

天宫二号 InIRA 数据系统延迟改正估算方法^①

陈嘉明^{②*} 廖静娟^{③*}

(^{*} 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室 北京 100094)

(^{**} 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 高精度和高空间分辨率的宽刈幅 3 维成像微波高度计 (InIRA) 在探测海洋和陆地水文变化等方面具有广阔的应用前景。然而,在湖泊水位监测应用中,由于 InIRA 传感器的系统延迟偏差,导致水位反演出现米级偏差。为此,针对 InIRA 的数据特性,本文提出了一种以 Cryosat-2 数据为基准的 InIRA 系统延迟改正估算方法,该方法在一定区域内可获取较为可靠的系统延迟改正量。利用该方法,在研究区内获取了 4.6287 m 的系统延迟改正,将该系统延迟改正加入后反演青海湖水位的精度为 0.3327 m,表明了系统延迟改正的可靠性,也体现了 InIRA 数据在湖泊水位反演方面的潜力。

关键词 天宫二号; 3 维成像微波高度计 (InIRA); Cryosat-2; 湖泊水位; 系统延迟改正

0 引言

据估计,大约 2.1% 的陆地表面为面积大于 1 hm^2 的湖泊和水塘所覆盖^[1]。湖泊是区域和全球范围内环境变化的关键因素^[2],探测湖泊的水位变化可以为水资源短缺或洪水预测提供早期预警^[3]。虽然传统的水文站观测方式能够获取连续、高精度的水位数据,但是运行成本高且站点数量有限,许多地方的水文站数据受地方政策限制不能公开使用^[4,5];全球水文站的数量在近年来也呈下降趋势^[6,7],因此湖泊水位变化的长时间探测显得极为迫切。从 20 世纪 90 年代开始,卫星测高技术在湖泊水位变化监测方面取得了广泛的应用^[8-12],但是对于中小型湖泊,雷达回波的波形受到周围陆地表面污染,反演水位精度较低,Cryosat-2 的出现在一定程度上解决了中小型湖泊水位的反演问题^[12-15],但是传统星载雷达高度计受到地面分辨率和刈幅宽度的影响,观测效率仍然较低。

2016 年 9 月 15 日,中国天宫二号空间实验站中搭载的 3 维成像微波高度计 (interferometric image radar altimeter, InIRA)^[16] 成功升空,打破了传统星载雷达高度计只能沿星下点航迹方向进行高度测量,以及测量刈幅宽度小而无法进行大范围观测的局限,同时能够提供地表水体高程变化的 2 维观测^[17]。与美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 2021 年即将发射的 SWOT (surface water ocean topography) 搭载的 Ka 波段雷达干涉仪 (Ka-band radar interferometers, Ka-RIn)^[18] 类似,InIRA 利用双天线干涉测量获取高精度的地面对波干涉相位,结合波形跟踪及合成孔径使得 InIRA 可在 $35 \sim 40 \text{ km}$ 的幅宽范围内以 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的分辨率进行观测^[19],从而有效避免刈幅内采样时间的不一致,获取高质量水体 2 维观测数据。迄今为止,InIRA 已经在轨运行 900 余天,成功获取了陆地和海洋的观测数据,为进一步提高大型湖泊的水位反演精度和实现对中小湖泊的水位变化监测提供了重要支撑。

① 国家自然科学基金(41871256)和国家重点研发计划(2016YFB0501501)资助项目。

② 男,1996 年生,硕士生;研究方向:微波遥感;E-mail: chenjaming@aircas.ac.cn

③ 通信作者,E-mail: liaojj@radi.ac.cn

(收稿日期:2019-12-12)

目前关于 InIRA 数据用于内陆水体的研究还很少^[20],且由于 InIRA 仅为实验数据,数据的系统统计时延迟、系统信号延迟均未进行改正,这对水位反演的精度影响极大,达到了米级的偏差^[21],因此必须进行系统延迟改正来提高数据的测量精度。为此,本文基于有限的 InIRA 数据,提出了一种大气路径延迟改正和系统延迟改正的方法。利用该方法提高 InIRA 数据的测量精度,并通过青海湖的实测水位,验证及评价本文所提出方法的可靠性。

1 研究区与数据

1.1 研究区

为了使所求解的 InIRA 系统延迟改正量具有足

够的代表性,本文选择了青藏高原地区 16 个具有不同特征的湖泊用以求解系统延迟改正量。所选湖泊位于中国青藏高原腹地,该区域气候寒冷干燥,年平均降水量低至 247.3 mm^[22],由于降水稀少,该地区的冰川为许多湖泊提供了重要的水源,湖泊水位在短时间内不会出现较大的变化。

图 1 显示了所选的 16 个湖泊的地理位置、形态以及周围的环境。表 1 列出了所选湖泊的中心坐标、面积。所选取的湖泊具有如下特征:湖泊形态各不相同,周边环境多为荒原、草地和高山,具有一定的地形起伏;所有湖泊在冬季都有结冰现象,冰期时间一般为当年 11 月至次年 4 月;湖泊受人类干扰影响较小;Cryosat-2 过境时获取数据的工作模式均为 SARin(synthetic aperture interferometric)模式。

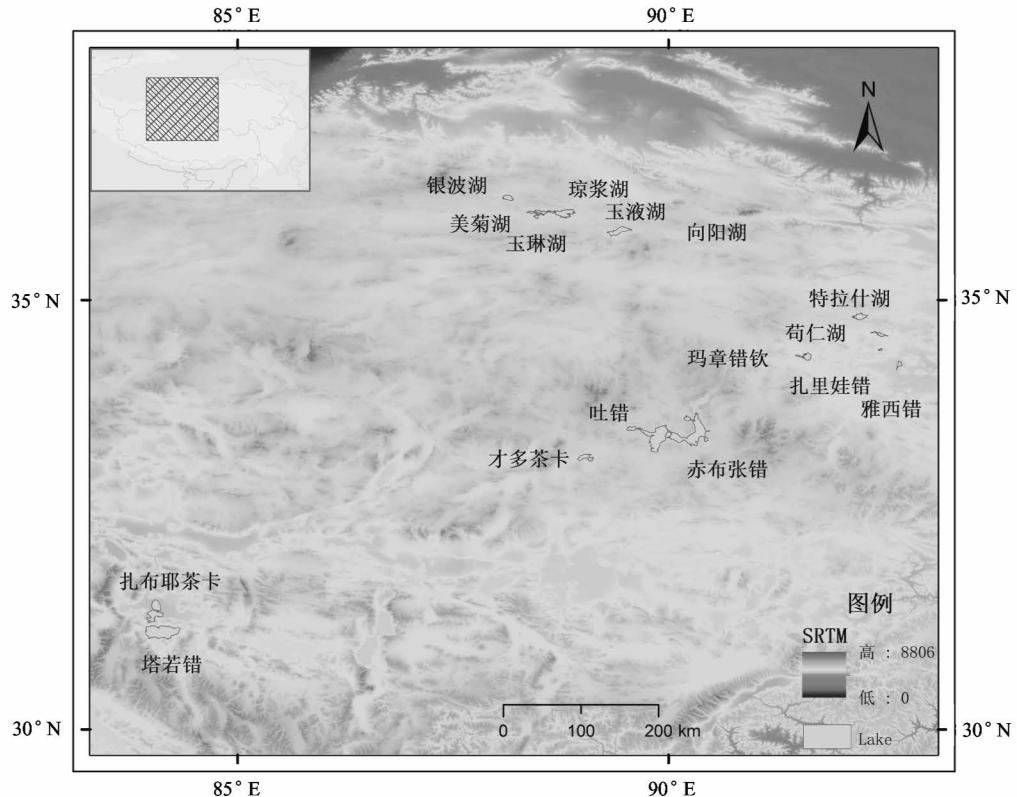


图 1 研究区地理位置、形态及周边地形

1.2 湖泊掩模数据

本文以 2014 年青藏高原湖泊子数据集^[23]为掩模数据。该数据集全面、准确地展现了 1 171 个青藏高原 1 km^2 以上湖泊的最新状态,包括名称、位

置、面积和形态等特征,通过解译 2014 年获取的 136 幅中国高分 1 号宽视场(wide field of view, WFV)影像和 11 幅 Landsat8 陆地成像仪(operation land imager, OLI)影像获得。

表 1 InIRA 过境所选 16 个湖泊数据统计

序号	中文名称	英文名称	中心坐标	湖泊面积(km^2)
1	玛章错钦	Mazhangcuoqin	91.59, 34.34	73.44
2	特拉什湖	Telashi Lake	92.22, 34.81	73.65
3	苟仁湖	Gouren Lake	92.45, 34.60	23.92
4	扎里娃错	Zhaliwa Co	92.46, 34.42	7.09
5	雅西错	Yaxi Co	92.73, 34.38	19.30
6	银波湖	Yinbo Lake	88.14, 36.19	30.40
7	琼浆湖	Qiongjiang Lake	88.52, 36.02	18.20
8	美菊湖	Meiju Lake	88.41, 36.02	13.40
9	玉琳湖	Yulin Lake	88.47, 35.97	12.82
10	玉液湖	Yuye Lake	88.78, 36.01	82.30
11	向阳湖	Xiangyang Lake	89.42, 35.80	97.20
12	吐错	Tu Co	89.86, 33.40	428.00
13	赤布张错	Chibzhang Co	90.27, 33.45	476.80
14	才多茶卡	Cedo Caka	89.04, 33.17	38.50
15	扎布耶茶卡	Chabyer Co	84.04, 31.38	235.00
16	塔若错	Taro Co	84.12, 31.14	484.65

1.3 天宫二号 InIRA 数据

InIRA 是国际上第 1 个实现宽刈幅 3 维成像的微波高度计, 它是为了评估近星下点成像和干涉测量技术在测量海面高度、水体范围和陆地高度的性能而设计的。仪器的主要参数如表 2 所示, InIRA 突破了传统星载高度计只能沿星下点方向测量、观测刈幅只有数千米的局限, 与传统星载雷达高度计的高度测量所不同的是, InIRA 采用了偏离星下点 $1 \sim 8^\circ$ 的小入射角、短基线的干涉测量方式, 以获取具有高相干的干涉相位, 并通过模型^[24]进行 3 维地

形的反演; 干涉波束同时也为干涉基线倾角的测量提供了帮助^[17], 以弥补卫星姿态测量能力难以满足宽刈幅范围内高精度测高要求的不足, 这对湖泊水位高精度反演具有重要意义。

InIRA 数据可在中国载人航天工程空间应用数据推广服务平台 (<http://www.msadc.cn/sy/>) 中申请下载, 有 4 种级别的数据可供下载, 分别为 0 级、1 级、2 级和 4 级。天宫二号空间实验站常有其他观测任务, 因此 InIRA 不能持续工作^[24], 故在内陆水体观测的数据覆盖区域有限, 无法进行水位时间序列的研究。本文选取了 InIRA 过境的 16 个青藏高原湖泊 1 级数据进行系统延迟改正, 同时为保证所求系统延迟量的稳定性, 所选过境的 1 级数据均为同一天的数据; 并选取青海湖 2017–2018 年的数据与实测数据进行对比验证。

1.4 Cryosat-2 SARin 数据

Cryosat-2 于 2010 年 4 月 8 日发射, 主要用于监测海洋冰盖和大陆冰盖, 所搭载的干涉合成孔径雷达高度计 (SAR interferometer radar altimeter, SIRAL) 是世界上第 1 台采用延迟多普勒技术的星载高度计^[25], 根据不同的地理模式可在 3 种不同的测量模式上工作^[26], 分别为 LRM (low rate mode)、SAR

表 2 InIRA 主要参数列表

参数名称	参数值
在轨高度(km)	400
频率(GHz)	13.58
海洋测高精度(cm)	20
干涉基线(m)	2.3
干涉基线滚动角($^\circ$)	5
视角($^\circ$)	2.5 ~ 7.5
下视方向	右视
覆盖范围	42°S ~ 42°N
刈幅宽度(km)	35
空间分辨率(海洋/陆地)(m)	10/200

(synthetic aperture radar) 和 SARin 模式, 本文中所采用的是青藏高原地区的 SARin Baseline C 版本的 1b 级与 2 级数据 (<ftp://science-pds.cryosat.esa.int>)。Level 1b 数据中提供了 SARin 20 Hz 波形, 与 SAR 波形类似。SARin 波形的前缘更加陡峭、后缘衰减也更快, 这使得多波峰波形里包含多个可区分的表面高度^[25], 同时提供了通过各类算法得到的各

星下点数据的对流层、电离层、固体潮、极潮等改正; Level 2 级数据中提供了由 Wingham/Wallis 算法计算的高度, 同时通过干涉处理重新定位了观测点位置^[27], 这对于偏离星下点距离改正^[28]和筛选湖泊过境数据点具有重要意义。图 2 展示了部分本文所选取的青藏高原地区湖泊的 InIRA 及 Cryosat-2 数据的覆盖情况及周边环境图。

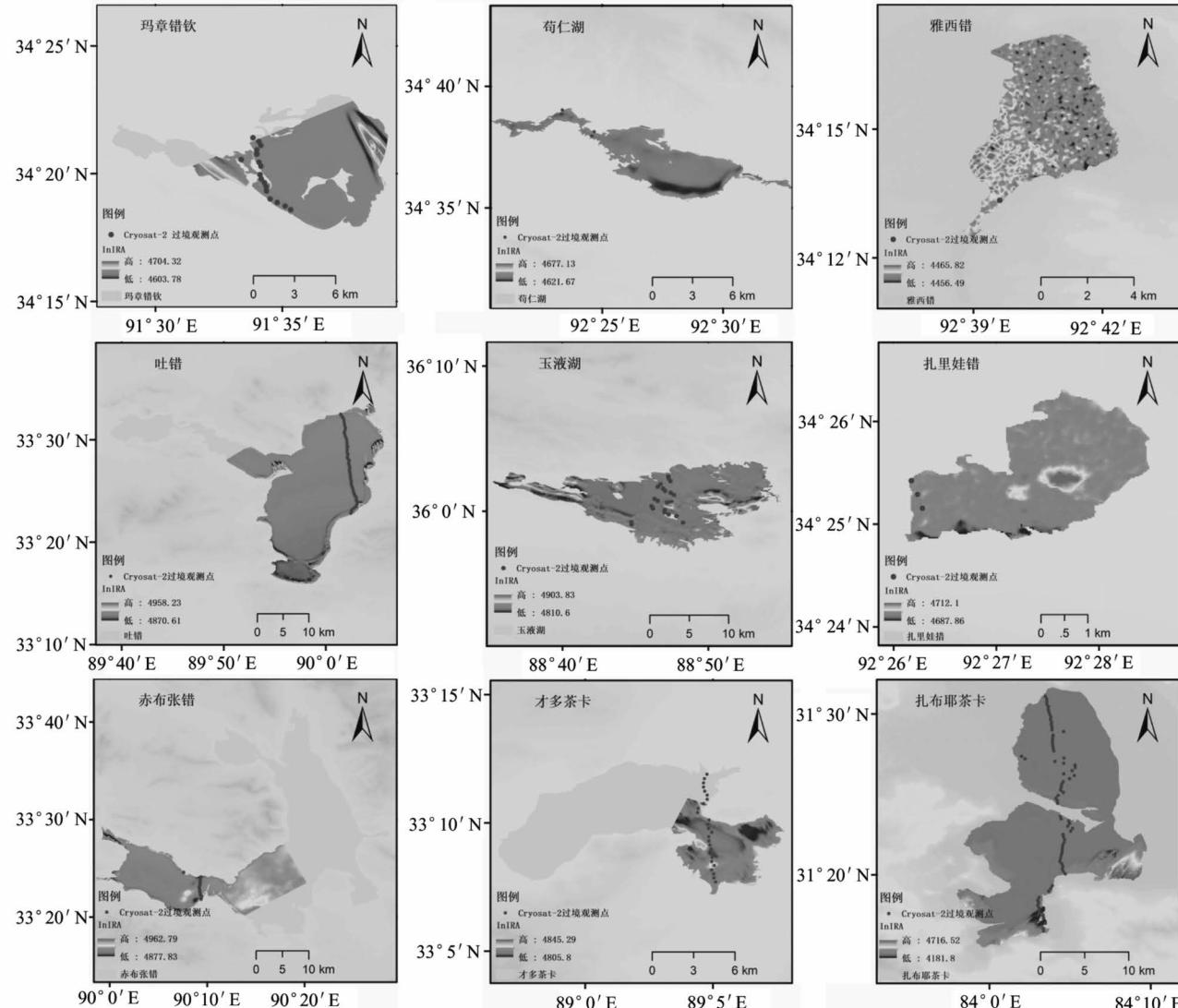


图 2 研究区部分湖泊 InIRA 及 Cryosat-2 数据覆盖图

1.5 实测数据

青海湖实测水位数据通过青海省水文水资源勘测局获得, 是由青海湖东南部下社站(36°35'16.0"E / 100°29'28.4"E)水位计采集的非冰期水位数据^[11]。该实测水位数据以 1985 中国国家黄海高程

基准为参考, 而本文反演的湖泊水位数据是以大地水准面为参考基准, 故本文采用翟振和等人^[29]提出的方法将黄海高程参考面转换至 EGM2008 大地水准面。

2 基于 Cryosat-2 数据的 InIRA 系统 延迟改正估算

2.1 地球物理改正

InIRA 数据在用于监测海洋或是内陆水体时,必须要对湿对流层、干对流层、电离层、固体潮、极潮、海潮及大地水准面等进行延迟改正。由于所发布的 InIRA 数据中没有进行地球物理改正,必须通过延迟改正模型进行地球物理改正,采用的各延迟

改正模型以及相应的延迟改正范围见表 3。采用的大地水准面模型为地球引力模型 2008(EGM2008)^[30]。

为进一步提高 InIRA 数据反演湖泊水位的精度,传感器本身的延迟误差需进行改正,如系统计时延迟、系统信号延迟等均会对高度计测高精度带来影响,而 InIRA 的 L1b 级数据并未进行相应的系统延迟改正,因此为获取更精确的湖泊水位需要进行 InIRA 系统延迟改正的估测,在 2.2 节中提出了基于 Cryosat-2 SARin 参考水位的 InIRA 系统延迟改正估算方法。

表 3 地球物理改正模型统计

延迟改正量	改正模型	改正范围(cm)
干对流层	欧洲中期天气预报中心模型 ^[31]	1.7 ~ 2.5
湿对流层	欧洲中期天气预报中心模型 ^[31]	0 ~ 50
电离层	全球电离层图(GIM) ^[32]	6 ~ 12
固体潮	Cartwright 模型 ^[33]	-30 ~ 30
极潮	历史站点数据 ^[34]	-2 ~ 2
海潮	GOT00.2 模型 ^[35]	-2 ~ 2

2.2 InIRA 系统延迟改正

InIRA 在内陆水体获取的观测数据有限,过境的内陆水体大都在青藏高原腹地,没有实测水位数据可以用于 InIRA 系统的延迟改正。Cryosat-2 SARin 数据在青藏高原地区已经有大量的研究,即使对中小型湖泊的水位反演精度也较高^[12,14]。故在无实测水位的情况下可采用 Cryosat-2 SARin 数据反演水位作为参考水位来替代实测水位对 InIRA 进行系统延迟改正。Cryosat-2 SARin 数据采用双天线干涉测量方式获取,并通过干涉处理获取观测点的水位信息,这与 InIRA 数据获取方式类似。此外由于 Cryosat-2 漂移轨道及 92°的近极地轨道的特性,使得 Cryosat-2 数据可以过境大部分 InIRA 数据过境的青藏高原区域湖泊。为此,本文选择 Cryosat-2 SARin 数据反演的高精度水位作为参考水位来估算 InIRA 系统延迟改正。主要选取 InIRA 数据过境 30 d 范围内的 Cryosat-2 数据进行处理获取高精度湖泊水位,并将此水位视为对应湖泊的精确水位对 InIRA 数据进行标定,从而估测 InIRA 系统的延迟。选取的 16 个湖泊的 Cryosat-2 数据以及 InIRA 数据

的详情如表 4 所示。

2.2.1 Cryosat-2 湖泊水位提取

对于 Cryosat-2 SARin 数据水位的提取,主要是通过处理 1b 级数据的波形数据获取精确的水面回波位置,其湖泊水位的计算公式如下:

$$H_{\text{Cryosat-2}} = H_{\text{alt}} - \left(\frac{c}{2} WD + R_{\text{retrack}} + R_{\text{geo}} \right) - N_{\text{geoid}} \quad (1)$$

其中, H_{alt} 为卫星质心至参考椭球的高度; N_{geoid} 为大地水准面至参考椭球的改正距离,本文选用 1 min 的 EGM2008 格网数据; c 为光速; WD 为窗口延迟; R_{geo} 为地球物理改正,包括电离层、干/湿对流层、固体潮、极潮和海潮改正,均可由 1b 数据读取; R_{retrack} 为重跟踪改正,本文采用 ImpMWapp^[12] 重跟踪算法。

由于研究区过境湖泊面积较小,为最大程度利用 Cryosat-2 SARin 数据过境点数,本文选取湖泊过境点时未采用星下点坐标,而是采用 Cryosat-2 SARin 2 级数据干涉重定后的坐标点,这样可以更精确地反映高度计实际观测点的地理位置。此外,为精

确获取 Cryosat-2 湖泊水位,还需进行如下处理步骤:(1) 利用 Cryosat-2 SARin 2 级数据进行偏离星下点距离改正^[28],消除实际观测点与星下点不在同一位置而产生的距离误差;(2) 对过境轨迹采用 1.5 倍中误差判断方法去除明显异常的水位值;(3) 利用高斯柯西误差混合模型^[36]描述单点水位噪声项,采用最大似然估计法求解湖泊过境沿轨均水位。

2.2.2 InIRA 湖泊水位提取

本节为 InIRA 未经系统延迟改正的湖泊水位反演方法,具体计算方法如下。

(1) 为避免 Cryosat-2 SARin 数据与 InIRA 数据的观测点坐标相差过大,本文只选取 Cryosat-2 SARin 2 级数据干涉重定后地面观测点的 150 m 范围内的所有 InIRA 过境数据值(沿轨数据)。

(2) 由于 InIRA 数据在内陆水体观测的过程中受数据质量的制约会出现误差,因此需对所获取的数据按照如下规则进行筛选:InIRA 过境湖泊水位数据点大于 10 000;过境数据点需离岸大于 300 m;后向散射系数大于 0;像素点幅度值大于 4 500。

(3) 对于每景 InIRA 数据,沿轨数据的所有像素值按式(2)计算,得到未经系统延迟改正的湖泊沿轨单点水位。

$$H = H_{alt} - (H_{range} + R_{geo}) - H_{system} - N_{geoid} \quad (2)$$

式中所有参数均与式(1)中含义相同,其中 H_{system} 为 InIRA 系统延迟估计量,在本文中设为 0; H_{range} 为传感器与星下点之间的距离; InIRA 数据的地球物理改正量 R_{geo} , 需根据 2.1 节中模型计算得到。

(4) 对每个湖泊对应的沿轨单点水位数据进行高斯均值滤波,减弱陆地回波信号对 InIRA 数据造成的干扰。

(5) 对过境沿轨数据采用 1.5 倍中误差异常水位值去除法,迭代去除超过 1.5 倍中误差范围的湖泊单点水位,直到得到没有超过 1.5 倍中误差的单点水位。

(6) 利用高斯柯西误差混合模型描述单点水位噪声项,采用最大似然估计法求解 InIRA 湖泊过境沿轨均水位。

表 4 InIRA 数据及 Cryosat-2 数据过境湖泊的详细信息

湖泊名称	InIRA 获取日期	Cryosat-2 获取日期	Cryosat-2 过境点数
玛章错钦	2016.09.23	2016.09.26	10
特拉什湖	2016.09.23	2016.10.23	1
苟仁湖	2016.09.23	2016.09.24	2
扎里娃错	2016.09.23	2016.09.24	4
雅西错	2016.09.23	2016.09.26	1
银波湖	2016.09.23	2016.09.05	14
琼浆湖	2016.09.23	2016.10.06	3
美菊湖	2016.09.23	2016.10.06	2
玉琳湖	2016.09.23	2016.10.06	8
玉液湖	2016.09.23	2016.10.02	18
向阳湖	2016.09.23	2016.10.04	4
吐错	2016.09.23	2016.09.30	59
赤布张错	2016.09.23	2016.09.03	12
才多茶卡	2016.09.23	2016.10.02	12
扎布耶错	2016.09.23	2016.10.14	49
塔若错	2016.09.23	2016.10.14	24

2.2.3 InIRA 系统延迟改正量估测

通过上述计算得到 Cryosat-2 SARin 数据参考

水位及 InIRA 数据沿轨水位,从而可以估算 InIRA 系统延迟改正。

Cryosat-2 SARin 数据在经过地球物理改正、重跟踪改正、偏离星下点距离改正后可以获取湖泊的高精度水位,在无实测水位的情况下可以采用 Cryosat-2 SARin 数据为 InIRA 数据进行系统延迟改正。此外,研究区域气候干燥,降水量非常低,在短时间内湖泊水位变化较小。因此,InIRA 数据在进行地球物理改正、高斯滤波、异常水位去除等处理后,所反演的湖泊沿轨水位与 Cryosat-2 参考水位在理论上的差值即为系统延迟改正。系统延迟改正估算的流程图如图 3 所示,具体处理过程如下。

- (1) 获取研究区 16 个湖泊过境时间差为 30 d 之内的 Cryosat-2 参考水位以及未经系统延迟改正的 InIRA 数据的沿轨水位。
- (2) 计算这 16 个湖泊范围内的 Cryosat-2 参考水位与 InIRA 沿轨均水位的差值。
- (3) 为减弱不同湖泊计算得到的差值水位之间的误差,采用高斯柯西误差混合模型来描述差值水位的噪声项,可以有效避免异常差值水位对系统延迟改正的干扰,采用最大似然估计法求解 InIRA 系统延迟改正值。

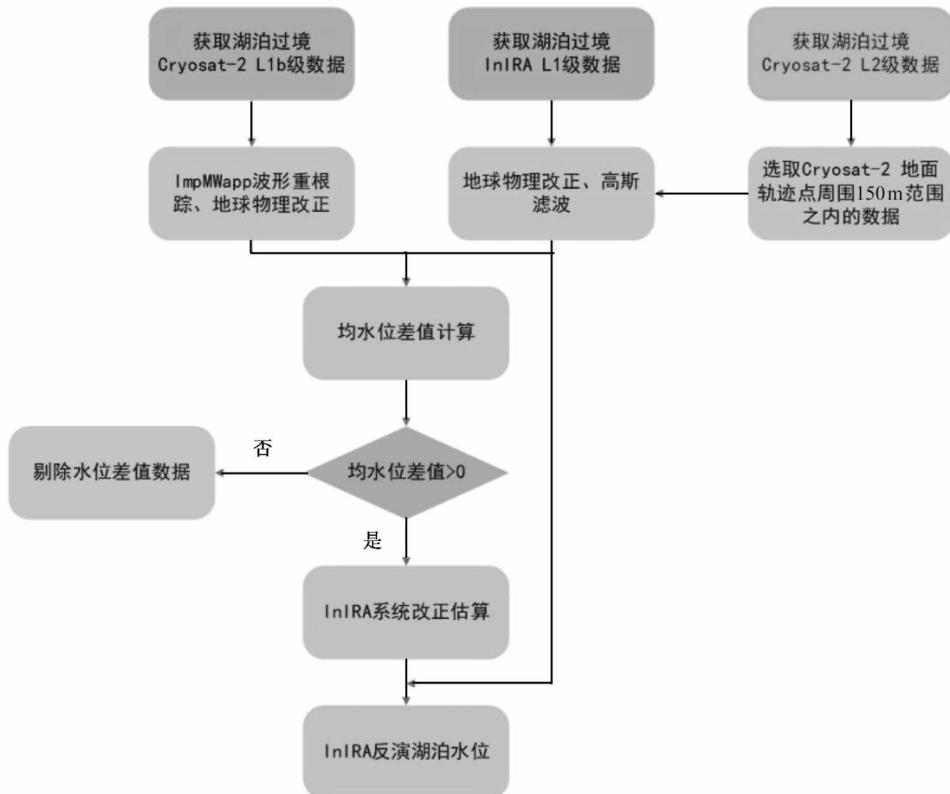


图 3 InIRA 湖泊水位反演流程图

3 结果与讨论

3.1 InIRA 系统延迟改正

按照 2.2 节中所述方法分别利用过境的 InIRA 沿轨数据及 Cryosat-2 数据对所选 16 个湖泊的绝对水位进行估算,得到 InIRA 和 Cryosat-2 SARin 数据反演的 16 个湖泊的绝对水位差值(表 5)。

由表 5 可见,InIRA 和 Cryosat-2 在同一湖泊过

境范围内反演的湖泊绝对水位差值主要集中在 4.5 m 附近。但对于琼浆湖、美菊湖、玉琳湖等湖泊,该绝对水位差值表现为负值,这主要是由于上述出现水位差值异常的湖泊所覆盖的 InIRA 数据受陆地区域的影响,陆地表面对 InIRA 信号造成较大污染,产生大量异常观测,如 InIRA 过境银波湖区域存在大量的浅滩和低缓岗丘,使回波无法获取正确的水体信息,导致无法获取有效的湖泊水位数据。

表 5 InIRA 和 Cryosat-2 湖泊绝对水位差值

湖泊名称	水位差值 * (m)	时间差(d)
玛章错钦	4.525	3
特拉什湖	4.428	30
苟仁湖	4.261	1
扎里娃错	4.187	1
雅西错	5.695	3
银波湖	-2.644	18
琼浆湖	-6.130	13
美菊湖	-7.196	13
玉琳湖	-7.133	13
玉液湖	4.794	9
向阳湖	-1.293	11
吐错	5.110	7
赤布张错	4.970	20
才多茶卡	4.626	9
扎布耶错	0.342	21
塔若错	3.690	21

* 水位差值的计算公式为 $\Delta H = H_{Cryosat-2} - H_{InIRA}$

为获取稳定的 InIRA 系统延迟改正,本文进行 InIRA 数据的系统偏差估算时,剔除上述绝对水位差值小于 0 的湖泊数据,将剩下的绝对水位差值采用高斯柯西误差混合分布模型进行水位差的稳态均值计算,所得结果为 4.6287 m,此值即为 InIRA 系统

延迟改正的估算量。

3.2 青海湖湖泊水位验证

为验证本文提出的 InIRA 系统延迟改正估算方法的有效性,将加入系统延迟改正量后反演的 2017–2018 年青海湖过境水位与下社水文站实测水位进行比较,以此来间接验证本文方法的有效性。按照 2.2.2 节中水位提取方法计算得到 2017–2018 年内 InIRA 过境青海湖沿轨均水位,并与下社站实测水位进行比较。不同时间段青海湖 InIRA 反演水位与实测水位比较结果如图 4 所示,沿轨水位数据已经过高斯滤波、中误差去除等方法进行了噪声去除,其中用于计算 InIRA 沿轨均水位数据的水位标准差及计算点数统计如表 6 所示。

从图 4 中可见在青海湖加入系统延迟改正后的 InIRA 沿轨均水位与实测水位的拟合程度较好,除图中的 4 个异常水位外,InIRA 反演的青海湖沿轨均水位与实测水位的差值的绝对值在 50 cm 以下。同时水位差值的绝对值较小的数据相应的单点水位标准差均在 1 m 以下,沿轨均水位参与计算的点数也越多,局部单点水位的波动较小,能够获取较稳定的湖泊水位。为更直观地反映本文系统延迟改正计算的有效性,对 InIRA 数据反演青海湖湖泊水位进行精度评估,计算 InIRA 沿轨均水位及实测水位的

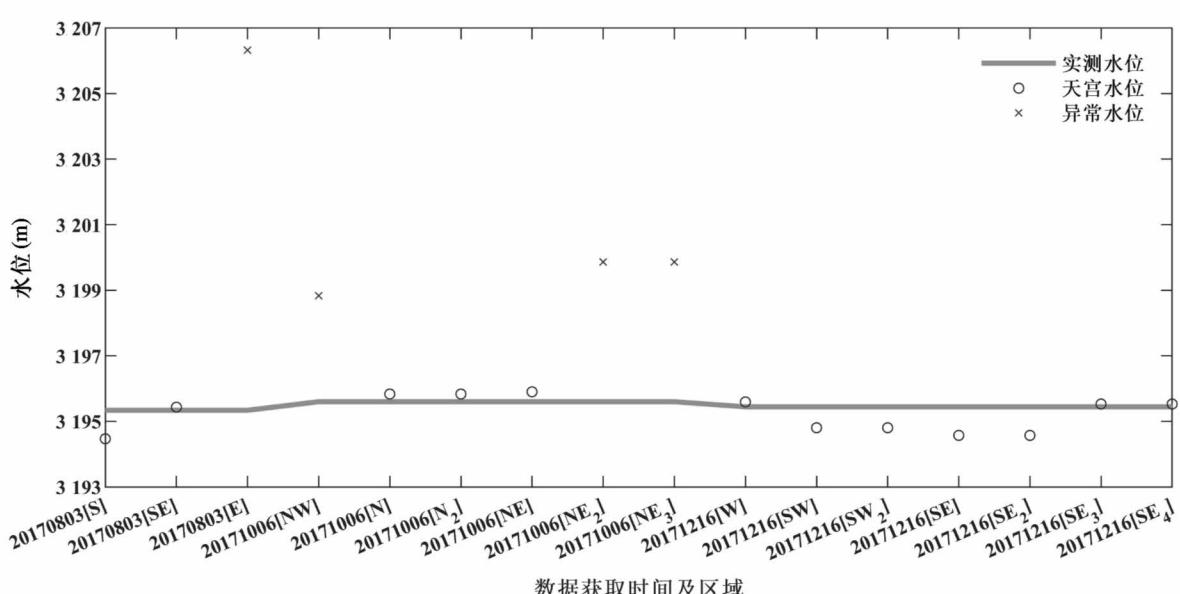


图 4 青海湖 InIRA 沿轨均水位与实测水位比较图

表 6 InIRA 过境青海湖水位与实测水位差值

InIRA 过境日期及区域 *	沿轨均水位 计算点数	单点水位 标准偏差(m)
20170803 [S]	331 408	0.4304
20170803 [SE]	448 134	1.3567
20170803 [E]	3 482	3.9129
20171006 [NW]	9 628	1.2112
20171006 [N]	257 054	1.3280
20171006 [N_2]	257 054	1.3280
20171006 [NE]	107 781	2.3693
20171006 [NE_2]	107 378	2.5431
20171006 [NE_3]	107 378	2.5431
20171216 [W]	36 429	0.7635
20171216 [SW]	579 022	0.6590
20171216 [SW_2]	579 022	0.6590
20171216 [SE]	482 552	0.5459
20171216 [SE_2]	482 552	0.5459
20171216 [SE_3]	133 769	0.5651
20171216 [SE_4]	133 769	0.5651

* InIRA 数据同一天过境青海湖的不同区域,通过过境区域方向进行区分,同一方向数据则通过方向后的数字区分。

无偏均方根误差 ubRMSE,计算方法见式(3)。InIRA 数据反演青海湖湖泊水位的无偏均方根误差为 0.3327 m。结果表明加入本文的系统延迟改正后, InIRA 数据反演湖泊水位的精度有显著提高,间接表明本文提出的系统延迟改正方法的有效性。

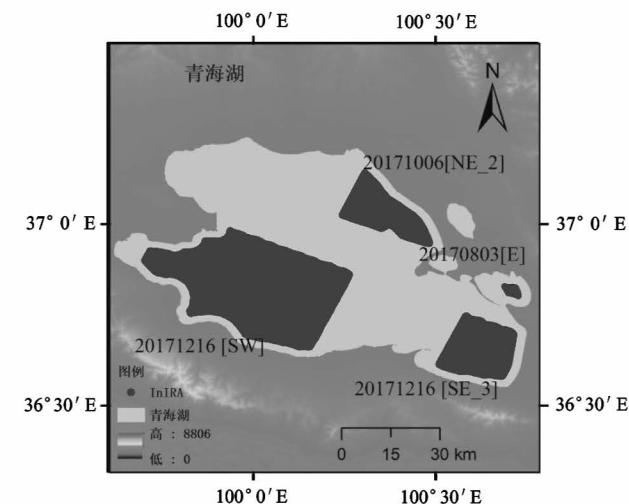
$ubRMSE =$

$$\sqrt{E\{(WL - E(WL)) - (insitu - E(insitu))\}^2} \quad (3)$$

其中, $E[*]$ 为期望算子, WL 为通过 InIRA 反演的湖泊水位, $insitu$ 为湖泊实测水位。

3.3 InIRA 反演湖泊水位性能分析

为进一步分析 InIRA 数据在湖泊水位反演方面的性能,选取 20170803 [E]、20171006 [NE_2]、20171216 [SW]、20171216 [SE_3] 4 景数据进行分析,其中前 2 景数据得到的青海湖沿轨均水位与实测水位的差值在米级,后 2 景数据的沿轨均水位与实测水位吻合程度较高,图 5 及图 6 分别展示了上述 4 景 InIRA 过境数据覆盖区域及沿轨单点水位的分布情况。

**图 5 部分 InIRA 过境数据覆盖区域**

从中可以观察到, InIRA 数据过境点数越多, 单点湖泊水位越稳定; 处于湖岸边 InIRA 数据, 如 20170803 [E]、20171006 [NE_2] 局部数据非常不稳定, 有效数据点数较少, 所获取的单点水位最大波动可达 10 m, 这表明受到复杂地形的陆地回波的影响, 可能会导致水面信号未进入系统跟踪窗口内或被噪声信号所淹没, 造成局部单点水位的测量出现严重错误。而对于 20171216 [SW]、20171216 [SE_3] 2 景数据, 其大量数据处于湖中心区域, 参与沿轨水位计算的点数非常丰富, 单点水位标准偏差较小, 数据观测质量稳定, 有利于获取准确的相对水位。因此与传统高度计需选择优质波形反演水位相类似, InIRA 反演水位时需选取过境点数丰富、单点水位标准偏差小的数据。此外, 上述分析也在一定程度上反映了 InIRA 数据的稳定性存在问题。

4 结 论

本文针对 InIRA 数据特点, 提出了基于 Cryosat-2 SARin 参考水位的 InIRA 系统延迟改正量估算方法。该方法的核心在于通过 ImpMWapp 算法获取得到一种稳定的高精度湖泊水位, 同时筛选出 Cryosat-2 数据的干涉重定后的观测点 150 m 范围的 InIRA 水位数据, 再通过两者的水位差来反映 InIRA 系统延迟改正量。通过有实测水位的青海湖来间接验证所获取的 InIRA 系统延迟改正的准确性。

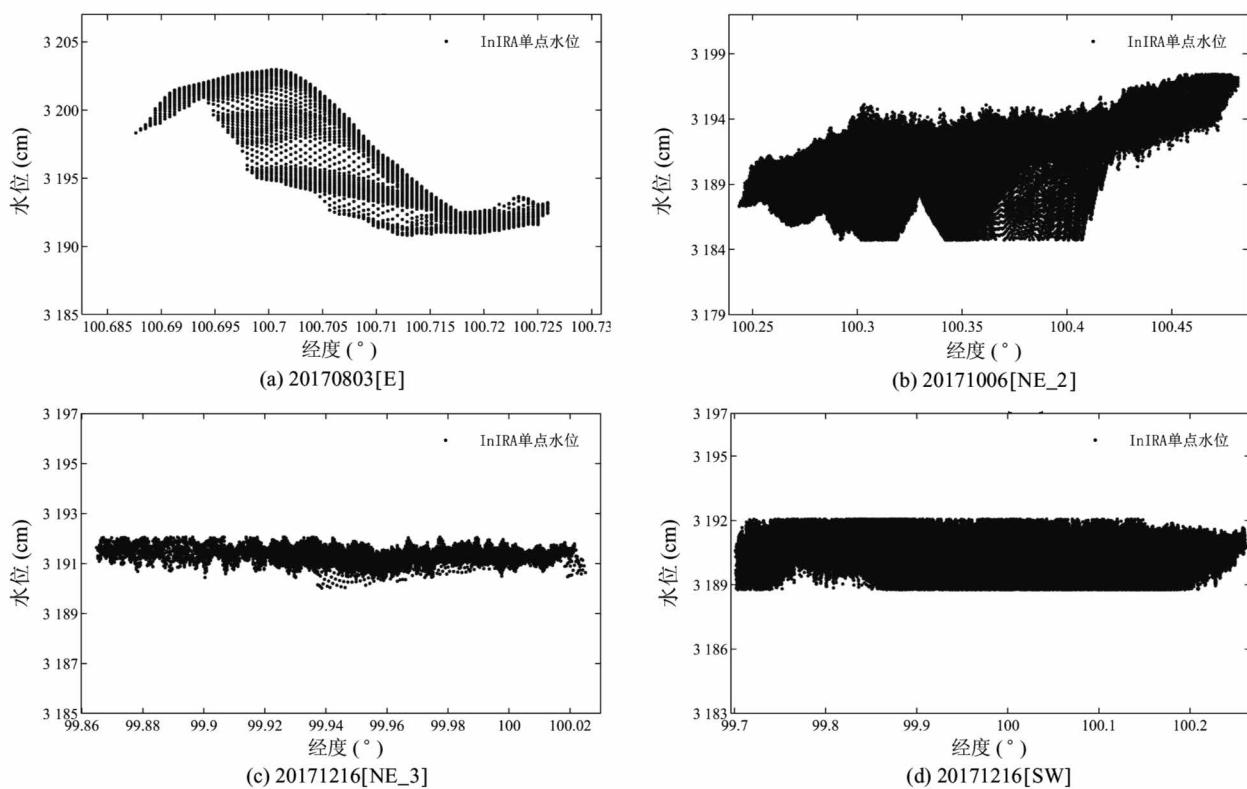


图 6 单点水位分布图

验证结果显示,2017–2018 年间 InIRA 反演青海湖湖泊水位精度为 0.3327 m,表明本文获取的 InIRA 系统延迟改正精度良好,这对于 InIRA 用于湖泊水位监测有着重要的意义。由于 InIRA 数据具有 3 维测高的能力,能够获取覆盖湖区范围的水位信息的空间分布图,对单点水位反演的精度更加关键。为进一步分析 InIRA 数据的精度,本文分析了若干湖泊的 InIRA 数据,发现同一湖泊不同区域的 InIRA 影像数据反演得到的水位有时存在明显差异,部分影像中不同像素点对应的单点水位的标准偏差较大,这从一定程度上反映了 InIRA 数据的稳定性存在一定问题。通过本文方法进行了 InIRA 数据的系统延迟改正,在一定程度上可提高 InIRA 数据反演湖泊水位的精度,但要从根本上提升 3 维成像高度计单点水位反演的精度,还需要依赖高度计本身设备性能的稳定,因此,未来的 3 维成像高度计需要全面提升其 3 维测高的性能。

同时,由于系统计时误差会随着时间的推移以及地域的不同而产生一定的变化,因此需要针对不同时间段、不同区域对系统进行时延校正,从而提高

水位反演的精度,这将在进一步研究中开展相关工作。

参考文献

- [1] Lerman A. Physics and Chemistry of Lakes [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995
- [2] Crétaux J F, Abarca-del-Río R, Bergé-Nguyen M, et al. Lake volume monitoring from space [J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(2):269-305
- [3] Gao Q, Makhoul E, Escorihuela M J, et al. Analysis of retrackers' performances and water level retrieval over the Ebro river basin using Sentinel-3 [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 718
- [4] Gleick P H. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st Century [J]. *Science*, 2003, 302 (5650):1524-1528
- [5] Bogning S, Frappart F, Blarel F, et al. Monitoring water levels and discharges using radar altimetry in an ungauged river basin: the case of the Ogooué [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2):1-18
- [6] Frappart F, Calmant S, Cauhopé M, et al. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation

- over the Amazon basin [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 252-264
- [7] Kleinherenbrink M, Ditmar P G, Lindenbergh R C. Retracking Cryosat data in the SARIn mode and robust lake level extraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 38-50
- [8] Morris C S, Gill S K. Evaluation of the TOPEX/POSEIDON altimeter system over the Great Lakes[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1994, 99(C12): 24527-24539
- [9] Zhu W B, Jia S F, Lv A F. Monitoring the fluctuation of lake Qinghai using multi-source remote sensing data[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11):10457-10482
- [10] Lee H, Shum C K, Tseng K H, et al. Present-day lake level variation from enisat altimetry over the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: links with precipitation and temperature[J]. *Terrestrial Atmospheric Oceanic Sciences*, 2011, 22(2):169-175
- [11] Liao J, Gao L, Wang X. Numerical simulation and forecasting of water level for Qinghai Lake using multi-altimeter data between 2002 and 2012[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(2):609-622
- [12] Xue H, Liao J J, Zhao L F. A modified empirical retracker for lake level estimation using Cryosat-2 SARIn data[J]. *Water*, 2018,10(11): 1584
- [13] Baup F, Frappart F, Maubant J. Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 10(12): 15731-15770
- [14] Kleinherenbrink M, Lindenbergh R C, Ditmar P G. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking Cryosat SARIn waveforms [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 521: 119-131
- [15] Jiang L, Nielsen K, Andersen O B, et al. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544:109-124
- [16] Zhang Y H, Jiang J S, Zhang H Y, et al. Spaceborne imaging altimeter for topographic mapping[C] //Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 2000: 2349-2351
- [17] 徐永生, 高乐, 张云华. 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[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1):84-94
- [18] Fu L, Alsdorf D, Rodriguez E, et al. The SWOT (surface water and ocean topography) mission: spaceborne radar interferometry for oceanographic and hydrological applications[C] // Proceedings of the OCEANOBS'09 Conference, Venice, Italy, 2009:21-25
- [19] Dong X, Zhang Y H, Zhai W S. Design and algorithms of the Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter processor[C] // Proceedings of 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring(PIERS), St Petersburg, Russia, 2017: 3802-3803
- [20] Li S, Tan H, Liu Z, et al. Mapping high mountain lakes using space-borne near-nadir SAR observations[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 2072-4292
- [21] Liao J, Xue H. Estimation of lake level using Tiangong-2 InIRA data[C] // Proceedings of the Tiangong-2 Remote Sensing Application Conference, Beijing, China, 2018: 333-343
- [22] Gao Q, Li Y, Wan Y, et al. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet[J]. *Climatic Change*, 2009, 97(3-4): 515-528
- [23] Wan W, Long D, Hong Y, et al. A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014 [J]. *Scientific Data*, 2016, 3: 160039
- [24] Zhang Y H, Shi X J, Wang H J, et al. Interferometric imaging radar altimeter on board Chinese Tiangong-2 space laboratory[C] // Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Kyoto, Japan, 2018:851-853
- [25] Raney R K. The delay/doppler radar altimeter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1578-1588
- [26] Wingham D J, Francis C R, Baker S, et al. CryoSat: a mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(4):841-871
- [27] Bouzinac C. CryoSat-2 product handbook [EB/OL]. https://earth.esa.int/documents/10174/125272/CryoSat-Product_Handbook:ESA, 2018
- [28] Armitage T W K, Davidson M W J. Using the interferometric capabilities of the ESA CryoSat-2 mission to improve the accuracy of sea ice freeboard retrievals [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,

2014, 52(1):529-536

- [29] 翟振和, 魏子卿, 吴富梅, 等. 利用 EGM2008 位模型计算中国高程基准与大地水准面间的垂直偏差[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(4):116-118
- [30] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117: 1-38
- [31] Boehm J, Kouba J, Schuh H. Forecast Vienna Mapping Functions 1 for real-time analysis of space geodetic observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(5):397-401
- [32] Scharroo R, Smith W H F. A global positioning system-based climatology for the total electron content in the ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research Space Phys-*
- ics, 2010, 115(A10): 1-16
- [33] Cartwright D E, Edden A C. Corrected tables of Tidal Harmonics[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1973, 33(3):253-264
- [34] Wahr, John M. Deformation induced by polar motion [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1985, 90(B11):9363-9368
- [35] Ray R D, Ponte R M. Barometric tides from ECMWF operational analyses[J]. *Annales Geophysicae*, 2003, 21: 1897-1910
- [36] Nielsen K, Stenseng L, Andersen O B, et al. Validation of CryoSat-2 SAR mode based lake levels[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 162-17

An estimation method of systemic delay correction for Tiangong-2 InIRA data

Chen Jiaming^{* **}, Liao Jingjuan^{*}(* Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

(** University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

Interferometric image radar altimeter (InIRA) with high-precision, high-resolution and wide-swath has a broad application prospect in detecting marine and terrestrial hydrological changes. However, for lake level estimation, due to the systemic delay of InIRA, the bias of lake level estimation could reach meters level. So in this work, based on the feature of the InIRA data, an estimation method of systemic delay correction for InIRA data using Cryosat-2 data as a reference is proposed. The reliable systemic delay in some areas is obtained through this method, and the systemic delay is corrected to 4.6287 m in the study area. The accuracy of Qinghai Lake level estimation is 0.3327 m when the systemic delay is corrected, indicating the reliability of this systemic delay correction and the potential of estimating lake level using InIRA data.

Key words: Tiangong-2, interferometric image radar altimeter (InIRA), Cryosat-2, lake level, systemic delay correction