

近天底干涉SAR动态海面高程测量误差分析

陈尧^{*①②} 黄默^① 王小青^③ 黄海风^③

^①(中国科学院微电子研究所 北京 100029)

^②(中国科学院大学 北京 100029)

^③(中山大学电子与通信工程学院 广州 510275)

摘要: 采用近天底的宽刈幅干涉高度计是近年来新发展的海面高程测量技术,与陆地高程测量不同,海浪一直处于随机运动之中,其动态特性会在合成孔径雷达(SAR)成像和干涉处理中引入显著误差。对于厘米级的干涉测量精度要求来说,该误差是主要误差源之一。该文研究了由海面特性引起的高程误差机理及其对于近天底干涉SAR测高精度的影响,建立了运动误差理论模型,同时考虑了电磁偏差与叠掩偏差影响。基于不同SAR工作体制,在不同海况下进行了理论近似仿真,并进行了干涉SAR全链路仿真,全链路仿真结果能够与理论仿真较好地吻合,验证了误差模型的正确。结果显示由海浪引起的误差随着多普勒中心频率近似呈线性变化,且与目标散射加权径向速度成正比。误差不仅与海浪特性相关,还与雷达系统参数相关,这能为未来系统设计、误差预算和海面高程处理提供参考。

关键词: 干涉SAR; 海面高程; 误差预算; 目标运动

中图分类号: TN959.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0547-08

DOI: [10.11999/JEIT190191](https://doi.org/10.11999/JEIT190191)

Error Analysis of Dynamic Sea Surface Height Measurement by Near-nadir Interferometric SAR

CHEN Yao^{*①②} HUANG Mo^① WANG Xiaoqing^③ HUANG Haifeng^③

^①(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

^②(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

^③(*School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract: The wide-swath interferometric altimeter working at near-nadir is a newly developed ocean surface topography measurement technology in recent years. Different from land elevation measurement, for the dynamic ocean surface waves, they move randomly all the time and this brings bias in Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging and interferometric processes and leads to the final height measurement errors. For the requirement of centimeter-level precision, this error is the main source of measurement errors. The errors due to the characteristics of ocean surface and their impact on near-nadir InSAR's precision are investigated. The motion error theoretical model is established combining the characteristics of the ocean surface and InSAR working mechanism, and the electromagnetic bias and layover bias are also taken into consideration. The error models in different SAR modes under various sea states are simulated. The error model is validated by the interferometric SAR full-link experimental simulation and the simulation results are consistent with the theoretical values. The results show that the errors are approximately linear changing with the Doppler centroid frequency and are proportional to the radial velocity of targets modulated by scattering. The errors are not only related to the characteristics of the waves, but also related to system parameters. This work can provide the feasible suggestions for future system design, error budget and data processing.

Key words: InSAR; Sea surface height; Error budget; Targets motion

收稿日期: 2019-03-28; 改回日期: 2019-08-30; 网络出版: 2019-09-05

*通信作者: 陈尧 chenyaol995@ime.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91438202)

Foundation Item: The Major Research Plan of the Natural Science Foundation of China (91438202)

1 引言

卫星测高技术诞生于20世纪60年代,能以较高的精度不间断地测量全球海面高程^[1]。得益于TOPEX/Poseidon, Jason 1, Jason 2等连续的高度计任务,最新的Jason 3高度计能够实现2 cm的精度^[2]。对于传统的天底高度计,其在空间分辨率上存在限制,只能测量200~300 km以上尺度的2维海洋地形与环流^[3]。近天底干涉合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)高度计,其结合了传统天底高度计与斜视干涉SAR的优点,能够以厘米级的精度测量尺度更小的中-亚尺度海洋现象^[4]。

由美国航空航天局(NASA)与法国航天局(CNES)联合研制的SWOT卫星预定于2021年发射,预计能在1 km²网格下实现2 cm的海洋测高精度^[5]。我国的干涉成像雷达高度计随天宫二号实验室于2016年上天^[6],报道显示其能在5 km²网格下实现7 cm的精度,在10 km²网格下实现3 cm精度^[7]。近天底干涉SAR高度计能够以较高的精度测量2维高程,被认为是下一代高度计的首选方案。

测量海洋中-亚尺度现象需要厘米级的精度,高精度意味着测量误差必须合理地分配,其机理也需研究透彻。海面高程测量一般分为4类误差,包括系统误差、随机误差、传播误差与海浪误差^[8]。干涉SAR系统的系统误差、随机误差和传播误差,前人都进行过较深入的研究^[9]。海浪误差与海洋自身特性密切相关,目前对于干涉SAR海浪误差的研究还鲜有报道。由于海面具有随机性与时变性,其干涉测量机理与陆地目标有着本质差异。海浪误差的理论研究与补偿方法是实现高精度的关键,也是海洋测量与陆地测量的核心区别所在。

对于传统高度计,海浪引起的误差称作海况偏差,包含电磁偏差、跟踪偏差与斜偏差3类^[10]。电磁偏差由于波谷和波峰对于电磁能量散射强度不同造成,其对于干涉SAR作用原理也一样^[11]。跟踪偏差与斜偏差与传统天底高度计特定的工作机理相关,干涉SAR基于SAR 2维成像特点利用相位差进行高程测量,其机理与传统高度计不同。而且SAR成像具有积分时间的特点,所以海浪的运动效应必须考虑在内。同时为了得到较高的测高灵敏度与大信噪比,其一般工作在近天底模式下,此时海面叠掩现象较为严重且不能忽略^[12]。综上,可以定义近天底干涉SAR海浪误差为电磁偏差、叠掩偏差、运动偏差3类,其也是影响测高精度最大的关键误差。

本文对动态海浪引起的干涉SAR测高误差进行了相关研究。首先依据海浪谱理论生成了不同海况

下的真实海洋场景,解析可以得到海面高度场与速度场。考虑电磁偏差影响,进行了海面归一化散射系数NRCS仿真。然后推导了目标运动下干涉SAR高程误差模型,将仿真海浪速度与NRCS代入进行了理论仿真,最后进行了从回波到成像到干涉处理的全链路仿真实验。两种结果能够较好地吻合,验证了理论模型的正确性。近天底工作下普通条带模式难以获得较大刈幅,本文进行误差分析时,也尝试进行了循序扫描地形观测TOPS模式下高精度测量。相关理论推导与仿真结果能为未来宽刈幅高度计系统设计与误差预算提供建议。

2 运动误差的理论推导

对于SAR成像过程,其假设目标静止不动。目标运动会引起相对偏移速度,成像与干涉处理时并未考虑此相对运动,这将导致相位测量误差,进而造成高程测量误差。由于运动,目标在SAR成像过程中方位向与距离向都会产生偏移。一般距离向偏移较小,不到1个距离分辨单元,但对于高精度的测量来说,也不可忽略。

如图1所示,图中T点箭头代表海浪3个方向速度,分为表面速度与垂直速度两类,其对于高程偏差有不同的影响。此时x轴代表方位向,y轴代表地距向,z轴代表垂直向。在成像过程中,SAR假设目标静止不动,如果目标运动则会产生成像坐标偏移。此时天线处于双发双收模式,基线两端SAR慢时间域回波可分别表示为

$$S_1(t) = A_0\omega_1(t) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R_1(v_x t, v_y t, v_z t) \right\} \quad (1)$$

$$S_2(t) = A_0\omega_2(t) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R_2(v_x t, v_y t + B, v_z t) \right\} \quad (2)$$

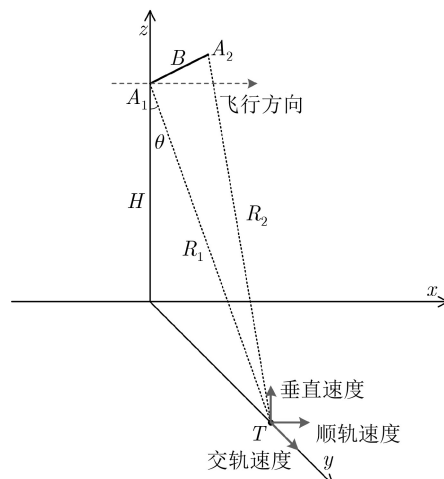


图1 干涉SAR运动目标测量几何示意图

其中, A_0 为任意复常数变量, $\omega(\cdot)$ 表示信号包络, B 为交轨基线长度, 此时基线与地距向平行, v_x 是目标顺轨速度, v_y 是交轨速度, 则 v_z 为垂直速度, 在式(1)和式(2)中代表为扰动项。由于目标 T 运动, 真实的成像点发生了偏移, 假设真实成像点为 $T'(x_t', y_t')$, 此时进行常规匹配滤波, 压缩时假设目标静止。成像时1次项与常数项相消, 考虑SAR海面成像合成孔径时间较短, 不需要高的单视分辨率, 进行相关近似, 可以推算到新的成像点位置为

$$x_t' = x_0 - \frac{(x_0 - x_t)(v_p - v_x) - (y_0 - y_t)v_y - (z_0 - z_t)v_z}{v_p} \quad (3)$$

$$\Delta x = x_t' - x_t \approx (y_0 - y_t) \frac{v_y}{v_p} + (z_0 - z_t) \frac{v_z}{v_p} = \frac{v_r}{v_p} R_0 \quad (4)$$

$$y_t' = y_t + \frac{\Delta x [2(x_0 - x_t) - \Delta x] - (2z_0 - z_t)z_t}{2(y_0 - y_t)} \quad (5)$$

$$\Delta y = y_t' - y_t = \frac{\Delta x [2(x_0 - x_t) - \Delta x] - (2z_0 - z_t)z_t}{2(y_0 - y_t)} \quad (6)$$

其中, $A_1(x_0, y_0, z_0)$ 是主天线坐标, $A_2(x_0, y_0 + B, z_0)$ 是辅天线坐标, $T(x_t, y_t, z_t)$ 为运动目标坐标, 进一步推算可得

$$\Delta y \approx \frac{(x_0 - x_t)}{(y_0 - y_t)} \Delta x - \frac{\Delta x^2}{2(y_0 - y_t)} - \frac{z_0 z_t}{(y_0 - y_t)} = \frac{R_0 \lambda f_d v_r R_0}{y_0 - y_t} - \frac{v_r^2 R_0^2}{2v_p^2 (y_0 - y_t)} - \frac{z_0 z_t}{(y_0 - y_t)} \quad (7)$$

此时 $\Delta x, \Delta y$ 分为为方位向与地距向的偏移, v_r 为运动目标径向速度, v_p 为雷达平台速度, λ 为雷达波长, f_d 为多普勒中心频率。方位向偏移 Δx 一般相对较大, 其在SAR动目标成像中研究较多[13]。

通过上述推导, 可以知道, 由于目标运动, 在距离向也会存在偏移 Δy , 关于其研究相对较少。尽管距离向偏移较小, 其在干涉处理平底相位矫正时会带来直接误差, 影响测高精度。进行进一步推导, 此时在斜距上的偏移为

$$\Delta R = \frac{(x_0 - x_t) \Delta x}{R_0} = \frac{f_d \lambda v_r R_0}{2v_p^2} \quad (8)$$

进行干涉处理, 提取相位差, 反演入射角, 然后通过斜距计算高程。此时, H 为雷达平台高度, 式(8)已经推导出了斜距向偏移 ΔR , 可得高程误差为

$$\Delta h \approx \frac{H \lambda f_d v_r}{2v_p^2} - \frac{H v_r^2}{2v_p^2} \quad (9)$$

其中, 一般情况下第1项起决定性作用, 可以看到其与多普勒中心频率和目标径向速度成正比, 可以简化为

$$\Delta h \approx \frac{H \lambda f_d v_r}{2v_p^2} \quad (10)$$

考虑海洋特性, 当同一个分辨单元内大量散射体进行统计叠加时, 海浪的速度和散射强度存在耦合项。即一个分辨单元内, 多个散射体沿雷达径向速度不同, 分辨单元的雷达径向速度为分辨单元内所有散射体的统计均值, 散射强度将对各散射点产生加权影响, 因此分辨单元内高程误差的统计均值可表示

$$\Delta \bar{h} = \frac{\langle \Delta h \sigma \rangle}{\langle \sigma \rangle} \approx \frac{H \lambda f_d \langle v_r \sigma \rangle}{2v_p^2 \langle \sigma \rangle} \quad (11)$$

因此平均高程误差 $\Delta \bar{h}$ 取决于散射加权的平均速度, 且与多普勒中心成正比。可以看到此时高程误差, 不仅与海洋运动特性 v_r 和电磁特性 σ 相关, 还与雷达多普勒中心频率、平台高度等系统参数相关。

3 仿真分析

目前SWOT卫星还处于预研阶段, 实验数据较少且不对外公开[4]。天宫二号3维干涉成像高度计由于具有实验性质实际精度相对较低[7]。对于干涉SAR高精度海洋测量可行性研究, 仿真系统必不可少。进行误差分析有3个关键步骤, 第一, 首先基于风生海浪谱模拟海洋场景; 第二, 为了考虑电磁偏差的影响, 海面的电磁散射特性需要仿真; 第三, 进行高精度SAR成像与干涉处理。接下来简短介绍仿真的基础。

3.1 仿真方法

风生海浪谱具有良好的解析特性, 本文使用Romeiser海浪谱[14]。该海浪方向谱模型是根据Apel海浪谱[15]修改而提出的, 它不仅保留了Apel海浪谱在所有波数范围的连续性和可微分性, 而且更有利于数值计算。该模型可以反映实际海洋随机特征, 其海浪方向谱解析表达式为

$$\psi(k, \phi, u_{10}) = P_L(k, u_{10}) W_H(k) \left(\frac{u_{10}}{u_n} \right)^{\beta(k)} \cdot k^{-4} S(k, \phi, u_{10}) \quad (12)$$

其中, k 表示海浪的波数, ϕ 表示海浪与风向的夹角, u_{10} 表示海面10 m高处的风速, P_L 是描述低波数段下降和JONSWAP波峰的因子[14]。通过仿真出海浪谱, 本文可以解析出海面真实高度场与速度

场, 其中高度场包括波浪造成的扰动项与真实高度, 高度场与速度场可以表示为

$$H(x, y, t) = \iint \sqrt{\phi(K_x, K_y)} \cdot \exp[j(K_x x + K_y y - \omega t) + \phi_0] \cdot dK_x dK_y + c.c. + H_0(x, y) \quad (13)$$

$$V_x(x, y, t) = \iint \omega \sqrt{\phi(K_x, K_y)} \cdot \exp[j(K_x x + K_y y - \omega t) + \phi_0] \cdot dK_x dK_y + c.c. + V_{0x}(x, y) \quad (14)$$

$$V_y(x, y, t) = \iint \omega \sqrt{\phi(K_x, K_y)} \cdot \exp[j(K_x x + K_y y - \omega t) + \phi_0] \cdot dK_x dK_y + c.c. + V_{0y}(x, y) \quad (15)$$

$$V_z(x, y, t) = \iint -j\omega \sqrt{\phi(K_x, K_y)} \cdot \exp[j(K_x x + K_y y - \omega t) + \phi_0] \cdot dK_x dK_y + c.c. \quad (16)$$

其中, $H(x, y, t)$ 是海面高度场, $\phi(K_x, K_y)$ 是波浪谱。 $V_x(x, y, t)$, $V_y(x, y, t)$, $V_z(x, y, t)$ 分别是海浪3个方向的速度场。 $H_0(x, y)$ 与 $V_{0x}(x, y)$, $V_{0y}(x, y)$ 分别是海面固有高程与速度, 其是需要反演的地球物理参数。

针对海面NRCS的仿真, 本文采用了2阶3尺度海面散射模型, 其是一种混合散射模型, 把散射单元分为大尺度波浪散射、小尺度布拉格散射与中尺度波浪散射^[16]。散射系数可以表示为

$$\rho(x, y, t) = \sqrt{\sigma(x, y, t)} \cdot \exp \left[j \left(\varphi_0 + \varphi_n(x, y, t) + \frac{4\pi D_r(x, y, t)}{\lambda} \right) \right] \quad (17)$$

其中, $\sigma(x, y, t)$ 为海面时变NRCS, φ_0 为海面散射初始随机相位, $\varphi_n(x, y, t)$ 为海面去相干随机相位, $D_r(x, y, t)$ 为散射面元的时变运动径向位移。星载SAR图像用于海洋遥感时, 合成孔径时间较短, 一般在0.1 s量级, 此时可以忽略海面NRCS随时间的变化。

3.2 仿真流程

在此次的仿真中, 海面固有的高度场与速度场都设为0, 风浪引起海面高度与速度变化都为扰动项, 反演得出的高程即为海浪引起的误差。本文进行了两种仿真, 分别为基于理论模型的近似仿真与干涉全链路仿真。理论仿真基于前面推导的误差模型, 同时考虑了电磁偏差与叠掩偏差效应引入的误差。在进行理论近似仿真后, 进行全链路仿真进行实验验证。全链路仿真误差分析流程如图2所示。

仿真包含4个步骤, 第1步, 基于给定风速和风向, 通过海浪谱产生海面高度场与速度场, 同时基于电磁参数仿真出海面NRCS; 第2步, 基于海面动态特性与电磁特性生成SAR回波, 成像处理后得到SAR单视复图像; 第3步, 进行干涉处理, 包括配准、滤波与相位解缠等, 通过前3个步骤, 可以反演得到海面高程; 第4步, 对比海浪谱生成的真实高度场, 即可得到其测量误差。

4 仿真与实验验证

不同体制的SAR具有不同的成像特性, 为了分析不同模式下海面动态误差影响程度, 本文仿真了3种不同海况下, 条带模式和TOPS模式下的海浪误差。TOPS能解决方位向混叠与扇贝效应的问题, 同时具有较大的刈幅^[17]。对于广袤海洋的监测, TOPS模式具有一定的优势。

3种海况分别为低海况、中海况与高海况, 对应着7 m/s, 10 m/s与14 m/s的海面风速。高频段意味着电磁波长较短, 能够很好地把握小尺度海洋现象, 同时也能实现较短基线设计, 能够实现单星进行双天线干涉, 电离层误差也相对较小。基于以上考虑, 本文雷达仿真选取Ka波段。

首先, 本文给出了仿真出的部分真实海洋场景与海面NRCS, 然后给出了不同雷达体制与海况下的理论误差仿真结果, 最后进行了干涉全链路仿真实验, 并且与理论仿真结果进行了对比。

4.1 海洋场景与电磁散射仿真

基于Romeiser海浪谱, 本文仿真在7 m/s, 10 m/s与14 m/s这3种风速下的海洋场景, 其中风向与方位向一致。仿真出海浪谱后, 基于式(13)–式(16)可以推导出海面高度场与速度场。

平稳后的高度场分布近似于高斯分布, 其均值接近于0。基于2阶3尺度散射模型, 本文可以仿真出每个像素点的NRCS, 此时极化方式为HH, 入射角为9°~10°之间。部分仿真NRCS场景如图3所示, 可以清晰地看到平稳海面风浪分布。

4.2 误差仿真结果

基于3种不同海况, 本文仿真了条带模式与TOPS模式下的误差。值得一提的是, 在进行理论仿真时, 本文不仅考虑了由于海浪运动引起的误差, 同时也考虑了电磁偏差与叠掩偏差, 使得仿真结果更接近于真实情况。仿真结果选取500 m²网格的分辨率, 其为初始分辨单元多视平均结果。理论仿真选取了星载海洋SAR的常用系统参数, 如表1所示。

4.2.1 条带模式

在条带模式中, SAR天线指向保持不变, 其多

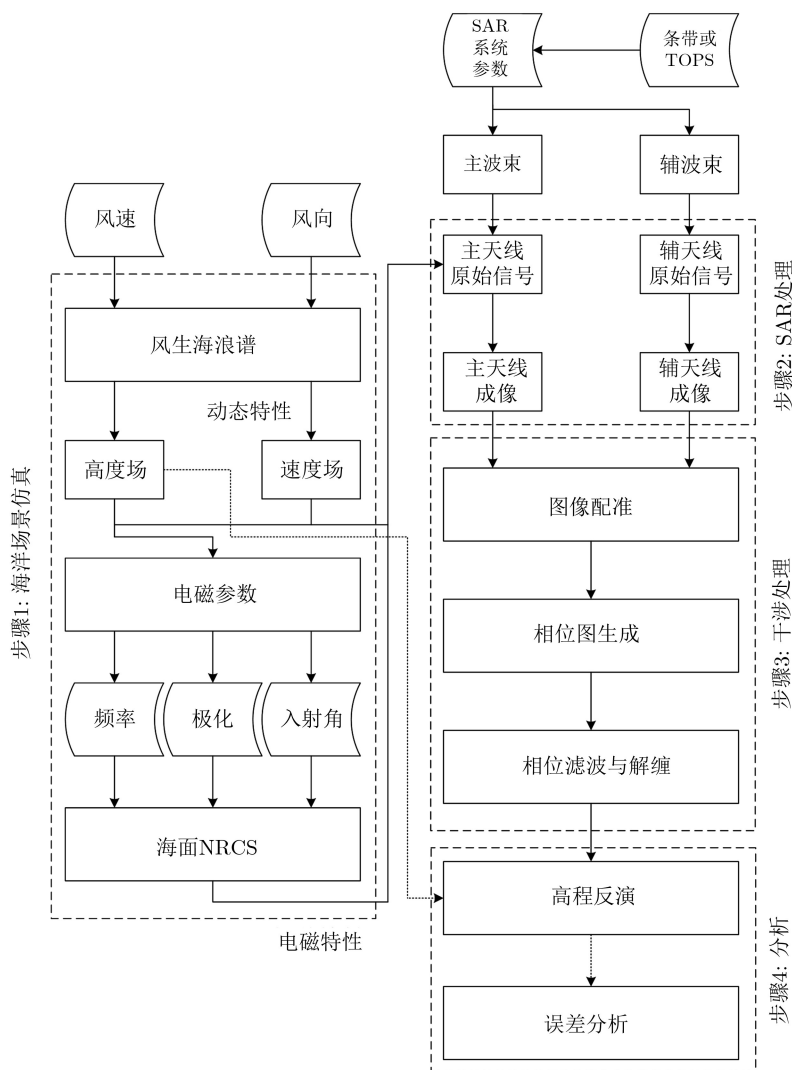


图2 误差仿真流程图



图3 部分海洋仿真场景(10 m/s风速)

表1 理论仿真系统参数

| 仿真系统参数 | 参数值 |
|--------|---------|
| 平台高度 | 800 km |
| 基线 | 10 m |
| 中心频率 | Ka波段 |
| 极化方式 | HH |
| 入射角 | 4°~4.7° |
| 距离采样率 | 0.8 m |
| 方位采样率 | 5 m |
| 距离分辨率 | 1 m |
| 方位分辨率 | 50 m |

普勒中心频率基本为0。图4为3种海况下误差仿真结果，可以看到误差随着风速增加明显变大。

由于条带模式多普勒中心保持稳定，此时误差沿方位向变化呈现波浪状，其绝对值较小，相对随机分布在0附近，且随着海况增加误差变大。进行统计分析，可以得到3种海况下误差的均方根RMS分布，如表2所示。可以看到在较低海况(7 m/s风速)下，其误差波动也就是精度在毫米级别，基本能够忽略，而在中等海况(10 m/s风速)以及高等海况(14 m/s风速)下，其已经达到厘米级波动，无法忽略，需要进行相应的补偿。

4.2.2 TOPS模式

TOPS模式下，多普勒中心频率会随着方位向变化而线性增加^[17]。同理，可以得到仿真误差分布图，如图5所示。可以看到TOPS模式下误差随着方位向变化发生了显著变化，其与多普勒中心频率变化一样，呈线性增加。同时，随着海况的增加，误差的波动也会随之增加。

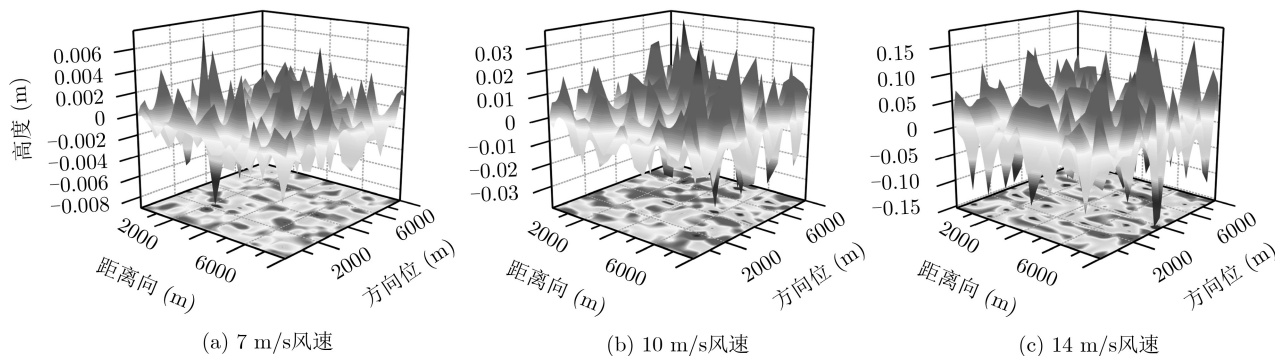


图4 条带模式理论仿真误差分布

表2 条带模式下误差RMS

| 海况 | RMS(cm) |
|------|---------|
| 低海况 | 0.2670 |
| 中等海况 | 1.3154 |
| 高海况 | 6.6361 |

进行统计分析,可以得到误差的统计特性,如表3所示。此时在较低海况下,误差RMS也达到厘米量级,其难以满足高精度的要求。所以在TOPS模式下,即使为低海况,其误差补偿方法是必须的。

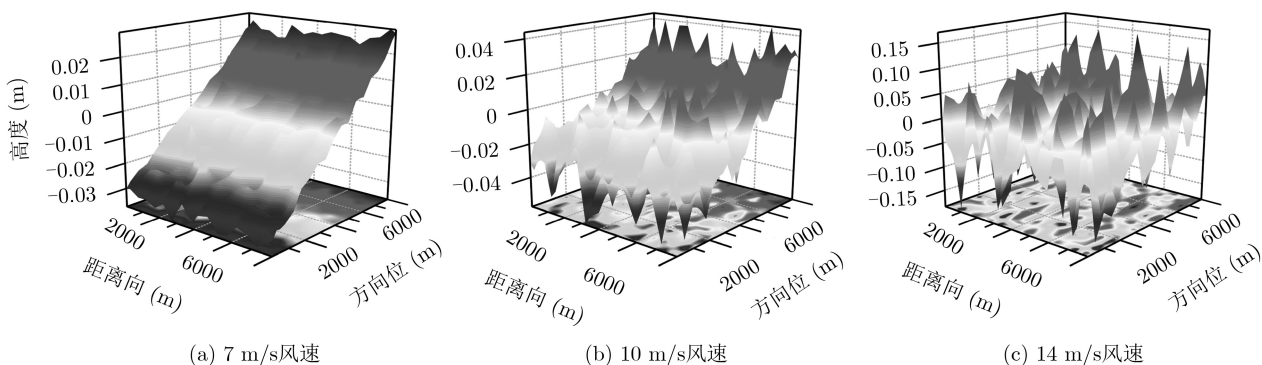


图5 TOPS模式理论仿真误差分布

4.3 全链路实验验证

本节将理论仿真结果与全链路仿真结果进行对比,此时采用合作方全链路SAR仿真系统进行验证,坐标系采用WGS84椭球坐标系。两种仿真采用一样的系统参数,如表4所示。为了更好地把握误差特性,此时采用TOPS模式进行验证,成像积分时间相对较短以保证海面高程特性不变。

如图6所示,其为理论近似仿真与全链路仿真误差对比图。其中图6(a)为理论近似仿真误差分布,图6(b)为干涉全链路仿真误差分布,可以明显看到误差沿方位向呈现近似线性变化。由于图6(a)是理论近似仿真,避免了随机误差以及系统误差等干

扰,能够更好地把握由海浪引起的误差。图6(b)由于引入了全链路流程,带入了其余误差,误差分布更为随机,且波动较大。

TOPS模式下多普勒中心沿方位向线性变化,其与误差分布变化趋势基本一致。此时,将两种仿真误差进行距离向平均,可以得到误差沿方位向分

表3 TOPS模式下误差RMS

| 海况 | RMS(cm) |
|------|---------|
| 低海况 | 1.9598 |
| 中等海况 | 2.2621 |
| 高海况 | 6.9801 |

表4 实验验证系统参数

| 实验系统参数 | 参数值 |
|--------|---------|
| 平台高度 | 852 km |
| 基线 | 12 m |
| 中心频率 | Ka波段 |
| 极化方式 | HH |
| 入射角 | 9°~12° |
| 带宽 | 65 MHz |
| 脉冲重复频率 | 3005 Hz |
| 距离分辨率 | 3 m |
| 方位分辨率 | 15 m |

布曲线，如图7所示，其中图7(a)为理论近似仿真，图7(b)为全链路仿真。

通过对比误差曲线，可以看到两种仿真误差曲线斜率基本一致，图7(a)与图7(b)初始值不同是由于平地矫正时初始参数设置不同。此时取方位向500 m²空间分辨率，计算可以得出图7(a)误差斜率为0.0095，图7(b)误差斜率为0.0104，数值十分接近，验证了本文理论模型的正确性。在前述理论推导中可以知道，只有运动引起的误差沿多普勒中心呈现线性变化，所以可以判断在海洋高程测量中，运动误差起决定性作用，影响最大，对其的误差补偿是必须攻克的关键技术。

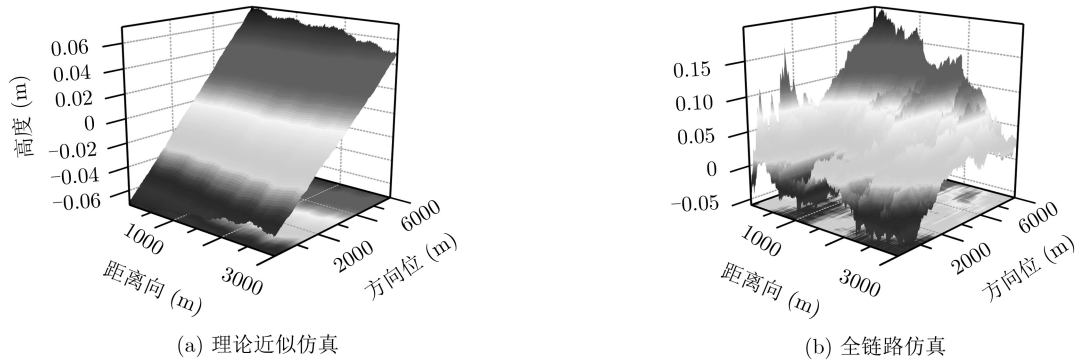


图6 理论近似仿真与全链路仿真误差

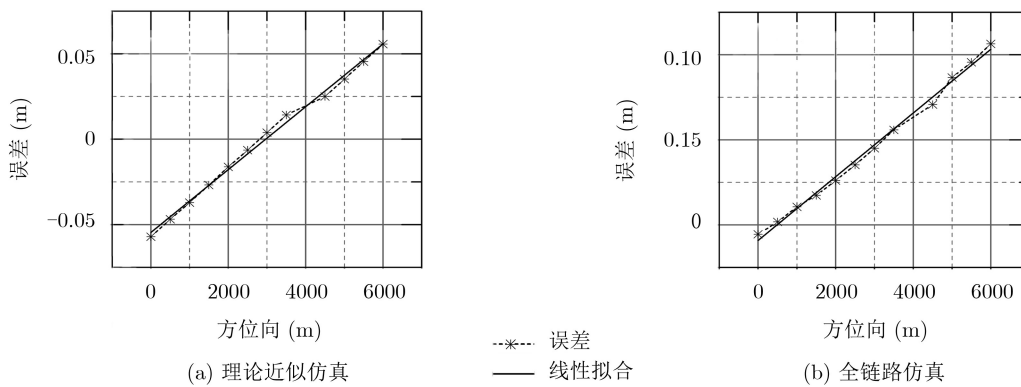


图7 误差沿方位向变化曲线

5 结束语

与陆地场景测量不同，海面动态特性会带来特有的测高误差。本文推导了由海浪运动引入的干涉SAR高程误差模型，理论分析表明该误差与SAR多普勒中心成正比，且与速度和散射的耦合项有关。同时，基于多种海况，分别进行了条带模式与TOPS模式下的理论模型仿真和全链路仿真，结果对比验证了模型的正确性。

通过对误差进行统计分析，可以知道，在条带模式低海况下时，由动态海面引起的误差量级在毫米级，基本可以忽略，能够实现厘米级精度的要求。TOPS模式由于具有较大的多普勒中心偏移，其误差呈线性变换，反演高程会发生锯齿状跳变。所以对于高海况或特殊SAR体制，基于系统参数的误差补偿方法是必须的，同时由于真实海况的复杂，海面径向运动引起的多普勒中心频率变化也需进行估计。本文相关研究可以为未来干涉SAR高度

计系统设计与误差预算提供一定参考，下一步的工作也将集中在误差补偿方法研究。

参考文献

- [1] FU L L and CAZENAVE A. Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications[M]. San Diego: Academic Press, 2001: 11–12.
- [2] ZAWADZKI L and ABLAIN M. Accuracy of the mean sea level continuous record with future altimetric missions: Jason-3 vs. Sentinel-3a[J]. *Ocean Science*, 2016, 12(1): 9–18. doi: 10.5194/os-12-9-2016.
- [3] VAZE P, KAKI S, LIMONADI D, et al. The surface water and ocean topography mission[C]. 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, 2018: 1–9. doi: 10.1109/AERO.2018.8396504.
- [4] FJORTOFT R, GAUDIN J M, POURTHIÉ 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. doi: [10.1109/TGRS.2013.2258402](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2258402).
- [5] ESTEBAN F D, POLLARD B V P, and ABELSON R. SWOT project mission performance and error budget[R]. JPL, NASA, 2017.
- [6] ZHANG Yunhua, SHI Xiaojin, WANG Hongjian, *et al.* Interferometric imaging radar altimeter on board Chinese Tiangong-2 Space Laboratory[C]. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference, Kyoto, Japan, 2018: 851–853. doi: [10.23919/APMC.2018.8617189](https://doi.org/10.23919/APMC.2018.8617189).
- [7] KONG Weiya, CHONG Jinsong, and TAN Hong. Performance analysis of ocean surface topography altimetry by Ku-band near-nadir interferometric SAR[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 933–947. doi: [10.3390/rs9090933](https://doi.org/10.3390/rs9090933).
- [8] PERAL E, RODRÍGUEZ E, and ESTEBAN-FERNÁNDEZ D. Impact of surface waves on SWOT's projected ocean accuracy[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(11): 14509–14529. doi: [10.3390/rs71114509](https://doi.org/10.3390/rs71114509).
- [9] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333–382. doi: [10.1109/5.838084](https://doi.org/10.1109/5.838084).
- [10] PIRES N, FERNANDES M J, GOMMENGINGER C, *et al.* Improved sea state bias estimation for altimeter reference missions with altimeter-only three-parameter models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(3): 1448–1462. doi: [10.1109/tgrs.2018.2866773](https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2866773).
- [11] DUBOIS P and CHAPRON B. Characterization of the ocean waves signature to assess the Sea State Bias in wide-swath interferometric altimetry[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 3789–3792. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8518813](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518813).
- [12] CHEN Yao, WANG Xiaoqing, HUANG Mo, *et al.* Analysis of the sea state bias in interferometric radar altimeter[C]. 2018 China International SAR Symposium, Shanghai, China, 2018: 1–7. doi: [10.1109/SARS.2018.8551968](https://doi.org/10.1109/SARS.2018.8551968).
- [13] PERRY R P, DIPIETRO R C, and FANTE R L. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188–200. doi: [10.1109/7.745691](https://doi.org/10.1109/7.745691).
- [14] ROMEISER R, ALPERS W, and WISMANN V. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface: 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C11): 25237–25250. doi: [10.1029/97jc00190](https://doi.org/10.1029/97jc00190).
- [15] APEL J R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C8): 16269–16291. doi: [10.1029/94jc00846](https://doi.org/10.1029/94jc00846).
- [16] 余颖, 王小青, 朱敏慧, 等. 基于二阶散射的海面三尺度雷达后向散射模型[J]. *电子学报*, 2008, 36(9): 1771–1775. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022).
YU Ying, WANG Xiaoqing, ZHU Minhui, *et al.* Three-scale radar backscattering model of the ocean surface based on second-order scattering[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(9): 1771–1775. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.09.022).
- [17] MANCON S, GUARNIERI A M, GIUDICI D, *et al.* On the phase calibration by multisquint analysis in TOPSAR and stripmap interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(1): 134–147. doi: [10.1109/TGRS.2016.2598686](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2598686).
- 陈尧: 男, 1995年生, 博士生, 研究领域为雷达信号处理与系统仿真.
- 黄默: 男, 1973年生, 研究员, 博士生导师, 研究领域为雷达系统总体.
- 王小青: 男, 1978年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为SAR海洋遥感与机理.
- 黄海风: 男, 1976年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式星载系统理论.