

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, doi:10.12284/hyxb2022131

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, doi:10.12284/hyxb2022131

# HY-2B 卫星载荷联合观测海面阵风的一种反演方法

张有广<sup>1,2</sup>, 蒋城飞<sup>2\*</sup>, 贾永君<sup>1,2</sup>, 马小峰<sup>1,2</sup>

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511485; 2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

**摘要:** 国内外对海上阵风的研究并不多, 且大多集中在阵风预报和应用研究方面, 对于海洋阵风数据的获取技术未见文献系统论述。本文利用 HY-2B 卫星雷达高度计观测的后向散射系数, 结合校正微波辐射计观测的亮度温度信息, 提出联合反演阵风风速的方法。两个遥感载荷联合反演得到的阵风风速与 2019–2021 年美国国家浮标数据中心 (NDBC) 浮标数据进行真实性检验, 结果显示: 阵风风速均方根误差 (RMSE) 为 0.98 m/s, 相关系数为 0.82; 基于本方法利用国外同类卫星 Jason-3 得到的阵风风速与 2016–2018 年 NDBC 浮标数据的 RMSE 为 0.96 m/s, 相关系数为 0.88。本文在 HY-2B 卫星雷达高度计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联合实现了海面阵风的观测, 数据的比对结果证明文中方法具有较高的观测精度。同时, 该方法对于具有相同观测体制的国内外卫星也适用。

**关键词:** HY-2B 卫星; 雷达高度计; 校正微波辐射计; 海面阵风; 反演方法

中图分类号: P714<sup>+</sup>.1; P715.6

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2022)11–0133–11

## 1 引言

海上阵风是海面的瞬时极大风速。在海洋工程结构设计中, 尤其是上层建筑结构必须要考虑阵风的作用<sup>[1]</sup>。阵风特性研究也是大风预报和服务的基础<sup>[2]</sup>。胡波等<sup>[3]</sup>利用 2006–2012 年的 NCEP/NCAR 再分析数据、舟山群岛 68 个自动站的小时极大风速数据, 通过定义大气环流形势相似指数和地面风场相似指数, 建立一种阵风经验统计降尺度映射预报模型。魏晓琳等<sup>[4]</sup>利用深圳沿海站点的风速观测资料, 按季风及热带气旋两种类型探讨了阵风和阵风系数的统计特征。周福等<sup>[5]</sup>基于 2011–2013 年浙江省自动气象站逐日逐 10 min 测风资料, 分析了浙江省陆地和近海海面冷空气、热带气旋和强对流大风的阵风系数特征, 认为模糊聚类可帮助提高模型阵风系数预报能

力。Giglio 等<sup>[6]</sup>认为上层海洋过程在海气耦合中起着关键作用, 在短时间尺度和长时间尺度上都有变化。当日平均风较弱时, 阵风调节海地表水混合到更深处。阵风比白天的风强得多。即使在一维过程模型中使用随机阵风, 但不使用日风作为输入, 也可以得到与观测值比较好的日温度估计值。胡波等<sup>[3]</sup>利用 2006–2016 年冬、春季浙江 4 个海岛气象站 10 m 大风观测资料和 ERA-interim 资料, 采用高斯过程回归方法建立阵风概率预报模型, 并进行试报, 大部分站点阵风预报的 50% 概率区间上下界跨度约为 2.5 m/s, 75% 概率区间跨度约为 4.5 m/s<sup>[3]</sup>。万夫敬等<sup>[6]</sup>利用上海台风研究所移动观测车获取的“莫拉克”台风登陆过程中超声风、温等观测资料对地面阵风特性进行了诊断分析。

综上所述, 国内外对海上阵风的研究并不多, 且

收稿日期: 2022–02–15; 修订日期: 2022–05–25。

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0302)。

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

\* 通信作者: 蒋城飞(1990—), 男, 博士, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: jcf@mail.nsoas.org.cn

大多集中在阵风预报和应用方面,对于海洋阵风数据的获取技术未见文献系统论述。我国的海洋动力环境卫星(HY-2B)于2018年投入在轨业务运行,已经具备全球海面风速等海洋动力环境信息的业务化获取能力<sup>[7]</sup>。利用HY-2B卫星上的雷达高度计获取海面的风速信息是其主要功能之一。迄今研究学者已提出大约20种的雷达高度计风速反演算法,其中比较著名的包括文献中提出的仅依赖于Ku波段后向散射系数单参数经验算法<sup>[8-12]</sup>。Gourrion等<sup>[13]</sup>通过对TOPEX/Poseidon高度计测量的有效波高和标准化雷达后向散射截面资料与NSCAT风速数据进行时空匹配处理,得到同步数据集,利用人工神经网络方法试验得到反演海面风速的两参数算法(即将后向散射系数和有效波高都作为输入的参数)。目前,HY-2B卫星雷达高度计就是采用这种方法获取全球海面风速信息。

综上所述,国内外对海上阵风的研究并不多,且大多集中在阵风预报和应用研究方面,对于海洋阵风数据的获取技术未见文献系统论述。同时,现有的卫星雷达高度计获取的只是海面风速的信息,也未提供海面阵风风速的观测。本文将在HY-2B卫星雷达高度计海面风速观测的基础上,纳入被动遥感观测的校正微波辐射计的同步观测信息,补偿雷达高度计的风速观测能力,实现两个遥感载荷联合的海面阵风观测,为阵风风速的观测提供一种可靠的卫星遥感信息获取手段。

## 2 卫星观测及相关数据源

### 2.1 雷达高度计及观测数据

雷达高度计是海洋动力环境卫星上的主动微波遥感载荷。它向海面垂直发射脉冲,通过接收返回脉冲的信号进行信息的获取。在返回的脉冲信号波形中,波形的幅度与海面后向散射特性具有相关性,利用这种相关关系可以建立海面风速与后向散射系数的算法模型,进而实现风速信息的获取<sup>[14]</sup>。HY-2B卫星雷达高度计有Ku和C两个频段,都可以进行有效波高和风速的观测,在卫星二级标准数据产品中包含了Ku和C频段的后向散射系数、海面风速、有效波高和海面高度等海洋动力环境信息。图1为文中所用的后向散射系数沿轨道分布示意图,数据的沿轨空间分辨率为7 km,1 s一个观测数据点,每个观测数据的空间足印为1.9 km。Jason-3卫星由美国和法国联合研制,Jason-3卫星雷达高度计与HY-2B卫星雷达

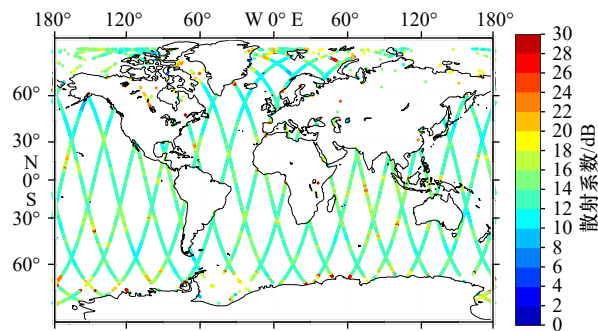


图1 HY-2B卫星雷达高度计观测的海面后向散射系数示意图

Fig. 1 Backscattering coefficient observed by HY-2B satellite radar altimeter

高度计属于相同工作体制的遥感器,技术指标也基本一致<sup>[15]</sup>。

### 2.2 校正辐射计及观测数据

校正辐射计是海洋动力环境卫星上专门为雷达高度计配备的用于大气湿对流层路径延迟校正的被动微波遥感载荷。HY-2B卫星校正辐射计有18.7 GHz( $T_{18}$ )、23.8 GHz( $T_{23}$ )和37 GHz( $T_{37}$ )3个亮度温度观测通道,这3个通道分别对海面风速、大气水汽和云液态水含量信息敏感,进而可以建立相应的反演算法<sup>[16]</sup>。校正辐射计各通道的亮度温度观测数据已经融合到雷达高度计的二级标准数据产品中,数据的采样间隔也是1 s,空间分辨率为24 km。Jason-3卫星校正辐射计有18.7 GHz( $T_{18}$ )、23.8 GHz( $T_{23}$ )和34 GHz( $T_{37}$ )3个亮度温度观测通道,技术指标基本与HY-2B校正辐射计一致<sup>[15]</sup>。文中所用的HY-2B卫星校正辐射计 $T_{18}$ 数据的沿轨分布示意图,如图2所示。

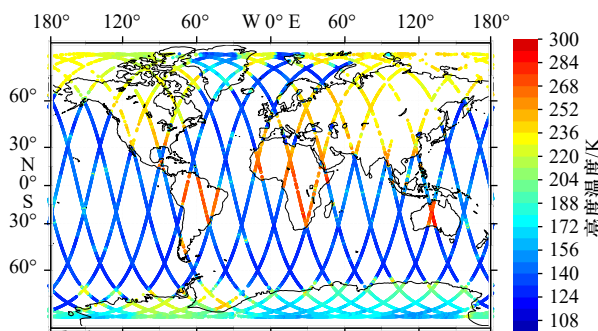


图2 HY-2B卫星校正微波辐射计18.7 GHz通道观测亮度温度示意图

Fig. 2 Brightness temperature of 18.7 GHz channel of HY-2B satellite correction radiometer

### 2.3 美国国家浮标数据中心观测数据

美国国家浮标数据中心(NDBC)持续提供高质量的海洋环境观测,以支持对天气、气候、海洋和海岸变化的理解和预测。NDBC全球浮标观测体系中有

1 000 多个各类浮标,用来获取海洋和大气的多种现场观测数据。其中,浮标获取的风速信息有海面风速和阵风风速等。海面风速是 NDBC 浮标在 8 min 内的平均风速(m/s),陆地站在 2 min 内的平均风速(m/s),每小时报告一次;阵风风速是在 8 min 或 2 min 内测得的峰值 5 s 或 8 s 阵风风速(m/s)。本文研究中选取了距离 HY-2B 卫星星下点观测距离最近的 2 个浮标点的观测数据进行定量评估,分别是 41044 和 51000 浮标,时段是 2019–2021 年。选取了距离 Jason-3 卫星星下点观测距离最近的浮标 41047 进行研究方法的适用性评估,数据时段是 2016–2018 年。图 3 为截取自 NDBC 的浮标位置示意图,浮标 51000、41044 和 41047(图中红圈内)分别位于美国东部太平洋和西部大西洋开阔海域,卫星数据不受陆地污染,利用数据的比对和分析。

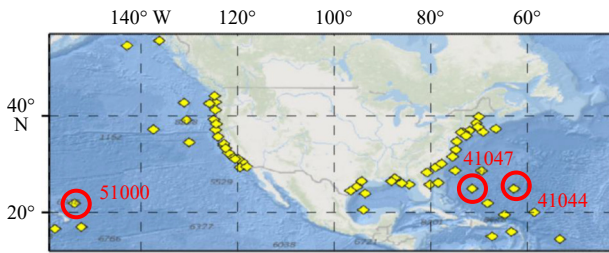


图 3 美国国家浮标数据中心浮标位置示意图  
Fig. 3 National data buoy center buoy position

### 3 研究方法

#### 3.1 现有海面风速反演方法

HY-2B 卫星雷达高度计风速反演算法中利用了 Gourrion 等<sup>[13]</sup>提出的双参数模型,即

$$U_{10} = \frac{Y - a_{U_{10}}}{b_{U_{10}}}, \quad (1)$$

$$Y = \left[ 1 + \exp^{-\left(\overline{W}_y X + \overline{B}_y\right)} \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$X = \left[ 1 + \exp^{-\left(\overline{W}_x P^T + \overline{B}_x\right)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

式中,  $U_{10}$  为距离海面 10 m 处的风速;  $P$  为  $SWH$  与  $\sigma^0$  归一化后的矩阵,维度为  $1 \times 2$ ;  $a_{U_{10}}$ ,  $b_{U_{10}}$  为风速系数;  $\overline{W}_x$ ,  $\overline{W}_y$ ,  $\overline{B}_x$ ,  $\overline{B}_y$  为待定的模型参数矩阵,维度分别为  $2 \times 2$ ,  $2 \times 1$ ,  $1 \times 2$ ,  $1 \times 1$ 。利用神经网络模型确定的上述模型中待定参数如表 1 和表 2 所示。

根据上述方法, HY-2B 卫星雷达高度计可以实现全球海面风速的观测(图 4),在非降雨条件下, 20 m/s 风速以内的观测精度优于 2 m/s<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 海面阵风风速反演方法

为了研究海面风速和阵风之间的关系,本文选取了距离 HY-2B 卫星星下点观测距离最近的 2 个 ND-

表 1 Gourrion 模型参数

Table 1 Gourrion model parameters

参数	$a$	$b$
$\sigma^0$	-0.343 36	0.069 09
$SWH$	0.087 25	0.063 74
$U_{10}$	0.1	0.028 44

表 2 Gourrion 模型参数

Table 2 Gourrion model parameters

参数	矩阵元素	
$\overline{W}_x$	-33.950 62	-11.033 94
	-3.934 28	-0.058 34
$\overline{W}_y$	0.540 12	10.404 81
$\overline{B}_x$	18.063 78	-0.372 28
$\overline{B}_y$	-2.283 87	...
$P$	$a_{\sigma^0} + b_{\sigma^0} \sigma^0$	$a_{SWH} + b_{SWH} SWH$

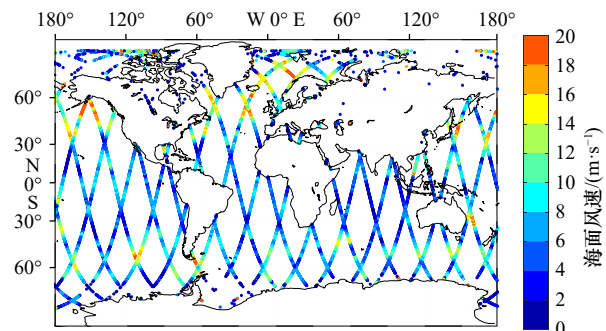


图 4 HY-2B 卫星雷达高度计观测海面风速示意图  
Fig. 4 Sea surface wind speed observed by HY-2B satellite radar altimeter

BC 浮标的观测数据,分别是 41044 和 51000 浮标;选取的浮标观测数据时段是 2019–2021 年。51000 和 41044 浮标分别位于美国东部太平洋和西部大西洋开阔海域,卫星数据不受陆地污染,利于数据的比对和分析。经过数据筛选,有 70 对数据点满足时间 1 h,空间距离 100 km 以内的数据匹配条件,相应的 HY-2B 卫星雷达高度计获取的海面风速( $W_0$ )与 NDBC 浮标的海面风速( $w_b$ )和阵风风速( $w_g$ )比对结果,如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 看出,  $W_0$  与  $w_b$  风速符合较好,每次观测的绝对偏差都在 2 m/s 以内,说明现有海面风速观测方法是可靠的。但是,  $W_0$  与  $w_g$  浮标阵风风速存在明显的偏差,最高达 4 m/s 左右,与浮标阵风风速出现不同程度的偏离。为此,需要在现有卫星观测海面

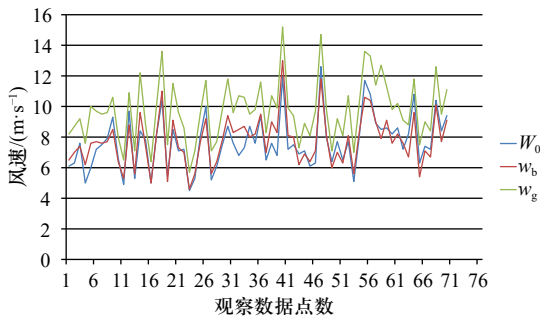


图 5 HY-2B 卫星的海面风速 ( $W_0$ ) 和 NDBC 浮标观测到的对应海面风速 ( $w_b$ ) 及阵风风速 ( $w_g$ )

Fig. 5 HY-2B satellite sea surface wind speed ( $W_0$ ) and the corresponding sea surface wind speed ( $w_b$ ) and wind gusts ( $w_g$ ) observed by NDBC buoy

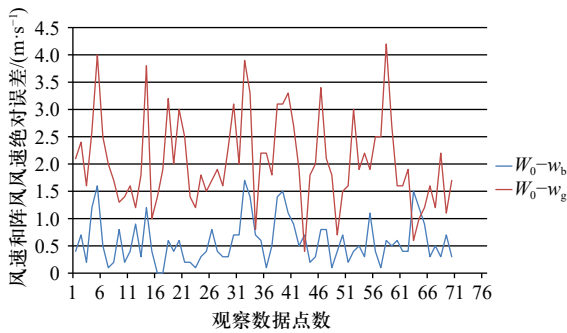


图 6 HY-2B 卫星的海面风速 ( $W_0$ ) 与 NDBC 浮标风速 ( $w_b$ ) 以及阵风风速 ( $w_g$ ) 之间的绝对误差

Fig. 6 Absolute error between HY-2B satellite wind speed ( $W_0$ ) and NDBC buoy wind speed ( $w_b$ ) and wind gusts ( $w_g$ )

风速的基础上, 进一步改进算法, 提升阵风观测能力。本文的思路是在 HY-2B 卫星雷达高度计海面风速观测的基础上, 纳入被动遥感观测的校正微波辐射计同步观测信息, 补偿雷达高度计对阵风风速的观测能力, 实现两个遥感载荷联合海面阵风观测。考虑到校正辐射计 18.7 GHz 通道亮度温度 ( $T_{18}$ ) 在海上的量程是 130~250 K; 雷达高度计观测后向散射系数 ( $\sigma^0$ ) 量程是 7~30 dB, 将  $T_{18}$  减小一个量级, 可达到与  $\sigma^0$  同等量级。同时, 考虑到  $T_{18}$  中包含着大气环境信息和海面粗糙度等信息, 它比雷达高度计获取的海面后向散射信息更为丰富。因此, 由  $T_{18}$  亮度温度中去除雷达高度计后向散射信息 (即,  $\frac{T_{18}}{10} - \sigma_{ku}^0$ ), 再对雷达高度计海面风速进行修正, 相应的海面阵风风速经验计算公式为

$$W = \begin{cases} T \times 2 + W_0, & T > 0.5, \\ T \times 2 + 1.5 + W_0, & 0 < T \leq 0.5, \end{cases} \quad (4)$$

$$T = \frac{T_{18}}{10} - \sigma_{ku}^0, \quad (5)$$

式中,  $W$  为阵风风速;  $\sigma_{ku}^0$  为高度计 Ku 波段后向散射系数;  $T_{18}$  为校正辐射计 18.7 GHz 通道亮温;  $W_0$  为雷达高度计观测海面风速。式(4)中的常数 1.5, 是对低风速条件下的补偿因子。在式(4)中,  $T > 0.5$  时, 对应  $W_0 > 7$  m/s 的风速;  $0 < T \leq 0.5$  时, 对应  $7$  m/s  $> W_0 > 5$  m/s 的风速。在  $T > 0.5$  时, 与图 5 所示的 NDBC 浮标数据的进行统计分析, 确定了系数取值为 2; 在  $0 < T \leq 0.5$  时, 将  $7$  m/s  $> W_0 > 5$  m/s 的风速数据与 NDBC 浮标风速进行统计分析, 存在平均 1.5 m/s 的偏差, 需对式(4)做相应的低风速补偿。在实际数据处理中, 考虑到雷达高度计在高风速和降雨条件下后向散射系数的观测更稳定, 在  $T > 0.5$  时, 将  $\sigma_{ku}^0$  替换成  $\sigma_c^0$  (C 波段后向散射系数) 进行数据处理。

这里以浮标 41044 在 2021 年 10 月 1 日和浮标 51000 在 2021 年 10 月 3 日的卫星观测为例, 在图 7 和图 8 中展示了卫星观测海面风速  $W_0$  和阵风风速  $W_G$  的变化。由图 7 和图 8 可以看出, 本文方法 (图中红线) 明显提升了 HY-2B 卫星海面风速 (图中蓝线) 观测的量值。

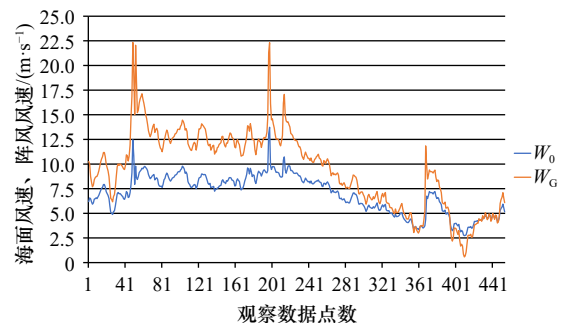


图 7 浮标 41044 附近的 HY-2B 卫星观测海面风速 ( $W_0$ ) 和阵风风速 ( $W_G$ )

Fig. 7 Wind speed ( $W_0$ ) and wind gust ( $W_G$ ) observed by HY-2B satellite near Buoy 41044

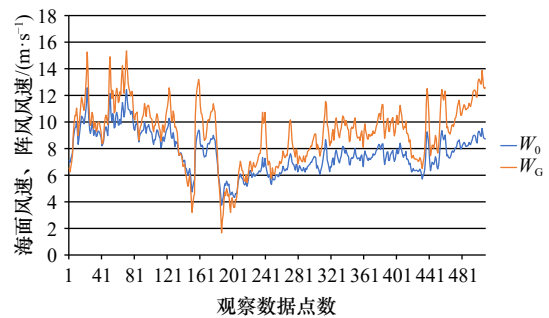


图 8 浮标 51000 附近的 HY-2B 卫星观测海面风速 ( $W_0$ ) 和阵风风速 ( $W_G$ )

Fig. 8 Wind speed ( $W_0$ ) and wind gust ( $W_G$ ) observed by HY-2B satellite near Buoy 51000

## 4 数据验证与讨论

### 4.1 HY-2B 卫星数据与浮标的比对和评价

为了对本文方法进行定量化评估,将 NDBC 浮标观测的海面风速和阵风风速纳入进行真实性检验。通过数据匹配共找到 70 对数据,具体的比对信息见图 9 至图 11 和表 3 至表 8。数据比对结果中除了 3 次阵风观测的绝对误差为 2.1 m/s,其他数据观测绝对误

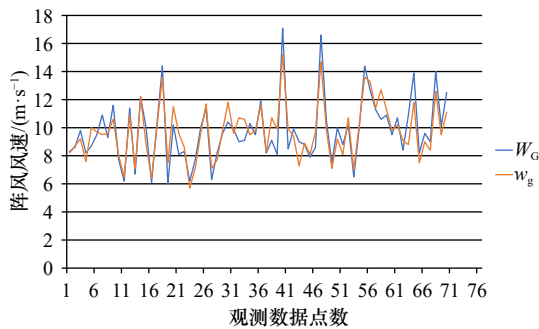


图 9 HY-2B 卫星获取的阵风风速 ( $W_G$ ) 与 NDBC 浮标观测到的阵风风速 ( $w_g$ )

Fig. 9 HY-2B satellite observed wind gust ( $W_G$ ) and wind gusts ( $w_g$ ) observed by NDBC buoy

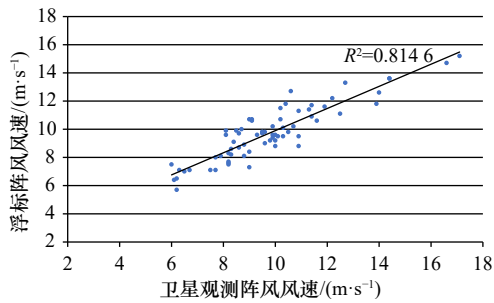


图 10 HY-2B 卫星与 2019–2021 年浮标阵风数据比对散点图

Fig. 10 Scatter diagram of comparison between HY-2B satellite wind gust and buoy wind gust from 2019 to 2021

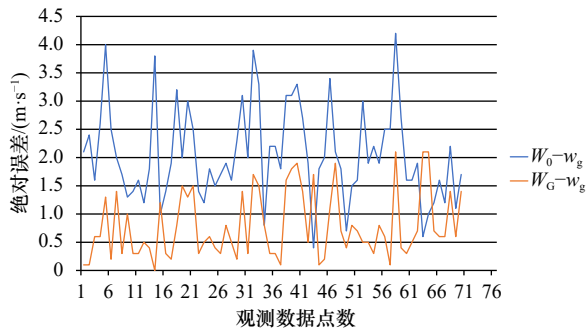


图 11 卫星的风速和阵风风速与浮标观测结果之间的绝对误差

Fig. 11 Absolute error between satellite wind speed and gust wind speed and buoy observations

表 3 HY-2B 卫星与 41044 浮标 2019 年数据比对结果

Table 3 Comparison results between HY-2B satellite and Buoy 41044 in 2019

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对误差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	观测点 距离/ km
1	4月4日	卫星	21:43	21.38°N, 59.15°W	8.3	0.1	60
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	8.2		
2	6月27日	卫星	21:43	21.38°N, 59.15°W	8.6	0.1	59
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	8.7		
3	7月25日	卫星	21:43	21.60°N, 59.21°W	9.8	0.6	60
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	9.2		
4	8月22日	卫星	21:43	21.3°N, 59.14°W	5.7	0.9	60
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	7.6		
5	9月19日	卫星	21:44	21.45°N, 59.18°W	8.7	1.3	59
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	10.0		
6	12月12日	卫星	21:44	21.49°N, 59.21°W	9.5	0.2	61
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	9.7		
7	12月26日	卫星	21:44	21.5°N, 59.21°W	10.9	1.4	61
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	9.5		

表 4 HY-2B 卫星与 41044 浮标 2020 年数据比对结果

Table 4 Comparison results between HY-2B satellite and Buoy 41044 in 2020

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对误差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	观测点 距离/ km
1	1月9日	卫星	21:44	21.42°N, 59.23°W	9.3	0.3	61
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	9.6		
2	2月6日	卫星	21:44	21.51°N, 59.21°W	11.6	1.0	61
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	10.6		
3	4月16日	卫星	21:44	21.62°N, 59.23°W	7.7	0.3	60
		41044	21:40	21.58°N, 58.63°W	8.0		
4	5月28日	卫星	21:45	21.56°N, 59.20°W	6.2	0.3	59
		41044	21:50	21.58°N, 58.63°W	6.5		
5	7月23日	卫星	21:45	21.62°N, 59.23°W	11.4	0.5	58
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	10.9		
6	9月3日	卫星	21:44	21.62°N, 59.23°W	6.7	0.4	58
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	7.1		
7	9月17日	卫星	21:44	21.45°N, 59.18°W	12.2	0	59
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	12.2		

续表 4

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风 风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对 误差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	观测点 距离/ km
8	10月1日	卫星	21:44	21.58°N, 59.22°W	10.0	1.2	61
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	8.8		
9	10月15日	卫星	21:44	21.62°N, 59.23°W	6.1	0.3	59
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	6.4		
10	11月12日	卫星	21:44	21.51°N, 59.19°W	10.3	0.2	58
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	10.1		
11	12月24日	卫星	21:44	21.62°N, 59.23°W	14.4	0.8	58
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	13.6		

表 5 HY-2B 卫星与 41044 浮标 2021 年数据比对结果

Table 5 Comparison results between HY-2B satellite and Buoy 41044 in 2021

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风 风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对 误差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	观测点 距离/ km
1	2月4日	卫星	21:46	21.56°N, 59.21°W	6.0	1.5	60
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	7.5		
2	2月18日	卫星	21:44	21.47°N, 59.19°W	10.2	1.3	59
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	11.5		
3	3月18日	卫星	21:44	21.47°N, 59.19°W	8.1	1.5	60
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	9.6		
4	5月13日	卫星	21:44	21.60°N, 59.21°W	8.3	0.3	60
		41044	21:40	21.59°N, 58.63°W	8.6		
5	6月24日	卫星	21:46	21.59°N, 59.21°W	6.2	0.5	60
		41044	21:50	21.59°N, 58.63°W	5.7		
6	6月10日	卫星	21:46	21.61°N, 59.21°W	7.7	0.6	60
		41044	21:50	21.59°N, 58.63°W	7.1		
7	7月8日	卫星	21:46	21.60°N, 59.21°W	10.0	0.4	60
		41044	21:50	21.59°N, 58.63°W	9.6		
8	8月19日	卫星	21:46	21.59°N, 59.21°W	11.4	0.3	61
		41044	21:50	21.59°N, 58.63°W	11.7		
9	9月2日	卫星	21:46	21.59°N, 59.21°W	6.3	0.8	60
		41044	21:50	21.59°N, 58.63°W	7.1		
10	9月16日	卫星	21:47	21.59°N, 59.21°W	8.2	0.5	58
		41044	21:50	21.59°N, 58.63°W	7.7		
11	12月9日	卫星	21:47	21.59°N, 59.21°W	9.6	0.2	60
		41044	21:50	21.59°N, 58.63°W	9.8		

表 6 HY-2B 卫星与 51000 浮标 2019 年数据比对结果

Table 6 Comparison results between HY-2B satellite and Buoy 51000 in 2019

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风 风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对 误差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	观测点 距离/ km
1	4月21日	卫星	16:31	23.54°N, 153.47°W	10.4	1.4	33
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	11.8		
2	6月2日	卫星	16:31	23.51°N, 153.48°W	9.9	0.4	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.6		
3	6月16日	卫星	16:31	23.50°N, 153.45°W	9.0	1.7	34
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	10.7		
4	6月30日	卫星	16:31	23.34°N, 153.53°W	9.1	1.5	34
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	10.6		
5	8月25日	卫星	16:31	23.53°N, 153.48°W	10.3	0.8	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.5		
6	9月8日	卫星	16:31	23.50°N, 153.49°W	9.5	0.3	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.8		
7	9月22日	卫星	16:31	23.52°N, 153.49°W	11.9	0.3	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	11.6		
8	11月3日	卫星	16:32	23.53°N, 153.49°W	8.2	0.1	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	8.3		
9	12月1日	卫星	16:31	23.55°N, 153.49°W	9.1	1.6	31
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	10.7		
10	12月15日	卫星	16:31	23.54°N, 153.49°W	8.1	1.8	31
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.9		
11	12月29日	卫星	16:31	23.53°N, 153.47°W	9.0	0.9	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.9		

表 7 HY-2B 卫星与 51000 浮标 2020 年数据比对结果

Table 7 Comparison results between HY-2B satellite and Buoy 51000 in 2020

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风 风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对 误差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	观测点 距离/ km
1	1月12日	卫星	16:31	23.57°N, 153.49°W	17.1	1.9	30
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	15.2		
2	2月23日	卫星	16:31	23.54°N, 153.49°W	8.5	1.4	31
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.9		
3	3月22日	卫星	16:31	23.53°N, 153.48°W	9.9	0.1	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.4		

续表 7

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风 风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	绝对 误差/ (m·s <sup>-1</sup> )	观测点 距离/ km
4	5月3日	卫星	16:31	23.45°N, 153.49°W	9.0	1.7	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	7.3		
5	5月17日	卫星	16:33	23.55°N, 153.47°W	8.8	0.1	33
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	8.9		
6	6月14日	卫星	16:33	23.54°N, 153.47°W	7.9	0.2	33
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	8.1		
7	7月12日	卫星	16:33	23.50°N, 153.48°W	8.6	1.1	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	9.7		
8	7月26日	卫星	16:33	23.50°N, 153.48°W	16.6	1.9	32
		51000	16:40	23.528°N, 153.792°W	14.7		
9	8月9日	卫星	16:31	23.55°N, 153.47°W	10.5	0.7	33
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	9.8		
10	8月23日	卫星	16:31	23.55°N, 153.48°W	7.5	0.4	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	7.1		
11	9月6日	卫星	16:31	23.51°N, 153.49°W	10.0	0.8	31
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	9.2		
12	9月20日	卫星	16:31	23.52°N, 153.49°W	8.8	0.7	31
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	8.1		
13	10月18日	卫星	16:31	23.55°N, 53.48°W	10.2	0.5	33
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	10.7		
14	11月15日	卫星	16:31	23.56°N, 153.47°W	6.5	0.5	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	7.0		
15	11月29日	卫星	16:31	23.52°N, 153.48°W	9.9	0.3	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	10.2		
16	12月27日	卫星	16:31	23.54°N, 153.47°W	14.4	0.8	33
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	13.6		

续表 8

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风 风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	绝对 误差/ (m·s <sup>-1</sup> )	观测点 距离/ km
3	3月7日	卫星	16:34	23.6°N, 153.47°W	10.6	2.1	34
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	12.7		
4	3月21日	卫星	16:31	23.55°N, 153.49°W	10.9	0.4	31
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	11.3		
5	5月2日	卫星	16:31	23.52°N, 153.48°W	9.5	0.3	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	9.8		
6	5月16日	卫星	16:31	23.50°N, 153.48°W	10.7	0.5	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	10.2		
7	7月11日	卫星	16:35	23.55°N, 153.47°W	8.4	0.7	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	9.1		
8	7月25日	卫星	16:35	23.51°N, 153.50°W	10.9	2.1	30
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	8.8		
9	8月22日	卫星	16:35	23.6°N, 153.5°W	13.9	2.1	36
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	11.8		
10	9月5日	卫星	16:35	23.55°N, 153.47°W	8.2	0.7	33
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	7.5		
11	9月19日	卫星	16:35	23.56°N, 153.44°W	9.6	0.6	36
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	9.0		
12	10月3日	卫星	16:35	23.56°N, 153.44°W	9.0	0.6	36
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	8.4		
13	11月28日	卫星	16:35	23.55°N, 153.47°W	14.0	1.4	33
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	12.6		
14	12月12日	卫星	16:31	23.53°N, 153.48°W	10.1	0.6	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	9.5		
15	12月26日	卫星	16:31	23.53°N, 153.48°W	12.5	1.4	32
		51000	16:50	23.528°N, 153.792°W	11.1		

表 8 HY-2B 卫星与 51000 浮标 2021 年数据比对结果

Table 8 Comparison results between HY-2B satellite and Buoy 51000 in 2021

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风 风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	绝对 误差/ (m·s <sup>-1</sup> )	观测点 距离/ km
1	1月24日	卫星	16:31	23.54°N, 153.47°W	12.7	0.6	32
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	13.3		
2	2月26日	卫星	16:31	23.53°N, 153.49°W	11.3	0.1	31
		51000	16:30	23.528°N, 153.792°W	11.4		

差均优于 2.0 m/s。按照式 (6) 计算的均方根误差 (RMSE) 为 0.98 m/s, 卫星和浮标数据的相关性 0.82。

$$RMSE(W_G, w_g) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [W_G(i) - w_g(i)]^2}, \quad (6)$$

式中,  $m$  为比对数据点数;  $w_g$  为浮标阵风风速;  $W_G$  为卫星观测阵风风速。

如图 11 所示, 卫星观测海面风速  $W_0$  与浮标阵风风速  $w_g$  绝对误差最大可达 4.2 m/s; 卫星观测阵风风速  $W_G$  与浮标阵风风速  $w_g$  绝对误差均在 2.1 m/s 以内, 绝

大部分观测优于 1.5 m/s。这表明文中方法具备可靠的阵风风速观测能力。

#### 4.2 本文方法在同类卫星中的适用性评价

本文为了进一步检验反演方法,并评估方法在同类卫星上的适用性。这里将本文方法应用到 Jason-3 卫星上,反演的阵风风速与 NDBC 的浮标 41047 进行

比对评估。浮标 41047 位于北大西洋北部的北美海盆开阔海域(图 3)。数据比对的时段为 2016–2018 年,表 9 和图 12 为数据的比对结果,在 33 个匹配数据点中,只有 1 个数据点绝对误差为 2.4 m/s,其他观测均达到或优于 2 m/s, RMSE 为 0.96 m/s, 相关系数为 0.88。数据比对验证表明:本文方法对于同类卫星也

表 9 Jason-3 卫星与 41047 浮标数据比对结果

Table 9 Comparison results between Jason-3 satellite and Buoy 41047

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风风速/(m·s <sup>-1</sup> )	绝对误差/(m·s <sup>-1</sup> )	观测点距离/km
1	2016年4月15日	卫星	11:11	27.22°N, 70.72°W	6.9	1.0	79
		41047	10:50	27.46°N, 71.47°W	7.9		
2	2016年4月25日	卫星	09:10	27.20°N, 70.71°W	10.5	1.5	80
		41047	08:50	27.46°N, 71.47°W	9.0		
3	2016年6月4日	卫星	01:04	27.24°N, 70.68°W	5.9	0.4	82
		41047	01:10	27.46°N, 71.47°W	5.5		
4	2016年6月23日	卫星	21:01	27.22°N, 70.70°W	5.4	0.1	81
		41047	21:00	27.46°N, 71.47°W	5.5		
5	2016年7月23日	卫星	14:57	27.22°N, 70.71°W	4.6	0	80
		41047	15:00	27.46°N, 71.47°W	4.6		
6	2016年9月1日	卫星	06:51	27.26°N, 71.69°W	7.9	1.1	80
		41047	07:00	27.46°N, 71.47°W	6.8		
7	2016年10月1日	卫星	00:46	27.20°N, 70.70°W	8.7	0.3	81
		41047	00:50	27.46°N, 71.47°W	9.0		
8	2016年10月10日	卫星	22:45	27.21°N, 70.71°W	15.2	0.2	80
		41047	22:50	27.46°N, 71.47°W	15.0		
9	2016年10月20日	卫星	20:43	27.21°N, 70.71°W	12.8	0.6	80
		41047	20:50	27.46°N, 71.47°W	12.2		
10	2016年10月30日	卫星	18:42	27.22°N, 70.71°W	8.7	1.1	80
		41047	18:50	27.46°N, 71.47°W	9.8		
11	2016年11月29日	卫星	12:38	27.24°N, 70.69°W	9.6	0.4	81
		41047	12:50	27.46°N, 71.47°W	9.2		
12	2016年12月19日	卫星	08:35	27.21°N, 70.70°W	8.7	0.5	81
		41047	08:40	27.46°N, 71.47°W	9.2		
13	2017年4月7日	卫星	10:18	27.21°N, 70.70°W	10.9	0.1	81
		41047	10:20	27.46°N, 71.47°W	10.8		
14	2017年5月17日	卫星	04:14	27.22°N, 70.70°W	6.6	1.5	81
		41047	04:20	27.46°N, 71.47°W	5.1		
15	2017年10月2日	卫星	21:52	27.21°N, 70.71°W	12.4	0.7	80
		41047	22:00	27.46°N, 71.47°W	13.1		

续表 9

序号	日期	观测源	时间	观测位置	阵风风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	绝对误差/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	观测点距离/km
16	2017年10月22日	卫星	17:49	27.21°N, 70.71°W	10.7	0.7	80
		41047	17:50	27.46°N, 71.47°W	10.0		
17	2017年11月1日	卫星	15:47	27.21°N, 70.71°W	9.5	0.6	80
		41047	15:50	27.46°N, 71.47°W	10.1		
18	2017年11月11日	卫星	13:46	27.24°N, 70.69°W	10.1	1.3	81
		41047	13:50	27.46°N, 71.47°W	11.4		
19	2017年11月21日	卫星	11:45	27.23°N, 70.70°W	13.5	0.9	80
		41047	11:50	27.46°N, 71.47°W	14.4		
20	2017年12月1日	卫星	09:43	27.23°N, 70.70°W	9.2	1.2	80
		41047	09:50	27.46°N, 71.47°W	8.0		
21	2017年12月11日	卫星	07:42	27.22°N, 70.70°W	12.6	2.4	81
		41047	07:40	27.46°N, 71.47°W	10.2		
22	2018年1月10日	卫星	01:37	27.28°N, 70.67°W	13.5	1.7	81
		41047	01:50	27.46°N, 71.47°W	11.8		
23	2018年2月28日	卫星	15:30	27.21°N, 70.71°W	11.0	2.0	80
		41047	15:40	27.46°N, 71.47°W	13.0		
24	2018年3月20日	卫星	11:27	27.22°N, 70.70°W	8.3	0.1	81
		41047	11:30	27.46°N, 71.47°W	8.4		
25	2018年4月29日	卫星	03:21	27.21°N, 70.70°W	8.4	0.2	81
		41047	03:30	27.46°N, 71.47°W	8.2		
26	2018年5月9日	卫星	01:19	27.23°N, 70.69°W	10.5	1.5	81
		41047	01:20	27.46°N, 71.47°W	9.3		
27	2018年5月18日	卫星	23:18	27.24°N, 70.69°W	10.5	0.2	81
		41047	23:30	27.46°N, 71.47°W	10.3		
28	2018年5月28日	卫星	21:17	27.22°N, 70.70°W	8.9	0.4	81
		41047	21:20	27.46°N, 71.47°W	8.5		
29	2018年7月17日	卫星	11:09	27.22°N, 70.70°W	6.7	0.1	81
		41047	11:20	27.46°N, 71.47°W	6.8		
30	2018年7月27日	卫星	09:08	27.27°N, 70.68°W	5.8	0.3	81
		41047	09:20	27.46°N, 71.47°W	5.5		
31	2018年11月13日	卫星	10:51	27.21°N, 70.71°W	10.0	0.2	80
		41047	11:00	27.46°N, 71.47°W	9.8		
32	2018年11月23日	卫星	08:50	27.28°N, 70.67°W	12.2	0.7	80
		41047	09:00	27.46°N, 71.47°W	12.9		
33	2018年12月3日	卫星	06:48	27.27°N, 70.68°W	6.8	1.2	81
		41047	06:50	27.46°N, 71.47°W	5.6		

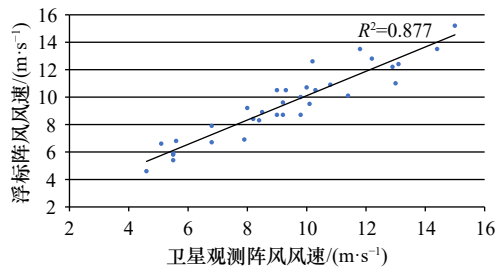


图 12 2016–2018 年 Jason-3 卫星与浮标阵风的对比散点图

Fig. 12 Scatter diagram of comparison between Jason-3 satellite and buoy wind gust from 2016 to 2018

适用, 也具备高精度的观测能力。

## 5 结论

海上阵风是对海上工程和海上安全必不可少的海洋环境信息, 但缺乏相关的有效观测手段。本文针对海上阵风遥感观测开展研究, 提出利用 HY-2B 卫星雷达高度计观测的后向散射系数, 结合同步校正微波辐射计观测的亮度温度信息联合反演阵风风速的方法。该方法是在卫星现有海面风速观测基础上, 利

用同步观测的校正辐射计提供的 18.7 GHz 通道的亮度温度信息, 来对雷达高度计对海面风速的观测进行补偿, 进而具备阵风的观测能力。为了量化评估文中方法的可靠性, 采用两个遥感载荷联合反演得到的阵风风速与 2019–2021 年 NDBC 浮标数据进行真实性检验, 结果显示: 阵风风速 RMSE 为 0.98 m/s, 相关系数为 0.82。为了检验文中方法在同类卫星上的适用性, 基于本方法利用国外同类卫星 Jason-3 得到的阵风风速与 2016–2018 年 NDBC 浮标数据的 RMSE 为 0.96 m/s, 相关系数为 0.88。通过数据比对和分析, 采用雷达高度计和校正辐射计联合观测海上阵风风速是可行的, 并具备较高的观测精度。同时, 该方法对于具有相同观测体制的国内外卫星也适用。本文的研究可为海上阵风卫星遥感观测提供一种简单易行且可靠的技术手段。

**致谢:** 感谢 NDBC 网站提供的浮标阵风数据 (<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] 张云彩, 姚美旺, 王敏声, 等. 阵风及其谱模拟[J]. *海洋工程*, 1996, 14(2): 20–27.  
Zhang Yuncai, Yao Meiwang, Wang Minsheng, et al. Gust simulation[J]. *The Ocean Engineering*, 1996, 14(2): 20–27.
- [2] 周福, 蒋璐璐, 涂小萍, 等. 浙江省几种灾害性大风近地面阵风系数特征[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 119–128.  
Zhou Fu, Jiang Lulu, Tu Xiaoping, et al. Near-surface gust factor characteristics in several disastrous winds over Zhejiang Province[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(1): 119–128.
- [3] 胡波, 杜惠良, 俞燎亮, 等. 一种经验相似方法在沿海海岛阵风预报中的应用[J]. *海洋预报*, 2014, 31(3): 37–44.  
Hu Bo, Du Huiliang, Yu Liaoni, et al. Application of an empirical similar statistic downscaling method in extreme wind forecast[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(3): 37–44.
- [4] 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.
- [5] Giglio D, Gille S T, Subramanian A C, et al. The role of wind gusts in upper ocean diurnal variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(9): 7751–7764.
- [6] 万夫敬, 孙继松, 孙敏, 等. 山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J]. *气象学报*, 2021, 79(5): 717–731.  
Wan Fujing, Sun Jisong, Sun Min, et al. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(5): 717–731.
- [7] 林明森, 张有广. 我国海洋动力环境卫星应用现状及发展展望[J]. *卫星应用*, 2018(5): 19–23.  
Lin Mingsen, Zhang Youguang. Application and development of Chinese ocean dynamic environment satellites[J]. *Satellite Application*, 2018(5): 19–23.
- [8] Brown G, Stanley H, Roy N. The wind-speed measurement capability of spaceborne radar altimeters[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1981, 6(2): 59–63.
- [9] Chelton D B, McCabe P J. A review of satellite altimeter measurement of sea surface wind speed: With a proposed new algorithm[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C3): 4707–4720.
- [10] Chelton D B, Wentz F J. Further development of an improved altimeter wind speed algorithm[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, 91(C12): 14250–14260.
- [11] Witter D L, Chelton D B. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1991, 96(C5): 8853–8860.
- [12] Lefevre J M, Barckicke J, Ménard Y. A significant wave height dependent function for TOPEX/POSEIDON wind speed retrieval[J].

- [Journal of Geophysical Research: Oceans](#), 1994, 99(C12): 25035–25049.
- [13] Gourrion J, Vandemark D, Bailey S, et al. A two-parameter wind speed algorithm for Ku-band altimeters[J]. [Journal of Atmospheric and Oceanic Technology](#), 2002, 19(12): 2030–2048.
- [14] 蒋兴伟. 海洋动力环境卫星基础理论与工程应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.  
Jiang Xingwei. The Based Theory and Engineering Application about Ocean Dynamic Environment Satellite[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014.
- [15] Dumont J P, Rosmorduc V, Carrere L, et al. Jason-3 products handbook[R]. Paris: CNES, 2016.
- [16] 王振占, 张德海, 赵谨, 等. HY-2A卫星大气校正微波辐射计在轨数据定标和检验研究[J]. [中国工程科学](#), 2013, 15(7): 44–52, 61.  
Wang Zhenzhan, Zhang Dehai, Zhao Jin, et al. In-orbit calibration and validation of atmospheric correction microwave radiometer on HY-2A satellite[J]. [Engineering Science](#), 2013, 15(7): 44–52, 61.
- [17] 海洋二号B卫星在轨测试报告[R]. 北京: 国家卫星海洋应用中心, 2019: 66–68.  
Haiyang-2B satellite in-orbit test report[R]. Beijing: National Satellite Ocean Application Service, 2019: 66–68.

## An inversion method for joint observation of wind gusts by HY-2B satellite remote sensors

Zhang Youguang<sup>1,2</sup>, Jiang Chengfei<sup>2</sup>, Jia Yongjun<sup>1,2</sup>, Ma Xiaofeng<sup>1,2</sup>

(1. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511485, China*; 2. *National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** There are few researches on offshore gusts at home and abroad, and most of them focus on gust prediction and application research. There is no systematic discussion on the acquisition technology of wind gust data. Based on the backscattering coefficient observed by HY-2B satellite radar altimeter and the brightness temperature information observed by correction microwave radiometer, a method for retrieving gust wind speed is proposed in this paper. The gust wind speed obtained from the joint inversion of the two remote sensing sensors is verified with the National Data Buoy Center (NDBC) buoy data from 2019 to 2021. The results show that the gust wind speed root mean square error (RMSE) is 0.98 m/s and the correlation coefficient is 0.82. The RMSE of the gust wind speed obtained based on the method using a similar satellite Jason-3 is 0.96 m/s and the correlation coefficient is 0.88. Based on the observation of sea surface wind speed with HY-2B satellite radar altimeter and the synchronous observation information of correction microwave radiometer by satellite platform, the observation of sea surface wind gust is realized jointly. The comparison results of data show that the method in this paper has high observation accuracy. At the same time, this method is also applicable to domestic and foreign satellites with the same observation system. This provides a simple and reliable means of ocean remote sensing technology for the current situation of insufficient observation capacity of offshore wind gust.

**Key words:** HY-2B satellite; radar altimeter; correction microwave radiometer; wind gust; inversion method