

基于动态滤波重采样的星载微波辐射计观测亮温方法^①

王兆徽^{②***} 刘宇昕^{***} 宋清涛^{③***} 刘 伟^{****}

(* 国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

(** 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室 北京 100081)

(*** 庄河市高级中学 大连 146400)

摘 要 研究了星载微波计的亮温观测,针对目前常用的采用重采样的固定滤波方法不考虑观测几何变化的不足,开发了一种采用基于 Backus-Gilbert (BG) 方法的动态滤波重采样的亮温观测方法,该方法从卫星观测方式入手,考虑了观测几何沿经线方向和沿纬线方向的变化,采用线性插值的方法对滤波模板进行实时更新,实现了动态滤波重采样的目的。对该方法并进行了仿真试验和基于对地观测的先进扫描微波辐射计 (AMSR-E) 观测资料的真实数据试验,试验结果表明,这种方法的匹配误差小于固定滤波方法且具有较高的计算效率,具有良好的业务化应用潜力。

关键词 星载微波辐射计,先进扫描微波辐射计 (AMSR), Backus-Gilbert (BG) 算法,动态滤波重采样

0 引 言

目前,使用微波遥感技术可以方便地获取全球范围内的海面温度、海面风速、水汽含量、液水含量等信息,这些信息可为全球水循环研究、全球气候变化研究、海洋环境预报与监测、海洋灾害防护、海上执法维权等领域提供重要的帮助。星载微波辐射计通过测量地球表面热辐射辐射出的电磁波,能够有效地获取这些海洋大气参数。由于微波辐射计通常采用具有不同空间分辨率的不同频段进行观测,因此其观测结果需要进行分辨率的统一重采样处理。目前常用的重采样技术大多基于 Backus-Gilbert (BG) 算法^[1, 2],该算法采用固定滤波模板对高频段低分辨率的观测亮温滤波处理,使之分辨率与低频的低分辨率的观测亮温相同。Stogryn^[3]首先将 BG 算法引入了微波遥感领域。在这之后,国内外的许

多学者也展开了相应的研究^[4-9]。本文在 BG 算法的基础上,考虑了不同观测点的卫星观测几何差异并建立仿真试验模型,在 BG 算法的基础上提出了采用动态滤波重采样的亮温观测方法,并对其进行了仿真试验和真实数据试验。这种方法从观测几何的经向变化和纬向变化入手,采用线性插值的方式,使重采样的滤波模板在不同的观测点进行动态更新。本文以搭载于地球观测卫星 (EOS Aqua) 的先进扫描微波辐射计 (advanced microwave scanning radiometer for earth observation, AMSR-E) 为例进行了试验。36.5GHz 观测亮温重采样到 18.7GHz 的试验结果表明,相比于常用的固定滤波模板的重采样方法,我们提出的新方法在保证计算效率的同时,能够有效地降低观测几何的差异带来的重采样误差。中国未来的海洋卫星发射计划包括一系列的微波辐射计,以及盐度试验卫星^[10]。该新方法的开发有助于改进星载微波辐射计的数据质量,提高反演产品

① 国家自然科学基金面上项目 (41276019,41076012) 和海洋公益性行业科研专项 (201305032) 资助项目。

② 男,1989 年生,硕士;研究方向:微波海洋遥感;E-mail: wzh@mail. nsoas. org. cn

③ 通讯作者;E-mail: qsong@mail. nsoas. org. cn

(收稿日期:2016-08-01)

精度。

1 BG 方法观测亮温重采样原理

天线测量获得的观测亮温可以表示为天线增益与地表辐射卷积的形式。当测量时间非常短时,观测亮温可以简写为如下形式^[11]:

$$T_{Bi} = \int T_i(\rho) G_i(\rho) dA \quad (1)$$

式中 $T_i(\rho)$ 表示位置向量为 ρ 的地表辐射, $G_i(\rho)$ 表示某一特定观测的归一化天线增益, dA 表示积分为地表面积积分。文中下标 i 均表示参与运算的第 i 个观测亮温。

$$\int dA G_i = 1 \quad (2)$$

任意位置的观测亮温由于客观条件并不能通过测量获得,然而可以通过某种线性运算建立该位置周围的测量结果与这一未知结果的近似关系。Stogryn 采用 BG 方法构造了任意位置的天线亮温,并用观测该点附近获得的已知天线亮温进行线性替代:

$$T_B(\rho_0) = \sum_{i=1}^N a_i T_{Bi} = \int T_B(\rho) \left[\sum_{i=1}^N a_i G_i(\rho) \right] dA \quad (3)$$

显而易见,获得系数 a_i 就成了解决这一问题的关键。式(3)里中括号内的部分在 BG 方法中被称为构造天线方向图。一种方便的获得系数 a_i 的方式是将目标方向图(用 F 表示)和构造方向图之差最小化,最小化的结果称为匹配误差(fit error):

$$Q = \int dA \left[\sum_{i=1}^N a_i G_i(\rho) - F(\rho) \right]^2 \quad (4)$$

此外,由于观测获得的天线温度并不能完全准确地获得,总是被随机噪声所影响,因此噪声对重采样的影响同样需要注意。如果假设噪声的方差为 ΔT ,均值为 0,则构造的 T_B 中由测量误差造成的方差为

$$e = a^T E a \quad (5)$$

其中 E 是卫星观测值的方差构成的矩阵, a 是 BG 方法中获得的系数。若观测值互相独立且每次观测

的仪器状态、观测时间等观测要素基本相同,那么 E 就是一个对角元素为 ΔT 的对角阵。此外,还定义了与观测噪声无关的噪声参数(noise factor, n_f)表示观测误差引入的权重分配,它用下式表示:

$$n_f = \sqrt{a^T a} \quad (6)$$

AMSR 的 Level 2A 算法提出使用平滑参数(smoothing parameter) β 来引入测量误差对重采样过程的影响,这样式(4)可以改写为

$$Q_0 = Q + e\beta \quad (7)$$

最小化式(7),可以方便地获得重采样系数的解析解:

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

其中:

$$V = G + E\beta \quad (9)$$

$$u_i = \int G_i(\rho) dA \quad (10)$$

$$v_i = \int G_i(\rho) F(\rho) dA \quad (11)$$

$$G_{ij} = \int G_i(\rho) G_j(\rho) dA \quad (12)$$

平滑参数、噪声参数和匹配误差之间有一个明显的单调变化关系:平滑参数的变大导致噪声参数变小,噪声参数变小导致匹配误差变大。一般而言,我们认为噪声参数越大越好,匹配误差越小越好。因此一个合理的选定平滑参数的方法是:当平滑参数从 0 向无穷大变化时,首次出现构造天线方向图非负的平滑参数即为最佳平滑参数。

2 观测亮温重采样的动态滤波方法

我们使用减削圆形口径天线方向图模型、正轴等距投影等方法建立了对地观测的先进扫描微波辐射计(AMSR-E)的天线方向图地表投影^[12],并使用 36.5GHz 和 18.7GHz 的仿真数据进行试验。这两个通道的地表天线方向图面积最小,计算简便。同时为了讨论的方便,我们约定了观测点的计数规则,展示在图 1 和图 2 中。obs8、obs122、obs236 是一轨数据中具有代表性的 3 个数据带,分别表示每一个扫描周期的第 8 个观测数据(临近一个扫描周期起始的观测点)、第 122 个观测数据(一个扫描周期的中间观测点)、第 236 个观测数据(临近一个扫描周

期结束的观测点)。图 2 是进行重采样计算时的升轨观测计数方式。降轨观测计数方式与之类似,关于图 2 的观测中心 Point113 中心反射。

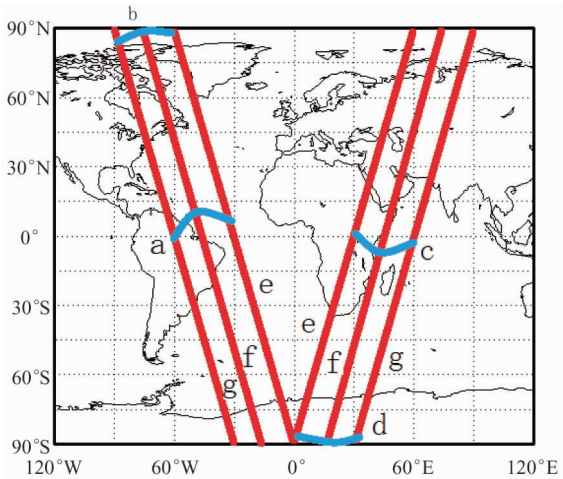


图 1 观测的计数规则,左侧升轨,右侧降轨
e、f、g 为 obs8、122、236

首先,本文分析了 7 个典型区域在选取最佳平滑参数时的噪声参数、匹配误差变化(图 3)。图 3

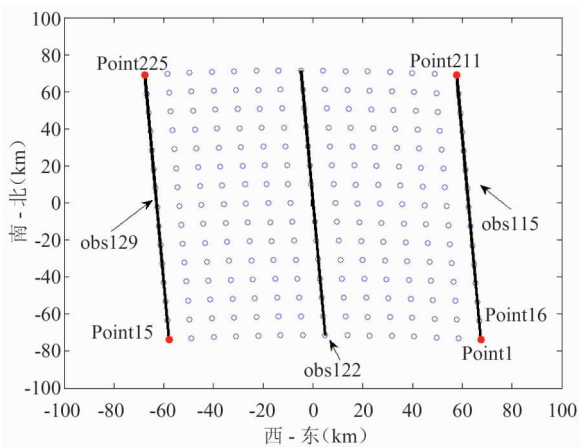


图 2 升轨 15 × 15 观测区域(观测四边形)编号

的横轴是观测计数,其中(a)、(b)、(c)、(d)为图 1 中相应位置的逆时针方向计数,(e)、(f)、(g)为图 1 中相应位置的南北极绕行(南极-北极-南极)计数。噪声参数和匹配误差有这样的规律:沿纬线方向形变幅度剧烈;沿经线方向形变幅度较小,且在南北极之间近似为线性关系。

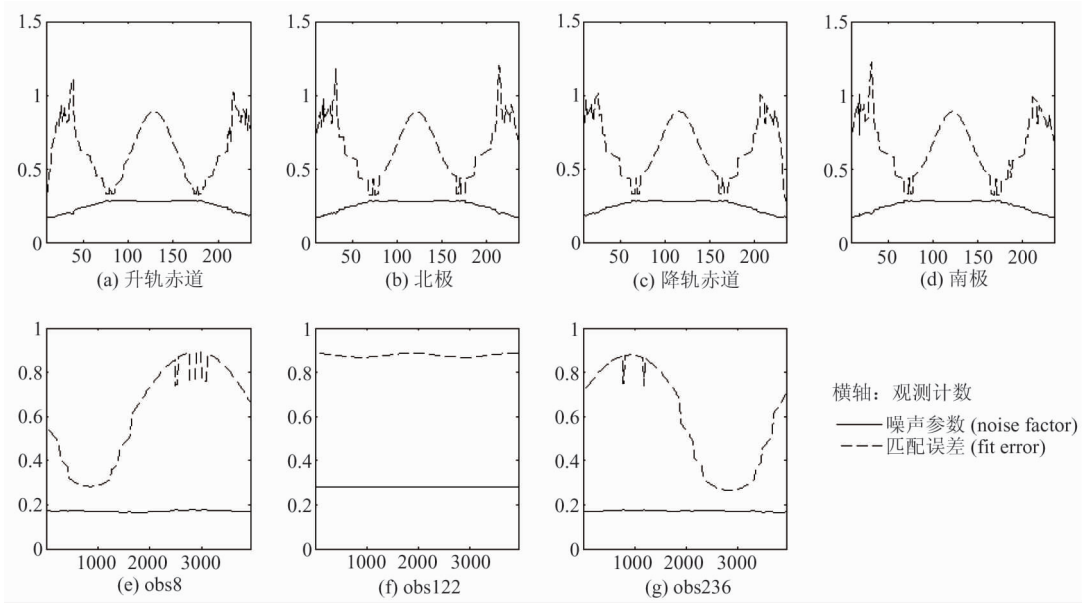


图 3 七个区域最佳平滑参数时的噪声参数和匹配误差

其次,本研究以观测点为元素,分析了重采样区域内观测点构成观测四边形的几何形变(图 4)。根据星载微波辐射计的观测机制,其观测点构成的观测四边形近似为平行四边形。因此通过对角线长度和对角线夹角就能方便的描述观测四边形的形状。

图 4 与图 3 相同,横轴是观测计数,其中(a)、(b)、(c)、(d)为图 1 中相应位置的逆时针方向计数,(e)、(f)、(g)为图 1 中相应位置的南北极绕行(南极-北极-南极)计数。通过对图 4 的分析能够有效的获得噪声参数和匹配误差这二者变化的原因。刈

幅内不同区域的 15×15 观测点构成的观测四边形形变的规律与噪声参数和匹配误差的变化规律类似:沿纬线方向形变幅度剧烈;沿经线方向形变幅度较小,且在南北极之间近似为线性关系。观测四边形的形变是噪声参数和匹配误差变化的直接原因,而观测四边形的形变是由星载微波辐射计圆锥扫描

的观测方式和地球自转线速度的空间分布差异造成的。这二者中,星载微波辐射计圆锥扫描的观测方式是观测四边形形状沿纬线方向变化(图 4(a)、(b)、(c)、(d))的主要原因,地球自转线速度的空间分布差异是观测四边形形状沿经线方向变化(图 4(e)、(f)、(g))的唯一原因。

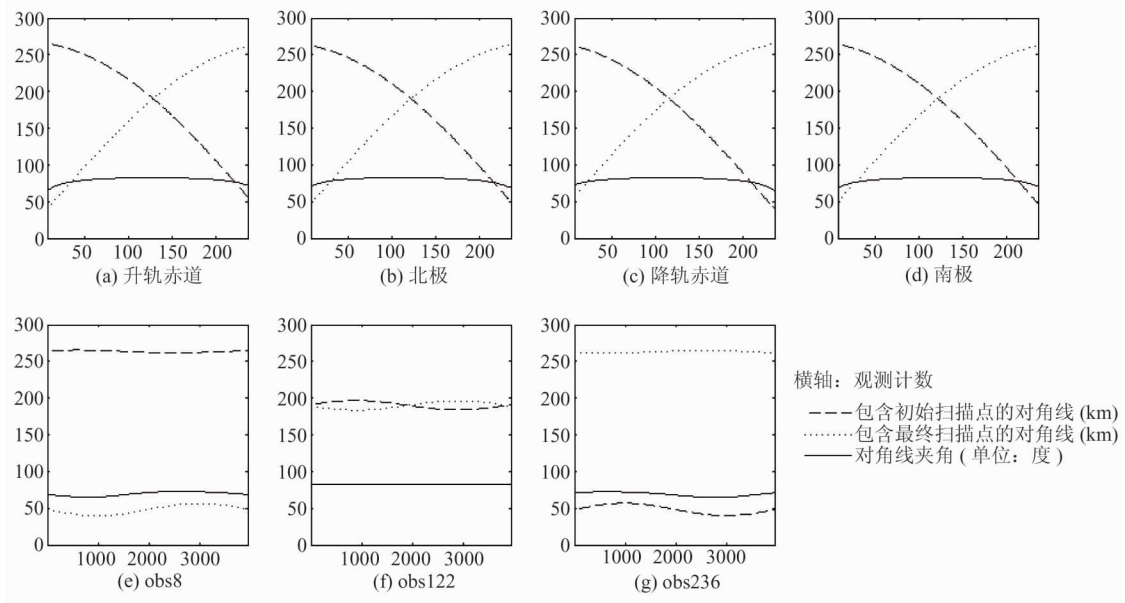


图 4 7 个区域观测四边形形变

由于天球坐标系统中,地球自转线速度的空间分布规律远比传感器扫描速度在一个扫描周期内的变化规律简单,也就是说观测四边形形状的沿经线

方向变化规律比沿纬线方向变化规律简单。据此本文分析了沿经线方向滤波模板的系数变化规律(图 5)。发现观测四边形的中心和 4 个顶点滤波系

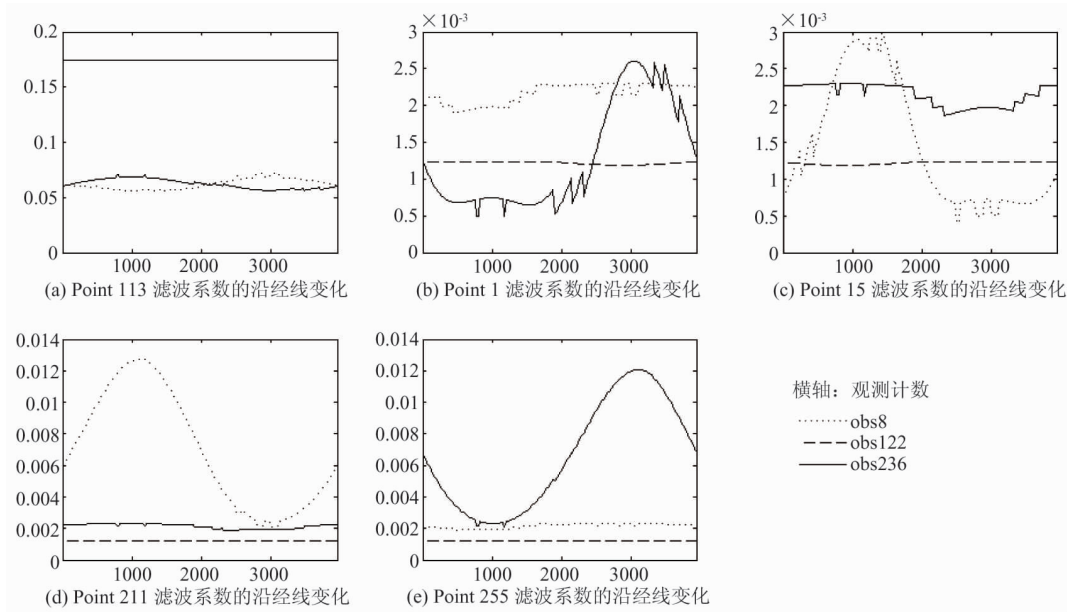


图 5 三个观测带滤波模板顶点及中心的系数沿经线方向变化

数沿经线方向的变化,在南北极之间基本是线性的。

于是,本文设计了这样的动态滤波重采样方式:以升轨赤道、北极、降轨赤道、南极四个观测带(图 1 (a)、(b)、(c)、(d)四个位置)为插值节点,沿经线方向对滤波模板的系数进行关于观测计数的线性插值。

3 动态滤波的仿真实验

本文比较了目前常用的固定模板滤波的重采样方法(图 6 中虚线)和本文提出的动态滤波重采样

方法(图 6 中黑实线),并将这两种方法的重采样结果与每个观测点最佳平滑参数下的重采样结果(图 6 中参考匹配误差)相比较。固定模板滤波是目前业务化最常用的方式,通常是以升轨 obs122 距赤道最近的观测点为重采样中心计算的重采样系数。由于动态滤波重采样的插值节点选择,图 6 中前 4 个分图中动态滤波结果与真实结果相同。此外,图 6 还标注了固定滤波重采样中出现的构造天线方向图小于 0 的情况,这种情况下的重采样结果没有物理意义。

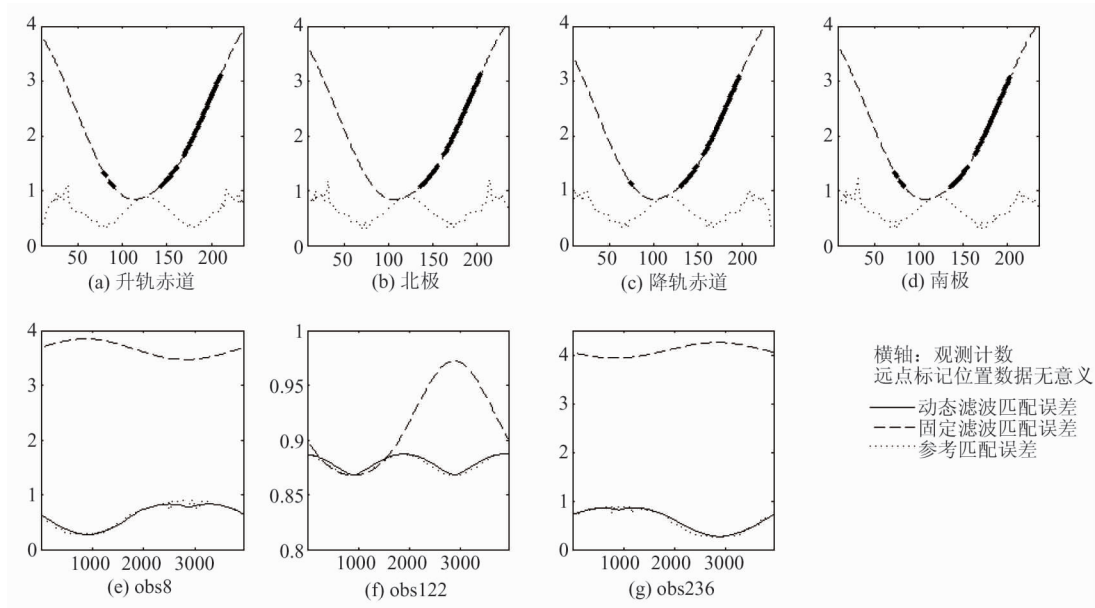


图 6 几种滤波结果比较

固定模板滤波除了在选定模板的区域匹配误差较小,其余区域匹配误差均较大。特别是,使用固定模板滤波会出现大量没有物理意义的构造天线方向图(图 6(a)、(b)、(c)、(d))。与之相比,动态滤波用简单的插值方法很好的模拟了真实情况,重采样误差较小。

4 动态滤波重采样在真实数据的应用

AMSR-E 的真实数据实验说明,动态滤波重采样的计算效率较高,具有业务化应用的潜力。星载微波辐射计的亮温观测数据通常以半轨为一个单元进行分发。因此,可以分为升降轨区别处理,并选择 obs122 中距离赤道最近的点为插值起点,向南北极

进行推算。插值起点的系数,以及沿经线方向系数的变化可以从仿真实验方便的获得。

本文展示了使用动态滤波和固定模板滤波对真实 AMSR-E 数据(2010 年 5 月 1 日 19:22 的升轨数据)进行 36.5GHz 分辨率的水平极化亮温重采样为 18.7GHz 分辨率的结果(图 7),分析了动态滤波和固定模板滤波这两种重采样方法结果的区别(图 8)。AMSR-E 的数据发布于美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center ,NSIDC),可以方便地通过网络下载(<ftp://n5eil01u.ecs.nsidc.org/SAN/AMSA/>)。图 8 中的亮温值是动态滤波重采样结果和固定模板滤波重采样结果之差。在 obs122 的位置,这两种方法的区别不大;在同一扫描带的起始位置和结束位置以及观测亮温值较大区

域(降雨区域、陆地区域等),这两种方法区别较大。例如,墨西哥湾和纬度 15°S 区域的重采样结果差异较小,北美陆地区域和纬度 10°N 区域的重采样结果差异较大。

从动态滤波重采样的方案设计可以看出,动态滤波重采样相比于固定模板滤波其匹配误差较小,与真值更为接近。而观测亮温 0.9K 左右(见表 1)

的均方根误差会对反演结果产生一定的影响。因此我们提出的基于 Backus-Gilbert(BG)方法的动态滤波重采样具有一定的应用价值。这在使用高频通道反演液水和水汽时尤为重要。此外,对构造天线方向图的分析我们发现,固定模板滤波的重采样结果除了在扫描带中部之外,其余位置很可能仅仅在数值上是近似正确的,并没有物理意义。

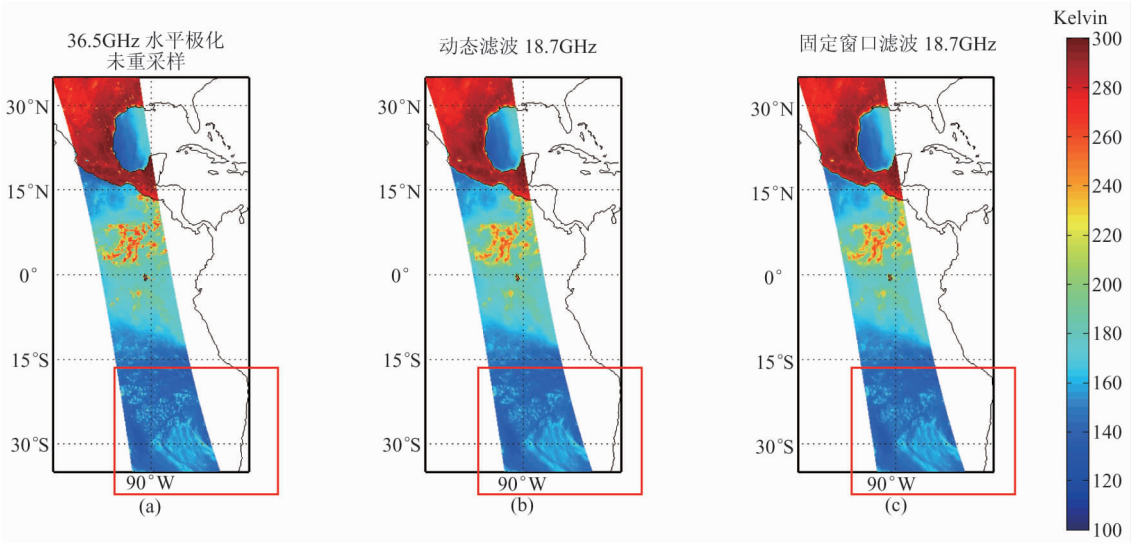


图 7 AMSR-E 的 36.5GHz 水平极化重采样结果

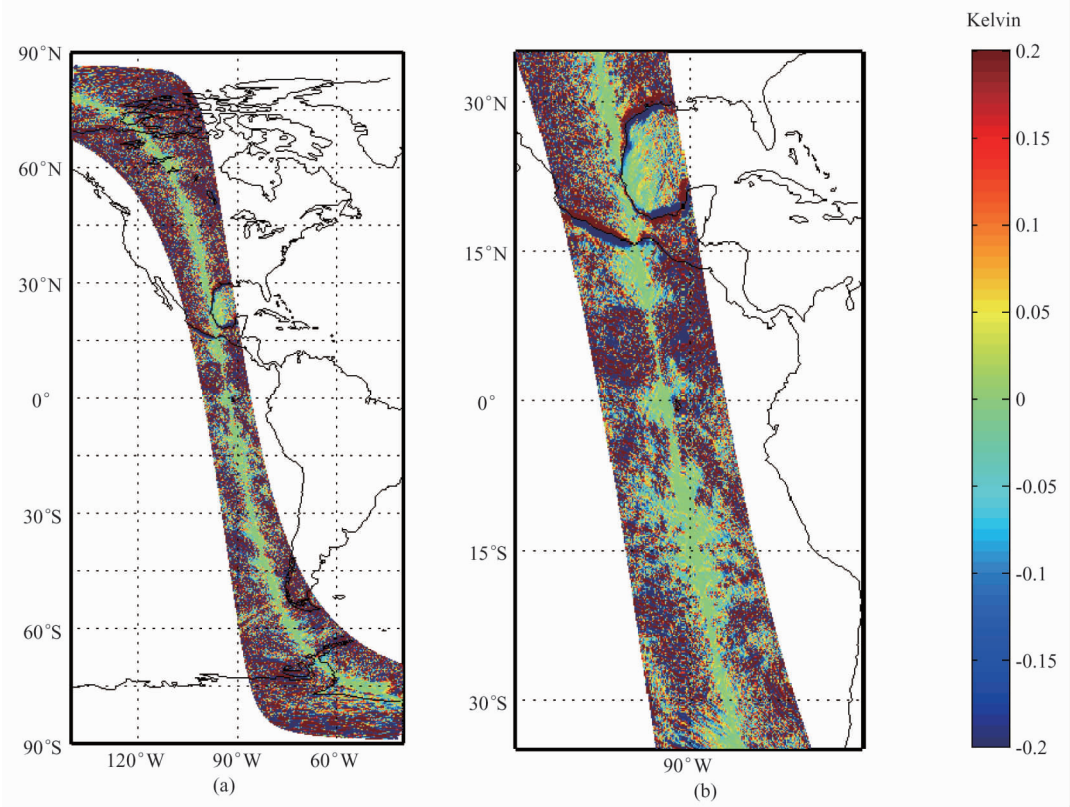


图 8 动态滤波重采样和固定模板滤波的结果对比,(b)与图 7 范围相同

表 1 动态滤波重采样和固定模板滤波的结果比对

区域	BIAS(K)	RMSE(K)
90°S-90°N 陆地和海洋	-0.0029	0.9865
90°S-90°N 海洋	-0.0054	0.8165
35°S-35°N 陆地和海洋	-0.0038	0.9933
35°S-35°N 海洋	-0.0158	0.8639

5 结 论

本文基于 Backus-Gilbert(BG) 方法和星载微波辐射计的几何变化规律观测开发了星载微波辐射计观测亮温的动态滤波重采样方法。这种方法采用线性插值技术,考虑了星载微波辐射计的观测几何变化的影响,有效地改进了目前常用的固定滤波模板重采样的匹配误差过大及构造天线方向图无意义的情况。试验表明,基于 Backus-Gilbert 的星载微波辐射计观测亮温的动态滤波重采样方法结果准确,具有较高的计算效率,具有业务化应用的潜力。中国未来的海洋卫星发射计划包括一系列的微波辐射计以及盐度试验卫星^[10],将为大洋环流、海气相互作用、海水蒸发与降水平衡等方面的研究提供重要的数据。预计,本文设计的动态滤波重采样方法将会获得良好的应用前景。

参考文献

[1] Backus G, Gilbert F. The resolving power of gross earth data. *Geophysical Journal International*, 1968, 16 (2): 169-205

[2] Backus G, Gilbert F. Uniqueness in the Inversion of Inaccurate Gross Earth Data. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A*, 1970, (1173): 123-192

[3] Stogryn A. Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, 26 (5): 720 - 726

[4] Poe G A. Optimum interpolation of imaging microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, (5): 800-810

[5] Robinson W D, Kummerow C, Olson W S. A technique for enhancing and matching the resolution of microwave measurements from the SSM/I instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30 (3): 419-429

[6] 王永前,施建成,蒋灵梅等. AMSR-E 低频亮温数据空间分辨率提高以及不同波段亮温数据组合应用时分分辨率匹配的算法. *中国科学:地球科学*, 2011, 41 (2): 253-264

[7] 黄磊,周武,李延民. HY-2 卫星扫描微波辐射计多通道分辨率匹配技术研究. *中国工程科学*, 2014, 16 (6): 65-69

[8] 王振占. 海面风场全极化微波辐射测量:[博士学位论文]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心, 2005. 133-135

[9] 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. *上海航天*, 2012, 29 (1): 23-28

[10] 国家海洋局. 2014 年中国海洋卫星应用报告. <http://www.nsoas.org.cn/HY2AZhuanti/Reports/ChinaOSAp-pReport2014.pdf>; NSOAS, 2015

[11] Ashcroft P, Wentz F J. Algorithm theoretical basis document AMSR level 2A algorithm, Report 121599B-1. California; RSS, 2000

[12] 王兆徽,廖菲,宋清涛等. 星载微波辐射计分辨率匹配的平滑参数选择. *航天器工程*, 2016, 25 (2): 145-154

A spaceborne microwave radiometer method for brightness temperature measurement based on dynamic resampling

Wang Zhaohui^{***}, Liu Yuxin^{***}, Song Qingtao^{***}, Liu Wei^{***}

(^{*} National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081)

(^{**} Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, SOA, Beijing 100081)

(^{***} Senior High School of Zhuanghe City, Dalian 146400)

Abstract

The brightness temperature observation using spaceborne microwave radiometers was studied, and a new method for brightness temperature observation using the dynamic resampling based on the Backus-Gilbert (BG) method was developed to solve the commonly adopted steady resampling method's problem of no observation of geometrical changing. This method considers the observation of geometry changing in both the north-south direction and the east-west direction, and uses a linear interpolation method to realize the filter template's real-time updating to realized the dynamic resampling. Its simulating test and the real experiment using the data from an advanced microwave scanning radiometer for earth observation (AMER-E) were conducted, and the results indicate that this method's fitting error is less than the common steady resampling method and has a higher computational efficiency as well as a good potential for applications.

Key words: spaceborne microwave radiometer, advanced microwave scanning radiometer (AMSR), Backus-Gilbert (BG) algorithm, dynamic resampling