

引用格式: Wang Zhiyong, Wang LiHua, Wang Zihao, *et al.* Research on Error of Three-dimensional Imaging Radar Altimeter in Sea Ice Thickness Estimation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(6): 1311-1318. [王志勇, 王丽华, 王子豪, 等. 三维成像雷达高度计在海冰厚度估算中的误差研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(6): 1311-1318.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.6.1311

## 三维成像雷达高度计在海冰厚度估算中的误差研究

王志勇<sup>1</sup>, 王丽华<sup>2</sup>, 王子豪<sup>1,3</sup>, 李昊<sup>1,4</sup>

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 长江科学院 空间信息技术应用研究所, 湖北 武汉 430010;

3. 青岛协同创新研究院, 山东 青岛 266071;

4. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广东 广州 511458)

**摘要:** 海冰是全球气候系统中最为重要的指示因子之一, 海冰厚度作为描述海冰变化的重要参数, 对研究区域热量调节、气候变化等有重大意义。现有高度计在海冰监测中存在空间分辨率低、观测刈幅窄等弊端, 而新型三维成像雷达高度计以小入射角以及短基线干涉测量技术可实现宽刈幅、高精度的海面测量, 在海冰监测中有巨大的潜力。从干涉测高原理入手, 基于交轨距离分析三维成像雷达高度计的斜距测量误差、基线倾角误差、基线长度误差、干涉相位误差对测高精度的影响, 并对上述误差构成的测高总误差进行仿真分析, 结合海冰分布图像以及海冰厚度估算原理, 探究提高海冰厚度估算精度的因素。实验发现: 利用干涉相位与基线倾角的相关性对基线倾角误差进行改正, 可提高三维成像雷达高度计在海冰厚度估算的精度, 使海冰厚度的估算误差由 85.47 cm 降至 70.23 cm, 精度提高 17.83%。

**关键词:** 三维成像雷达高度计; 海冰厚度; 干涉相位; 测高误差; 精度分析

**中图分类号:** P731.15; TP722.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)06-1311-08

### 1 引言

海冰是由海水冻结而成的混合物质, 包括晶体、卤水以及气泡等, 主要分布在中高纬度地区。随着全球变暖日益严重, 北极区域海冰的厚度和面积也在急剧缩减<sup>[1]</sup>, 而极地区域的海冰是全球最为重要的冷源之一, 对区域热量、温盐环流、气候变化等都有极为重要的影响<sup>[2-3]</sup>。另外, 海冰作为中高纬度区域特有的物质, 它的冻结和漂移会对海洋生产和海上航行产生危害。作为海冰最难探测的参数之一, 海冰厚度的监测对研究气候变化影响机制、生态环境以及冰灾防治等均有重要意义。

利用遥感手段对海冰进行探测是最为普遍和

有效的方法, 光学遥感受天气因素影响大, 无法长期、连续的进行有效观测, 各类型的微波传感器在进行海冰厚度监测时也有不足之处, 如被动微波遥感受海冰表面粗糙度的影响在探测较厚的海冰时有一定的限制, 而主动微波遥感则会受到相干散射的影响<sup>[4]</sup>。利用雷达高度计进行海冰厚度监测是最为有效的方式之一, 其有效性和精度都已得到证明<sup>[5-8]</sup>, 但是存在空间分辨率低、观测刈幅窄、无法成像等缺点, 限制其进一步发展。为解决传统高度计由星下点工作模式带来的以上弊端, 新型成像雷达高度计应运而生。美国和法国于 2009 年联合提出利用偏离天底点交轨干涉技术进行中尺度海洋测

收稿日期: 2021-03-11; 修订日期: 2022-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876202), 山东省自然科学基金项目(ZR2017MD020)。

作者简介: 王志勇(1978—), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微波遥感、雷达干涉测量等研究。E-mail: wzywlp@163.com

通讯作者: 王丽华(1995—), 女, 山东潍坊人, 助理工程师, 主要从事海冰探测研究。E-mail: 1451319865@qq.com

量和地表水文监测的 SWOT<sup>[9-11]</sup> (Surface Water and Ocean Topography) 任务, 由于对测高精度要求严格, 发射计划一再推迟, 预计于 2022 年 11 月发射<sup>[12]</sup>。我国的“观澜号”海洋科学卫星计划也设计搭载三维成像雷达高度计<sup>[13]</sup>, 它采用 3 对干涉波束进行观测, 左右小入射角侧视波束可实现宽刈幅观测, 星下点干涉波束为传统的高度计测量模式, 但可为基线倾角的测量提供帮助<sup>[14]</sup>。以同样思路设计的三维成像微波高度计于 2016 年随天宫二号发射升空, 证明了干涉测量与三维成像技术在海面高度测量中的可行性<sup>[15-16]</sup>。新型成像高度计在海洋测量中具有巨大的优势, 宽刈幅、高空间分辨率与高精度测量的特点使其在海冰厚度监测中也具有极大的潜力, 可解决传统高度计难以获取高空间分辨率、大幅宽的海冰厚度数据以及无法成像的难题。

三维成像雷达高度计在干涉测量的过程中会存在斜距测量误差、基线倾角误差、基线长度误差以及干涉相位误差等, 对测高精度带来一定的影响, 从而导致海冰厚度的估算误差。研究分析了三维成像雷达高度计的测高原理, 基于交轨距离对影响测高精度的斜距测量误差、基线倾角误差、基线长度误差以及干涉相位误差进行分析, 并结合海冰厚度的估算原理, 进一步探究提高海冰厚度估算精度的方法。

## 2 三维成像雷达高度计的测高原理及海冰厚度估算原理

### 2.1 三维成像雷达高度计测高原理

三维成像雷达高度计干涉测量是在合成孔径干涉雷达的基础上, 采用小入射角对地表进行观测, 其测量原理可基于合成孔径干涉测量技术 (InSAR) 进行分析<sup>[17-18]</sup>。图 1 为传统高度计、三维成像雷达高度计以及合成孔径雷达入射角的示意图, 三维成像雷达高度计采用小入射角、双天线模式实现对目标的观测, 由于两天线存在路径差, 因此获得同一区域的两幅影像之间存在相位差, 根据两影像的相位差、基线长度、波束对地面的入射角度、传感器距地面的高度之间的关系, 可以推算地面目标点的高度信息<sup>[19-20]</sup>, 其测高的几何原理图 2 所示。

三维成像雷达高度计的天线为单发双收工作模式, 其中  $A_1$  为主天线,  $A_2$  为辅天线, 天线  $A_1$  既发射信号又接收信号, 天线  $A_2$  只接收信号, 两天线之间的距离为基线长度, 基线倾角为  $\alpha$ , 代表基线方向

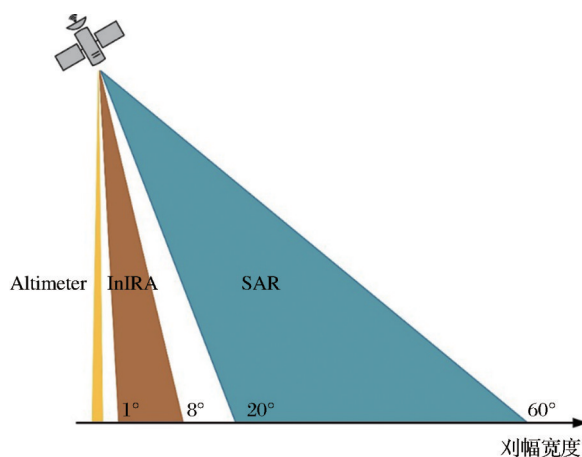


图 1 不同传感器入射角示意图

Fig.1 Schematic diagram of incident angles of different sensors

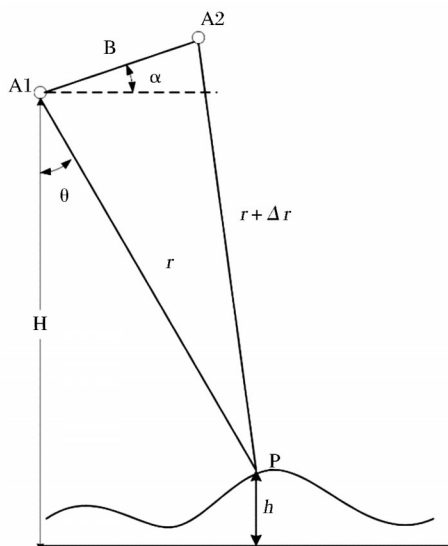


图 2 三维成像雷达高度计测高原理

Fig.2 Height measurement principle of three-dimensional imaging radar altimeter

与水平方向之间的夹角。 $H$  为传感器的平台高度,  $h$  代表地面点  $P$  的高程。 $r$  以及  $r + \Delta r$  分别为天线  $A_1$  和  $A_2$  到地面点的斜距,  $\Delta r$  代表斜距差。 $\theta$  为天线  $A_1$  的侧视角, 即入射角。

由于干涉测高的几何关系可知, 地面点  $P$  的高度测量表达式为:

$$h = H - r \cos \theta \quad (1)$$

在三角形  $A_1 A_2 P$  中, 由余弦定理得:

$$(r + \Delta r)^2 = r^2 + B^2 - 2rB \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta + \alpha \right) \quad (2)$$

即:

$$(r + \Delta r)^2 = r^2 + B^2 - 2rB \sin (\theta - \alpha) \quad (3)$$

由于  $\Delta r \ll r$  并且  $B \ll r$ ,

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{r^2 + B^2 - (r + \Delta r)^2}{2rB} \approx \frac{\Delta r}{B} \quad (4)$$

因此,天线 $A_1$ 对于地面点的入射角 $\theta$ 为:

$$\theta = \alpha + \arcsin\left(\frac{B^2 - \Delta r^2 - 2r\Delta r}{2rB}\right) \quad (5)$$

对于单发双收的天线,天线 $A_1$ 和 $A_2$ 接收回波信号经过干涉处理后得到的相位与回波距离差存在如下关系:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \quad (6)$$

其中: $\lambda$ 为雷达波长。

由式(2)–(6)可得:

$$h = H - r \cos \left\{ \alpha + \arcsin \left[ \frac{B^2 - \left( \frac{\lambda \varphi}{2\pi} \right)^2 - \frac{r \lambda \varphi}{\pi}}{2rB} \right] \right\} \quad (7)$$

$$h = H - r \cos \theta = H - r \cos \left[ \alpha - \arcsin \left( \frac{\lambda \varphi}{2\pi B} \right) \right] \quad (8)$$

通过对数据进行处理得到解缠后的相位 $\varphi$ 以及斜距 $r$ ,利用基线长度 $B$ 、基线倾角 $\alpha$ 、轨道高度 $H$ 等参数之间的几何关系以及相位 $\varphi$ 与斜距差 $\Delta r$ 之间的关系便可获得地面点的高程。

## 2.2 海冰厚度估算模型

基于干涉雷达高度计数据获取地表的高程后,通过图像分类获取海冰和冰间水道的分布情况,从而得到它们的高程,以冰间水道高程为基准求取海冰的干舷高度(海冰高出海面的高度),最后利用浮体法求得海冰的厚度。浮体法是假定海冰在海水中处于静力平衡状态,如图3所示。通过海冰干舷高、海水密度、海冰密度、积雪密度、积雪厚度等参数利用浮体法即可求得海冰厚度,基于浮体法估算海冰厚度的计算公式如下:

$$h_i = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_f + \frac{\rho_s}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_s \quad (9)$$

其中: $h_i$ 为海冰厚度; $h_f$ 为海冰的干舷高度; $h_s$ 为海冰的积雪厚度;积雪厚度可通过辐射计的亮温数据反演获得<sup>[21]</sup>。 $\rho_w$ 、 $\rho_i$ 以及 $\rho_s$ 则分别代表海水、海冰与积雪的密度值。海水和积雪的密度值一般是固定值,海冰的密度值则需要根据其类型的差异进行不同的取值。

## 3 基于交轨距离的测高误差仿真分析

由公式(8)可知,测高误差斜距、基线长度、基线倾角、干涉相位等各参数息息相关<sup>[22]</sup>。而斜距误

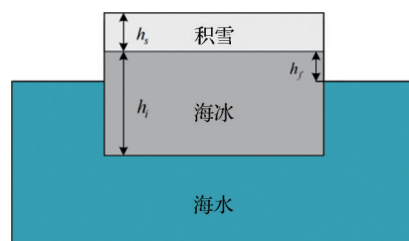


图3 基于浮体法估算海冰厚度示意图

Fig.3 Schematic diagram of sea ice thickness estimation based on floating body method

差、基线长度误差、基线倾角误差以及干涉相位误差作为成像高度计测高误差的组成部分,微小的变化就会对高程测量带来较大的影响<sup>[23]</sup>。上述误差源与高程误差之间存在如下关系:

斜距测量误差造成的高度误差 $\sigma_{h,r}$ :

$$\sigma_{h,r} = -\cos \theta \cdot \sigma_r \quad (10)$$

基线长度测量误差引起的高度误差 $\sigma_{h,B}$ :

$$\sigma_{h,B} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial B} \sigma_B = \frac{-r \sin \theta \tan(\theta - \alpha)}{B} \cdot \sigma_B \quad (11)$$

基线倾角测量误差引起的高度误差 $\sigma_{h,\alpha}$ :

$$\sigma_{h,\alpha} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} \sigma_\alpha = r \sin \theta \cdot \sigma_\alpha \quad (12)$$

干涉相位测量误差引起的高度误差 $\sigma_{h,\varphi}$ :

$$\sigma_{h,\varphi} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \sigma_\varphi = \frac{-r \lambda \sin \theta}{2\pi B \cos(\theta - \alpha)} \cdot \sigma_\varphi \quad (13)$$

根据图1中的几何关系可知, $r \sin \theta$ 为目标点与星下点的距离,定义该距离为交轨距离 $C$ :

$$C = r \sin \theta \quad (14)$$

由公式(10)–(13)可知,斜距误差、基线长度误差、基线倾角误差、干涉相位误差对高程测量的影响均随交轨距离而变化,因此对小入射角下的测高误差随交轨距离的变化进行仿真分析。参照现有高度计的测量精度及误差的统筹分配要求以及天宫二号的载荷参数,仿真参数的设置如表1所示,利用公式(10)–(13)对基线倾角误差、基线长度误差、干涉相位误差随交轨距离的变化进行仿真,仿真结果如图4所示。

图4为斜距误差、基线倾角误差、基线长度误差以及干涉相位误差随着交轨距离的变化对高程测量的影响,其中基线长度误差与基线倾角误差对测高误差带来的影响较大,在刈幅远距端可达十几厘米。假设上述4种种误差相互独立,它们共同构成了测高总误差,则三维成像雷达高度计的测高总误差为:

$$\sigma h = \sqrt{\sigma_{h,r}^2 + \sigma_{h,\alpha}^2 + \sigma_{h,B}^2 + \sigma_{h,\varphi}^2} \quad (16)$$

表 1 仿真参数设置及误差分配

Table 1 Simulation parameter setting and error distribution

参数	数值
波长	0.86 cm
高度	400 km
基线长度	10 m
基线倾角	5°
入射角	1—8°
斜距误差	4.27—4.45 cm
基线长度误差	0.05 cm
基线倾角误差	0.36"
干涉相位误差	10 <sup>-3</sup> rad

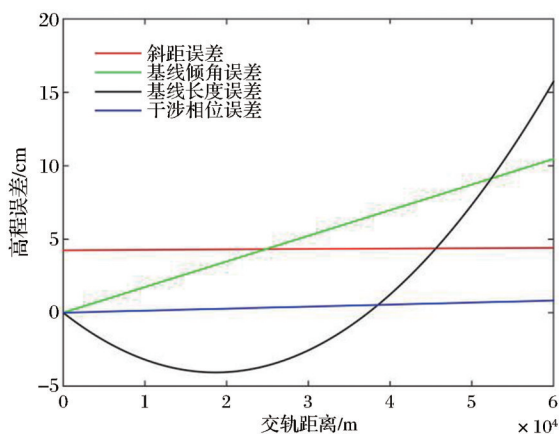


图 4 各测高误差随交轨距离的变化对高程测量的影响

Fig.4 Influence of height measurement error with rail crossing distance on height measurement

基于式(16)对测高总误差进行仿真,结果如图5所示。从图中可以看出,在0—40 km 刘幅范围内,三维成像雷达高度计的测高总误差在0—10 cm 范围内,但是在40—60 km 刘幅范围内测高总误差急剧增加,在远距端误差可达25 cm,对数据的应用影响较大。

为探究测高误差对海冰厚度估算误差的影响,基于海冰分布图像进行二维测高误差仿真。假设卫星以30 m的分辨率进行采样,且陀螺仪按0.36"的精度进行基线倾角的测量,仿真结果如图6所示。

#### 4 基于干涉相位法提高海冰厚度估算精度

海冰干舷高是海冰的出水高度,可利用海冰处的高程与冰间水道高程作差得到,海冰厚度可利用海冰干舷高基于公式(9)获得,对其求偏导发现海冰干舷高误差与海冰厚度误差之间存在以下关系:

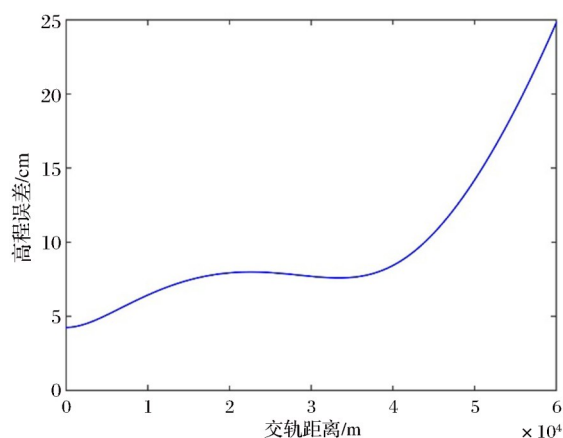


图 5 三维成像雷达高度计测高总误差仿真

Fig.5 Simulation of total error of height measurement of three-dimensional imaging radar altimeter

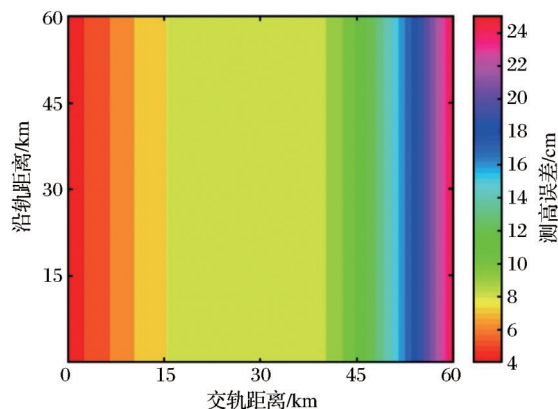


图 6 三维成像雷达高度计测高误差仿真结果(二维)

Fig.6 Simulation results of height measurement error of three-dimensional imaging radar altimeter (two-dimensional)

$$\sigma_{h,hf} = \frac{\partial h}{\partial hf} \sigma_{hf} = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} \sigma_{hf} \quad (17)$$

其中: $\sigma_{h,hf}$ 为海冰干舷高误差引起的海冰厚度误差; $\sigma_{hf}$ 为海冰干舷高误差; $\rho_w$ 、 $\rho_i$ 分别代表海水、海冰的密度值, $\rho_w$ 取1024 kg/m<sup>3</sup>, $\rho_i$ 取917.6 kg/m<sup>3</sup>[24]。因此,海冰干舷高测量误差引起的海冰厚度的估算误差可以表示为:

$$\sigma_{h,hf} = 9.62 \sigma_{hf} \quad (18)$$

由公式(18)可知,海冰厚度误差约为海冰干舷高误差的9倍,微小的海冰干舷高误差都将引起很大的海冰厚度估算误差,因此基于图6模拟的测高误差对海冰厚度的估算误差进行计算,探究影响海冰厚度估算精度的因素。

实验选取 Landsat-7 卫星影像(60 km×60 km)中海冰与海水的分布情况来进行海冰厚度误差计算,海冰分布如图7所示。



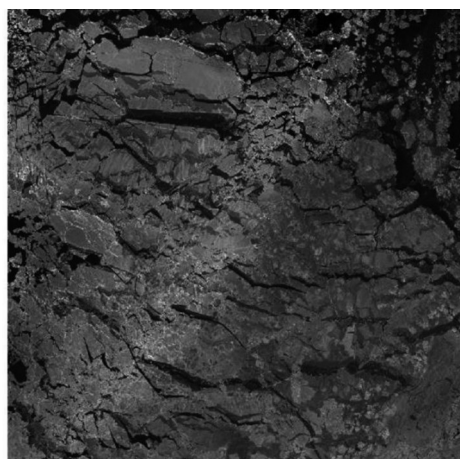


图 7 海冰分布图

Fig.7 Sea ice distribution map

基于海冰与冰间水道反照率的差异,采用监督分类的方法对海冰和冰间水道进行分离,将图 6 模拟的测高误差分别添加到海冰和冰间水道图像上,计算刈幅内误差,采用平均误差对其进行评价。海冰与冰间水道的误差图像如图 8 所示。

对海冰与冰间水道所覆盖的区域进行测高误差计算,根据海冰厚度的估算原理以及海冰干舷高误差与厚度误差之间的关系计算得到海冰厚度的

估算误差,统计结果如表 2 所示。

表 2 海冰厚度估算误差

Table 2 Estimation error of sea ice thickness

误差种类	误差值/cm
海冰区域平均误差	8.48
冰间水道区域平均误差	9.16
海冰干舷高估算误	12.48
海冰厚度估算误差	120.02

由表 2 可以看出,仿真得到的海冰测高误差以及冰间水道的测高误差都接近 10 cm,并且测高误差传至海冰厚度时,使得厚度反演误差在 1.2 m 左右,这样得到的反演结果并不具备参考性,因此,对刈幅远距端误差较大的部分舍弃,选取有效的刈幅宽度进行实验。

根据图 6 三维成像雷达高度计测高总误差的仿真结果可知,测高总误差在 0—40 km 刈幅范围内误差相对较小且变化缓慢,因此选取实验有效的刈幅宽度为 40 km,重新进行上述实验,得到 40 km 刈幅范围内的海冰以及冰间水道的误差分布如图 9 所示。重新对有效刈幅内的海冰厚度误差进行计算,得到的结果如表 3 所示。

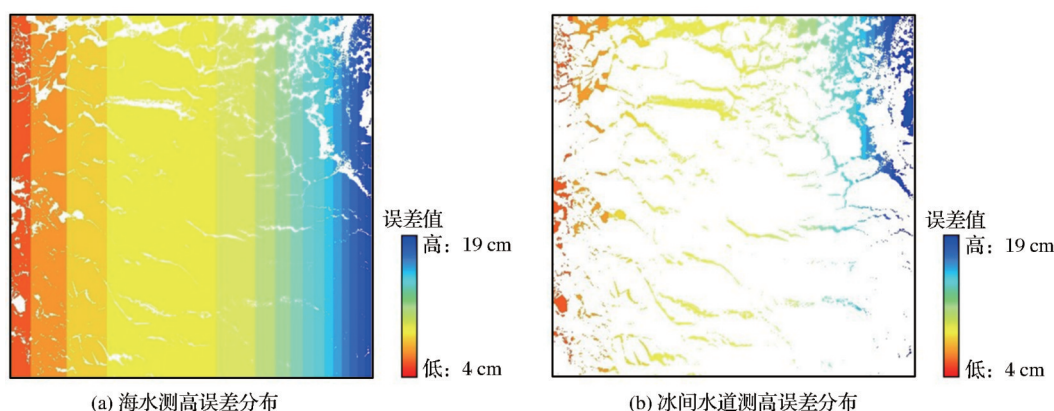


图 8 测高误差分布图

Fig.8 Height measurement error distribution diagram

实验结果表明,较小的测高误差会对海冰厚度的估算产生较大的影响,严重影响海冰厚度的反演精度。因此必须要提高测高精度,减小高程的测量误差,才能得到有效的海冰厚度反演结果。由图 4 可以看出,相比于干涉相位误差,基线长度误差和基线倾角误差对测高精度带来的影响要大得多,而基线倾角与干涉相位存在如下关系:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \approx \frac{2\pi}{\lambda} B \sin \alpha \quad (19)$$

由此可知,

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\varphi}{B} \right) \quad (20)$$

基线倾角可由干涉相位表征,对其求偏导可得到二者的误差关系式:

$$\Delta \alpha - \frac{\lambda}{2\pi \cos \alpha} \left( -\frac{\varphi}{B^2} \Delta B + \frac{1}{B} \Delta \varphi \right) \quad (21)$$

由式(21)可知,基线倾角误差主要由两个因素决定:基线长度误差  $\Delta B$  和干涉相位误差  $\Delta \varphi$ ,而  $\varphi$  值接近于 0 且基线长度误差较小,因此,由基线长度带来的基线倾角误差项  $-\frac{\varphi}{B^2} \Delta B$  远小于干涉相位带来

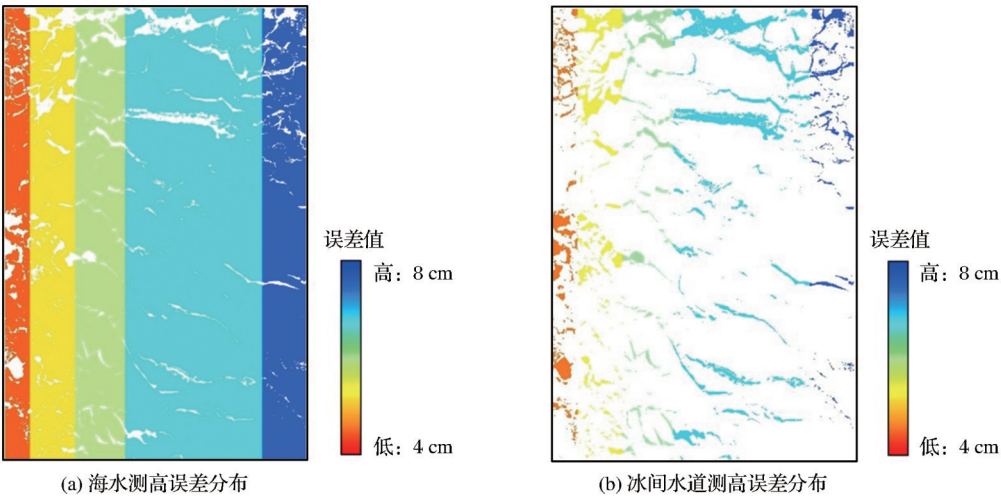


图 9 有效刈幅内测高误差分布图

Fig.9 Distribution diagram of height measurement error in effective swath

表 3 有效刈幅内海冰厚度估算误差  
Table 3 Estimation error of sea ice thickness in effective swath

误差种类	误差值
海冰区域平均误差	6.46 cm
冰间水道区域平均误差	6.10 cm
海冰干舷高估算误	8.88 cm
海冰厚度估算误差	85.47 cm

的基线倾角误差,在此可以忽略基线长度带来的倾角误差,所以基线倾角的反演误差主要由干涉相位

误差表征可表示为:

$$\Delta\alpha\approx\frac{\lambda}{2\pi\cos\alpha B}\Delta\varphi\tag{22}$$

根据表 1 误差的分配方案,取干涉相位误差为  $10^{-3}$  rad,此时基线倾角的反演误差可根据式(22)改正为 0.03",而基于当前硬件技术很难获得如此高的基线倾角测量精度。利用改正后的基线倾角误差进行测高总误差仿真,叠加到海冰与冰间水道的分布图像上,并取 0—40 km 的有效观测刈幅,改正后的海冰与冰间水道的测高误差图像如图 10 所示。

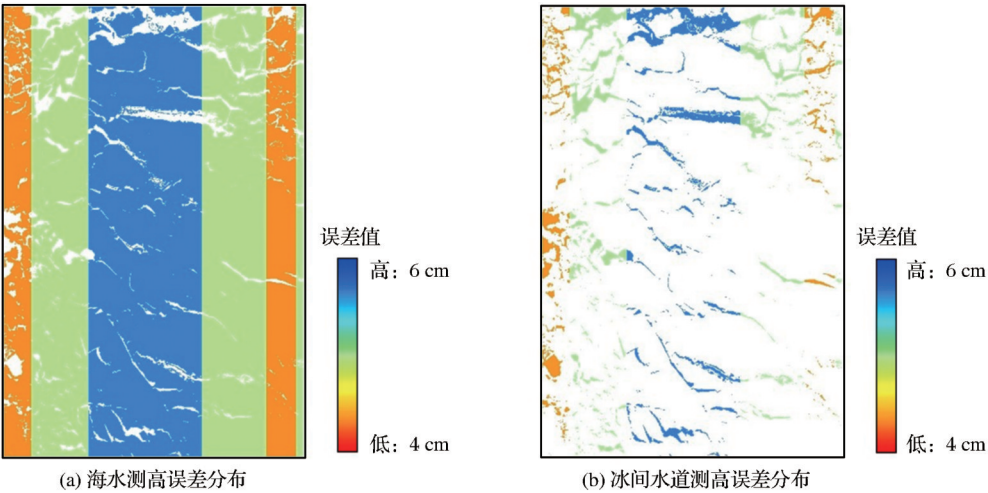


图 10 改正后测高误差分布图

Fig.10 Error distribution of height measurement after correction

对改正后的仿真误差进行统计,计算海冰厚度的估算误差,并于改正前的误差进行对比,结果如表 4 所示。由表 4 可知,基于干涉相位法对基线倾角进行改正可减小高程测量的误差,提高海冰厚度反演精度,海冰厚度的估算误差由 85.47 cm 降至

70.23 cm,使海冰厚度的估算精度提高了 17.83%。海冰以及冰间水道的测高误差满足海洋模式下系统的测高精度优于 20 cm 的标准,但是由于海冰厚度估算的特殊性,会使海冰干舷高误差放大 9 倍传递,使得海冰厚度估算存在较大的误差。理论上可

表4 改正前后海冰厚度估算误差对比

Table 4 Comparison of sea ice thickness estimation errors before and after correction

误差种类	改正前/cm	改正后/cm
海冰区域平均误差	6.46	5.19
冰间水道区域平均误差	6.10	5.13
海冰干舷高估算误差	8.88	7.30
海冰厚度估算误差	85.47	70.23

用于极地的海冰厚度估算,在海冰厚度较薄的区域结果可靠性低。

## 5 结 论

基于交轨距离对影响三维成像雷达高度计测高精度的斜距误差、基线长度误差、基线倾角误差、干涉相位误差进行分析,对这4种误差源所构成的测高总误差进行仿真。结合海冰分布情况以及海冰厚度的估算模型,利用干涉相位法提高海冰厚度的估算精度。

利用干涉相位和基线倾角之间的相关性可对基线倾角进行改正,改正后的基线倾角比一般的星敏测量装置测得的基线倾角精度高,可大大减小由基线倾角带来的测高误差,使海冰厚度的估算误差由85.47 cm降至70.23 cm,精度提高17.83%。干涉相位法可以有效的提高海冰以及冰间水道的测高误差,但是海冰厚度误差会成倍放大,在适用性方面有待探究。

本文仅以斜距误差、基线倾角误差、基线长度误差和干涉相位误差4种误差源对三维成像雷达高度计测高误差产生的影响进行仿真实验,没有考虑其他误差的影响,例如轨道高度、仪器等误差。且海冰厚度的估算也会受到海冰密度、积雪厚度等参数的影响,后续应综合考虑多种误差的影响进行仿真分析,以提高海冰厚度的估算精度。

## 参考文献(References):

- [1] Chen Yizhuo, Ji Qing, Pang Xiaoping. Spatio-temporal variation of Antarctic sea ice thickness using CryoSat-2 satellite altimeter data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1214-1220. [陈亦卓, 季青, 庞小平. 基于CryoSat-2卫星测高数据分析南极海冰厚度的时空变化[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1214-1220.]
- [2] Wu Bingyi. Progresses in the impact study of arctic sea ice loss on wintertime weather and climate variability over East Asia and key academic disputes[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 786-805. [武炳义. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题[J].

大气科学, 2018, 42(4): 786-805.]

- [3] Wang Kang, Zhang Tingjun, Mu Cuicui, *et al.* From the Third Pole to the Arctic: Changes and impacts of the climate and cryosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 42(1): 104-123. [王康, 张廷军, 牟翠翠, 等. 从第三极到北极: 气候与冰冻圈变化及其影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 104-123.]
- [4] Ji Qing, Pang Xiaoping, Xu Suqing, *et al.* Review of technology and application research on polar sea ice thickness detection[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28(4): 431-441. [季青, 庞小平, 许苏清, 等. 极地海冰厚度探测方法及其应用研究综述[J]. 极地研究, 2016, 28(4): 431-441.]
- [5] Ricker R, Hendricks S, Schwegmann S, *et al.* Arctic and Antarctic sea-ice freeboard and thickness retrievals from CryoSat-2 and EnviSat[C]//Egu General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016.
- [6] 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, 2013, 52(1): 529-536.
- [7] Wei Xin, Li Fei, Zhang Shengkai, *et al.* Estimation of sea ice from Cryosat-2 data in the Arctic Greenland sea[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2017, 29(1): 90-100. [魏鑫, 李斐, 张胜凯, 等. 基于CryoSat-2测高数据的北极格陵兰海海冰干舷高提取研究[J]. 极地研究, 2017, 29(1): 90-100.]
- [8] Shen X, Simil M, Dierking W, *et al.* A new retracking algorithm for retrieving sea ice freeboard from CryoSat-2 Radar altimeter data during winter-spring transition[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1194. DOI: 10.3390/rs11101194.
- [9] Fjortoft R, Gaudin J M, Pourthie N, *et al.* KaRIn on SWOT: Characteristics of near-nadir Ka-band interferometric SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(4): 2172-2185.
- [10] Weiya K, Jinsong C, Hong T. Performance analysis of ocean surface topography altimetry by Ku-band Near-Nadir Interferometric SAR[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9): 933. DOI: 10.3390/rs9090933.
- [11] Durand M, Fu L L, Lettenmaier D P, *et al.* The surface water and ocean topography mission observing terrestrial surface water and oceanic submesoscale eddies [J]. Proceedings of The IEEE, 2010, 98(5): 766-779.
- [12] Zhou Hong. US-European satellite project to create world's first global freshwater survey[J]. Express Water Resources & Hydropower, 2022, 43(9): 2. [周虹. 美国-欧洲计划发射SWOT卫星进行首次全球淡水资源调查[J]. 水利水电快报, 2022, 43(9): 2.]
- [13] Chen Ge, Yang Jie, Zhang Bentao, *et al.* Thoughts and prospects on the new generation of marine science satellites[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(10): 110-117. [陈戈, 杨杰, 张本涛, 等. 新一代海洋科学卫星的思考与展望[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(10): 110-117.]
- [14] Xu Yongsheng, Gao Le, Zhang Yunhua. New generation altimetry satellite SWOT and its reference to China's swath altimetry satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 84-94. [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.]



- [15] Sun Xinyi, Zhang Yunhua, Dong Xiao, *et al.* Inversion of the baseline incline angle for Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2): 331-336.[孙馨怡, 张云华, 董晓, 等. 天宫二号干涉成像雷达高度计的基线倾角反演[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2): 331-336.]
- [16] Yang Jinsong, Ren Lin, Zheng Gang. The first quantitative remote sensing of ocean by Tiangong-2 three-dimensional 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.]
- [17] Zhang Rong, Yang Jinsong, Huang Weigen, *et al.* Imaging mechanism and possible oceanographic applications of China Imaging Altimeter[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(3): 99-102.[张荣, 杨劲松, 黄韦良, 等. 三维成像雷达高度计的工作机理及其可能的海洋学应用[J]. 海洋学研究, 2009, 27(3): 99-102.]
- [18] Miao Xiangying, Miao Hongli, Zhang Xudong, *et al.* Improve the height measurement accuracy in Three-dimensional Imaging Altimeter using nadir interferometric phase[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 866-872.[苗翔鹰, 苗洪利, 张旭东, 等. 利用星下点干涉相位法提高三维成像高度计测高精度[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 866-872.]
- [19] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 88(3): 333-382.
- [20] Zhao Zheng. Methods on high-accuracy DEM extraction from interferometric SAR in sophisticated terrain areas[J]. Cartographica Sinica, 2016, 45(11): 1385.[赵争. 地形复杂区域 InSAR 高精度 DEM 提取方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(11): 1385. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160357.]
- [21] Shu Su. Analysis of Antarctic sea ice variations from 2011 to 2018 [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.[舒苏. 2011-2018 年南极海冰变化分析[D]. 南京: 南京大学, 2019.]
- [22] Geng Hui, Xie Yanan, Wang Bo, *et al.* Elevation measurement of InSAR and accuracy analysis[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(2): 39-41, 65.[耿辉, 谢亚楠, 王波, 等. InSAR 测高原理及精度分析[J]. 电子测量技术, 2011, 34(2): 39-41, 65.]
- [23] 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.
- [24] Fichefet T, Maqueda M. Modelling the influence of snow accumulation and snow-ice formation on the seasonal cycle of the Antarctic sea-ice cover[J]. Climate Dynamics, 1999, 15(4): 251-268.

## Research on Error of Three-dimensional Imaging Radar Altimeter in Sea Ice Thickness Estimation

Wang Zhiyong<sup>1</sup>, Wang LiHua<sup>2</sup>, Wang Zihao<sup>1,3</sup>, Li Hao<sup>1,4</sup>

(1.College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2.Spatial Information Technology Application Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

3.Qingdao Institute of Collaborative Innovation, Qingdao 266071, China;

4.MNR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geology Survey, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 511458, China)

**Abstract:** Sea ice is one of the most important indicators in the global climate system, which has a significant impact on regional heat regulation and climate change. Sea ice thickness is an extremely important parameter in the research of sea ice change. The existing altimeter has some disadvantages in sea ice monitoring, such as low spatial resolution and narrow observation range. However, the new three-dimensional imaging radar altimeter can achieve wide-range and high-precision sea surface measurement with small incident angle and short baseline interferometry technology, which has great potential in sea ice monitoring. In this paper, based on the principle of interference altimetry, the influence of the slant range measurement error, baseline inclination error, baseline length error and interference phase error on the altimetry accuracy of three-dimensional imaging radar altimeter is analyzed, and the total altimetry error composed of the above errors is simulated. Combined with the sea ice distribution image and the sea ice thickness estimation principle, the factors to improve the estimation accuracy of sea ice thickness are explored. Experiments show that the accuracy of sea ice thickness estimation by 3D imaging radar altimeter can be improved by correcting the baseline inclination error by using the correlation between interference phase and baseline inclination angle, and the estimation error of sea ice thickness can be reduced from 85.47 cm to 70.23 cm, and the accuracy can be improved by 17.83%.

**Key words:** Three-dimensional imaging radar altimeter; Sea ice thickness; Interference phase; Height measurement error; Accuracy analysis