

HY-2 卫星微波散射计反演风矢量产品真实性检验方法研究

穆博, 林明森, 彭海龙, 宋清涛, 周武

(国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

[摘要] 海洋二号(HY-2)卫星微波散射计主要用于测量海表面的风速和风向, 为了确保地面应用系统业务化处理软件生产产品的质量, 必须对其生产产品进行真实性检验, 为数据产品的定量化应用提供依据。本文基于NCEP分析资料数据, 对HY-2卫星微波散射计反演风矢量产品进行了真实性检验, 检验结果表明: 采用NCEP分析数据, 除了可以给出HY-2卫星微波散射计反演风矢量产品的整体精度评价之外, 还可以用于快速分析与圆锥扫描笔形波束体制相关及测量机理的精度特性分析, 辅助分析识别仪器在轨测量性能的短期异常。

[关键词] 微波散射计; 反演风矢量; 真实性检验

[中图分类号] TP732.1; P714.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)06-0039-07

1 前言

海面风场数据对于海气相互作用和海洋动力学等研究是非常重要的。基于船舶和浮标的常规海面风场测量方式往往都是空间上零星分布的, 且在全球海洋的观测分布点非常少。目前, 星载微波散射计是可以有效测量海面风速和风向的一种卫星传感器, 它能够全天候地获得覆盖全球的、高分辨率的、高频次的和长周期的海面风场观测资料, 已经广泛应用于海洋预报和相关科研应用领域。

星载微波散射计是间接测量海面风矢量的。它直接测量的是海表面的雷达后向散射能量, 依据雷达方程获得海表面的后向散射系数; 然后通过对海面同一面元进行多方位向的后向散射系数测量, 结合地球物理模式函数反演出海表面的风速和风

向。一般0.2 dB的定标偏差会导致风速的反演误差大约是0.25 m/s^[1]。为了获得散射计反演风矢量产品精度, 保障风矢量产品的定量化应用, 必须对其产品质量进行真实性检验。

我国于2011年8月发射了首颗海洋动力环境卫星——HY-2卫星, 其上搭载了国内首颗星载微波散射计。本文采用National Centers for Environmental Prediction(NCEP)的一种最终分析资料数据, 实现了HY-2卫星微波散射计反演风矢量产品的真实性检验, 获得了反演产品的整体精度评价, 该方法可以快速有效地给出与星载微波散射计波束体制及测量机理相关的精度特性评价, 完成HY-2卫星散射计反演风矢量产品精度的全面评价, 辅助进行仪器在轨测量性能的异常识别。

[收稿日期] 2014-04-11

[基金项目] 自然科学基金项目(41276019); 公益项目(201305032); 航天关键技术预先研究项目“中法海洋卫星算法研究与应用预研”; 国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA09A505); HY-2卫星激光观测精密定轨技术(201105032)

[作者简介] 穆博, 1985年出生, 男, 陕西西安市人, 助理研究员, 主要从事海洋微波遥感器辐射定标及真实性检验工作;

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

2 数据简介

2.1 HY-2卫星数据

本文中采用的HY-2卫星微波散射计风矢量数据采用的是国家卫星海洋应用中心公开分发的L2B级产品数据,该风矢量产品经由NSCAT-2模式函数反演得到,数据空间分辨率约为25 km。同时,为了消除降雨条件观测数据对检验结果的影响,基于搭载于HY-2卫星上的扫描微波辐射计观测大气产品数据,实现散射计在降雨条件下观测数据的剔除。微波散射计和扫描微波辐射计的数据时间范围都为2012年1月。

2.2 海面风场数据

海面风场数据采用NCEP的FNL(Final)全球分析资料数据,FNL分析资料由NCEP的全球资料同化系统(GDAS)生产,每天在世界时0时、6时、12时和18时分别生产一次数据;每个时刻生产数据采用经纬网格划分,水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (全球共 361×181 个格点)。

由于FNL资料的海表面风速是海面高度10 m处的真风速,而微波散射计反演的风速产品是假定中性大气层结条件下的海面10 m高度处风速^[2]。因此,在本文数据处理中,采用Liu和Tang的方法^[3],将匹配的FNL资料的海面风速转换为了海面10 m高度处的中性稳定风速(equivalent neutral wind speed)。该模型需要输入海面的气象参数数据和海面温度数据,在实际计算中,气象辅助参数同样从NCEP的FNL全球分析资料数据中获取,插值方法与海面风矢量的插值方法相同。

3 检验方法

3.1 检验内容

对于星载微波散射计反演风矢量产品的真实性检验,除了需要评估风速风向产品的整体精度之外,还需要结合微波散射计采用的波束体制特点,获得与波束体制及测量机理相关的测量精度特性。针对HY-2卫星微波散射计,风矢量产品真实性检验的内容包括:不同交轨方向刈幅位置反演风矢量的精度评价、不同风速条件下反演风矢量的精度评价、模糊解去除能力的精度评价及整体风矢量精度评价,详细描述如下。

1)不同交轨方向刈幅位置反演风矢量的精度

评价。HY-2卫星微波散射计采用笔形波束圆锥扫描体制,工作频率为13.256 GHz(Ku波段),具有两个笔形极化波束,内波束是HH(H为水平极化)极化,入射角为 41.2° ;外波束是VV(V为垂直极化)极化,入射角为 48.4° ;通过天线的圆锥扫描和卫星平台的运动,实现对海面同一观测单元的多方位向观测和全球覆盖观测^[2,4]。图1描绘了HY-2卫星微波散射计的观测几何示意图。

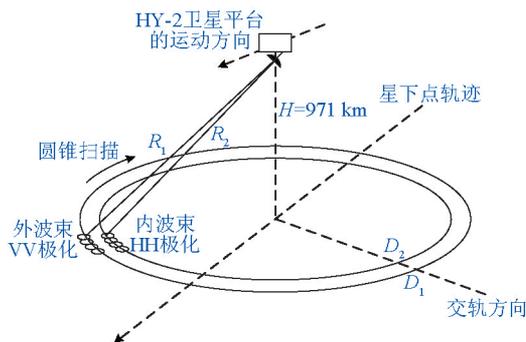


图1 HY-2卫星微波散射计观测几何示意图

Fig. 1 The HY-2 scatterometer measurement geometry

在散射计内波束刈幅范围内,同一观测单元可以获得内外波束前视和后视的观测各一次,共得到四次不同方位向观测。在内波束边缘到外波束边缘之间的区域,同一分辨单元只能获得外波束的前视和后视观测各一次,所以只能得到二次不同方位向观测。同时,在交轨方向,不同刈幅位置之间多次方位向观测的差异度也不一样,这种差异化也造成了笔形圆锥扫描体制微波散射计在不同交轨方向刈幅位置反演风矢量精度的差异。一般来说,在星下点和刈幅边缘位置反演风矢量的精度较差,而在刈幅中间位置反演风矢量的精度最高。如果测量精度不符合这一特性,则说明圆锥扫描笔形波束体制散射计反演风矢量的精度存在异常,而该异常很可能由笔形波束天线扫描关节造成不同方位向的测量精度存在差异引起。HY-2卫星微波散射计根据其面元分辨率和观测刈幅宽度,沿交轨方向从左至右依次划分了76个分辨面元,需要对其不同交轨方向刈幅观测位置的风矢量产品精度进行检验。

2)不同风速条件下反演风矢量的精度评价。微波散射计直接测量的是海表面的后向散射系数,且海面后向散射系数是随着风速的增大而增大

的。在低风速条件下,由于海表面近似呈现镜面状态,其后向散射的能量非常小,造成星载微波散射计的测量信噪比很低,测量精度显著下降,进而造成散射计在低风速条件下反演风矢量的精度降低。目前,国内外微波散射计反演风速范围的研制指标要求都大于2 m/s。随着风速的增大,海面后向散射系数随风速增大的变化率也越来越小,逐渐趋于饱和^[5-7],这也正是目前国内外星载微波散射计都只能有效反演小于30 m/s风速的原因。因此,需要结合散射计的测量机理,实现HY-2卫星微波散射计在不同风速条件下反演风矢量的精度特性评价。

3)模糊去除能力的精度评价。在散射计风矢量反演过程中,由于测量数据的噪声污染、模式函数的误差等因素,往往存在多个风速风向组合,使得反演目标函数取得最优值,这些可能的风速、风向组合统称为风矢量模糊解,从多个模糊解中寻找最优解的过程称为模糊去除。目前,散射计风场反演中使用比较多的模糊去除算法主要有SeaWinds散射计风场反演用到的中值滤波方法^[8],以及圆中数滤波方法^[9,10]。模糊去除精度对微波散射计最终反演风矢量产品精度至关重要,因此,需要评价散射计反演风矢量的模糊去除精度。

4)整体风速范围的精度检验。目前,星载微波散射计无法实现海面全风速范围的有效风矢量测

量。因此,只能针对散射计的有效测量范围,对其有效反演风矢量进行整体精度检验,给出散射计反演风矢量的精度。SeaWinds散射计测量海面风矢量的研制指标要求是3~30 m/s,而HY-2卫星微波散射计测量风矢量范围的研制指标要求是2~24 m/s^[2]。

3.2 数据处理流程

在散射计降雨条件观测数据的剔除过程中,依据散射计的观测时间和地理位置,匹配空间阈值50 km和时间阈值30 min以内的所有扫描微波辐射计观测云中液态水含量参数数据,如果存在一个云中液态水含量参数大于等于0.1 kg/m³,即认为散射计在该面元的观测条件为降雨^[11]。

通过空间和时间的三维线性插值,将FNL资料数据线性插值到散射计测量的时间及其地理位置,实现FNL资料数据与散射计观测数据之间的地理时空匹配,获得散射计测量位置时刻的海面风矢量和气象辅助数据^[12]。采用Liu和Tang的方法,校正NCEP模型风速。最后,统计计算匹配风速风向数据对的偏差、RMS、相关系数等,实现HY-2卫星微波散射计在不同交轨方向刈幅位置、不同风速条件、模糊去除和整体风矢量的精度特性进行分析,完成散射计反演风矢量的真实性检验。检验数据处理流程图如图2所示。

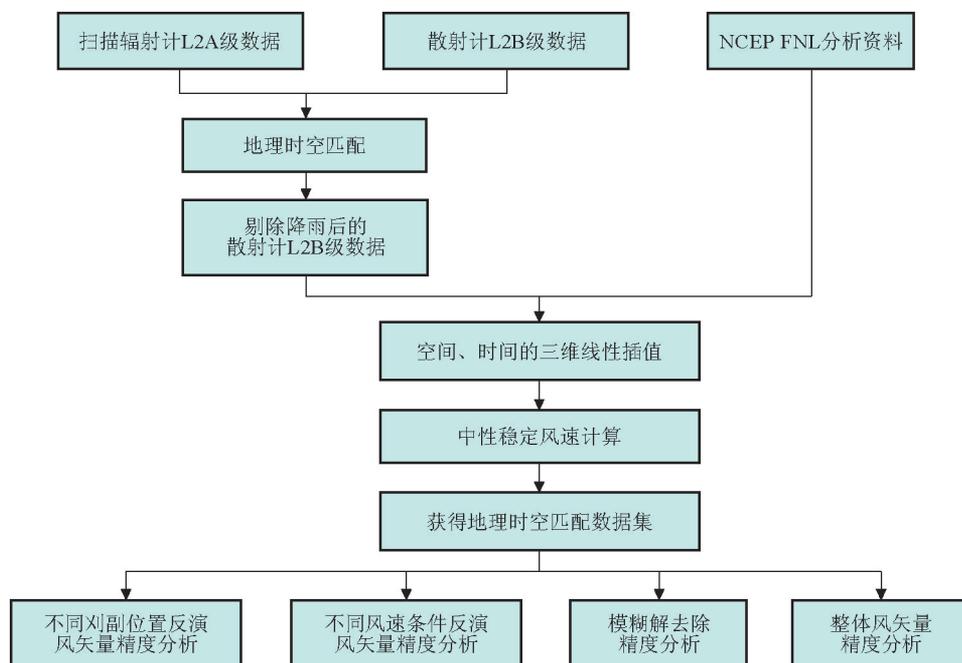


图2 HY-2卫星微波散射计反演风矢量真实性检验数据处理流程图

Fig. 2 The validation data processing flow for the retrieved wind vector of the HY-2 scatterometer

由于风向的圆周性,在进行散射计和NCEP测量风向之间的均方根误差(RMS)、偏差(bias)、相关系数(corr)等统计分析计算时,0°和360°之间的断点会引起风向的统计结果偏离实际真实情况。例如:对于风向350°和10°的观测值,直接相减的数值差异为340°,而实际只相差20°。因此,在进行风向的统计分析计算时,必须对风向进行转换,转换公式如式(1)所示:

$$wd_{NCEP} = wd_{scat} - 360^\circ, \text{当 } wd_{scat} - wd_{NCEP} < -180^\circ$$

$$wd_{scat} = wd_{scat} - 360^\circ, \text{当 } wd_{scat} - wd_{NCEP} < -180^\circ \quad (1)$$

式(1)中, wd_{NCEP} 为NCEP分析资料的测量风向; wd_{scat} 为HY-2卫星微波散射计的反演风向。但是,在风向散点分布图绘制中,为了显示原始的风向分布特点,并没有对风向进行式(1)的转换。

4 结果与分析

由于HY-2卫星扫描微波辐射计的观测刈幅约为1 500 km,而散射计的观测刈幅约为1 700 km,因此,为了确保检验结果不受降雨的影响,剔除了散射计刈幅边缘位置观测的所有数据。

4.1 不同刈幅观测位置反演风矢量精度分析

HY-2卫星微波散射计采用笔形圆锥扫描波束体制,沿交轨方向从左至右依次划分为1到76个风矢量观测刈幅位置单元,刈幅位置标识参数为wvc_index。为了检验其反演风矢量的精度是否依赖于散射计观测交轨方向的刈幅位置,本文按照从左至右、且每两个连续风矢量观测刈幅位置单元划分为一个统计区间的方式,得到36个交轨方向刈幅位置的散射计反演风速风向的检验结果,如图3所示。

从图3可以看出,对于交轨方向的不同刈幅观测位置,风速风向都是在刈幅中间位置反演风矢量的精度最高,在星下点和刈幅边缘位置反演风矢量的精度稍差,这与理论上笔形圆锥扫描波束体制微波散射计造成交轨方向不同刈幅观测位置风矢量反演精度的特性一致。

4.2 不同风速条件反演风矢量精度分析

由于散射计的测量机理原因,造成散射计在不同风速条件下的反演风矢量精度是不同的。依据NCEP风速,将匹配数据划分为1 m/s的检验区间,各个风速区间范围的检验结果如图4所示。

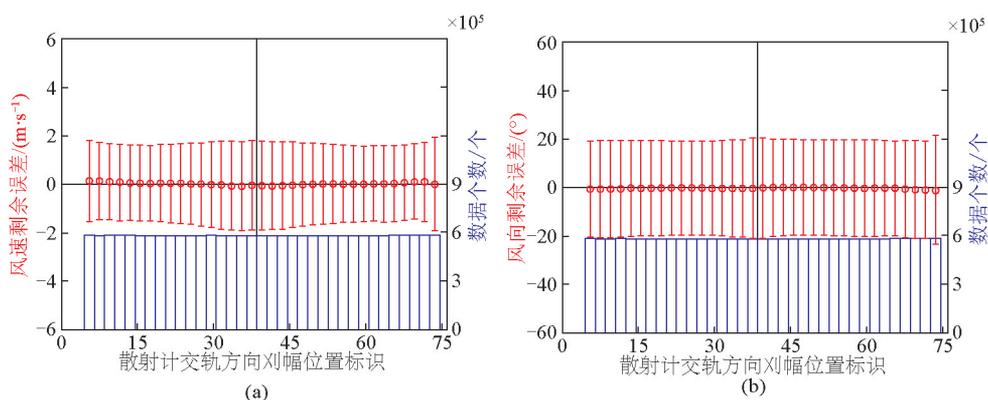


图3 交轨方向不同刈幅观测位置反演风矢量偏差(NCEP-scat)的检验结果

Fig. 3 Dependence of wind vector residual (NCEP-scat) on the location of the wind vector cells

注:(a)为风速结果,(b)为风向结果,圆圈表示剩余误差的平均值,垂直线表示剩余误差的方差

从图4可以看出,HY-2卫星微波散射计在地风速条件下的反演风速风向的精度最差,在中等风速条件下的精度最高,在高速风速条件下的精度有所下

降。这一特性与SeaWinds散射计反演风矢量随不同风速条件的精度变化特性一致^[13]。

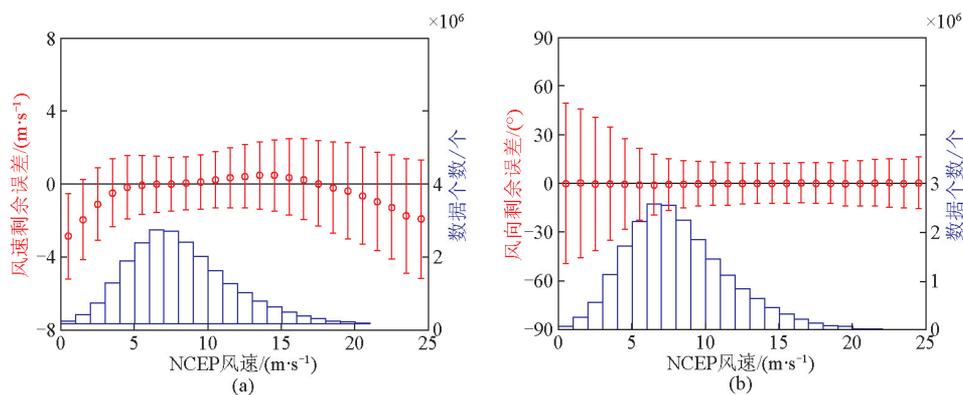


图4 不同风速条件下反演风矢量误差(NCEP-scat)的检验结果

Fig. 4 Dependence of wind vector residual (NCEP-scat) on the NCEP wind speed

注:(a)为风速结果,(b)为风向结果,圆圈表示剩余误差的平均值,垂直线表示剩余误差的方差

4.3 模糊去除精度分析

利用微波散射计测量后向散射系数反演风矢量时,一般会出现不超过4个的模糊解,模糊去除指的是从多个模糊解中找出风矢量的唯一解。模糊去除精度定义为最接近NCEP风向的匹配数据占总匹配数据的百分比,在本文中即统计风向偏差小于 90° 的数据个数占总数据量的百分比。依据NCEP风速,计算得到各个风速区间段的模糊去除质量检验结果,如图5所示。

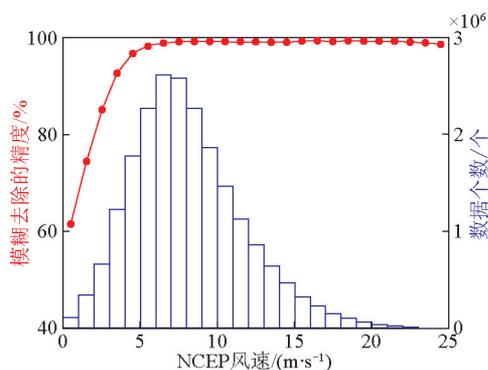


图5 模糊去除精度的检验结果

Fig. 5 The skill of the ambiguity removal plotted against the NCEP wind speed

从图5可以看出, HY-2 卫星微波散射计在低风速条件下的模糊去除精度很差,与理论上低风速条

件下的测量精度较差是相对应的;在大于 3 m/s 的风速条件下,模糊去除的精度都在 90% 以上,且当风速大于 4 m/s 时,模糊去除的精度接近 100% 。这一特性与 SeaWinds 散射计随不同风速条件下的模糊去除的精度特性一致,其在风速小于 1 m/s 条件下的模糊去除精度同样约为 60% ^[13]。

4.4 整体精度检验

HY-2 卫星微波散射计测量风速范围的设计指标为 $2 \sim 24 \text{ m/s}$,因此,风场检验整体精度的风速范围同样设置为 $2 \sim 24 \text{ m/s}$ 。同时,为了避免风矢量模糊解选择异常对精度评价结果的影响,剔除了散射计反演风矢量模糊解选择异常的数据,即NCEP风向和散射计反演风向两者之差大于 90° 的数据^[13,14],得到HY-2 卫星微波散射计反演风矢量整体精度的检验结果如图6所示。

5 结语

本文利用NCEP模式数据,实现了HY-2 卫星微波散射计反演风矢量产品的真实性检验,采用一个月的数据,就获得了散射计在交轨方向不同刈幅观测位置、不同风速条件、模糊去除精度的检验结果,且其精度变化特性与理论特性非常一致。国际上研究学者通常都认为现场浮标测量风矢量具有非常高的精度,而NCEP模式风场数据的精度相对较差,因此,造成采用NCEP模式数据检验得到散射计

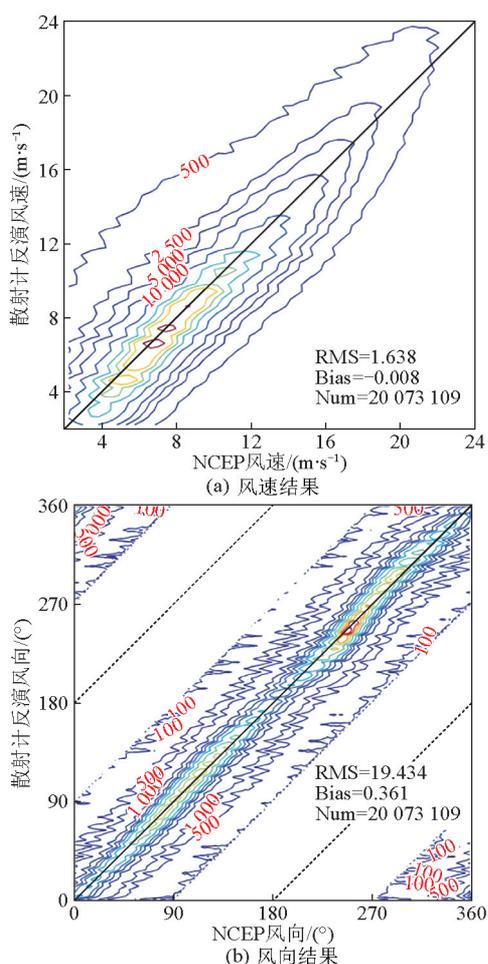


图6 散射计反演风矢量的整体精度检验结果
Fig. 6 The HY-2 scatterometer wind vectors precision validated by NCEP wind data

注:(a)为风速结果,(b)为风向结果

反演风矢量RMS数值较差。但是,相比高精度现场浮标测量的检验,本文检验方法可以在短期内获得大量的匹配数据,NCEP单月可以获得约 2×10^7 个匹配样本数据,而即使采用全球浮标观测网,假设全球可用浮标约1 000个,一个月也只能获得约 6×10^4 个匹配数据,较少的样本数,将很难获得清晰的交轨方向不同观测位置、不同风速条件及模糊去除精度的检验,不利于识别可能出现的测量性能异常。因此,本文检验方法不仅可以实现星载微波散射计反演风矢量整体精度的检验,还可以快速实现

星载微波散射计反演风矢量产品的全面检验,有助于识别可能出现的异常现象。

致谢

NCEP的FNL分析资料数据由RDA,NCAR(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)提供,特表谢忱。

参考文献

- [1] Stofflen A. A simple method for calibration of a scatterometer over the ocean[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(2): 275-281.
- [2] 蒋兴伟,林明森,宋清涛. 海洋二号卫星主被动微波遥感探测技术研究[J]. 中国工程科学,2013, 15(7):4-11.
- [3] Liu W T, Tang W Q. Equivalent neutral wind[R]. CA: California Institute of Technology, 1996.
- [4] 王小宁,刘丽霞,陈文新. 海洋二号卫星微波散射计系统设计与应用[J]. 中国工程科学,2013,15(7):33-38.
- [5] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2005.
- [6] 蒋兴伟,林明森,刘建强,等. 海洋遥感导论[M]. 北京:海洋出版社,2008: 246-265.
- [7] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing—Vol. II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. Boston: Addison-Wesley Publishing Company: 1982: 747-766.
- [8] Freilich M H. SeaWind algorithm theoretical basis document [R]. ATBD-SWS-01. Greenbelt, M D: NASA Goddard Space Flight Center, 2000.
- [9] Stoffelen A, Anderson D L T. Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102:5767-5780.
- [10] 解学通,方裕,陈克海,等. 一种新的SeaWinds散射计海面风场反演方法[J]. 高技术通讯, 2005(15):98-104.
- [11] Mears C A, Smith D K, Wentz F J. Comparison of special sensor microwave imager and buoy-measured wind speeds from 1987 to 1997[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (C6):11719-11729.
- [12] Chelton D B, Freilich M H. Scatterometer-based assessment of 10 m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models[J]. Monthly Weather Review, 2005, 133: 409-429.
- [13] Ebuchi N, Graber H, Caruso M J. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data[J]. Journal of Atmospheric Oceanic Technology, 2002, 19: 2049-2062.
- [14] Freilich M H, Dunbar R S. The accuracy of the NSCAT 1 vector winds comparisons with national data buoy center buoys[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C5): 11231-11246.

Validation of wind vectors retrieved by the HY-2 microwave scatterometer using NCEP model data

Mu Bo, Lin Mingsen, Peng Hailong, Song Qingtao,
Zhou Wu

(National Satellite Oceanic Application Center Service, Beijing 100081, China)

[Abstract] The microwave scatterometer onboard HY-2 Satellite mainly makes measurements of surface wind vectors over the global oceans. In order to ensure that the quality of wind vectors produced by ground application system software, the product must be validated to provide the basis for the quantitative application of the data product. This paper performs the validation of wind vectors retrieved by HY-2 scatterometer using national centers for environmental prediction (NCEP) model data. The validation result suggests that the validation method can give the precision of the overall wind vectors, and also can be used to analyze the precision characteristics relating with the scanning pencil-beam system and the scatterometer measurement mechanism. Meanwhile the validation can aid to identify the short-term anomaly of in-orbit measuring performance.

[Key words] microwave scatterometer; wind vectors inversion; validation