

林静, 张有广. 基于双频段雷达高度计数据的海面阵风反演研究[J]. 海洋学报, 2024, 46(4): 133–142, doi:10.12284/hyxb2024039
Lin Jing, Zhang Youguang. Research of sea surface gust inversion by dual band radar altimeter data[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(4): 133–142, doi:10.12284/hyxb2024039

基于双频段雷达高度计数据的海面阵风反演研究

林静¹, 张有广^{2*}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 海面阵风是海洋资源开发、海洋防灾减灾和海洋科研等领域所需的重要海洋动力环境信息。但迄今为止, 海面阵风观测数据严重缺失, 阻碍了阵风预报、应用研究等方面的发展。本文利用双频的 HY-2B 卫星高度计 C、Ku 波段的后向散射系数, 对现有海面风速 (U_{10}) 进行修正, 建立了阵风风速 (U_g) 反演算法。反演结果与美国国家浮标数据中心 (NDBC) 2018–2022 年的浮标数据进行真实性检验, 相关系数 (R) 为 0.91, 均方根误差 (RMSE) 为 1.82 m/s; 国外同类卫星 Jason-3 基于本方法的反演结果与 2018–2022 年 NDBC 站点数据进行检验, RMSE 优于常规 2 m/s 精度要求; 反演结果与处于不同纬度的近海远洋站点进行个例验证, RMSE 均优于 2 m/s。因此, 本文在现有的 HY-2B 卫星高度计海面风速观测数据的基础上, 利用不同波段信息实现了海面阵风的观测, 具有较高的观测精度。同时, 该方法也适用于相同观测体制的国外卫星高度计。

关键词: 雷达高度计; 反演算法; 海面阵风; HY-2B 卫星; 后向散射系数

中图分类号: P714+.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2024)04-0133-10

1 引言

海面风速作为一个重要的海洋要素, 对于研究海面粗糙度、海气通量以及开发和利用海洋资源起着至关重要的作用^[1]。海面风速一般分为持续风速和阵风风速。持续风速是指在较长一段时间内的平均值, 是目前大多数风场产品中出现的海面风速; 阵风风速则是指风速在短时间内, 突然出现的忽大忽小的风速, 通常是指“瞬间极大风速”^[2], 在浮标或气象站点测量的过程中一般指数秒内的平均风速。

相对于持续风速, 阵风通常会伴随着灾害性的天气系统一起出现。在雷暴前和飑线等系统中通常会出现强阵风, 其持续时间短, 出现时瞬时风速突增, 风向突变, 气象要素剧烈变化^[3], 造成巨大的人员伤亡和财产损失。在桥梁、石油平台等海上工程结构设计、风力发电机组寿命设计的过程中都会考虑阵风

的因素^[4-7], 阵风的短期变化也会对风速敏感的行业如海上运输业、渔业、港口码头等海上作业的安全造成严重的影响^[8-9]。2015 年 6 月 1 日“东方之星”号客轮倾翻, 是小尺度强对流天气出现瞬时特大强风所造成的^[10]。据统计, 对海洋产业构成影响的自然灾害中绝大多数是气象灾害及其衍生灾害, 而海上强阵风及其引起的涌浪破坏力是最大的, 所以对将海洋产业作为支柱的沿海城市来说, 对海面阵风的研究具有重要的意义^[11]。

自 20 世纪六七十年代起, 国内外就已经有了对强阵风的研究工作。在假设地表观测的阵风是由于边界层中流向较高的气团的偏转导致的基础上, Brasseur^[12]提出了一种估算地面阵风的方法; 董双林^[13]对阵风极值及阵风因子进行了统计研究, 其所得的结果已经应用到了国家军用标准的制定; Lei 等^[14]利用 CCMP (Cross Calibrated, Multi-Platform Ocean Surface

收稿日期: 2024-01-23; 修订日期: 2024-03-25。

基金项目: 国家重点研发计划新型海洋观测资料同化技术支撑项目 (2021YFC3101502)。

作者简介: 林静 (1999—), 女, 福建省莆田市人, 主要从事海面风场研究。E-mail: 2213400005@hhu.edu.cn

* 通信作者: 张有广 (1971—), 男, 山东省济南市人, 研究员, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: zhangyouguang@mail.nsoas.org.cn

Wind Velocity) 风速资料和 ERA (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis) 临时阵风资料, 对西太平洋地区年风速、季节风速、阵风风速特征进行描述; 胡海川等^[15] 基于 2016–2019 年观测资料和 ERA5 再分析资料, 使用多元回归方法建立中国近海逐小时阵风预报模型。

虽然阵风研究开展得很早, 但迄今, 海面阵风风速的观测大多还是依靠浮标、石油平台等传统方式, 所获取的数据量有限, 现有的星载雷达高度计及辐射计风场产品也并没有提供海面阵风的观测数据。海面阵风实测数据的缺失, 严重阻碍了阵风预报、应用研究等方面的发展。张有广等^[16] 于 2022 年的研究表明, 在 HY-2B 卫星雷达高度计现有海面风速观测的基础上, 纳入同一卫星平台校正微波辐射计的同步观测信息, 对海面风速进行修正, 从而实现海面阵风观测的方法是可行的。

本文在现有 HY-2B 卫星雷达高度计观测的海面风速基础上, 利用同一卫星雷达高度计不同波段观测能力差异, 实现两波段联合观测海面阵风, 为海面阵风提供一种卫星观测方法。

2 数据来源

2.1 星载雷达高度计观测数据

星载雷达高度计是遥感监测的重要工具之一。雷达高度计通过向海面垂直发射尖脉冲, 接收返回脉冲信号来进行海洋要素观测。通过雷达发射和接收脉冲的时间间隔确定海面高度, 通过返回脉冲的波形确定有效波高和海面风速。

HY-2B 卫星雷达高度计为 Ku 和 C 双频雷达高度计, 工作频率分别为 5.25 GHz 和 13.58 GHz, 星下点优于 2 km, 测距精度优于 2 cm, 沿轨空间分辨率为 7 km。地球物理模型 (Geophysical Data Records, GDR) 是经过波形重构和 POE (Precision Orbital Ephemeris) 定轨等方法进行完全校正后的数据产品, 主要包括 Ku 和 C 波段后向散射系数、海面风速、有效波高等海洋要素信息, 以及经纬度、星下点类型、测量时间等卫星观测信息。图 1、图 2 分别为 HY-2B 卫星雷达高度计的 C、Ku 波段后向散射系数沿轨道分布示意图。

Jason-3 卫星是法国国家太空研究中心 (Cutaneous Nerve Entrapment Syndrome, CNES) 和美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 联合研制的海洋地形卫星, 于 2016 年发射。Jason-3 卫星雷达高度计和 HY-2 系列卫星雷达高度计的工作机制相同, 技术指标也几乎一致。

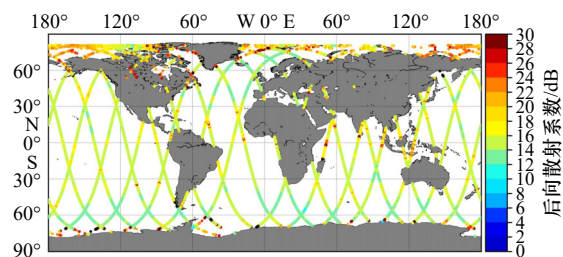


图 1 HY-2B 卫星雷达高度计 C 波段后向散射系数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the backscattering coefficient of the C-band sea surface observed by the HY-2B satellite radar altimeter

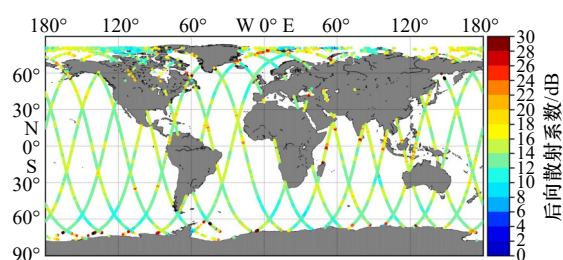


图 2 HY-2B 卫星雷达高度计 Ku 波段后向散射系数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the backscattering coefficient of the Ku-band sea surface observed by the HY-2B satellite radar altimeter

2.2 浮标观测数据

美国国家数据浮标中心 (National Data Buoy Center, NDBC) 长期收集和共享海洋环境中的原位、实时、质量控制观测数据, 以支持了解和预测大气、海洋、波浪、冰和气候的研究。NDBC 浮标提供观测的时间、风向、海面风速、有效波高、海面阵风等信息, 每 10 min 至 1 h 提供一次观测数据。

NDBC 浮标风速计所处的高度不同, 一般实测风速在海面的 3~5 m, 而目前卫星普遍获得的海面风速数据均在海面 10 m 的高度。因此, 本文将浮标历史海面风速和海面阵风数据矫正到海面 10 m 高度风速, 校正公式^[17] 如下:

$$U_{10} = U_z(10/z)^{0.11}, \quad (1)$$

式中, z 为观测高度; U_{10} 为海面 10 m 高度的参考风速; U_z 为在观测高度 z 处对应的海面风速。

NDBC 全球浮标观测体系中有 1 000 多个不同类型浮标, 为避免卫星数据受到陆地污染, 有利于数据的对比分析, 所使用的浮标均远离大陆架 50 km 以上且处于开阔海域, 时间段为 2018–2022 年。本文选取距离 HY-2B 卫星星下点轨迹最近的 46035、41048 和 46005 站点确定海面风速、阵风及 C、Ku 波段后向

散射系数间关系;选取 46006、51000 和 41040 站点数据进行算法定量化评估;选取距离 Jason-3 星下点轨迹最近的 46066、51003 和 41043 站点进行适用性评估。图 3 为 NDBC 浮标所处位置示意图,均位于大西洋西部和太平洋开阔海域,图中圈红站点为上述所提及的站点。

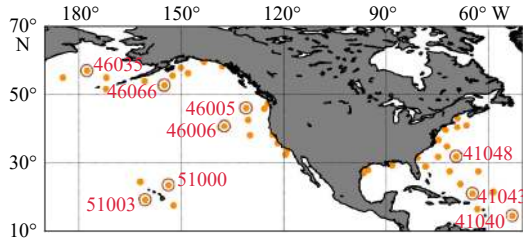


图 3 NDBC 浮标位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the position of the NDBC buoy

3 研究方法

3.1 现有海面风速反演方法

散射理论和实验观测^[18]表明,雷达高度计的后向散射系数和海面风速之间存在着一种反比关系。随着海面风速的增大,海面粗糙度逐渐增大,进而导致雷达的后向散射系数减小。雷达高度计反演海面风速的研究,经历了一个从纯考虑后向散射系数到引入有效波高、降雨、白帽等影响因素的过程,其分析方法也主要分为数据统计和半物理半统计方法。

HY-2B 和 Jason-3 卫星雷达高度计将 Gourrion 等^[19]提出的利用后向散射系数和有效波高(SWH)所建立的双参数模型,作为其业务化海面风速算法,即

$$U_{10} = \frac{Y - a_{U_{10}}}{b_{U_{10}}}, \quad (2)$$

$$Y = [1 + e^{-(W_y X^T + B_y^T)}]^{-1}, \quad (3)$$

$$X = [1 + e^{-(W_x P^T + B_x^T)}]^{-1}, \quad (4)$$

式中, P 为有效波高和后向散射系数归一化后的矩阵; $a_{U_{10}}$ 和 $b_{U_{10}}$ 为风速系数; W_x 、 W_y 、 B_x^T 和 B_y^T 为待定系数参数矩阵,维度分别为 2×2 、 2×1 、 1×2 、 1×1 。利用神经网络确定上述待定参数,具体见表 1 和表 2。

表 1 Gourrion 模型参数

Table 1 Gourrion model parameters

参数	a	b
σ^0	-0.343 36	0.069 09
SWH	0.087 25	0.063 74
U_{10}	0.1	0.284 4

表 2 Gourrion 模型参数

Table 2 Gourrion model parameters

参数	矩阵元素	
W_x	-33.950 62	-11.033 94
	-3.934 28	-0.058 34
W_y	0.540 12	10.404 81
B_x^T	18.063 78	-0.372 28
B_y^T	-2.283 87	...
P	$a_{\sigma^0} + b_{\sigma^0} \sigma^0$	$a_{SWH} + b_{SWH} SWH$

HY-2B 卫星雷达高度计使用 Gourrion 算法可以实现全球海面风速的沿轨观测(图 4),且在中等风、无雨等中性条件下,风速误差优于 2 m/s ^[20]。

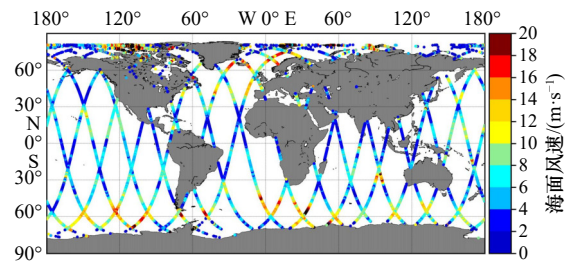


图 4 HY-2B 卫星雷达高度计观测海面风速示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sea surface wind speed observed by the HY-2B satellite radar altimeter

3.2 海面阵风反演方法

为获取更加准确的海表面风浪信息,国内外很多研究者会使用现场数据和卫星测量结果进行比较分析^[21-24],通常选取时间窗口为 $0.5 \sim 1.5 \text{ h}$,空间窗口为 $10 \sim 150 \text{ km}$ 。由于阵风具有较小时空尺度的特征,在保证数据量的情况下选取 30 min 、 50 km 的窗口进行时空匹配。将 HY-2B 卫星雷达高度计数据与所选取的 NDBC 浮标数据进行时空匹配,共有 342 对数据点满足要求。

根据 NDBC 浮标观测海面风速(u_b)以及阵风风速(u_g)数据对比结果(图 5)发现, u_b 和 u_g 存在较好的相关性,其相关系数高达 0.99,且二者之间存在明显的系统性偏差。根据 HY-2B 卫星雷达高度计观测海面风速(U_{10})和对应 NDBC 浮标观测海面风速 u_b 以及阵风风速 u_g 数据对比结果(图 6,图 7)发现, U_{10} 和 u_b 风速结果吻合较好,散点均位于 $1:1$ 基准线附近,根据式(5)计算的均方根误差(RMSE)仅为 1.48 m/s ,说明 HY-2B 卫星高度计现有海面风速观测方法是可靠的。反观 U_{10} 和 u_g 间存在着明显的偏差,最大偏差可达 7.5 m/s ,RMSE 高达 3.49 m/s ; U_{10} 和 u_g 之间也同

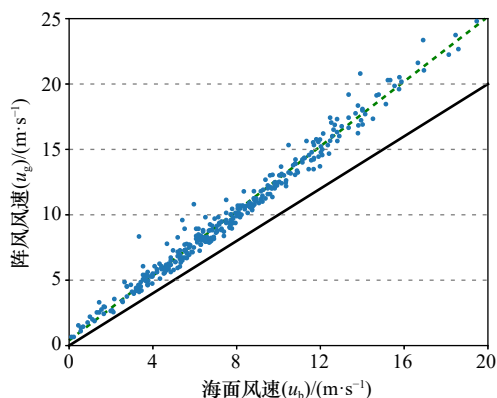


图5 NDBC浮标海面风速(u_b)以及阵风风速(u_g)的散点对比

Fig. 5 Scatter comparison of the sea surface wind speed (u_b) and gust wind speed (u_g) of the NDBC buoy

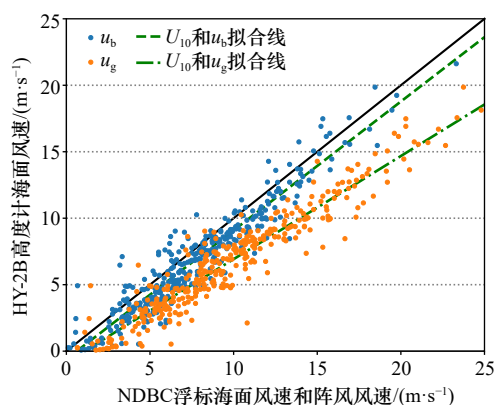


图6 HY-2B卫星雷达高度计海面风速(U_{10})和NDBC浮标海面风速(u_b)以及阵风风速(u_g)的散点对比

Fig. 6 Scatter comparison of the sea surface wind speed (U_{10}) of the HY-2B satellite radar altimeter and the sea surface wind speed (u_b) and gust wind speed (u_g) of the NDBC buoy

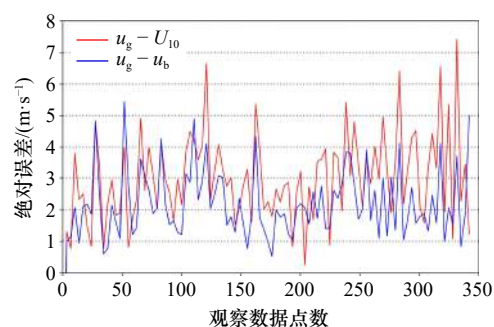


图7 HY-2B卫星雷达高度计海面风速(U_{10})和NDBC浮标海面风速(u_b)与NDBC浮标阵风风速(u_g)间的绝对误差

Fig. 7 The absolute error between the HY-2B satellite radar altimeter sea surface wind speed (U_{10}) and the NDBC buoy surface wind speed (u_b) and the NDBC buoy gust wind speed (u_g)

样存在较好的相关性、明显的系统性偏差,与 u_b 和 u_g 偏差接近。因此,在雷达高度计现有海面风速观测数据的基础上,可以通过改进算法消除海面风速与海面阵风之间的系统性偏差,来挖掘雷达高度计海面阵风的观测能力。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}, \quad (5)$$

式中, x 、 y 分别为浮标测量的真实数据和从模型中反演出来的数据; n 为对比数据点数。

将HY-2B雷达高度计后向散射系数与NDBC海面阵风进行比对分析(图8)发现,后向散射系数与海面阵风同样存在着反比关系,C波段后向散射系数普遍高于Ku波段后向散射系数。陈戈^[25]发现,Ku波段后向散射系数(σ_{Ku})和C波段后向散射系数(σ_{C})间存在一定的“标准”关系,一旦二者关系相对于“标准”关系出现偏离,就意味着存在某种海洋或大气干扰条件,也可能表明正在演变的海况条件^[26]。根据Zappa等^[27]的研究,阵风会导致短尺度波的初生长,使得水气截面变粗糙;其次,由于阵风的剪切过程和微尺度波的破碎,使冷皮肤层的流体机械波破碎,导致海面皮肤温度增加。Lyu等^[28]发现,在阵风条件下,有效波高和浪风高均比非阵风条件下增加10%~20%。综上所述,海面阵风会对海况、海表温度等海洋或大气要素造成一定的影响,导致 σ_{Ku} 和 σ_{C} 偏离“标准”关系。基于后向散射系数与阵风风速间关系以及阵风对 σ_{Ku} 和 σ_{C} 间“标准”关系的影响,将利用 σ_{Ku} 和 σ_{C} 来实现海面阵风的观测。

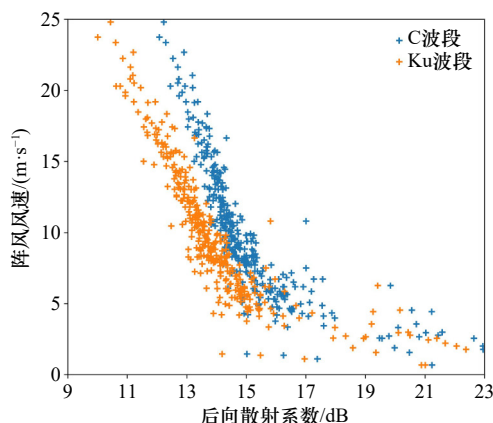


图8 C、Ku波段后向散射系数与阵风风速之间的关系
Fig. 8 Relationship between the backscattering coefficients of C and Ku bands and gust wind speed

Ku波段和C波段所能接收到反射波的范围存在差异,根据过滤表面效应,高度计接收到的反射波的范围应该是其辐射波长的3倍左右。Ku波段和C波

段的星下点面积也同样存在差异, Ku 波段足印为 2~10 km, 而 C 波段足印为 20~30 km。基于探测波长和星下点面积的不同, C 波段相较于 Ku 波段会获取更多的风速信息。因此, 考虑到 σ_C 中包含着比 σ_{Ku} 更多的风速信息, 将 σ_C 和 σ_{Ku} 的差值作为修正量, 来对基于 σ_{Ku} 得到的海面风速进行补偿修正, 进而得到相应的海面阵风风速。具体计算方法如下:

$$U_g = U_{10} + AT, \quad (6)$$

$$T = \sigma_C - \sigma_{Ku}, \quad (7)$$

式中, U_g 为阵风风速; U_{10} 为雷达高度计所观测的海面风速; σ_C 、 σ_{Ku} 分别为 C、Ku 波段后向散射系数; A 为待定系数。根据匹配数据对中雷达高度计及浮标数据进行线性拟合确定上述待定系数, $A = 2.0$ 。使用上述反演方法, HY-2B 卫星雷达高度计可以实现全球海面阵风的沿轨观测(图 9)。

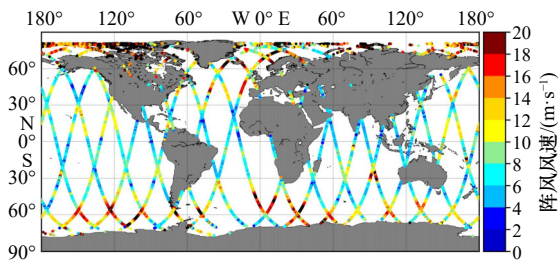


图 9 HY-2B 卫星雷达高度计观测海面阵风示意图
Fig. 9 Schematic diagram of sea gusts observed by the HY-2B satellite radar altimeter

4 算法检验与讨论

4.1 真实性检验

为定量评估反演方法, 将 HY-2B 反演结果与 NDBC 浮标的阵风风速进行检验。经过时空匹配及数据筛选, 共 319 对数据满足条件, 其对比结果见图 10。

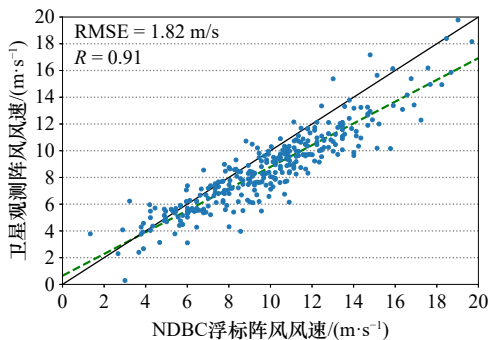


图 10 HY-2B 卫星雷达高度计与 NDBC 浮标阵风数据散点分析
Fig. 10 Scatter analysis of gust data of HY-2B satellite radar altimeter and NDBC buoy data

结果表明: 卫星观测阵风风速 (U_g) 与浮标阵风风速 (u_g) 基本吻合, 31 对数据绝对误差大于 3 m/s, 最大绝对误差为 5.61 m/s, 近 72.10% 的数据绝对误差优于 2 m/s, 均方根误差 (RMSE) 为 1.82 m/s, 优于常规 2 m/s 的精度要求, 卫星和浮标数据间的 R 为 0.91。说明反演方法的阵风风速观测能力可靠。

对绝对误差较大的数据进行进一步的分析(图 11)发现: 绝对误差小于 3 m/s 的数据, 其雷达高度计海面风速绝对误差大多小于 2 m/s, 海面风速反演精度较好; 反观绝对误差大于 3 m/s 的数据, 其雷达高度计海面风速绝对误差大多大于 2 m/s, 海面风速反演精度较差。这说明海面风速的精度会对阵风风速的反演效果造成影响, 在雷达高度计提供的海面风速精度较高的基础上, 使用反演方法反演出来阵风风速可信。

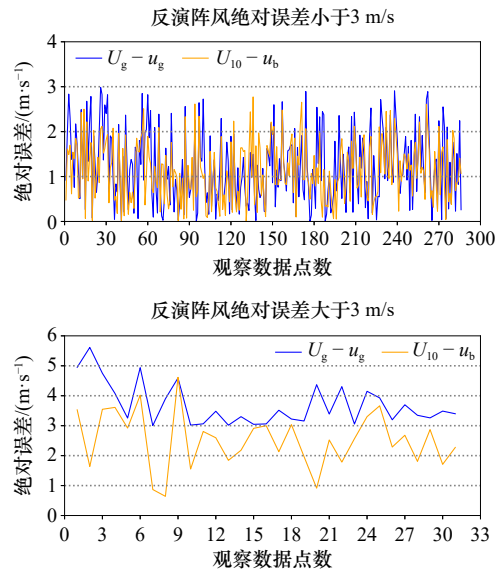


图 11 HY-2B 卫星雷达高度计海面风速与海面阵风绝对误差折线图

Fig. 11 Line chart of HY-2B satellite radar altimeter sea surface wind speed and sea surface gust absolute error

4.2 反演方法在同类卫星中的适用性

为检验反演方法在其他同类卫星上的适用性, 将上述的阵风反演方法应用到与 HY-2B 卫星接近的 Jason-3 卫星上, 反演结果与 NDBC 浮标数据进行对比分析。对于近乎垂直入射和给定的雷达频率, 后向散射系数是海面的基本属性, 但是由于仪器间存在系统误差, 不同卫星雷达高度计风速产品间存在误差, 所以雷达高度计之间需要进行一定的交叉验证, 提出 3 种微调方案: 仅对式 (6)、式 (7) 中的待定系数 A 进行重新拟合; 仅对 Jason-3 卫星雷达高度计的后向散射系数进行卫星间的标定, 调整 T 值, 不改变 A ; 既进行卫星间标定, 调整 T 值, 又对 A 进行重新拟

合。卫星间的标定结果如下:

$$T_{\text{Jason}} = \sigma_C - \sigma_{\text{Ku}} - 0.6. \quad (8)$$

利用除 46066、51003 和 41043 站点外其余 NDBC 站点确定待定系数 A , 不进行卫星标定的待定系数 $A = 1.2$, 进行卫星标定后的待定系数 $A = 1.8$ 。

将 Jason-3 卫星雷达高度计反演结果与 NDBC 浮标的阵风风速进行检验, 经时空匹配及数据筛选, 共找到 231 对数据, 其对比分析见图 12。对比结果表明: 未进行调整的反演结果与浮标阵风风速的 RMSE 为 1.64 m/s, 优于精度要求, $A = 2.0$ 同样适用于 Jason-3

卫星雷达高度计; 3 种调整方案 RMSE 均优于 1.35 m/s, 经过不同程度的调整, 其反演精度提高了约 0.30 m/s, 其中仅对待定系数 A 进行调整的方案最佳, RMSE 为 1.26 m/s, 仅调整 T 值的方案次之, RMSE 为 1.32 m/s, 反对 T 值和待定系数 A 同时调整的方案效果最差, RMSE 为 1.34 m/s, 3 种方案的 RMSE 相差不超过 0.08 m/s。这说明反演方法在其他同类卫星上依旧具有可靠的阵风观测能力, 待定系数 $A = 2.0$ 同样适用于其他卫星, 但对 A 或者 T 值进行重新调整后, 反演精度更佳。

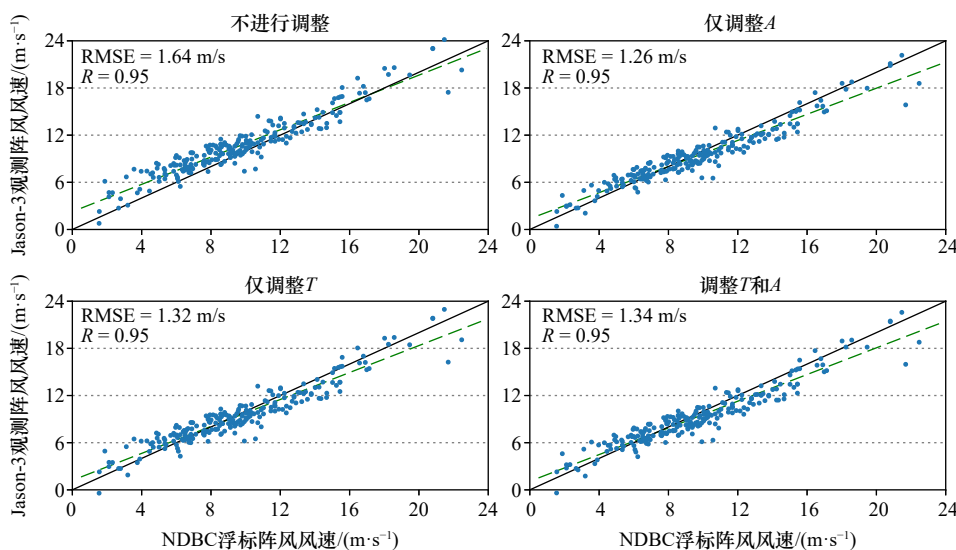


图 12 Jason-3 卫星雷达高度计与 NDBC 浮标阵风数据散点对比

Fig. 12 Scatter comparison of Jason-3 satellite radar altimeter and NDBC buoy gust data

4.3 阵风算法的空间普适性

为对算法得到空间普适性进行检验, 选取了 8 个位于近海远洋、不同纬度下的 NDBC 浮标进行个例验证(图 13), 其中 41040、44008、41008、44011 站点位于大西洋西侧海域, 其余站点位于太平洋开阔海域; 51003、46070、46006、41040 位于不同纬度的远洋, 其余站点位于近海; 51003、41040 站点位于低纬度地区, 其余站点位于中高纬度地区。

将 HY-2B 反演结果与选取的浮标数据进行对比分析, 其对比结果见表 3 和图 14。结果表明: 8 个站

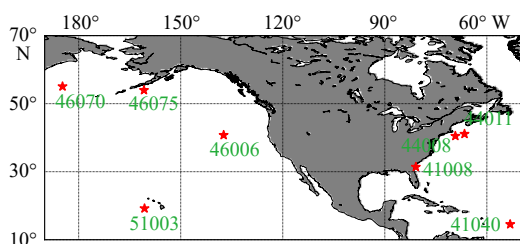


图 13 NDBC 浮标位置示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the position of the NDBC buoy

点的 RMSE 均优于 2 m/s 的常规要求, 其中处于大西洋西部低纬度海域的 41040 远洋站点反演精度最佳, RMSE 为 1.35 m/s, 处于太平洋东部中纬度海域的 46006 远洋站点反演精度最差, RMSE 为 1.89 m/s; 从纬度上来看, 处于不同纬度的 46070、46006、51003、41040 远洋站点以及不同纬度的 46075、44008、41008 近海站点的阵风反演精度均满足要求; 从离岸距离上看, 几乎处于同一纬度下的 46006、46070 远洋站点与 44008、46075 近海站点, 反演精度均满足要求, 无明显的差异性; 从大洋上看, 处于大西洋西部海域 41040、44011 站点, 太平洋北部海域 46070 站点、太平洋中央海域 51003 站点以及太平洋东部海域 46006 站点, 阵风反演结果均满足精度要求。这说明该算法具有一定的空间普适性, 在近海远洋及不同纬度下的阵风反演均可以满足精度要求。

将雷达高度计提供的海面风速精度纳入分析(表 3), 发现海面风速的精度会对阵风风速的反演效果造成影响, 41040、51003 站点的海面风速的 RMSE 均小于

表3 HY-2B 卫星雷达高度计与 NDBC 浮标数据对比分析及浮标具体信息

Table 3 Comparative analysis results of HY-2B satellite radar altimeter and NDBC buoy data and specific information of buoys

NDBC 浮标站点	纬度	经度	距离大陆架/(n mile)	卫星与NDBC浮标海面风速		卫星与NDBC浮标阵风风速	
				RMSE/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	R	RMSE/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	R
46070	55.05°N	175.26°E	142	1.51	0.95	1.76	0.96
46075	53.97°N	160.79°W	85	1.62	0.94	1.81	0.95
44011	41.09°N	66.56°W	170	1.95	0.91	1.83	0.95
46006	40.76°N	137.38°W	600	1.65	0.93	1.89	0.94
44008	40.50°N	69.25°W	54	1.78	0.93	1.88	0.95
41008	31.40°N	80.87°W	40	1.95	0.90	1.48	0.94
51003	19.20°N	160.64°W	205	1.39	0.88	1.40	0.91
41040	14.54°N	53.14°W	470	1.21	0.90	1.35	0.90

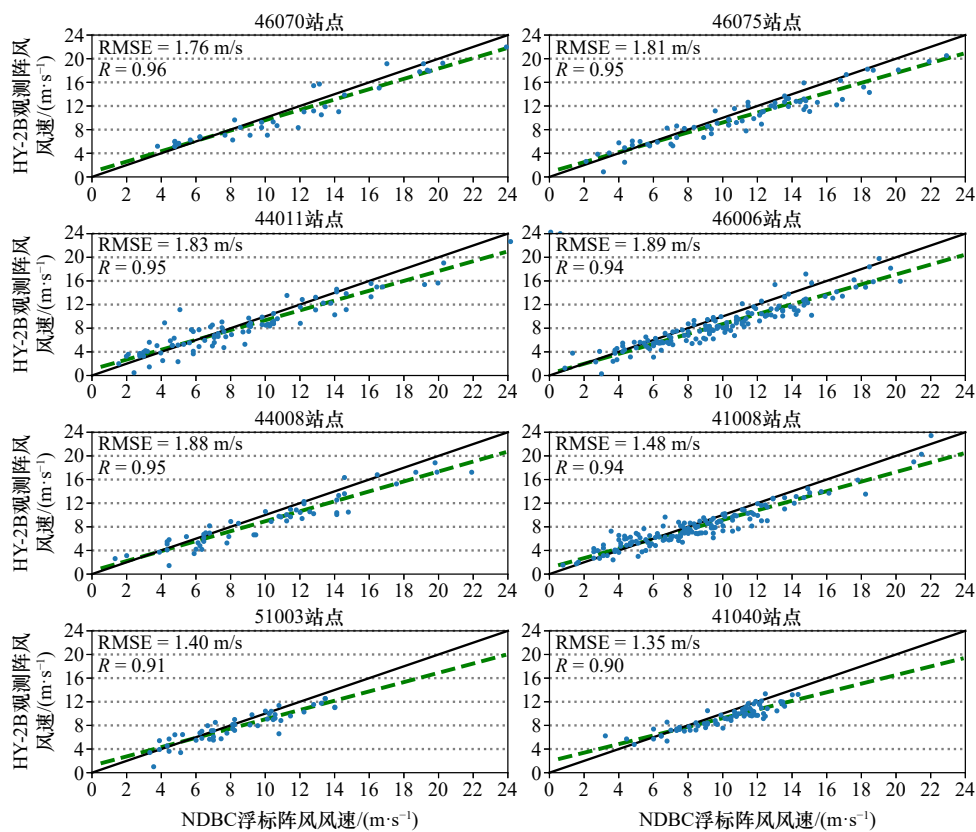


图14 HY-2B 卫星雷达高度计与 NDBC 浮标阵风数据散点对比

Fig. 14 Scatter comparison of HY-2B satellite radar altimeter vs. NDBC buoy gust data

1.40 m/s, 其反演的阵风风速 RMSE 均优于 1.45 m/s; 其余站点海面风速 RMSE 均大于 1.50 m/s, 其反演的阵风风速虽满足常规精度要求, 但远不及 41040、51003 站点, 与真实性检验中的发现吻合。对 HY-2B 反演结果与选取的浮标数据对比散点图(图 10, 图 14)进行进一步分析发现, 阵风风速在 4~16 m/s 的范围内反演精度较高, 与浮标阵风风速高度吻合, 均位于 1:1 基准线附近; 当阵风风速低于 4 m/s 或超过 16 m/s 时,

离散现象明显; 当阵风风速超过 16 m/s 时, 出现明显低估现象, 当阵风风速低于 4 m/s 时, 出现较明显的高估现象, 这与海面风速反演中的低风速高估、高风速低估现象吻合。

5 结论

海面阵风研究对于研究海面粗糙度、海气通量以及开发和利用海洋资源等都有着重要意义, 但海面阵

风观测数据的严重缺失,阻碍了阵风预报、应用研究等方面的发展。本文利用HY-2B卫星雷达高度计的海面风速观测数据,纳入C、Ku波段观测信息对海面风速进行补偿,来实现海面阵风的观测。

为量化评估反演方法的可靠性,使用了2018–2022年NDBC的46006、51000和41040浮标数据进行检验,其结果为阵风风速的RMSE为1.82 m/s,相关系数为0.91。为定量分析反演算法及待定系数 A 在其他卫星上的适用性,将反演方法应用到国外同类卫星Jason-3上,其观测到的阵风风速与2018–2022年NDBC 46066、51003和41043浮标数据进行对比,结果表明:未进行调整的反演结果与浮标阵风风速的RMSE为1.64 m/s,优于精度要求, $A=2.0$ 同样适用于Jason-3卫星雷达高度计;3种调整方案的反演结果与浮标阵风风速的RMSE均优于1.35 m/s,经过不同程度的调整,其反演精度提高了约0.30 m/s。为对算法的空间普适性进行检验,8个位于近海远洋、不同纬度下的NDBC浮标进行个个验证,结果表明:8个站点的卫星观测阵风风速(U_g)与浮标阵风风速(u_g)基本吻合, RMSE均优于2 m/s的常规要求,其中处于大

西洋西部低纬度海域的41040远洋站点反演精度最佳, RMSE为1.35 m/s,处于太平洋东部中纬度海域的46006远洋站点反演精度最差, RMSE为1.89 m/s;按照站点的纬度、离岸距离、大洋位置进行区分,对比分析阵风反演精度,发现算法反演效果无明显差异;将雷达高度计提供的海面风速精度纳入分析,发现海面风速的精度会影响到阵风风速的反演效果,在4~16 m/s的范围内阵风风速反演精度较高,存在与海面风速反演较为类似的低风速高估高风速低估现象。

通过数据分析,使用雷达高度计不同波段后向散射系数联合观测海面阵风风速是可行的,同时该反演方法在其他相同观测体系的卫星雷达高度计上也适用,并具有一定的空间普适性。本反演方法为卫星雷达高度计观测海面阵风提供了可能性。

致谢: 感谢NDBC网站提供的浮标数据 (<https://www.ndbc.noaa.gov/>);感谢AVISO提供的Jason-3卫星雷达高度计数据 (<https://aviso.altimetry.fr/en/data.html>)。

参考文献:

- [1] 姜祝辉, 黄思训, 刘刚, 等. 星载雷达高度计反演海面风速进展[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 588–594.
Jiang Zhuhui, Huang Sixun, Liu Gang, et al. Research on the development of surface wind speed retrieval from satellite radar altimeter[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(5): 588–594.
- [2] 大气科学名词审定委员会. 大气科学名词[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2009.
Approval Committee of Atmospheric Science Terms. Chinese Terms in Atmospheric Science[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 李永平, 郑运霞, 方平治. 2009年“莫拉克”台风登陆过程阵风特征分析[J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1188–1199.
Li Yongping, Zheng Yunxia, Fang Pingzhi. Analysis of the characteristics of gusts during the landing of Typhoon Morakot (2009)[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(6): 1188–1199.
- [4] Jung C, Schindler D, Buchholz A, et al. Global gust climate evaluation and its influence on wind turbines[J]. *Energies*, 2017, 10(10): 1474.
- [5] Larose G L, Mann J. Gust loading on streamlined bridge decks[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1998, 12(5): 511–536.
- [6] 岑国基, 张金根. 大跨度桥梁施工抗风设计问题[J]. 桥梁建设, 1988(3): 57–63, 56.
Cen Guoji, Zhang Jingen. Wind-resistant design of long-span bridge construction[J]. Bridge Construction, 1988(3): 57–63, 56.
- [7] Kwon S D, Chang S P. Suppression of flutter and gust response of bridges using actively controlled edge surfaces[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 88(2/3): 263–281.
- [8] 魏晓琳, 王德立, 贺佳佳, 等. 深圳沿海地区阵风系数的特征[J]. 广东气象, 2016, 38(5): 33–36, 41.
Wei Xiaolin, Wang Deli, He Jiajia, et al. Characteristics analysis on gust factors over coastal areas in Shenzhen[J]. Guangdong Meteorology, 2016, 38(5): 33–36, 41.
- [9] 尹尽勇, 刘涛, 张增海, 等. 冬季黄渤海大风天气与渔船风损统计分析[J]. 气象, 2009, 35(6): 90–95.
Yin Jinyong, Liu Tao, Zhang Zenghai, et al. Statistical analysis of the weather system types causing strong winds and fishery boat wind-age loss accidents in Bohai Sea and Yellow Sea in winter[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(6): 90–95.
- [10] 丁杏农. 浅谈横风使船舶产生横漂的机理[J]. 云南交通科技, 1997, 13(1): 46–48.
Ding Xingnong. A brief discussion on the mechanism of transverse drift of ships caused by crosswind[J]. Yunnan Communication Science and Technology, 1997, 13(1): 46–48.
- [11] 荣艳敏, 阎丽凤, 盛春岩, 等. 山东精细化海区风的MOS预报方法研究[J]. 海洋预报, 2015, 32(3): 59–67.
Rong Yanmin, Yan Lifeng, Sheng Chunyan, et al. A study on MOS forecasting method of gale wind in Shandong coast[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(3): 59–67.

- [12] Brasseur O. Development and application of a physical approach to estimating wind gusts[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(1): 5–25.
- [13] 董双林. 中国的阵风极值及其统计研究 [J]. 气象学报, 2001, 59(3): 327–333.
Dong Shuanglin. Gust extremes in China and its statistical study[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(3): 327–333.
- [14] Fan Lei, Zheng Chongwei, Zhou Hongjin, et al. Gust characteristic analysis of wind energy resource in the western Pacific Ocean[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 99(S1): 404–410.
- [15] 胡海川, 刘珺, 林建. 基于预报方程的我国近海阵风预报 [J]. 气象, 2022, 48(3): 334–344.
Hu Haichuan, Liu Jun, Lin Jian. Application of prediction equation to gust forecasting for Chinese offshore areas[J]. *Meteorological Monthly*, 2022, 48(3): 334–344.
- [16] 张有广, 蒋城飞, 贾永君, 等. HY-2B 卫星载荷联合观测海面阵风的一种反演方法 [J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 133–143.
Zhang Youguang, Jiang Chengfei, Jia Yongjun, et al. An inversion method for joint observation of wind gusts by HY-2B satellite remote sensors[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(11): 133–143.
- [17] Hsu S A, Meindl E A, Gilhousen D B. Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability conditions at sea[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(6): 757–765.
- [18] Hwang P A, Teague W J, Jacobs G A, et al. A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C5): 10451–10468.
- [19] Gourrion J, Vandemark D, Bailey S, et al. Satellite altimeter models for surface wind speed developed using ocean satellite crossovers[R]. 2000.
- [20] Sharoni S M H, Md Reba M N, Hossain M S. Tropical cyclone wind speed estimation from satellite altimeter-derived ocean parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(4): e2020JC016988.
- [21] 刘花, 王静, 齐义泉, 等. 南海北部近岸海域 Jason-1 卫星高度计与浮标观测结果的对比分析 [J]. 热带海洋学报, 2013, 32(5): 15–22.
Liu Hua, Wang Jing, Qi Yiquan, et al. Comparison of Jason-1 satellite altimeter and buoy measurements in the coastal water of the northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(5): 15–22.
- [22] Hwang C, Kao E C, Parsons B. Global derivation of marine gravity anomalies from Seasat, Geosat, ERS-1 and TOPEX/POSEIDON altimeter data[J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 134(2): 449–459.
- [23] Gower J F R. Intercalibration of wave and wind data from TOPEX/POSEIDON and moored buoys off the west coast of Canada[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C2): 3817–3829.
- [24] Cotton P D, Carter D J T. Cross calibration of TOPEX, ERS-I, and Geosat wave heights[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 25025–25033.
- [25] 陈戈. 卫星高度计反演海面风速——模式函数与应用实例 [J]. 遥感学报, 1999, 3(4): 305–311, 325.
Chen Ge. On retrieving sea surface wind speed from satellite altimeters: model functions and an application case[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1999, 3(4): 305–311, 325.
- [26] Farjami H, Golubkin P, Chapron B. Impact of the sea state on altimeter measurements in coastal regions[J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, 7(10): 935–944.
- [27] Zappa C J, Laxague N J M, Brumer S E, et al. The impact of wind gusts on the ocean thermal skin layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11301–11309.
- [28] Lyu M, Potter H, Collins C O, et al. The impacts of gustiness on the evolution of surface gravity waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(12): e2023GL104085.

Research of sea surface gust inversion by dual band radar altimeter data

Lin Jing¹, Zhang Youguang²

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

Abstract: Sea surface gusts are important marine dynamic environmental information required for the development of marine resources, marine disaster prevention and reduction, and marine scientific research. However, so far, there has been a serious lack of observational data on sea surface gusts, which has hindered the development of gust forecasting, application research, and other aspects. This article uses the backscatter coefficients in the C and Ku bands of the dual frequency HY-2B satellite altimeter to correct the existing sea surface wind speed (U_{10}) and gust wind speed (U_g) inversion algorithm. The inversion results were verified for authenticity with the buoy data from the National Buoy Data Center (NDBC) of the United States from 2018 to 2022. The correlation coefficient (R) was 0.91, and the root mean square error (RMSE) was 1.82 m/s; based on the inversion results of this method and the NDBC station data from 2018 to 2022, the RMSE of similar foreign satellites Jason-3 is superior to the conventional 2 m/s accuracy requirement; the inversion results were verified with individual cases of offshore and oceanic stations at different latitudes, and the RMSE was better than 2 m/s. Therefore, based on the existing HY-2B satellite altimeter sea surface wind speed observation data, this article uses different band information to achieve observation of sea surface gusts, which has high observation accuracy. Meanwhile, this method is also applicable to foreign satellite altimeters with the same observation system.

Key words: radar altimeter; inversion method; sea surface gusts; HY-2B satellite; Backscattering Coefficient