



# 极轨气象卫星资料地理定位误差评估与订正方法综述

## 摘要

首先介绍了极轨气象卫星资料地理定位误差的来源,回顾了地理定位误差的研究状况.随后重点分析了3种可行的定位误差评估与订正的数学方法,并结合极轨卫星资料定位误差的订正实例,对不同订正方法进行了比较和讨论.最后展望了地理定位误差订正方法的研究方向.

## 关键词

卫星遥感;地理定位误差;极轨气象卫星

中图分类号 P414.4

文献标志码 A

收稿日期 2016-12-23

资助项目 国家重点研发计划(2017YFC1502104,2017YFC1501805);国家自然科学基金(91337218,41475103);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406008);江苏省“333工程”项目(BRA2018100);江苏省气象局科研重点项目(KZ201805)

## 作者简介

唐飞,男,博士,研究方向为气象卫星微波遥感资料应用.tangfei@nuist.edu.cn

1 江苏气象科学研究所,南京,210009

2 南京信息工程大学 资料同化研究与应用联合中心,南京,210044

## 0 引言

气象卫星遥感资料经过地理定位之后,形成包含探测目标实际地理位置信息的遥感物理量<sup>[1]</sup>,是目前探测陆地、海洋和大气最有效的手段之一.特别是微波遥感资料,能够提供全天候、全球性的观测数据,极大程度弥补了常规观测资料时间、空间上的局限,对气象研究的发展起重要作用.如中国风云三号卫星上搭载的微波成像仪(FY-3/MWRI),设置了从10.65 GHz到89 GHz 5个特定的频率,接收来自地球表面和大气的水平及垂直极化的电磁辐射,其数据被广泛用于反演降水、云和大气中水汽含量、地表植被、土壤湿度等分布情况,为天气预报、环境监测等提供可靠资料.然而,在实际的气象卫星资料中,存在着各种因素带来的地理定位误差,如卫星时间的系统误差、仪器的空间位置、天线的扫描精度以及卫星姿态的偏差等造成的定位误差,直接影响卫星资料对大气和地表参数的反演.

尽管研究人员在卫星发射前已对资料的地理定位精度开展相关计算工作,但是卫星在发射以及在轨运行过程中仍然会对仪器的扫描精度带来一些不可预知的误差.因此,国内外研究人员针对各国发射的不同气象卫星,对发射后的卫星观测资料开展了很多定位误差的评估与订正工作.1990年,Poe等<sup>[2]</sup>利用卫星姿态角对美国空军防御气象卫星计划F-8上的SSM/I仪器定位误差进行订正,使得定位误差减小到7 km以下;1998年,Atkinson等<sup>[3]</sup>利用AMSU-A通道15和AMSU-B通道1之间的互相关性,对NOAA-15地理定位精度进行评估,发现2个通道之间不重合度很小;2006年,Purdy等<sup>[4]</sup>利用海岸线匹配方法和扫描误差分析,发现了WindSat定位有5 km的不确定性;2008年,Poe等<sup>[5]</sup>对SSM/I数据使用偏微分的方法估计地理定位精度,并将定位精度提高至4~5 km.在我国,针对风云三号卫星(FY-3C/B)携带的卫星仪器也已经开展了很多定位误差的评估工作,如2008年关敏等<sup>[6]</sup>、2009年关敏等<sup>[7]</sup>分别对MWS和MWRI的定位算法及误差精度进行了分析;2012年,吴荣华等<sup>[8]</sup>通过修正安装矩阵的方法对MERSI的定位误差进行订正;2016年,Tang等<sup>[9]</sup>和唐飞等<sup>[10]</sup>对我国FY-3 MWRI地理定位误差进行了评估与订正.

由于不同卫星仪器的扫描方式以及仪器频率设置的不同,在进行定位误差订正时,采取的订正方法也不尽相同.因此,本文通过总结国内外关于不同卫星资料地理定位误差评估与订正的方法,对近年

来应用较为广泛、可行的方法进行了详细介绍,指出不同定位误差订正方法使用时的优缺点,展望地理定位误差订正的发展方向,希望对研究我国各种卫星资料的定位误差精度、提高资料的质量提供一些参考。

## 1 地理定位误差来源

### 1.1 定位算法流程

卫星资料的地理定位算法主要是计算由仪器天线指向与地球椭球的交点,实现对地观测点的地理定位.卫星仪器不同,其定位算法也不尽相同,但均涉及到图1所示的坐标系及坐标转换流程.由于本文宗旨是介绍定位误差的订正方法,对于定位算法的具体过程及各个坐标系的定义可以参考文献[9,11].

### 1.2 定位误差来源

地理定位误差,即卫星仪器观测资料在地球表面的观测位置(一般指经纬度)与其实际应该所在位置之间的差异<sup>[4]</sup>.在卫星资料的定位过程中,坐标系之间的每一个转换环节都有可能产生定位误差.2013年,Moradi等<sup>[12]</sup>给出了定位误差可能的来源:1)卫星钟的偏差,即卫星钟和协调世界时(UTC)差异带来的误差;2)仪器系统的偏差导致仪器天底位置和卫星星下点位置不重合,或者扫描方向与飞行方向不垂直造成定位误差;3)用来预测卫星位置的卫星星历的不精确所带来的误差;4)仪器模型误差,如仪器步进角误差所造成的定位误差;5)由于卫星

姿态(俯仰、滚动和偏航)偏差造成的定位误差.Moradi等<sup>[12]</sup>在对NOAA卫星AMSU仪器定位误差分析时指出,卫星姿态能够体现卫星的飞行状况及稳定性.仪器姿态误差包含卫星姿态误差、仪器安装误差、时间误差以及星历数据的不确定性.卫星姿态误差和仪器装备误差导致的地理定位误差,可以利用卫星姿态旋转矩阵对各种因素导致的定位误差进行订正<sup>[12]</sup>.

### 1.3 卫星姿态误差

卫星星体在轨道上运行时,其空间位置用直角坐标系的3个坐标轴表示.以卫星质心为原点,从卫星指向地面星下点的方向定义为偏航轴(Z轴),偏航轴与卫星飞行方向的外积作为俯仰轴(Y轴),Y轴和Z轴的外积作为滚动轴(X轴),图2是卫星姿态的示意.

卫星由于飞行状态不稳定产生的卫星姿态的变化由3个坐标轴表示.其中,卫星滚动轴旋转导致的滚动误差,对卫星遥感图像产生相对于卫星飞行方向的左右偏移;俯仰轴旋转造成的俯仰误差,对遥感图像造成平行于飞行方向的前后移动;偏航误差是偏航轴旋转造成的姿态误差,对遥感图像造成飞行方向和扫描方向偏移的误差.

1994年,Rosborough等<sup>[13]</sup>利用地面控制点,通过建立卫星姿态模型估计先进的高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)姿态误差,发现构建的卫星姿态模型能够

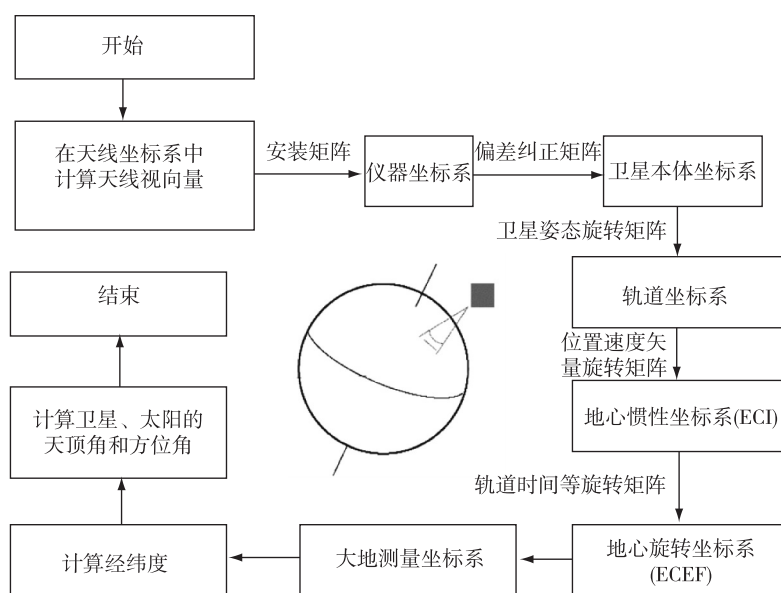


图1 地理定位坐标系与算法流程

Fig. 1 Coordinate systems and geolocation flow chart

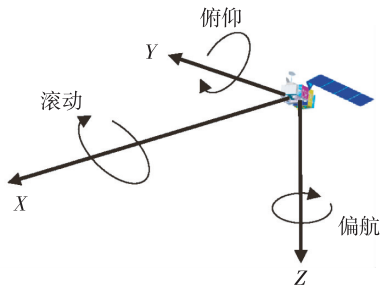


图2 卫星姿态示意(卫星沿 X 轴方向飞行)

Fig. 2 Illustration of satellite attitude, with flight direction along X-axis

提供 1 km 以内的卫星导航精度. Moradi 等<sup>[12]</sup> 利用 NOAA 卫星 AMSU-A 仪器资料, 分析了俯仰、滚动和偏航误差对遥感图像在地球表面定位误差的分布特征. 由于 AMSU 仪器的扫描方式为跨轨扫描, 2016 年, 唐飞等<sup>[10]</sup> 根据 FY-3B 卫星搭载的 MWRI 仪器观测亮温资料, 分析了圆锥扫描方式下卫星姿态误差对定位结果的影响特征. 对比发现, 圆锥扫描和跨轨扫描方式下卫星姿态的俯仰和滚动误差所造成的定位误差特征相似, 但偏航偏差对定位误差的影响特征有差别, 这就要求不同扫描方式的卫星定位误差的订正方法有所不同.

## 2 定位误差订正方法

### 2.1 拐点法

自气象卫星发射至今, 国内外科学家已对定位误差分析与订正开展了大量研究工作. 1987 年, Hoffman 等<sup>[14]</sup> 在研究美国 NOAA-9 卫星、地球辐射收支卫星 (ERBS) 上的地球辐射收支实验扫描仪 (ERBE) 的定位误差时, 首先提出了计算海洋和陆地交界处辐射量变化梯度的最大值来确定海岸线的方法, 统计出计算的海岸线位置与高精度海岸线的距离作为定位误差. 该方法通过计算三次拟合函数的拐点作为海岸线的位置, 因此称为拐点法 (Coastline Crossing Method, CCM).

CCM 方法将晴空条件下海岸线附近观测亮温梯度变化最大处 (拐点) 视为海岸线位置, 并将拐点到高精度海岸线最近的距离认为是定位误差. 首先利用一条扫描线上 4 个连续观测点  $(\lambda_i, \phi_i)$ , 建立观测辐射值 (亮温) 和观测点的位置之间的三次多项式模型:

$$y_i = a\lambda_i^3 + b\lambda_i^2 + c\lambda_i + d, \quad (1)$$

这里  $i = 1, 2, 3, 4$ ,  $\lambda_i$  是观测点所在经度,  $y_i$  是  $(\lambda_i, \phi_i)$  处的观测值 (亮温). 系数  $a, b, c$  和  $d$  通过式 (2)

求解:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^3 & \lambda_1^2 & \lambda_1 & 1 \\ \lambda_2^3 & \lambda_2^2 & \lambda_2 & 1 \\ \lambda_3^3 & \lambda_3^2 & \lambda_3 & 1 \\ \lambda_4^3 & \lambda_4^2 & \lambda_4 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

拐点 (经度)  $\lambda = -\frac{b}{3a}$ . 拐点所在纬度通过式 (3)

得到:

$$\phi = f(\lambda) = p_1\lambda^3 + p_2\lambda^2 + p_3\lambda + p_4, \quad (3)$$

系数  $p_i$  由  $(\lambda_i, \phi_i)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 经过 3 次曲线拟合得到.

当  $\lambda = -\frac{b}{3a}$  落在区间  $[\lambda_2, \lambda_3]$ , 且第 1 个和第 4 个观测值的变化  $\Delta y = |y_1 - y_4|$  大于预先给定的阈值 (阈值可根据海陆亮温差异给定) 时, 将  $(\lambda, \phi)$  作为海岸线的位置, 其到真实海岸线的直线距离视为定位误差. 沿所有晴空条件下的扫描线计算满足以上条件的拐点, 就可以模拟出海岸线的位置.

1998 年, Currey 等<sup>[15]</sup> 利用 CCM 方法对搭载在 TRMM 卫星上的云和地球能量辐射系统扫描仪 (CERES) 进行定位误差分析, 他们首先利用搭载于同一卫星上分辨率很高的可见光和红外扫描仪 (VIRS), 选择海陆交界处的晴空观测, 计算海岸线位置. 然后最小化所计算的海岸线数据集与地图海岸线数据集的平均距离, 从而得到 CERES 的定位误差. 2002 年, Currey<sup>[16]</sup> 对云气溶胶激光雷达和红外探测器观测卫星 (Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations, CALIPSOs), 2003 年, Gregorich 等<sup>[17]</sup> 对 Aqua 卫星上搭载的大气红外探测仪 (Atmospheric Infrared Sounder), 2009 年, Smith 等<sup>[18]</sup> 对 Terra 以及 Aqua 卫星上的 CERES 均使用 CCM 方法进行资料的定位误差分析, 使资料定位误差精度能够满足当前的业务应用.

2016 年, Tang 等<sup>[9]</sup> 利用 CCM 方法估计了 FY-3C 卫星 MWRI 仪器存在俯仰、滚动和偏航偏差分别平均为  $-0.59^\circ$ 、 $-0.09^\circ$  和  $0.21^\circ$ . 图 3 是 FY-3C MWRI 在 2014 年 7 月 9 日一个降轨观测的亮温分布. 图 3a 是原始资料 (未进行定位误差订正) 的亮温分布, 可以看出沿着海岸线的亮温图像有明显的海陆偏移; 图 3b 是使用 CCM 方法计算得到的海岸线位置, 可以看出其位置均落在海陆亮温梯度最大处; 经过定位误差订正后的图像上, 海、陆亮温沿海岸线分布基本吻合 (图 3c).

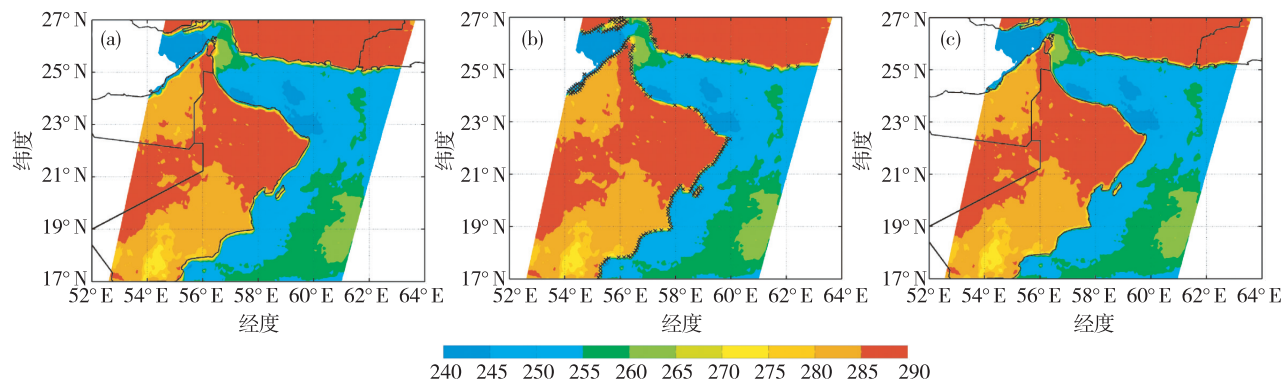


图3 FY-3C MWRI 在2014年7月9日一条观测轨道上,(a)定位误差订正前、(b)CCM方法计算的海岸线位置(黑色叉号)在观测上和(c)定位误差订正后的亮温分布(单位:K)

Fig. 3 Brightness temperature maps of before (a) and after (c) geolocation error correction, and (b) is for calculated coastlines mapped on observations (units in K)

CCM方法的优点是简单、直接,尤其适用于海岸线附近海陆亮温差比较明显、海岸线几何分布不太复杂的地理区域.加利福尼亚海湾附近、红海海岸线、地中海海岸线、澳大利亚西北部海岸附近常被用于CCM方法中,因为卫星在这些区域观测的海陆亮温变化梯度大,计算出的拐点作为海岸线的位置具有代表性和真实性.综合不同仪器使用CCM方法的过程可知,选择晴空观测条件下海洋和陆地温度差异明显的区域是该方法的关键,对于海岸线两侧亮温梯度不明显的区域,CCM方法受到了限制,云的污染很容易对计算亮温梯度造成影响.此外,2013年Wang等<sup>[19]</sup>指出,由于海岸线的不规则分布,拐点到海岸线的直线距离并不是实际的定位误差,这在一定程度上会给定位误差的真实性带来影响.

## 2.2 升降轨亮温差法

2008年,Wiebe等<sup>[20]</sup>提出,在卫星定位误差存在的情况下,升轨和降轨观测在同一区域上的遥感图像在地球上的偏移方向是相反的.因此,在沿海岸线附近,升轨和降轨观测的亮温差就会比较大.据此,他们通过分析AMSR-E观测亮温升降轨之间的差异,对ASMSR-E的地理定位进行了分析和优化.这一方法利用了升轨和降轨的亮温差,称为升降轨亮温差法(Node Differential Method,NDM).

2013年,Moradi等对NOAA系列卫星搭载的AMSU仪器各通道观测的地理定位误差开展了评估订正工作,给出了NOAA-15等卫星上携带的AMSU仪器不同通道姿态角度偏差随时间的变化趋势<sup>[12]</sup>.他们的误差订正过程概括为以下步骤:

1) 选择海岸线分布方向复杂多样,且海陆亮温

差异很大的区域,如地中海区域,将俯仰、滚动和偏航角度分别设为零,根据卫星位置和速度矢量建立的卫星姿态模型(卫星本体坐标系),计算一天中经过该区域的每个扫描位置的经纬度( $\lambda_i, \phi_i$ )( $i$ 表示第 $i$ 个扫描点).

2) 将一天中经过所选定区域的升轨和降轨的观测资料分别进行 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 格点化,然后计算升轨和降轨之间的亮温差,并统计海岸线附近100 km范围内亮温差大于所给定的阈值的像素点数 $N_p$ .如果 $N_p = 0$ ,不需要对该资料进行定位误差订正,只对下一天的资料进行计算.否则,进入第3)步.

3) 给俯仰角度一个小的扰动,重复步骤2)直到 $N_p = 0$ 为止.

4) 对于滚动和偏航,重复步骤2)—3).

5) 利用新得到的俯仰、滚动和偏航角度,重新计算经纬度.

在以上步骤中,先假定了滚动和偏航角度偏差分别为零,对俯仰角度增加或减小一个很小的值来不断调整卫星姿态,重新计算地理经纬度,直到升降轨亮温差超过给定阈值的像素点数达到最小.随后,再重复这一过程分别求滚动和偏航偏差,从而求得卫星姿态的3个偏差角度.其结果与求解俯仰、滚动和偏航角的次序有关.然而,该方法计算量大,且针对的是跨轨扫描仪器.

唐飞等<sup>[10]</sup>针对圆锥扫描仪器,分析了FY-3B MWRI卫星姿态误差造成的遥感图像在地球上的偏移特征,发现圆锥扫描方式下,滚动偏差和偏航偏差产生的定位偏移特征相似,难以区分跨轨误差(扫描方向的误差)是来源于滚动偏差还是偏航偏差.因

此,不能按照计算跨轨扫描仪器卫星姿态误差的方法估计圆锥扫描仪器的卫星姿态误差.针对这一问题,唐飞等<sup>[10]</sup>利用最优化方法对步骤3)进行了改进如下:以俯仰( $\xi_p$ )、滚动( $\xi_r$ )和偏航( $\xi_y$ )角度为自变量,以像素点数  $N_p$  为因变量,构造三元目标函数  $N_p = f(\xi_r, \xi_p, \xi_y)$ ,使用极小化方法求该目标函数的极小值  $N_p^{\min} = \min f(\xi_r, \xi_p, \xi_y)$ ,卫星姿态角度 ( $\xi_r^{\min}$ ,  $\xi_p^{\min}$ ,  $\xi_y^{\min}$ ),即为所求的卫星姿态误差<sup>[10]</sup>.这一改进不仅能估计出最优的卫星姿态,而且减小了计算时间.根据卫星姿态误差,通过建立卫星姿态模型,最终可以实现卫星资料定位误差的订正.

2013年, Berg 等<sup>[21]</sup>利用 NDM 方法分析了圆锥扫描仪 SSM/I 的地理定位误差,订正之后,SSM/I 的定位精度明显提高.由此可见,不同仪器使用 NDM 方法对地理定位精度均有不同程度的改进.为了更加直观地说明 NDM 方法,图4给出了定位误差订正前后升降轨亮温差分布的一个实例.可以看出,由于 FY-3C MWRI 地理定位误差的存在,图4a 中海岸线附近的升轨和降轨亮温差明显,经过 NDM 定位误

差订正后,这种差异明显减小(图4b),说明 NDM 方法能够有效地订正地理定位误差.

由于对升降轨亮温差在全球观测范围进行计算会耗费计算机的存储空间及计算时间,通常需要选择一些比较典型的区域来评估定位误差.地中海区域和澳大利亚区域常用来作为典型区域.

### 2.3 海陆比例法

1999年, Bennartz<sup>[22]</sup>结合高精度的海陆标志数据集,通过建立模型来计算海岸线附近观测视场内水体所占比例的方法,估计了 F11-SSM/I 仪器的定位不确定性程度,本文将这种方法称为海陆比例法(Land Sea Fraction Method, LFM). LFM 方法首先计算目标仪器每一个扫描视场的大小,然后将视场与高分辨率海陆标志数据集进行匹配,计算落在每个视场内海洋和陆地所占的比例,如图5a所示.在计算扫描视场大小时,涉及到卫星观测几何参数,包括经纬度,卫星高度,卫星观测天顶角、方位角,波束宽度等<sup>[17]</sup>.根据扫描线上每个视场内海陆比例,建立亮温模型:

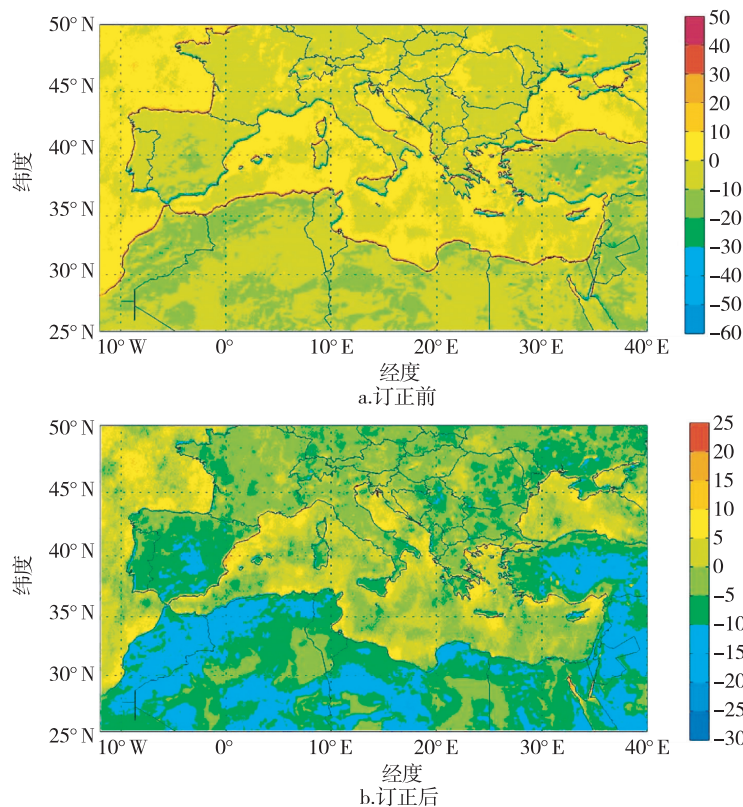
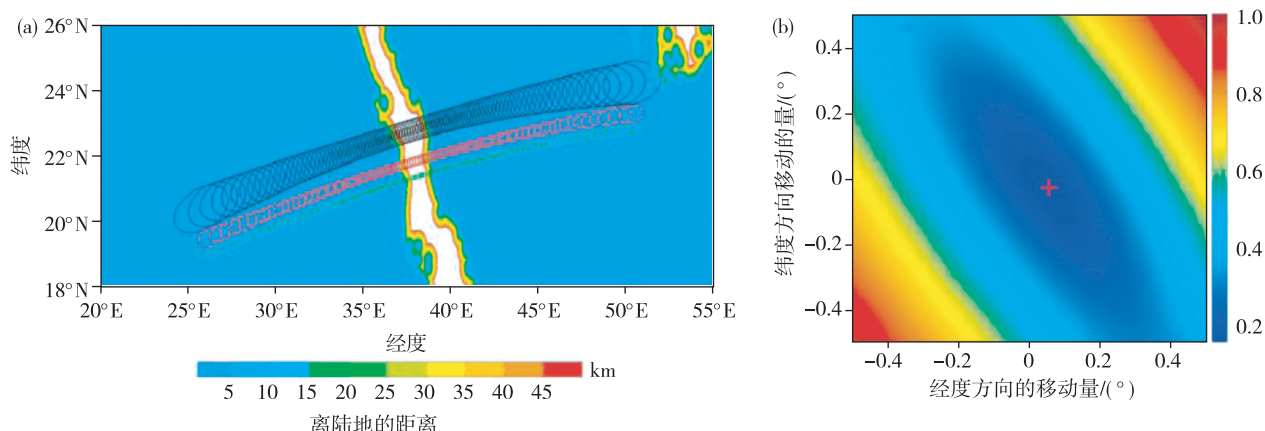


图4 FY-3C MWRI 89 GHz 水平极化通道在地中海区域 2014 年 7 月升轨和降轨亮温差在地理定位订正前和订正后的月平均分布<sup>[9]</sup>(单位:K)  
Fig. 4 Monthly averaged node differences of FY-3C MWRI in July 2014 over Mediterranean Sea before and after geolocation error correction<sup>[9]</sup>(units in K)

图5 ATMS 观测视场与海陆标志数据匹配示意图(a)和 ATMS 通道 1 代价函数的变化(b)<sup>[23]</sup>Fig. 5 Illustration of collocation between the ATMS footprints and the land-sea mask dataset (a), and variations of cost function of ATMS at channel 1(b)<sup>[23]</sup>

$$T_{\text{model}} = T_{\text{sea}} + L_{\text{fraction}}(T_{\text{land}} - T_{\text{sea}}), \quad (4)$$

式(4)中  $T_{\text{sea}}$  和  $T_{\text{land}}$  分别表示晴空条件下某观测区域内(如红海海域)海洋上的亮温平均值和陆地上的亮温平均值。 $L_{\text{fraction}}$  表示视场内陆地和海洋标志的比例。最后计算观测区域所有视场的观测亮温和模式亮温之差的平方和:

$$\chi^2 = \sum_{\text{FOVs}} (T_{\text{obs}} - T_{\text{model}})^2. \quad (5)$$

将遥感图像的位置沿东—西方向和南—北方向移动,当式(5)达到最小时,就可以估计出仪器的沿轨误差和跨轨误差。2016年, Han 等<sup>[23]</sup> 利用 LFM 对 ATMS 的地理定位误差进行了评估与订正。如 ATMS 通道 1(23.8 GHz)利用 LFM 方法,沿着经纬度方向平移原始图像后,代价函数在  $(-0.074^\circ, 0.082^\circ)$  处达到最小,如图 5b 所示,对 ATMS 通道 1 的观测图像沿经纬度方向平移时,式(5)在图中红色加号标志处表示定位误差所在的位置。

目前,利用 LFM 方法对卫星资料地理定位误差的评估相对较少,2013年, Wang 等<sup>[19]</sup> 利用 LFM 方法对 CrIS 仪器的定位误差进行验证,分析了跨轨扫描仪器在不同扫描位置定位误差的特征,分析表明 LFM 方法与 CCM 方法的结果一致。LFM 方法在计算量方面比 CCM 方法更大,且依赖于高空间分辨率、高精度地理经纬度作为参考数据,受到所建立的亮温模型精度影响较大。但是,与 CCM 方法对比发现, LFM 方法更适用于海岸线复杂的区域和非星下点数据的定位误差估计<sup>[23]</sup>。

### 3 总结与展望

当前,在全球变化、天气灾害预警等研究中,气

象卫星资料的作用日益明显。而对卫星资料的有效定位是其应用的前提和保证。本文通过总结国内外关于定位误差一些有代表性的研究,对 3 种广泛应用于极轨气象卫星微波观测资料的地理定位误差评估与订正的方法(CCM、NDM 和 LFM)做了深入的介绍和比较。

CCM 方法的优点是简单、直接,尤其适用于海岸线附近亮温梯度较大的区域。但是,针对海岸线两侧亮温梯度不明显的区域该方法有局限性。此外,由于海岸线的不规则分布,拐点到海岸线的直线距离并不是实际的定位误差,这在一定程度上会给定位误差的真实性带来影响。

NDM 方法和 LFM 方法都是通过将遥感图像沿着经纬度方向平移的方法最小化目标函数,将使得目标函数达到最小值的移动量作为定位误差。所不同的是 LFM 方法需要借助其他卫星仪器或者海陆标志较高地理定位精度的数据库,建立亮温模拟模型,而模型的精度直接影响定位误差的评估。NDM 方法仅需根据所研究仪器的升降轨辐射量资料进行分析。综合来看,CCM 方法和 NDM 方法更容易实现。

虽然气象卫星及遥感工作者在地理定位误差研究工作中取得了一系列成果,探索了一些可行的方法,但是仍然存在一些尚需不断探索和改进的问题。在今后的研究中,可以从以下几个方面进一步提高极轨卫星资料的地理定位精度:

- 1) 计算高精度的卫星轨道及星历,考虑建立更多高精度的地面控制点来估计卫星的最有状态。
- 2) 由于微波仪器观测分辨率通常较低,在进行

定位误差评估时,通常忽略地形和视场大小对定位误差的影响.今后,建立准确度更高的地球形态模型对提高定位精度会有重要作用.

3)CCM、NDM 和 LFM 方法分别利用了不同的数学方法,通过不同频率观测在海洋和陆地不同的辐射特征进行定位误差评估.这 3 种方法均受到晴空观测条件的限制.因此,寻找一种更好的数学方法或映射函数来订正不可预知的因素产生的定位误差,具有十分重要的意义.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] 陆文,严卫,施健康,等.一种适用于 WindSat 的地理定位方法[J].遥感技术与应用,2010,25 ( 1 ):126-131  
LU Wen, YAN Wei, SHI Jiankang, et al. A geolocation algorithm for Windsat[J]. Remote Sensing Technology and Application, ,2010,25 ( 1 ):126-131
- [ 2 ] Poe G A, Conway R W. A study of the geolocation errors of the Special Sensor Microwave/Imager ( SSM/I ) [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990,28(5) :791-799
- [ 3 ] Atkinson N C, McLellan S. Initial evaluation of AMSU-B in-orbit data [ C ] // Proc. SPIE 3503, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment, 1998: 276-287
- [ 4 ] Purdy W E, Gaiser P W, Poe G A, et al. Geolocation and pointing accuracy analysis for the WindSat sensor [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006,44(3) :496-505
- [ 5 ] Poe G A, Uliana E A, Gardiner B A, et al. Geolocation error analysis of the special sensor microwave imager/sounder [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(4) :913-922
- [ 6 ] 关敏,谷松岩,杨忠东.风云三号微波湿度计遥感图像地理定位方法 [ J ]. 遥感技术与应用, 2008, 23 ( 6 ): 712-716  
GUAN Min, GU Songyan, YANG Zhongdong. Geolocation method for FY-3 MWS's remote sensing image [ J ]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23 ( 6 ):712-716
- [ 7 ] 关敏,杨忠东. FY-3 微波成像仪遥感图像地理定位方法研究 [ J ]. 遥感学报, 2009, 13 ( 3 ): 463-474  
GUAN Min, YANG Zhongdong. Geolocation method for FY-3 MWR's remote sensing image [ J ]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13 ( 3 ): 463-474
- [ 8 ] 吴荣华,杨忠东,关敏,等.修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度 [ J ]. 中国图像图形学报, 2012, 17 ( 10 ): 1327-1332  
WU Ronghua, YANG Zhongdong, GUAN Min, et al. Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix [ J ]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17 ( 10 ): 1327-1332
- [ 9 ] Tang F, Zou X L, Yang H, et al. Estimation and correction of geolocation errors in FengYun-3C microwave radiation imager data [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54 ( 1 ): 407-420
- [ 10 ] 唐飞,董慧杰,李南,等. FY-3B 微波成像仪资料的地理定位误差与订正 [ J ]. 遥感学报, 2016, 20 ( 6 ): 1342-1351  
TNAG Fei, DONG Huijie, LI Nan, et al. Geolocation errors and correction of FY-3B microwave radiation imager measurements [ J ]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20 ( 6 ): 1342-1351
- [ 11 ] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2003  
LIU Jiyu. Principles and methods of GPS satellite navigation and positioning [ M ]. Beijing: Science Press, 2003
- [ 12 ] Moradi I, Meng H, Ferraro R R, et al. Correcting geolocation errors for microwave instruments aboard NOAA satellites [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51 ( 6 ): 3625-3637
- [ 13 ] Rosborough G W, Baldwin D G, Emery W J. Precise AVHRR image navigation [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32 ( 3 ): 644-657
- [ 14 ] Hoffman L H, Weaver W L and Kibler J F. Calculation and accuracy of ERBE scanner measurement locations [ R ]. NASA Technical Report N, 1987, NASA/TP-2670
- [ 15 ] Currey C, Smith L, Neely B. Evaluation of Clouds and the Earth's Radiant Energy System ( CERES ) scanner pointing accuracy using a coastline detection system [ J ]. Spies International Symposium on Optical Science Engineering & Instrumentation, 1998, 3439: 367-376
- [ 16 ] Currey J C. Geolocation assessment algorithm for CALIPSO using coastline detection [ R ]. NASA Technical Report, 2002, NASA/TP-2002-211956
- [ 17 ] Gregorich D T, Aumann H H. Verification of AIRS bore-sight accuracy using coastline detection [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41 ( 2 ): 298-302
- [ 18 ] Smith G L, Priestley K J, Hess P C, et al. Validation of geolocation of measurements of the Clouds and the Earth's Radiant Energy System ( CERES ) scanning radiometers aboard three spacecraft [ J ]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 26 ( 11 ): 2379-2391
- [ 19 ] Wang L K, Tremblay D A, Han Y, et al. Geolocation assessment for CrIS sensor data records [ J ]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118 ( 22 ): 12690-12704
- [ 20 ] Wiebe H, Heygster G, Meyer-Lerbs L. Geolocation of AM-SR-E data [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 ( 10 ): 3098-3103
- [ 21 ] Berg W, Sapiano M R P, Horsman J, et al. Improved geolocation and earth incidence angle information for a fundamental climate data record of the SSM/I sensors [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51 ( 3 ): 1504-1513
- [ 22 ] Bennartz, R. On the use of SSM/I measurements in coastal regions [ J ]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1999, 16: 417-431
- [ 23 ] Han Y, Weng F Z, Zou X L, et al. Characterization of geolocation accuracy of Suomi NPP Advanced Technology Microwave Sounder measurements [ J ]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2016, 121 ( 9 ): 4933-4950

## Methods on geolocation error estimation and correction for polar-orbit meteorological satellite measurements:an overview

TANG Fei<sup>1,2</sup> DONG Huijie<sup>2</sup>

1 Jiangsu Research Institute of Meteorological Sciences,Nanjing 210009

2 Joint Center of Data Assimilation for Research and Application,  
Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

**Abstract** The accuracy of geolocation on meteorological satellite data is critical for its application.The geolocation error sources of polar-orbit satellite are introduced,and then the research status on geolocation error estimation and correction is reviewed.Three mathematical methods of geolocation error correction,including Coastline Crossing Method (CCM),Node Differential Method (NDM) and Land Sea Fraction Method (LFM) are compared and discussed.Future researches in geolocation error correction are prospected.

**Key words** satellite remote sensing;geolocation error;meteorological satellite