散射系数增长率。原因是 SAR 数据的仿真过程没有考虑泡沫对后向散射系数的影响, 在风速小于 10 m/s 时, 泡沫引起的海面辐射率变化相对较小, 但随着风速和白浪覆盖面积的增大, 这种变化迅速增大^[20]。

从图 3 中还可以看出: 当入射角小于 27°时, 反演风速的分布无规律且波动大; 而当入射角不小于 27°时, 反演风速的分布有规律且波动小。这种现象也与仿真 SAR 后向散射系数相关。如图 5 和图 6 所示, 分别展示了后向散射系数与相对风向、风速的关系, 其中, 虚线代表通过 CMOD5.N 计算的后向散射系数, 实线代表仿真的 SAR 后向散射系数。

从图 5 中可以看出: 随着入射角的增大, 仿真后向散射系数随着相对风向变化的趋势越来越近似余弦形状, 也逐渐接近 CMOD5.N 中后向散射系数随着相对风向变化的趋势; 当入射角大于 24°时, 仿真后向散射系数随着相对风向变化的趋势基本近似余弦形状, 且不存在明显的异常值。从图 6 中可以看出: 随着入射角的增大, 仿真后向散射系数随着风速变化的波动越来越少, 变化趋势逐渐变得平缓; 当入射角大于 25°时, 不同风速对应的仿真后向散射系数均小于通过 CMOD5.N 计算的后向散射系数, 不再存在明显的异常值点。因此, 为了保证数据的可用性, 将合格数据的入射角临界值设置为 27°, 将入射角小于 27°的仿真 SAR 数据视为不合格的仿真数据, 不再进行处理。

接下来, 统计了不同入射角条件下的反演风速的均方根误差, 结果如图 7 所示。34 组数据的 RMSE 在 5.5 m/s 至 8 m/s 之间, 这说明: 直接使用 CMOD5.N 提取仿真 SAR 数据的风速, 不能满足海面风速反演的精度要求。为了保证后续研究的可靠性, 有必要找到适用于仿真 SAR 数据的风场反演模型。

本文使用的数据是组网 SAR 卫星的模拟观测结果。通过更改输入参数, 可以获得各种海况下的 SAR 数据。首先, 使用 CMOD5.N 提取不同海况下的仿真 SAR 数据的风速; 然后, 拟合反演风速与实际风速之间的关系并建立关系数据库; 最后将拟合关系添加到 CMOD5.N, 获得适用于仿真 SAR 数据的风场反演模型。本实验采用最小二乘法拟合反演风速与实际风速之间的关系, 获得三阶非线性关系的拟合函数。反演风速与拟合关系的分布如图 8 所示。

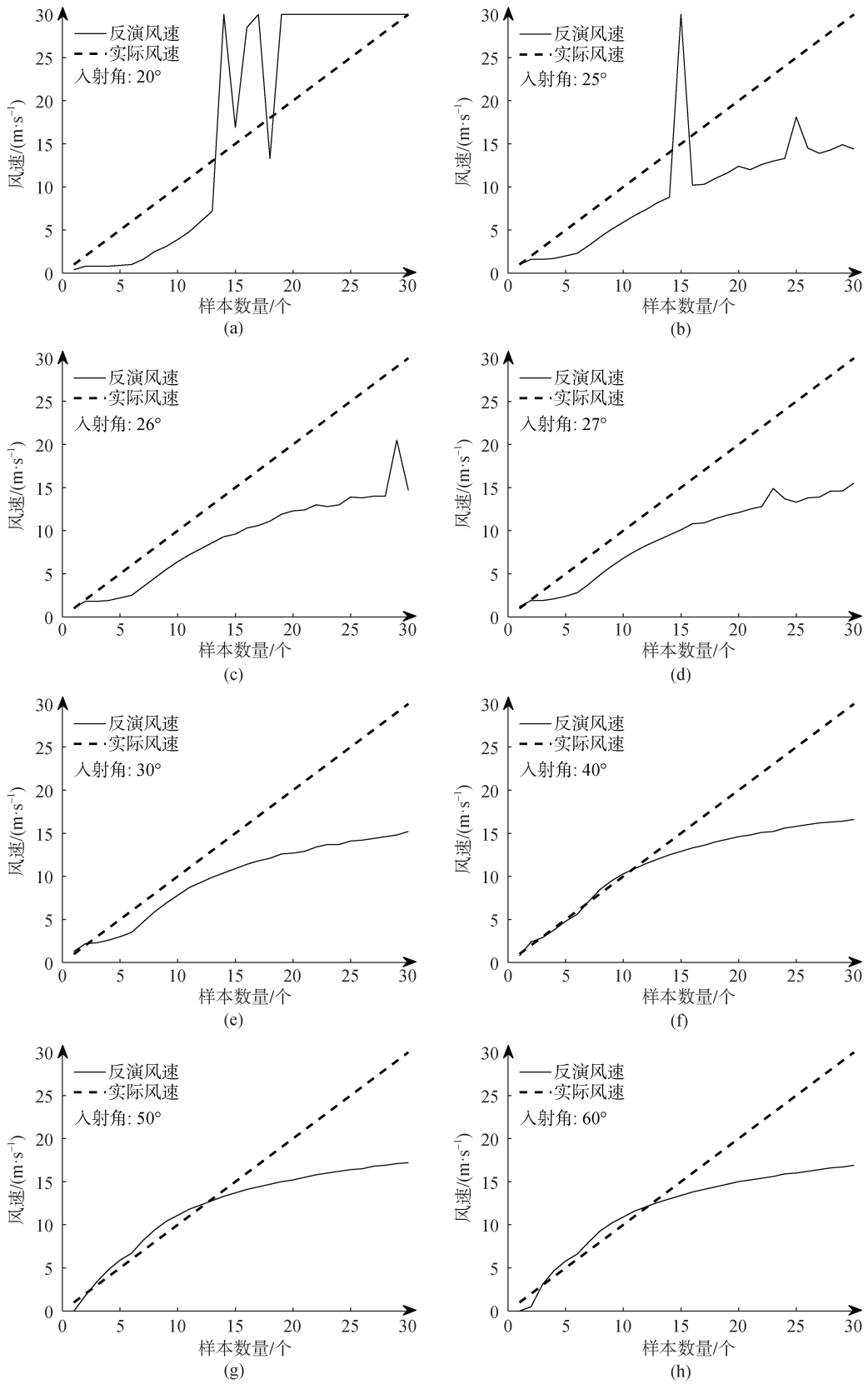


图3 反演风速与实际风速的对比结果(CMOD5.N)

Fig. 3 Comparison result of inverted wind speed and actual wind speed (CMOD5.N)

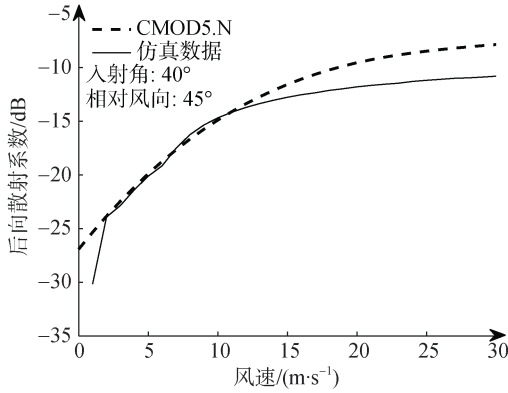


图 4 后向散射系数与风速的关系

Fig. 4 Relationship between backscattering coefficient and wind speed

从图 8 中可以看出: 拟合关系的形状相似, 且与反演风速的拟合度高。将拟合的非线性函数添加到 CMOD5.N 获得优化的模型, 通过优化模型提取仿真 SAR 数据的风速。反演风速与实际风速之间的对比如图 9 所示。

从图 9 可以看出: 通过优化模型提取的反演风速与实际风速的一致性较好。接下来, 计算不同入射角条件下的反演风速与实际风速相比的均方根误差, 结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出: 在不同入射角的条件下, 通过优化模型提取风速的 RMSE 均小于 1.5 m/s。这说明采用优化模型提取的风速精度符合海面风速反演的精度要求, 进一步证实, 优化模型适用于多数入射角和海况下的仿真 SAR 数据。

2.4 多入射角风场反演

利用 2.3 节优化的风速反演模型建立代价函数。在建立代价函数时, 使用不同入射角的 SAR 数据。本研究使用了 3 颗卫星的 SAR 数据, 建立的代价函数如公式(7)所示。

$$J_{\text{cost}}(\theta, \Phi, v) = \left[\sigma_1^m(\theta_1, \Phi_1, v) - \sigma_1^0(\theta_1, \Phi_1, v) \right]^2 + \left[\sigma_2^m(\theta_2, \Phi_2, v) - \sigma_2^0(\theta_2, \Phi_2, v) \right]^2 + \left[\sigma_3^m(\theta_3, \Phi_3, v) - \sigma_3^0(\theta_3, \Phi_3, v) \right]^2, \quad (7)$$

其中, σ_1^m , σ_2^m 和 σ_3^m 是通过优化模型计算的后向散射系数, σ_1^0 , σ_2^0 和 σ_3^0 是仿真的组网 SAR 后向散射系数, θ 为入射角, Φ 为相对风向, v 为风速。当代价函数的值最小即接近 0 时, 则通过模型计算的后

向散射系数与仿真的 SAR 后向散射系数最接近, 此时的风速与风向就是反演结果。

为了最小化代价函数, 分别获取了代价函数关于风速和相对风向的偏导数, 如式(8)、(9)所示, 式中字母含义同式(7)。由于优化模型是一个相对复杂的函数, 因此式(7)、(8)、(9)也是复杂的函数。为了减轻计算难度, 本文使用了一种双精度搜索方法来获取目标代价函数的最小值, 从而获得海面风速和风向的解。搜索过程主要分为两个步骤: 粗搜索和细搜索。在粗搜索过程中, 将 0~30 m/s 的风速以 1 m/s 为间隔, 将 0°~360°的相对风向以 10°为间隔代入式(8)与式(9), 得到偏导数。在结果中, 一些相邻结果的符号不同, 说明在相邻数据之间存在一个偏导数为 0 的点, 即极值点。然后, 在存在极值点的区间内进行细搜索, 将风速以 0.1 m/s 为间隔, 将相对风向以 1°为间隔代入式(8)与式(9)。将偏导数结果中最接近 0 的值保存, 并将其对应的风速和相对风向代入式(7)以计算代价函数, 与代价函数最小值对应的风速是风速反演结果, 由于风向存在 180°模糊的问题, 故无法获取准确的风向结果。

$$\frac{\partial J_{\text{cost}}(\theta, \Phi, v)}{\partial v} = \sum_{i=1}^3 2(\sigma_i^m - \sigma_i^0) \frac{\partial \sigma_i^m}{\partial v}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial J_{\text{cost}}(\theta, \Phi, v)}{\partial \cos(\Phi)} = \sum_{i=1}^3 2(\sigma_i^m - \sigma_i^0) \frac{\partial \sigma_i^m}{\partial \cos(\Phi)}. \quad (9)$$

该方法可以解决 SAR 风速反演依赖于风向数据的问题, 但只能获得反演风速。当相对风向为 45°时, 对实际风速为 1~30 m/s 的 30 组数据进行风速反演, 对比反演风速与实际风速, RMSE 为 2.25 m/s, 相关系数为 0.975。反演风速与实际风速的对比如图 11 所示。

另一种筛选结果的方法需要将参考风向引入处理流程。在计算完代价函数后, 设置合适的筛选阈值, 将筛选后的结果视为风矢量的模糊解。最后, 使用参考风向消除模糊解, 获得唯一解。前文提到了获取风向的方法, 散射计数据和数值预报模式数据的分辨率低; 基于风条纹信息获取的反演风向存在 180°模糊, 且大约 40%的 SAR 图像没有风条纹。因此, 本文使用海浪方向来消除模糊解, 从而获得唯一解。从 SAR 图像中可以获得不存在 180°模糊的海浪方向, 将海浪方向作为参考风向可以增强 SAR 风场反演的独立性。

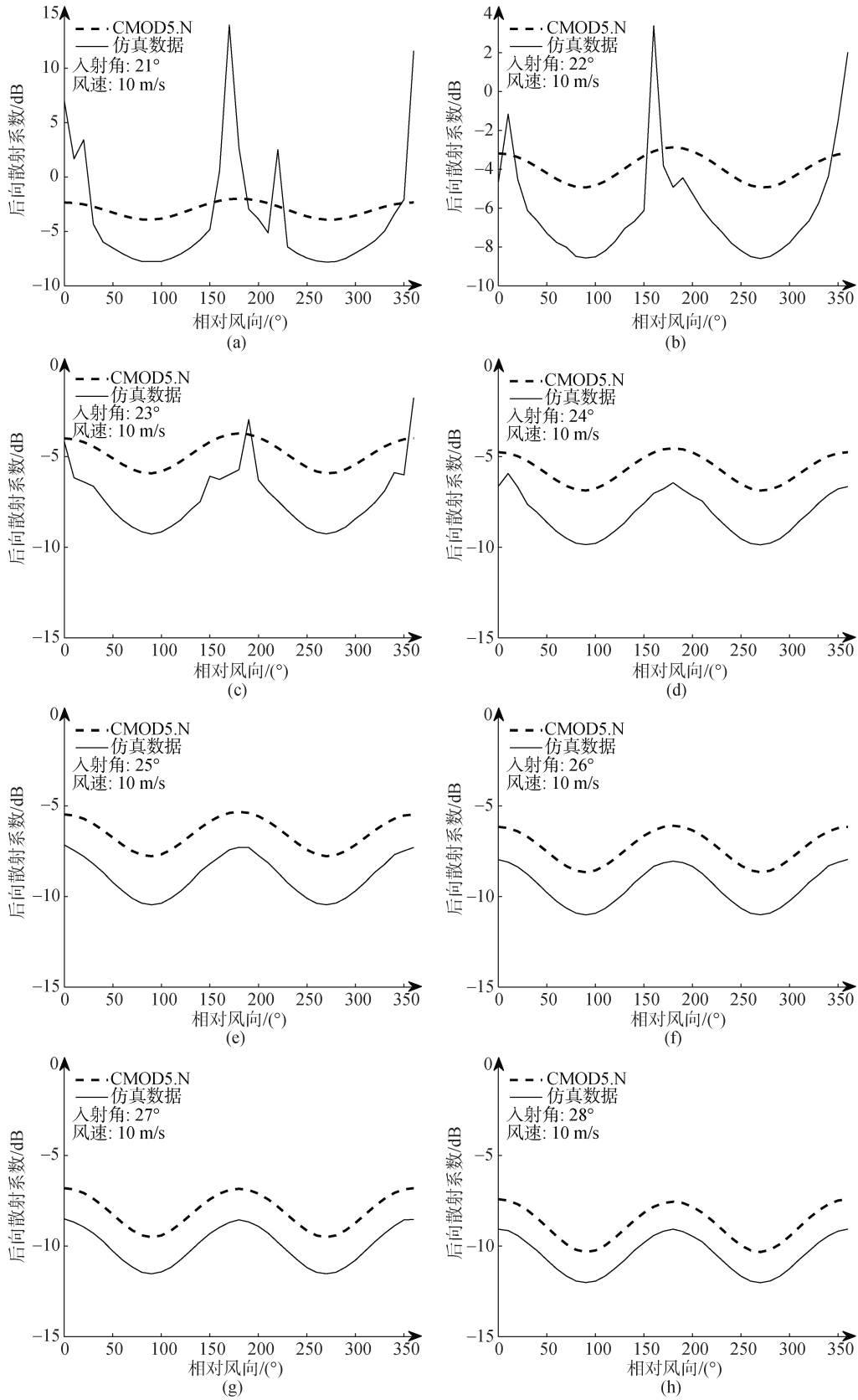


图 5 后向散射系数与相对风向的关系(不同入射角)

Fig. 5 Relationship between backscattering coefficient and relative wind direction (different incident angles)

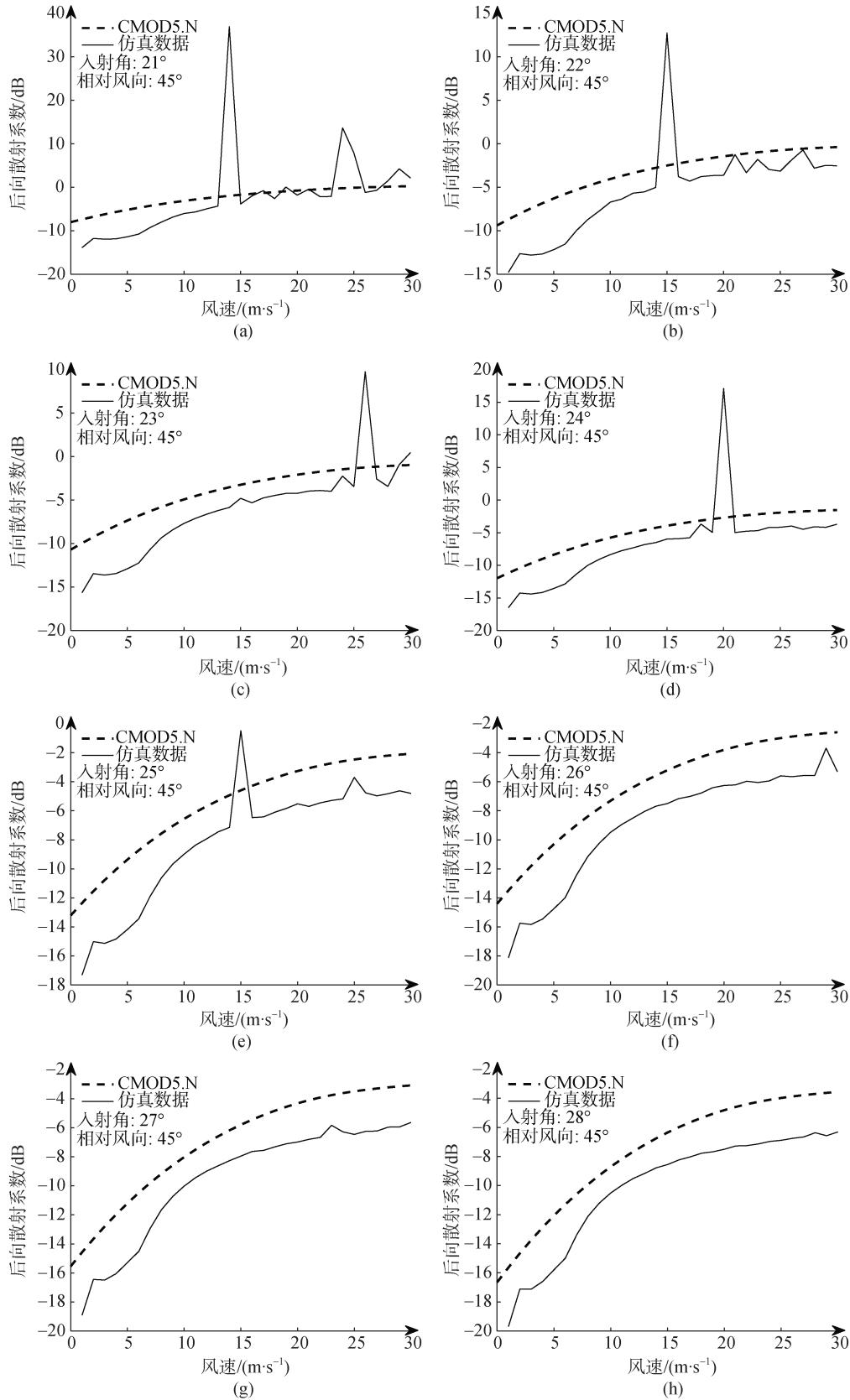


图 6 后向散射系数与风速的关系(不同入射角)

Fig. 6 Relationship between backscattering coefficient and wind speed (different incident angles)

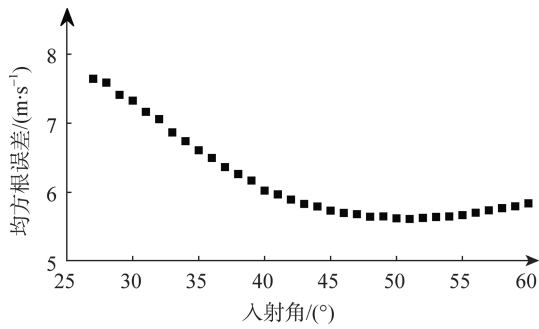


图 7 反演风速的均方根误差(CMOD5.N)

Fig. 7 Root mean square error of inverted wind speed (CMOD5.N)

海浪包括风浪和涌浪。风浪是在区域风的直接作用下形成的，从开始持续成长。当风速突然下降或风向突然改变时，风浪可能会成为涌浪。当海浪是风浪时，海浪的方向可以在某种程度上代表风场的方向。为了验证使用风浪方向代替风向进行风场反演的可行性，本文使用 ECMWF 平均风浪方向作为 CMOD5.N 的输入风向来反演真实 SAR 数据的风速。实验数据是 2.2 节中使用的 RADARSAT-2 和 Sentinel-1A 数据。反演风速和 ECMWF 风速的对比如图 12 所示。

如图 12 所示，当输入风向为风浪方向时，反演风速的 RMSE 为 0.91 m/s。这说明：在一定条件

下，将风浪方向代替风向用于地球物理模型函数是可行的。接下来，对比用于实验的风浪方向与风向，风浪方向与风向相比的 RMSE 为 3.87°，这表明：风浪方向与风向具有较好的一致性。对比结果如图 13 所示。

根据海浪谱的能量密度可以获得海浪方向，海浪谱的能量在波浪方向上最强。已有的海浪谱反演方法包括：MPI 算法、交叉谱算法、PARSA 算法和 SPRA 算法。MPI 算法是经典的海浪谱反演方法，但无法解决海浪方向存在 180°模糊的问题^[21]。交叉谱算法解决了海浪传播方向的 180°模糊问题，但反演结果受截断波长的影响^[22]。PARSA 算法是 MPI 和交叉谱算法的组合，可以获取完整的二维海浪谱，且解决了海浪方向的 180°模糊问题^[23]。SPRA 算法只获得涌浪谱，并依赖于散射计信息^[24]。

本文将反演的海浪方向作为参考风向引入多入射角风场反演方法，从仿真 SAR 数据中提取的海浪方向与实际风向的大小一致。对风向为 45°、风速为 1~30 m/s 的仿真 SAR 数据进行处理，在得到多个模糊解后，将反演的海浪方向作为参考风向用于确定唯一解，得到风速和风向的反演结果。反演风速、风向与实际风速、风向的对比结果如图 14、15 所示。

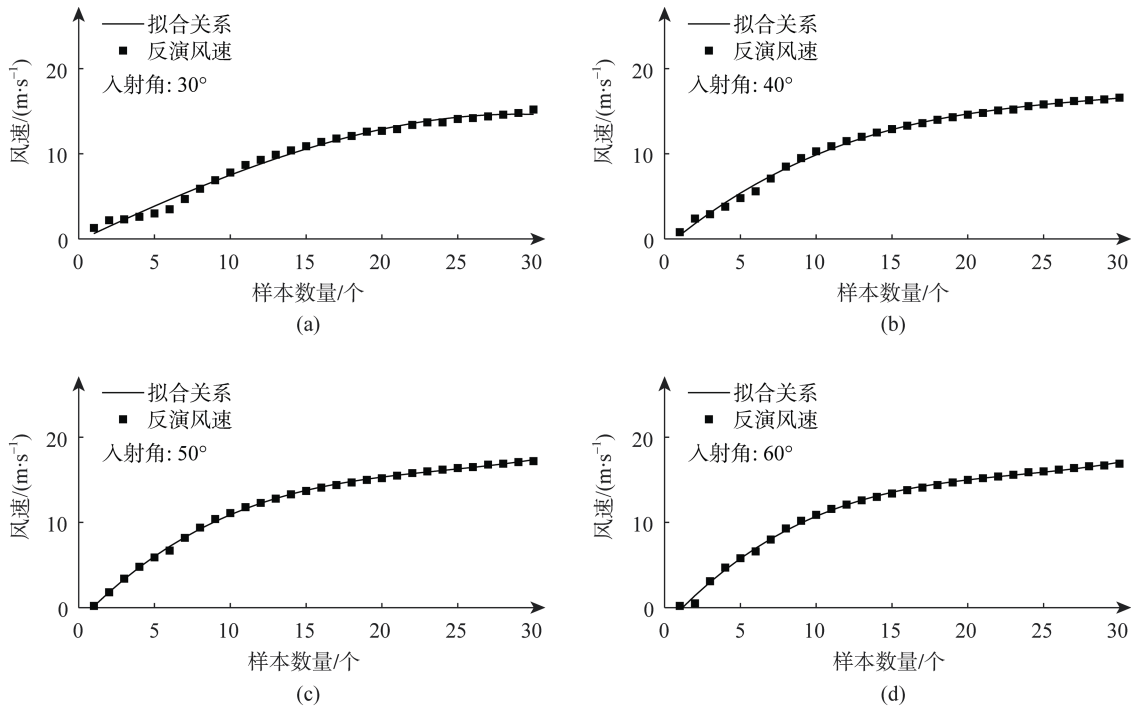


图 8 反演风速与拟合关系的分布图

Fig. 8 Distribution diagram of inverted wind speed and fitting relationship

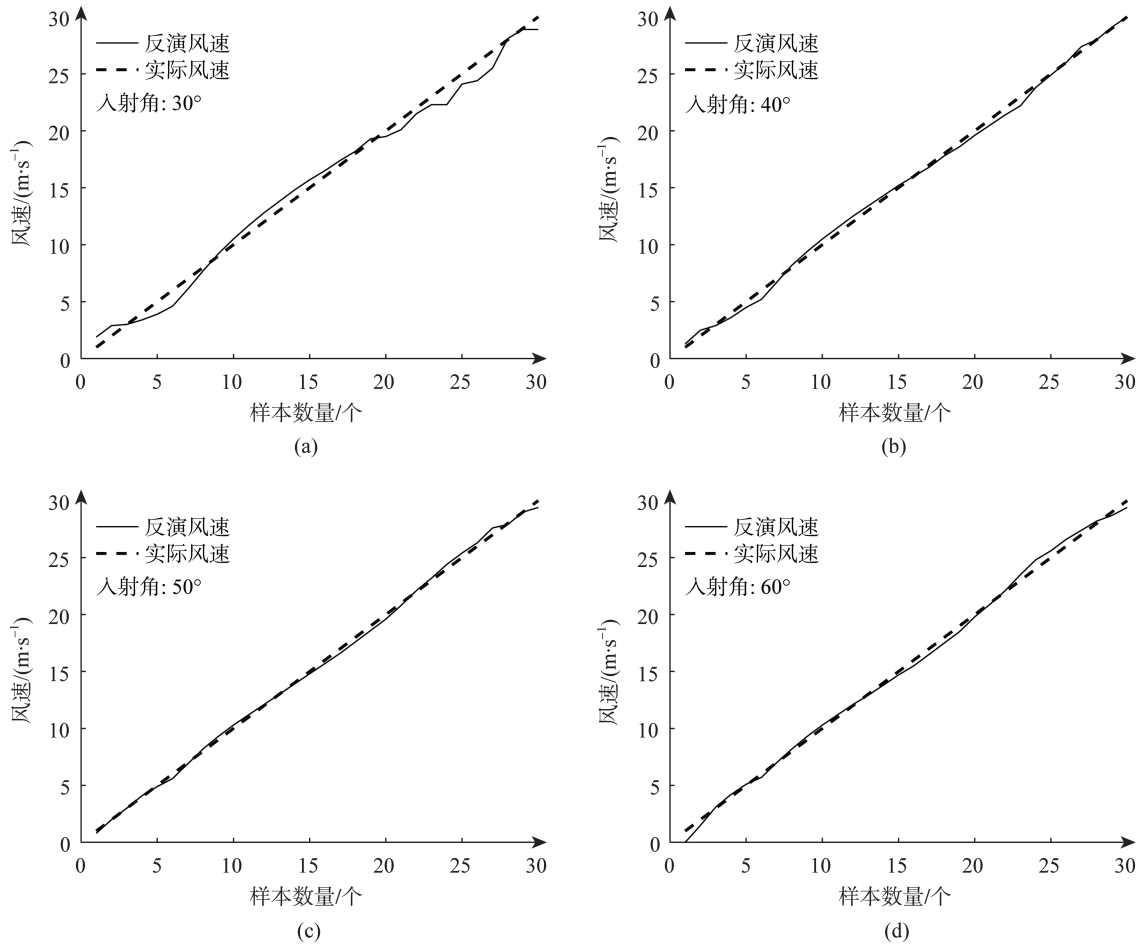


图 9 反演风速与实际风速的对比图(优化模型)

Fig. 9 Comparison between inverted wind speed and actual wind speed (optimization model)

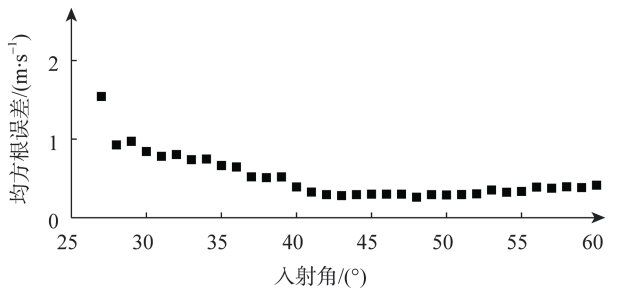


图 10 反演风速的均方根误差(优化模型)

Fig. 10 Root mean square error of inverted wind speed (optimization model)

从图中可以看出: 反演风速的 RMSE 为 0.61 m/s, 相关系数为 0.998; 反演风向的 RMSE 为 3.21°, 相关系数为 1。这说明: 引入准确的参考风向可以提高风速反演的精度, 并使该方法可以提取精度较高的风向信息。

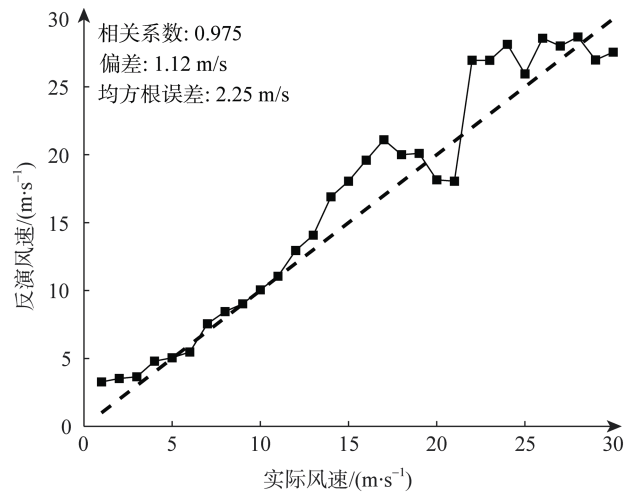


图 11 反演风速与实际风速的对比结果(未引入参考风向)
Fig. 11 Comparison result of inverted wind speed and actual wind speed (no reference wind direction input)

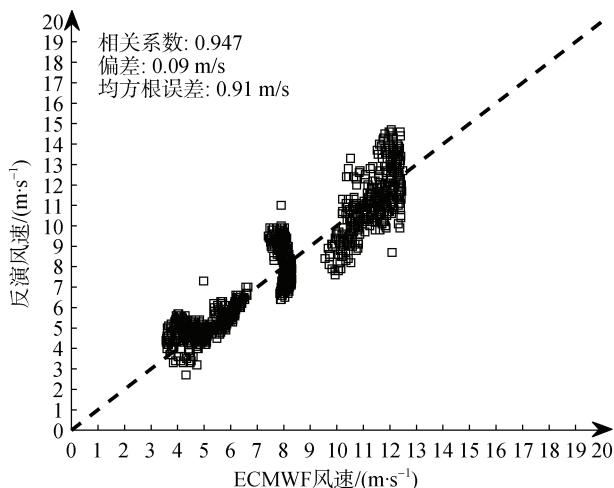


图 12 反演风速和 ECMWF 风速的对比(ECMWF 风浪平均方向)

Fig. 12 Comparison between inverted wind speed and ECMWF wind speed (ECMWF mean direction of wind waves)

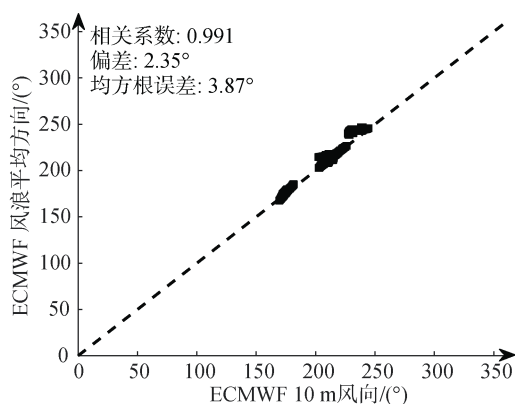


图 13 ECMWF 风浪平均方向和 ECMWF 10 m 风向的对比结果

Fig. 13 Comparison between ECMWF mean direction of wind waves and ECMWF 10-m wind direction

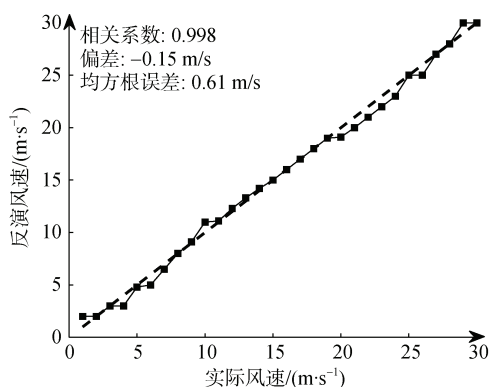


图 14 反演风速与实际风速的对比结果(引入参考风向)

Fig. 14 Comparison result of inverted wind speed and actual wind speed (input reference wind direction)

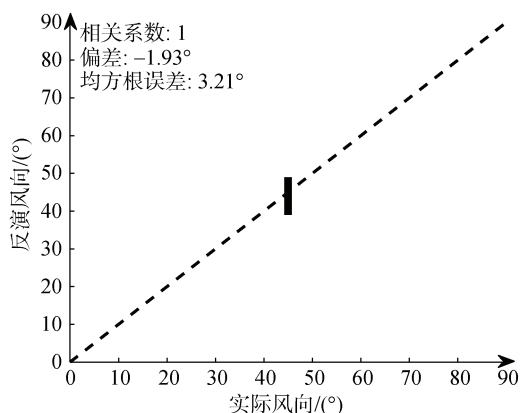


图 15 反演风向与实际风向的对比结果(引入参考风向)

Fig. 15 Comparison result of inverted wind direction and actual wind direction (input reference wind direction)

3 结论

针对单星 SAR 时间分辨率低且风场反演依赖风向的问题, 本文提出了一种卫星组网的工作模式, 针对该工作模式进行了 SAR 数据仿真与风场反演研究。实验与验证结果说明: 在不引入参考风向的前提下, 仅通过最小化代价函数筛选结果, 则风速反演精度在中低风速时较高, 但无法提取准确的风向信息; 在引入准确的参考风向后, 各海况下的风速、风向反演精度都较高。本文的研究说明, 通过卫星组网获取的不同入射角的 SAR 数据可以为海面风场反演提供更多的可能, 可以使 SAR 风速反演不依赖风向数据, 使基于入射角差异的风场反演不受海况与分辨率限制。当海浪以风浪成分为主时, 海浪方向可以被作为参考风向来筛选结果, 提高 SAR 风场反演的精度。本文的研究可以在一定程度上为未来 C 波段组网 SAR 卫星的工作模式及风场反演的研究提供一些参考。

参考文献:

- [1] BENTAMY A, QUEFFEULOU P, QUILFEN Y, et al. Ocean surface wind fields estimated from satellite active and passive microwave instruments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2469-2486.
- [2] LIN H, XU Q, ZHENG Q. An overview on SAR measurements of sea surface wind[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18: 913-919.
- [3] MARCOS P A. Wind field retrieval from satellite radar systems[D]. Barcelona: University of Barcelona, 2002.
- [4] HORSTMANN J, KOCH W, LEHNER S, et al. Wind

- retrieval over the ocean using synthetic aperture radar with C-band HH polarization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2122-2131.
- [5] GERLING T W. Structure of the surface wind field from the Seasat SAR[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1986, 91(C2): 2308-2320.
- [6] HORSTMANN J, LEHNER S, KOCK W, et al. Computation of wind vectors over the ocean using spaceborne synthetic aperture radar[J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2000, 21(1): 100-107.
- [7] MONALDO F. The Alaska SAR demonstration and Near-Real-Time synthetic aperture radar winds[J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2000, 21(1): 75-79.
- [8] MONALDO F M, THOMPSON D R, PICHEL W G, et al. A systematic comparison of QuikSCAT and SAR ocean surface wind speeds[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(2): 283-291.
- [9] PIERSON W J, MOSKOWITZ L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1964, 69(24): 5181-5190.
- [10] HWANG P A, ATAKTURK S, SLETTEN A, et al. A study of the wavenumber spectra of short water waves in the ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1996, 26(7): 1266-1285.
- [11] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1997, 102(C7): 781-796.
- [12] THORSOS, ERIC I. The validity of the kirchoff approximation for rough surface scattering using a gaussian roughness spectrum[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, 83(1): 78-92.
- [13] YOSHIDA T, RHEEM C K. SAR image simulation in the time domain for moving ocean surfaces[J]. *Sensors*, 2013, 13(4): 4450-4467.
- [14] WAN Y, ZHANG X, DAI Y, et al. Research on a method for simulating multiview ocean wave synchronization data by networked SAR satellites[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(180): 1-17.
- [15] STOFFELEN A, ANDERSON D. Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1997, 102(C3): 5767-5780.
- [16] QUILFEN Y, CHAPRON B, ELFOUHAILY T, et al. Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C4): 7767-7786.
- [17] HERSBACH H, STOFFELEN A, HAAN S D. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): 1-18.
- [18] HERSBACH H. Comparison of C-band scatterometer CMOD5.N equivalent neutral winds with ECMWF[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(4): 721-736.
- [19] HE Y, PERRIE W, ZOU Q, et al. A new wind vector algorithm for C-band SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(7): 1453-1458.
- [20] HWANG P A. Foam and roughness effects on passive microwave remote sensing of the ocean[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 2978-2985.
- [21] HASSELMANN K, HASSELMANN S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1991, 96(C6): 10713-10729.
- [22] YANG J, WANG H, HUANG W, et al. Error analysis of Envisat ASAR level 2 algorithm based on simulation technique[C]//*IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Barcelona: IEEE, 2007: 1409-1411.
- [23] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C5): 1-17.
- [24] MASTENBROEK C, DE VALK C F. A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2000, 105(C2): 3497-3516.

Wind field optimization inversion method for C-band networked SAR satellite

WAN Yong¹, SHI Xiao-lei², DAI Yong-shou¹

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Received: Nov. 5, 2020

Key words: networked satellite; synthetic aperture radar; wind field inversion

Abstract: The geophysical model function is a wind field retrieval method often used in co-polarimetric synthetic aperture radars (SARs). When using this method to extract wind speed from SAR data, wind direction should be used as the input information. Thus, the wind speed retrieval accuracy is affected by the wind direction accuracy, and the SAR wind field retrieval cannot be completed independently. To solve these problems, simulated SAR data of networked satellites are obtained through numerical simulation, and the same sea surface is observed at different incident angles through three SARs simultaneously. A wind field optimal inversion method is developed for the simulated networked SAR satellite data. Through this method, wind speed can be retrieved without inputting wind direction, and wind field retrieval accuracy can be further improved by providing the reference wind direction.

(本文编辑: 杨 悦)