

HY-2 卫星扫描微波辐射计多通道分辨率匹配技术研究

黄磊¹, 周武¹, 李延民²

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 中国航天科工集团公司第五研究院西安分院, 西安 710100)

[摘要] 星载微波辐射计多通道海洋参数反演需要基于同一位置、同一分辨率的多通道观测值, 但由于星载微波辐射计设计的局限性, 多通道观测地面像元位置和分辨率均不同, 因此运用多通道分辨率匹配技术统一观测面元是扫描微波辐射计数据处理中的关键技术, 基于海洋二号(HY-2)卫星扫描微波辐射计的成像原理和天线方向图, 模拟各通道天线方向图在地面的投影, 用 Backus-Gilbert (BG) 算法将高频观测亮温重采样到最低的低频 6.6 GHz 通道的观测位置和像元分辨率。结果表明, BG 降低分辨率重采样算法能得到很好的拟合效果, 并且不另引入噪声。

[关键词] 扫描微波辐射计; HY-2; 分辨率匹配; BG 算法

[中图分类号] V443 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)06-0065-05

1 前言

被动微波辐射计能够监测海洋大范围的变化, 相对于主动微波遥感, 其传感器体积和功耗小, 在没有暴雨的情况下, 仪器几乎能全天候透过云层观测海洋表面, 是获取大气、海面和陆地等多领域环境信息的重要手段。但微波辐射计受自身系统的限制, 其空间分辨率依赖于天线的尺寸, 并与频率相关, 受卫星有效载荷体积和重量的限制, 星载微波辐射计无法配装大型天线, 不同的频率的馈源共用一个反射面天线, 导致各通道观测的入射角度不同, 对应的地面观测位置、覆盖范围和分辨率也不相同。在进行微波辐射计海洋参数反演时, 需要用到多通道亮温进行综合计算, 这要求多通道地面观测位置和面元要一致, 即将高分辨率的观测结果降低到低分辨率的尺度, 或者将低分辨率的观测结果提高到高分辨率的尺度, 前者会导致高分辨率通道

的细节信息丢失, 后者会引入大量的噪声, 降低观测精度。由于海面温度和海面风场的观测主要受低频影响, 且为了保证观测的准确性, 所以星载微波辐射计多采用降低分辨率的多通道分辨率匹配技术进行地面像元重构, 将同一时刻所有通道的观测值统一到同一位置和分辨率。

目前星载微波传感器空间匹配算法主要有 Backus 和 Gilbert 提出的 BG 算法^[1]、Sethmann 的图像反卷积技术等。其中 BG 算法广泛应用于国外的星载多通道扫描微波辐射计, 如 SSM/I、AMSR-E 等微波辐射计^[2,3]。在国内, 也有众多将 BG 算法应用于微波辐射计的研究^[4,5], 并将此算法应用于 FY-3 卫星 MWRI 上^[4,6]。BG 算法通过模拟不同频率天线增益到地面的投影, 通过重采样算法, 利用邻近观测像元重叠部分, 重构指定位置的观测结果, 并尽可能地接近真实的天线增益方向图。

HY-2 卫星上搭载的扫描微波辐射计是一台设

[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)项目“海洋动力环境微波遥感信息提取技术与应用”(2013AA09A505)

[作者简介] 黄磊, 1982 年出生, 男, 湖北潜江市人, 助理研究员, 研究方向为微波遥感; E-mail: huanglei@mail.nsoas.gov.cn

计有9个通道的辐射计,可以监测海面温度、海面风场、海冰、降雨等海洋大气参数,其频率设置为6.6 GHz、10.7 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、37.0 GHz,除23.8 GHz频率仅有垂直极化通道,其余频率均包含水平极化通道和垂直极化通道,辐射计采用圆锥扫描的方式,天线的俯仰角为40°,幅宽1 600 km,地面分辨率优于100 km、70 km、40 km、35 km、25 km。根据HY-2扫描微波辐射计的观测特性,本文应用BG算法进行了多通道分辨率匹配研究,其中涉及观测几何定位、天线方向图地面投影、目标方向图重构,并对结果进行了分析,根据评价结果给出了HY-2扫描微波辐射计多通道分辨率匹配的方案。

2 BG反演算法

BG算法是由Stogryn将Backus-Gilbert矩阵反演方法引入星载微波辐射计系统提出的。根据Stogryn^[7],用 $G(\rho_A, \rho)$ 表示地球坐标系下中心位置在 ρ_A 的增益方向图 ρ 位置的有效天线增益,是采样积分时间 τ 和瞬时传感器方向图 G_t 的函数

$$G(\rho_A, \rho) = \frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} dt G_t(\hat{s}_0(t), \hat{s}(t)) \left[\frac{-\hat{s}(t) \cdot \hat{\rho}}{s^2(t)} \right] \quad (1)$$

式(1)中, $\hat{s}_0(t)$ 表示 t 时刻的天线视线方向; $\hat{s}(t)$ 表示传感器到位置 ρ 的单位矢量。 ρ_A 对应的有效天线指向为

$$\hat{s}_A = \frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} dt \hat{s}_0(t) \quad (2)$$

则第 i 次观测亮温则是地球表面亮温在天线增益上的积分

$$T_{Bi}(\rho_{Ai}) = \int_E dA G(\rho_{Ai}, \rho) T_B(\rho) \quad (3)$$

BG反演算法是寻找相邻观测值 T_{Bi} 一组最优的线性组合,重构出一个最接近于真实测量值 T_{BC}

$$T_{BC} = \sum_{i=1}^N a_i T_{Bi} = \int_E dA \left[\sum_{i=1}^N a_i G(\rho_{Ai}, \rho) \right] T_B(\rho) \quad (4)$$

根据最小二乘原理,使得重构亮温与参考亮温最为接近必须满足3个条件,首先是 G 为归一化,即 a_i 的总和为1,第2个约束条件Stogryn将其称为分辨率价值函数

$$Q_R = \int_E dA \left[G(\rho_r, \rho) - \sum_{i=1}^N a_i G(\rho_{Ai}, \rho) \right]^2 J(\rho_r, \rho) \quad (5)$$

式(5)中, J 为补偿函数,用来产生理想的天线方向图,通常将 J 设置为1。第3个约束条件是重构观测

亮温的噪声最小,实际观测亮温中叠加有随机噪声信号,噪声的方差为 $(\Delta T_i)^2$,则重构亮温的方

$$e^2 = (\Delta T_i)^2 = \mathbf{a}^T \mathbf{E} \mathbf{a} \quad (6)$$

式(6)中, \mathbf{a} 是元素 a_i 的列向量; \mathbf{E} 是误差协方差矩阵。

为了在噪声和重构分辨率之间寻求折中,Stogryn建立了分辨率噪声权衡函数

$$Q = Q_0 \cos \gamma + e^2 w \sin \gamma \quad (7)$$

式(7)中, w 为尺度因子,用于确保 Q_0 和 $e^2 w$ 在量级上接近; γ 为平滑参数,一般取值在 $0 \sim \pi/2$ 。在归一化条件 $\int_E \sum_{i=1}^N a_i G(\rho_i) dA$ 下,可获得使 Q 最小化的权重系数可表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{Z}^{-1} \left[\cos \gamma \mathbf{v} + \frac{1 - \cos \gamma \mathbf{u}^T \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{v}}{\mathbf{u}^T \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{u}} \mathbf{u} \right] \quad (8)$$

式(8)中,

$$\mathbf{Z} = \mathbf{G} \cos \gamma + \mathbf{I} w \sin \gamma \quad (9)$$

式(9)中, \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{G} 为 $N \times N$ 对称矩阵,表示参与采样足印面元的重叠度。

$$G_{ij} = \iint_E dA G_i(\rho) G_j(\rho) \quad (10)$$

$$u_i = \iint_E dA G_i(\rho) \quad (11)$$

$$v_i = \iint_E dA G_i(\rho) G_r(\rho) \quad (12)$$

3 BG算法在HY-2扫描微波辐射计数据上的实现

针对于HY-2卫星扫描微波辐射计各频率观测面元不同,运用BG算法来实现对各频率数据的分辨率匹配计算。大致的过程包括微波辐射计定位、各通道天线方向图地面投影、BG匹配算法重采样系数生成和面元重构结果评价分析。

3.1 HY-2扫描微波辐射计观测几何

通过HY-2扫描微波辐射计仪器的姿态和卫星的轨道位置,可以推算出各频率在地面的足印位置,主要包括由传感器坐标系-平面大地坐标系-地心坐标系的坐标系转换和俯仰、航偏、滚动等姿态角度的旋转,结合各频率的天线方向图,即可模拟各通道在地面的投影区域。

HY-2扫描微波辐射计上各个馈源通过反射面接收辐射能量,由于多个馈源接受信号,各通道观测角度不同,所以同一时刻,各频率在地面的投影位置也不相同,如图1所示,37 GHz地面观测中心点位置与6.6 GHz观测面元中心位置并不重合。此外,由于HY-2扫描微波辐射计低频6.6 GHz,

10.7 GHz 与高频 18.7 GHz、23.8 GHz、37 GHz 的馈源分别位于飞行方向的两侧,高频通道与低频通道观测的覆盖范围也不一样,如图2所示,它们只有中间 143 个观测面元是重叠覆盖并包含所有观测通道的,每个扫描行的初始和结尾部分,只有高频观测或者低频观测,这部分观测区域无法反演全部的海洋大气参数。中间重合的部分即是需要进行空间分辨率匹配的区域。

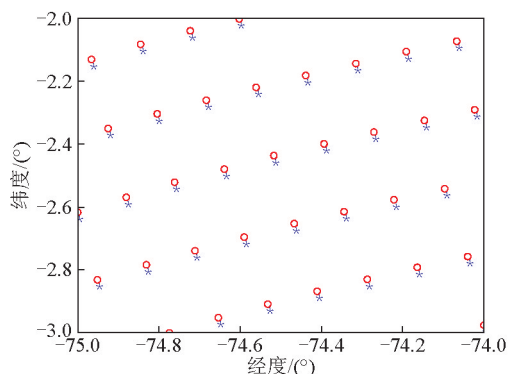


图1 6.6 GHz 和 37 GHz 观测面元地面投影位置分布
Fig. 1 The observation area center arrangement of 6.6 GHz and 37 GHz

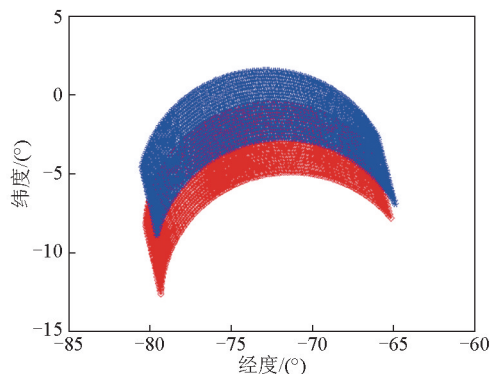


图2 6.6 GHz 和 37 GHz 覆盖范围重叠图
Fig. 2 The overlap of observation coverage between 6.6 GHz and 37 GHz

3.2 天线方向图地面投影

在获得准确的定位算法后,按各通道的观测几何,将天线方向图投影到地面,方向图地面投影的采样分辨率为 1 km,选取沿轨道方向 31 行,扫描向 150 列,天线方向图选取增益下降 -10 db 的区间,

生成的各通道天线方向图地面投影的结果如图 3 所示。

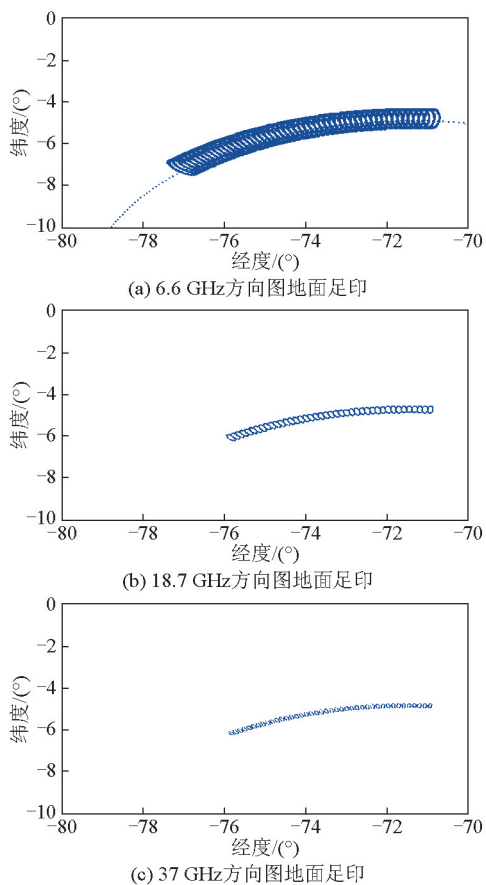


图3 地面足印
Fig. 3 Simulated scan antenna footprint

3.3 BG 匹配算法重采样系数计算

由生成的天线方向图地面足印,用BG算法进行通道分辨率降低匹配计算,由于微波辐射计 6.6 GHz 频段为海面温度反演的关键通道,而且在多通道综合反演算法中,大气和海洋参数的反演均需要用到低频部分,所以本文将 6.6 GHz 的天线方向图作为参考方向图。用 18.7 GHz 的垂直极化 (V) 天线方向图拟合得出 6.6 GHz V 极化天线方向图,用 37 GHz 的 V 极化天线方向图拟合得出 6.6 GHz V 极化天线方向图,如图 4 所示。根据天线方向图地面高低频足印的重叠范围,本文采用 15×15 的重采样窗口。由图 4 可知,对分辨率降低的计算,BG 算法能很好地用高分辨率天线方向图拟合低分辨率天线方向图。

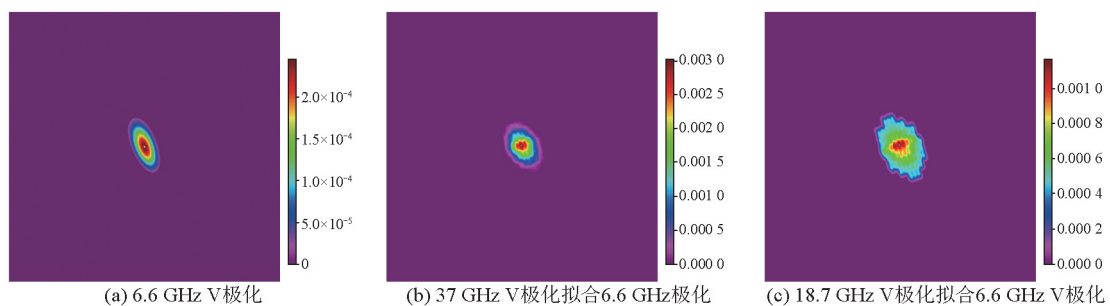


图4 极化天线方向图

Fig. 4 Polarization antenna pattern

BG算法可同时进行通道分辨率降低和增强两种运算,但进行分辨率增强会引入噪声,根据杨虎的研究^[5],针对扫描微波辐射计,利用低频数据进行重采样,不能完全拟合出高频分辨率的天线方向图,本文对此就不再进行计算分析。

3.4 拟合系数应用及评估

为检验BG算法,本文将重采样系数应用于HY-2扫描微波辐射计L1B亮温数据中。由于HY-2扫描微波辐射计有高频和低频两组馈源指向,造成

了高频数据和低频数据在地面的投影仅有中间的134列重合,另在扫描方向上,各扫描点的位置不同,观测角度有所变化,则相邻面元的相互关系不同,因此需要对扫描行中的各点分别选取不同的拟合系数。图5表示的是37 GHz垂直极化通道观测亮温匹配到6.6 GHz垂直极化通道分辨率的情况。从图5可看出,经过图像降低分辨率的处理后,图像的细节信息有所弱化,但是仍然保留了其通道原有的观测特点,能反映出海上的水汽分布。

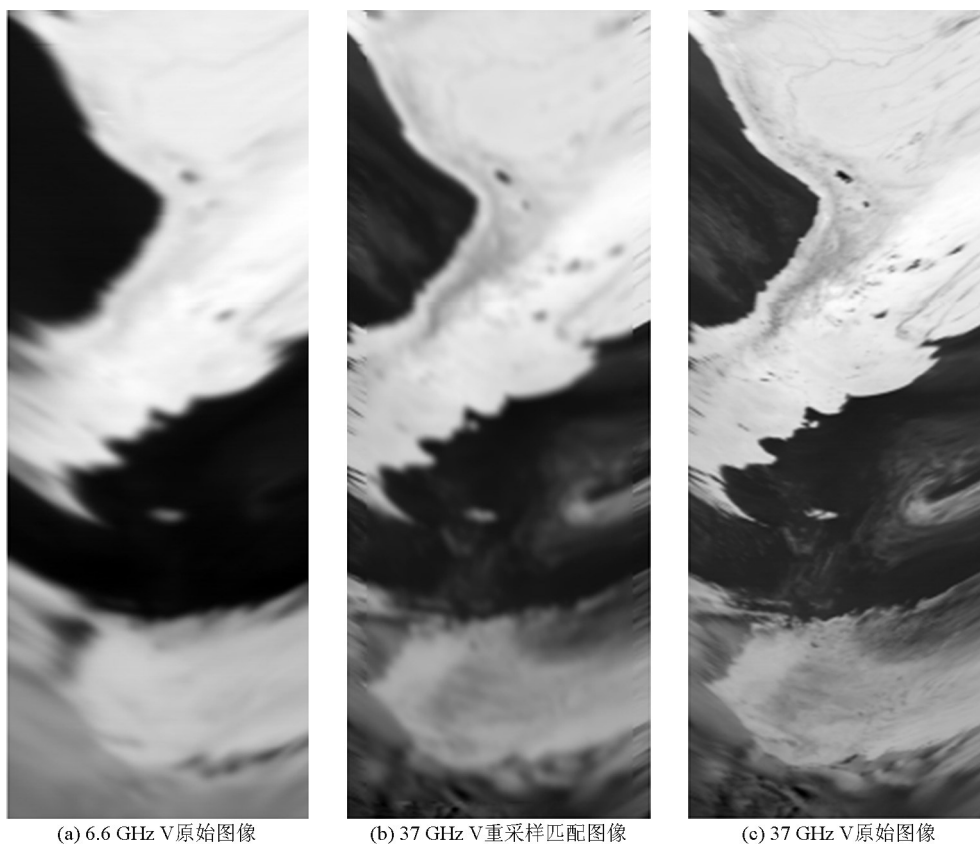


图5 37 GHz V极化匹配到6.6 GHz V极化分辨率的结果

Fig. 5 37 GHz V matched to 6.6 GHz V resolution image

4 结语

本文详细阐述了BG算法的原理,并针对HY-2扫描微波辐射计各观测通道地面观测位置和足印覆盖范围不匹配的情况,以天线方向图为基础,利用BG算法进行了降分辨率足印匹配研究,结果表明,通过合理的参数选取,能很好地将高频通道的观测结果拟合到低频通道的观测,且不引入噪声,这对后期扫描微波辐射计海洋大气参数的反演将起到十分重要的作用。

参考文献

- [1] Backus G, Gibert F. Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problem [J]. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 1967, 13: 247-276.
- [2] Farrar M R, Smith E A. Spatial resolution enhancement of terrestrial features using deconvolved SSM/I microwave brightness temperatures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1992, 30(2): 349-355.
- [3] Robinson W D, Kummerow C, Olson W S. A technique for enhancing and matching the resolution of microwave measurements from the SSM/I instrument [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(3): 419-429.
- [4] 李靖,王涛,张升伟,等. 利用BG算法提高微波辐射计空间分辨率[J]. *遥感学报*, 2004, 8(5): 409-413.
- [5] 杨虎,商建,吕利清,等. 星载微波辐射计通道分辨率匹配技术及其在FY-3卫星MWRI中的应用[J]. *上海航天*, 2012(1): 23-28.
- [6] 尹红刚,张德海. 星载微波辐射计空间分辨率增强算法研究[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(增): 192-197.
- [7] Stogryn A. Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data [J]. *IEEE Transaction Antennas and Propagation*, 1978, 26(5): 720-726.

Study on channel resolution matching algorithm for HY-2 satellite scanning microwave radiometer

Huang Lei¹, Zhou Wu¹, Li Yanmin²

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. The Fifth Institute Xi'an Branch of China Aerospace Science and Industry Corporation, Xi'an 710100, China)

[Abstract] Accuracy satellite scanning microwave radiometer ocean parameters retrieval needs brightness temperature of multiple channels from the same area and identical resolution. Due to the limitation of spaceborne radiometer antenna design and feedhorn arrangement, each channel has different resolutions and observation positions, which will increase the ocean parameter retrieval error. Based on the HY-2 scanning microwave radiometer antenna pattern and imaging geometry, we simulate the ground footprint form different channels, use Backus-Gilbert (BG) algorithms to produce a single composite sample at a particular location and with a particular spatial weighting pattern from combination of the adjacent measurements; the low frequency 6.6 GHz is set as the reference channel. The result shows that the matching with resolution decreasing could simulate the real instrument observation without introducing noise.

[Key words] scanning microwave radiometer; HY-2; resolution matching; Backus-Gilbert algorithm