



武汉大学学报(信息科学版)
Geomatics and Information Science of Wuhan University
ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 利用最优插值法改正宽刈幅高度计对流层湿延迟
作者: 周茂, 金涛勇, 姜卫平
DOI: 10.13203/j.whugis20210008
收稿日期: 2021-01-14
网络首发日期: 2021-06-11
引用格式: 周茂, 金涛勇, 姜卫平. 利用最优插值法改正宽刈幅高度计对流层湿延迟. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210008>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210008

引用格式：

周茂, 金涛勇, 姜卫平. 利用最优插值法改正宽刈幅高度计对流层湿延迟[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210008 (Zhou Mao , Jin Taoyong, Jiang Weiping. The Wet Tropospheric Correction of Wide-swath Altimeter using Optimum Interpolation Method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210008)

利用最优插值法改正宽刈幅高度计对流层湿延迟

周茂¹ 金涛勇^{1,2} 姜卫平^{2,3}

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北 武汉, 430079

3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘要：宽刈幅高度计仅在星下点携带微波辐射计, 使得两侧刈幅内的对流层湿延迟只能采用水汽模型改正或采用星下点实测值替代, 导致改正精度较低。本文提出使用最优插值法融合星下点辐射计实测的对流层湿延迟改正值, 以提升两侧刈幅内的改正精度, 并以SWOT(Surface Water and Ocean Topography)宽刈幅高度计进行了验证。在刈幅内, 采用ERA5(ECMWF Re-Analysis 5th Generation)水汽数据计算湿延迟改正时, 最优插值法融合改进后的残余湿延迟误差较采用星下点实测值替代方法减小约40%; 采用辐射计实测湿延迟波数谱模拟计算湿延迟改正时, 最优插值法融合改进后的残余湿延迟误差较采用星下点实测值替代方法在各纬度区域均减小达80%。此外, 在水汽变化剧烈的情况下, 最优插值法的改进效果远优于星下点实测值替代的效果。

关键词：对流层湿延迟改正; 宽刈幅高度计; 微波辐射计; ERA5; 最优插值

中图分类号: P228 文献标志码: A

卫星测高技术是高效获取全球海面高的主要手段。近五十年来, 通过雷达回波波形重跟踪、精密定轨、仪器精度提升以及地球物理改正等手段, 卫星测高观测的海面高精度已经达到1~3 cm^[1-4]。传统星下点高度

计在时间分辨率和空间分辨率上互相妥协, 导致其在海洋学和大地测量学中的应用产生矛盾^[5]。鉴于此, 针对观测亚中尺度海洋现象的宽刈幅高度计概念被提出^[6-8]。SWOT(Surface Water and Ocean Topography, 地表水与海洋地形)宽刈幅高度计预计将于2022年发射, 可促进海洋学、水文学以及大地测量学等学科的发展^[9-16]。我国也已经在天宫二号上使用三维地形高度计对宽刈幅测量方式进行了验证^[17,18], 并规划了“观

收稿日期: 2021-01-14

项目资助: 国家自然科学基金(41974020, 41721003); 高分辨率对地观测系统重大专项(42-Y20A09-9001-17/18)。

第一作者: 周茂, 硕士生, 主要从事卫星测高数据处理及应用研究。maozhou@whu.edu.cn
通讯作者: 金涛勇, 博士, 副教授。tyjin@sgg.whu.edu.cn

澜号”宽刈幅高度计^[19]。

对流层湿延迟改正值的绝对量级较小, 约为 40 cm, 但由于对流层水汽活动剧烈, 其精确改正较为困难。随着卫星轨道确定精度的提高, 对流层湿延迟成为除海况偏差外对海面高精度影响最大的环境因素, 其改正方法主要包括基于星载微波辐射计实测数据的改正和基于再分析水汽数据的改正。SWOT 宽刈幅高度计卫星也将搭载微波辐射计用于确定对流层湿延迟改正, 但仅限于星下点观测, 两侧刈幅的对流层湿延迟改正只能采用再分析水汽数据计算或直接采用星下点实测值替代。由于对流层水汽空间活动剧烈, 仅利用星下点微波辐射计获得的湿延迟与两侧远幅的真实湿延迟存在一定偏差。因此, 本文将针对 SWOT 卫星设计, 提出利用最优插值法融合星下点微波辐射计实测湿延迟, 以提高两侧刈幅内的对流层湿延迟改正精度。

1 数据与方法

SWOT 卫星的幅宽设计为左右各 60 km, 中间存在 20 km 的观测空白, 搭载 Ka 波段雷达干涉仪用于刈幅观测, 以及类 Jason 的雷达高度计用于填补星下点空白并对两侧刈幅观测数据进行校正。因 SWOT 卫星尚未发射, 本文将结合 SWOT 宽刈幅观测模式设计, 以 SARAL 卫星(Satellite with ARgos and ALtika, 携带 Argos 和 Altika 的卫星)地面轨迹作为星下点高度计轨迹, 在其两侧分别模拟幅内空间分辨率为 1 km 的观测点位数据。

1.1 微波辐射计实测的湿延迟改正

SARAL 卫星是首颗搭载 Ka 波段高度计的卫星, 由于 Ka 波段波长更短, 足印区更小, 受电离层的影响仅为 Ku 波段的约 1/7,

其海面高观测精度相比于其它卫星精度提高了 2 倍^[20,21]。SARAL 携带的双频微波辐射计采用两个频段测量湿延迟的影响, 其中, 23.8 GHz 频段用来测量水蒸气导致的亮温, 37 GHz 频段用来测量云状液态水的影响。针对 2020 年 1 月 1 日一天 30 个弧段的 SARAL GDR 数据, 对其微波辐射计观测数据进行编辑和预处理, 其中包括: 剔除海冰、陆地以及星下点距离海岸线小于 60 km 的观测; 剔除微波辐射计两个频段观测质量不合格的数据; 剔除亮温内插质量不合格的数据; 剔除湿延迟改正值在 0 cm 到 -45 cm 范围以外的数据。经过数据编辑和预处理后, 获得 42661 个有效观测点, 编辑后有效改正值随纬度的变化如图 1 中蓝色线所示, 可以看出, 湿延迟改正值在低纬度区域量级较大, 在单个弧段随沿轨方向的空间变化剧烈, 含有丰富的短波信息。因此, 鉴于 SWOT 的幅宽较大, 在几十公里的尺度上, 星下点的微波辐射计实测的湿延迟改正值难以直接用于两侧刈幅。

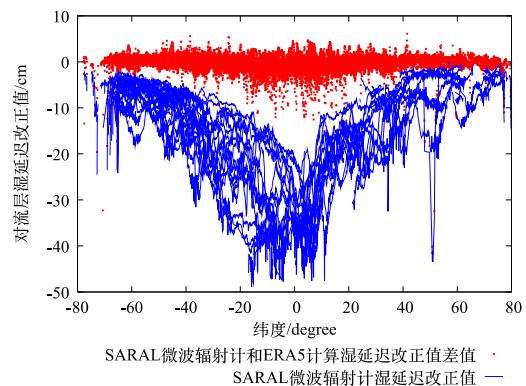


图 1 对流层湿延迟改正值随纬度的变化

Fig. 1 The variation of wet tropospheric correction with latitude

1.2 再分析数据计算的湿延迟改正

除使用微波辐射计直接获得湿延迟改

正值外, 各卫星产品中使用了再分析水汽数据计算对流层湿延迟改正值以提供参考。ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)最新发布的第五代气候再分析数据集 ERA5(ECMWF Re-Analysis 5th Generation)同化了大量的卫星资料及地面和高空观测资料, 其最新数据时间分辨率已经达到 1 小时, 空间分辨率为 0.25 度^[22]。高度计对流层湿延迟改正值可由 ERA5 数据集提供的水汽数据计算得到^[23]

$$WTC = - \left(0.101995 + \frac{1725.55}{T_m} \right) \frac{TCWV}{1000} \quad (1)$$

式中, WTC(Wet Tropospheric Correction)为湿延迟改正值; TCWV(Total Column Water Vapor)为对流层总水汽含量; T_m 为对流层平均温度, 可由海洋表面上方 2 m 处温度 T_0 建模得到^[24]

$$T_m = 50.440 + 0.789T_0 \quad (2)$$

其中, T_0 和 TCWV 均可由 ERA5 数据集直接获得。

基于 SARAL 卫星观测星下点轨迹和时间信息, 选取 2020 年 1 月 1 日一天的 ERA5 数据集水汽数据并计算 SARAL 沿轨湿延迟改正值, 并与微波辐射计观测湿延迟改正值作差, 其结果如图 1 红色点所示。可以看出, 差值整体在零上下波动, 但在部分区域, 尤其是赤道地区, 明显较大, 可达 5~10 cm。对上述差值进行统计可得, ERA5 数据计算的湿延迟改正值和 SARAL 实测的湿延迟改正值的差值的平均值为 0.24 cm, 均方根为 1.21 cm。因此, 鉴于 ERA5 数据计算的湿延迟改正值与微波辐射计获得湿延迟改正值仍存在较大的偏差, 仅使用 ERA5 数据集对 SWOT 两侧刈幅进行改正有一定误差。

1.3 最优插值方法

最优插值(Optimum Interpolation, OI)最早应用于气象领域的研究, 此后逐渐在大气和海洋相关领域的数据同化中得到了广泛应用。与其他数据同化和融合方法相比, 最优插值的优点在于它既可以考虑各种观测误差的自相关关系, 也可以考虑不同观测间的互相影响^[25]。最优插值分析首先需要确定计算点的初估值和观测值, 对于每个计算点, 该计算点的最终分析值 A_k 等于该点的初估值 F_k 加上该计算点观测值与初估值的偏差, 该偏差由一定范围内 n 个已知的观测值 O_i 和初估值 F_i 的偏差加权计算得到

$$A_k = F_k + \sum_{i=1}^n W_{ki} (O_i - F_i) \quad (3)$$

式中, k 为计算点, i 为可获得的观测值, W_{ki} 为权重函数, 表示在 k 点上第 i 个观测值与初估值的偏差在估计时分配的权重。

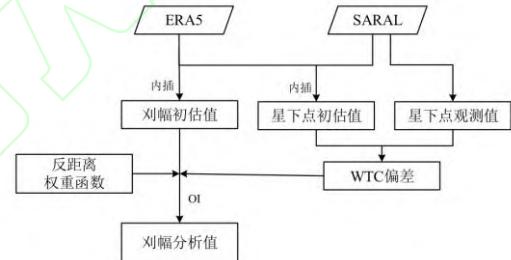


图 2 最优插值法实施流程图

Fig.2 Flow chart of optimum interpolation

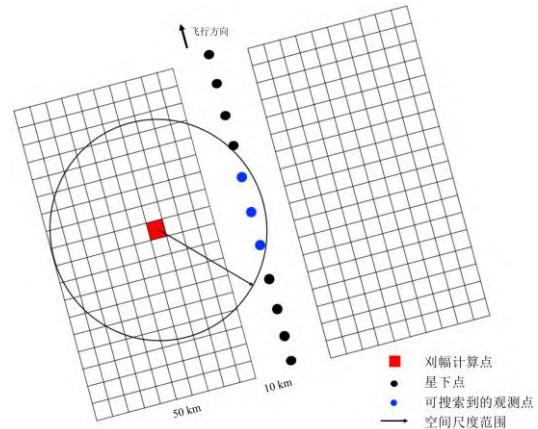


图 3 最优插值法刈幅湿延迟改正示意图

Fig. 3 Diagram of wet tropospheric correction using

宽刈幅高度计在观测过程中, 星下点微波辐射计与海面高为同步观测, 精度较高, 因此可作为观测值。ERA5 数据集空间覆盖率为 1 小时, 卫星过境则在瞬间完成, 因此在星下点观测位置, 分别先在空间内插 ERA5 数据, 再在时间上内插得到观测点的初估值。在刈幅格网中, 同样对 ERA5 数据进行时间和空间的内插得到计算点的初估值。观测值为相同弧段的沿轨微波辐射计湿延迟, 可假定为等精度观测, 在无其他外部观测值的情况下, 将权重函数简化为由观测点到计算点反距离确定的权值。使用最优插值法确定刈幅湿延迟的主要实施过程如图 2 所示。为保证远幅边缘也能搜索到最少一个有效星下点观测, 将用于搜索计算点附近的观测点的空间尺度设置为 60 km。如图 3 所示, 近幅计算点可搜索到的观测点较多, 远幅计算点可搜索到的观测点较少, 由此, 刈幅观测值越接近近幅, 湿延迟改正的分析值与星下点实测值相关性越强。

2 结果与分析

本文分别使用了两种方法对刈幅内湿延迟改正进行改进, 一是直接采用星下点辐射计实测的湿延迟改正值代替; 二是采用最优插值法融合星下点实测湿延迟改正值。由于在 SWOT 观测刈幅内没有实测湿延迟改正值, 再分析水汽数据计算的湿延迟改正值在一定程度上具有较好的自治性, 因此将计算值与基于再分析水汽数据的湿延迟改正值的残差作为评估改正方法效果的指标。为验证最优插值法的效果, 对 SWOT 卫星两侧刈幅的对流层湿延迟给出了两个方案: 一是, 采用 ERA5 数据集计算的湿延迟改正值;

二是, 采用多个周期的 SARAL 微波辐射计实测湿延迟改正计算其波数谱, 再用于模拟得到刈幅内的湿延迟改正值。

2.1 基于 ERA5 数据集的湿延迟改正评估

在星下点处使用 SARAL 微波辐射计实测湿延迟, 两侧刈幅则采用 ERA5 数据集在时间和空间上进行内插计算湿延迟(图 4a), 并减去星下点辐射计湿延迟, 得到残余对流层湿延迟, 如图 4b。由于星下点实测数据的沿轨分辨率较高, 而 ERA5 数据集分辨率较低, 因此湿延迟改正值的残余信号表现为明显的沿轨波动。图 4b 中湿延迟改正值的残余信号表明, 使用星下点微波辐射计实测湿延迟代替两侧刈幅再分析水汽数据计算的湿延迟可以获得更多的变化细节, 减小对海面高观测精度的影响, 其残余湿延迟最大可达约 6 cm。然后, 在刈幅内, 利用最优插值法融合上述两种湿延迟改正值, 替代 ERA5 数据计算的湿延迟改正值, 结果如图 5a 所示。可以看出, 由于微波辐射计存在观测误差, 且 SARAL 产品并未对原始亮温数据进行滤波, 导致刈幅内湿延迟改正值出现部分粗差。与 ERA5 数据计算的湿延迟相比, 融合结果的残余信号如图 5b, 可以看出, 与星下点实测湿延迟替代的方法相同, 最优插值方法改进后的残余湿延迟改正值减小。由于两侧刈幅沿星下点对称, 因此利用最优插值法融合星下点实测湿延迟对两侧刈幅的湿延迟改进是对称的, 使得残余湿延迟改正值也沿星下点对称。分别采用星下点实测湿延迟替代方法和最优插值法, 获得一天的刈幅内湿延迟改正值, 并计算得到其残差统计结果如表 1。相比于星下点实测湿延迟替代方法, 最优插值法可以将残余湿延迟减小 0.6 cm 左右, 接近 40%。

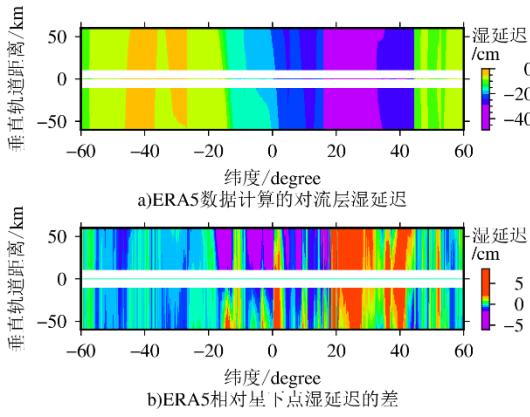


图 4 ERA5 数据计算的对流层湿延迟

Fig. 4 Wet tropospheric corrections computed by ERA5 datasets

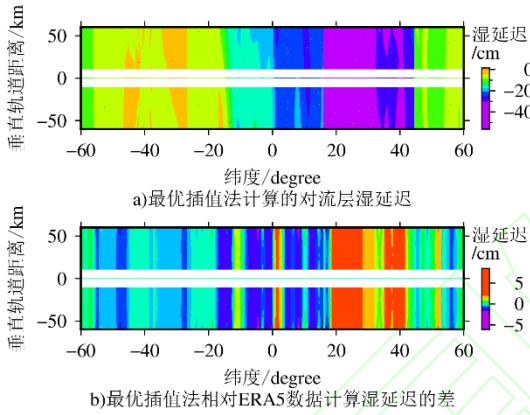


图 5 最优插值法计算的对流层湿延迟

Fig. 5 Wet tropospheric corrections by optimum interpolation method

表 1 两种湿延迟改正方法的残差统计结果(单位: cm)

Tab. 1 Statistics of the residual wet tropospheric correction by two different methods (unit: cm)

	平均值	标准差	均方根
星下点实测	0.21	1.66	1.66
值替代法	0.04	1.02	1.02
最优插值法	0.04	1.02	1.02

ERA5 数据集时间分辨率为 1 小时, 对流层水汽的时间尺度在几个小时, 因此在时间尺度上可以满足高度计湿延迟改正的应用, 目前也广泛地应用于各高度计任务。但即使融合了多种数据, ERA5 数据集的空间

分辨率仅有 0.25° , 约为 30 km, SWOT 二级产品的分辨率将不会低于 2 km, 因此 ERA5 数据无法有效识别小尺度的对流层水汽变化, 也难以对高分辨率的 SWOT 刃幅数据进行高精度湿延迟改正。Vieira 等人分析指出, ERA5 数据计算的湿延迟改正值在全球范围内与微波辐射计观测的湿延迟改正值的差值的均方根约为 1.2 cm, 但在不同纬度下, 其均方根在 0.6 cm 到 1.7 cm 范围内波动^[26], 与本文的结果一致。结合图 1、图 4b 和图 5b, 可以看出, SARAL 微波辐射计和 ERA5 数据计算的湿延迟改正值之间的偏差较大, 融合星下点实测湿延迟对刃幅内湿延迟进行改进, 在部分区域仍有不低于 4 cm 的误差。通过对 SWOT 单微波辐射计的校正效果分析, Ubelmann 等人指出在基线两侧中间位置各携带一个微波辐射计分别用于改正两侧刃幅湿延迟是更好的方案^[27]。

2.2 湿延迟信号的波数谱模拟

由于上述计算过程中, 两侧刃幅内并没有实测水汽数据, 且 ERA5 数据集中水汽数据的空间分辨率和 SWOT 空间分辨率差异明显, 对湿延迟改正方法评估的可靠性有限。因此, 本文将通过仿真高分辨率的湿延迟数据来评估最优插值方法的效果。基于雷达回波仿真的方法虽然能够考虑各种设计参数以及地形等因素的影响, 但回波仿真效率较低, 因此, 本文中使用波数谱模拟方法仿真二维的湿延迟改正值。

采用波数谱模拟方法必须首先知道需要模拟信号的波数谱。使用 2020 年 1 月 1 日一天的 SARAL 数据在沿轨方向计算对流层湿延迟波数谱, 并由 ERA5 数据分别计算相同的沿轨湿延迟并计算其波数谱, 结果如图 6 所示。红色为 SARAL 实测湿延迟波数谱, 蓝色为 ERA5 数据集计算湿延迟波数谱。

可以看出, SARAL 微波辐射计相比于 ERA5 数据集, 可以更好的获取湿延迟小尺度特征。在长于 150 km 波长的部分, 微波辐射计实测数据和 ERA5 数据的湿延迟符合较好, 在对数坐标系中, 大致表现为相同的线形下降趋势。在 150 km 波长以下的部分, 由辐射计数据计算的波数谱与大于 150 km 部分具有相同的线性下降的趋势, 直到大约 35 km 左右。由 ERA5 数据集计算的波数谱则偏离了该趋势, 表明再分析水汽数据在该尺度信号有缺失, 微波辐射计则能较好的识别这些信号。在小于 35 km 波长的部分, 微波辐射计波数谱同样偏离了长于 35 km 部分的线形趋势, 可以认为是受到噪声的影响。Ubelmann 等人指出, 由于微波辐射计噪声的影响, 湿延迟信号在小尺度部分噪声较大, 由 HAMSR(High-Altitude Monolithic Microwave Integrated Circuit Sounding Radiometer)观测的水汽信号表明, 湿延迟信号波数谱在一定的波长范围内, 随波长逐渐变短呈现出指数下降趋势, 因此在对数坐标中接近线形线性下降趋势^[27], 与上述实测数据的分析结果一致。

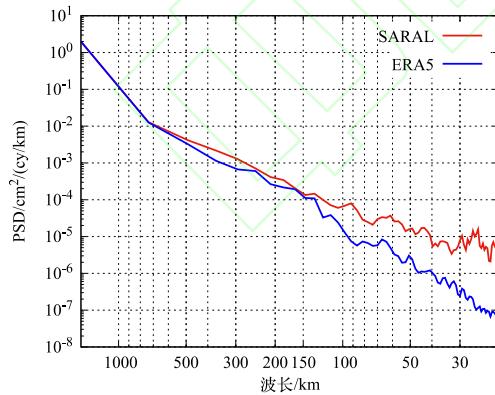


图 6 SARAL 微波辐射计实测湿延迟和 ERA5 数据集计算湿延迟的波数谱

Fig. 6 The wavenumber spectrum of wet tropospheric corrections from SARAL radiometer and ERA5 dataset

由于 ERA5 数据集相比于微波辐射计存在一定的信号缺失, 同时其精度与实测数据仍存在一定的差距, 且 ERA5 的空间分辨率仅为 0.25°, 而由微波辐射计计算的波数谱精度较高且保留了除小于 35 km 波长尺度外全部的湿延迟信号, 因此本文使用微波辐射计的波数谱来模拟刈幅内的湿延迟改正值。如公式(1)所示, 对流层湿延迟改正值主要受大气中水汽的影响, 因此其地理分布与水汽分布相近。在海洋上, 高纬度的对流层湿延迟改正值仅为几个厘米, 但低纬度的湿延迟改正值可达 40 cm 左右(图 1)。此外, 对于纬度高于 60° 的区域, 水汽活动较为平缓, 湿延迟改正值比较稳定, 在低纬度的赤道地区, 水汽活动剧烈, 湿延迟改正值的偏差较大^[28]。为研究不同纬度下对流层湿延迟的影响, 使用 SARAL 重复周期任务第 1 到 35 周期第 13 个弧段的微波辐射计观测湿延迟, 将其分为低纬度、中纬度和高纬度三个区域, 其纬度范围分别为 -10°~10°、20°~40° 和 50°~70°, 分别计算其波数谱, 结果如图 7 所示。其中, 黑色、红色和蓝色的细线分别表示在低、中和高纬度各周期的波数谱, 黑色、红色和蓝色的粗线分别为各纬度所有周期的波数谱的平均值。从图 7 中可以看出, 高纬度地区由于水汽比较稳定, 在各波长整体幅度都低于中纬度和低纬度; 赤道地区水汽活动剧烈, 其波数谱在 250 ~ 1000 km 波长部分高于中纬度区域, 其它波长部分与中纬度区域基本相同。

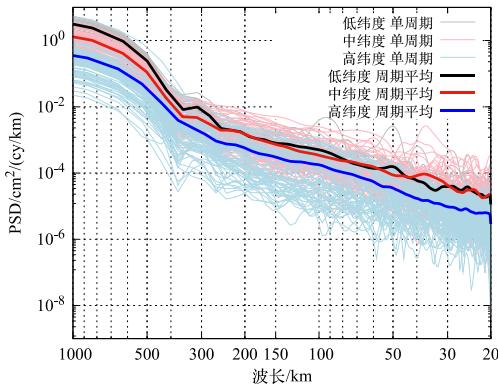


图 7 SARAL 微波辐射计湿延迟改正值在不同纬度的波数谱

Fig. 7 The wavenumber spectrum of wet tropospheric corrections from SARAL radiometer in different latitudes

为简化模拟过程,假设对流层湿延迟在各方向的变化相同,即具有各项同性,因此沿轨的波数谱能代表其湿延迟在各方向的变化。以平均波数谱作为湿延迟在各纬度的真实功率谱,模拟二维的湿延迟改正值。将二维的湿延迟改正值假定为多个二维随机傅里叶序列的叠加,由公式(4)可得到二维各项同性湿延迟改正值 $H(x, y)$ ^[27]。

$$H(x, y) = \frac{\pi(k_a^2 - k_b^2)}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{2E_{2d}(k_{xn}, k_{yn})} \cos(k_{xn}x + k_{yn}y + \phi_n) \quad (4)$$

式中, x , y 分别为沿轨方向和垂直轨道方向的坐标; k 为一维波数(或空间频率), 其与二维波数之间的关系为 $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; H 为由 N 个随机二维傅里叶分量在频率 k_a 到 k_b 范围内的叠加, 第 n 个分量对应的二维波数为 (k_{xn}, k_{yn}) ; ϕ_n 为在 $[0, 2\pi]$ 范围内的随机相位; E_{2d} 为二维波数谱, 其与一维波数谱的关系为

$$E_{2d}(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi k} E(k) \quad (5)$$

由于每个傅里叶分量的相位都是随机

的,因此单次模拟的湿延迟都不相同,每一次模拟均为一次随机实现。本文中,将 N 设置 2000, 由不同纬度的波数谱分别计算得到二维对流层湿延迟。由于波数谱只能反映信号在波数域(或频域)中的特征,并不对应于固定的空间域中真实的湿延迟,因此波数谱反演的湿延迟结果表现出较强的随机性,其值并不都为负数。从图 8 结果中可以看出,由波数谱模拟的二维湿延迟重新计算得到的波数谱与输入的原始波数谱符合较好,因此认为本文中的模拟过程是可行的。

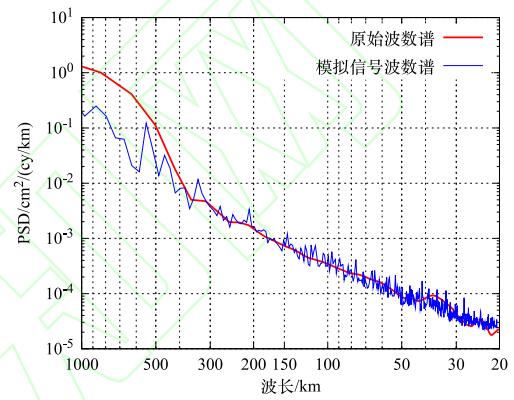


图 8 中纬度区域仿真对流层湿延迟改正值的波数谱

Fig. 8 The wavenumber spectrum of simulated wet tropospheric corrections in the mid-latitude

2.3 基于模拟数据的湿延迟改正评估

由最优插值法融合星下点辐射计湿延迟改正时,首先要获得计算点和观测点的初估值,即刈幅和星下点处对流层湿延迟的初估值。刈幅湿延迟和星下点湿延迟通过波数谱模拟同时得到,可以认为是“真实值”,其中刈幅湿延迟可用于评估两种方法的湿延迟改正效果,星下点湿延迟则用于计算“观测值”和初估值的偏差。由图 6 中的湿延迟波数谱可以看出,微波辐射计只能识别湿延迟中较大尺度的信号。由于模拟数据中包含了全频谱的信号,因此对星下点初估

值进行 35 km 的沿轨高斯滤波作为最优插值法中的星下点初估值。当前, ERA5 数据集的空间分辨率最高为 0.25°(约为 30 km), 因此, 对刈幅模拟湿延迟进行 30 km 的滤波, 以代替再分析水汽数据计算结果, 作为刈幅的初估值。获得刈幅和星下点的初估值后, 分别使用星下点湿延迟替代法和最优插值法获得最终的刈幅湿延迟改正值, 通过与模拟得到的刈幅湿延迟改正值做差, 得到残余湿延迟改正值。在中纬度区域, 两种改正方法的效果如图 9 所示。由计算点和观测点间距离变大导致两点之间的湿延迟信号相关性变弱, 采用星下点湿延迟替代后的残余湿延迟改正值从近幅到远幅逐渐变大, 在整个刈幅中, 其残余湿延迟改正值量级都较大(图 9b)。采用最优插值法改进后的残余湿延迟改正值量级显著减小, 且在整个刈幅中较为均匀(图 9c)。对不同纬度范围下星下点湿延迟替代和最优插值方法的残余湿延迟改正值统计见表 2。由于不同纬度的水汽环境不同, 湿延迟改正效果也不同, 随纬度升高, 残余湿延迟改正值也逐渐变小。最优插值法可以显著减小刈幅对流层湿延迟改正值的残差, 在所有纬度区域, 湿延迟改正值的残余误差均不超过 2.5 cm, 相较于使用星下点替代的结果, 其残余湿延迟改正的量级减小了 80%以上。

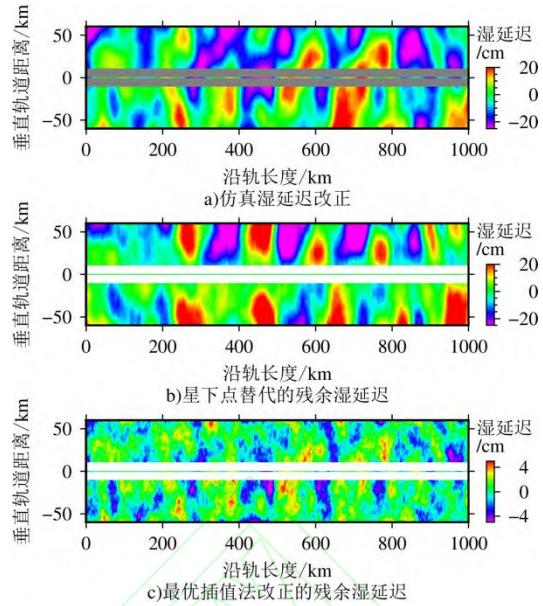


图 9 中纬度区域仿真湿延迟改正值及不同方法改正后的残余湿延迟

Fig. 9 The simulated wet tropospheric corrections and the residuals after corrected by different methods in the mid-latitude

因顾及实测湿延迟改正值在波数域上特征, 采用波数谱模拟的二维湿延迟改正值在一定程度可代表其空间变化。因此, 可以认为, 在空间尺度上, 对于高频的湿延迟信号, 在刈幅内仅使用星下点对流层湿延迟替代的方法精度有限。由于刈幅初估值来自较为理想的模拟信号, 已经带有一定的湿延迟高频信息, 所以使用最优插值法融合星下点湿延迟改正后的结果更优。最优插值法的残余湿延迟改正误差略大于 Vieira 等人分析指出的 0.6~1.7 cm^[26], 其原因在于基于波数谱模拟的方法包含全频谱的湿延迟信号, 而基于再分析水汽数据计算的湿延迟缺失了小尺度的特征。

表 2 不同纬度下星下点替代法和最优插值法改正后的残余湿延迟改正值统计结果 (单位: cm)

Tab. 2 Statistics of residual wet tropospheric corrections after corrected by the nadir radiometer substituted and optimum interpolation methods in different latitude areas (unit: cm)

纬度	星下点替代法			最优插值法		
	平均值	标准差	均方根	平均值	标准差	均方根

低纬度	-1.69	16.81	16.89	0.12	2.46	2.46
中纬度	1.41	11.06	11.12	-0.21	1.78	1.79
高纬度	-0.72	6.30	6.34	0.08	0.93	0.93

3 结论

本文针对宽刈幅高度计观测过程中，星下点微波辐射计无法观测到两侧刈幅湿延迟的情况，提出采用最优插值法，融合星下点微波辐射计数据改善刈幅湿延迟改正值的方法。以 SWOT 宽刈幅高度计为例，基于刈幅内两种对流层湿延迟改正方案，分别对采用星下点湿延迟替代和采用最优插值法融合改进刈幅湿延迟改正的效果进行了研究，结果表明：在两侧刈幅内，基于 ERA5 数据集的湿延迟改正方案，使用最优插值法融合星下点辐射计数据和 ERA5 数据集改进后的残余湿延迟改正值相较于采用星下点湿延迟替代方法降低了 0.6 cm，接近 40%；基于辐射计实测湿延迟改正值波数谱模拟的湿延迟改正方案，使用最优插值法融合星下点辐射计数据和模拟湿延迟改进后的残余湿延迟改正值相较于采用星下点湿延迟替代方法，在各纬度区域均减小达 80%。在水汽变化剧烈的情况下，最优插值法的改进效果远优于星下点辐射计数据替代的效果。

宽刈幅高度计作为一种新型的高度计，在数据处理和误差校正等方面，还有很多待解决的问题。与星下点高度计不同，宽刈幅高度计在刈幅内无法获得各点的同步微波辐射计湿延迟改正，本文分析结果表明，在搭载有限微波辐射计情况下，两侧刈幅的对流层湿延迟改正后不可避免地存在一定的残差，对于获取高精度海面高不容忽视，是未来仍需重点考虑的问题。对于刈幅湿延迟的影响，除融合星下点微波辐射计和再分析水汽数据进行改正外，同时可采用同期的卫星在交叉点进行外部校正(如与 SWOT 同期观测的 Jason-CS、Sentinel-3C、HY-2D 等)，

以提高刈幅内远幅海面高的精度。在内陆地区，则可采用当前常用的 GPD(Global Navigation Satellite System derived Path Delay)算法。除湿延迟外，海况偏差作为最大的环境误差，预计将对宽刈幅高度计的观测精度产生较大影响。因此，未来仍需要对宽刈幅高度计湿延迟和海况偏差等环境因素进一步研究。

参考文献

- [1] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Liu Huanling, et al. Research Situation and Future Development of Satellite Geodesy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(1): 48-54 (程鹏飞, 文汉江, 刘焕玲, 等. 卫星大地测量学的研究现状及发展趋势[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2019, 44(1): 48-54.)
- [2] Wen Hanjiang, Jin Taoyong, Zhu Guangbin, et al. Principle and Application of Satellite Altimetry[M]. Surveying and Mapping Press, Beijing, 2017 (文汉江, 金涛勇, 朱广彬, 等. 卫星测高原理及应用[M]. 测绘出版社, 2017)
- [3] Zhang Shengjun, Li Jiancheng, Chu Yonghai, et al. Calculation and Analysis of the Deflection of Vertical Derived from Cryosat and Jason1 GM Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(8): 1012-1017 (张胜军, 李建成, 褚永海, 等. 基于Cryosat和Jason1GM数据的垂线偏差计算与分析[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2015, 40(8): 1012-1017.)
- [4] Fernandes M, Lázaro C, Nunes A, et al. Atmospheric Corrections for Altimetry Studies over Inland Water[J]. Remote Sensing, 2014, 6(6): 4952–4997.
- [5] Fu L-L, Rodriguez E. High-Resolution Measurement of Ocean Surface Topography by Radar Interferometry for Oceanographic and Geophysical Applications[M/OL]. Sparks R S J, Hawkesworth C J./Geophysical Monograph

- Series. Washington, D. C. American Geophysical Union, 2004: 209–224.
- [6] Rodriguez E, Pollard B, Martin J. Wide-Swath Ocean Altimetry Using Radar Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 1-52.
- [7] Zhang Hongyuan, Zhang Xiangkun, Xu Ke, et al. Imaging Simulation Analysis of 3-D Imaging Altimeter[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2001, 16(3): 184-189 (张鸿远, 张祥坤, 许可, 等. 三维成像雷达高度计成像模拟研究[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(3): 184-189)
- [8] Zhang Yunhua, Jiang Jingshan. A Radar Altimeter System and Design Method of 3D Imaging Compatible With Land and Sea[P]. 2001(张云华, 姜景山. 一种海陆兼容并三维成象的雷达高度计系统及设计方法[P]. 2001)
- [9] Fu L-L, Alsdorf D, Morrow R, et al. SWOT: The Surface Water and Ocean Topography Mission: Wide-Swath Altimetric Elevation on Earth[R]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2012.
- [10] Xu Yongsheng, Gao Le, Zhang Yunhua. New Generation Altimeter Satellite SWOT and Its Reference to China's Swath Altimetry Satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 79-89 (徐永生, 高乐, 张云华. 美国新一代测高卫星——评述我国宽刈幅干涉卫星的发展借鉴[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 79-89)
- [11] Durand M, Andreadis K M, Alsdorf D E, et al. Estimation of Bathymetric Depth and Slope from Data Assimilation of Swath Altimetry into a Hydrodynamic Model[J/OL]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): 1-5.
- [12] Pavelsky T M, Durand M T, Andreadis K M, et al. Assessing the Potential Global Extent of SWOT River Discharge Observations[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1516–1525.
- [13] Gaultier L, Ubelmann C, Fu L-L. The Challenge of Using Future SWOT Data for Oceanic Field Reconstruction[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, 33(1): 119–126.
- [14] Solander K C, Reager J T, Famiglietti J S. How Well Will the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission Observe Global Reservoirs?: SWOT OBSERVATIONS OF GLOBAL RESERVOIRS[J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 2123–2140.
- [15] Wan X, Jin S, Liu B, et al. Effects of Interferometric Radar Altimeter Errors on Marine Gravity Field Inversion[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2465-2483.
- [16] Zhou M, Jin T, Li J, et al. Analysis on the Accuracy of Marine Gravity Inversion from the Wide-swath Altimeter Mission[C]/EGU General Assembly Conference Abstracts. 2020.
- [17] Ren L, Yang J, Dong X, et al. Preliminary Evaluation and Correction of Sea Surface Height from Chinese Tiangong-2 Interferometric Imaging Radar Altimeter[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2496.
- [18] Yang Jinsong, Ren Lin, Zheng Gang. The First Quantitative Remote Sensing of the Ocean by the Tiangong-2 3-D Imaging Microwave Altimeter[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(2): 129–130 (杨劲松, 任林, 郑罡. 天宫二号三维成像微波高度计对海洋的首次定量遥感[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 129–130)
- [19] Chen G, Tang J, Zhao C, et al. Concept Design of the “Guanlan” Science Mission: China’s Novel Contribution to Space Oceanography[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 194.
- [20] Steunou N, Desjonquères J D, Picot N, et al. AltiKa Altimeter: Instrument Description and In Flight Performance[J]. Marine Geodesy, 2015, 38(sup1): 22–42.
- [21] Zhang S, Sandwell D T. Retracking of SARAL/AltiKa Radar Altimetry Waveforms for Optimal Gravity Field Recovery[J]. Marine Geodesy, 2017, 40(1): 40–56.
- [22] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 Global Reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [23] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning

- System[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D14): 15787–15801.
- [24] Mendes V, Prates G, Santos L, et al. An Evaluation of the Accuracy of Models for the Determination of the Weighted Mean Temperature of the Atmosphere[C]//Proceedings of ION. 2000.
- [25] Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. Analysis of the Combined Gauge-Satellite Hourly Precipitation over China Based on the OI Technique[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(6): 1381–1389 (潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1381–1389)
- [26] Vieira T, Fernandes M J, Lazaro C. Impact of the New ERA5 Reanalysis in the Computation of Radar Altimeter Wet Path Delays[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(12): 9849–9857.
- [27] Ubelmann C, Fu L-L, Brown S, et al. The Effect of Atmospheric Water Vapor Content on the Performance of Future Wide-Swath Ocean Altimetry Measurement[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(6): 1446–1454.
- [28] Escudier P, Couhert A, Mercier F, et al. Satellite Radar Altimetry: Principle, Accuracy, and Precision[M]//Satellite altimetry over oceans and land surfaces. CRC Press, 2017: 1–70.

The Wet Tropospheric Correction of Wide-swath Altimeter using Optimum Interpolation Method

Zhou Mao¹ Jin Taoyong^{1, 2} Jiang Weiping^{2, 3}

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² MOE Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Wuhan 430079, China

³ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Since there is only nadir radiometer onboard for the wide-swath altimetry, the wet tropospheric delay can only be corrected by models inside the cross-swath or substituted by the nadir radiometer measured data, which lead to the lower accuracy. In order to improve the accuracy of wet tropospheric correction (WTC) inside the cross-swath, an optimum interpolation method to fuse the nadir radiometer WTC is proposed, and it is verified by taken the SWOT (Surface Water and Ocean Topography) wide-swath altimeter as example. Inside the cross-swath, when the WTCs from ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5th Generation) dataset are used, the residual of WTC after corrected by optimum interpolation can be reduced by 40% compared with the nadir radiometer WTC substituted. When the simulated WTCs from the spectrum of radiometer measured WTCs are used, the residual of WTC after corrected by optimum interpolation can be reduced by 80% in all latitude areas compared with the nadir radiometer WTC substituted. In addition, the optimum interpolation method has much better accuracy than the nadir radiometer WTC substituted in the case of high water vapor variability.

Key words: wet tropospheric correction; wide-swath altimeter; radiometer; ERA5; optimum interpolation

First author: Zhou Mao, postgraduate, major in altimetry data processing and applications. E-mail: maozhou@whu.edu.cn

Corresponding author: Jin Taoyong, PhD, associate professor. E-mail: tyjin@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41974020, 41721003); the Grant Project of High Resolution Earth Observation System (42-Y20A09-9001-17/18).

网络首发：

标题：利用最优插值法改正宽刈幅高度计对流层湿延迟

作者：周茂，金涛勇，姜卫平

收稿日期：2021-01-14

DOI:10.13203/j.whugis20210008

引用格式：

周茂, 金涛勇, 姜卫平. 利用最优插值法改正宽刈幅高度计对流层湿延迟[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210008 (Zhou Mao , Jin Taoyong, Jiang Weiping. The Wet Tropospheric Correction of Wide-swath Altimeter using Optimum Interpolation Method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210008)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文：

基于相空间重构和高斯过程回归的对流层延迟预测

罗亦泳, 张静影, 陈郡怡, 黄城, 汪鑫

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1): 103-110

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190018>

GPT3 模型在中国地区的精度分析

高壮, 何秀凤, 常亮

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(4): 538-545

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190202>