

HY-2 卫星雷达高度计风速反演验证

贾永君,张有广,林明森

(国家卫星海洋应用中心,北京 100081)

[摘要] 本文给出了海洋二号(HY-2)卫星雷达高度计风速反演的双参数算法模型,并利用 Jason-1 产品和 HY-2 卫星微波散射计产品定性验证了双参数算法模型的正确性,同时利用星星交叉比对方法、美国国家浮标数据中心(National Data Buoy Center, NDBC)浮标数据验证方法、美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析数据验证方法三种不同方法对该模型进行定量化验证,结果表明 HY-2 卫星雷达高度计风速反演的双参数算法模型的反演精度达到 2.0 m/s 的精度,满足海洋业务应用和科学研究的精度要求,可为用户提供满足观测要求的海面风产品。

[关键词] 风速反演;双参数模型;雷达高度计;HY-2

[中图分类号] TP722 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)06-0054-06

1 前言

作为海洋表面最大的一种动量来源,风对于海洋中从波动到流动的各种运动过程都有直接或间接的影响。风对于海气间的热量、物质和水汽交换具有重要的调节作用。这种调节过程能够平衡大气和海洋之间的相互作用,从而建立并维持全球和区域天气系统。全球风场资料在海洋学研究和实际应用(如渔业捕捞、航海运输和海洋工程)方面都具有重要应用价值。

传统上,风场资料是根据浮标和船只测量获取。利用这种方法获得的资料,只能反映局地的风场特征。随着科技的不断进步,卫星可以提供各种天气条件下,全球范围内高分辨率的风速资料。卫星雷达高度计是一种星下指向的主动式雷达,垂直向下发射脉冲信号,经地球表面(海、陆、冰等)反射后回到接收天线。通过分析返回脉冲的波形和强

度,可以获取海面风速的信息。如何能根据卫星雷达高度计测得的波形数据,更准确地反演海面风速成为一个重要的研究课题。

卫星雷达高度计是一种星下指向的主动式雷达,虽然仅给海面风速标量,但在实际应用中具有特殊意义。因为高度计可提供同步的风浪数据,为风浪研究和监测提供准确的测量数据。另外,高度计星下点测量风速的空间分辨率高于散射计,利用高度计数据对风速的估计,在风速为 0~10 m/s 时,误差低于 1 m/s。

迄今为止研究学者已提出约 20 种高度计风速反演算法,其中比较著名的包括文献[1~5]中提出的仅依赖于 Ku 波段后向散射系数单参数经验算法。其中 Witter 和 Chelton 在 1991 年提出的经验算法已经发展成为 ERS-1、ERS-2 和 TOPEX/Poseidon (T/P) 高度计的业务化风速反演算法^[5]。此外,1994 年, Lefevre 等提出了双参数(风速的反演除了依赖 Ku

[收稿日期] 2014-04-10

[基金项目] 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助(SS2013AA091206);国家国际科技合作专项(2011DFA22260)

[作者简介] 贾永君,1980 年出生,男,内蒙古清水河县人,博士,副研究员,主要从事卫星雷达高度计数据处理及卫星海洋应用工作;

E-mail:jiayongjun@mail.nsoas.gov.cn

波段雷达后向散射截面外,还依赖于高度计测量的有效波高)经验算法,这种双参数算法在风速反演精度上较单参数算法有一定程度的改善^[6]。Gourrion等通过对T/P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(即将后向散射截面和有效波高都作为输入的参数)^[7]。

2 海洋二号(HY-2)卫星雷达高度计风速反演算法

海面在风的作用下能够产生厘米尺度的波浪,从而引起海面粗糙度的变化。HY-2卫星雷达高度计对于大于或等于其工作波长(一般为2 cm左右)的海面粗糙度变化有敏感响应。

雷达信号散射理论表明,雷达后向散射截面 σ_0 与表征海面粗糙度的海面均方斜率之间存在下列关系:

$$\sigma_0(\theta) = \frac{\alpha |R(0)|^2}{s^2} \sec^4(\theta) \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{s^2}\right) \quad (1)$$

式(1)中, $|R(0)|^2$ 为Fresnel反射系数; θ 为入射角; α 为比例系数; s^2 为均方斜率。而另一方面海面风速与海面粗糙度密切相关,20世纪50年代,Cox和Munk^[8]将机载照相机拍到的海表面粗糙度和地面风速建立关系,得出了海面均方斜率与海上风速之间的经验关系

$$s^2 = 0.005 12U_{12.5} + 0.003 \quad (2)$$

式(2)中, $U_{12.5}$ 代表12.5 m高风速。

HY-2卫星雷达高度计雷达入射角为0,这种情况下合并式(1)和式(2),得

$$\sigma_0(\theta) = \frac{\alpha |R(0)|^2}{0.005 12U_{12.5} + 0.003} \quad (3)$$

卫星雷达高度计测量的标准化雷达后向散射截面和海表面风速之间存在着一种近似非线性反比关系。风速增加,海面粗糙度随之增加,使得雷达脉冲冲向其他方向散射的能量增加,从而导致高度计接收到的后向散射截面 σ_0 下降。后向散射截面 σ_0 与海表面风速之间的数学关系称为“反演算法”。高度计测量的数据必须通过反演算法才能转换成海表面风速。

随着高度计风速反演算法研究的进一步发展,人们普遍认为在发展风速反演函数时应该引入海洋中波浪的成长状态,方法是在风速反演函数中引

入有效波高。HY-2卫星雷达高度计风速反演算法利用Gourrion等提出的双参数模型,即

$$U_{10} = \frac{Y - a_{U_{10}}}{b_{U_{10}}} \quad (4)$$

$$Y = \left[1 + \exp^{-\left(\overline{W}_y \overline{X} + \overline{B}_y\right)} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\overline{X} = \left[1 + \exp\left(-\left(\overline{W}_x \overline{P}^T + \overline{B}_x\right)\right) \right]^{-1} \quad (6)$$

式(4)~式(6)中, U_{10} 为距离海面10 m处的风速; P 为有效波高SWH与 σ_0 归一化后的矩阵,维度为 1×2 ; $a_{U_{10}}, b_{U_{10}}$ 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 $2 \times 2, 2 \times 1, 1 \times 2, 1 \times 1$ 。该算法既考虑了海面风速同后向散射截面之间的近似反比关系,同时引入了有效波高对风速的影响。利用神经网络模型确定的上述模型中的待定参数如表1和表2所示。

表1 Gourrion模型参数表1

Table 1 Gourrion model parameters 1

参数	a	b
σ_0	-0.343 36	0.069 09
SWH	0.087 25	0.063 74
U_{10}	0.1	0.028 44

表2 Gourrion模型参数表2

Table 2 Gourrion model parameters 2

参数	矩阵元素	
\overline{W}_x	-33.950 62	-11.033 94
\overline{W}_y	-3.934 28	-0.058 34
\overline{B}_x	0.540 12	10.404 81
B_y	18.063 78	-0.372 28
\overline{P}	-2.283 87	—
	$a_{\sigma_0} + b_{\sigma_0} \sigma_0$	$a_{SWH} + b_{SWH} SWH$

根据HY-2卫星雷达高度计AGC(自动增益控制)和 σ_0 得到Ku波段线性关系为: $\sigma_0 = (AGC - 28.15)$ 。

3 HY-2卫星雷达高度计风速反演算法验证

3.1 利用Jason-1产品直接验证

Jason系列卫星无疑是当今世界上测量精度最高的卫星雷达高度计的典范。基于Jason-1卫星雷达高度计2级产品中的 σ_0 和有效波高,利用Gourri-

on模型计算对应的风速。随机选取一轨数据进行算法验证,验证结果如图1和图2所示。图1红色曲线为利用Gourrion算法模型计算得到的风速,蓝色为Jason-1产品中给出的风速,可以看到二者几乎是相同的。图2是对应的散点图,图中蓝色直线为对角线,红色点为产品结果与利用Gourrion算法模型计算结果对比。从图2也可以得出二者是一致的。

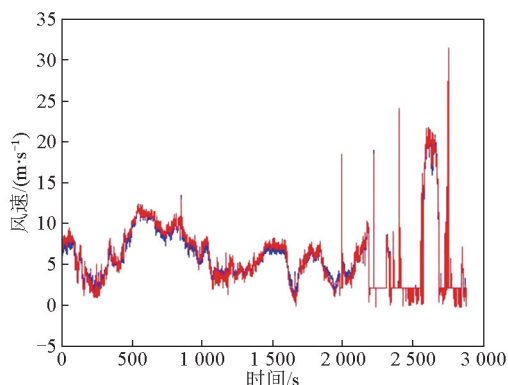


图1 风速反演效果图(蓝线为Jason-1自带产品风速,红线为反演风速)

Fig. 1 Effect figure of windspeed retrieval (the blue line is the wind speed from Jason-1 product and the red one is from retrieval)

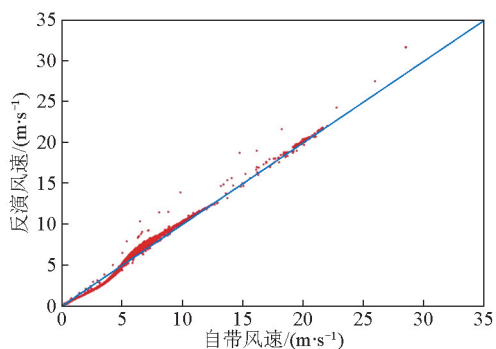


图2 风速反演结果比较散点图

Fig. 2 Scatter diagram for the comparison of wind speed retrieval results

3.2 利用HY-2卫星散射计数据验证

HY-2卫星搭载有雷达高度计、微波散射计等载荷。从探测原理上比较,雷达高度计和微波散射计较为接近,都是通过后向散射系数计算得到的。从探测范围比较,雷达高度计和微波散射计适合探测中等风速(2~24 m/s)。虽然HY-2微波散射计数据尚未经过现场标定,但其探测精度已经被证实达到

< 2 m/s,所以可以利用HY-2卫星微波散射计星下点风速来验证卫星雷达高度计风速反演算法模型的正确性。

选取2012年10月4日西北太平洋海域海面风场进行探测比较。选取该时空范围作为研究范围的原因是该时间内该海域有台风——马力斯影响,所以风速范围比较大,图3给出了马力斯台风影响下的雷达高度计和微波散射计风速反演结果比较,二者吻合的较好。可惜的是由于HY-2卫星微波散射计星下点分辨率太粗,二者不能一一对应进行量化比较。

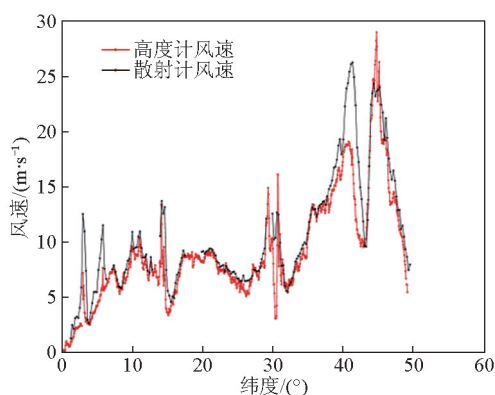


图3 相同时间相同经度雷达高度计和微波散射计探测风速对比

Fig. 3 Comparison of the wind speed between altimeter and scattometer at the same time and the same longitude

3.3 星星比对方法验证

验证时使用的HY-2卫星雷达高度计数据,时间范围为2011年10月20日00:13—2011年11月13日23:58,连续25天观测数据;使用的Jason-1卫星雷达高度计数据,Cycle 361 Pass 004-Cycle 363 Pass 136 IGDR数据,与HY-2高度计数据时间覆盖范围相同;Jason-2卫星雷达高度计数据,Cycle 121 Pass 131-Cycle 124 Pass 010 IGDR数据,与HY-2高度计数据时间覆盖范围相同。取交叉点(见图4)前后共100 km连续观测点的值(交叉点前后各50 km),以该空间范围内沿迹连续观测值(1 s观测值)中有效观测值的平均值作为交叉对比点的值。

图5和图6给出了HY-2卫星雷达高度计与Jason-1/2高度计海面风速比较,结果表明HY-2高度计海面风速与Jason-1和Jason-2星星交叉比较的均方根误差分别为0.84 m/s和0.78 m/s。

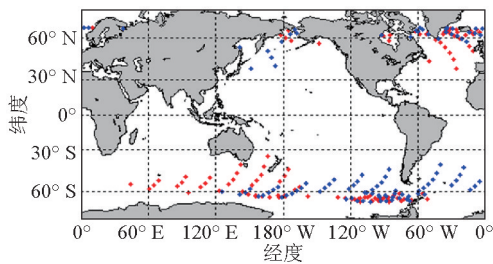


图4 HY-2卫星高度计与 Jason-1/2 高度计地面轨迹交叉对比点分布图

Fig. 4 The distribution of crossover points between HY-2 and Jason-1/2 on the ground track

注:时间窗口 1 h, 红色实点为 HY-2 与 Jason-1 地面轨迹交叉点, 蓝色实点为 HY-2 与 Jason-2 地面轨迹交叉点

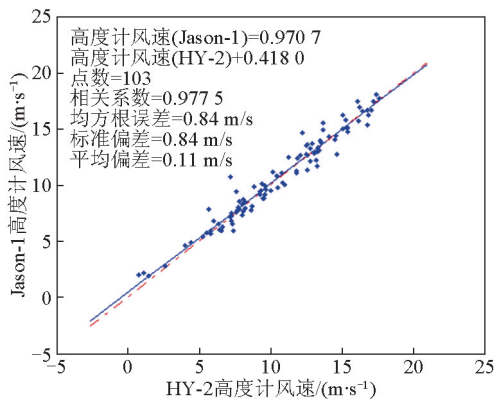


图5 HY-2与 Jason-1 雷达高度计海面风速比较
Fig. 5 Comparison of wind speed between HY-2 and Jason-1

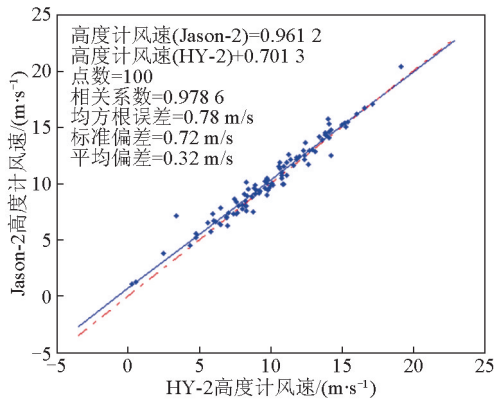


图6 HY-2与 Jason-2 雷达高度计海面风速比较
Fig. 6 Comparison of wind speed between HY-2 and Jason-2

3.4 利用 NDBC 浮标数据验证

NDBC 测量数据的时间范围与 HY-2 卫星雷达

高度计测量数据的时间范围相同。NDBC 数据包括 cwind 浮标风速数据和 c-man 观测站观测数据, 其数据格式为每 10 min 提供一个风速数据, 每个风速数据为 8 min 浮标观测的平均值和 2 min 观测站观测值的平均。

搜索高度计地面轨迹离浮标距离最近的点, 当该最小距离小于 50 km 时, 将该最近点作为高度计对比点位置; 取卫星过境对比点的时间前后共 1 h 内海面风速作为现场测量值, 取卫星对比点 50 km 空间范围内有效观测值的平均值作为对比点, 取到的对比点如图 7 所示。

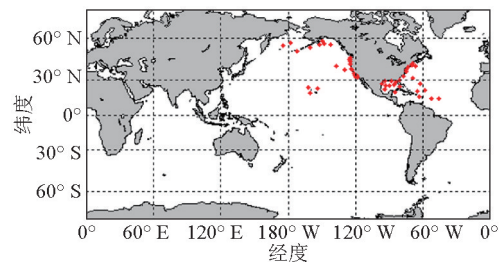


图7 HY-2卫星雷达高度计配对的 NDBC 浮标位置分布
Fig. 7 Distribution of the NDBC buoys matched to the HY-2 radar altimeter observed

图 8 给出了 HY-2 高度计海面风速大小与 NDBC 浮标现场测量值比较情况, 结果显示 HY-2 高度计海面风速大小与 NDBC 浮标现场测量值比较的均方根误差 RMS 为 1.98 m/s。

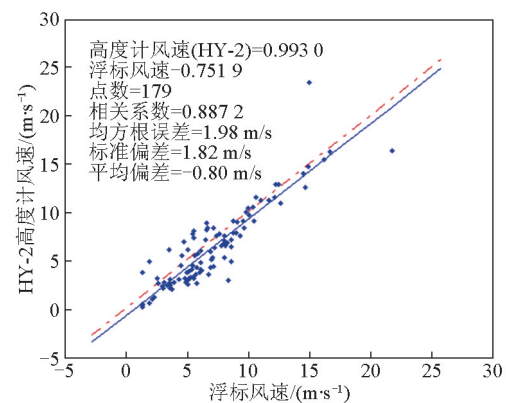


图8 HY-2卫星雷达高度计海面风速大小与 NDBC 浮标海面风速大小比较图
Fig. 8 Comparison of wind speed between HY-2 and NDBC buoys

3.5 利用NCEP数据验证

选取 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格的NCEP 10 m高再分析数据。取卫星过境时间与NCEP数据时间1 h内的风速有效观测值的平均观测值作为待检验值。对于HY-2高度计反演得到的风速,交叉点前后连续观测点的有效观测值的标准偏差 ≤ 2.0 m/s,保留作为对比数据源,图9为本研究所选取的对比点分布。

图10给出了HY-2卫星雷达高度计测量得到的海面风速与NCEP计算得到的海面风速比较情况,可以看到HY-2高度计海面风速大小与NCEP再分析海面风场大小比较的均方根误差RMS为1.82 m/s。

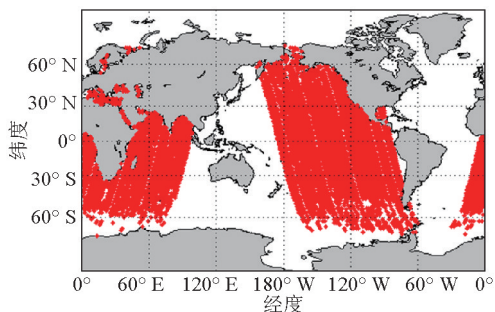


图9 HY-2卫星雷达高度计海面风速与NCEP风速对比点分布

(2011年10月20日-2011年11月13日)

Fig. 9 Distribution of NCEP wind speed matched to the HY-2 radar altimeter observed (October 20, 2011– November 13, 2011)

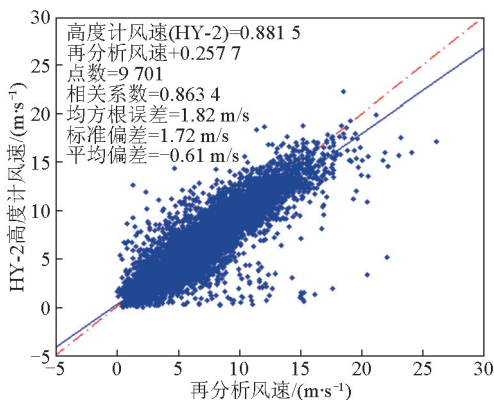


图10 HY-2卫星雷达高度计与NCEP再分析海面风速比较

Fig. 10 Comparison of wind speed between HY-2 and NCEP

4 结语

利用5种不同方法对HY-2卫星雷达高度计风速反演算法进行验证,结果表明HY-2卫星雷达高度计业务化产品中使用的双参数模型风速反演算法可以满足2 m/s的测量精度。

储小青2011年证明了波斜率也是影响风速的一个重要参数^[9]。在后续研究中,应考虑波斜率的影响。同时, HY-2卫星雷达高度计风速反演算法使用的双参数模型中,后向散射系数的权重很大,所以是影响风速反演精度主要的参数。如何更精确标定HY-2卫星雷达高度计后向散射系数是风速反演精度的关键之一。

参考文献

- [1] Brown G S, Stanley H R, Roy N A. The wind speed measurement capacity of space borne radar altimeter[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1981, 6, 59–63.
- [2] 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, 1985, 90, 4707–4720.
- [3] Goldhirsh R E, Dobson E B. A recommended algorithm for the determination of ocean surface wind speed using a satellite borne radar altimeter[R]. JHU/APLS1R85U-005, Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Laurel, 1985.
- [4] Chelton D B, Wentz F J. Further development of an improved altimeter wind speed algorithm[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91, 14250–14260.
- [5] Witter D L, Chelton D B. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96, 8853–8860.
- [6] Lefevre J M, Barckicke J. A significant wave height dependent function for TOPEX/Poseidon wind speed retrieval[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99, 25035–25049.
- [7] 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, 2030–2048.
- [8] Cox C S, Munk W H. Statistics of the sea surface derived from sun glitter [J]. J M R, 1954, 13: 198–227.
- [9] 储小青. 海浪波谱仪海浪遥感方法及应用基础研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2011.

Verification of HY-2 satellite radar altimeter wind retrieval

Jia Yongjun, Zhang Youguang, Lin Mingsen

(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

[Abstract] In this study, the two-parameter algorithm is used to get the wind speed from HY-2 satellite radar altimeter. The correctness of this algorithm is verified using the Jason-1 and HY-2 scatterometer data qualitatively. Three different methods, such as cross-over method, NDBC buoys data validation and NCEP data test method are used respectively to evaluate this algorithm. It is turned out that the two-parameter retrieval algorithm of the wind speed from radar altimeter is considered to be accurate to 2.0 m/s. It meet the accuracy requirements of marine scientific research and applications. And HY-2 radar altimeter can provide users the observed surface wind products.

[Key words] wind speed retrieval; two-parameter algorithm; radar altimeter; HY-2