

FY-3D/MWRI在不同轨道位置的重采样误差分析

张洲^{1,2}, 王振占¹, 何文明^{1,2}, 佟晓林¹, 丁甲^{1,2}

1. 中国科学院国家空间科学中心 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要: 中国风云三号 (FY-3) 卫星是国际气象组织组网卫星之一, 其搭载的微波成像仪 (MWRI) 可为气象研究、天气预报等多个领域提供有效数据。在应用 MWRI 数据进行多频率探测通道的协同反演时, 必须考虑通过重采样来使不同探测频点的数据具有一致的空间分辨率。BG (Backus-Gilbert) 方法是一种被广泛用于星载微波辐射计亮温数据重采样的方法。传统重采样方式应用 BG 方法计算辐射计单次旋转扫描得到的采样点的权重系数 (预计算权重系数), 并将其直接应用到所有旋转扫描获取的采样点上, 进而完成全部数据的重采样。然而, 在卫星仪器的采样过程中, 地球椭球面等因素的影响会导致观测视场之间的相对位置发生改变, 将预计算权重系数直接应用到全部数据会给重采样带来误差。因此, 本文提出一种结合天线方向图投影定位方法的重采样方式, 详细分析了 MWRI 数据在不同轨道位置的重采样效果。实验结果表明, 本文采用的重采样方式能够在 MWRI 的不同的通道组合上修正传统重采样方式造成的平均 1.32 K 的亮温误差。本文指出并修正了重采样亮温的一种误差来源。未来在使用多频率探测通道数据协同反演地球物理参数时, 根据反演参数对亮温变化的敏感程度, 应用本文方式获取的重采样数据可以获得更准确的反演结果。

关键词: FY-3D 微波成像仪, Backus-Gilbert 方法, 亮温, 重采样, 拟合误差, 空间分辨率, 采样, 误差分析

中图分类号: TP722.6/P2

引用格式: 张洲, 王振占, 何文明, 佟晓林, 丁甲. 2025. FY-3D/MWRI 在不同轨道位置的重采样误差分析. 遥感学报, 29(1): 219-231

Zhang Z, Wang Z Z, He W M, Tong X L and Ding J. 2025. Analysis of resampling error of FY3D/MWRI at different orbital positions. National Remote Sensing Bulletin, 29(1): 219-231 [DOI: 10.11834/jrs.20243207]

1 引言

搭载在中国风云三号 (FY-3) 系列气象极轨卫星上的微波成像仪 (MWRI) 是一种高灵敏度全功率辐射计, 其通道分别为 10.65V/H、18.7V/H、23.8V/H、36.5V/H 和 89V/H-GHz, 目的是观测全球洋面、陆表、大气等关键环境参数。其中, 大部分的地表参数及气象参数例如土壤湿度, 雪覆盖, 降水, 是需要多通道探测信息协同反演 (王振占等, 2023)。因此, 为了提高反演精度, 在应用 MWRI 数据协同反演时, 必须考虑通过重采样来使不同探测频点的数据具有一致的空间分辨率。通过匹配空间分辨率来实现重采样有两种方法。一种是将低频通道的空间分辨率增强, 另一种则

是将高频通道的空间分辨率降低。值得注意的是, 由于空间分辨率增强效果差强人意, 目前对于星载微波辐射计亮温数据的重采样通常采用空间分辨率降低的方式来实现。

BG (Backus-Gilbert) 方法是目前最常用的星载微波辐射计数据空间分辨率匹配方法, 其核心在于利用辐射计不同通道对地观测视场之间的相对位置关系以及天线方向图等先验信息, 在目标采样点上寻找相邻的待匹配通道 (下文称源通道) 方向图的最优线性组合 (权重系数), 重构出最接近于目标通道方向图的合成方向图, 进而实现源、目标通道空间分辨率的匹配。其中, 源、目标通道方向图观测视场之间相对位置关系的一种示意如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 方向图视场间相

收稿日期: 2023-06-25; 预印本: 2023-12-18

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2022YFB3903303)

第一作者简介: 张洲, 研究方向为微波辐射计地理定位校正、重采样等。E-mail: 905479655@qq.com

通信作者简介: 王振占, 研究方向为微波遥感定标、定量反演与应用技术。E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn

对位置关系在BG方法的计算中起到了重要作用。BG方法起初用于解决从有限的模糊的观测数据中建立地球模型的反演问题(Backus和Gilbert, 1967; Backus和Gilbert, 1968, 1970)。Stogryn (1978)最先将该方法用于处理微波辐射计数据,通过估计测量点附近的观测亮温对测量点位置的测量值的贡献权值,消除相邻亮温之间的重叠模糊。Poe (1990)首次利用BG方法对SSM/I仪器的天线方向图进行了最佳插值匹配,成功将高频通道亮温数据匹配到低频通道。随后,学者们将BG方法广泛应用于各种多频微波辐射计的空间分辨率匹配,代表性仪器的有SSM/I (Long和Daum, 1998)、SMAP (Long等, 2019)、GMI (Petty和Bennartz, 2017)、AMSR2 (Maeda等, 2016; Maeda, 2020)、MWRI (Yang等, 2012)、ATMS (Zhou等, 2022)等。

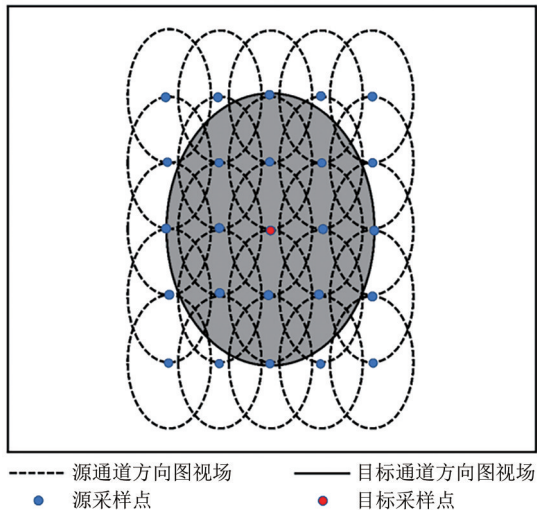


图1 源、目标通道方向图观测视场之间相对位置关系示意图
Fig. 1 The relative position between the observation fields of the source and target channel antenna pattern

在MWRI上的重采样主要可分为3个过程。首先,计算出目标通道在MWRI单次旋转扫描过程

中获取的所有对地采样点的位置(目标采样点)以及对应的视场(目标通道视场),同时计算出这些目标通道视场内所有起作用的源通道采样点及其对应视场。其次,利用源、目标通道视场间的相对位置关系以及对应的天线方向图信息,在每个目标采样点上应用BG方法计算最佳的权重系数,所有目标采样点的权重系数组成预计算权重系数。最后,在假定卫星仪器每次对地旋转扫描获取的采样点之间的相对位置保持不变的前提下,将预计算权重系数直接应用到所有旋转扫描获取的采样点上,完成亮温数据的重采样(Maeda等, 2016)。然而,随着卫星仪器的在轨运动,源、目标通道方向图在地球表面投影视场的相对位置会发生一定变化,这将导致从MWRI单次旋转扫描中预先计算的权重系数不再适用于其他旋转扫描所获取的样本,进而在重采样的亮温数据上产生额外的亮温误差。

因此,在这篇文章中,我们以BG方法对FY-3D MWRI仪器进行分辨率降低的应用为例,提出结合天线方向图投影定位方法的重采样方式,并详细的分析了MWRI仪器在不同轨道位置时的重采样效果。实验结果表明,我们的方式能够有效修正应用传统重采样方式给重采样数据带来的亮温误差,为多频率探测通道的协同反演提供更准确的重采样亮温数据。

2 仪器与重采样误差来源分析

2.1 MWRI

MWRI具有覆盖10—89 GHz的5个观测频点,每个频点有垂直和水平两种极化,共计10个遥感通道。所有通道使用相同的地理位置信息,如经度、纬度、入射角和方位角。仪器相关参数及通道信息由表1给出。

表1 MWRI仪器特征
Table 1 MWRI instrument characteristics

通道中心频率/GHz	极化	3 dB 足印/km		采样间隔/km		波束宽度/(°)
		Cross-track	Along-track	Cross-track	Along-track	
10.65	V/H	51	85	6	11	2.01/2.03
18.7	V/H	30	50	6	11	1.18/1.17
23.8	V/H	27	45	6	11	0.99/0.99
36.5	V/H	18	30	6	11	0.62/0.62
89	V/H	9	15	6	11	0.29/0.29

MWRI在836 km的高度飞行,主反射镜对地视角为 45° ,在地表实际的入射角约为 53.1° ,在地球上的扫描幅宽为1400 km。MWRI采用的地球模型为WGS84模型,采用的扫描方式是匀速圆周运动的固定视角圆锥扫描方式。扫描角在 37.5° 和 143° 之间时对地球扫描,以星下点为中心对地扫描范围是 $\pm 52^\circ$ 。顺着卫星飞行方向,扫描方向是从左向右,每次扫描旋转共获得266个对地观测样本。如图2(a)所示。本文主要采用MWRI获取的Level-1(L1)数据用于实验与验证。L1数据会按照时间、升降轨等要素分为多个HDF格式的数据文件,每个数据文件在沿轨(Along-track)方向

和交轨(Cross-track)方向分别包含1824个、266个采样点。随后我们将MWRI在Along-track方向扫描得到的采样观测称为扫描行,在Cross-track方向单次旋转扫描得到的采样观测称为扫描列,如图2(b)所示。其中,不同颜色的圆代表不同通道的地面观测视场,其空间分辨率大小不一。由于采样间隔一致,因此会出现过采样(10.65—36.5 GHz通道)和欠采样(89 GHz通道)的情况。更多关于MWRI L1数据的信息可以在国家卫星气象中心(NMSC)网站上找到。

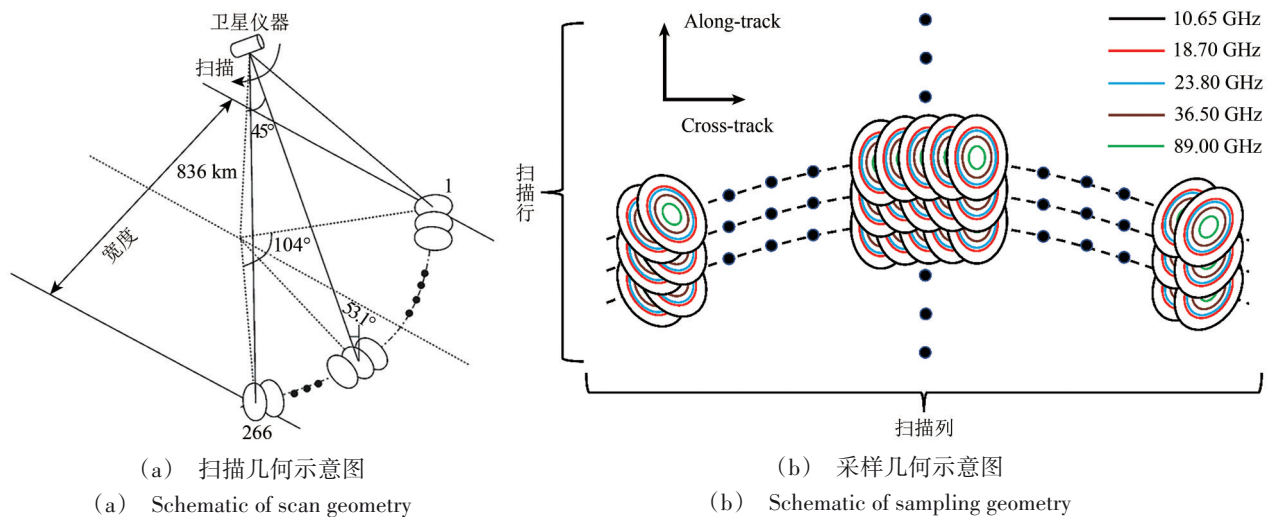


图2 MWRI扫描与采样几何示意图

Fig. 2 Schematic of MWRI scan and sampling geometry

2.2 重采样误差来源分析

引言中简要说明了对MWRI亮温数据重采样的主要过程。这里我们进一步地分析重采样过程中主要的误差来源。

图2(b)展示了理想条件下MWRI对地采样视场的位置分布。从图2中可以看出,在相同的扫描列上,不同扫描行上的视场与周围视场之间的相对位置是保持不变的。也就是说,在源、目标通道天线方向图等先验条件不变的前提下,当目标采样点处于相同的扫描列时,BG方法在其中任意采样点计算的源通道方向图权重系数均不会发生改变。因此,传统重采样方式通过将单个扫描行的所有扫描列上计算的权重系数直接应用到其他扫描行来完成全部数据的重采样。

然而,地球是一个不规则球体。在实际情况下,由于球面曲率、地形等因素的影响,卫星仪

器在不同时刻观测的地球表面并不是一成不变的。因此,在MWRI的L1级数据中,相同扫描列、不同扫描行上的目标通道采样视场与周围源通道采样视场之间的相对位置会发生改变,这将导致BG方法在单个扫描行上计算的权重系数不再适用于其他扫描行,进而在重采样数据中产生误差。除此之外,其他影响MWRI定位的因素,如姿态控制不稳定等,也会在一定程度上造成采样视场间相对位置的改变,进而影响重采样效果。为了进一步验证我们的想法,图3展示了在MWRI的真实数据上(20190402 0607 UTC),目标采样点(第200扫描行132扫描列)与其周围的 19×19 个临近点在不同扫描行的相对位置分布。其中不同颜色的点表示不同扫描行。可以看出,随着扫描行的变化,临近点与目标采样点间的相对位置也发生了变化。这无疑会给重采样数据带来误差。

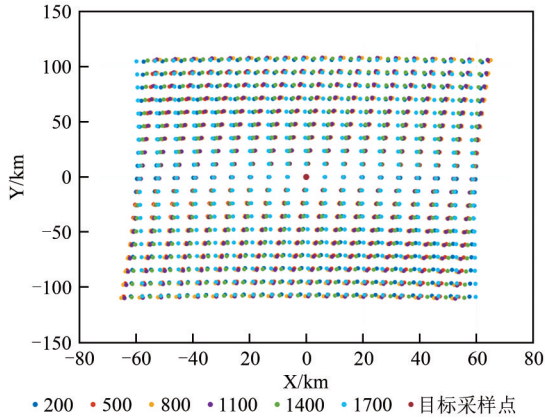


图3 目标采样点与其周围的19*19个临近点在不同扫描行的相对位置分布

Fig. 3 The relative position distribution of the target sampling point and its 19*19 adjacent points in different scan rows

为此,我们采用结合天线方向图投影定位方法的重采样方式,在真实情况下计算地球表面不同区域的重采样结果,进而消除传统重采样方式造成的亮温误差。

3 方法

3.1 天线方向图投影定位方法

模拟 MWRI 在地球表面的视场,需要将天线视向量进行坐标系的转换。首先定义3个坐标系:以地球球心为原点的球坐标系 (IJK)、以观测视场中心为原点的局地坐标系 (ENU) 和以天线接收点为原点的天线视角轴坐标系 (XYB)。

在 IJK 坐标系中, I 轴定义在赤道上从地心指向 0° 经线的方向; J 轴定义为赤道上从地心指向东经 90° ; K 轴定义为地心指向北极点。假设视场中心的经纬度分别为 λ 和 φ , 则 IJK 轴的单位向量可以分别表示为

$$I = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ 0 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

在 ENU 坐标系中, 原点定义为地面视场中心, U 轴由地心指向地面视场中心; E 轴为局地正东方向; N 轴为局地正北方向。 UEN 轴的单位向量分别表示为

$$U = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} -\sin \lambda \\ \cos \lambda \\ 0 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

XYB 坐标系的坐标原点定义在天线主反射镜

中心, B 轴定义为波束视向量方向; X 轴为 ENU 坐标系中观测位置的方位角方向; Y 轴是 B 轴和 X 轴的外积。假设在 ENU 坐标系中卫星的天顶角和方位角分别是 α 和 β , 则 XYB 轴的单位向量可以分别表示为

$$\begin{aligned} \vec{B} &= -\sin \alpha \sin \beta \cdot \vec{E} - \sin \alpha \cos \beta \cdot \vec{N} - \cos \alpha \cdot \vec{U} \\ \vec{X} &= -\sin \beta \cdot \vec{E} + \cos \beta \cdot \vec{N} \\ \vec{Y} &= \vec{B} \times \vec{X} \end{aligned} \quad (3)$$

根据 MWRI 的扫描几何参数以及 WGS84 地球模型, 通过上面定义的3个坐标系, 就可以计算出 MWRI 的地面观测视场和天线方向图在地球表面的投影。更多信息可以在 Tang 等 (2016) 论文中找到。

3.2 Backus-Gilbert 方法

BG 方法既可以提高也可以降低辐射计通道的空间分辨率。这里我们简单介绍用 BG 算法在单个采样点降低空间分辨率的原理。

根据辐射计扫描成像原理可知, 在地球表面 ρ_A 位置的天线亮温 $T_A(\rho_A)$ 可表示为天线方向图 $G(\rho_A, \rho)$ 与地表亮温 $T_B(\rho)$ 的卷积:

$$T_A(\rho_A) = \int G(\rho_A, \rho) T_B(\rho) d\rho \quad (4)$$

BG 方法的核心是寻找相邻 N 个观测值 T_{Ai} 的最优线性组合, 重构出最接近于真实测量值 T_A 的量 (如图1所示)。根据式 (4), 可以将 ρ_0 处天线亮温 $T_A(\rho_0)$ 表示成一组天线亮温 T_{Ai} 的线性组合:

$$T_A(\rho_0) = \sum_{i=1}^N a_i T_{Ai} = \int \left(\sum_{i=1}^N a_i G_i(\rho) \right) T_B(\rho) dA \quad (5)$$

由于绝大多数情况下不能获得可以精确算出 $T_A(\rho_0)$ 的一组权重系数 a_i , 所以 BG 方法的关键问题是如何选择权重系数 a_i 产生最接近真实值的亮温。也就是说, 应找到一组能使源方向图 G_i 完美复制目标方向图 F 的权重 a_i , 使目标方向图与合成方向图之间的绝对差别 (拟合误差) 达到绝对最小。拟合误差的表达式如下所示:

$$Fit Error = \int \left| F - \sum_{i=1}^N a_i G_i \right| dA \quad (6)$$

BG 方法通过最小化拟合误差得到的权重系数可表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{V}^{-1} \left[\mathbf{v} + \frac{1 - \mathbf{u}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{v}}{\mathbf{u}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{u}} \mathbf{u} \right] \quad (7)$$

式中, $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{G}_i$ 、 u_i 、 v_i 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mathbf{G} + \omega \mathbf{E} \beta \\ G_{ij} = \int G_i(\rho) G_j(\rho) dA \\ u_i = \int G_i(\rho) dA \\ v_i = \int G_i(\rho) F(\rho) dA \end{cases} \quad (8)$$

式中, ω 为比例参数, β 为平滑因子, $\mathbf{E}$ 为噪声的协方差矩阵。

以上即为 BG 方法在单个目标采样点的权重系数计算方式。关于 BG 方法的参数选择以及更多详细的信息可在 (Stogryn, 1978; Poe, 1990) 论文中找到。

在实验中, 我们以拟合误差 (式 (6))、噪声因子等参数来评价重采样效果的优劣:

$$\text{Noise Factor} = \sqrt{\mathbf{a}\mathbf{a}^T} \quad (9)$$

式中, 拟合误差代表了合成方向图与目标方向图之间的绝对差别; 噪声因子代表了重构亮温的噪声放大系数, 噪声因子大于 1 代表采样重构时仪器的噪声被放大。反之, 噪声减小。其具体推导过程可见 Maeda 等 (2016) 论文。

4 实验与分析

对 MWRI 数据重采样的主要过程是: 首先应用 BG 方法在某一固定扫描行的所有目标通道扫描列上计算源通道方向图的最佳权重系数作为预计算权重组合, 然后将权重组合直接应用到其他扫描行, 进而完成所有数据的重采样。在第 4.1 节, 我们应用 BG 方法在一个固定扫描行上计算了所有扫描列的权重系数, 并将其视为预计算权重组合。在第 4.2 节, 我们以固定扫描行上的第 1, 44, 133 扫描列的源方向图临近点为例, 计算了这些临近点随扫描行的增加相对于目标采样点发生的位置变化, 并应用预计算权重组合计算了这些变化所造成的拟合误差。在第 4.3 节, 我们在样本数据上验证了本文的重采样方式对亮温误差的修正效果, 同时在长期数据上计算了本文方式对 MWRI 的不同通道组合修正的平均亮温误差。

4.1 固定扫描行的重采样实验

本节选择 2019 年 4 月 1 日 0122 UTC 的 MWRI 数据作为样本数据。以 10.65 GHz H 极化通道的方向图作为目标通道方向图, 10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz、89 GHz H 极化的方向图作为源通道方向图, 对样本数据中第 200 扫描行中所有 266 个目标扫描位置进行重采样。所有目标扫描位

置计算得到的权重系数被组合作为预计算权重组合。

图 4 展示了不同的源、目标通道组合在第 200 扫描行的所有扫描位置上的重采样计算结果。其中, 横坐标表示扫描列号, 纵坐标依次表示平滑因子 (图 4 (a))、噪声因子 (图 4 (b))、拟合误差 (图 4 (c))。其中, 拟合误差和噪声因子均由图 4 (a) 中相应的平滑因子计算得到。由图 4 (b) 可知, 所有源、目标通道组合的噪声因子均小于 1, 这意味着包含在合成亮温中的随机误差总是优于源亮温中的随机误差。由图 4 (c) 可知, 除了源通道方向图 10.65 GHz 的情况外, 随着扫描列由边缘移动到中心, 所有源通道方向图逐渐可以完整的覆盖目标通道方向图, 因此拟合误差逐渐减小。当源、目标通道方向图均为 10.65 GHz 时, 由于方向图具有一致的特征, 因此所有扫描列的拟合误差均较小且不会发生很大的变化。此外, 由于 MWRI 所有通道的采样间隔是一致的, 这导致具有较高空间分辨率的源通道方向图不足以像其他通道一样完全覆盖目标通道方向图, 因此 89 GHz 通道的拟合误差相对较高。

图 5 分别展示了扫描列在 1, 44, 133 时, 源通道 (18.7 GHz) 方向图临近点的相对位置分布以及权重系数取值。图 5 中蓝色 (红色) 方框表示目标通道方向图 (候选源方向图) 边界。3 种情况对应的源方向图临近点个数分别为 194、336、261, 拟合误差分别为 0.3997、0.0116、0.0119。这一结果进一步说明了当扫描列由边缘移动至中心部分时, 目标通道方向图逐渐可以完全被源通道方向图覆盖, 因此计算出的权重系数更容易使拟合误差达到最小。

本节实验展示了 BG 方法在固定扫描行上的计算结果。实验结果表明, 所有源、目标通道组合的噪声因子均小于 1, 且除边缘区域外, 拟合误差较小。这一结果说明传统重采样方式预计算的权重组合能够很好地应用在其本身所采用的固定扫描行上。

4.2 不同扫描行的重采样实验

为了探究扫描行变化对重采样效果的影响, 我们以图 5 中 3 个扫描位置为例, 首先计算了这些扫描位置周围的临近点在不同样本数据上发生的位置变化, 随后应用 4.1 节预计算的权重组合计算了这些位置变化所产生的拟合误差。

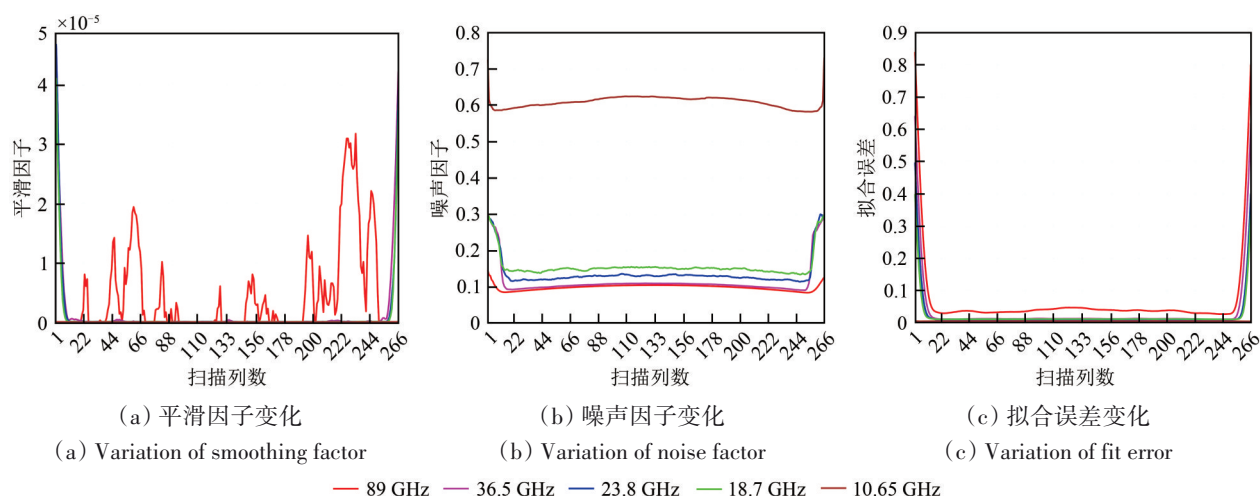


图4 源、目标通道组合(H极化)在所有扫描列上的重采样计算结果

Fig. 4 The resampling calculation results of the source and target channel combination (H polarization) on all scan columns

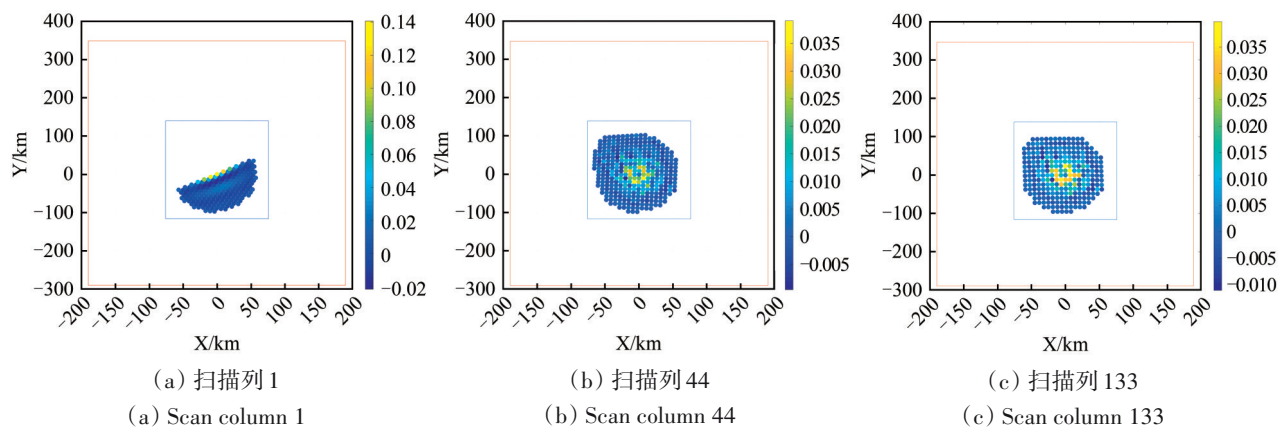


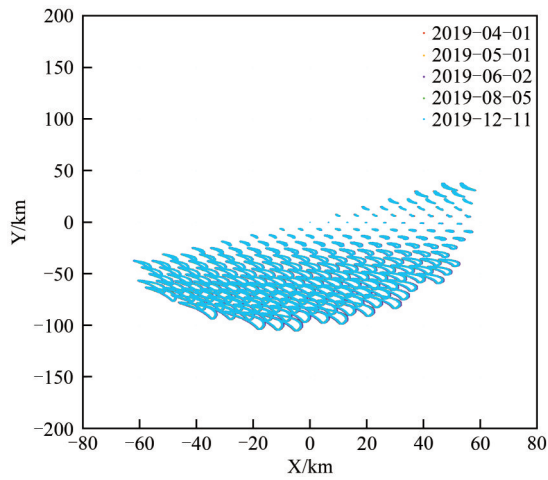
图5 源通道方向图临近点的相对位置分布以及权重系数取值

Fig. 5 The relative position distribution of the adjacent points in the source channel pattern and the value of the weight factor

在 2019-04-01, 2019-05-01, 2019-06-02, 2019-08-05, 2019-12-11 日期中每天随机选择 4 个连续时间段的数据作为实验样本。图 6 展示了图 5 中 3 个扫描列的源方向图临近点在不同时间的样本数据上发生的位置变化 (图 6 (a)、图 6 (c)、图 6 (e)) 以及位置变化均值 (见图 6 (b)、图 6 (d)、图 6 (f))。图 6 (a)、图 6 (c)、图 6 (e) 中不同颜色的点代表不同时间的样本数据, 可以看到, 在所有样本数据中, 各个临近点位置发生了近似一致的变化 (蓝色样本数据覆盖了其他颜色样本数据) 并且以一种特定的轨迹进行近似周期的运动。图 6 (b)、图 6 (d)、图 6 (f) 中实心圆的色阶代表临近点距离变化的均值。从图 6 中可以看出, 距离原点越远的临近点, 其距离变化越大。注意, 由于规定每个扫描列坐标系的 X 轴、Y 轴方向分别为各自采样视场的长轴和短轴, 因此, 图 6 (a)、图 6 (c)、图 6 (e) 中显示的变化轨迹各不相同。

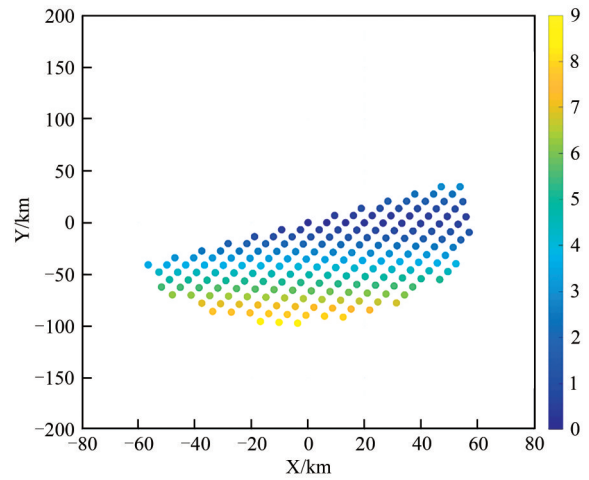
接下来, 我们以 2019-04-01、2019-12-11 时间内的数据 (每天的数据合并后约为 6900 个扫描行) 为例, 应用 4.1 节预计算的权重组合来计算上述临近点位置变化给重采样带来的拟合误差变化。

图 7 展示了 18.7 GHz 源通道与 10.65 GHz 目标通道的组合在 2019-04-01 (图 7 (a)) 以及 2019-12-11 (图 7 (b)) 样本数据上的拟合误差变化。其中, 蓝色、红色、紫色线分别代表扫描列 1、44、133。通过图 7 (a) 与图 7 (b) 的对比可以发现, 3 个扫描列的拟合误差在不同时间段发生了近似一致的周期性的变化。其中, 扫描列 1 由于处于扫描边缘, 因此拟合误差最大。扫描列 44 和 133 的拟合误差变化相近, 前者的拟合误差整体变化略大于后者。这是由于第 44 扫描列的临近点数量 (336) 大于第 133 扫描列 (261), 临近点的位置变化产生了更大的拟合误差。经计算, 图 7 (a) 与图 7 (b) 中 3 个扫描列的最大拟合误差相比于最低点分别增加了 0.0412、0.0906、0.0799。



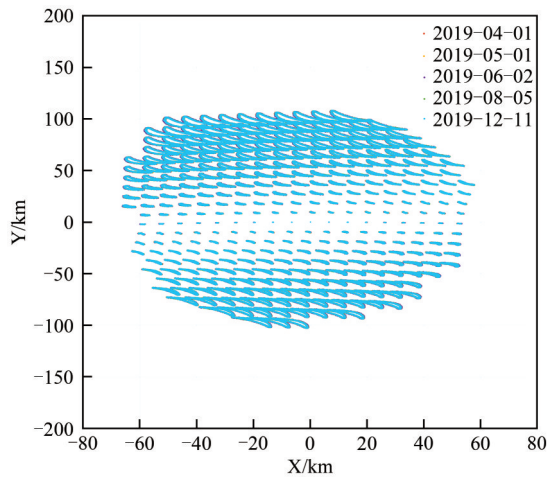
(a) 扫描列 1 的临近点位置变化

(a) Scan column 1's adjacent points position changes



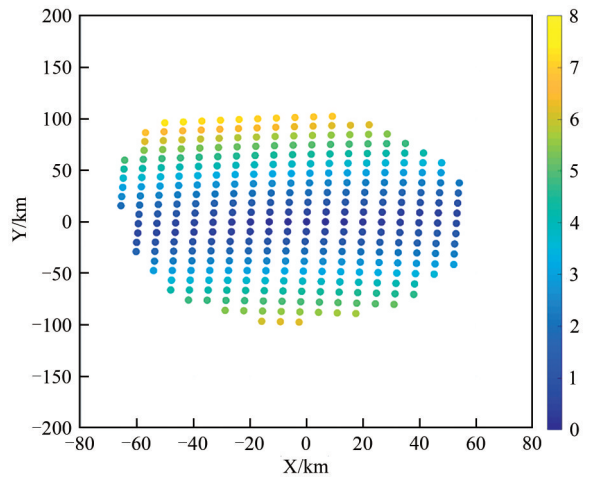
(b) 扫描列 1 的临近点位置变化均值

(b) The mean value of column 1's adjacent points changes



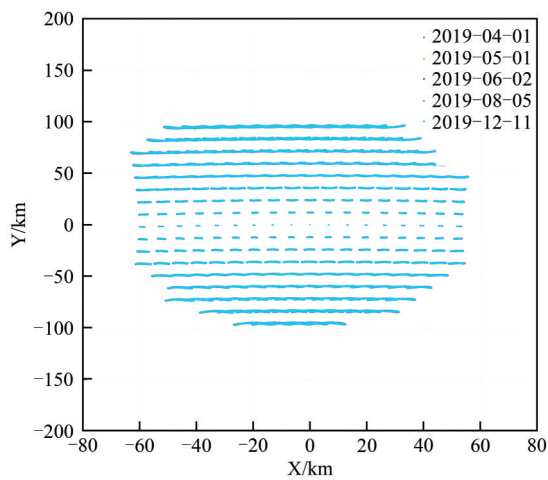
(c) 扫描列 44 的临近点位置变化

(c) Scan column 44's adjacent points position changes



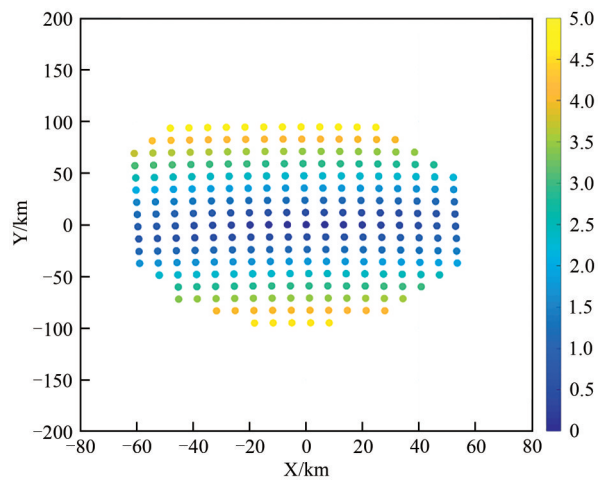
(d) 扫描列 44 的临近点位置变化均值

(d) The mean value of column 44's adjacent points changes



(e) 扫描列 133 的临近点位置变化

(e) Scan column 133's adjacent points position changes



(f) 扫描列 133 的临近点位置变化均值

(f) The mean value of column 133's adjacent points changes

图 6 临近点随样本数据的变化而发生的位置变化以及位置变化均值

Fig. 6 The position change and the mean of position change of adjacent points with the change of sample data

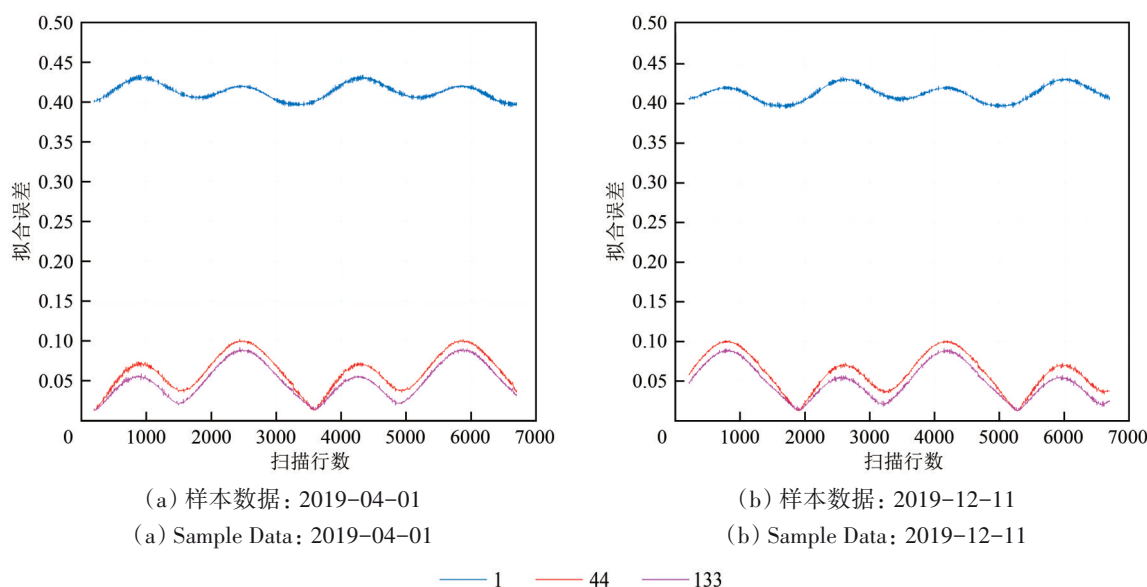


图7 源通道为18.7 GHz,目标通道为10.65 GHz时,3个扫描列在不同样本数据上随扫描行增加发生的拟合误差变化
Fig. 7 When the source channel is 18.7 GHz and the target channel is 10.65 GHz, the fit error changes of the three scan columns with the increase of scan rows on different sample data

4.3 重采样误差分析

在本节,我们以2019-04-01时间内的4个连续时间段数据(数据合并后约6900个扫描行)为样本数据,并选择其中第2100—2400扫描行(15°N — 48°N , 18°W — 10°E)作为实验区域。值得注意的是,扫描开始和结束位置的数据未包含在重采样数据中。

首先,我们在实验区域上计算传统重采样方式(即利用4.1节预计算的固定扫描行权重组合)与本文提出的重采样方式(即利用实验数据中第2250扫描行所计算的权重组合)所产生的拟合误差。图8展示了实验数据的第44扫描列(图8(a))、133扫描列(图8(b))随扫描行增加而产生的拟合误差变化。其中,蓝色、红色线分别表示传统方式和本文方式得到的结果。可以看出,本文采用的重采样方式显著降低了拟合误差,降低后的拟合误差保持在0.01—0.02。两种方式的平均拟合误差差距约为0.076。进一步地,由于原理相似,我们可以推断出实验数据中所有扫描列具有相似的结果。

接下来,我们通过计算通道间亮温差的分布来验证拟合误差的变化对重采样亮温造成的影响。图9(a)展示了下式的亮温分布情况:

$$\Delta T_B = T_{B10.65\text{H}} - T_{B18.7\text{H}} \quad (10)$$

式中, $T_{B10.65\text{H}}$ 和 $T_{B23.8\text{H}}$ 分别为10.65 GHz、18.7 GHz

的H通道对应的原始亮温数据。当扫描位置由陆地接近海岸线时,由于空间分辨率的差异,10.65 GHz通道的天线方向图在18.7 GHz之前覆盖了海洋区域。因此 $T_{B10.65\text{H}}$ 在 $T_{B18.7\text{H}}$ 之前下降,导致 ΔT_B 下降,如图中海岸线附近深蓝色区域所示。当扫描位置穿过海岸线时,18.7 GHz通道方向图覆盖海洋的速度比10.65 GHz快,因此 ΔT_B 增加,如图中海岸线附近深红色区域所示。当两个通道方向图完全越过海岸线时, ΔT_B 再次趋于稳定。海岸线周围的 ΔT_B 反映了两个通道的亮温差异,这一差异包括空间分辨率以及微波发射特性造成的差异。此外,值得注意的是,海岸线附近的亮温差没有完全与海岸线相契合,这可能与MWRI的地理定位误差(Zhang等, 2022)、成像机理以及天线方向图测量误差(王振占等, 2023a; 王振占等, 2023b)等因素有关。

图9(b)展示了下式的亮温分布情况:

$$\Delta \hat{T}_B = T_{B10.65\text{H}} - \hat{T}_{B18.7\text{H}} \quad (11)$$

式中, $\hat{T}_{B18.7\text{H}}$ 为采用传统重采样方式将18.7 GHz H通道亮温重采样到10.65 GHz H通道的亮温。相比于 ΔT_B , $\Delta \hat{T}_B$ 消除了两个通道之间空间分辨率的差异,主要表现为通道间微波发射特性的差异。因此图9(b)中没有出现类似于图9(a)中海岸线周围的异常亮温变化。

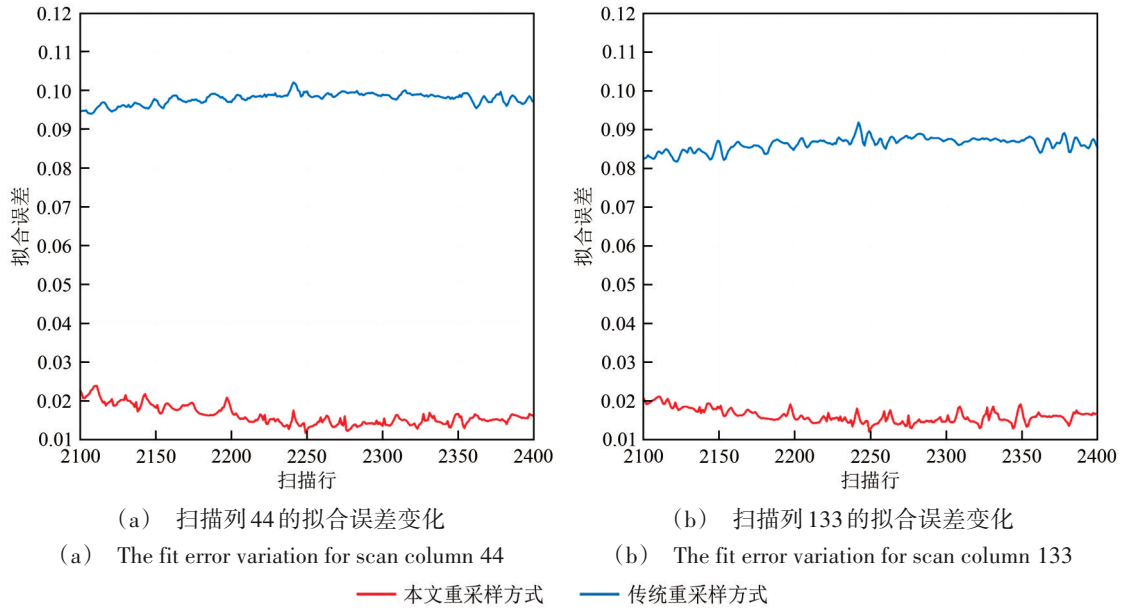


图 8 传统重采样方式和本文重采样方式在实验数据的扫描列上产生的拟合误差

Fig. 8 The fit error generated by the traditional resampling method and the resampling method in this paper on the scanning columns of the experimental data

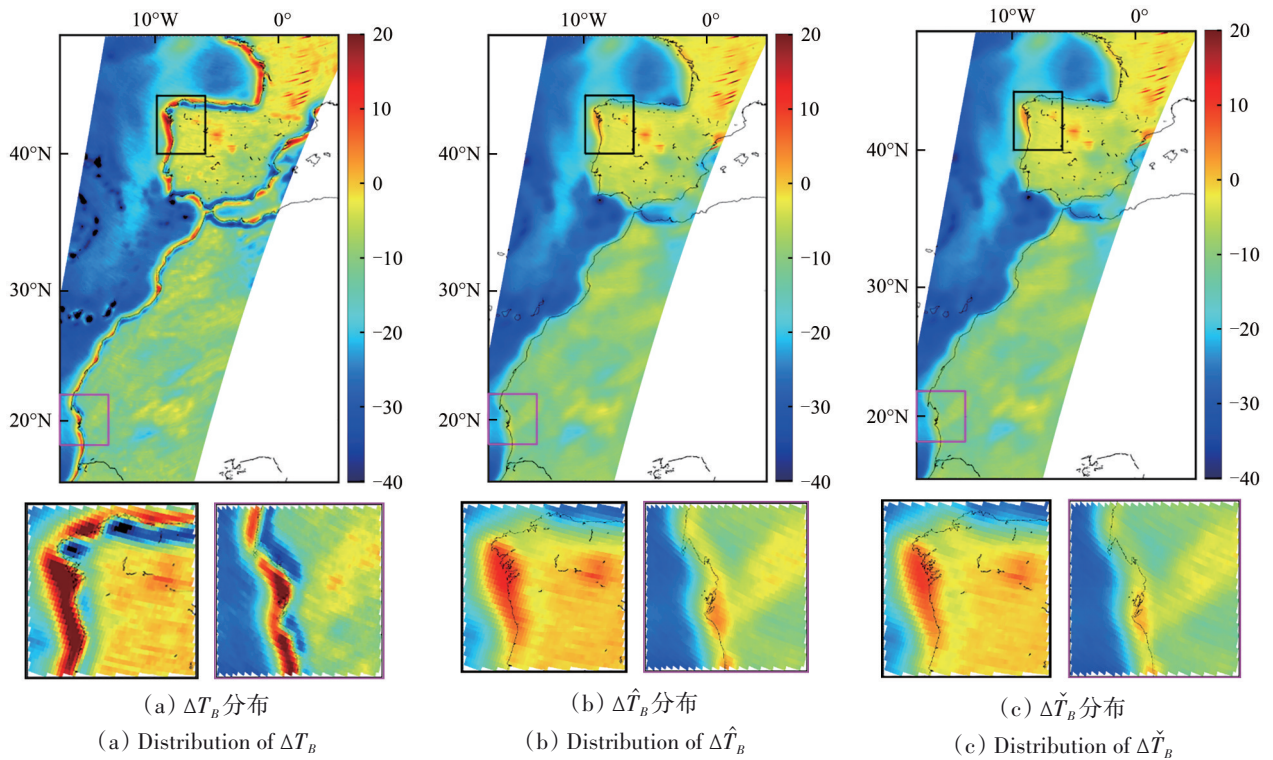


图 9 样本区域的 H 极化通道亮温差分布

Fig. 9 Distribution of H-polarization channel brightness temperature difference in the sample data

图 9 (c) 展示了 $T_{B10.65H}$ 与 $\check{T}_{B18.7H}$ 的差值分布情况。其中, $\check{T}_{B18.7H}$ 为采用本文重采样方式将 18.7 GHz H 通道亮温重采样到 10.65 GHz H 通道的亮温, 如式 (12) 所示:

$$\Delta \check{T}_B = T_{B10.65H} - \check{T}_{B18.7H} \quad (12)$$

从图 9 中放大的黑色框和紫色框可以看出, 相比于图 9 (b), 图 9 (c) 更能消除两个通道之间的空间分辨率差异, 接近海岸线的异常亮温影响更小。

为了更清晰的展示 $\hat{T}_{B18.7H}$ 与 $\check{T}_{B18.7H}$ 的区别, 我

们计算了它们之间差的绝对值,如图10所示。由上述分析可知,该值反映了本文重采样方式在样本区域上修正的传统方式造成的亮温误差。从图中可以看出,亮温误差主要集中在海岸线、岛屿或受云雨等因素影响的亮温分布不均匀的区域。对于亮温分布均匀的海洋或陆地区域,由于两种重采样方式所应用的权重系数之和均为1,因此没有出现亮温误差。定量来看,本文的重采样方式在图中亮温分布不均匀区域修正了最大2.57 K、平均1.67 K的亮温误差。

除此之外,我们还在不同区域上验证了本文提出的重采样方式,实验结果均表明本文的重采样方式具有更好的效果。例如,图11展示了MWRI在2019年5月1日监测到的极强气旋风暴“法尼”附近区域的亮温数据。其中,图11(a)和图11(b)分别为应用传统方式和本文方式在与本节相同的实验条件下得到的重采样亮温。图11(c)为目标通道亮温。从图11中放大区域可以看出,相比于图11(a)图,图11(b)图的亮温数据表现出的空间分辨率信息更加接近图11(c)图,说明本文的重采样方式更好的消除了不同通道间空间分辨率的差异。此外,为了更清晰的展示图11(a)与

图11(b)区别,我们计算了二者之间亮温差的绝对值,如图12所示。从图12中可以发现本文方式所修正的亮温误差集中于海陆边界以及气旋风暴等亮温分布不均匀的区域。经计算,图中亮温不均匀区域的亮温误差最大值、均值分别为2.72 K、1.75 K,该结果与上述样本区域的结果基本一致。

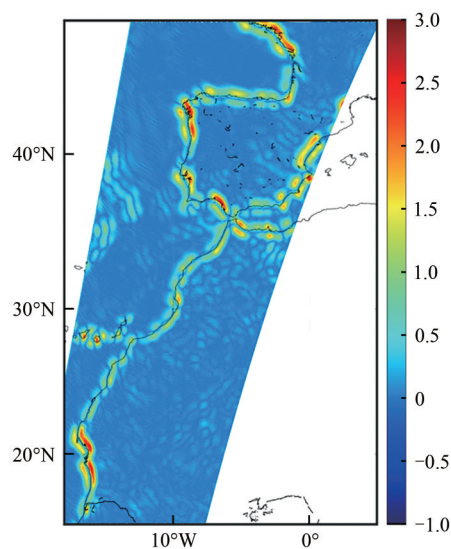


图10 $\hat{T}_{B18.7H}$ 与 $\check{T}_{B18.7H}$ 之间亮温差的绝对值

Fig. 10 The absolute value of the brightness temperature difference between $\hat{T}_{B18.7H}$ and $\check{T}_{B18.7H}$

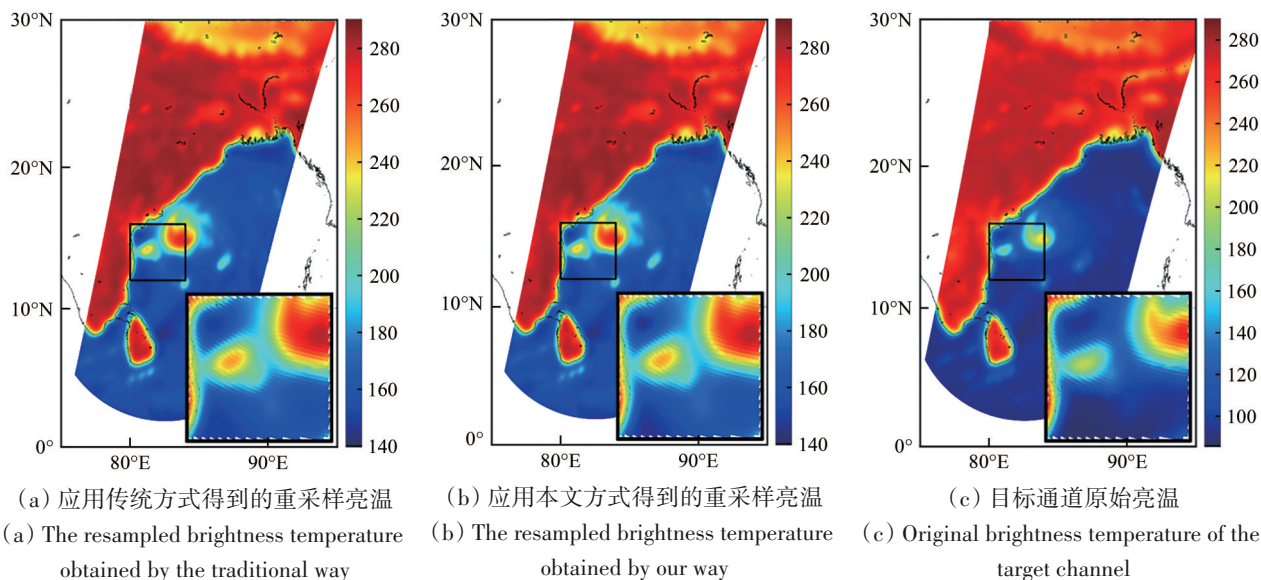


图11 MWRI在2019年5月1日监测到的气旋风暴“法尼”附近区域的亮温分布

Fig. 11 Brightness temperature distribution of the area near Cyclone "Fani" monitored by MWRI on May 1, 2019

以上结果说明当源、目标通道组合为18.7 GHz、10.65 GHz时,本文采用的重采样方式能够在样本数据上有效修正传统方式造成的亮温误差。进一步地,我们还在MWRI的长期数据上(2019-04-

01—2019-12-11)计算了本文的重采样方式在不同的源、目标通道组合修正的平均亮温误差,如表2所示。从表2中可以看出,本文的重采样方式在所有不同的通道组合上都起到了显著的效果。

从整体上看,随着目标通道频率的降低,修正的亮温误差逐渐增大。这是由于随着目标视场变大,所需源通道临近点数量增加,因此,临近点的相对位置变化会对重采样结果造成更大的影响。此外,值得注意的是,当源、目标通道相同时,修正的亮温误差接近于0。这是由于两个通道之间不存在空间分辨率差异,起作用的源通道临近点集中于目标采样点中心附近。而通过前面的实验我们知道在目标采样点中心附近的临近点的位置基本不会发生变化。因此,在这种情况下,传统重采样方式基本不会带来误差。同理,当源、目标通道频率分别为23.8 GHz、18.7 GHz时,由于两个通道的空间分辨率十分接近,其亮温误差也相对较小。

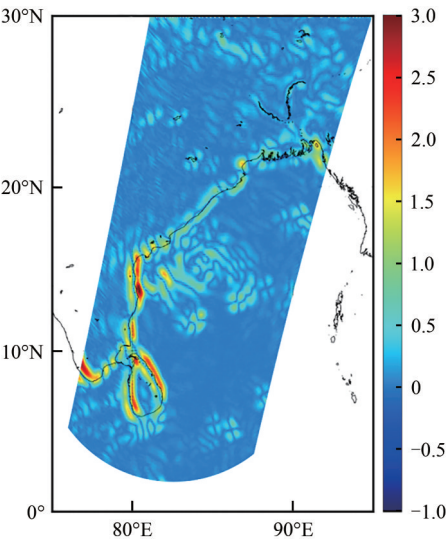


图 12 图 11(a)与图 11(b)间亮温差的绝对值
Fig. 12 The absolute value of the brightness temperature difference between Fig. 11(a) and Fig. 11(b)

表 2 本文的重采样方式在不同的源、目标通道组合修正的平均亮温误差

Table 2 The mean brightness temperature error corrected by the resampling way in this paper under different source and target channel combinations

源通道/GHz	目标通道/GHz				/K
	10.65	18.7	23.8	36.5	
10.65	0.09				
18.7	1.73	0.07			
23.8	1.58	0.59	0.07		
36.5	1.87	1.54	1.24	0.06	
89	1.41	1.22	1.13	0.89	

综合上述分析,不论是在样本数据还是长期数据的实验中,本文采用的重采样方式均能够很

好地修正传统重采样方式造成的亮温误差。在MWRI的10种不同的通道组合上可修正平均1.32 K的亮温误差。

5 结 论

MWRI数据被广泛用于全球陆表、大气等参数的反演。其中,大部分地表参数及气象参数需要使用重采样数据进行多通道信息协同反演,例如土壤湿度,雪覆盖,降水等。因此,为了有效利用重采样数据,本文提出了一种结合天线方向图投影定位方法的重采样方式,探究了MWRI在不同轨道位置的重采样效果。

在固定扫描行的重采样实验中,我们在样本数据的第200扫描行上实现了不同的源、目标通道组合的重采样。结果表明传统重采样方式在固定扫描行上能够实现较好的重采样效果。在不同扫描行的重采样实验中,我们在2019-04-01—2019-12-11时间范围内随机选择的样本数据上,计算了第1、44、133扫描列的源方向图临近点在样本数据上产生的相对位置变化,随后计算了相对位置变化对重采样造成的拟合误差。结果表明临近点位置的变化最大可导致拟合误差发生0.09左右的恶化。在误差分析实验中,我们通过计算通道间亮温差的分布,在MWRI的样本数据以及长期数据上验证了本文重采样方式对亮温误差的修正效果。具体来说,本文采用的重采样方式能够在MWRI的10种不同的通道组合上修正平均1.32 K的亮温误差。

综上所述,本文详细分析了MWRI仪器在不同轨道位置时的重采样效果,指出了重采样亮温的一种误差来源,为将来进行高精度的多频率探测通道协同反演奠定了基础。但以下问题仍需进一步研究。根据本文的结论,当我们应用MWRI重采样数据反演某区域的地球物理参数时,理想条件下应结合卫星轨道数据计算该区域的所有扫描位置的最佳权重系数来避免亮温误差的产生。然而,由于运算时间问题,我们无法对区域中所有扫描位置都计算一次最佳的权重系数。我们在4.2节已经验证了重采样的拟合误差会随着扫描行的增加发生震动幅度近似一致的周期性变化。因此,一种潜在的解决方案为根据拟合误差在一个周期内的变化规律,对拟合误差变化较大的扫描行计算权重系数。随后将计算结果拓展到所有周

期内, 得到所有数据的重采样结果。此外, 我们还正在研发另一种更快速的BG方法来解决这一问题。对这些问题的探究将被包含在我们接下来的研究中。

参考文献(References)

- Backus G and Gilbert F. 1968. The resolving power of gross earth data. *Geophysical Journal International*, 16(2): 169-205 [DOI: 10.1111/j.1365-246X.1968.tb00216.x]
- Backus G and Gilbert F. 1970. Uniqueness in the inversion of inaccurate gross Earth data. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 266 (1173): 123-192 [DOI: 10.1098/rsta.1970.0005]
- Backus G E and Gilbert J F. 1967. Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems. *Geophysical Journal International*, 13(1/3): 247-276 [DOI: 10.1111/j.1365-246X.1967.tb02159.x]
- Long D G, Brodzik M J and Hardman M A. 2019. Enhanced-resolution SMAP brightness temperature image products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(7): 4151-4163 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2889427]
- Long D G and Daum D L. 1998. Spatial resolution of SSM/I data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(2): 407-417 [DOI: 10.1109/36.662726]
- Maeda T. 2020. Spatial resolution enhancement algorithm based on the backus-gilbert method and its application to GCOM-W AMSR2 data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2809-2816 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2955967]
- Maeda T, Taniguchi Y and Imaoka K. 2016. GCOM-W1 AMSR2 level 1R product: dataset of brightness temperature modified using the antenna pattern matching technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2): 770-782 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2465170]
- Petty G W and Bennartz R. 2017. Field-of-view characteristics and resolution matching for the Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI). *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(3): 745-758 [DOI: 10.5194/amt-10-745-2017]
- Poe G A. 1990. Optimum interpolation of imaging microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5): 800-810 [DOI: 10.1109/36.58966]
- Stogryn A. 1978. Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 26(5): 720-726 [DOI: 10.1109/TAP.1978.1141919]
- Tang F, Zou X L, Yang H and Weng F Z. 2016. Estimation and correction of geolocation errors in FengYun-3C microwave radiation imager data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(1): 407-420 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2458851]
- Wang Z Z, Xiao Y W, Wang K X and Zhang S W. 2023a. Recalibration Model of MWHTS' historical data onboard FY-3C Satellite. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2283-2294 (王振占, 肖雨伟, 王可昕, 张升伟. 2023a. FY-3C微波湿度计-II数据的再定标模型. *遥感学报*, 27(10): 2283-2294) [DOI: 10.11834/jrs.20221446]
- Wang Z Z, Xiao Y W, Zhang S W, He J Y and Gu S Y. 2023b. Analysis on applicability of nonlinearity coefficients derived from prelaunch calibration tests to onboard calibration of Microwave Humidity Sounder (MWHS-III) on FY-3E satellite. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2327-2336 (王振占, 肖雨伟, 张升伟, 何杰颖, 谷松岩. 2023b. FY-3E微波湿度计发射前定标的非线性系数在星上定标中的适用性分析. *遥感学报*, 27(10): 2327-2336) [DOI: 10.11834/jrs.20221447]
- Wang Z Z, Xu H W, Duan Y Q, Wang W Y, Ding J, He W M and Zhang S W. 2023c. Effect analysis of spectral response function of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3D satellite. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(2): 394-405 (王振占, 许皓文, 段永强, 王文煜, 丁甲, 何文明, 张升伟. 2023c. FY-3D星微波湿温探测仪通道响应函数的影响分析. *遥感学报*, 27(2): 394-405) [DOI: 10.11834/jrs.20220450]
- Yang H, Shang J, Lu L Q, He J K and Xu H X. 2012. Study of channel resolution matching of spaceborne microwave radiometer and its application in MWRI of FY-3 satellite. *Aerospace Shanghai*, 29(1): 23-28, 51 (杨虎, 商建, 吕利清, 何嘉恺, 徐红新. 2012. 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*, 29(1): 23-28, 51) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-1630.2012.01.005]
- Zhang Z, Wang Z Z, He W M and Tong X L. 2022. An improved coastline inflection method for geolocation correction of Microwave Radiation Imager data. *International Journal of Remote Sensing*, 43(12): 4410-4435 [DOI: 10.1080/01431161.2022.2112109]
- Zhou J, Yang H and Iacovazzi R. 2022. Improving ATMS remapping accuracy using adaptive window and noise-tuning method in backus-gilbert inversion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5304412 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3182630]

Analysis of resampling error of FY-3D/MWRI at different orbital positions

ZHANG Zhou^{1,2}, WANG Zhenzhan¹, HE Wenming^{1,2}, TONG Xiaolin¹, DING Jia^{1,2}

1.Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The MicroWave Radiation Imager (MWRI) on China's Fengyun-3 (FY-3) satellite can provide effective data for various fields, such as meteorological research and weather forecasting. When using MWRI data for coinversion of multifrequency detection channels, considering resampling is necessary to make the data of different detection frequency points have a consistent spatial resolution. The Backus-Gilbert (BG) method is a widely used resampling method for spaceborne microwave radiometers. The traditional resampling method uses the BG method to calculate the weight coefficient of the sampling points obtained by a single rotation scan of the radiometer (precalculated weight coefficient) and directly applies it to all sampling points generated by the rotation scan, thereby completing the resampling of all data. However, during the sampling process of satellite instruments, the influence of factors such as the ellipsoid of the Earth will lead to changes in the relative positions between the observation fields, and directly applying the precalculated weight coefficients to all the data will induce errors in resampling. Therefore, in this paper, on the basis of the orbit parameters and pattern information of FY-3D MWRI, we propose a resampling method combined with antenna pattern projection positioning and analyze the resampling effect of MWRI at different orbit positions in detail.

In the resampling experiments with fixed scan lines, we implement resampling for different combinations of source and target channels on the 200th scan line of the sample data. Results show that the traditional resampling method can achieve a better resampling effect by applying the BG method on a fixed scan line. In resampling experiments at different scan lines, we randomly select sample data in the time range from 2019-04-01 to 2019-12-11 and calculate the positional changes of the adjacent points in the source pattern of the 1st, 44th, and 133rd scan columns with the increase in the scan lines of the sample data. The fit error due to positional changes is then calculated using precomputed weighting factors. The maximum change in the position of the adjacent points can lead to a deterioration in the fit error of about 0.09. In the error analysis experiment, we verify the correction effect of the resampling method adopted in this study on the Brightness Temperature (BT) error on the MWRI sample data and long-term data by calculating the distribution of the BT difference between channels. The adopted resampling method can correct the average BT error of 1.32 K on 10 different channel combinations of MWRI.

In conclusion, this study analyzes the resampling effect of the MWRI instrument at different orbital positions in detail. A source of error in resampled BT is identified and corrected. In the future, when multifrequency detection channel data are used to collaboratively retrieve geophysical parameters, more accurate retrieval results may be obtained by applying the resampled data generated in this study on the basis of the sensitivity of the parameters to changes in BT.

Key words: FY-3D microwave radiation imager, Backus-Gilbert method, brightness temperature, resampling, fit error, spatial resolution, sampling, error analysis

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3903303)