

基于RADARSAT-2四极化SAR影像的海面风速反演

方贺^{1,2}, 蔡菊珍¹, 何月¹, 徐瑞³, 张育慧¹, 张小伟¹, 贺忠华¹, 肖晶晶¹, 谢涛⁴

(1. 浙江省气候中心, 浙江 杭州 310017; 2. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;
3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 4. 南京信息工程大学 遥感与测绘学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 选取成像于中国东海和南海海域的102景RADARSAT-2(RS-2)精细四极化SAR原始影像以及ERA-Interim风场,在各极化通道下利用相应风速反演模型开展风速反演的研究。CMOD5地球物理模式函数对VV极化SAR数据反演风速效果最好,可以获取海面高精度风速数据。对于HH和交叉极化SAR影像,利用RS-2 SAR影像和ERA-Interim资料对现有风速反演模型进行改进,并提出了用于HH极化风速反演的PR_CS极化比模型和用于交叉极化风速反演的CP_CS模型。结果显示:基于两种模型的SAR反演风速与ERA-Interim风速具有良好的一致性,利用PR_CS模型的SAR反演风速与参考风速的均方根误差为1.54 m/s,利用CP_CS模型的SAR反演风速与ERA-Interim风速的均方根误差分别为1.43 m/s(VH极化)和1.51 m/s(HV极化)。

关键词: 海面风速;合成孔径雷达;四极化;RADARSAT-2

中图分类号: P714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)02-0042-13

1 引言

海表面风场是推动海洋表面运动的重要动力,同时也是大气和海洋相互作用的重要参数之一,高时空分辨率的海表面风场资料有利于大气-海洋动力过程的研究。此外,海面风尤其是海上大风天气是我国沿海地区常有的灾害性天气,对海洋航运、安全生产以及海洋工程危害甚大,因此准确且及时的海表面风场预报和观测尤为重要^[1]。

传统的海面风场观测手段(浮标、气象站和测风塔等)有着明显的局限性,如建设维护成本较高、无法获取大面积海面信息以及受外界环境因素影响较大,从而影响高质量海面风场数据的获取。随着空间遥感技术的发展,各种星载传感器应运而生,可以弥补传统海面风场观测的不足,使得长时间和大范围获取高分辨率海面风场信息成为可能。

在众多星载传感器中,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)可以不受云、日照以及太阳光线的影响,实现全天时和全天候成像的能力,已逐渐成为海面风场监测,尤其是近岸风场反演的新手段^[2]。

早期的SAR海面风速反演研究主要基于单极化影像数据展开。对于C波段VV极化SAR影像数据,CMOD(C-Band MODE)系列半经验地球物理模式函数(Geophysical Model Functions, GMF)是最常用的手段。CMOD系列模式函数起初是基于VV极化的散射计海面风场反演而设计,后被证明同样适用于SAR风场反演。在众多CMOD函数版本中,较为常用且经过多种SAR影像数据检验的有CMOD4^[3]、CMOD-IFR2^[4]、CMOD5^[5]和CMOD5.N^[6]模式函数。CMOD7是CMOD系列函数最新的版本,但目前多应用于C波段散射计风场的处理,用于

收稿日期: 2020-07-30; 修回日期: 2020-10-19。

基金项目: 国家自然科学基金(41776181); 中国气象局气候变化专项(CCSF202036); 浙江省重点研发计划(2021C02036); 浙江省自然科学基金青年基金(LQ21D060001、LQ21D050001); 浙江省基础公益研究计划(LGF18D050001); 浙江省气象科技计划项目(2020ZD08); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室资助项目(QNHX2012)。

作者简介: 方贺(1990-),男,工程师,博士,主要从事海洋气象预报和海洋环境遥感的相关研究。E-mail: fanghe_doc@163.com

通讯作者: 蔡菊珍(1965-),女,高级工程师,学士,主要从事应用气象及遥感的相关研究。E-mail: jzcaai@21cn.com

SAR风场反演的研究较少^[7]。对于HH极化影像风场反演,通常的做法是利用极化比(Polarization Ratio, PR)模型将HH极化SAR归一化雷达后向散射系数(Normalized Radar Cross Section, NRCS)转化为VV极化NRCS,然后再代入CMOD模式函数用于反演海面风速。PR模型是一种半经验模式函数,通过拟合HH极化NRCS与海表面风速、入射角和相对风向等信息而开发的。目前,学者们基于不同SAR影像数据开发了众多版本的PR模型,由于建立模型的数据源和参考风场不同,因此各种模型的适用性仍有待进一步研究^[8-13]。

相较共极化(VV和HH极化)SAR影像,交叉极化(VH和HV极化)SAR数据可以获取更多的海洋环境信息,从而在海面风场遥感领域展现出独特的优势。随着加拿大RADARSAT-2(RS-2)和中国高分三号SAR卫星的成功发射,我们可以同时获取VV、HH、VH和HV极化的SAR影像,使得交叉极化SAR海面风速反演成为可能。Vachon等^[14]选用加拿大环境及气候变化部(Environment and Climate Change Canada)的浮标风场作为参考数据,对比分析了RS-2精细四极化SAR雷达后向散射系数和海表面风速的关系。分析结果表明:交叉极化SAR的NRCS与风速呈线性关系,与风向和雷达入射角无关,并以此建立了一个线性交叉极化风速反演模型。随后,Zhang等^[15]通过对比分析534幅RS-2交叉极化NRCS和美国国家浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)浮标风速的关系,同样发现交叉极化NRCS与风速呈线性关系,并提出了用于交叉极化风速反演的C-2PO(C-band cross-Polarized Ocean backscatter model)模型。最近研究发现,高海况下利用共极化SAR数据反演海面风速会出现“饱和”现象,即反演风速低于实际风速。然而,这一现象并未出现在交叉极化SAR海面风速反演中。因此,交叉极化SAR影像被广泛应用于飓风观测,学者们基于这一特性也开发了众多用于飓风风速反演的模型,并取得了良好的反演效果^[16-17]。

相较传统的单极化SAR系统,星载RS-2四极化SAR卫星可以测量完整的极化散射矩阵,获取更多的海洋环境参数信息,从而在海面风场遥感领域展现出独特的优势。近年来,RS-2 SAR影像数据在中国沿海海域也有了初步应用。韩冰等^[18]以ERA-

Interim资料构建海面初始风向场,对4景成像于中国海域的RS-2精细四极化影像开展了风速反演实验。结果表明:在4种极化通道下,SAR反演风速与ERA-Interim风速均有着良好的一致性,从而表明该数据在中国海域的可应用性。同年,许遐祯等^[19]采用RS-2宽幅扫描、窄幅扫描模式和标准模式的7景RS-2 SAR影像,联合ERA-Interim风场对共极化SAR数据进行风速反演研究。结果显示:VV极化数据采用CMOD4模式函数表现最好,与ERA-Interim风速的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为1.5 m/s;HH极化数据则采用CMOD4、CNMO-IFR2和CMOD5与Kirchhoff模型的组合函数更适用于海面风速反演,与ERA-Interim风速的RMSE均在2 m/s以内。

综上所述,利用RS-2不同极化SAR影像数据,基于现有风速反演模型可以在我国沿海海域获取海表面风速数据。但由于影像数量有限,且没有实况观测风速数据进行对比验证,因此对于各极化通道下最佳风速模型的选取仍有待进一步验证。本研究选取102景我国沿海海域RS-2精细四极化原始SAR影像开展风速反演研究,基于较常用的风速反演模型对比分析了共极化和交叉极化SAR风速的反演效果,探究各极化方式数据反演风速的最优方法,并对HH极化和交叉极化数据的NRCS与海面风速关系进行进一步研究分析。

2 数据处理和方法

2.1 RS-2 SAR影像

RS-2是一颗搭载C波段传感器的高分辨率商用雷达卫星,于2007年12月发射升空,设计寿命7~12 a,至今仍在轨运行。RS-2具有1 m高分辨率和全天候成像能力,其搭载的传感器具有多极化方式和多空间分辨率的特点,使得RS-2卫星具有多种成像模式,可以同时提供VV、HH、VH和HV极化SAR影像,是世界上最先进的商业SAR卫星之一。本文选用的RS-2影像为精细四极化(Quad-Fine)单视复型产品(Single-Look Complex, SLC)。该产品标称空间分辨率 $8\text{ m} \times 5\text{ m}$,刈幅 $25\text{ m} \times 25\text{ km}$,入射角范围 $20^\circ \sim 60^\circ$ 。产品除了提供传统的共极化数

据外,还可以提供交叉极化数据,极大地丰富了 SAR 观测的地物目标信息。此外,精细四极化 SAR 数据具有较大的信噪比,各极化通道串扰噪声低于 -35 dB,保证了交叉极化信号强度不受同极化数据的污染,从而可以较好地应用于海面风场反演中。

在利用 SAR 数据进行海面风速反演前,需对高分辨率原始 SAR 影像进行预处理,主要包括辐射定标、降噪滤波、海陆掩膜和空间分辨率重采样。本文选用的 RS-2 SLC SAR 数据是经过辐射校正后的数据,因此可以直接利用官方用户手册提供的定标参数进行辐射定标。SAR 是一种相干的成像系统,在其对目标成像过程中,不可避免地形成一种称为“斑斑”的噪声。斑点噪声的存在严重影响 SAR 图像的质量,进而影响海面风速信息的准确提取。为了克服这一缺陷,学者们一般采用降低原始 SAR 影像空间分辨率的方法来获取高精度海面风速。为了降低斑点噪声对 SAR 影像的影响,本文对原始 SAR 图像进行 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的空间分辨率重采样^[20]。中国沿海岛屿众多,陆地相对于海面而言较为粗糙,其后向散射系数远高于海面,是影响沿海 SAR 风场反演精度的重要因素。因此,对本研究所选 SAR 数据中的岛屿和陆地影像,采用 10 m 水深矢量进行陆地掩膜,水深矢量采用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的 ETOPO1 地形高程数据。此外,在利用 SAR 影像进行海面风场反演前,我们还采用“同质性滤波”算法对海上目标物和内波等非风场信号进行剔除,以此保证 SAR 风场反演的准确性^[15]。

2.2 再分析资料

ERA-Interim 是欧洲中长期天气预报中心(European Center for Medium range Weather Forecasts, ECMWF)提供的再分析数据,是连接再分析数据(ERA-40)与新一代再分析产品的过渡数据。它可以提供海面 10 m 高处 U(东西方向,正值)和 V(南北方向,负值)风速分量数据,空间最高分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,时间分辨率为 6 h 。Song 等^[21]采用中国科学院近海海洋观测研究网络黄海站和东海站浮标数据,对 2010—2011 年期间的 ERA-Interim 风场进行评估。结果显示:ERA-Interim 风

场在黄海和东海海域与浮标风场有着良好的一致性,从而证明了 ERA-Interim 风场在东海和黄海海域是真实可靠的。因此,本文选取 ERA-Interim 风场作为 RS-2 SAR 风速反演所使用的外部风场和参考风场。

2.3 数据时空匹配

利用 RS-2 共极化 SAR 影像开展海面风速反演实验,需要借助外部风向信息,构建初始风向场,然后通过 CMOD 模型函数提取风速信息;另一方面,对于 SAR 影像反演得出的风速场,需要利用参考风速对其进行评估,从而确定反演风速的精度。因此,在进行海面风速反演前,需要将 SAR 影像与参考风场进行时间和空间匹配,从而建立 SAR 影像与参考数据间的时空关系。

ERA-Interim 数据和 SAR 影像空间匹配流程如图 1 所示。时间上,RS-2 卫星在中国海域的过境时间分别约为 10 时(升轨,世界时,下同)和 22 时(降轨),基于时间间隔最小原则,本文选取当日 12 时和次日 0 时的 U 和 V 风速分量。空间上,RS-2 精细四极化 SAR 影像幅宽约 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$,而 ERA-Interim 的空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,因此,本文利用插值方法,在一幅 SAR 影像内选取 5~7 个 ERA-Interim 网格点数据。图 2 所示为 1 景 SAR 影

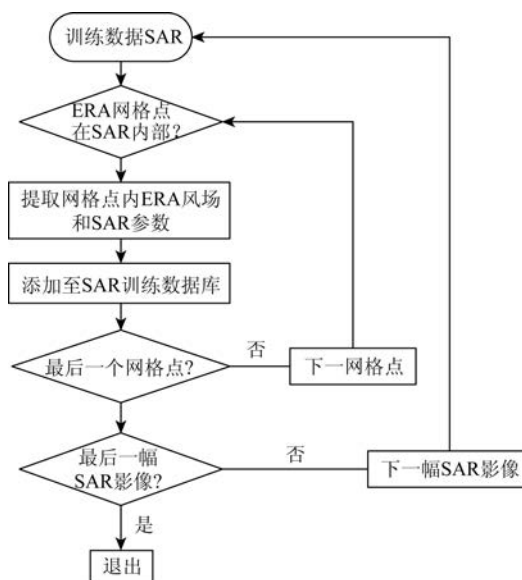


图1 RS-2 SAR 影像训练数据库与 ERA-Interim 匹配流程图

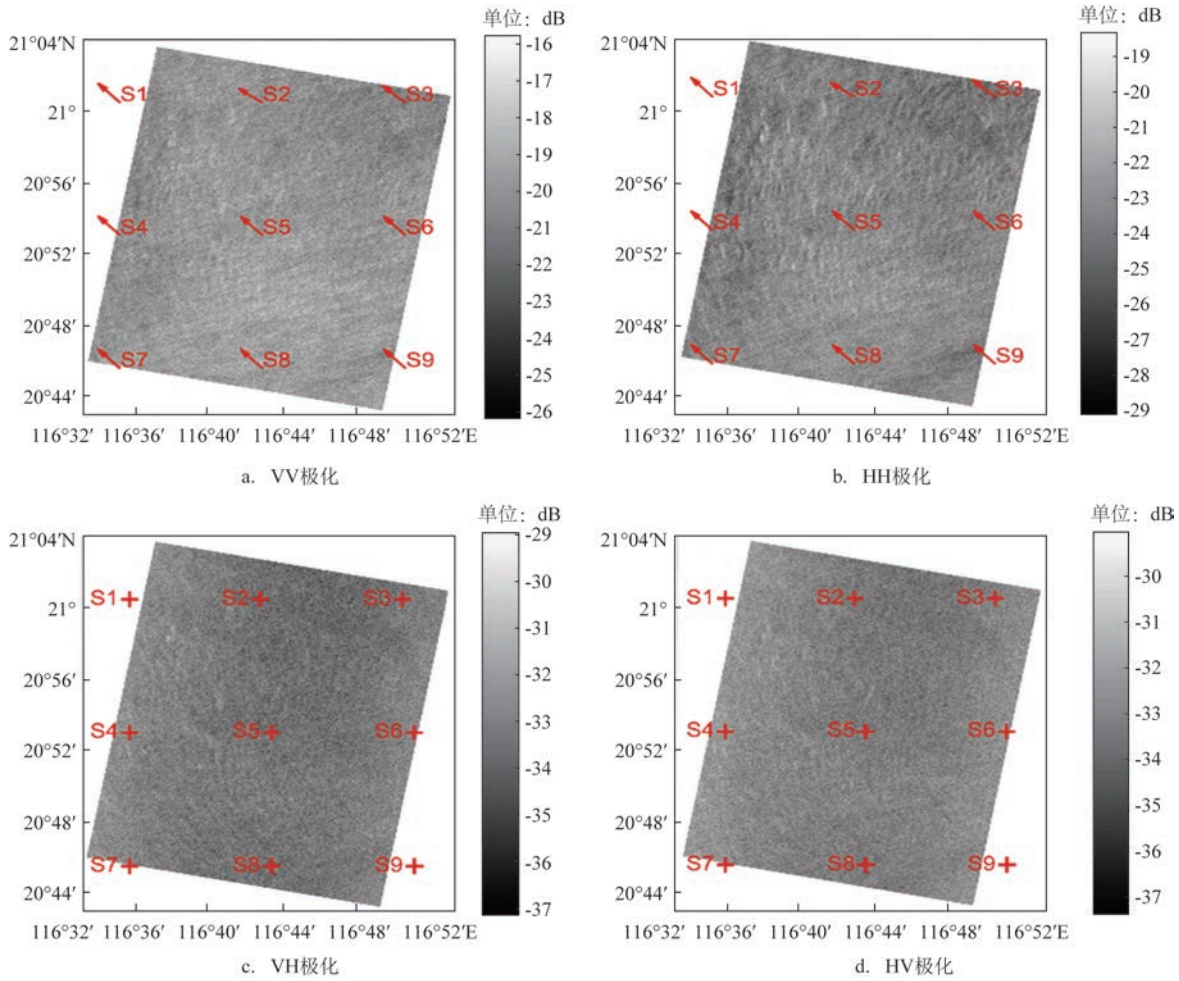


图2 RS-2精细四极化SAR影像(成像时间为2012年8月8日22时03分40秒;红色“+”表示ERA-Interim样本点;红色箭头表示风向;原始影像产品版权归MacDonald、Dettwiler和Associates Ltd公司所有)

像与ERA-Interim风场的时空匹配。图中ERA-Interim样本点S2、S3、S4、S5、S6、S7和S8落在SAR影像,因此可以认为是有效样本点。

本文中,将102景RS-2 SAR影像以及时空匹配的ERA-Interim风场分为训练数据库和测试数据。训练数据库包括102景RS-2 SAR影像,有效样本点为735个,用于在各极化通道下开展SAR风速反演实验;测试数据库包括24景RS-2 SAR影像,有效样本点为164个,用于验证本文提出HH和交叉极化SAR风速反演模型。

2.4 四极化SAR海面风速反演模型

对于VV极化SAR数据,目前国际上使用最为广泛且经过大量数据验证的是CMOD4、CMOD-

IFR2、CMOD5和CMOD5.N^[1-2,18-19]。CMOD函数一般表达式如下:

$$\sigma_{VV}^0 = b_0 [1 + b_1 \cos(\phi) + b_2 \cos(2\phi)]^n \quad (1)$$

式中: σ_{VV}^0 为VV极化的NRCS; ϕ 为相对风向;系数 b_0 、 b_1 和 b_2 为入射角 θ 和海表面10 m高处风速 u_{10} 的函数。对于CMOD4、CMOD5和CMOD5.N模式函数,指数 $n = 1.6$;对CMOD-IFR2模式函数, $n = 1$ 。由式(1)可以看出,在已知雷达入射角、相对风向以及VV极化的NRCS时,可以计算出海表面10 m高处风速。图3a和3b分别表示不同CMOD模式函数模拟的 σ_{VV}^0 与海面风速和相对风向之间的关系。

对于HH极化SAR数据,其风速反演一般做法

是利用PR模型将HH极化的NRCS σ_{HH}^0 转化为 σ_{VV}^0 , 然后代入CMOD模式函数中进行风速计算。极化比的一般形式如下:

$$PR = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{HH}^0} \quad (2)$$

基于不同SAR卫星数据,学者们提出了不同的PR模型,主要可以分为两大类:一类是只与入射角有关的比值形式PR模型;另一类是与入射角和海面风矢量有关的指数形式PR模型。本文采用目前较为常用的6种PR模型进行HH极化SAR数据风速反演,分别记为E1996^[8]、T1998^[9]、H2000^[10]、V2000^[11]、M2005^[12]和Z2011^[13]。图3c为上述6种PR模型模拟的极化比数值随雷达入射角的变化。

除共极化SAR影像外,交叉极化SAR影像在海面风场遥感领域也有着广泛的应用。Vachon等^[14]基于550景RS-2四极化SAR数据和浮标风场资料,构建了Vachon-CP的交叉极化SAR风速反演模型,并指出交叉极化的NRCS仅和海面风速有关,而与入射角无关。随后,Zhang等^[15]基于这一特性,在

Vachon-CP模型的基础上进行了相应的参数调整,提出了C-2PO风速反演模型。Vachon-CP模型和C-2PO模型的一般表达式如下:

$$\sigma_{VH/HV}^0 = 0.592u_{10} - 35.600(\text{Vachon_CP}) \quad (3)$$

$$\sigma_{VH/HV}^0 = 0.580u_{10} - 35.652(\text{C-2PO}) \quad (4)$$

式中: $\sigma_{VH/HV}^0$ 表示VH/HV交叉极化的NRCS。图3d为Vachon-CP和C-2PO模型仿真的海面风速与交叉极化NRCS的关系。

3 风速反演结果和对比分析

基于120景训练SAR数据库中735个样本点以及时空匹配的ERA-Interim风场,利用相应风速反演模型,分别在VV、HH、VH和HV极化通道下开展SAR风速反演实验。此外,本文选取RMSE、偏差(Bias)和相关系数(Corr)作为评价参数,用于检验SAR风速反演模型的性能。一般认为,SAR反演风速与参考风速RMSE小于2 m/s,即可认为SAR反

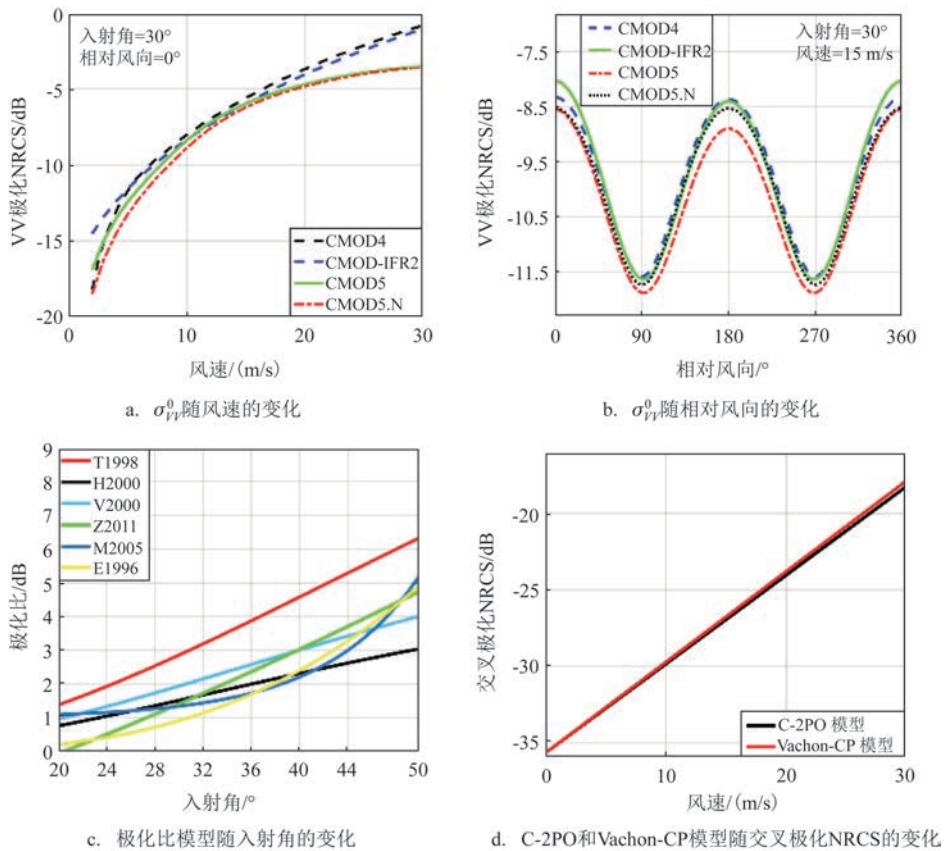


图3 不同极化模式SAR风速反演模型比较

演风速满足高精度海面风速反演要求^[2,14-15,20]。

以ERA-Interim风场作构建海面初始风向,分别利用CMOD4、CMOD-IFR2、CMOD5和CMOD5.N模式函数对VV极化RS-2数据进行海面风速反演。图4为利用CMOD模式函数的SAR反演风速与ERA-Interim风速对比图。图中可以看出,基于CMOD4、CMOD-IFR2、CMOD5和CMOD5.N的SAR反演风速与ERA-Interim风速的RMSE分别为2.23 m/s、2.34 m/s、1.94 m/s和2.12 m/s,4种CMOD模式函数均可以反演出较高精度的海表面风速,其中利用CMOD5函数反演的效果最好。

利用HH极化SAR影像反演风速,需首先将HH极化NRCS σ_{HH}^0 转换为VV极化的NRCS σ_{VV}^0 ,然后代入CMOD模式函数求解海面风速。本文以ERA-Interim风场作构建海面初始风向,利用CMOD5模型与E1996^[8]、T1998^[9]、H2000^[10]、V2000^[11]、M2005^[12]和Z2011^[13]极化比模型的组合函

数,对HH极化SAR影像进行风速反演。图5为基于CMOD5函数联合6种极化比模型函数的SAR反演风速与ERA-Interim风速对比图。图中可以看出,CMOD5+E2005、CMOD5+T1998、CMOD5+H2000、CMOD5+V2000、CMOD+M2005和CMOD+Z2011组合模型反演风速与ERA-Interim风速RMSE分别为3.07 m/s、4.35 m/s、2.86 m/s、3.54 m/s、5.21 m/s和2.75 m/s,与ERA-Interim风速RMSE均大于2 m/s,风速反演效果无法满足高精度风速反演要求。此外,CMOD5+M2005和CMOD5+T200组合模型反演风速在高风速下(> 15 m/s)严重高于ERA-Interim风速,已无法得到可信风速。CMOD5+V2000组合模型反演风速在0~10 m/s风速区间严重高于ERA-Interim风速,无法得到可信风速。CMOD5+E1996组合模型反演风速在高风速下与ERA-Interim风速一致性较差。

对于RS-2精细四极化SAR影像中交叉极化

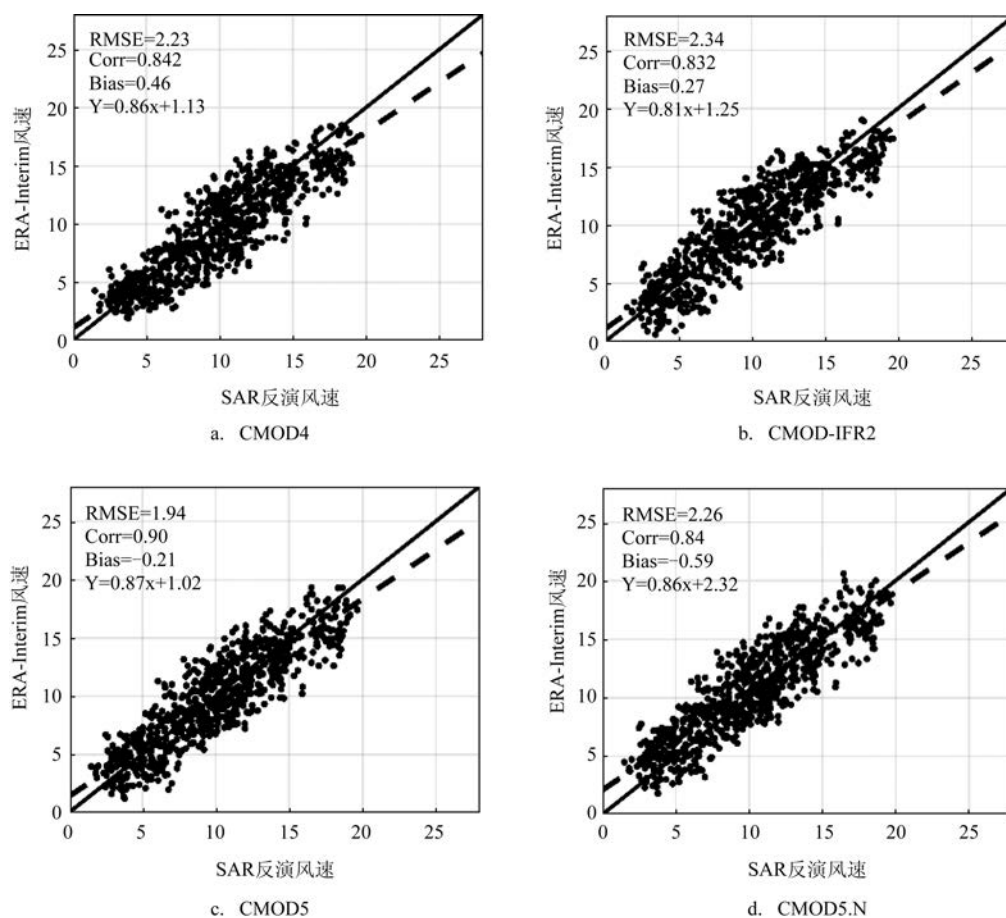


图4 基于CMOD模式函数的SAR反演风速与ERA-Interim风速对比图(单位:m/s;N=735)

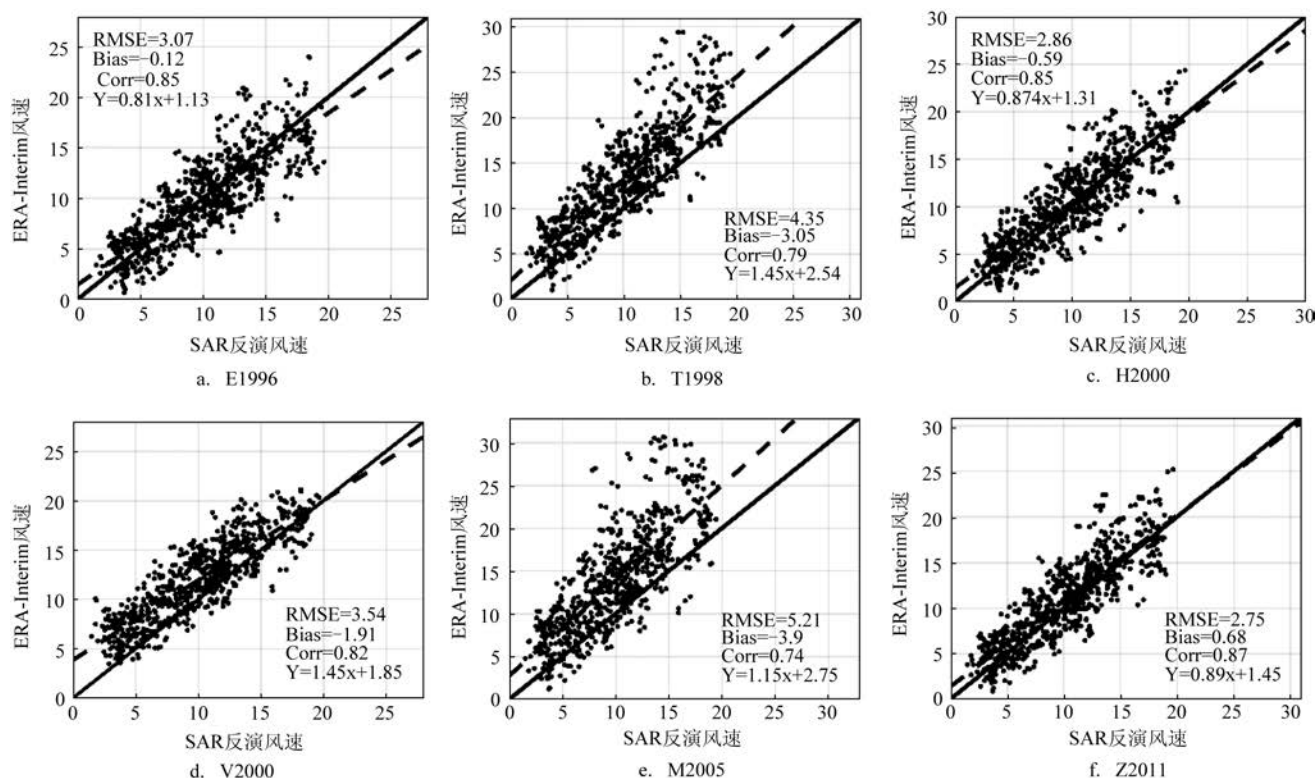


图5 基于CMOD5函数联合6种极化比模型函数的SAR反演风速与ERA-Interim风速对比图(单位:m/s; $N=735$)

数据,已有研究证明交叉极化的NRCS仅和海表面风速有关,与雷达入射角和风向无关,因此可以直接利用C-2PO模型和Vachon-CP模型进行海面风速反演。图6为C-2PO和Vachon-CP模型SAR反演风速与ERA-Interim风速对比,图中可以看出两个模型均可以从交叉极化SAR影像得到反演风速。基于Vachon-CP模型的VH和HV极化SAR反演风速与ERA-Interim风速RMSE分别为2.61 m/s和2.65 m/s,而基于C-2PO模型的VH和HV极化SAR反演风速与ERA-Interim风速RMSE分别为2.82 m/s和2.78 m/s。无论是C-2PO模型还是Vachon模型,其在VH和HV极化通道下SAR反演风速具有很好的一致性,但由于SAR反演风速普遍低于参考风速,导致RMSE较大,无法满足高精度海面风速反演要求。表1为不同极化通道下,基于不同风速反演模型的SAR反演风速与ERA-Interim风速对比。

4 极化比和交叉极化模型的优化

基于训练数据库VV极化SAR数据,利用

CMOD5模式函数反演风速与ERA-Interim风速RMSE为1.94 m/s,优于CMOD4、CMOD-IFR2和CMOD5.N函数,满足高精度海面风速反演要求。然而,利用CMOD5函数和6种极化比组合模型的SAR反演风速与ERA-Interim风速误差较大,即使效果最好的CMOD+Z2011模型,其反演风速与参考风速RMSE也高于2 m/s(为2.75 m/s),难以满足高精度海面风速反演要求。同样,基于交叉极化的C-2PO和Vachon-CP模型SAR反演风速与ERA-Interim风速RMSE大于2 m/s,且SAR反演风速明显低于ERA-Interim风速,这也是造成RMSE偏大的一个重要原因。为了提高SAR海面风速反演精度,本文利用训练数据库中735个样本点对HH极化和交叉极化风速反演模型进行改进,并利用测试数据库中24景RS-2四极化SAR影像联合ERA-Interim风速资料进行验证。

4.1 PR_CS极化比模型

由指数形式的极化比模型可知,RS-2共极化SAR影像的极化比值是入射角 θ 的函数,两者呈现出较强的非线性关系。因此,我们首先提取735个

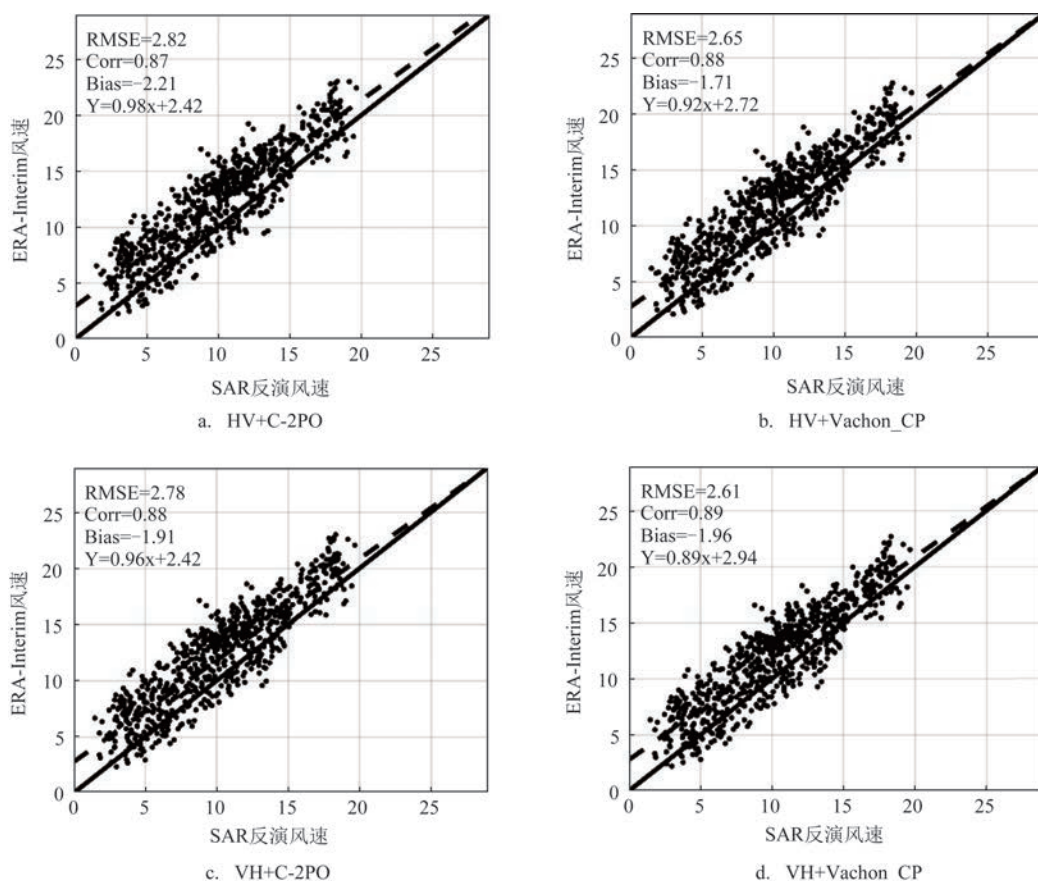


图6 基于C-2PO和Vachon-CP模型的SAR反演风速和ERA-Interim风速对比(单位:m/s; $N=735$)

表1 不同极化通道下SAR反演风速与ERA-Interim风速对比

极化通道	风速模型	RMSE/(m/s)	Corr	Bias/(m/s)
VV极化	CMOD4	2.23	0.84	0.46
	CMOD-IFR2	2.34	0.83	-0.27
	CMOD5	1.94	0.9	-0.21
	CMOD5.N	2.26	0.84	0.59
VH极化	C-2PO	2.78	0.87	-2.21
	Vachon_CP	2.61	0.88	-1.71
HV极化	C-2PO	2.82	0.88	-1.91
	Vachon_CP	2.65	0.89	-1.96
HH极化	E1996	3.07	0.85	-0.12
	T1998	4.35	0.79	-0.35
	H2000	2.86	0.85	-0.59
	V2000	3.54	0.82	-1.91
	M2005	5.21	0.74	-3.9
	Z2011	2.75	0.87	0.68

样本点的极化比值和入射角进行分析。由图7a可以看出,RS-2四极化SAR影像极化比值随入射角的

增加而增加。利用非线性拟合方法,在Z2011极化比模型的基础上对相关参数进行重新赋值,记做PR_CS(PR_China Seas)模型,其表达式为:

$$PR = A_1 \exp(A_2 \theta) + A_3 \quad (5)$$

式中: A_1 、 A_2 和 A_3 为常数,其拟合值如表2所示。

表2 PR_CS极化比模型系数及拟合值

系数	拟合值
A_1	0.070 71
A_2	0.087 76
A_3	-0.105 80

为了验证PR_CS极化比模型的适用性,我们首先对图2 SAR影像中共极化数据开展风速反演实验。图8分别为基于CMOD5模式函数的VV极化SAR影像反演风速和基于CMOD5+PR_CS组合模型的HH极化SAR影像反演风速。表3为S2~S8样

本点 SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速误差对比。从表中可以看出,在 S2~S8 样本点中,SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速误差均小于 2.5 m/s,两者具有良好的一致性。然后,我们选取测试数据库中 24 景 RS-2 精细四极化 HH 极化 SAR 数据进行海面风速反演实验。图 7b 为 CMOD5+PR_CS 组合模型反演风速与 ERA-Interim 风速散点图。从图中可以看出,CMOD5+PR_CS 组合模型反演风速与测风塔观测风速有着良好的一致性,两者 RMSE 为 1.54 m/s,满足高精度海表面风速反演要求。

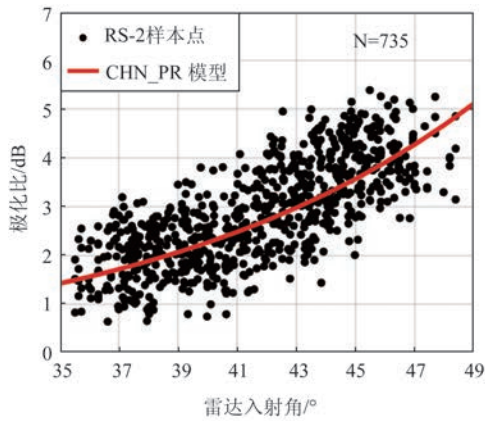
4.2 CP_CS 交叉极化风速反演模型

由 Vachon-CP 和 C-2PO 模型可知,交叉极化的 SAR NRCS 仅和海表面风速有着较强的线性关系,

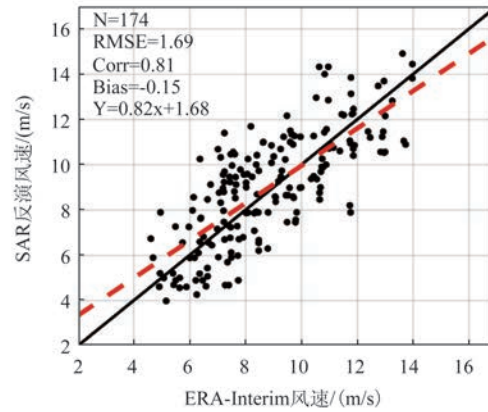
而与海面风向和入射角无关。由图 6 可以看出,基于交叉极化 SAR 影像反演的风速明显高于 ERA-Interim 风速,这也是造成风速反演误差的重要原因。因此,本节通过研究交叉极化 NRCS 和 ERA-Interim 风速的线性关系,对交叉极化 SAR 风速反演模型中的相关参数进行改进,以解决 SAR 反演风速过高的问题。图 9 为训练数据库中 735 个交叉极化 NRCS 样本点与 ERA-Interim 风速的关系。从图中可以看出,VH 和 HV 极化 NRCS 与 ERA-Interim 有着较强的线性关系,利用线性拟合算法,可以得出记为 CP_CS (CP_China Seas) 的交叉极化风速反演模型:

$$\sigma_{VH}^0 = 0.5360 U_{10} - 33.9575 \quad (6)$$

$$\sigma_{HV}^0 = 0.5079 U_{10} - 32.8214 \quad (7)$$

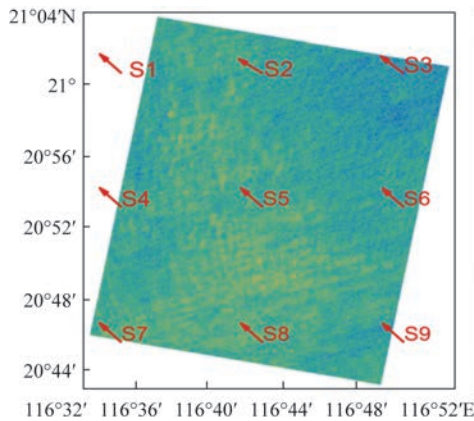


a. RS-2四极化SAR影像极化比值和入射角的关系

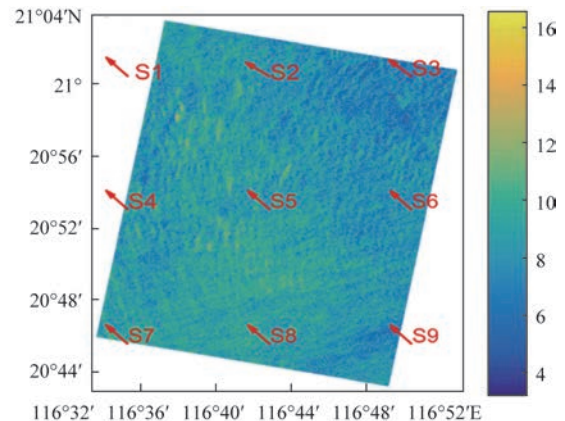


b. CMOD5+ PR_CS组合模型反演风速与ERA-Interim风速

图7 PR_CS极化比模型及风速反演



a. 基于CMOD5模式函数的VV极化影像



b. 基于CMOD5+ PR_CS组合模型的HH极化影像

图8 基于不同模式的极化SAR影像反演风速(单位:m/s)

式中: σ_{VH}^0 和 σ_{HV}^0 分别为 VH 和 HV 极化的 NRCS, U_{10} 为海表面 10 m 高处风速。

为了验证 CP_CS 风速反演模型的适用性,我们

首先对图 2 的 SAR 影像中交叉极化数据开展风速反演实验。图 10 为基于 CP_CS 模型的 VH 极化 SAR 影像(见图 2c)反演风速和 HV 极化 SAR 影像

表 3 S2~S8 样本点 SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速误差(单位:m/s)

模型	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
CMOD5+VV	1.73	2.01	2.14	1.56	1.34	0.97	0.65
CMOD5+PR_CS+HH	1.62	1.42	1.73	2.05	1.79	2.16	0.89

表 4 S2~S8 样本点 SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速误差(单位:m/s)

模型	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
CP_CS+VH	1.45	1.32	1.26	0.56	0.78	1.21	0.76
CP_CS+HV	1.58	1.68	0.79	0.83	0.98	1.52	1.13

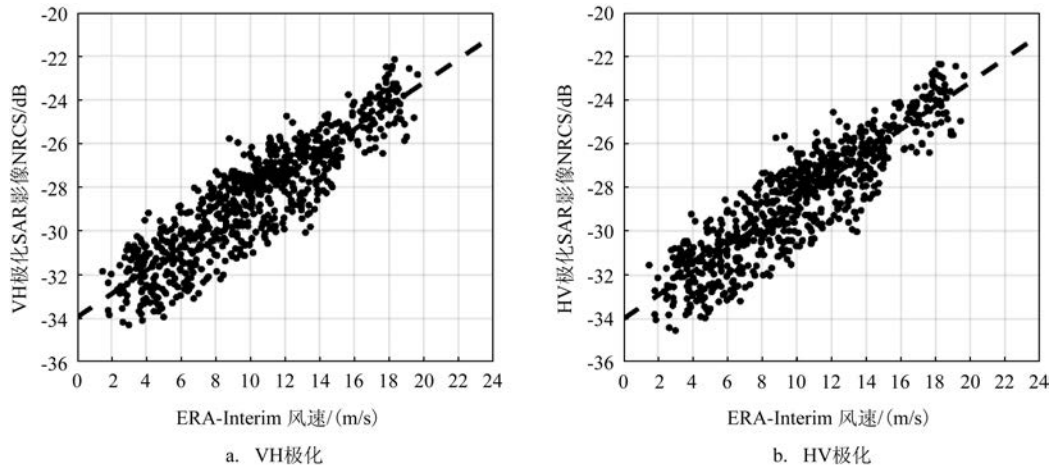


图 9 交叉极化 NRCS 样本点与 ERA-Interim 风速的关系($N=735$)

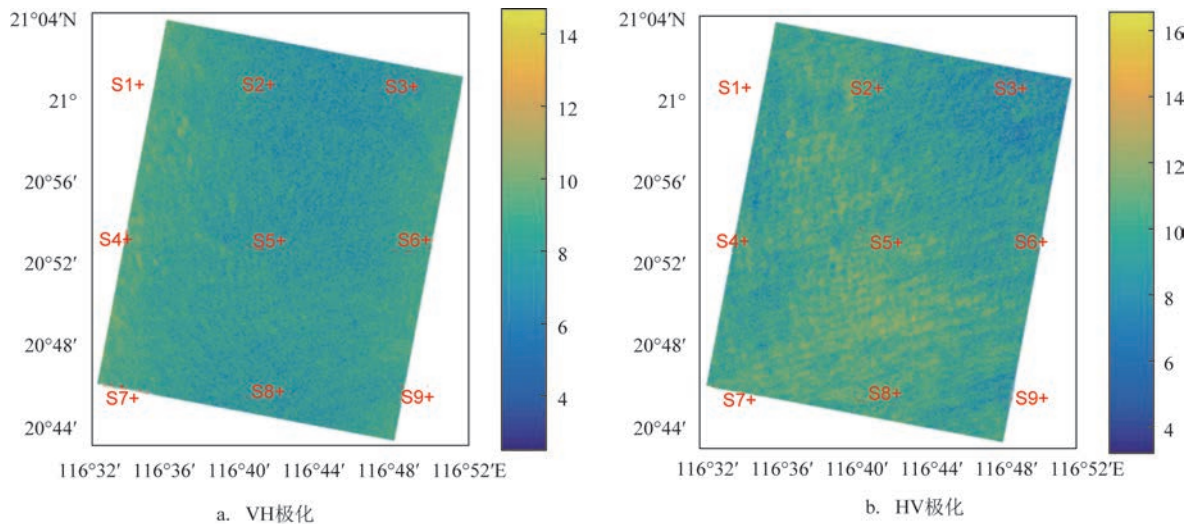


图 10 基于 CP_CS 模型的极化 SAR 影像反演风速(单位:m/s)

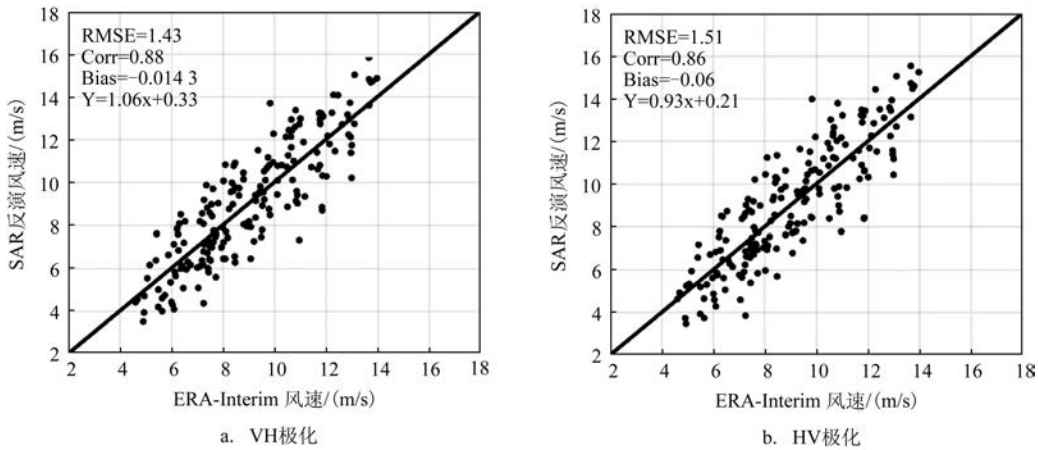


图 11 基于 CP_CS 模型的极化 SAR 反演风速和 ERA-Interim 风速 ($N=164$)

(见图 2d)反演风速。表 3 为相应的 S2~S8 样本点 SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速误差对比。从表中可以看出,在 S2~S8 样本点中,SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速误差均小于 2 m/s,满足高精度海面风速反演要求。随后,我们选取测试数据库中 24 景 RS-2 交叉极化 SAR 影像进行海面风速反演实验。图 11 为基于 CP_CS 模型的交叉极化 SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速散点图。从图中可以看出,VH 和 HV 极化 SAR 反演风速与 ERA-Interim 风速有着良好的一致性,两者 RMSE 分别为 1.43 m/s 和 1.51 m/s,偏差分别为 -0.01 m/s 和 -0.06 m/s,且没有出现交叉极化 SAR 数据风速反演过高的问题。

5 讨论

本文基于 RS-2 精细四极化 SAR 影像和 ERA-Interim 风场,分别对现有 HH 极化和交叉极化风速反演模型进行了改进,并建立了 PR_CS 和 CP_CS 风速反演模型。经过验证发现,利用改进的相应算法模型,可以有效地从 RS-2 四极化 SAR 影像中提取高精度海面风速。需要特别指出的是,无论是用于 HH 极化影像的 PR_CS 模型还是用于交叉极化影像的 CP_CS 模型,均是基于 RS-2 精细四极化 SAR 影像 NRCS 和 ERA-Interim 风场而建立的。因此,在利用 ERA-Interim 作为参考风场时,RS-2 HH 和交叉极化 SAR 反演风速结果得到了一定的改进,后续研究还将获取更多的参考风场(如海洋

浮标和观测站等)用于验证 PR_CS 和 CP_CS 风速反演模型在中国海域的适用性。

共极化和交叉极化 SAR 反演风速描述的海面风矢量与雷达后向散射系数的关系是经验性的。要想获得更准确的海面风速数据,不仅需要加深对电磁散射模型物理机制的理解,还依赖大量的 SAR 遥感数据和现场观测数据支持。笔者通过查询加拿大自然资源部(Natural Resources Canada) RADARSAT 系列卫星数据库发现,自 RS-2 SAR 卫星 2007 年卫星发射至今,在中国海域仅精细四极化数据就有近 2 000 景,因此在后续的研究中还应获取更多的 SAR 数据用于海面风场反演的研究。此外,风速反演模型的开发和应用还有赖于实况观测资料(浮标和测风塔等),但中国海域暂时还没有公开和免费的实况观测数据,这也是导致利用 SAR 卫星在我国沿海开展风场反演研究较少的原因之一。随着我国业务化运行的海洋观测平台系统的完善,未来可以提供实时和公开的海洋风场产品,这将为我国海域 SAR 风场反演研究以及沿海风能资源评估提供有力的数据支撑。

6 结论

本文以我国东海和南海海域为研究区,选用 ERA-Interim 风场为参考风场资料,对 RS-2 精细四极化 SAR 影像数据进行海表面风速反演。首先,将 102 景 RS-2 SAR 影像分为训练数据库和测试数据库;随后,基于训练数据库中 VV、HH、VH 和 HV

极化SAR数据,对常用SAR风速反演模型进行对比分析,并对HH和VH极化风速反演模型进行改进;最后,利用测试数据库对本文改进的风速反演模型进行验证。结论如下:

(1)基于测试数据库VV极化SAR数据,CMOD4、CMOD5、CMOD-IFR2和CMOD5.N模式函数均能反演出有效风速。其中,利用CMOD5模型反演风速的精度要优于其他三者,其与ERA-Interim风速的RMSE为1.94 m/s。

(2)基于测试数据库HH极化SAR数据,对比分析了CMOD5与E1996、T1998、H2000、V2000、M2005和Z2011的组合模型反演风速效果。结果显示,虽然6种组合模型均能从HH极化SAR影像中反演风速,但其精度较差,难以满足高精度海面风速反演要求。对于交叉极化SAR数据,SAR反演风速明显低于ERA-Interim风速,无法得出高精度海面风速。

(3)为了提高HH和交叉极化SAR反演风速精度,本文基于测试数据对现有风速模型进行改进,分别提出了PR_CS极化比模型和CP_CS交叉极化SAR风速反演模型。随后,利用测试数据库中SAR影像进行风速反演实验,并利用ERA-Interim风速进行验证。结论显示:CMOD5+PR_CS组合模型可以从HH极化SAR影像反演得出高精度海面风速,与参考风速RMSE为1.54 m/s;基于CP_CS模型的VH和HV极化SAR反演风速与ERA-Interim风速RMSE分别为1.43 m/s和1.51 m/s,偏差分别为-0.01 m/s和-0.06 m/s,满足海表面风速反演要求,且有效解决了交叉极化SAR数据风速反演过高的缺陷。

致谢:本文使用的RADARSAT-2精细四极化SAR影像数据由加拿大贝德福德海洋研究所(Bedford Institute of Oceanography)William Perrie教授提供,原始影像产品版权归MacDonald、Dettwiler和Associates Ltd公司所有。ERA-Interim数据由欧洲空间局(European Space Agency)提供。在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 柳婧,宋晓姜,王彰贵.中国近海ASCAT和ERA-Interim风场资料的评估[J].海洋预报,2019,36(1):10-19.
- [2] 方贺,谢涛,周育锋,等.基于C-2PO模型和CMOD5.N地球物理模式函数的SAR风速反演性能评估[J].海洋学报,2018,40(9):103-112.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Hersbach H, Stoffelen A, de Haan S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2007, 112(C3): C03006.
- [6] Hersbach H. CMOD5.N: A C-band geophysical model function for equivalent neutral wind[R]. ECMWF Technical Memorandum 554, Reading, England: ECMWF, 2008.
- [7] Stoffelen A, Verspeek J A, Vogelzang J, et al. The CMOD7 geophysical model function for ASCAT and ERS wind retrievals [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(5): 2123-2134.
- [8] Elfouhaily T. Physical modeling of electromagnetic backscatter from the ocean surface; application to retrieval of wind fields and wind stress by remote sensing of the marine atmospheric boundary layer[C]//Dépt. d'Océanogr. Spatiale, l'Inst. Français Rec; l'Exploitation Mer (IFREMER): Plouzane, France, 1997.
- [9] Thompson D R, Elfouhaily T M, Chapron B. Polarization ratio for microwave backscattering from the ocean surface at low to moderate incidence angles[C]//IGARSS'98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. Seattle: IEEE, 1998.
- [10] 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.
- [11] Vachon P W, Dobson F W. Wind retrieval from RADARSAT SAR Images: selection of a suitable c-band HH polarization wind retrieval model[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(4): 306-313.
- [12] Mouche A, Chapron B. Global C-band envisat, RADARSAT-2 and sentinel-1 SAR measurements in copolarization and cross-polarization[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(11): 7195-7207.
- [13] Zhang B, Perrie W, He Y J. Wind speed retrieval from RADARSAT-2 quad-polarization images using a new polarization ratio model[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C8): C08008.
- [14] Vachon P W, Wolfe J. C-band cross-polarization wind speed retrieval[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8

- (3): 456-459.
- [15] Zhang B, Perrie W, Vachon P W, et al. Ocean vector winds retrieval from C-band fully polarimetric SAR measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11): 4252-4261.
- [16] Zhang G S, Li X F, Perrie W, et al. A hurricane wind speed retrieval model for C-band RADARSAT-2 cross-polarization scanSAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(8): 4766-4774.
- [17] Shao W Z, Yuan X Z, Sheng Y X, et al. Development of wind speed retrieval from cross-polarization chinese gaofen-3 synthetic aperture radar in typhoons[J]. Sensors, 2018, 18(2): 412.
- [18] 韩冰, 许遐祯, 刘焕彬, 等. 同极化Radarsat-2数据的海面风速反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 419-426.
- [19] 许遐祯, 韩冰, 黄敬峰, 等. 基于交叉极化数据的海面风速反演研究[J]. 气象科学, 2017, 37(5): 629-638.
- [20] Fang H, Xie T, Perrie W, et al. Comparison of C-band quad-polarization synthetic aperture radar wind retrieval models[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1448.
- [21] Song L N, Liu Z L, Wang F. Comparison of wind data from ERA-Interim and buoys in the Yellow and East China Seas[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(1): 282-288.

Ocean surface wind speed retrieve from RADARSAT-2 quad-polarized SAR images

FANG He^{1,2}, CAI Ju-zhen¹, HE Yue¹, XU Rui³, ZHANG Yu-hui¹, ZHANG Xiao-wei¹, HE Zhong-hua¹,
XIAO Jing-jing¹, XIE Tao⁴

(1. Zhejiang Climate Centre, Hangzhou 310017 China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012 China; 3. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 4. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 China)

Abstract: In this paper, we selected 102 RS-2 SAR images and collocated ERA-Interim reanalysis wind information to assesses different sea surface wind speed retrieval model in China Seas. The result shows that CMOD5 geophysical model function is the optimal model for VV-polarized data, which can retrieve high precision wind speed from SAR image. For HH- and cross-polarized SAR images, we propose two wind speed retrieval models: PR_CS model for HH-polarized data, and CP_CS model for cross-polarized data. The results show that SAR-retrieved wind speed has a good agreement with ERA-Interim winds. The RMSE between wind speed from PR_CS model and reference data are 1.54 m/s. The RMSE between wind speed from CP_CS model and reference data are 1.54 m/s (VH-polarized) and 1.43 m/s (HV-polarized), respectively.

Key words: sea surface wind speed; synthetic aperture radar; quad-polarized SAR; RADARSAT-2