

刁宁辉,吴奎桥,孙从容,等.HY-2B卫星微波辐射计地理定位与偏差修正[J].海洋气象学报,2022,42(4):77-84.
DIAO Ninghui, WU Kuiqiao, SUN Congrong, et al. Geolocation and error correction of HY-2B satellite microwave radiometer[J].
Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(4): 77-84. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.008. (in Chinese)

HY-2B 卫星微波辐射计地理定位与偏差修正

刁宁辉^{1,2}, 吴奎桥^{1,2}, 孙从容^{1,2}, 郭振宇¹, 韩静雨¹

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081)

摘要: 文章介绍了 HY-2B 卫星微波辐射计的工作原理、卫星星历获取、天线波束指向计算和一系列坐标系转换的方法。针对微波辐射计的圆锥扫描工作方式, 给出了一种适用的地理定位算法并进行定位计算, 通过相关参数修正, 实现了对地理定位偏差的修正。将修正后的全球高中低纬度典型地域的定位结果与高精度地理底图叠加, 显示两者匹配良好, 该算法具有一定的实际应用价值。

关键词: HY-2B 卫星; 微波辐射计; 地理定位; 偏差修正

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)04-0077-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.008

Geolocation and error correction of HY-2B satellite microwave radiometer

DIAO Ninghui^{1,2}, WU Kuiqiao^{1,2}, SUN Congrong^{1,2}, GUO Zhenyu¹, HAN Jingyu¹

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract This paper introduces the operating principles of HY-2B satellite microwave radiometer, acquisition of satellite ephemeris, calculation of antenna beam pointing, and a series of coordinate system conversion methods. A suitable geolocation algorithm is presented for the conical scanning mode of microwave radiometer and the location calculation is carried out. By modifying some parameters, the geolocation errors are corrected. By overlaying the modified location results in typical areas at different latitudes with high-precision geographical base map, it can be seen that they match well, so the algorithm has certain practical value.

Key words HY-2B satellite; microwave radiometer; geolocation; error correction

引言

星载微波辐射计(以下简称“微波辐射计”)属于被动微波遥感器,在海洋探测方面,主要通过接收海水分子热运动在微波频段产生的自然辐射强度,以及极化特性随波长、海面粗糙度、海水介电特性的变化,来反演海面温度、海面风速、表层海水盐

度等海洋动力和热力参数^[1-2],并可反演大气中的水汽含量、云液态水含量等大气参数^[3]。这些反演得到的参数在全球气候变化、海洋环境预报、海洋灾害监测、海况监测以及海洋渔场监测等方面具有广泛应用。

微波辐射计数据地理定位是数据预处理的重要组成部分,直接影响后续多通道数据匹配和卫星

收稿日期:2021-12-03; 修订日期:2022-03-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3900400)

第一作者:刁宁辉,男,助理研究员,主要从事卫星数据预处理研究,diaoninghui@mail.nsoas.org.cn。

通信作者:孙从容,女,正高级工程师,主要从事海洋遥感和地面系统建设工作,suncr@mail.nsoas.org.cn。

数据应用。遥感数据地理位置的计算方法主要分为参数法和非参数法,参数法是根据遥感仪器的观测几何及空间位置,建立观测像元与地面观测位置之间的模型^[4]。非参数法利用已知地理位置地物特征明显的地面点,建立遥感数据和地基坐标系之间的空间位置关系模型。目前卫星遥感数据地理定位业务中主要采用的是参数法,非参数法则可以用于成像载荷数据,对参数法的结果进行精校正,进一步提高定位精度。

目前国际上的 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)、AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System) 和 WindSat 等比较典型的微波辐射计都采用相似的地理定位算法^[5-7],核心原理都是利用辐射计的波束指向和载荷的空间位置构建几何定位模型,利用矢量三角形原理解算地面观测点的坐标。POE and CONWAY^[5]利用该方法对 SSM/I 的 H 极化 85 GHz 通道数据进行地理定位,并通过提高卫星星历精度和修正姿态角,将定位误差控制到 7 km 以内。由于海陆交界处的亮温梯度较大,WIEBE et al.^[6]通过修正载荷的指向角和扫描角来降低海岸线附近的升降轨数据亮温差,优化了 AMSR-E 定位结果。PURDY et al.^[7]对全极化辐射计 WindSat 进行了地理定位和指向精度分析,通过修正时间和波束指向误差,定位精度优于 5 km,满足精确极化测量的要求。我国的微波辐射计研究起步较晚,2002 年 12 月

神舟四号飞船成功发射^[8],其搭载多模态微波遥感器(包括散射计、辐射计和高度计)获取大量的在轨数据,为载荷上星积累了丰富的算法实践经验。此后的风云三号卫星和海洋二号等卫星均搭载微波辐射计,其地面系统的定位算法也采用几何定位模型,并取得了不错的精度^[4,9]。

1 微波辐射计工作原理

海洋二号 B 卫星(简记为“HY-2B”)于 2018 年 10 月 25 日从太原卫星发射中心发射升空,是我国第二颗极轨海洋动力环境卫星。星上搭载的微波辐射计(Scanning Microwave Radiometer, SMR)是由一个偏置抛物面反射器和馈源喇叭组成的全功率辐射计,天线波束指向与星下点方向夹角为 44°,通过旋转机构的 360°转动,在飞行方向一定角度范围内实现对地扫描,获取地球表面和大气的辐射数据,同时在方位向进行冷空观测和热源观测,收集到数量充足的定标数据^[10]。载荷的性能指标见表 1,其观测几何如图 1 和图 2 所示。

2 地理定位算法

SMR 地理定位算法是利用采样时刻的卫星星历和天线波束的指向,构建几何定位模型来计算地面点的位置。该方法的优势是原理简单,计算快速。影响定位精度的因素有卫星星历、卫星姿态、波束指向和时间等。地理定位流程如图 3 所示。

表 1 HY-2B 卫星微波辐射计主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of HY-2B satellite microwave radiometer

| 频率/ GHz | 极化 方式 | 射频带宽/ MHz | 对地采样点数 | 扫描方式 | 刈幅宽度/ km | 指向角/ (°) | 扫描 周期/s | 辐射 灵敏度/K | 空间 分辨率/km |
|------------|----------|--------------|--------|------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|
| 6.925 | V/H | 350 | 150 | 圆锥扫描 | >1 600 | 44 | 3.78 | <0.5 | 74×122 |
| 10.7 | V/H | 100 | 150 | 圆锥扫描 | >1 600 | 44 | 3.78 | <0.6 | 56×93 |
| 18.7 | V/H | 200 | 150 | 圆锥扫描 | >1 600 | 44 | 3.78 | <0.5 | 31×51 |
| 23.8 | V | 400 | 150 | 圆锥扫描 | >1 600 | 44 | 3.78 | <0.5 | 27×44 |
| 37 | V/H | 1 000 | 150 | 圆锥扫描 | >1 600 | 44 | 3.78 | <0.8 | 17×28 |

注:“H”表示水平极化,“V”表示垂直极化,下同。

2.1 时间确定

采样时间是计算卫星星历和波束指向的基准。SMR 时间采样策略是当天线旋转到某一特定角度时,记录一个星上时间,存储在载荷原始数据包。因此,计算某扫描行某采样点的时间采用如下公式:

$$t_i = t_{\text{base}} + t_{\text{sat}} + t_{\text{local}} - t_0 + (i - 1)\Delta t. \quad (1)$$

其中: t_i 为某扫描行第 i 个采样点的时间; t_{sat} 为星上时间码, t_{local} 为本地计时时间,两者均从载荷原始数据包中读取,是以基准时间为起点的累计秒; t_0 为从起始采样点角度旋转到载荷时间获取角度的时间间隔; Δt 是采样时间间隔,为固定值 10 ms; t_{base} 为基准时间,即 2016 年 1 月 1 日 00:00:00(UTC)。

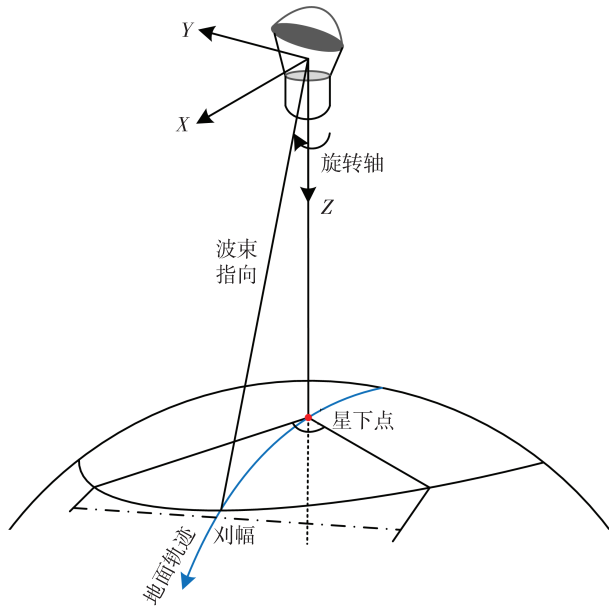


图1 微波辐射计扫描几何示意图
Fig.1 Scanning geometry of microwave radiometer

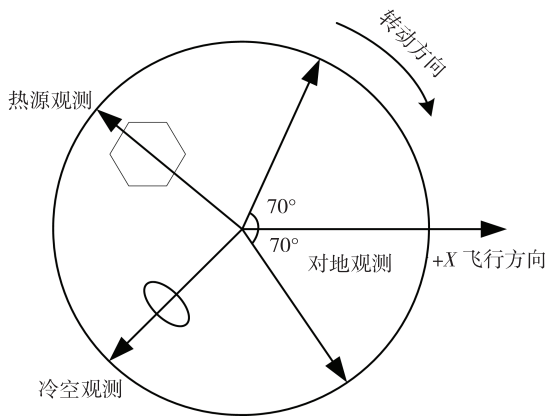


图2 扫描系统工作模式示意图
Fig.2 Schematic diagram of scanning system's operating mode

2.2 卫星星历获取

HY-2B 卫星星历获取的方法一般有两种:一种是通过星载全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 接收机获取地固坐标系 (Earth-Centered, Earth-Fixed, 简称“ECEF”) 下的卫星位置和速度,然后利用3次样条插值方法得到仪器采样时刻的卫星位置,简称“GPS法”;另一种是利用两行元素轨道报 (Two-Line Element Set, 简称“TLE”), 结合SGP4 (Simplified General Perturbations 4) 轨道预测模型直接计算得到真赤道平春分点坐标系 (True Equator Mean Equinox, TEME) 下的仪器采样时刻卫星位置和速度,然后再转换成地固坐标,简称“TLE法”。TLE法获取的卫星位置比从星上

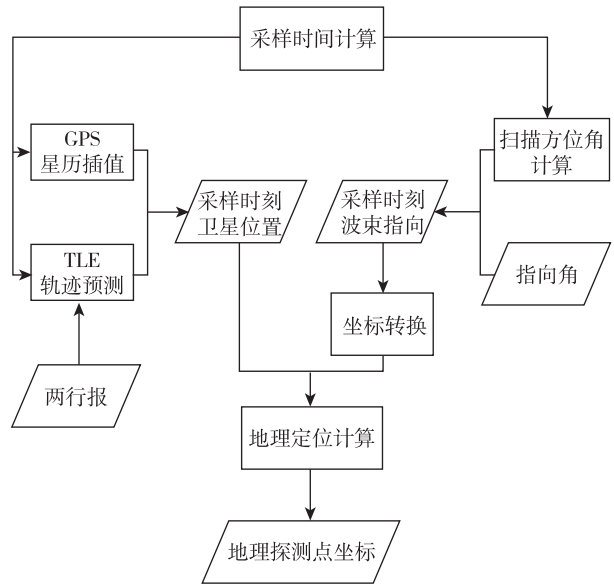


图3 地理定位流程图
Fig.3 Flow chart of geolocation

GPS 获取的位置精度低,在历元时刻的轨道计算精度为 1 km 左右,并以每天 1~3 km 的误差不断累积^[11]。在 HY-2B 微波辐射计处理业务中,会每天更新 TLE 文件,因此 TLE 法的累积误差可以忽略。TEME 坐标系到 ECEF 坐标系的转换公式如下:

$$\mathbf{r}_{ECEF} = \mathbf{T}_{ECEF/TEME} \mathbf{r}_{TEME}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{r}_{TEME} 为 TEME 坐标系下的卫星位置矢量, \mathbf{r}_{ECEF} 为 ECEF 坐标系下的卫星位置, $\mathbf{T}_{ECEF/TEME}$ 是 TEME 至 ECEF 的转换矩阵。

转换矩阵可用如下公式计算^[12]:

$$\mathbf{T}_{ECEF/TEME} = \mathbf{R}(y, -x_p) \mathbf{R}(x, -y_p) \mathbf{R}(z, \theta_G). \quad (3)$$

其中, \mathbf{R} 表示绕某个坐标轴逆时针转动某个角度的坐标变换矩阵^[12-13]; x_p 和 y_p 是极移两分量,可在 IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) 网站获取; θ_G 是格林尼治恒星时角,具体计算方法可参考文献[11]。

2.3 天线波束指向计算

SMR 天线波束指向的计算涉及到天线坐标系、仪器坐标系、卫星本体坐标系、轨道坐标系、J2000 惯性坐标系和地心地固坐标系的相互转换。坐标系定义见表 2。

2.3.1 天线坐标系到仪器坐标系的转换

天线坐标系到仪器坐标系可以通过天线的安装矩阵 $\mathbf{T}_{inst/ante}$ 来进行转换。该矩阵一般在卫星发射前进行测量,可以视为一个常量。

2.3.2 仪器坐标系到卫星本体坐标系的转换

仪器坐标系到卫星本体坐标系可以用仪器的

安装矩阵 $T_{\text{sat}/\text{inst}}$ 进行转换。该矩阵在卫星发射前进行测量,卫星在轨后可以对该矩阵进行更新。

表 2 各坐标系定义

Table 2 Definition of different coordinate systems

| 坐标系名称 | 坐标原点 | 坐标轴描述 |
|-------------|----------|--|
| 天线坐标系 | 天线反射面中心 | Z_{ante} 轴指向地面, X_{ante} 轴与卫星滚动轴同向, Y_{ante} 轴为右手系方向 |
| 仪器坐标系 | 辐射计安装面中心 | Z_{inst} 轴垂直于仪器安装面指向地面, Y_{inst} 轴为安装面中心指向精测镜方向的反方向, X_{inst} 轴为右手系方向 |
| 卫星本体坐标系 | 卫星质心 | Z_{sat} 轴指向地心, X_{sat} 轴与卫星的滚动轴一致, Y_{sat} 轴为右手系方向 |
| 轨道坐标系 | 卫星质心 | Z_{orb} 轴指向地心, Y_{orb} 轴指向轨道平面的负法线方向, X_{orb} 轴为右手系方向 |
| J2000 惯性坐标系 | 地球质心 | 参考平面为 2000.0 地球平赤道面, X_{J2000} 轴在基本平面内由地球质心指向 2000.0 的平春分点, Z_{J2000} 轴为基本平面的法向, 指向北极方向。 Y_{J2000} 为右手系方向 |
| 地心地固坐标系 | 地球质心 | 参考平面为地心和国际协议原点 (conventional international origin, CIO) 连心正交的平面, Z_{ECEF} 轴指向 CIO, X_{ECEF} 轴指向参考平面与格林尼治子午面的交点方向 ^[11] , Y_{ECEF} 轴为右手系方向 |
| 大地坐标系 | 地球质心 | 大地经度 L 为大地起始子午面与该点所在的子午面所构成的二面角, 大地纬度 B 是经过该点作椭球面的法线与赤道面的夹角, 大地高 H 是地面点沿椭球的法线到椭球面的距离 |

2.3.3 卫星本体坐标系到轨道坐标系的转换

卫星本体坐标系到轨道坐标系的转换矩阵 $T_{\text{orb}/\text{sat}}$ 可以通过卫星姿态角旋转的方式实现, 姿态数据随时间变化。3 个姿态角的旋转顺序为 2-1-3 (即俯仰-滚动-偏航), 计算公式^[14] 如下:

$$T_{\text{orb}/\text{sat}} = \begin{bmatrix} \cos Y & -\sin Y & 0 \\ \sin Y & \cos Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & -\sin R \\ 0 & \sin R & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & 0 & \sin P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin P & 0 & \cos P \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, P 为俯仰角, R 为滚动角, Y 为偏航角。如果卫星的飞行姿态为 0 时, 两个坐标系是重合的。

2.3.4 轨道坐标系到 J2000 惯性坐标系的转换

要实现轨道坐标系与 J2000 惯性坐标系的坐标转换, 首先要计算得到轨道坐标系的 3 个坐标轴在惯性坐标系中的单位矢量^[15]。

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{\text{orb}} &= -\mathbf{r}/r \\ \mathbf{y}_{\text{orb}} &= \mathbf{z}_{\text{orb}} \times \mathbf{v}/v, \\ \mathbf{x}_{\text{orb}} &= \mathbf{y}_{\text{orb}} \times \mathbf{z}_{\text{orb}} \end{aligned}, \quad (5)$$

其中, \mathbf{r} 是卫星在惯性坐标系下的位置矢量, r 是卫星位置矢量的模, \mathbf{v} 是卫星在惯性坐标系下的速度矢量, v 是卫星速度矢量的模。

因此, 轨道坐标系到 J2000 惯性坐标系的转换矩阵为:

$$T_{\text{J2000}/\text{orb}} = \begin{bmatrix} x_{\text{orb}}(1) & y_{\text{orb}}(1) & z_{\text{orb}}(1) \\ x_{\text{orb}}(2) & y_{\text{orb}}(2) & z_{\text{orb}}(2) \\ x_{\text{orb}}(3) & y_{\text{orb}}(3) & z_{\text{orb}}(3) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.3.5 J2000 惯性坐标系到地心地固坐标系的转换

J2000 惯性坐标系到地心地固系的坐标转换可以采用经典的岁差章动理论方法, 也可以采用无旋原点的方法。转换矩阵用 $T_{\text{ECEF}/\text{J2000}}$ 表示。具体转换方法可以查阅相关文献, 这里不再赘述。

2.3.6 波束指向计算

波束指向在天线坐标系中, 可以用单位向量表示为:

$$\mathbf{u}_{\text{ante}} = [\sin \alpha \cos \varphi, \sin \alpha \sin \varphi, \cos \alpha]^T. \quad (7)$$

式中: α 为波束指向角, 为 44° ; φ 为波束的扫描方位角, 可通过起始扫描方位角、天线转速和采样时间间隔计算得到。

需将其天线坐标系下的波束指向单位向量转换到地心地固坐标系, 使其与卫星位置处于同一坐标框架下。转换公式如下:

$$\mathbf{u}_{\text{ECEF}} = T_{\text{ECEF}/\text{J2000}} T_{\text{J2000}/\text{orb}} T_{\text{orb}/\text{sat}} T_{\text{sat}/\text{inst}} T_{\text{inst}/\text{ante}} \mathbf{u}_{\text{ante}}, \quad (8)$$

其中, \mathbf{u}_{ante} 为波束指向在天线坐标系下的单位矢量, \mathbf{u}_{ECEF} 为波束指向在地心地固坐标系下的单位矢量。

2.4 采样点位置计算

已知在地心地固坐标系下的卫星位置矢量 \mathbf{r}_{ECEF} 和天线波束指向矢量 \mathbf{u}_{ECEF} , 构建几何定位模型, 可以得到地面采样点的位置 \mathbf{p}_{ECEF} 。原理图如图 4 所示。

几何模型可以用如下公式表示:

$$\mathbf{r}_{\text{ECEF}} + s \cdot \mathbf{u}_{\text{ECEF}} = \mathbf{p}_{\text{ECEF}}, \quad (9)$$

其中, s 为卫星到地面采样点的斜距。

由式(9)可以看出, 要想得到 \mathbf{p}_{ECEF} , 必须先要求解斜距 s , 因此建立椭球方程, 将待求点 \mathbf{p}_{ECEF} 带入

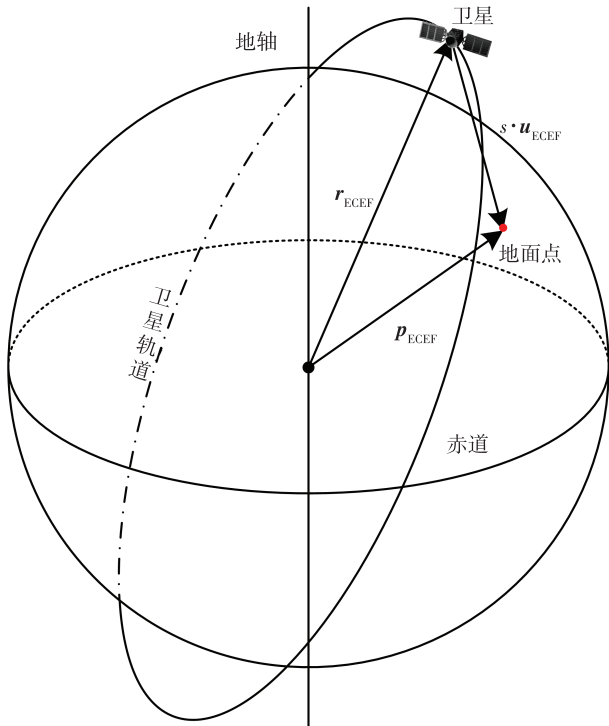


图4 微波辐射计几何定位模型原理图
Fig.4 Schematic diagram of geometric positioning model of microwave radiometer

该方程:

$$p^2x + p^2y + \frac{p_z^2}{(1 - e^2)} = a^2, \quad (10)$$

其中, a 为地球的半长轴, e 为地球偏心率。

将式(9)带入式(10)得到一个简单的一元二次

方程,可以很容易地求出两个解,取斜距 s 的两个根中较小的那一个,因为这个根是天线波束与地球近端的交点。将 s 带入式(9)就可以得到地心地固系中地面采样点的坐标。

$$A \cdot s^2 + B \cdot s + C = 0. \quad (11)$$

最后要将地心地固坐标转换为经纬度坐标,常用的方法是通过多次迭代、快速收敛,得到纬度值和高度值。本文采用 FUKUSHIMA^[16] 根据 Halley 的三阶公式提供的一种求解纬度值的新方法,该方法无需迭代,快速高效。

3 定位结果

由于 SMR 的 9 个通道的馈源指向都略有差异,每个通道都需单独定位。这里将星载 GPS 数据作为卫星星历,采用上述地理定位方法,对 2019 年 6 月 26 日 cycle 号为 018, pass 号为 0045 的数据进行计算,其 10.7 GHz H 极化通道的定位结果如图 5 所示。由于在海岸线附近的探测会同时受到陆地和海洋影响,因此亮温值介于陆地和海洋之间,呈现明显的过渡趋势。将定位结果与精确地理底图叠加显示可以看出,定位偏移比较大且相邻扫描线之间疏密不均匀。其他 8 个通道的定位结果也出现类似情况,将在下一节分析原因并进行改进。

4 偏差分析与结果修正

针对上述 SMR 定位结果出现的偏移问题,根据载荷的工作原理和定位模型综合分析可知,定位点

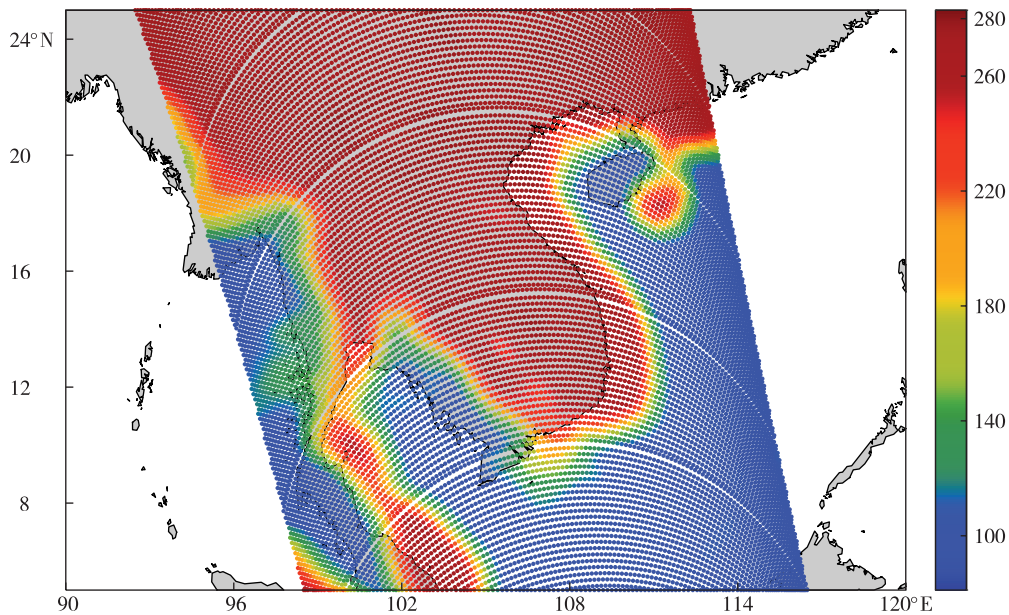


图5 10.7 GHz H 极化通道数据定位结果(色标为亮温,单位:K)
Fig.5 Geolocation results of 10.7 GHz H polarization channel data (color scale for brightness temperature, units: K)

偏移的原因可能是卫星星历误差或扫描方位角误差。相邻扫描线的不均匀性可能有两个原因:一是卫星姿态异常,二是扫描线的起始点的采样时间不准确。下面分别进行具体分析。

4.1 星历精度分析

在 SMR 业务生产中,同时支持 GPS 插值、TLE 轨道预测两种星历计算方法。星上 GPS 的标称精度为 10 m,因此优先采用 GPS 法,当 GPS 数据异常时自动切换到 TLE 法。下面定量比较一下两者的精度差异。提取载荷原始数据包中 2019 年 6 月 26 日的 GPS 数据,将 TLE 法预测的卫星位置与其进行对比。由图 6 可见,TLE 法与 GPS 法的位置偏差小于 1.4 km,与算法标称精度一致。图中的误差曲线有 3 处不平滑的位置(图中画圈的位置)。通过分析 GPS 数据可以推断不平滑的位置可能是因 GPS 天线锁定 GPS 卫星的数量过少,影响了对卫星位置的解算精度,因此有必要利用位置精度为 10 cm 的精密定轨实时产品(real-time orbit ephemeris, ROE)来分析一下载荷包中 GPS 数据的精度。由图 7 可见,99.8%的 GPS 数据点的误差在 10 m 以内,少量数据点的误差大于 10 m,个别点的误差超过 100 m,这说明载荷包中的 GPS 数据精度基本达到了设计指标。对比图 6 和图 7,可以发现图 6 出现不平滑位置的时间与图 7 精度较差的时间相吻合,从而证明了前面的推断。

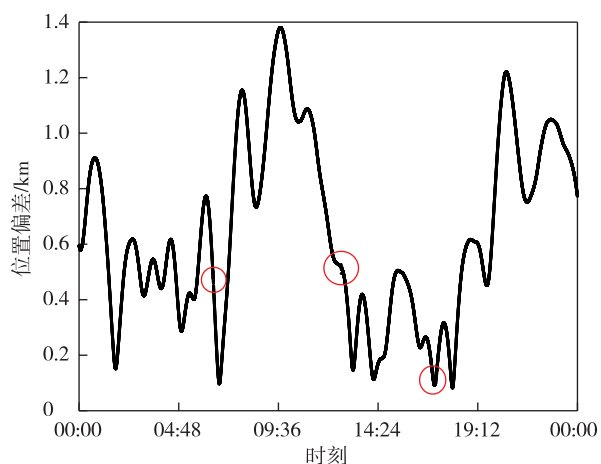


图 6 TLE 法与 GPS 法的位置偏差(红色圆圈代表误差曲线中不平滑的位置)

Fig.6 Position errors of TLE method and GPS method (red circle for unsmoothed place in the error curve)

上述分析表明,对于分辨率较低的微波辐射计来说,卫星星历的精度可以满足定位需求,因此可以确定扫描方位角误差是造成较大定位偏移的主

要原因。

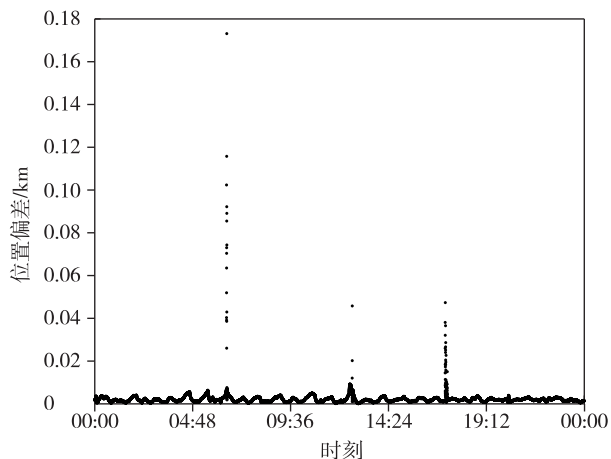


图 7 GPS 与 ROE 的位置偏差

Fig.7 Position errors of GPS and ROE

4.2 时间精度分析

针对图 5 中相邻扫描线疏密不均匀的现象,根据定位原理初步分析,可能是卫星姿态异常或某些扫描线起始观测点的采样时间异常导致的。经过分析,卫星姿态数据没有异常。因 SMR 的扫描周期是 3.78 s,所以相邻扫描线起始观测点的时间差理论值应该是 3.78 s。然而通过分析发现,大部分时间差值分布在标称扫描周期 3.78 s 附近,少量值有规律的波动。图 8a 中的横坐标是扫描线的行号,纵坐标是相邻扫描线起始观测点的时间差值。图 8a 中显示某些相邻扫描线的时间间隔大于 4 s 或小于 3 s,因此推断星上时间获取有误差。通过剔除异常采样时间值,进行线性插值解决了星上时间获取误差的问题(图 8b)。修正后的时间差值分布在 3.792 s 周围,与设计值(3.78 s)接近。

4.3 结果修正

通过修正起始观测点的采样时间和扫描方位角,对 9 个通道分别进行重新定位,选择了全球高中低纬度不同地区的定位结果进行展示(图 9)。地理底图选用 GSHHG (Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database),该底图的位置精度为几十米的量级^[17]。由图 9 可以看出,海洋和陆地的亮温与地理底图的匹配性比较好,海陆边界的亮温过渡也比较自然。因此,该定位修正方法适用于对 SMR 全球数据的地理定位。

5 小结

本文描述了 HY-2B 卫星微波辐射计的工作原理,针对其圆锥扫描的工作方式,给出了一种适用

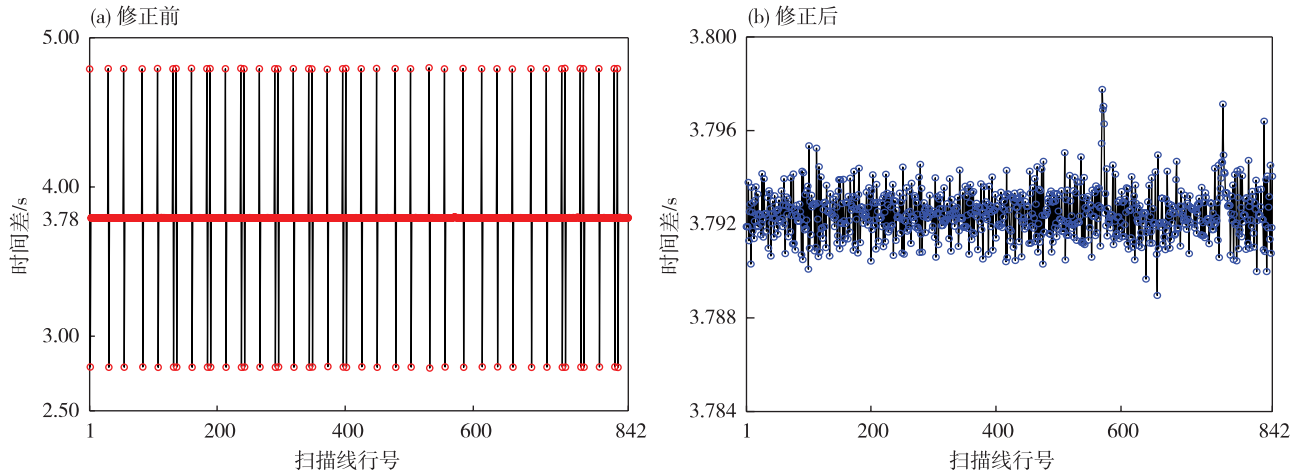


图 8 相邻扫描线起始采样时间差曲线
Fig.8 Difference of start times between adjacent scanning lines

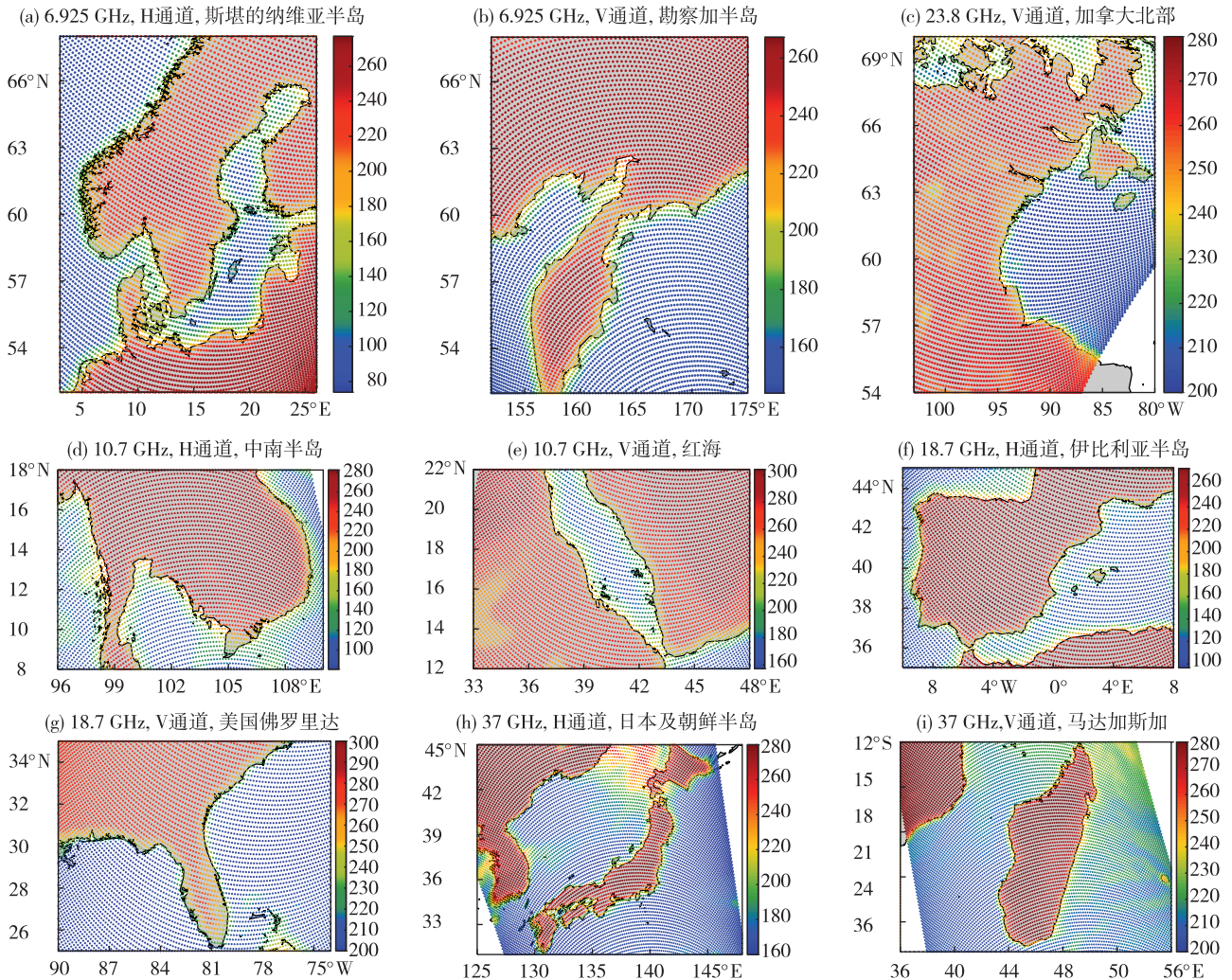


图 9 修正后的定位结果图(色阶为亮温,单位:K)
Fig.9 Revised geolocation results (color scale for brightness temperature, units: K)

的地理定位方法并对 SMR 的 9 个通道分别进行了定位。针对定位结果较差的问题,分析了 GPS 和

TLE 两种方式获取的卫星星历精度。结果表明, GPS 法大部分点的精度优于 10 m,基本满足指标要

求, TLE 法的精度优于 1.4 km, 相对于 SMR 粗糙的分辨率来说, GPS 和 TLE 提供的星历精度都是足够的。针对起始观测点采样时间异常, 利用剔除异常值进行线性插值的方法, 解决了相邻扫描线之间疏密不均匀的问题。通过修正扫描方位角较好地解决了定位结果偏移比较大的问题。将定位结果与高精度的地理底图叠加发现, 定位结果与海陆边界匹配较好, 可以应用到业务化生产工作中。

参考文献:

- [1] 蒋兴伟, 林明森, 宋清涛. 海洋二号卫星主被动微波遥感探测技术研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 4-11.
- [2] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave remote sensing: active and passive. Volume I: microwave remote sensing fundamentals and radiometry [M]. Reading: Addison-Wesley Publishing Co., 1981.
- [3] 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[J]. 航天器工程, 2016, 25(2): 145-152.
- [4] 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.
- [5] POE G A, CONWAY R W. A study of the geolocation errors of the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1990, 28(5): 791-799.
- [6] WIEBE H, HEYGSTER G, MEYER-LERBS L. Geolocation of AMSR-E data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(10): 3098-3103.
- [7] PURDY W E, GAISER P W, POE G A, et al. Geolocation and pointing accuracy analysis for the WindSat sensor [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44(3): 496-505.
- [8] 张德海, 姜景山, 郑震藩, 等. 神舟 4 号主载荷: 多模态微波遥感器[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 74-80.
- [9] 吴奎桥, 林明森, 郭振宇. HY-2 卫星微波辐射计地理定位方法[J]. 中国工程科学, 2014, 16(6): 21-26.
- [10] 李延明, 姜敏, 余锐, 等. 海洋二号卫星微波辐射计系统设计[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 39-43.
- [11] VALLADO D A, CRAWFORD P, HUJSAK R, et al. Revisiting Spacetrack Report #3: Rev 3 [C]. AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference, Keystone, Colorado, 2006.
- [12] 李济生. 航天器轨道确定 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [13] 张玉祥. 人造卫星测轨方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [14] TANG F, ZOU X L, YANG H, et al. Estimation and correction of geolocation errors in FengYun-3C Microwave Radiation Imager data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2015, 54(1): 407-420.
- [15] DUNBAR R S, HSIAO S V, KIM Y J, et al. Science algorithm specification for SeaWinds on QuikSCAT and SeaWinds on ADEOS-II [M]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2001: 4-61.
- [16] FUKUSHIMA T. Transformation from Cartesian to Geodetic coordinates accelerated by Halley's method [J]. J Geodesy, 2006, 79(12): 689-693.
- [17] WESSEL P, SMITH W H F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database [J]. J Geophys Res: Solid Earth, 1996, 101(B4): 8741-8743.