# 一种合成孔径雷达高度计定标方法

谌 华\*<sup>123</sup> 郭 伟<sup>12</sup> 杨双宝<sup>12</sup> 许 可<sup>12</sup> 徐曦煜<sup>12</sup> 史灵卫<sup>12</sup> 王 磊<sup>12</sup>
 <sup>1</sup>(中国科学院徽波遥感技术重点实验室 北京 100190)
 <sup>2</sup>(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)
 <sup>3</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘 要:** 合成孔径雷达高度计的关键技术特点是沿轨向的多普勒锐化和延迟距离校正技术。两者的结合使得其相 对于传统雷达高度计具有沿轨向高分辨率和显著提高测高精度的优势。在2m波高海况和2km的地面网格下, 其测高精度可以达到2cm。为了验证合成孔径雷达高度计的测高精度,在充分研究合成孔径雷达高度计测高原理 和传统雷达高度计定标方法的基础上,该文提出一种基于全球导航卫星系统(GNSS)浮标的合成孔径雷达高度计定 标方法,采用时空一致性匹配和多基线联合解算方法提高海面高度测量精度,并将该方法应用于合成孔径雷达高 度计首次机载试验中,通过对试验数据结果的处理分析,在验证合成孔径雷达高度计测高精度的同时,初步验证 了该定标方法的可行性。

关键词:合成孔径雷达高度计;波束锐化;距离校正;全球导航卫星系统浮标;定标
 中图分类号:TN953
 文献标识码:A
 文章编号:1009-5896(2017)09-2232-06
 DOI: 10.11999/JEIT161363

## A Method of Calibration of SAR Altimeter

 $\begin{array}{cccc} {\rm CHEN~Hua}^{0\,28} & {\rm GUO~Wei}^{0\,2} & {\rm YANG~Shuangbao}^{0\,2} & {\rm XU~Ke}^{0\,2} \\ & {\rm XU~Xiyu}^{0\,2} & {\rm SHI~Lingwei}^{0\,2} & {\rm WANG~Lei}^{0\,2} \end{array}$ 

<sup>(1)</sup>(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>(2)</sup> (Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>(3)</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The key invoation technology of Synthetic Aperture Radar ALtimeter (SARAL) are Doppler-beam sharppen and delay/doppler range compensation. The combination of these two technologies makes it has high along-track resolution and high precision in height measurement. On the basis of 2 m sea wave height and 2 km ground grid, the accuracy of sea surface height measured by SARAL will reach 2 cm. In order to verify the accuracy of SARAL, based on a thorough study of the SARAL height measurement principle and traditional radar altimeter calibration method, a calibration method for SARAL based on Global Navigation Satellite System (GNSS) buoy calibration is developed. The method uses temporal and spatial consistency matching and multi-baseline joint solution to improve the accuracy of sea surface height measurement, then it is applied to the first airborne test of SARAL and the first airborne flight experiment data processing. By analyzing the results of airborne flight experiment data, at the same time of validation SARAL measurement precision, the feasibility of the SARAL calibration method is preliminarily verified.

Key words: Synthetic Aperture Radar ALtimeter (SARAL); Beam sharpen; Range correction; Global Navigation Satellite System (GNSS) buoy; Calibration

## 1 引言

自从 1978 年 Seasat 海洋微波雷达高度计正式 业务运行以来,其后所有的海洋微波雷达高度计一 直采用传统脉冲有限体制的实孔径工作模式。其中 ERS1/ERS2, Envisat 和 HY-2A 雷达高度计除了执 行海洋测量任务以外,也关注海冰和极冰观测,所 以其轨道设计使得卫星可以达到南北极附近。但是 在测冰方面,由于受传统脉冲有限体制的实孔径工 作模式限制,这些业务雷达高度计的地面分辨率过 粗(2 km 左右),远远超过海冰和具有复杂地形的冰 架区域的地理特征尺度。因此,限制了高度计在这 些地区的测高精度和进一步应用。

因此,从20世纪80年代末90年代初起,从事

收稿日期:2016-12-13;改回日期:2017-05-15;网络出版:2017-06-23 \*通信作者: 谌华 e chenhua@163.com

雷达高度计工作的科技工作者一直在试图解决这个 问题。最初 Griffiths 等人将基于合成孔径处理的多 普勒锐化技术引入雷达高度计中,形成多普勒锐化 雷达高度计,但是由于锐化后无法有效抑制斑点噪 声,从而使得测高精度大幅度下降,最终导致失败。 基于此, Raney 提出, 在多普勒锐化之后, 采样延 迟校正技术,使得锐化后的各个多普勒子波束回波 的相对应的距离门的回波,都来自于同一个测量区 域,从而可以有效抑制斑点噪声和增加有效独立观 测次数。从而形成延迟-多普勒雷达高度计 (Delay/Doppler radar Altimeter, DDA)。鉴于目前 采用这种工作体制的业务卫星 Crysoat-2 以及大量 的国际文献称这种雷达高度计为合成孔径高度计 (Synthetic Aperture Radar ALtimeter, SAR ALtimeter,所以本文标题以及后文均遵从这一习 惯)。从而可以保证甚至显著提高雷达高度计的测高 精度。此后, 文献[1]和文献[2]等先后论证了合成孔 径雷达高度计的测量精度,并指出合成孔径雷达高 度计的测量精度相对于传统雷达高度计有显著提 高。随后,利用机载实验验证了其在海冰和极冰方 面的测量精度<sup>[3,4]</sup>。

本世纪初,基于合成孔径雷达高度计在测冰方 面的巨大潜力, 欧空局于 2010 年发射的 Crvosat2 卫星,其上搭载的雷达高度计(SIRAL)在执行海冰 和复杂地形冰架观测任务时采用了合成孔径高度计 工作模式(在对复杂地形冰架观测时还使用双通道 完成干涉测量以估计地形坡度)。这是有史以来微波 雷达高度计第1次采用合成孔径工作模式。但是其 业务运行仍然仅限于冰观测,并且在开阔海域和平 坦冰原内部,高度计仍然采用传统测量模式。同期, 在合成孔径高度计研究领域,很多研究团队已经开 始了利用合成孔径雷达高度计进行海洋观测的研 究[5,6]。尤其是在海洋重力异常测绘和海底地形测量 方面, 合成孔径雷达高度计显示出了巨大的优越 性<sup>[7,8]</sup>。另外,Crvosat-2 为了利用海洋重力场的缓 变特性为其干涉模式的横滚角测量做定标, 在印度 洋、太平洋和大西洋的多个海域使用了 SARIn 观测 模式<sup>[8]</sup>。其中的合成孔径模式的实验数据处理取得 了成功。基于这些结果,即将发射的 Sentinel-3 上 搭载的雷达高度计在对海和对冰观测方面都使用合 成孔径工作模式,计划于 2020 年发射的 Jason-CS (与 Sentinel-6 合并)也将搭载合成孔径雷达高度计。

合成孔径高度计的定标原理与传统雷达高度计 定标原理基本一致,只是海面高度定标精度要求更 高。传统雷达高度计海面高度定标方法主要有基于 专用定标场的绝对定标方法,基于岸基验潮仪的潮

汐外推方法,有源定标器法和基于多星比对的星星 交叉方法,其中专用定标场的绝对定标方法可以给 出最准确并且是绝对意义上的定标偏差。国际上, 相关学者利用 Harvest 石油平台定标场分别对 T/P卫星、Jason 系列高度计卫星进行绝对定标<sup>[9]</sup>, 利用巴士海峡对 Jason 系列高度计卫星进行绝对定 标<sup>[10]</sup>,利用法国南部的科西嘉岛 (Corsica)作为专 用定标场对 Jason 系列高度计卫星进行定标<sup>[11]</sup>,西 班牙的伊比萨岛(Ibiza)和希腊的加夫多斯岛 (Gavdos)也都建成专用的定标场对 Jason 系列高 度计卫星进行定标<sup>[12]</sup>。关于合成孔径雷达高度计的 定标方法研究目前国际上尚无公开文献发表,本文 在充分研究传统雷达高度计定标方法的基础上,设 计出适用于合成孔径雷达高度计海面高度定标方 案,并在实际机载试验中对该方案能否对合成孔径 雷达高度计高精度的测高精度进行了验证。

### 2 测高原理

雷达高度计的目的在于测量被观测目标相对于 大地椭球参考面的高度。其实现测高的方法在于, 利用精密测定的卫星轨道高度,减去雷达高度计发 射电磁波的回波延迟所对应的距离,即得到被观测 目标相对于大地椭球参考面的高度。基于此,雷达 高度计测量的距离被定义为当高度计卫星经过被测 目标正上方时,与被测目标之间的距离。如图1所示。

对于图 1 中被观测目标 T,当卫星处于其天顶 点 B 时,卫星相对于椭球参考面的轨道高度为 H<sub>0</sub>, 雷达高度计与目标之间的距离为 h,则被观测目标 T 相对于大地椭球参考面的高度为

$$\Delta H = H_0 - h \tag{1}$$

#### 2.1 传统雷达高度计测高原理

为了便于介绍合成孔径雷达高度计的测高原 理,这里对传统雷达高度计的测高原理进行简单回 顾。

由于卫星和被观测目标之间的距离相对于波长 非常大,因此可以将星载雷达高度计发射的电磁波



图1 雷达高度计测高几何示意图

看作是平面波。又因为传统高度计是实孔径雷达, 所以,可以认为经过距离压缩后的窄电磁脉冲先在 被观测表面形成一个光斑并产生回波,然后向四周 扩散依次照亮周围区域并产生回波。如同一粒石子 投入平静水面泛起的涟漪一般,每一圈涟漪均对应 一个距离门的回波。如图 2(a)所示。由此,与雷达 最近距离的散射目标的回波先返回高度计并被接 收;然后,扩展照射到稍远距离处散射目标的回波 依次返回高度计并被接收,形成如图 2(c)所示的回 波。简言之,传统雷达高度计的地面足迹由等距线 描述,其功率回波由等距线之间的圆(环)面积和被 照射目标的散射截面、天线增益等因素决定。



图 2 传统/合成孔径雷达高度计测高原理示意图

在传统雷达高度计中,雷达先朝被观测目标表 面发射电磁波脉冲,并对回波可能到达的时刻进行 粗估计和高精度计量,完成回波捕获和锁定。然后 对回波进行混频去斜处理,将回波时间延迟转换为 频率偏移,进行频谱分析从而得到高度跟踪点。其 中对回波可能到达时刻的高精度计量,是通过高稳 定度晶振对发射脉冲和接收脉冲之间的回波延迟时 间进行粗分辨率的高精度计时实现的。同时,该时 刻也是对回波进行全去斜操作的参考时刻。全去斜 操作将回波延迟线性映射为回波频率偏移,从而使 得回波频率和回波延迟时间线性对应。因此,只需 要在地面重跟踪处理中,对回波进行最小二乘拟合 分析,即可以得到相对于参考时刻的高度跟踪点延迟。将高稳晶振的高精度计时和相对于参考时刻的 利用光速和延迟,就可以计算出雷达高度计与被观测目标之间的距离。

#### 2.2 合成孔径雷达高度计测高原理

合成孔径雷达高度计概念中的距离定义和传统 高度计一样,即为当高度计卫星经过被测目标正上 方时,与被测目标之间的距离。被观测目标的相对 大地椭球参考面的高度也为式(1)所描述。

如前所述,合成孔径雷达高度计的技术初衷是 为了解决高度计的分辨力过粗的问题,以便能提高 其在海冰和复杂冰架地形区域的观测能力。

为了提高沿轨分辨率,需要在沿轨方向上做合 成孔径处理。由此,如图1所示,雷达高度计不仅 需要在被观测目标 T 的天顶点上方位置 B 对目标 进行观测,还需要在轨道上的多个位置如位置 A 对 目标 T 进行观测。通过对这些回波的合成孔径处 理,高度计物理天线方向图被锐化成多个子波束, 从而其地面足迹也由等距线和等多普勒线共同围 成。图 3(a)给出了对应的多普勒锐化示意图,图 2(b) 则描述了由等距线和等多普勒线围成的地面足迹 (等多普勒线由双曲线描述,并非直线。图中在高 度计观测系统参数下做了近似,用直线描述)。从 图 3(a)中可以看到,经过多普勒锐化后,雷达可以 在轨道上的多个位置对某一条带区域,使用不同的 子波束进行多次观测。相应地, 锐化后的各个子波 束回波如图 2(d)所示。为了显示方便,图 3(a)中, 雷达在位置 B 时只画出了锐化后的一个子波束。

但是根据雷达高度计测距定义,如图1和图3(a) 所示,当雷达高度计位于位置A时测得的雷达与目标T之间的距离r并不是需要测量的距离h,不能 直接对测距构成贡献。这一点在图2(b)和图2(d)中 也可以清楚地看到:高度计在偏离目标天顶点位置 接收到的雷达回波对高度跟踪点贡献几乎为0。这 也是之前在高度计中应用多普勒锐化技术(Doppler Beam Sharpened, DBS)导致测高失败的原因。



为了解决这个问题,使得雷达高度计既能提高

图 3 合成孔径雷达高度计波束锐化和回波几何示意图

在沿轨方向的方位分辨率,以适应测冰需求,又能 保证一定的精度,可以对锐化后各个子波束回波进 行斜距校正<sup>[13]</sup>。即对高度计在偏离目标天顶点位置 接收到的回波,在距离上移动:

$$\Delta r = r - h \tag{2}$$

使得高度计在各个偏离目标天顶点位置接收到的回 波都对回波跟踪有贡献。这种距离校正和一般合成 孔径成像雷达中的距离徙动校正类似。上述操作相 当于把图 3(a)和图 2(d)中所示的各个多普勒子波束 回波按高度跟踪点对齐。从而使得每个子波束对某 一条带目标区域的测距结果都是相同的。最终使得 合成孔径高度计相对于传统高度计,增加了观测次 数,进而提高测距精度。

### 3 合成孔径雷达高度计定标方案

针对合成孔径雷达高度计 2 cm 测高精度的要 求,在验证精度时,海面高度的测量精度需要达到 1 cm。在充分研究传统雷达高度计海面高度定标方 法的基础上,研制出了对海况适应性强的 GNSS 浮 标(见图 4),经过陆地测试、静水试验后,采用 GNSS 浮标配合验潮仪,在岸边架设多个 GNSS 基 站,采用多基站约束解算,设计了合成孔径雷达高 度计定标方案。

选取海况相对稳定(海况低于 4 级)的中国沿海 区域布设 GNSS 基站(3~4个),形成图形精度高的 GNSS 区域网,在合成孔径雷达高度计升降轨地面 轨迹及交叉区域附近布设 GNSS 浮标,并在 GNSS 基站附近架设验潮仪。

#### 4 定标关键技术

为了满足验证合成孔径雷达高度计的测高精 度要求,合成孔径雷达高度计的定标方法需要对传 统高度计海面高度定标中多个误差来源进行更为严 苛的测试验证及误差去除,主要包含以下几方面:

(1)基于奇异谱分析的 GNSS 浮标获取的海面 高序列中仪器误差消除方法研究<sup>[14]</sup>;

(2)GNSS 浮标获取的时间序列海面高度与合



图 4 自行研制的 GNSS 浮标

成孔径高度计过境获取的瞬时海面高度时空一致性 匹配研究;

(3)大气对流层水汽延迟在GNSS基站与GNSS 浮标多基线解算中与距离权重关系的研究,利用该 项研究确定多基线解算值对最终精度的贡献,从而 削弱大气水汽对解算精度影响。

在对 GNSS 浮标获取的海面高时间序列数据处 理过程中,首先采用 Teqc 软件对 GNSS 浮标获取 数据进行质量检查,确定 GNSS 浮标 L1/L2 通道接 收 GNSS 卫星信号的信噪随时间分布,有步骤地剔 除解算数据中的粗差数据,降低粗差数据对整个定 标解算精度的影响;接着,确定定标中 GNSS 浮标 海面高度解算中 GNSS 信号多路径影响随时间分布 关系,选取合适的时段数据,削弱多路径影响;然 后,采用 GAMIT 软件分长、短基线模式对 GNSS 基站和 GNSS 浮标数据做差分处理,得到浮标处海 面高时间序列,同时利用验潮仪数据去除海面高时 间序列中的潮汐分量贡献;最后,利用 Brown 理论, 单点海面高时间序列时间域积分等效于瞬时海面高 度空间域积分,对 GNSS 浮标获取的时间序列海面 高度与合成孔径高度计过境获取的瞬时海面高度进 行一致性匹配。

### 5 机载实验

为了验证合成孔径雷达高度计的测高精度及定标方法的可行性,中国科学院国家空间科学中心于2014年10月在山东威海附近进行机载飞行试验。 机载系统的关键技术参数如表1所示。

表1 机载系统技术参数

速度	$70 \mathrm{~m/s}$	高度	$3600 \mathrm{~m}$
$\mathbf{PRF}$	$5 \mathrm{~kHz}$	簇内脉冲	64
载频	$13.6~\mathrm{GHz}$	带宽	$320 \mathrm{~MHz}$
脉冲宽	$12.8~\mu \mathrm{s}$	波束宽	$25^{\circ}$

机载平台上安装了 GNSS 接收机,并精密测量 了 GNSS 接收机天线相位中心与合成孔径雷达高度 计安装天线口面之间的垂直距离Δh<sub>at</sub>,同时在地面 架设了 GNSS 基站,在飞机飞行路线经过海面足迹 附近布设 GNSS 浮标,飞行路线经过海边验潮站。

采用前文阐述的定标及数据处理方法,首先, 利用 GNSS 基站与飞机上 GNSS 接收机之间差分处 理得到飞机飞行高度序列  $H_{air}$ ,减去安装改正  $\Delta h_{at}$ 后,得到飞行试验过程中合成孔径雷达高度计安装 天线口面到海面之间的高度  $H_{GNSS} = H_{air} - \Delta h_{at}$ ; 接着,对合成孔径雷达高度计获得的海面回波数据 进行重跟踪处理,得到合成孔径雷达高度计重跟踪 的平均海面高度 H<sub>SARA</sub> (直接处理结果,没有进行大 气延迟校正、高度计系统的硬件延迟校正和大地水 准面精化校正);最后,得到同一空间坐标框架下两 者的结果(图5),两者相关性高于 0.95,两者相减, 得到合成孔径雷达高度计测得该片海域的海面高度 时间序列(图6);对比利用 GNSS 基站数据、GNSS 浮标数据和验潮仪数据,在去除潮汐影响和进行水 汽延迟、电离层延迟等各项误差改正后,处理得到 该片海域的海面高度时间序列 H<sub>bnoy</sub>(图7),通过对 图 6 和图 7 的对比分析,可以看出,无论是合成孔 径雷达高度计测得的平均海面高度还是 GNSS 浮标 测得的瞬时海面高度时间序列,其海面高度的变化 范围都在 0.8 m 内,其波形变化相关性高于 0.9,变 化趋势一致性良好。

### 6 结束语

本文针对合成孔径高度计测高精度高的特点, 在充分研究合成孔径雷达高度计测高原理和传统雷 达高度计定标方法的基础上,提出了适用于合成孔 径雷达高度计的定标方法,并进行了机载试验,在 验证合成孔径雷达高度计测高精度<sup>[15]</sup>的同时,初步 验证了定标方法的可行性。

结果显示,合成孔径高度计的测高结果和定标 高程结果存在一致性。但是,由于机载实验平台不 够稳定以及 GNSS 数据码率(每秒一个数据)比较 低,同时在机载试验中,没有预先考虑大气延迟校 正、高度计系统的硬件延迟校正和大地水准面精化 校正,因此,定标数据处理结果和高度计测量结果 还不能直接对比。合成孔径高度计的测高结果和 GNSS 浮标测得的瞬时海面高度时间序列始终存在 14.76 m 的固定偏差,但是通过二者对比,合成孔 径高度计数据处理结果和地面定标数据处理结果存 在的一致性初步验证了合成孔径高度计目前的定标 方法是可行的, 且目前研制的 GNSS 浮标在 4 级海 况下测量海面高度精度已经优于1cm。关于合成孔 径雷达高度计测高精度的进一步验证结果可参考文 献[16],本文不再赘述。该定标方法还有待后续合 成孔径雷达高度计上天后,继续对大气延迟校正、 高度计系统的硬件延迟校正、大地水准面精化校正 等误差因素进行综合考虑分析后进一步完善。 致谢 感谢国家海洋技术中心陈春涛高级工程师、 李军、翟万林工程师在机载定标试验中给予的大力 协助,在此一起表示感谢。



#### 参 考 文 献

- JENSEN J R and RANYE R K. Delay/Doppler radar altimeter: Better measurement precision[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, 1998, 4: 2011–2013.
- [2] PHALIPPOU L and ENJOLRAS V. Re-tracking of SAR altimeter ocean power-waveforms and related accuracies of the retrieved sea surface height, significant wave height and wind speed[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 2007: 3533–3536.
- [3] LEUSCHEN C J and RANEY R K. Initial results of data collected by the APL D2P radar altimeter overland and sea

ice[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2005, 26(2): 114–122.

- [4] LENTZ H, BORISCH W, BRAUN H M, et al. An airborne radar altimeter with very high spatial resolution[C]. Proceedings of the Advanced RF Sensors for Earth Observation 2006 (ASRI), Workshop on RF and Microwave Systems, Instruments & Sub-Systems, ESA7ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2006: 156–164.
- [5] YANG Shuangbao. The mean echo model and data process of SAR altimeter[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, 2011: 2077–2080.
- [6] HALIMI A, MAILHES C, TOURNERET J, et al. A semianalytical model for delay/Doppler altimetry and its

estimation algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience* and Remote Sensing, 2014, 52(7): 4248–4258.

- [7] RANEY R K, SMITH W H F, and SANDWELLC T D. A high-resolution gravimetric and bathymetric mission[C].
   Space 2004 Conference and Exposition, San Diego, 2004: 1525–1529.
- [8] GALIN N, WINGHAM D J, CULLEN R, et al. Calibration of the CryoSat-2 interferometer and measurement of acrosstrack ocean slope[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 57–72.
- [9] HAINES B J, DESAI S D, BORN G H, et al. The harvest experiment: Calibration of the climate data record from TOPEX/POSEIDON, Jason-1 and the ocean surface topography mission[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1): 91–113.
- [10] WATSON C, WHITE N, CHURCH J, et al. Absolute calibration in Bass Strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2[J]. Marine Geodesy, 2011, 34(3): 242–260.
- [11] BONNEFOND P, EXERTIER P, LAURAIN O, et al. Absolute calibration of Jason -1 and Jason-2 altimeters in Corsica during the formation flight phase[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1): 80–90.
- [12] MERTIKAS S, IOANNIDES R, TZIAVOS I, et al. Statistical models and latest results in the determination of the absolute bias for the radar altimeters of Jason satellites using the Gavdos facility[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1): 114–149.
- [13] WINGHAM D J, PHALIPPOU L, MAVEOCORDATOS C, et al. The mean echo and echo cross product from a beamforming interferometric altimeter and their application to elevation measurement[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2305–2323.
- [14] 叶沛,许可,徐曦煜. 基于奇异谱分析的 DGPS 浮标海面高 测量误差研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 661-666. doi:

10.11873/j.issn.1004-0323.2015.40661.

YE Pei, XU Ke, and XU Xiyu. Study on denoising the instrumental errors of the sea surface height series derived from buoys[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(4): 661–666. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015. 40661.

- [15] 刘鹏,许可,王磊,等.合成孔径雷达高度计与传统高度计精度比对分析与机载试验验证[J].电子与信息学报,2016,38(10):2495-2501.doi:10.11999/JEIT151354.
  LIU Peng, XU Ke, WANG Lei, et al. Precision comparison and airborne experiment validation between SAR altimeter and conventional altimeter[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(10): 2495-2501. doi: 10.11999/JEIT151354.
- [16] SHI Lingwei, XU Ke, LIU Peng, et al. Height precision of SAR altimeter and conventional radar altimeter based on flight experimental data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(6): 2676–2686.
- 谌 华: 男,1979年生,博士生,研究方向为雷达高度计定标及 数据处理.
- 郭 伟: 男,1967年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为微波遥感技术、主动微波遥感器定标.
- 杨双宝: 男,1975年生,博士,副研究员,主要研究方向为合成 孔径高度计数据处理.
- 许可: 男,1967年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究 方向为星载雷达高度计系统技术、合成孔径雷达高度计 系统技术、信号处理技术、电路和软件技术.
- 徐曦煜: 男,1979年生,博士,副研究员,主要研究方向为星载 雷达高度计数据处理及定标技术.
- 史灵卫: 男, 1980年生, 博士, 研究方向为雷达高度计信号处理.
- 王 磊: 男, 1986年生, 博士, 研究方向为雷达高度计信号处理.