

海洋二号卫星微波散射计系统设计与应用

王小宁,刘丽霞,陈文新

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

[摘要] 海洋二号卫星是我国第一颗海洋动力环境卫星,于2011年8月16日成功发射,搭载的微波散射计是我国第一颗星载海洋风场测量雷达。海洋二号卫星微波散射计采用笔形波束体制,圆锥扫描工作方式,本文给出了微波散射计系统组成、主要性能指标和在轨数据预处理方法,并给出了在轨测试结果及在台风监测中的应用。

[关键词] 海洋二号;雷达;散射计;后向散射系数;定标

[中图分类号] P414 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)07-0033-06

1 前言

海洋二号卫星是我国首颗海洋动力环境微波遥感卫星,卫星搭载了4个有效载荷:微波散射计、雷达高度计、扫描微波辐射计和校正微波辐射计,用于实现全天时、全天候、高精度对全球海面风场、浪场、高度场和温度场等重要海洋参数的连续观测。

微波散射计作为海洋二号卫星的主要载荷,主要功能是获取全球海面风场,同时星载微波散射计还广泛应用于气象研究、植被观测、海冰监测等,特别是风场和灾害性海况的监测和预报需要星载微波散射计提供海面实时风场信息,同时海面风场作为海洋学的重要物理参数,是引起海浪、大气环流等海洋环境过程的主要驱动力之一,在气象学中,它是行星边界层下界面的边界条件之一,因此在气候学中占据重要地位。通过星载微波散射计提供的长期、连续、系统的观测资料,对全球气候研究具有重要意义。

散射测量技术是微波遥感技术的一个重要研究领域,它利用电磁波与媒介之间相互作用的机理,通过测量回波信号幅度、相位等信息,从而获得被测遥感目标的物理特性和运动特性,达到识别和辨认目标的目的。星载微波散射计最成功的应用

是能够获取海洋表面风场,利用海面后向散射系数与地球物理模型函数可以同时获得风速和风向,也是当前唯一能够同时获得风速和风向的微波遥感器。

2 微波散射计测风机理

在大多数入射角范围内,海面后向散射与海面的风速、风向有着密切的关系,微波散射计测量海面风速和风向的原理就是利用海面风场产生的海面毛细波对微波产生 Bragg 散射,而且这种波浪对应的海面小尺度取向和斜率分布与风的方向有关,风生毛细波的幅度随着风速的增大而增大,从而 Bragg 散射的强度也增大。由于风生毛细波造成海面小尺度斜率,即与 Bragg 散射有关的散射单元的方向与风的方向有关,所以后向散射的强度也与风的方向有关^[1]。

星载微波散射计是通过间接的方式测量海面风场的,它通过测量雷达的回波功率,再通过雷达方程计算出海面的后向散射系数 σ^0 ,利用海面后向散射系数 σ^0 和海面风场之间的关系获取风速和风向。

$$\sigma^0 = A + B \cos \phi + C \cos 2\phi \quad (1)$$

式(1)中, ϕ 是雷达波束方向与迎风方向之间的方位夹角,系数 A 、 B 、 C 分别为入射角、风速和极化的函数。

[收稿日期] 2013-04-22

[作者简介] 王小宁(1973—),男,陕西富平县人,研究员,主要研究方向为星载微波遥感器系统;E-mail:wxnwxc@126.com

海面后向散射系数随方位角和风速的变化关系仿真结果如图1所示^[2]。

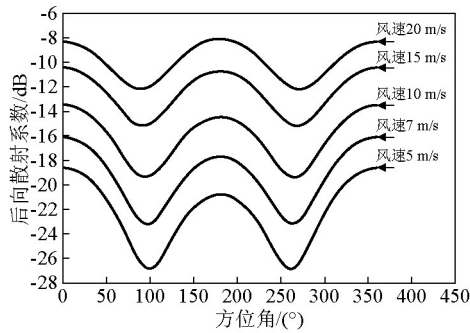


图1 后向散射系数(垂直极化)随方位角和风速的变化图
(方位角:0°表示迎风方向,入射角=40°)

Fig.1 σ^0 (V polarization) variety curve with the wind direction and speed
(azimuth angle: 0° shows windward, incidence angle=40°)

3 微波散射计系统设计

3.1 微波散射计工作几何关系

微波散射计通过对后向散射系数的测量实现海面风场的测量。由图1可知,为了测量风向,需要获得对同一分辨单元上不同入射方位角的后向散射信息,地面风场反演算法中要求至少4次不同角度的 σ^0 值才能反演出无模糊的风场。

微波散射计采用VV、HH两种极化的点波束,内波束入射角为35°,外波束入射角为40.5°,通过天线的圆锥扫描和平台的运动,在刈副范围内实现对同一分辨单元内外波束前视和后视各观测一次,从而得到4个 σ^0 测量值。图2给出了微波散射计的观测示意图。图3给出了双点波束在海面的测量示意图。

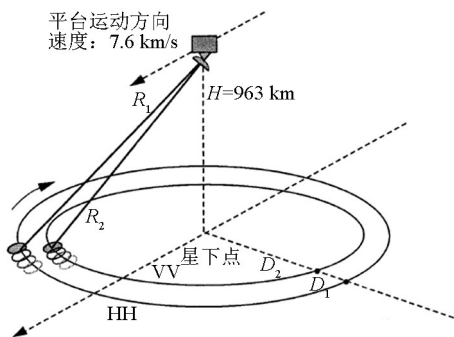


图2 微波散射计观测示意图

Fig.2 The scatterometer measurement geometry

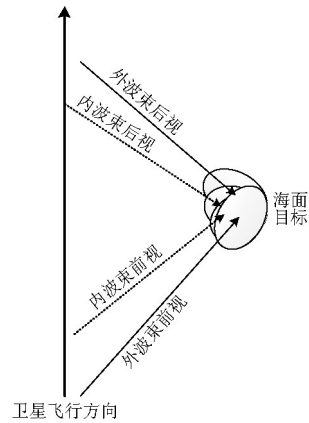


图3 双点波束在海面的测量示意图

Fig.3 Double beam measurement geometry on sea surface

3.2 信号检测方法

星载微波散射计是一种主动式雷达,由于作用距离远,回波信号能量小,检波后的接收信号中包括回波信号和热噪声信号,而热噪声包括仪器的系统噪声和地球背景噪声。散射计的目的是要检测纯净回波信号能量,因此在设计中采用了在信号加噪声的测量值中减去噪声的测量值,提高信号测量精度。

在微波散射计系统设计中,为提高系统的测量精度,对接收的衰落信号取较大的独立采样数,保证系统在有噪状态下的测量精度。

雷达测量误差通常采用信号的相对均方差来表示,式(2)给出了雷达相对均方差与雷达信噪比和独立采样数的关系^[1]

$$\frac{\sigma_s}{\bar{p}_s} = \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{1}{S_n}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_n}\right)^2}{N_r}} \quad (2)$$

式(2)中, σ_s 为信号方差; \bar{p}_s 为接收信号功率的平均值; S_n 为接收信号信噪比; N_r 为接收信号的独立采样数。

在有噪条件下系统要达到要求的测量精度,应具有与混合的信号噪声相分开的单独进行噪声测量的方法^[2]。在海洋二号微波散射计信号检测方案设计中,采用两个通道进行检测,定义为信号通道和噪声通道,两通道的带宽不同,通过参数替换和内定标测量得到纯信号能量。

根据雷达方程,海面后向散射系数 σ^0 与接收的信号功率之间的关系可表示为^[3]

$$\sigma^0 = \frac{(E_n - \alpha\beta E_e)L_a^2 L_w^2 (4\pi)^3 L_f}{(\beta - \alpha\beta)\lambda^2 I} \quad (3)$$

式(3)中, E_n 为噪声通道的测量值; E_e 为信号通道的测量值; β 定义为噪声通道和信号通道的增益比, $\beta = G_m/G_n$; α 定义为两通道的带宽比, $\alpha = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{N_n}{N_e}$; $I = \int \frac{G_i(\theta, \phi)G_r(\theta, \phi)}{R^4} dA$ 表示海面足迹与天线增益的积分; λ 为波长; L_a 为大气损耗; L_w 为系统损耗; L_f 为定标测量中内定标回路的插损。

α 由信号通道中的噪声能量 N_e 和噪声通道中的噪声能量 N_n 决定, 表示为

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{N_n}{N_e} \quad (4)$$

系统中, α 具体通过式(5)测得

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\langle N_{n,load} \rangle}{\langle N_{e,load} \rangle} \quad (5)$$

式(5)中, $N_{n,load}$ 为接收机前端射频匹配负载时噪声通道中测得的能量; $N_{e,load}$ 为接收机前端射频匹配负载时信号通道中测得的能量; 式中的尖括号表示多次测量的平均。

系统信号检测中采用参量替代方法来实现, 从而得到纯净信号, 系统测量误差主要由两通道的增益比和带宽比的测量误差引起。由于通道增益比在定标模式下测量, 定标信号远大于噪声信号, 其测量

误差较小。通道带宽比借助于射频匹配负载(噪声源)来实现, 其测量误差可通过多次平均来实现。

3.3 雷达工作时序

海洋二号微波散射计采用脉冲体制的雷达系统, 在天线扫描一周范围内, 雷达分别工作在风测量方式、内定标方式以及噪声测量方式, 3种工作方式分时工作, 以天线旋转一周 3.6 s 为周期, 如图 4 所示。

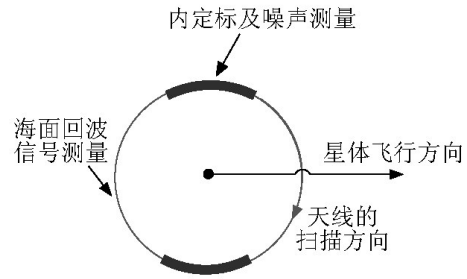


图4 天线扫描一周系统工作模式示意图
Fig.4 The scatterometer work mode with the antenna scanning a cycle

风测量模式下散射计雷达发射脉冲宽度为 1.5 ms, 脉冲重复频率为 185 Hz, 雷达工作时序如图 5 所示。

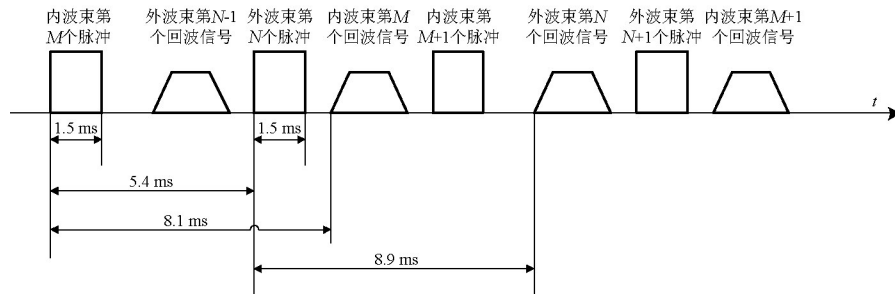


图5 雷达工作时序
Fig.5 Radar transmit and detection timing

3.4 后向散射系数测量精度分析

微波散射计系统设计中一般采用测量相对标准偏差 K_p 来评估回波测量精度, 回波信号的测量精度主要取决于独立采样数和数据处理信号的信噪比

$$K_p = \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{1}{S_n}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_n}\right)^2}{N}} \quad (6)$$

式(6)中, S_n 为接收信号的信噪比; N 为独立采样数。

微波散射计对回波信号进行处理时的信噪比设计为 6 dB。

独立采样数的获得包括两个方面: 同一分辨单元的重复观测次数和采用距离滤波技术获得的距离向独立采样数。根据微波散射计的系统设计(双点波束扫描观测)和相邻分辨单元重叠约三分之一, 对同一分辨单元重复观测次数大于 4 次, 计算时取 4。

微波散射计的发射信号设计为线性调频信号,线性调频信号的带宽为 5 MHz,脉冲宽度 T_p 为 1.5 ms,接收去线性调频后的带宽 B_s 为 640 kHz,则独立采样数 N_R 为

$$N_R = T_p \cdot B_s = 960 \quad (7)$$

则系统总的独立采样数约为 $N=4 \times 960=3\ 840$,

$$K_p = 1/\sqrt{N} = 1/\sqrt{3\ 840} = 0.016\ 13(0.07\ \text{dB}) \quad (8)$$

考虑接收通道的幅相等影响数据处理的因素,后向散射系数测量精度将优于 0.14 dB。

3.5 系统组成框图和主要性能指标

微波散射计系统组成原理框图如图 6 所示。

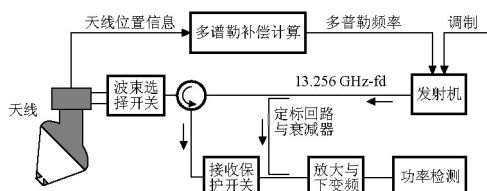


图 6 微波散射计系统组成原理框图

Fig.6 Diagram of scatterometer electronics functions

微波散射计的基本工作过程如下:微波散射计向海面发射射频脉冲,脉冲信号经目标散射,散射回波信号被天线接收后送到接收机,再经接收放大后送至信号处理器。内定标是将发射机的部分功率耦合到接收机中形成闭环,从而实现内部校准,消除收发系统的变化所引起的测量误差。信号处理器对回波信号、内定标信号及噪声信号进行处理,获得海面散射源的归一化雷达后向散射系数 σ^0 。地面处理系统再对不同入射角、不同方位角、不同天线波束测得的 σ^0 通过一定的数学模型推算出海面风速和风向。

微波散射计分系统由天线子系统、收发通道子系统、定标单元、数据处理单元、系统控制单元组成,主要性能指标如表 1 所示。

4 微波散射计在轨数据预处理与应用

微波散射计在轨数据预处理是指原始数据 L_0 级产品到一级数据 L_1 数据产品的数据处理,主要包括数据去格式、后向散射系数计算、星地几何关系的建立、利用地球模型进行观测单元定位和匹配,定标参数计算和系统误差校正,在轨数据预处理流程如图 7 所示^[4]。

表 1 微波散射计系统主要技术指标

Table 1 Scatterometer main parameters

参数	内波束	外波束
工作频率/GHz	13.25	
轨道高度/km	970	
天线口径/m	1	
极化	HH	VV
视角/(°)	35	41
3 dB 波束宽度 (方位'俯仰)	1.5°×1.5°	1.5°×1.5°
刈幅/km	1 360	1 780
峰值发射功率/W	120	
脉冲重复频率/Hz	185	
接收灵敏度/dBm	-134	
接收机动态范围/dB	60	
脉冲宽度/ms	1.5	
天线旋转速率/(r·min ⁻¹)	16.67	
内定标精度/dB	0.15	
后向散射系数测量精度/dB	0.5	
风速测量范围/(m·s ⁻¹)	2~24	
风速测量精度/(m·s ⁻¹)	1.5	
风向测量范围/(°)	0~360	
风向测量精度/(°)	±20	
扫描方式	机械圆锥扫描	

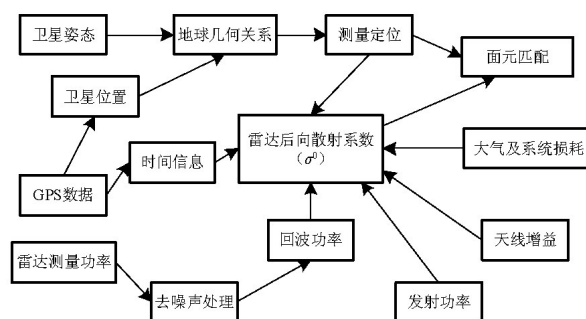


图 7 微波散射计在轨数据预处理流程

Fig.7 In-orbit scatterometer data pretreatment flow

海洋二号卫星微波散射计作为我国第一颗星载风场测量雷达,自卫星发射以来,其在轨的优异表现得到了用户的高度肯定,反演的风场图像清晰,能够分辨出锋面,及时捕获到全球台风和气旋,风速和风向性能指标达到国际先进水平,海洋二号卫星微波散射计的成功发射,对我国海洋环境预报特别是对极端海洋气候预报发挥了重要作用,它的观测数据已作为我国海况预报系统的重要依据之一,在台风预报、风暴潮预报等领域发挥着不可替

代的作用。

图8给出了海洋二号卫星微波散射计于2011年10月11日观测到的全球海面风场,表明海洋二号卫星微波散射计具有全球海面风场的观测能力,1 d能够覆盖全球90%的海域,可以捕捉全球所有的气旋。

图9给出了海洋二号卫星微波散射计观测到的2011年10月的月平均风场。该结果表明,海洋二号

卫星微波散射计可提供气候态长时间序列的海面风场监测结果,可有效用于海面风场相关的科学研究。

台风是世界上最严重的自然灾害之一,海洋二号卫星微波散射计能够及时监测到台风的产生和发展过程,确定台风的强度、位置、方向、结构、移动路径和速度等要素,是应对台风灾害最直接有效的监测手段。图10给出了微波散射计对台风苏拉的监测过程。

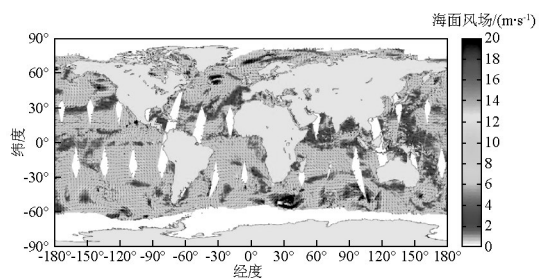


图8 2011年10月11日全球风场图
Fig.8 Wind field of the earth (2011-10-11)

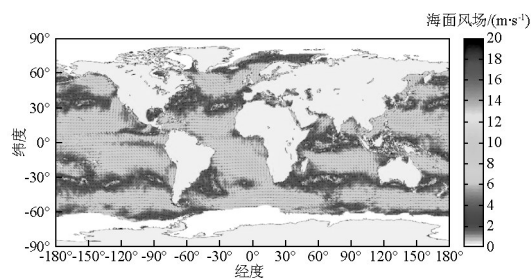


图9 2011年10月月平均海面风场图
Fig.9 Average wind field of the earth (2011-10)

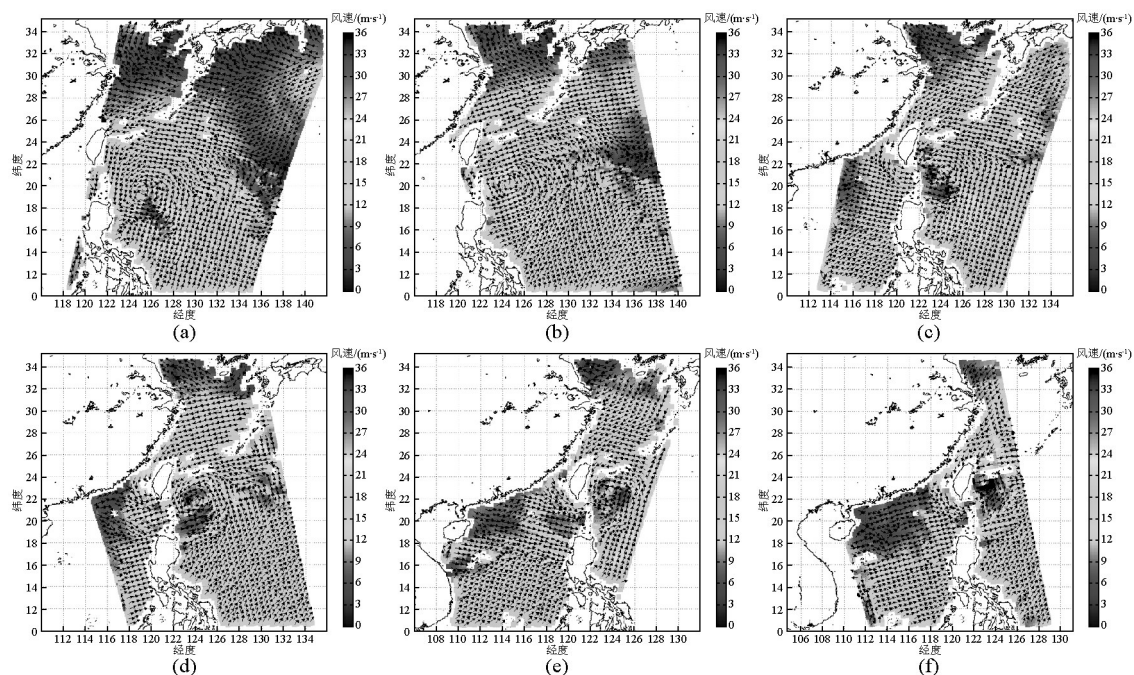


图10 微波散射计对2012年台风“苏拉”检测过程
Fig.10 Scatterometer observed the “Sula” typhonic process

5 结语

海洋二号卫星微波散射计作为我国首颗星载风场测量雷达,通过在轨运行和测试,主要性能指标达到国际先进水平,为我国海洋环境检测提供了

可靠的保证,与此同时,我国将继续研制新一代的风场测量雷达,包括极化散射计和多波段联合监测散射计,满足我国海洋环境监测、海洋气候研究的需要。

参考文献

- [1] 乌拉比 F T, 穆尔 R K. 微波遥感(第二卷: 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论)[M]. 黄培康, 汪一飞, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] 田栋轩. 星载极化散射计技术研究[D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2008.
- [3] Chialin W, Yong L, Kent K H, et al. Design and calibration of the seawinds scatterometer[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 94-109.
- [4] 穆 博. 微波散射计定标技术研究[D]. 北京: 国家海洋卫星应用中心, 2009.

The system design and application of HY-2A scatterometer

Wang Xiaoning, Liu Lixia, Chen Wenxin
(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

[Abstract] The HY-2A satellite was first launched in August of 2011, the microwave scatterometer as one of the main loads, is primarily applied in sea surface wind observation. HY-2A satellite scatterometer used two pencil beam circle scan system, and the radar worked in Ku band. The paper illuminates the scatterometer's system composition, main parameter, the in-orbit pretreatment and the results in observation to typhoon.

[Key words] HY-2A; radar; scatterometer; backscattering coefficient; calibration