

天宫二号三维成像微波高度计大气斜距时延校正

陈洁好^{1,2}, 张云华^{1,2}, 董晓¹

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, 北京 100049

摘要: 2016-09-15随天宫二号空间实验室发射升空的三维成像微波高度计(简称天宫二号成像高度计)是国际上第一个采用小入射角、短干涉基线实现宽刈幅海面高度测量的高度计。由于天宫二号没有为成像高度计配备用于大气校正的微波辐射计,因此需要采用模型方法对大气时延进行精确估计。传统高度计采用星下点观测,通常只考虑大气折射率的改变引起传播速度变化的时延。天宫二号成像高度计采用偏离星下点 1° — 8° 的小角度观测,因此在进行大气传输时延校正时不仅要考虑雷达信号传播速度的改变,还应考虑由于传播方向改变带来的路径弯曲效应。本文针对天宫二号成像高度计的观测几何特性,提出基于数值天气模型校正大气斜距时延的算法:采用欧洲中期天气预报中心的天气数据和大气分层模型,通过气象参数计算大气折射率;根据高度计参数和各层大气折射率,依赖折射定律和信号传播的几何关系在路径上逐层积分,计算大气斜距时延的估值。通过对天宫二号成像高度计的陆地角反射器定标实测数据进行处理,经大气斜距时延校正后,角反射器的剩余距离误差的标准差约为6.2 cm,达到厘米量级的斜距测量精度,验证了在不同入射角情况下,所提出的大气斜距时延校正算法的有效性和可靠性。

关键词: 天宫二号微波高度计, 干湿大气时延, 斜距时延校正, 数值天气模型, 路径弯曲

引用格式: 陈洁好,张云华,董晓.2020.天宫二号三维成像微波高度计大气斜距时延校正.遥感学报,24(9):1059-1069

Chen J H, Zhang Y H and Dong X. 2020. Correction of the tropospheric slant path delay of Tiangong-2 Interferometric Imaging Radar Altimeter. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(9): 1059-1069 [DOI: 10.11834/jrs.20208509]

1 引言

由于地球周围存在大气层,其折射率不同于真空折射率。此差异主要在于两点:一是折射率的数值不同,使得电磁波的传播速率不同于真空中的传播速率。二是折射率的非均匀变化,使得斜入射信号由于折射发生路径弯曲。在这些物理现象的制约下,当涉及利用雷达信号的传播进行测高、定位等应用时,大气时延的校正成为提升精度必不可少的处理环节(邓明军等,2018)。自2016-09-15天宫二号空间实验室发射至今,作为有效载荷之一的三维成像宽刈幅微波高度计(以下简称天宫二号成像高度计)已成功获得了对陆地和海洋的观测数据。天宫二号成像高度计是国际上第一个融合了小入射角、短基线干涉测量技

术、孔径合成技术以及海陆兼容的高度跟踪技术(Dong等,2017;Zhang等,2003)实现宽刈幅海面高度测量的高度计。它的一大特征是采用偏离星下点的小角度入射,这一区别于传统高度计的特质使得天宫二号高度计获得了极大的刈幅宽度,有利于海洋中尺度现象的观测(徐永生等,2017;Zhang等,2007)。

虽然国际上合成孔径雷达、高度计等星载雷达的数据产品已较为成熟(Zhang等,2000),但着眼国内星载雷达数据的后处理,在精度的追求中尚处于初级阶段。对于传统高度计而言,星下点测量的工作模式简化了大气时延的校正,通常只需考虑各层大气中信号传播速度不同带来的路径时延,如针对海洋二号卫星雷达高度计测高误差的干湿大气校正(张有广等,2013)。对于斜入

收稿日期:2019-01-04;预印本:2019-04-02

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC1401004)

第一作者简介:陈洁好,1994年生,女,硕士研究生,研究方向为雷达信号处理、数据挖掘与分析。E-mail:chenjichaojane@foxmail.com

通信作者简介:张云华,1967年生,男,研究员,研究方向为微波遥感器、高分辨率雷达系统设计、信号处理、天线技术等。E-mail:zhangyunhua@mirslab.cn

射观测制式的雷达高度计而言, 还需考虑斜入射信号在各层大气传播中发生的折射效应, 如天宫二号成像高度计。一方面, 国内星载雷达的大气时延校正多采用经验公式, 或采用简化的静态模型(丁赤飏等, 2017), 省略了从物理本质出发的精细计算, 使得测高、定位、以及后续任何基于电磁波传播的科学分析受限。另一方面, 天宫二号成像高度计作为国际上首次实现宽刈幅海面高度测量的“太空新生力量”, 尚未有成熟的大气斜距时延校正算法可以借鉴。因此, 对天宫二号成像高度计大气斜距时延的精细建模与计算, 其作用和意义不仅在于提高它自身的高度测量精度和定位精度, 还填补了国内高度计大气斜距时延校正的空白, 为后续的工程应用和科学分析奠定基础。

本文通过对 2017-03-16 和 2018-09-11、2018-09-19 共 3 次定标观测数据进行处理, 对本文提出的大气斜距时延校正方法进行了验证。表 1 给出了天宫二号成像高度计的主要系统参数和测高精度的设计指标。

表 1 天宫二号成像高度计主要系统参数及测高精度指标
Table 1 Main system parameters and range-measuring design index of Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter

参数名称	参数值
工作频率	Ku (13.58 GHz)
信号带宽	40 MHz
干涉基线长度	2.3 m
干涉基线倾角	5°
天线增益	36.5 dB
峰值发射功率	300 W
观测角度范围	1°—8°
	海面: 5 cm @ 5 km × 5 km
相对测高精度 (此为相对测高精度, 不考虑定轨误差和潮汐误差)	陆地: 5 m @ 300 m × 300 m

2 大气时延的数学模型

站在大气科学的角度上, 其结构特征理论将大气从地面到高空分为: 对流层、平流层、中间层、暖层和逸散层(赵铁刚, 2011)。通常所言的电离层处于中间层和暖层之间。而从雷达信号处理的角度出发, 通常根据信号的路径时延是否具

有色散特性, 分为电离层时延和大气时延。大气时延与雷达信号的工作频率无关(Eineder等, 2011), 相反, 电离层时延则具有色散特性。具体而言, 电离层时延与雷达工作频率和电子浓度有关, 与载波频率的平方成反比, 与电子浓度成正比。电离层时延通常根据电子总含量来计算, 对于工作在 Ku 波段的天宫二号成像高度计而言, 电离层时延通常在厘米量级(Xu等, 2004), 而大气时延可达米量级, 故电离层时延相比大气时延小很多。因此需要明确指出的是: 对标大气学理论, 本文提出的天宫二号成像高度计大气斜距时延的校正方法, 针对的是信号在对流层和平流层中传播所产生的路径时延, 不包含电离层的作用。

当雷达信号在对流层和平流层中传播时, 影响路径时延的因素主要有 3 个: 干大气、湿大气以及液态水。其中, 干大气分布在地表至大气层上界约 60 km 的范围内, 统计意义上干大气较为稳定, 受天气状况的影响小, 估计其对应的路径时延较容易。与之相反, 湿大气虽然只分布在大气层的中下层, 约从地面起至 11 km(赵铁刚, 2011), 但由于水汽值随温度、湿度等气象参数不断变化, 因此湿对流层的时延估计更为复杂。第 3 项液态水造成的路径时延非常小, 可忽略不计(Jehle等, 2008)。

为计算大气时延, 首先回归信号产生时延的物理本质——大气折射率不同于真空折射率。在忽略传导电流和介质磁化的情况下, 大气折射率与其相对介电常数的关系如下

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

因此, 有

$$\epsilon_r = n^2 = (n^2 - 1) + 1 \approx 2(n - 1) + 1 \quad (2)$$

由于大气折射率的取值在 1 附近, $n - 1$ 的值极小, 为便于后续计算, 研究者们人为定义了一个新的参数, 即无线电折射率为

$$N \equiv (n - 1) \times 10^6 \quad (3)$$

根据国际电信联盟最新定义, 无线电折射率 N 与气象参数之间的关系可近似表示为 (ITU, 2017)

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

式中, P_d 和 e 分别代表了干大气和湿大气的分压,

单位为百帕 (hPa); T 为绝对温度, 单位为开尔文 (K)。 k_1, k_2, k_3 为实验测定的经验系数:

$$\begin{cases} k_1 = 77.689 \text{ KhPa}^{-1} \\ k_2 = 71.2952 \text{ KhPa}^{-1} \\ k_3 = 3.75463 \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

由此建立了以大气折射率 n 为代表的大气层电磁特性和以温度、干湿大气分压为代表的气象特性之间的关系为

$$n = \left(k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) \times 10^{-6} + 1 \quad (6)$$

正是由于大气层温度、湿度的变化, 造成了电磁特性的非均匀, 从而使得信号的传播速度和传播方向在穿过整个大气层时不断变化。

假设信号的真实传播路径为自地球表面的观测点 z_0 至大气层上界 z_{atmo} , 则相应的大气时延可近似表达为以下积分式 (Pany 等, 2001)

$$\begin{aligned} \int_{z_0}^{z_{\text{atmo}}} (n - 1) dz &= 10^{-6} \times \int_{z_0}^{z_{\text{atmo}}} N dz \\ &= 10^{-6} \times \int_{z_0}^{z_{\text{atmo}}} \left(k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz \end{aligned} \quad (7)$$

根据 Dalton 的分压定律, 大气层的总压强可写作干湿大气分压之和。因此大气时延可以利用下式计算:

$$10^{-6} \times \int_{z_0}^{z_{\text{atmo}}} \left(k_1 \frac{P}{T} + (k_2 - k_1) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz \quad (8)$$

式中, P 代表大气总压强, 气压、温度均为与积分路径有关的变量。

3 大气斜距时延的数值计算

基于数值天气模型来估计大气时延, 其核心思想: 一是借助气象特性与电磁特性的关系, 通过获取大量气象参数, 计算大气折射率; 二是基于大气分层模型, 将路径积分离散化处理。其中, “数值” 既指使用天气物理量来量化折射率, 又指利用数值方式来计算路径积分。“天气” 一词则解释了使用气象参数间接获取大气层电磁参数, 从而计算时延量的过程。

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 为大气分层提供了解决思路, 其采用的 IFS (Integrated Forecast System) 模型,

在水平方向上将全球划为了数百万个网格点, 精度可达 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; 在垂直方向上将大气层离散化为 60 层 (Abdalla, 2013), 称为 “hybrid model”, 如图 1 所示。此模型划分大气层的理念为: 在靠近地表的下层, 模型的建立依赖于地形, 愈往上的层级愈依赖于大气压, 因此总体上对大气层的划分是结合了地表地形和气压变化的结果。

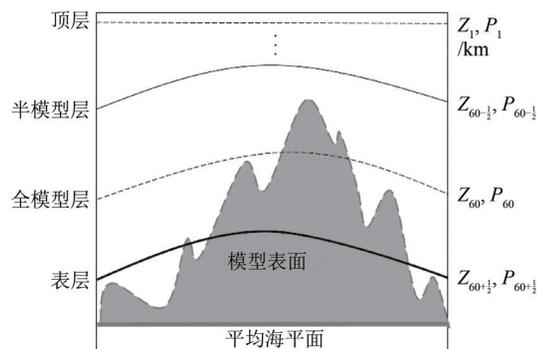


图1 大气垂直分层混合模型

Fig.1 Tropospheric vertical hybrid model

根据具体的压强值来定义每一层。首先定义每两层中间层的压强为

$$P_{k-\frac{1}{2}} = A_{k-\frac{1}{2}} + B_{k-\frac{1}{2}} P_s, k = 1, 2, \dots, 61 \quad (9)$$

式中, P_s 为地表压强, 取值 1013.25 hPa。每层的压强表示为

$$P_k = \frac{1}{2} (P_{k-\frac{1}{2}} + P_{k+\frac{1}{2}}) \quad (10)$$

ECMWF 提供的官方文档中 (Berrisford 等, 2011), 详细列出了用于计算每一层大气压强和海拔高度的参数, 可以由此得到各层的海拔高度和大气压强。

另一方面, ECMWF 不提供湿大气分压的数据, 因此只能通过其他物理量间接计算。湿大气分压与湿度的关系 (Cong 等, 2012) 为

$$e = \frac{r}{r + \frac{M_w}{M_d}} \times P \quad (11)$$

$$r = \frac{q}{1 - q} \quad (12)$$

式中, q 代表比湿, 该参数可以从 ECMWF 公开数据中获取。 M_d 和 M_w 分别为干湿大气的摩尔质量, 取值如下:

$$M_d = 2.89644 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

$$M_w = 1.80152 \times 10^{-2} \text{ kg} \quad (13)$$

对于传统高度计的星下点观测而言，信号垂直入射大气层，仅需考虑大气折射率不同引起速率变化的时延。但对于天宫二号成像高度计，其偏离星下点小角度入射的特性使得信号在进入每一层大气时，都会因折射效应造成方向改变，即路径弯曲效应。因此，路径时延的计算中速率变化和方向变化是耦合的，用于估计大气斜距时延的计算公式修正为

$$\delta h = 10^{-6} \int_{s_0}^{s_n} (k_1 \frac{P}{T} + (k_2 - k_1) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}) ds \quad (14)$$

式中， ds 是斜距积分微元，在斜距积分路径上，气象参数 T , P , e 随信号穿刺点坐标 $[x_i, y_i, z_i]$, $i = 0, \dots, n$ 变化，完整表示应写作： $P(x_i, y_i, z_i)$, $T(x_i, y_i, z_i)$, $e(x_i, y_i, z_i)$ 。其中， i 代表大气划分的第 i 层。需要注意的是，ECMWF 提供的气象数据是关于经度、纬度、时间以及大气划分层级的 4 维变量，例如，所获取的温度物理量为 $T(lat, lon, time, i)$ ，因此计算时需在两种数据表示间转化。

图 2 给出如何计算在每一层中的实际传播路径的示意图。

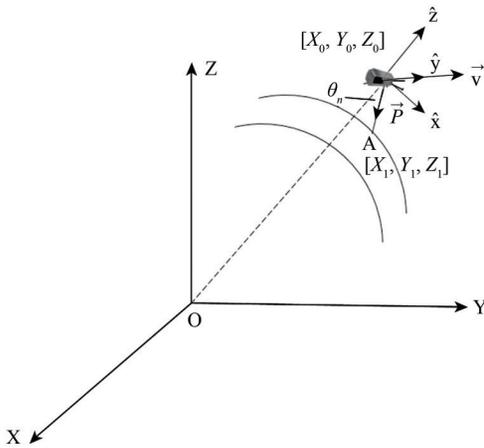


图2 地心地固坐标系下的信号传播路径
Fig.2 Propagation path in Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) coordinate system

如图 2 所示， $X - Y - Z$ 代表 ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) 坐标系，以卫星与地心连线方向为 \hat{z} 轴，卫星飞行方向为 \hat{y} 轴， $\hat{x} = \hat{y} \times \hat{z}$ ，由此建立卫星局部坐标系 $\hat{x} - \hat{y} - \hat{z}$ 。设天宫二号成像高度计天线相位中心在 ECEF 坐标系下的初始坐标为

$S = [X_0, Y_0, Z_0]$ ，斜入射角为 θ_n ，信号传播至大气最上层的距离为 l ，那么信号在最上层大气穿刺点的坐标可表示为： $A = S + l \cdot P$ ，其中 $P = [\hat{x} \sin\theta_n, 0, -\hat{z} \cos\theta_n]$ 。

为简化几何计算，在 2 维平面上绘出信号的斜距传播路径，如图 3 所示。图 3 中 S 代表天宫二号成像高度计在偏离星下点 θ_n 的情况下进行观测，信号从 A 点进入最上层大气，此时的到达角为 α 。根据正弦定理：

$$\frac{OA}{\sin\theta_n} = \frac{OS}{\sin(180^\circ - \alpha)} \quad (15)$$

式中， OS 为地心至高度计轨道高度的距离， OA 为地心至大气上界的距离，一旦确定高度计的斜入射角，可计算出信号进入最上层大气的到达角。随后信号在大气层间传播，根据折射定律有：

$$n_0 \sin\alpha = n_1 \sin\beta \quad (16)$$

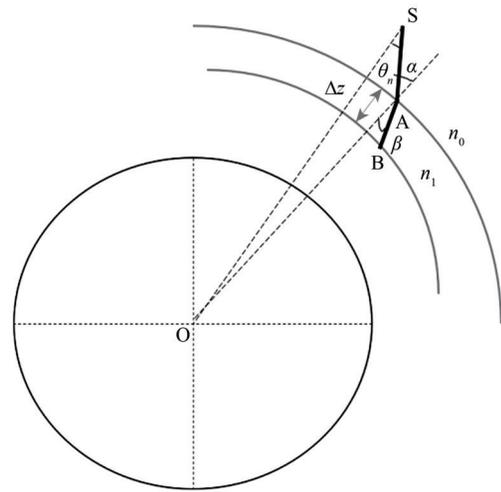


图3 信号传播路径平面示意图
Fig.3 Two-dimensional propagation path

当求解出每层大气中的折射角 β 后，可以得到对应层中信号的真实传播路径：

$$\Delta s = \frac{\Delta z}{\cos\beta} \quad (17)$$

将式 (14) 中的积分计算离散化为求和式，则高度计大气斜距时延的计算公式最终修正为

$$\delta h = 10^{-6} \times \sum_{i=1}^n (k_1 \frac{P_i}{T_i} + (k_2 - k_1) \frac{e_i}{T_i} + k_3 \frac{e_i}{T_i^2}) \times \Delta s_i \quad (18)$$

图 4 为大气斜距时延算法的流程图。

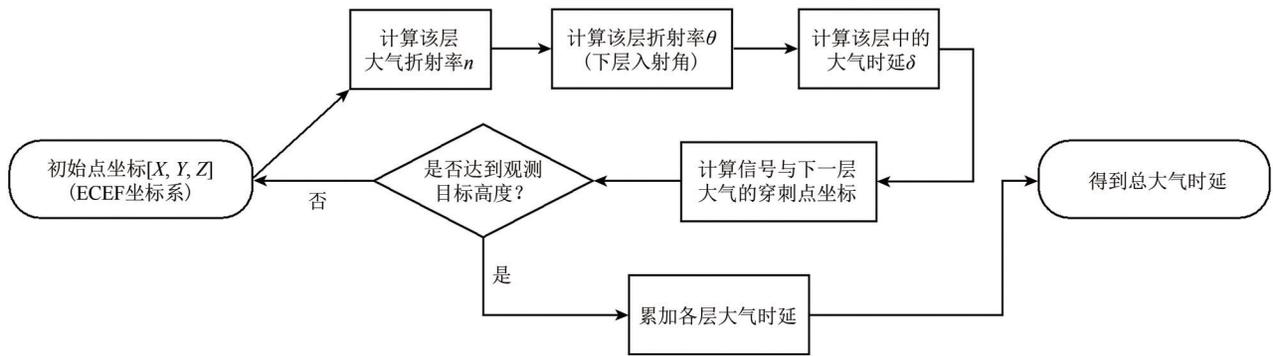


图4 大气斜距时延算法流程图

Fig.4 Flow chart of calculating tropospheric slant path delay

4 实测数据处理与分析

4.1 系统时延误差

在天宫二号成像高度计的斜距测量中, 时延误差主要包含两部分: 一是系统时延误差, 它是一个几乎恒定的值, 与雷达设备的物理属性相关; 二是路径时延误差, 它是一个随时间与空间变化的值, 与高度计观测时间下信号传播路径的天气状况相关。因此, 在验证本文提出的大气斜距时延校正算法的有效性之前, 需要对天宫二号成像高度计的系统时延误差进行校正。

2017-03-16, 针对天宫二号成像高度计系统, 在内蒙古自治区包头地区开展了第一次定标实验, 图5是天宫二号成像高度计得到的幅度图像, 为便于显示, 图5将幅度图像地理定位后叠加在 Google Earth 上。

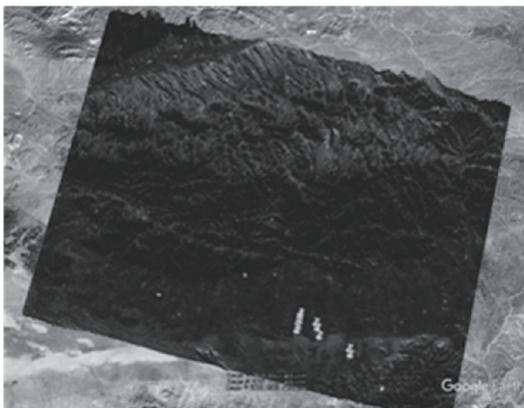


图5 2017-03-16定标幅度图像

Fig.5 Calibration amplitude image on March 16, 2017

图6是该实验的局部放大图像, 该实验一共布设11个角反射器, 如图6中P1—P11标注的区域。

从图像中可以看出, 实验中P4、P6、P7、P8、P10、P11这6个角反射器的信杂比较高, 适合用于进行距离时延标定; 而其余角反射器所处区域的地面杂波较强, 信杂比较低, 不适合用于标定距离时延; 因此, 本次定标实验只采用P4、P6、P7、P8、P10、P11进行时延标定。

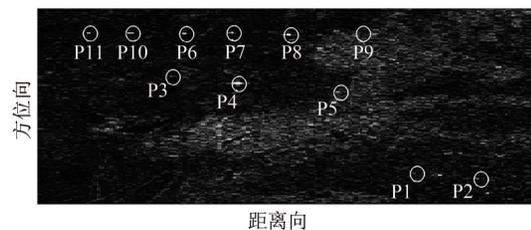


图6 2017-03-16局部放大定标幅度图像

Fig.6 Zoomed-in calibration amplitude image on March 16, 2017

对这6个角反射器的观测数据进行大气斜距时延校正, 表2给出了校正前后的距离误差对比, 表3列出了各角反射器在传播路径上的天气参数均值。

表2 2017-03-16大气斜距时延计算结果

Table 2 Tropospheric slant path delay on March 16, 2017

角反射器 编号	大气时延/ m	校正前距离误差/ m	校正后距离 误差/m
P4	2.198274	2.801888541	5.000163
P6	2.198625	2.977151162	5.175776
P7	2.200645	2.758364571	4.959009
P8	2.181658	2.85997389	5.041631
P10	2.198787	2.848472464	5.047260
P11	2.199853	2.619351168	4.819204
std		0.119	0.117

注:std表示标准差。

由于本文旨在研究斜距大气时延校正算法, 因此仅简要说明校正前距离误差的计算过程: 根

据高度计天线相位中心坐标和角反射器自身携带的差分GPS定位坐标,可以直接计算出高度计与目标之间的斜距,记为 r_{measured} ;根据高度计所成图像,通过插值和数据拟合在图像中定位出角反射器的峰值响应坐标点,如图7所示,再根据成像算法得到高度计到角反射器的斜距,记为 r_{expected} ,因此校正前的距离误差可表示为 $r_{\text{expected}} - r_{\text{measured}}$ 。校正后的距离误差主要由系统内部时延引起,其平均值为5.007 m,后面的验证实验将首先以此值作为系统内部时延量予以消除。

表3 2017-03-16气象参数均值

Table 3 Average weather parameters on March 16, 2017

角反射器编号	温度均值/K	比湿均值/(kg/kg)
P4	234.6224	0.000367488
P6	234.4527	0.000302836
P7	234.5365	0.000363073
P8	234.4527	0.000302836
P10	234.4527	0.000302836
P11	234.4527	0.000302836

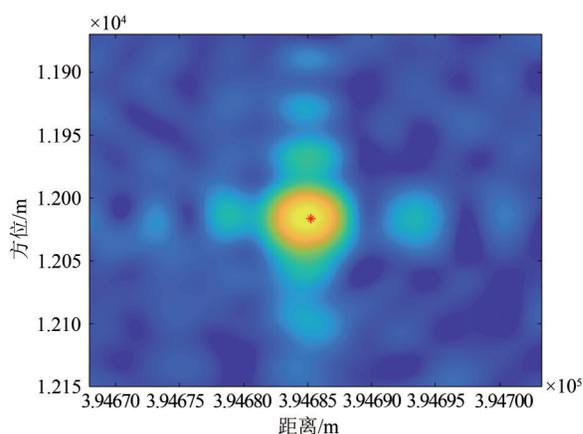


图7 幅度图像中P1角反射器的峰值响应坐标
Fig.7 Peak position of CR-P1 in amplitude image

4.2 大气时延误差

2018-09,针对天宫二号成像高度计系统,在内蒙古自治区苏尼特右旗地区开展了第2次定标实验,图8是天宫二号成像高度计经过定标场的多个轨道的幅度图像,为便于显示,图8仍将幅度图像地理定位后叠加在Google Earth上。

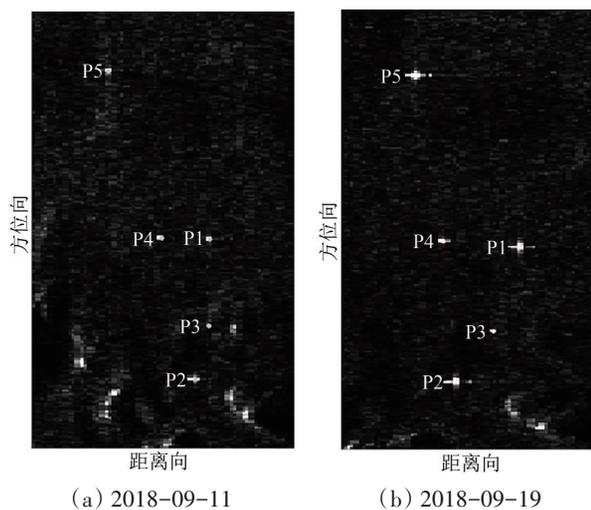
为验证本文提出的大气斜距时延校正方法,采用天宫二号成像高度计于2018-09-11和2018-09-19所获取的定标实验观测数据,图9为高度计成像所得的幅度图像,P1—P5代表布设的5个角

反射器,其顶点的经纬度和高度坐标已由精密的差分GPS定位得到。其中,P1、P2和P5为2.2 m的四面角反射器,P3和P4为2.0 m的四面角反射器,由于P3和P4角反射器布设过程中存在误差,其自身地理位置测量的精度不高,并且同P1、P2和P5相比,P3和P4角反射器信杂比较低,故在本文大气斜距时延校正算法的验证中,应剔除P3和P4角反射器的异常数据。



图8 2018-09定标幅度图像

Fig.8 Calibration amplitude image in September, 2018



(a) 2018-09-11

(b) 2018-09-19

图9 角反射器幅度图像局部放大图

Fig.9 Zoomed-in amplitude images of corner reflectors

在Python下编程调用ECMWF的API接口,获取对应观测时间、经纬度、大气层级的气象参数,包括温度、比湿、气压数据。每一层的各物理参数都是关于时间和空间的变量,因此对任何一个天气参数而言,共包含4个维度:时间、经度、纬度、海拔高度(层数)。根据目标场景的经纬度,在获取的网格数据上进行双线性插值;根据观测的UTC (Coordinated Universal Time) 时间,在时

间尺度上进行线性插值。

表4给出了2018-09-11定标数据的时延计算结果。干湿大气时延分量如图10所示。表5给出了2018-09-19定标数据的时延计算结果。

表4 2018-09-11大气斜距时延计算结果
Table 4 Tropospheric slant path delay on September 11, 2018

角反射器编号	入射角/(°)	大气时延/m
P1	3.07377039538697	2.151426676
P2	3.06260453019788	2.148063607
P5	2.92027277940492	2.151087635

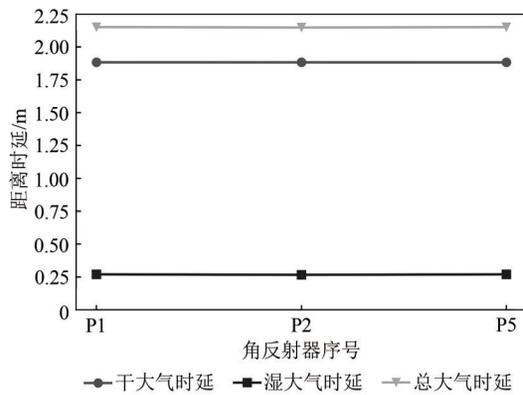


图10 干湿大气时延(2018-09-11)

Fig.10 Dry and wet tropospheric path delay on September 11, 2018

表5 2018-09-19大气斜距时延计算结果
Table 5 Tropospheric slant path delay on September 19, 2018

角反射器编号	入射角/(°)	大气时延/m
P1	5.01754831807151	2.338140036
P2	4.96443719397232	2.338675201
P5	4.92573051194585	2.337773211

干湿大气时延分量如图11所示。首先, 根据以上计算结果分析大气时延的共性。从图10、图11中可以发现: 大气时延的主要贡献来源于干大气, 湿大气时延分量的占比很小。一方面, 对同一天的观测而言, 干大气时延维持一个近乎恒定的值, 与理论分析一致。由于3个角反射器所处的空间位置跨度很小, 经度相差约0.06°, 纬度相差约0.01°, 在这个小区域内的湿大气时延在一天内并没有呈现出明显变化, 仅在湿大气时延分量小数点后第4位开始浮动。另一方面, 对比图10和图11,

可以看到11日和19日这两天的干大气时延分量几乎相同, 说明干大气的状态在一定时间范围内也近乎不变, 与大气理论相符。

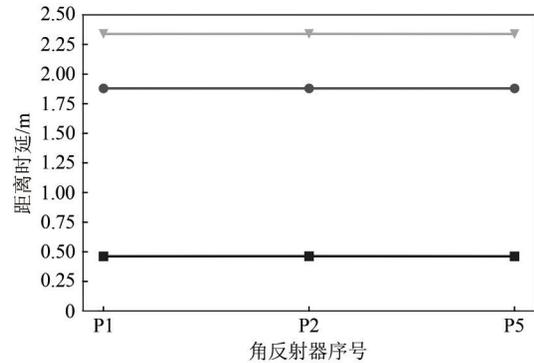


图11 干湿大气时延(2018-09-19)

Fig.11 Dry & wet tropospheric path delay on September 19, 2018

接着分析大气时延的差异。为便于后文对比分析不同天气状况下大气时延的差异, 考虑到列出信号传播路径上所有层的天气参数过于复杂, 现给出不同观测时间下各角反射器天气参数在信号传播路径上的均值, 见表6和表7。

表6 2018-09-11气象参数均值

Table 6 Average weather parameters on September 11, 2018

角反射器编号	温度/K	比湿/(kg/kg)
P1	235.3427295	0.000289866
P2	235.3510599	0.000286262
P5	235.3427295	0.000289866

表7 2018-09-19气象参数均值

Table 7 Average weather parameters on September 19, 2018

角反射器编号	温度/K	比湿/(kg/kg)
P1	235.7181171	0.000493951
P2	235.7310553	0.000492271
P5	235.7181171	0.000493951

对任何一个角反射器而言, 除高度计自身的参数(工作频率, 天线相位中心坐标)外, 决定其对应的大气时延的因素有3个: (1)角反射器的地理空间位置, 即经纬度和高程; (2)观测时间; (3)信号的入射角。这3个因素耦合在一起, 共同决定了信号从高度计天线发出, 经干湿大气到达

角反射器的真实路径,从而计算出对应的大气时延。对比表4和表5,由于同一编号角反射器的位置在两次观测中没有发生变化,因此反映出在不同观测时间和入射角的情况下大气时延量不同。观测时间不同,天气状况一般也会不同,对信号传播速度的影响也随之发生改变,从而导致大气时延的不同。表6和表7的气象参数均值显示,09-19的湿度均高于09-11,整体趋势上表5中每一个角反射器的大气时延量均高于表4。这是由于在干大气时延近乎不变的情况下,湿度增加使得湿大气时延增加,从而提升了整体的大气时延。值得注意的是,对比表4和表5,各角反射器的时延增量并不是一个相同的固定值:如表4中P1和P5的大气时延大于P2,但表5中P1和P2的大气时延大于P5,这是由于除了天气状况的影响外,还有入射角的影响。入射角不同,会影响信号传播方向的改变(Choi, 1996),体现在计算信号传播的弯曲效应中,以此影响大气时延。正如本段开头所论述的,目标的地理空间位置、观测时间下的天气状况、信号入射角这3个因素耦合在一起共同影响目标对应的大气时延,由于定标实验只能控制一个影响变量,其余两个变量对大气时延的影响仍是耦合在一起的,不能通过表格数据简单地分析出大气时延的变化规律。正因为这3个因素的复杂性和耦合性,本文提出基于数值天气模型,在斜距传播路径上依据折射定律和几何关系、利用射线追踪的思想逐层积分计算大气斜距时延。此算法综合考虑了大气时延的时空变化特性和天宫二号成像高度计斜入射观测的特点,避免了使用映射函数(杨志强等, 2008)将大气天顶方向的时延直接转化为斜距时延中忽略的路径弯曲效应,使得大气斜距时延校正更加准确可信。

根据前面的计算结果对角反射器的观测数据进行大气斜距时延校正,表8给出了校正前后的距离误差对比。

表8反映的是表4、表5中列出的角反射器基于2017-03-16定标数据的系统时延校正量,在不同观测日期和入射角的情况下,修正大气时延前后距离误差的变化。根据2018-09的定标实验数据,重新估算系统内部时延,需增加绝对距离时延的偏置约0.825 m。更新后,系统时延约为5.832 m。表9给出更新系统时延后大气时延校正前后的距离误差对比。

表8 大气时延校正前后的距离误差(系统时延:5.007 m)

Table 8 Range errors before and after tropospheric slant path delay correction (System delay: 5.007 m)

角反射器编号	校正前距离误差/m	校正后距离误差/m
P1	1.369595611	-0.781831065
P2	1.306623982	-0.841439625
P5	1.469687472	-0.681400164
P1	1.537049239	-0.801090797
P2	1.509303638	-0.829371563
P5	1.490524822	-0.847248389

表9 大气时延校正前后的距离误差(系统时延:5.832 m)

Table 9 Range errors before and after tropospheric slant path delay correction (System delay: 5.832 m)

角反射器编号	校正前距离误差/m	校正后距离误差/m
P1	2.194595611	0.043168935
P2	2.131884318	-0.016179289
P5	2.294947808	0.143860172
P1	2.362309575	0.024169539
P2	2.334563974	-0.004111227
P5	2.315785158	-0.021988053
std	0.090	0.062

注:std表示标准差。

表9显示出校正后的距离误差在零值附近波动。其中,第3行为P5角反射器在2018-09-11的校正情况,相比另外5个样本点,其校正后的距离误差较大。为分析原因,根据ECMWF湿度数据绘制该观测日期下P5角反射器对应的湿大气状况,如图12所示。

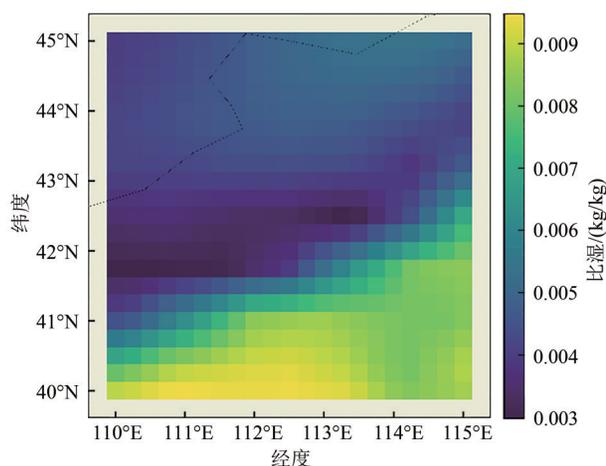


图12 2018-09-11 P5角反射器对应的湿大气状况
Fig.12 The condition of water vapor related to corner reflector P5 on September 11, 2018

从图 12 中可以看出, 观测当天 P5 角反射器 (42.5°N, 112.8°E) 附近的比湿有明显变化, 但由于能获取到的比湿数据的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 数据插值会不可避免地引入误差, 影响了在更小的经纬度范围内湿大气时延的计算精度, 表现为一定程度上低估了 P5 角反射器当天的大气斜距时延, 因此表 9 中第 3 行校正后的距离误差相对较大。

为验证本文提出的大气斜距时延校正算法的有效性和可靠性, 计算校正前和校正后距离误差的标准差。记校正前距离误差的标准差为 $std(r_{cb})$, 校正后距离误差的标准差为 $std(r_{ca})$, 具体的计算公式如下:

$$std(r_{cb}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((r_{\text{expected}} - r_{\text{measured}}) - \overline{(r_{\text{expected}} - r_{\text{measured}})} \right)^2}{n-1}} \quad (19)$$

$$std(r_{ca}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((r_{\text{expected}} - r_{\text{measured}} - \delta h) - \overline{(r_{\text{expected}} - r_{\text{measured}} - \delta h)} \right)^2}{n-1}} \quad (20)$$

式中, $r_{\text{expected}} - r_{\text{measured}}$ 代表校正前距离误差; $r_{\text{expected}} - r_{\text{measured}} - \delta h$ 代表校正后距离误差, δh 为算法估计的大气时延, n 代表样本数目, 下标 i 代表第 i 个样本。校正后距离误差的标准差反映了在角反射器的陆地定标实验中, 天宫二号成像高度计经大气时延校正后所能达到的测量精度。表 2 显示 2017 年第一次定标实验中, 校正前距离误差的标准差约为 11.9 cm; 经校正大气斜距时延后, 距离误差的标准差约为 11.7 cm, 测量精度提升了 0.2 cm。表 9 显示 2018 年第二次定标实验中, 校正前距离误差的标准差约为 9.0 cm; 在校正大气斜距时延后, 距离误差的标准差约为 6.2 cm, 测量精度提升了 2.8 cm。表 2 和表 9 的计算结果均说明, 采用本文提出的大气斜距时延校正算法后, 高度计的距离测量精度得到了提高, 表现为校正后距离误差的标准差下降。此外, 对比表 2 和表 9 可知, 相比 2017 年的数据, 2018 年定标观测数据的信杂比更高, 更适合用于标定距离时延, 表现为在经过大气斜距时延校正后, 2018 年数据距离误差的标准差相比 2017 年小 5.5 cm ($11.7 \text{ cm} - 6.2 \text{ cm} = 5.5 \text{ cm}$)。剩余距离误差的来源包括电离层时延、定轨误差、角反射器位置测量误差、ECMWF 数据

误差和模型残余计算误差, 以下对本文能分析的误差进行说明。针对电离层时延, 通过欧洲定轨中心公布的 2018-09-11 和 2018-09-19 的全球电离层地图 (CODE, 2012) 可知, 角反射器所在区域上空的电子总含量分别约为 9 TECU (Total Electron Content Unit) 和 12 TECU, 本文限于篇幅不展开对电离层时延校正的论述, 但需在此说明, 对应 Ku 波段的雷达信号, 剩余距离误差中电离层时延的贡献约 2 cm。角反射器布设误差约为 1—2 cm (通过差分 GPS 设备测量)。针对 ECMWF 数据, 文献 (陈钦明等, 2012) 论证使用 ECMWF 数据在亚洲地区进行对流层天顶延迟 ZTD (Zenith Tropospheric Delay) 计算, 相对于 GPS 实测 ZTD 值, 年均偏差约为 -1.0 cm, 已达到相当高的精度, 适合于高精度对流层延迟研究。本文使用 ECMWF 数据在各层大气中计算对应的折射率, 对于斜距的处理则基于折射定律和路径积分, ECMWF 数据引入的误差与研究天顶方向大气时延一致, 因此亦可认为, 由 ECMWF 数据本身引入的斜距测量误差约 -1.0 cm。上述误差分析说明, 采用本文提出的大气斜距时延校正算法后, 天宫二号成像高度计实现的斜距测量精度为 6.2 cm, 达到了厘米量级, 与 TerraSAR-X 的斜距测量精度相当 (Eineder 等, 2011; Cong 等, 2012), 满足天宫二号成像高度计测高精度设计指标的评估要求 (小于 $5 \text{ cm} + 2 \text{ cm} = 7 \text{ cm}$, 其中 5 cm 为海面相对测高精度, 2 cm 为允许的偏差量)。另一方面需要说明的是, 2017-03 和 2018-09 两个时间段的定标试验中得到的系统时延由 5.007 m 变为了 5.832 m, 分析其原因主要有两方面: (1) 时钟漂移。根据天宫二号成像高度计所采用的 100 MHz 晶体振荡器的技术指标, 稳定度约为 $\alpha \times 0.01 \text{ ppm}$ (α 为小于 1 的某个数), 由此导致的距离测量年偏移量约为 $\pm(1.5e^8/100e^6)(\text{m/Hz}) \times (100e^6 \times \alpha \times 0.01e^{-6})\text{Hz} \approx 0.1\text{—}1.0 \text{ m}$; (2) 轨道确定误差。根据天宫二号的精密定轨任务设计指标, 定轨精度优于 0.2 m。因此一方面 0.825 m ($5.832 \text{ m} - 5.007 \text{ m} = 0.825 \text{ m}$) 的距离偏差符合预期, 另一方面也不影响对大气时延校正的精度评价。

5 结论

本文立足于天宫二号成像高度计, 针对雷达信号传播中的大气斜距时延进行估计与校正。不

同于传统高度计的星下点观测, 天宫二号成像高度计采用偏离星下点的小角度入射, 这就要求在斜距上进行大气时延的校正, 因此需要考虑路径弯曲效应。为了实现更高精度的大气时延校正, 本文开发的校正大气斜距时延算法基于数值天气模型并采用射线追踪的方法, 考虑斜入射情况下信号传播中兼有的速度改变和方向改变, 融合气象参数、折射定律和大气分层路径积分。该算法能有效捕捉天宫二号成像高度计在不同斜入射角的情况下, 信号大气斜距时延的时空2维特性。基于天宫二号成像高度计2018-09的实际定标数据和ECMWF的开源天气数据进行计算, 经校正大气斜距时延, 剩余距离误差的标准差约为6.2 cm, 满足对天宫二号成像高度计测高精度的评估要求。该结果表明本文提出的大气斜距时延校正算法能在高度计小入射角的动态范围内, 对不同入射角下的真实数据进行处理, 算法的有效性和可靠性得到了验证。本文所提出的大气斜距时延校正方法, 基于ECMWF的天气数据, 其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 尚不能准确反映更小空间单元内因湿度变化造成的湿大气时延改变, 后续工作将探索如何更加准确地估计在如此高精度的地理空间范围内湿大气时延的变化。

星载雷达信号传播中的大气时延, 是制约雷达数据后续应用的关键。对大气时延进行精确估计和校正, 一方面可为精确测高、定位、成像奠定基础, 同时也为研究海平面高度变化等科学问题奠定基础。本文所提出的基于数值天气模型的天宫二号成像高度计大气斜距时延校正方法, 填补了国内高度计斜入射大气时延校正的空白, 以期从后续的数据挖掘中得到更多有利于科学研究和工程应用的信息。

志 谢 感谢ECMWF提供相关的数据资料。

参考文献 (References)

- Abdalla S. 2013. Evaluation of radar altimeter path delay using ECMWF pressure-level and model-level fields. A report for ESA contract 21519/08/ I-OL. European Centre for Medium Range Weather Forecasts: 1-4
- Berrisford P, Dee D, Poli P, Brugge R, Fielding M, Fuentes M, Kållberg P W, Kobayashi S, Uppala S and Simmons A. 2011. The ERA-interim archive Version 2.0. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: 2-4
- Chen Q M, Song S L and Zhu W Y. 2012. An analysis of the accuracy of zenith tropospheric delay calculated from ECMWF/NCEP data over Asian area. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 1541-1548 (陈钦明, 宋淑丽, 朱文耀. 2012. 亚洲地区ECMWF/NCEP资料计算ZTD的精度分析. *地球物理学报*, 55(5): 1541-1548) [DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011]
- Choi J. 1996. Tropospheric effects of time delays and angle of arrivals in the low elevation angle for radiowave propagation//Proceedings of MILCOM '96 IEEE Military Communications Conference. McLean: IEEE: 1041-1044 [DOI: 10.1109/MILCOM.1996.571440]
- CODE. 2012. Global ionosphere maps produced by CODE[EB/OL]. [2018-11-16]. <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere>
- Cong X Y, Balss U, Eineder M and Fritz T. 2012. Imaging geodesy - centimeter-level ranging accuracy with TerraSAR-X: an update. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(5): 948-952 [DOI: 10.1109/lgrs.2012.2187042]
- Deng M J, Zhang G, Zhao R S, Li S N and Li J S. 2018. Application of the atmospheric delay correction model in YG-13A range calibration. *Journal of Remote Sensing*, 22(3): 373-380 (邓明军, 张过, 赵瑞山, 李少宁, 李建松. 2018. 顾及大气延迟效应的YG-13A斜距标定. *遥感学报*, 22(3): 373-380) [DOI: 10.11834/jrs.20187116]
- Ding C B, Liu J Y, Lei B and Qiu X L. 2017. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system. *Journal of Radars*, 6(1): 11-16 (丁赤彪, 刘佳音, 雷斌, 仇晓兰. 2017. 高分三号 SAR 卫星系统级几何定位精度初探. *雷达学报*, 6(1): 11-16) [DOI: 10.12000/JR17024]
- Dong X, Zhang Y H and Zhai W S. 2017. Design and algorithms of the Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter processor//Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring. St. Petersburg: IEEE: 3802-3803 [DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262420]
- Eineder M, Minet C, Steigenberger P, Cong X Y and Fritz T. 2011. Imaging geodesy - toward centimeter-level ranging accuracy with TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(2): 661-671 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2060264]
- ITU. 2017. ITU-R P. 453-12 The radio refractive index: its formula and refractivity data. Geneva: ITU - Radiocommunication Sector: 2-3
- Jehle M, Perler D, Small D, Schubert A and Meier E. 2008. Estimation of atmospheric path delays in TerraSAR-X data using models vs. measurements. *Sensors*, 8(12): 8479-8491 [DOI: 10.3390/s8128479]
- Pany T, Pesec P and Stangl G. 2001. Atmospheric GPS slant path delays and ray tracing through numerical weather models, a comparison. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(3): 183-188 [DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00044-8]
- Xu Y S, Gao L and Zhang Y H. 2017. New generation altimetry satellite SWOT and its reference to China's swath altimetry satellite. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(1): 84-94 (徐永生, 高乐, 张云华. 2017. 美国新一代测高卫星SWOT——评述

- 我国宽刈幅干涉卫星的发展借鉴. 遥感技术与应用, 32(1): 84-94 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.1.0084]
- Xu Z W, Wu J and Wu Z S. 2004. A survey of ionospheric effects on space-based radar. *Waves in Random Media*, 14(2): S189-S273 [DOI: 10.1088/0959-7174/14/2/008]
- Yang Z Q, Chen X M and Zhao Z W. 2008. Empirical model for radio wave refractive error correction of troposphere. *Chinese Journal of Radio Science*, 23(3): 580-584 (杨志强, 陈祥明, 赵振维. 2008. 对流层电波折射误差修正经验模型研究. *电波科学学报*, 23(3): 580-584) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.03.037]
- Zhang Y G, Jia Y J, Fan C Q, Zhang J and Lin M S. 2013. HY-2A satellite radar altimeter error correction algorithm and verification. *Engineering Sciences*, 15(7): 53-61 (张有广, 贾永君, 范陈清, 张杰, 林明森. 2013. 海洋二号卫星雷达高度计测高误差校正算法及验证. *中国工程科学*, 15(7): 53-61) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.07.008]
- Zhang Y H, Jiang J S, Zhang H Y and Zhang D H. 2000. Spaceborne imaging altimeter for topographic mapping//*Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment*. Honolulu: IEEE: 2349-2351 [DOI: 10.1109/IGARSS.2000.858405]
- Zhang Y H, Jiang J S, Zhang X K, Xu K, Yan J Y, Jiang C H and Lei L Q. 2003. Design and preliminary experiment of china imaging altimeter//*Proceedings of the SPIE 4894, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment III*. Hangzhou: SPIE: 190-199 [DOI: 10.1117/12.466230]
- Zhang Y H, Zhang X K, Meng X, Luo W, Zhou Z X and Jiang J S. 2007. An interferometric imaging altimeter applied for both ocean and land observation//*Proceedings of 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Barcelona: IEEE: 3821-3824 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423676]
- Zhao T G. 2011. Tropospheric Modeling and Delay Error Analysis Based on the GNSS Signals. Harbin: Harbin Institute of Technology: 12-22 (赵铁刚. 2011. 基于GNSS信号的对流层建模与延迟误差分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学: 12-22)

Correction of the tropospheric slant path delay of Tiangong-2 Interferometric Imaging Radar Altimeter

CHEN Jiehao^{1,2}, ZHANG Yunhua^{1,2}, DONG Xiao¹

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

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Launched on September 15, 2019, the Interferometric Imaging Radar Altimeter (InIRA) onboard the Chinese Tiangong-2 space laboratory is the first spaceborne interferometric radar altimeter that can obtain wide-swath ocean topography measurements by adopting small incidence angles from 1° to 8° with a short baseline. InIRA achieves various technological breakthroughs, meanwhile, it also brings some challenges in data processing because no radiometer is onboard the Tiangong-2 space laboratory. Considering signal path delays is a premise for InIRA to meet its geocoding and Sea Surface Height (SSH) measurement goals, a mathematical model-based method for tropospheric path delay correction should be developed. Unlike traditional nadir-looking altimeters, which only require the propagation delay related to the velocity variation along a line path, the Tiangong-2 InIRA must consider the additional bending of radio waves for its small incidence angles. In this study, a tropospheric slant path delay correction algorithm is developed using the ray-tracing technique based on Fermat's principle and on the numeric weather model from the European Center for Medium-range Weather Forecasts. Two calibration campaigns are conducted in March 2017 and September 2018, which recorded 12 measurement data from 9 corner reflectors. Results show that the standard deviation of the residual error range after the tropospheric slant path delay correction is approximately 6.2 cm, which indicates that a centimeter-level range accuracy is realized. Therefore, the effectiveness and reliability of the proposed algorithm in different small incidence angles are validated.

Key words: Tiangong-2 Interferometric Imaging Radar Altimeter (InIRA), atmospheric path delay, slant path delay correction, Numeric Weather Model (NWM), bending of radio waves

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC1401004)