

海洋二号卫星微波散射计数据 预处理技术研究

张毅¹, 林明森¹, 宋清涛¹, 解学通², 邹巨洪¹

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 广州大学, 广州 510006)

[摘要] 本文在简述海洋二号(HY-2A)星载微波散射计(简称散射计)工作原理的基础上,详细阐述了散射计数据预处理所涉及的关键技术,主要包括几何定位算法和雷达后向散射系数的计算。星载微波散射计数据的地理定位是计算遥感器观测点在地基坐标系中坐标的处理过程。地理定位需要考虑仪器扫描几何、空间位置、天线指向、地球曲率、旋转等因素。传统的遥感数据定位方法依赖于卫星轨道,定位精度难以保障, HY-2A卫星搭载了GPS传感器,提供1 s间隔的卫星平台定位数据,据此建立传感器观测几何与地面面元之间的几何模型,通过模型的解算获得观测面元中心的地理坐标,并计算观测面元的方位角、入射角等参数。随后采用参量代换法从雷达回波信号中计算后向散射系数。

[关键词] HY-2A卫星;微波散射计;预处理

[中图分类号] TP722.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)06-0062-06

1 前言

主动式微波散射计是向海面发射微波频段能量的雷达系统,它通过雷达接收回波信号的强弱并通过不同角度的回波信号反演出10 m高度海面风速和风向^[1]。随着星载散射计发射计划的增多以及在科研和业务化应用的发展,学者们普遍认为准确获取雷达回波强度信息(定义为归一化雷达后向散射系数)是决定海面风场反演质量的关键^[2]。微波散射计数据预处理过程主要包括从散射计发射和接收单元获取地面观测单元的雷达后向散射系数,并对观测面元的中心进行几何定位,获得其地理坐标的过程。准确获取观测面元的雷达后向散射系数及其地理坐标是包括风场反演在内的各种应用的基础。

我国自主研发的海洋二号(HY-2A)卫星已于2010年8月成功发射,在HY-2A之前,由于无法获

得星载微波散射计原始数据,国内学者研究领域主要集中在散射计海面风场反演算法的研究上^[3-7],在仪器硬件的设计研究和数据产品的应用研究之间存在一定的脱节。HY-2A卫星的成功发射为全面掌握主动式微波散射计预处理技术,并不断改进和提高反演风场精度提供了一个良好的机会。

本文以近年来在微波散射计预处理和风场反演方面的工作为基础^[8],充分利用HY-2A海洋卫星有效载荷微波散射计的前端数据,开展雷达后向散射系数的地理定位算法研究,探讨提高后向散射系数精度的方法,最终为提高海面风场的反演精度和定位精度打下基础。

2 HY-2A卫星微波散射计技术特点

2.1 微波散射计观测几何

HY-2A微波散射计采用双点笔形波束体制^[9]。天线采用抛物反射面天线,产生两个点波束,其中

[收稿日期] 2013-04-22

[基金项目] 国家海洋局青年基金项目;海洋公益项目(201105032,201305032);航天关键技术预先研究项目;国家自然科学基金面上项目(41076012)

[作者简介] 张毅(1983—),男,江苏大丰市人,助理研究员,博士,主要从事微波海洋遥感研究;E-mail: zhangyi@mail.nsoas.gov.cn

内波束水平极化,外波束垂直极化。通过360°旋转实现对同一分辨单元4次不同方位角测量,微波散射计观测示意图见图1。

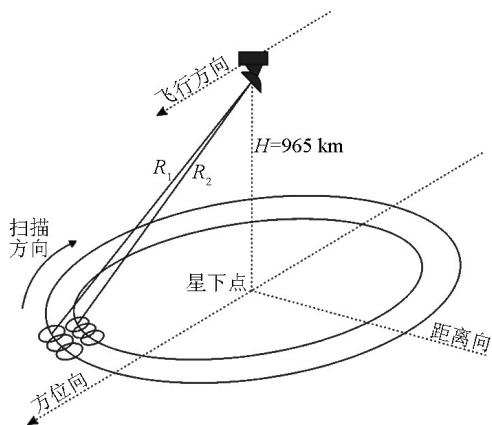


图1 HY-2A 卫星微波散射计观测示意图

Fig.1 Schematic diagram of the HY-2A scatterometer observation

天线波束围绕中心轴360°扫描,扫描速度为95°/s(低转速),或105°/s(高转速)。天线波束足迹扫描方向为逆时针。天线视角:内波束为34.8°;外波束为40.7°。

2.2 HY-2A 微波散射计工作特点

1)工作模式。设计有3种工作模式,分别为测量模式、测试模式、外定标模式。测量模式包括海面观测、内定标和噪声测量3种不同工作阶段,这3个工作阶段按照事先设计好的时序工作。测试模式包括连续定标子模式和单次采集(天线高速转、低速转都可以)子模式。外定标模式除接收机增益固定外,其他特性和正常测量模式一致。

2)收发时序。HY-2A 微波散射计采用脉冲雷达体制;设计有内外两个波束,两波束交替工作;设计有两种转速,低转速和高转速,两种转速下海面观测点数不同。设计发射脉冲时宽为1.5 ms,脉冲重复频率(PRF)为181 Hz,回波采集时间长度兼顾卫星高度和姿态的正常变化范围。

2.3 HY-2A 微波散射计的性能技术指标

HY-2A 微波散射计由探测头部、系统控制器、伺服控制器三个装星单机组成^[10]。HY-2A 微波散射计的基本工作过程为:微波发射机通过环形器与天线接通,向海面发射射频脉冲,散射回波信号被天线接收后,经环形器送到接收机,送至信号处理器。信号处理器对回波信号、内定标信号及纯噪声

信号进行处理,地面处理系统综合各测量结果获得海面散射源的后向散射系数 σ^0 、风场等。其主要性能技术指标见表1。

表1 HY-2A 微波散射计主要技术指标
Table 1 The technical specification of HY-2A scatterometer

| 参数 | 技术指标 |
|-----------------------------|------------------------------|
| 工作频率/ GHz | 13.25 |
| 观测刈幅/ km | 外波束:不小于1 700 内波束:不小于1 400 |
| 地面分辨率/ km | 25 |
| 后向散射系数 测量精度/ dB | 0.5 |
| 后向散射系数 数测量范围/ dB | -40~20 |
| 风速测量范围/($m \cdot s^{-1}$) | 2~24 |
| 风速反演精度 | ± 2 m/s 或 10 % |
| 风向反演精度/($^{\circ}$) | ± 20 |

3 HY-2A 微波散射计几何算法

3.1 坐标系的定义

1)卫星局部直角坐标系。卫星局部直角坐标系定义如下(见图2):原点—卫星质心(s/c),S轴—指向 $T \times U$,T轴—指向 $U \times v$,U轴—指向 r ;其中, v 是卫星的惯性速度, r 是地心直角坐标系中卫星的位置矢量。如果卫星轨道的偏心率为0,则S轴与速度 v 重合。

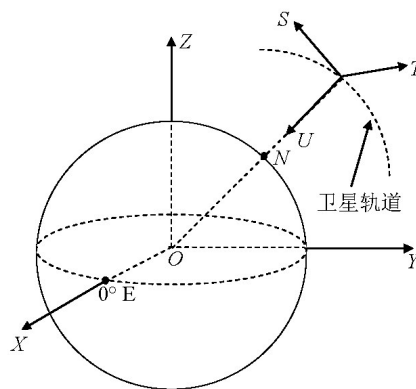


图2 地心坐标系及卫星局部坐标系示意图

Fig.2 Geocentric coordinate system and spacecraft center coordinate system

2)卫星本体坐标系。卫星本体坐标系定义如下(见图3):原点—卫星质心(s/c), X_0 轴—指向卫星

的正前方, Y_b 轴一指向卫星的右侧, Z_b 轴一指向卫星的天底方向。

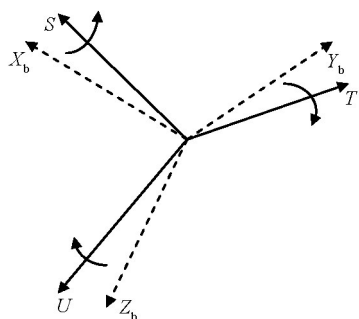


图3 卫星本体坐标系的定义

Fig.3 The local coordinate system of spacecraft

如果测滚、俯仰和偏航量都为0,则卫星的本地坐标系和局部坐标系重合。卫星的本地坐标系与局部坐标系可以通过围绕 T 、 S 、 U 轴旋转 P 、 R 和 Y 角度(即俯仰、滚动、偏航)而互相转换。

3)地心直角坐标系。地心直角坐标系定义如下:原点—地球质心, X 轴—指向 0° 经线, Y 轴—垂直于 X 轴, Z 轴—垂直于 XY 轴构成的平面。

3.2 面元中心定位

面元中心定位是指确定散射计扫描矢量与地面交点构成的面元中心的地理坐标,假设地球为椭球体,散射计扫描矢量与椭球体构成入射角 I , s 为观测方向的单位矢量, S 为斜距, n 为法向量, L 为散射计位置矢量, R 为面元中心点位置矢量。根据图4所示的几何关系,可得

$$X^2 + Y^2 + Z^2 / (1 - e^2) = a^2 \quad (1)$$

$$L + S \times s = R \quad (2)$$

式(1)、(2)中, X 、 Y 、 Z 为面元中心坐标; e 为偏心率; a 为长半轴; $L=(x, y, z)$ 散射计系统在地心坐标系下的坐标; $s=(s_1, s_2, s_3)$ 观测方向的单位矢量; S 为斜距,将公式(2)展开,带入式(1),整理后得

$$C_1 \times S^2 + 2 \times C_2 \times S + C_3 = 0 \quad (3)$$

其中,

$$C_1 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 / (1 - e^2) \quad (4)$$

$$C_2 = x \times s_1 + y \times s_2 \quad (5)$$

$$+ z \times s_3 / (1 - e^2) \quad (5)$$

$$C_3 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (6)$$

$$/ (1 - e^2) - a^2 \quad (6)$$

因此,利用式(4)至式(6)计算 C_1 、 C_2 、 C_3 ,求解二次方程(3),得到 S 后再利用式(2)求解 R 。

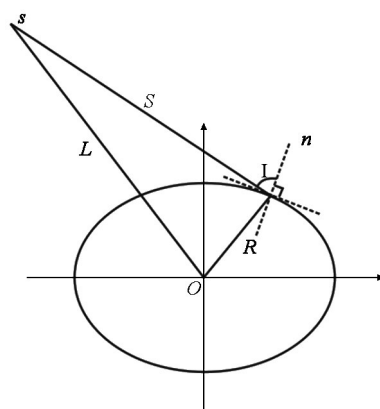


图4 散射计位置和观测方向矢量与椭球体的几何关系

Fig.4 Scatterometer location and the direction of observation vector and ellipsoid geometric relationships

s 矢量是散射计观测方向,也就是天线最大增益方向,每一个脉冲发射时刻的天线的最大增益方向可以由天线的方位角和观测视角来确定, s 矢量计算公式如下

$$F(1) = \sin(L) \cdot \cos(A) \quad (7)$$

$$F(2) = \sin(L) \cdot \sin(A) \quad (8)$$

$$F(3) = \cos(L) \quad (9)$$

式(7)~(9)中, L 为天线视角, ($^\circ$); A 为天线方位角, ($^\circ$)。

这里需要注意的是,此时的 s 矢量所处的坐标系为卫星本体坐标系,因此先要将其转换到卫星局部坐标系,再转换到地心坐标系^[11]。

L 是卫星的位置矢量, HY-2A 卫星自带了 GPS 接收机,实时记录卫星在 WGS-84 坐标系下的三维坐标,记录频率为 1 s/次, HY-2A 散射计的脉冲重复周期 (PRF) 为 5.52 ms, 因此为获取每个面冲发射时刻的卫星的位置,需要利用 GPS 位置数据进行插值处理,通常采用三次样条函数插值法。

3.3 定位精度分析

采用对比后向散射系数分布情况与海岛边界的方式对定位精度进行估算。选用海南岛作为评估的区域,后向散射系数分布如图5所示。图5中每个点的位置对应散射计测量脉冲的指向位置,颜色对应后向散射系数的大小。从图5中可以看出, HY-2A 散射计后向散射系数分布在海陆边界,变化趋势明显,定位精度小于交轨向相邻两个脉冲之间的距离。在地图上测量可获得沿天线扫描方向相邻两点间距约为 17 km,据此可估算出定位精度为 5~8 km。

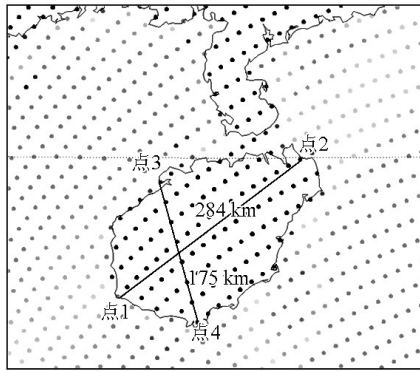


图5 HY-2A 卫星微波散射计内定位精度评价结果
Fig.5 Accuracy evaluation results of the HY-2A scatterometer inner beam

3.4 计算波束入射角

波束入射角定义为地球表面局部法矢量与卫星到面元中心方向矢量之间的夹角(见图4)。面元中心处的局部法向量为

$$\mathbf{n} = (2X/a^2, 2Y/a^2, 2Z/b^2) \quad (10)$$

式(10)中, a 为地球的半长轴; b 为地球的半短轴。入射角可由下式计算:

$$I = 180 - \arccos \left[\frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \right] \quad (11)$$

式(11)中, \mathbf{s} 为矢量 $(\mathbf{R}-\mathbf{r})$ 的单位矢量, \mathbf{r} 为卫星的位置矢量。

3.5 计算观测方位角

观测方位角是指天线波束的主瓣方向与观测面元中心所在经线构成的角度,在实际计算中,首先根据地球椭球体参数方程确定面元中心点的切平面方程,然后将面元中心点所在的经线、纬线以及观测方向单位矢量投影到该切平面,此时就可以根据投影方向矢量在投影经纬线上的分量计算观测方位角。

4 HY-2A 微波散射计物理量的计算

4.1 信号通道测量值

HY-2A 散射计“信号通道”测量值是对数据快速傅立叶变换(FFT)变换后,2 MHz 带宽内均分8块模平方累加的结果,每个数对应1个子带的能量值,按3 dB波束足迹计算, HY-2A 散射计回波对应的信号带宽为630 kHz,地面信号处理时需从信号通道8个测量值中选取对应的数累加(相邻3个数),得到足迹对应的回波能量。选取方法如下:

a. 根据在轨卫星轨道高度确定足迹近端斜距、远端斜距; b. 计算足迹近端回波、足迹远端回波对应的频率。

计算公式如下:

$$f_{\text{signal}_n} = -k \cdot \frac{2R_n}{c} = -k \cdot \frac{2(R_n - R_0)}{c} \quad (12)$$

$$f_{\text{signal}_f} = -k \cdot \frac{2R_f}{c} = -k \cdot \frac{2(R_f - R_0)}{c} \quad (13)$$

式(12)、(13)中, f_{signal_n} 、 f_{signal_f} 分别为足迹近端、足迹远端回波对应的频率; k 为发射线性调频信号调频斜率; R_n 、 R_f 分别为足迹近端、足迹远端对应斜距; R_0 为设计的参考斜距。根据 f_{signal_n} 、 f_{signal_f} 的具体数值来确定信号通道需要累加的3个切片能量值,从而得到信号通道的总能量值。

4.2 雷达后向散射系数 σ^0 计算

根据雷达方程,输入到散射计接收机的回波功率可表示为

$$P_s = \sigma^0 \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{P_t}{L_a^2 L_w^2} \int \frac{G_t(\theta, \phi) G_r(\theta, \phi)}{R^4} dA \quad (14)$$

$$\text{令 } I = \int \frac{G_t(\theta, \phi) G_r(\theta, \phi)}{R^4} dA, \text{ 则有:}$$

$$P_s = \sigma^0 \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{P_t}{L_a^2 L_w^2} I \quad (15)$$

式(14)、(15)中, λ 为波长; P_t 为雷达发射功率; L_a 为单程大气损耗; L_w 为单程波导损耗; $G_t(\theta, \phi)$ 为发射天线增益; $G_r(\theta, \phi)$ 为接收天线增益; R 为雷达到被测目标的距离; I 为天线方向图在观测面元内的积分项。

根据式(14), σ^0 可表示为

$$\sigma^0 = \frac{(4\pi)^3 L_a^2 L_w^2}{\lambda^2 I} \cdot \frac{P_s}{P_t} = \frac{(4\pi)^3 L_a^2 L_w^2}{\lambda^2 I} \cdot \frac{P_{os} L_f}{P_{os,c}} \cdot \frac{G_c}{G_{e,AGC}} \quad (16)$$

式(16)中, P_{os} 为接收通道输出端测得的回波信号功率; L_f 为内定标回路损耗系数; $P_{os,c}$ 为接收通道输出端测得的内定标信号功率; G_c 为内定标时接收机自动增益控制值; $G_{e,AGC}$ 为回波测试时实时对应的接收机自动增益控制值。

HY-2A 卫星获得的一轨雷达后向散射系数分布见图6,从图中可以看出海表、陆地以及南北两极的雷达后向散射系数呈现出各自的特征,后续的反演工作将在此基础上展开,如海面风场反演、陆地土壤水分反演、极地海冰反演等。

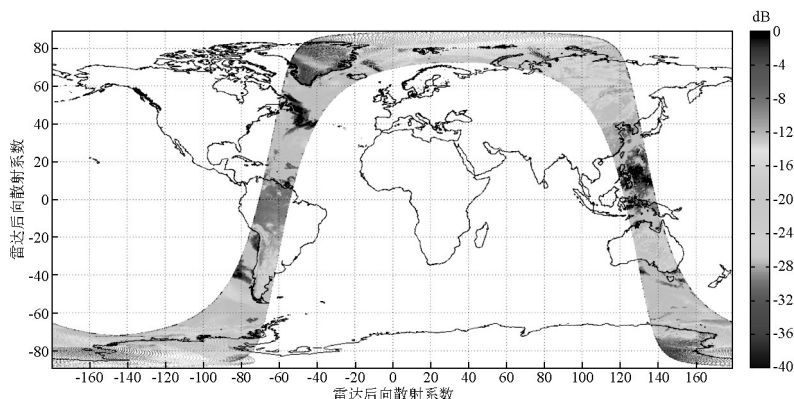


图6 HY-2A微波散射计观测所得的雷达后向散射系数全球分布图

Fig.6 Global map of normalized radar backscatter coefficient acquired by HY-2A scatterometer

注:数据获取时间:2011-10-20

5 结语

星载微波散射计数据预处理定义为从散射计0级数据出发,获取海面后向散射系数并进行几何定位的过程。一方面,预处理的结果是传感器工作性能、仪器状态的最直接的反映;另一方面也是进行海面风场反演及其他相关应用的基础,在整个散射计系统硬件研发和后续的数据应用中处于承上启下的位置,而显得非常重要,因此散射计数据预处理技术是本文研究的重点。目前,我们国家的HY-2A卫星搭载的微波散射计传感器已经正常在轨运行,其工作机制与SeaWinds相仿,各项性能技术指标均达到设计要求,在后续的海洋二号系列卫星中还将继续搭载散射计传感器,为改进提高仪器的性能,迫切需要对传感器获取的原始数据进行细致而深入的研究,为传感器相关参数的改进提供科学的依据,这是散射计数据预处理技术研究所关注的焦点,也是本文研究的意义所在。

参考文献

- [1] Michael W S. A methodology for the design of spaceborne pencil-beam scatterometer systems[D]. USA: Brigham Young University, 2001.
- [2] Moor R K. Radar sensing of the ocean[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1985(2):84-113.
- [3] 林明森. 一种修正的星载散射计反演海面风场的场方式反演算法[J]. 遥感学报, 1997, 4(1):61-65.
- [4] 林明森, 宋新改, 彭海龙, 等. 散射计资料的风场神经网络反演算法研究[J]. 国土资源遥感, 2006(2):8-12.
- [5] 解学通, 郁文贤. 基于遗传算法的微波散射计海面风矢量反演研究[J]. 海洋通报, 2008, 27(4):1-11.
- [6] 解学通, 方裕, 陈克海, 等. SeaWinds 散射计海面风场神经网络建模研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2):12-17.
- [7] 邹巨洪, 林明森, 潘德炉. QuikSCAT 风矢量快速反演的后向散射系数预处理算法[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(2):36-41.
- [8] 张毅, 林明森, 蒋兴伟. 神舟4号(SZ-4)多模态遥感器散射计数据预处理及sigma-0数据显示[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(6):801-805.
- [9] 许可, 董晓龙, 张德海, 等. HY-2 雷达高度计和微波散射计[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1):89-93.
- [10] 朱素云, 刘浩, 董晓龙. 海洋二号有效载荷微波散射计数据处理系统的设计[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(2):152-154.
- [11] Scott Dunbar R, Vincent Hsiao S, Young-Joon Kim, et al. Science algorithm specification for SeaWinds on QuikSCAT and SeaWinds on ADEOS-II[R]. California: Jet Propulsion Laboratory, 2001.

Research on the preprocessing of HY-2A space-borne scatterometer data

Zhang Yi¹, Lin Minseng¹, Song Qingtao¹,
Xie Xuotong², Zou Juhong¹

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

[Abstract] This paper describes the key technologies involved in the scatterometer data preprocessing, which include the geometric positioning algorithm and the radar backscatter coefficient calculation algorithm. The geometric positioning of space-borne scatterometer data is a process of obtaining the coordination of measuring pulse, which needs to consider the instrument scan geometry, spatial location, antenna pointing, earth curvature, rotation, and other factors. The traditional method of geometric positioning of space-borne scatterometer data depends on the satellite ephemeris with a low positioning accuracy. HY-2A satellite is equipped with a global positioning system (GPS) sensor to provide the location of the satellite platform with 1 s interval. Accordingly, the geometric relationship between sensor observation and ground surface can be established. The geographic coordination of the observation cell center, observation azimuth angle and incidence angle can be determined using this geometric relationship. The radar backscatter coefficient is calculated with a parameter substitution method.

[Key words] HY-2A satellite; microwave scatterometer; preprocessing