

# 海洋二号卫星3个主要载荷 风速测量比较

贾永君, 刘建强, 林明森, 张有广

(国家卫星海洋应用中心, 100081 北京)

**[摘要]** 海面风速对海洋中动能的转移、海气间物质和能量的交换具有非常重要的作用。海洋二号(HY-2)卫星搭载的雷达高度计、微波散射计和扫描微波辐射计均可以用来探测海面风速。区别是雷达高度计只能测量星下点风速,微波散射计可以得到宽刈幅的风场(包括风向和风速),扫描微波辐射计可获得宽刈幅的风速。为了更好地分析3个载荷风速测量能力,针对2013年9月19日“天兔”台风影响海域范围内的海面风速,比较了3种载荷的探测结果。结果表明,在小于20 m/s风速范围内,雷达高度计和微波散射计探测到的风速非常接近,标准偏差小于2 m/s,而扫描微波辐射计测量的风速比另外两个载荷测量的风速大;在20~35 m/s风速范围内,雷达高度计和扫描微波辐射计风速较为接近;在大于35 m/s的高风速区,只有扫描微波辐射计可以探测出风速,但其测量精度还需要进一步验证。

**[关键词]** 风速;雷达高度计;海洋二号

**[中图分类号]** P715.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)06-0027-06

## 1 前言

我国自行研制的海洋二号(HY-2)海洋动力环境卫星已于2011年8月发射成功,目前在轨运行良好。HY-2卫星搭载的主要微波遥感器包括雷达高度计、微波散射计、扫描微波辐射计和校正微波辐射计。这颗卫星的4个主载荷均可以获得海面风速。雷达高度计和校正微波辐射计可获得星下点风速,微波散射计和扫描微波辐射计可获得宽刈幅海面风速。由于校正微波辐射计只提供风速的大致趋势,达不到应用的需要,所以本文不做讨论。

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风速;扫描微波辐射计和校正微波辐射计都是通过亮温反演得到海面风速。

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),扫描微波辐射计和校正微波辐射计可探测的风速范围没有严格限制。微波散射计和扫描微波辐射计的刈幅宽度较大,雷达高度计和校正微波辐射计只能探测星下点的风速。

## 2 方法

### 2.1 雷达高度计风速反演算法

Brown等<sup>[1]</sup>对1975—1978年的Geos-3及美国国家海洋大气局(NOAA)浮标数据进行编辑、筛选,找出时间间隔在1.5 h之内、空间距离相差150 km的共184对数据。利用这些数据进行建模分析。Brown风速算法分两步,第一步由式(1)给出

**[收稿日期]** 2014-04-10

**[基金项目]** 海洋公益性行业科研专项经费项目(201105032);国家高技术研究发展计划(863计划)“海洋动力环境微波遥感信息提取技术与应用”(2013AA09A505)

**[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,主要研究方向为卫星雷达高度计数据处理算法及高度计数据应用;E-mail:jiayongjun2008@gmail.com

$$W_1 = \exp[(10^{-0.21+\sigma_0/10} - B)/A] \quad (1)$$

式(1)中,  $\sigma_0$  为后向散射系数,  $A$ 、 $B$  为系数。当  $\sigma_0 < 10.12$  dB 时,  $A=0.080\ 074$ ,  $B=-0.124\ 651$ ; 当  $10.12$  dB  $\leq \sigma_0 < 10.9$  dB 时,  $A=0.039\ 893$ ,  $B=-0.031\ 996$ ; 当  $\sigma_0 \geq 10.9$  dB 时,  $A=0.015\ 95$ ,  $B=0.017\ 215$ 。  $W_1$  表示风速的第一次估计值, 通过与浮标风速的比较, Brown 发现浮标值与  $W_1$  有一系统偏差, 为了校正这一系统偏差, 推导出风速的二次估计值  $W_2$

$$W_2 = \sum_{n=1}^5 a_n W_1^n \quad W_1 \leq 16 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$W_2 = W_1 \quad W_1 > 16 \text{ m/s} \quad (3)$$

式(2)中,  $a_1=2.087\ 799$ ,  $a_2=-0.364\ 992\ 8$ ,  $a_3=0.040\ 624\ 21$ ,  $a_4=-0.001\ 904\ 952$ ,  $a_5=0.000\ 032\ 881\ 89$ 。上述即为高度计风速反演的 Brown 模式函数, 反演出的风速为海面 10 m 高处风速值。

为了消除 Brown 风速算法对  $\sigma_0$  的不连续性, Goldhirsh 等<sup>[2]</sup>用一个五次多项式拟合 Brown 的原始  $\sigma_0$  和浮标风速数据(共 184 个点)。这种风速反演函数几乎与 Brown 算法一致, 但没有 Brown 模型的风速多模态特征。因此该模型也称平滑的 Brown 算法, 由式(4)给出

$$W = \sum_{n=0}^5 a_n \sigma_0^n \quad 8 \text{ dB} < \sigma_0 < 15 \text{ dB} \quad (4)$$

式(4)中,  $a_0=-15.383$ ,  $a_1=16.077$ ,  $a_2=-2.305$ ,  $a_3=0.098\ 96$ ,  $a_4=0.000\ 18$ ,  $a_5=-0.000\ 064\ 14$ 。其中, 条件  $\sigma_0 < 15$  dB 表明该算法适用于 2 m/s 以上的风速计算。

Chelton 和 Wentz 针对 Seasat 高度计开发了适用的风速反演算法<sup>[3]</sup>。对 Geosat 高度计, Witter 和 Chelton 发现其  $\sigma_0$  与 Seasat 高度计所观测的  $\sigma_0$  有一系统偏差。他们比较了 Seasat 高度计与 Geosat 高度计的  $\sigma_0$  分布直方图, 这两者的偏差确实存在, 但不是年季及季节变化所造成的。为适用于 Geosat 高度计的应用, Witter 和 Chelton 针对 Geosat 卫星的情况, 对 Chelton 和 Wentz 针对 Seasat 卫星开发的风速反演算法做了修正, 以消除 Seasat 高度计和 Geosat 高度计  $\sigma_0$  测量的系统偏差, 建立的新算法即为改进的 Chelton 和 Wentz 算法(MCW)<sup>[4]</sup>。

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。Gourrion 等在 Brown 和 MCW 模型的基础上, 发展了双参数模型。HY-2 卫星雷达高度计

风速反演算法利用了 Gourrion 等提出的双参数模型<sup>[5]</sup>, 即

$$U_{10} = \frac{Y - a_{U_{10}}}{b_{U_{10}}} \quad (5)$$

式(5)中,

$$Y = \left\{ 1 + \exp[-(\mathbf{W}_y X + B_y)] \right\}^{-1} \quad (6)$$

式(6)中,

$$X = \left\{ 1 + \exp[-(\mathbf{W}_x \mathbf{P}^T + B_x)] \right\}^{-1} \quad (7)$$

式(5)~式(7)中,  $U_{10}$  为距离海面 10 m 处的风速;  $\mathbf{P}$  为有效波高(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;  $\mathbf{W}_x$ 、 $\mathbf{W}_y$ 、 $B_x$ 、 $B_y$  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 I

Table 1 Gourrion model parameters I

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 II

Table 2 Gourrion model parameters II

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

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

## 2.2 微波辐射计海面风速反演算法

多元统计回归方法是目前星载微波辐射计海洋地球物理参数常用的业务化反演算法, 其利用星载微波辐射计多个通道观测亮温的线性组合或变

相的线性组合反演海气参量。这种方法假定海面温度、风速等海洋参数与辐射计各个通道观测的亮温之间存在一定的线性关系,通过将时空匹配的星载辐射计测量与浮标数据、再分析数据等统计回归,得到一组或数组系数,从而进行海洋参数的反演。

HY-2卫星微波辐射计海面风速反演算法形式与Goodberlet等<sup>[6]</sup>给出的多通道亮温线性组合形式相同

$$WS = \sum_{i=1}^9 c_i F_i + c_{10} \quad (8)$$

式(8)中,WS表示风速; $c_i$ 是系数; $F_i$  ( $i=1,2,3,\dots,9$ )分别对应于6.6V、6.6H、10.7V、10.7H、18.7V、18.7H、23.8V、37V、37H(V和H分别表示垂直极化和水平极化)9个通道的亮温数据。对于23.8V( $i=7$ )以外的通道, $F_i = TB_{ch,i} - 150$ ;对于23.8V( $i=7$ )通道, $F_7 = -\ln(290 - TB_{ch,7})$ 。无雨情况下,式(8)的系数见表3。有雨情况下,式(8)的系数见表4。

表3 海面风速反演算法系数(无雨)

Table 3 Parameters of wind speed algorithm (without rain)

系数	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
算法	-0.045 18	0.625 654	-1.345 38	0.741 073	1.602 353	-0.905 28	-3.196 16	-0.871 05	0.457 614	52.341 82

表4 海面风速反演算法系数(有雨)

Table 4 Parameters of wind speed retrieval algorithm (with rain)

系数	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
算法	0.715 006	0.353 659	-2.321 45	1.129 498	1.548 652	-0.922 94	-1.447 19	-0.680 72	0.390 869	61.316 78

### 2.3 微波散射计海面风场反演算法

微波散射计风矢量反演算法主要是通过地球物理模型函数以及海面风矢量单元不同方位角的观测获得海面的风矢量解。地球物理模型函数的一般形式为

$$\sigma_0 = F(\omega, \chi, \dots, f, p, \theta) \quad (9)$$

式(9)中, $\sigma_0$ 代表散射计测量的后向散射系数; $\omega$ 为风速; $\chi$ 为风向的相对方位角; $f$ 为散射计的工作频率; $p$ 为极化方式; $\theta$ 为天线的入射角。

自1978年美国Seasat卫星装载的微波散射计(SASS)成功运作以来,经过20多年的研究,雷达后向散射截面 $\sigma_0$ 与风矢量关系的地球物理模型已逐渐完善,已建立许多地球物理模型,包括SASS-1、SASS-2以及ERS-1的CMOD系列模型。由于测量中各种噪声的存在,所以不能通过从地球物理模型中直接求逆来反演风矢量。通常利用加权最小二乘法(SOS)、最大似然法(ML)、最小二乘法(LS)、加权最小二乘法(WLS)、自适应最小二乘法(AWLS)、LI模算法(LI)和最小风速平方和法(LWSS)来进行反演运算。这些方法中,最大似然估计法(MLE)是海面风矢量反演的最佳算法,其已经应用于ERS/SCAT和NSCAT散射计的海面风矢量反演。本文也将采用该法来反演风矢量。

根据散射计的几何观测特征,利用模拟的后向

散射系数及其观测参数,分析MLE目标函数的一般分布特征,并考察分布特征随几何观测参数和横向地面轨道位置变化的规律。MLE目标函数表达式为

$$J = - \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{[\sigma_{0i} - \sigma_m(w, \varphi)]^2}{\text{Var}(\sigma_m)_i} + \ln[\text{Var}(\sigma_m)_i] \right\} \quad (10)$$

式(10)中, $\sigma_{0i}$ 为卫星观测后向散射系数测量值; $\sigma_m(w, \varphi)$ 为后向散射系数模型计算出来的后向散射系数结果; $N$ 表示后向散射系数的独立测量次数; $\text{Var}(\sigma_m)_i = \alpha \sigma_m^2 + \beta \sigma_m + \gamma = (K_p^2)_i$ 为测量偏差,系数 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 与天线和风矢量单元的位置有关。

利用MLE求极值的方法可以得到多个海面风矢量解,其风速基本一致,相差较小,但是风向却存在模糊性。为了获取唯一的风矢量解,需要采用风向多解消除算法。

确定要排除的风向模糊点,并选择 $N \times N$ 点阵的单元作为滤波窗口,保证要排除的风向模糊点位于这个点阵的中心位置。利用周围点及要排除的风向模糊点上的第一风场解的值,作出圆直方图。

根据圆直方图中每个值所对应的圆分布函数的离散值 $f_k$ ,利用式(11)求出中数角(有多个)。

$$\sum_{k=k_1}^{k_1+L/2} f_k \cdot \Delta = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=0}^L f_k \cdot \Delta \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

$$X_i = \Delta \cdot (K_i + 1/2) \quad (12)$$

式(12)中,  $X_i$  为中数角。利用式(13)求出圆平均角

$$\bar{x} = \tan^{-1} \left[ \frac{\left( \sum_{k=1}^L \{f_k \cdot \sin[\Delta \cdot (K+1/2)]\} \right)}{\left( \sum_{k=1}^L \{f_k \cdot \cos[\Delta \cdot (K+1/2)]\} \right)} \right] \quad (13)$$

式(13)中,  $\Delta = (2 \cdot \pi) / L$  是圆直方图离散步长。

比较中数角与圆平均角, 选取与圆平均角最接近的中数角作为圆中数角。用圆中数角作为该点的参考风向值, 并选取与之最接近的模糊风向作为风向真值, 这样逐点求解, 一直处理下去, 全场排除完毕进行新一层的迭代求解, 直到迭代的全场风向不发生变化, 即求出了全场的风向真解。

经过风向模糊排除处理, 得到了每个测量点上具有唯一大小和方向的风矢量场, 进一步处理这样的风矢量场, 就可以得到能直接用于气象和海洋模型研究及海面风场信息分析的风场。

### 3 结果

为比较不同载荷探测不同风速的能力, 本文选取2013年第19号台风“天兔(Usagi)”风场作为研究对象。选择“天兔”风场作为研究对象的原因是它的风速范围比较大, 既有小风速也有超过25 m/s的大风速。

图1~图3分别给出了3个不同载荷2013年9月19日在西北太平洋海域的风速探测情况。从图中可以看到, 3个载荷均有探测风速的能力, 并且在台风中心也表现出比不受台风影响海域风速大的特点, 符合实际; 但3个载荷探测到的台风中心最大风速有所差别。总体而言, 雷达高度计和微波散射计探测到的中低风速相差较小; 微波辐射计探测到的风速不管是大风速还是中低风速与另外两个载荷探测到的风速相比都较大。

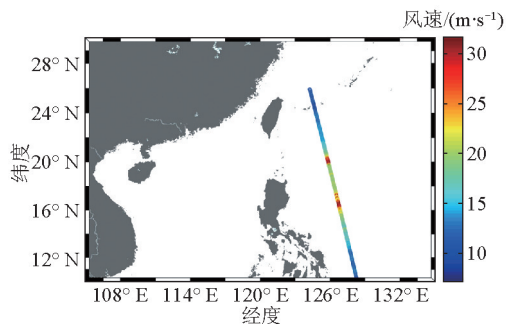


图1 HY-2卫星雷达高度计过“天兔”台风中心海面风速测量结果(2013-09-19)  
Fig. 1 Wind speed of Usagi from HY-2 satellite radar altimeter (2013-09-19)

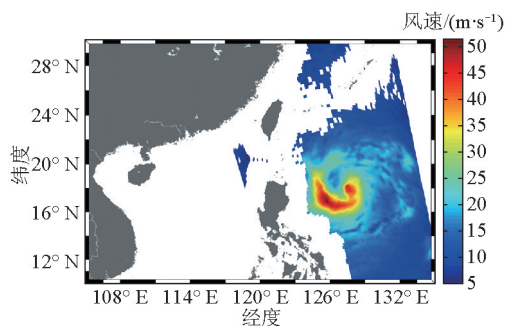


图2 HY-2卫星扫描微波辐射计过“天兔”台风中心海面风速测量结果(2013-09-19)

Fig. 2 Wind speed of Usagi from HY-2 satellite scanning microwave radiometer (2013-09-19)

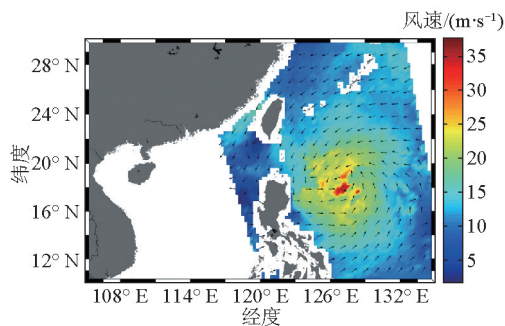


图3 HY-2卫星微波散射计过“天兔”台风中心海面风速测量结果(2013-09-19)

Fig. 3 Wind field of Usagi from HY-2 satellite microwave scatterometer (2013-09-19)

考虑到雷达高度计只能探测星下点海面风速, 为更明确地知道3个载荷探测风速的能力, 选取过台风“天兔”中心的一个pass星下点风速作为研究对象(微波散射计和扫描微波辐射计也提取到星下点风速)。图4给出了3个载荷探测的风速比较。从图4可以看到, 在不超过20 m/s的中低风速下, 雷达高度计和微波散射计探测到的结果相差很小, 不到2 m/s; 扫描微波辐射计探测到的结果较雷达高度计和微波散射计探测到的结果大, 平均超过2 m/s, 但在低于22 m/s的风速下总体趋势与雷达高度计和微波散射计保持一致。对于超过20 m/s的大风速, 雷达高度计和微波散射计的探测结果略有差别, 最大相差近5 m/s, 但总体趋势一致; 扫描微波辐射计

表现出和雷达高度计探测结果相同的趋势,但风速明显大于雷达高度计探测的风速。

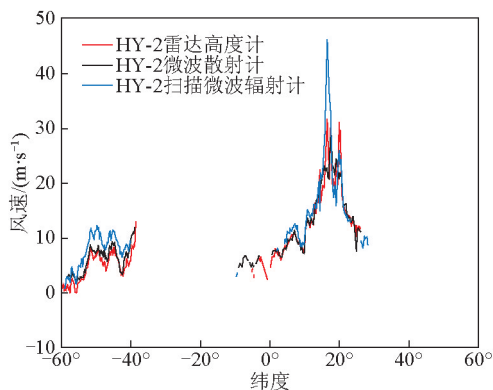


图4 HY-2卫星3个主要载荷过台风“天兔”中心海面风速测量结果比较(2013-09-19)

Fig. 4 Comparison of wind speed among 3 main payloads of HY-2 when satellite flying above typhoon Usagi (2013-09-19)

图5是3个载荷在相同星下点探测的风速概率密度分布。从图5中可以看到,雷达高度计和微波散射计探测到的风速概率密度非常接近,最大概率密度对应的风速约为8 m/s;不同的是当风速为8 m/s时二者的概率密度不同,这可能和二者的风速反演算法模型有关,有待进一步研究。扫描微波辐射计海面风速概率密度对应的风速同雷达高度计和微波散射计相比,有一个约为2 m/s的偏差,而且是偏大的。

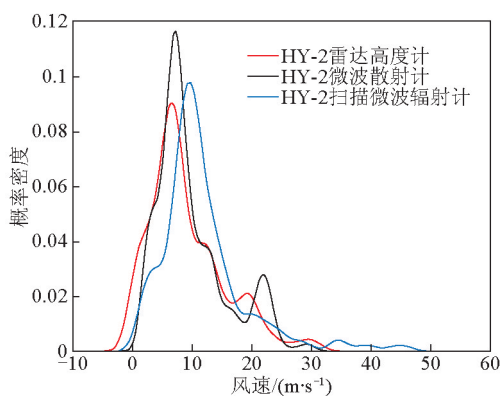


图5 HY-2卫星3个主要载荷过台风“天兔”中心海面风速测量结果概率密度比较(2013-09-19)

Fig. 5 Comparison of wind speed probability density function among HY-2 satellite 3 main payloads when satellite flying above typhoon Usagi (2013-09-19)

模式预报和其他方式得到的海面风速均表明台风“天兔”有大于40 m/s的大风速出现,但3个载荷中只有扫描微波辐射计探测到了超过35 m/s的风速,另外两个载荷测量的最大风速均不超过35 m/s。

当风速小于20 m/s时,雷达高度计和微波散射计星下点风速测量值相差很小,图6和图7都表明二者的差小于2 m/s;在20~35 m/s的风速范围内,二者的风速测量偏差较大,标准差最大可达7.3 m/s。

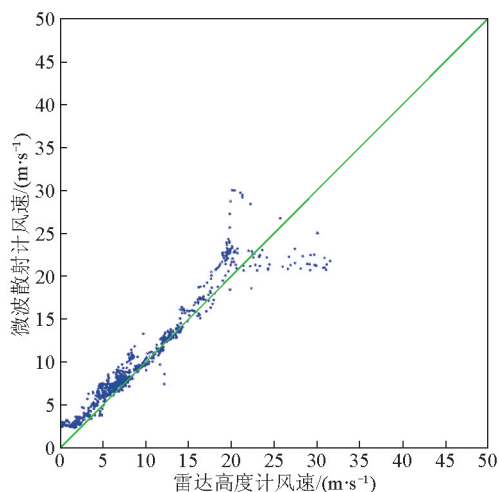


图6 HY-2卫星雷达高度计和微波散射计过台风“天兔”中心海面风速测量结果比较(2013-09-19)

Fig. 6 Comparison of wind speed between HY-2 satellite radar altimeter and scatterometer when satellite flying above typhoon Usagi (2013-09-19)

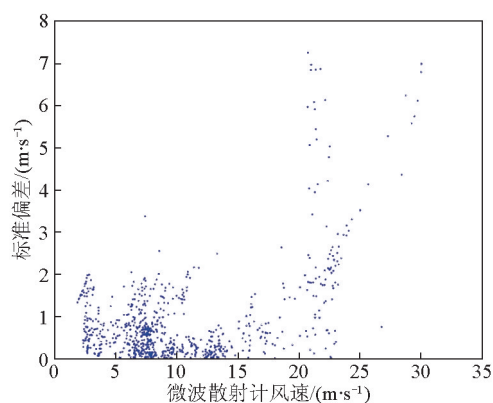


图7 HY-2卫星雷达高度计和微波散射计过台风“天兔”中心海面风速测量标准偏差随散射计风速测量结果分布(2013-09-19)

Fig. 7 Comparison of wind speed standard deviation between HY-2 satellite radar altimeter and scatterometer when satellite flying above typhoon Usagi (2013-09-19)

## 4 结语

已经利用美国国家数据浮标中心(NDBC)浮标数据验证,在小于20 m/s的风速范围内,微波散射计和雷达高度计的风速测量精度均优于2 m/s。但是微波散射计的刈幅宽度可以达到1 800 km,而雷达高度计只能做到星下点观测。虽然二者的测量精度在小于20 m/s的风速范围内几乎是相同的,但实用性有很大差别。扫描微波辐射计在小风速范围内与雷达高度计和微波散射计风场测量值有明显的约为2 m/s的固定偏差。因此,在小于20 m/s的风速范围,3个载荷都可以用来测量风速,并且微波散射计和扫描微波辐射计具有宽刈幅的优点。在20~35m/s的风速范围内,由于微波散射计风速测量范围的限制,雷达高度计和扫描微波辐射计测得的风速较为接近,可以应用在相关的监测中。在大于35 m/s的高风速区,只有扫描微波辐射计可以探测,但其测量精度还需要验证。

## 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(2): 59-63.
- [2] Goldhirsh R E, Dobson E B. A recommended algorithm for the determination of ocean surface wind speed using a satellite borne radar altimeter [R]. Report JHU/APLS1R85U- 005, Laurel, MD: Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, 1985.
- [3] Chelton Dudley B, Wentz Frank J. Further development of an improved altimeter wind speed algorithm [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(C12): 14250-14260.
- [4] Witter Donna L, Chelton Dudley B. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96 (C5): 8853-8860.
- [5] 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.
- [6] Goodberlet Mark A, Swift C F, Wilkerson J C. Ocean surface wind speed measurements of the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1990, 28(5): 823-828.

# Comparison of wind speed from 3 main payloads of HY-2 satellite

Jia Yongjun, Liu Jianqiang, Lin Mingsen,  
Zhang Youguang

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

**[Abstract]** Sea surface wind speed plays a very important role in the transfer of kinetic energy in the ocean and the exchange of the matter and energy in the air-sea surface. There are three payloads on HY-2 satellite which can be used to detect the sea surface wind speed. The payloads are radar altimeter, microwave scatterometer and scanning microwave radiometer. The difference is that the radar altimeter can measure the wind speed at the nadir point of the HY-2 satellite, the microwave scatterometer can detect the wide swath wind field, and the scanning microwave radiometer can measure the wide swath wind speed only. In order to analyze the capacity of the three payloads, in this study, the Typhoon Usagi was selected for comparing the ability of the three payloads to measure the wind speed. It turned out that when the wind speed is lower than 20 m/s, the wind speed from radar altimeter is much the same as that from microwave scatterometer. The standard deviation is less than 2 m/s. But when wind speed is between 20 m/s and 35 m/s, the wind speed of radar altimeter is close to the scanning microwave radiometer. Only the scanning microwave radiometer is able to detect the wind speed higher than 35 m/s. Before using it to measure the wind speed higher than 35 m/s, we have to assess the accuracy of measurement.

**[Key words]** wind speed; radar altimeter; HY-2