

1-4-2019

Key Points Analysis and Simulation for Sea Surface Velocity Estimation Based on Spaceborne ATI-SAR System

Yan He

College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Daiyin Zhu

College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Key Points Analysis and Simulation for Sea Surface Velocity Estimation Based on Spaceborne ATI-SAR System

Abstract

Abstract: ATI (Along Track Interferometric) technique is one of the most important applications for spaceborne SAR (Synthetic Aperture Radar) systems. ATI-SAR systems can directly detect the Doppler offset associated with each pixel of a SAR image. This is achieved by interferometric combination of two complex SAR images of the same scene. The sea surface velocity can be estimated via the calculated interferometric phase. The baseline length, velocity resolution and velocity estimation error are three important factors in the process of spaceborne ATI-SAR system design, and these three points are carefully investigated here. *The basic principle and expression of spaceborne ATI-SAR system are presented. The selection method of baseline length is discussed. The velocity resolution is studied, as well as the velocity estimation error. Some conclusions are drawn to play an important role in future spaceborne ATI-SAR system design.*

Keywords

spaceborne synthetic aperture radar, along track interferometric, sea surface velocity estimation, error analysis

Recommended Citation

Yan He, Zhu Daiyin. Key Points Analysis and Simulation for Sea Surface Velocity Estimation Based on Spaceborne ATI-SAR System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3861-3869.

星载 ATI-SAR 系统洋流测速要点分析与仿真

闫贺, 朱岱寅

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016)

摘要: 沿航迹干涉(ATI)技术是星载 SAR 系统的重要应用之一。通过对同一区域获取的复数 SAR 图像进行干涉处理, ATI-SAR 系统可以直接检测到 SAR 图像每个像素点的多普勒偏移。对于进行洋流测速的星载 ATI-SAR 系统而言, 基线长度、速度分辨率及速度测量误差是系统设计的三大要素, 因此这里针对此三大要素进行了详细分析。给出了星载 ATI-SAR 的基本原理并推导了相应的公式。总结了基线选择的基本方法。分析和推导了速度分辨率和洋流测速误差。得出了相关结论, 这些结论对未来的洋流测速 ATI-SAR 系统的设计具有重要的指导作用。

关键词: 星载 SAR; ATI; 洋流测速; 误差分析

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 10-3861-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810032

Key Points Analysis and Simulation for Sea Surface Velocity Estimation Based on Spaceborne ATI-SAR System

Yan He, Zhu Daiyin

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: ATI (Along Track Interferometric) technique is one of the most important applications for spaceborne SAR (Synthetic Aperture Radar) systems. ATI-SAR systems can directly detect the Doppler offset associated with each pixel of a SAR image. This is achieved by interferometric combination of two complex SAR images of the same scene. The sea surface velocity can be estimated via the calculated interferometric phase. The baseline length, velocity resolution and velocity estimation error are three important factors in the process of spaceborne ATI-SAR system design, and these three points are carefully investigated here. *The basic principle and expression of spaceborne ATI-SAR system are presented. The selection method of baseline length is discussed. The velocity resolution is studied, as well as the velocity estimation error. Some conclusions are drawn to play an important role in future spaceborne ATI-SAR system design.*

Keywords: spaceborne synthetic aperture radar; along track interferometric; sea surface velocity estimation; error analysis

引言

利用沿航迹干涉(ATI)的方法进行海面洋流测



收稿日期: 2016-08-26 修回日期: 2017-01-05;
基金项目: 国家自然科学基金(61501231), 江苏省自然科学基金(BK20150759), 航空科学基金(20152052027), 中央高校基本科研业务费专项资金(NZ2016105);
作者简介: 闫贺(1985-), 男, 江苏徐州, 博士生, 讲师, 研究方向为合成孔径雷达系统设计及信号处理。

速最早是由 Goldstein 和 Zebker 在 1987 年提出^[1]。ATI 方法借助雷达沿航迹排列的 2 个通道(或两颗卫星)对观测的区域分别进行 SAR 成像, 然后对 2 幅 SAR 图像进行干涉处理并得到干涉相位, 利用干涉相位结合系统参数推算洋流速度。相比于传统的洋流测速方法, ATI 方法的突出优点是同时具备高分辨、宽测绘、快时间的测量能力, 而且还可以

<http://www.china-simulation.com>

• 3861 •

提供包括海浪、内波、漩涡、涌浪等其他信息，因此在海洋学、海洋环境监测、海洋气象预报等领域有着广泛的应用前景。随着 SAR 成像理论以及 InSAR 理论的不断成熟完善，ATI 相关理论和实践也得到了不断发展。2001 年 IEEE 的 GRS 年会里有针对 ATI 海洋遥感问题的专题研究，2002 年 NASA 的地球科学与应用小组召开了 ATI 理论及应用研讨会，这 2 次会议的成功举行极大推动了 ATI 技术的实用化。此外，利用机载平台进行的 ATI 洋流测速试验也取得了成功。例如，德国的 EURoPAR 项目，用于研究机载 ATI 洋流测速，美国喷气实验室的 AIRSAR 系统也进行了多次 ATI 试验，这些试验录取了大量实测数据，为后面的分析与实际应用奠定了基础。

随着机载 ATI 技术的试验验证，推动了星载 ATI 技术的发展。目前的星载 SAR 系统中，TerraSAR-X 系统和 SRTM 系统均具有 ATI 洋流测速的能力。星载 ATI-SAR 系统相比于机载 ATI-SAR 系统的优势在于：具有更大的覆盖范围、更适合开展全球洋流测速。同时星载 ATI-SAR 系统的运动轨迹相比于机载 ATI-SAR 系统要稳定的多(机载系统容易受到气流和风向的影响，运动轨迹不是理想的直线)，因此星载 ATI-SAR 系统的测速误差要小得多。

但是，根据 SAR 成像相关理论，通过 ATI 技术仅能获得洋流的一维径向速度，无法实现二维洋流速度的测量。为了解决这个问题，有人提出对观测区域采用两次成像，且这两次成像的平台轨迹相互垂直，这样就可以分别获得洋流的径向速度和切向速度。然而，对于星载系统而言，虽然上升轨道和下降轨道能够获得相交基线，但是数小时或数天重复航过，待测洋流场已经发生了变化，其获得的二维洋流分布也就失去了意义。

针对这种情况，文献[2-3]中又提出了一种双波束干涉 DBI(Dual-Beam Interferometer)方案，即通过 2 颗卫星的前后 2 个波束分别获取观测区域的 4

幅 SAR 图像，包括 2 幅前视 SAR 图像和 2 幅后视 SAR 图像。然后分别获取 2 幅前视 SAR 图像的干涉相位和 2 幅后视 SAR 图像的干涉相位，通过干涉相位计算出 2 个波束方向对应的径向速度。利用 2 个波束方向的径向速度即可反演出洋流实际的二维速度。上述 2 组波束可以通过 2 副天线分别发射和接收；也可以通过 2 副天线产生，即每副天线分别产生前视与后视波束。DBI 方案在理论上是没有问题的，但是通过对其进行误差分析可以发现 DBI 进行洋流测速的误差通常会非常大(取决于系统参数以及波束的角度)，往往无法洋流测速的精度要求。因此，实用化洋流二维速度测量的方案还有待进一步研究。

然而，很多应用获得一维洋流速度就足够了，如类似一维流动形式的河流、海洋内波，以及某些对称的海洋现象如漩涡等。因此，本文针对星载 ATI-SAR 系统进行洋流测速时的基线选择、速度分辨率和测速误差进行分析与仿真。

论文安排如下：首先给出星载 ATI-SAR 洋流测速原理，接着对星载 ATI-SAR 系统基线长度选择和速度分辨率进行分析，然后进行洋流测速误差分析，最后通过仿真实验得出相关结论。

1 星载 ATI 洋流测速原理

图 1 给出了星载 ATI 系统几何关系图，采用一发两收方式(可以是 2 颗卫星，也可以是 1 颗卫星的 2 个通道，这里以 2 颗卫星为例进行讨论)。图中 xyz 坐标系为右手坐标系，以卫星飞行方向作为 x 轴，z 轴垂直向下指向地心，y 轴与 z 轴构成了距离-俯仰平面。卫星 1 在 t 时刻的位置 $A_1(t)$ 为 xyz 坐标系的中心。假设卫星 2 在 $t+\tau$ 时刻(相对观测目标的斜距为 $R_2(t+\tau)$)与卫星 1 在 t 时刻(相对观测目标的斜距为 $R_1(t)$)的 x 轴分量相同，即 $B_x = 0$ ，对应的时间延迟为 τ 。同时，卫星 2 的等效相位中心的位置为 $A_2'(t+\tau)$ ，斜距为 $R_2'(t+\tau)$ 。则根据图 1，沿航迹干涉相位可以计算为^[4]：

$$\Phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda} [R'_1(t) - R'_2(t + \tau)] = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{B_z}{2} \cos \theta + \frac{B_y}{2} \sin \theta + V_r \tau \right) \quad (1)$$

其中, B_z , B_y 分别双星重叠位置误差在 z 轴和 y 轴的分量, θ 为天线视角, V_r 表示观测目标的斜距径向速度, 以接近卫星的方向为径向速度的正方向。

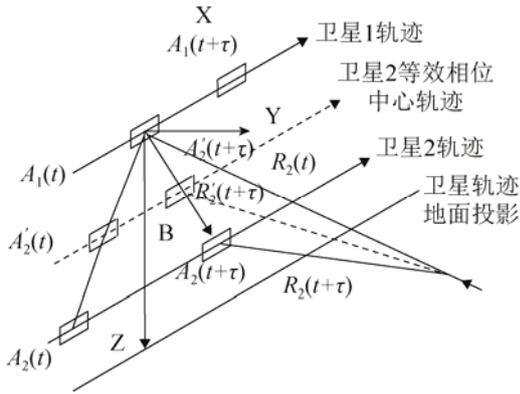


图 1 沿航迹干涉 ATI 几何关系图

Fig. 1 The geometry of Along Track Interferometry (ATI)

在理想情况下, B_z 和 B_y 均为零, 此时沿航迹干涉相位为:

$$\Phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot V_r \cdot \tau \quad (2)$$

通过空间几何关系, 可以得时间延迟 τ 为:

$$\tau = \frac{d}{V} \quad (3)$$

其中, V 表示卫星 2 的速度, d 表示一发两收方式对应的基线长度。

则式(2)可以表示为:

$$\Phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{V} \cdot V_r \quad (4)$$

若观测目标相应的地面径向速度为 V_{gr} , 则沿航迹干涉相位为:

$$\Phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{V} \cdot V_{gr} \cdot \sin(\theta_{inc}) \quad (5)$$

其中, θ_{inc} 表示入射角。由此可见, 根据测量的干涉相位值可实现目标的径向速度估计。这就是 ATI 方法进行洋流测速的基本原理。

2 基线长度分析

从式(5)中可以看出: 在洋流径向速度相同的情况下, 基线长度的变化会带来 2 个方面的影响。首先, 基线越长, 引起的相位变化就越大, 则越容易从噪声引起的相位扰动中区分开来。换句话说, 基线越长, 对应的洋流测速误差就越小。其次, 在洋流径向速度相同的情况下, 基线越长, 引起的相位变化就越大, 越容易发生相位 2π 周期性缠绕现象。换句话说, 基线越长, 回波相位越容易出现 2π 模糊, 从而带来洋流测速的速度模糊。综上所述, 基线长度越长, 带来的好处是减小测速误差, 带来的坏处是增加速度模糊的可能性。

为了解决上述基线长度选择的问题, 可以采用长短基线结合的手段。首先, 利用长短基线同时进行数据测量。然后, 根据长基线获取的数据反演洋流速度, 根据短基线获取的数据实现速度解模糊。通过长短基线结合, 可以在保证测速精度的同时, 增加系统可测量的最大不模糊速度。

需要注意的是, 在使用长基线时, 并不是基线越长, 测速误差就越小。因为随着基线长度的增加, 用于进行干涉操作的 2 幅 SAR 图像的相关性降低, 导致干涉相位误差增大。除了基线长度外, 2 幅 SAR 图像的相关性还取决于: 极化方式、波长、风速大小、雷达下视角等因素^[5]。图 2 给出了 2 幅 L 波段 SAR 图像相关性曲线^[5], 其中横坐标时间延迟 $\tau = \frac{d}{V}$ 。在实际星载 ATI-SAR 系统设计时可以以该图作为参考。例如, 从图中可以看出, L 波段、VV 极化方式, 风速为 10 m/s 时, 为了保证 2 幅 SAR 图像的相关性不低于 0.5, 时间延迟的最大取值为 50 ms, 根据卫星的速度可以推算基线长度的大概范围。需要说明的是, 文献[5]中指出, VV 极化和 HH 极化对 ATI 性能的影响差别不大, 只是 VV 极化的 SNR 会略大于 HH 极化(国外洋流测速系统多为 VV 极化方式, 目前查到的文献均是关于 VV 极化方式的 SAR 图像相关性曲线图)。

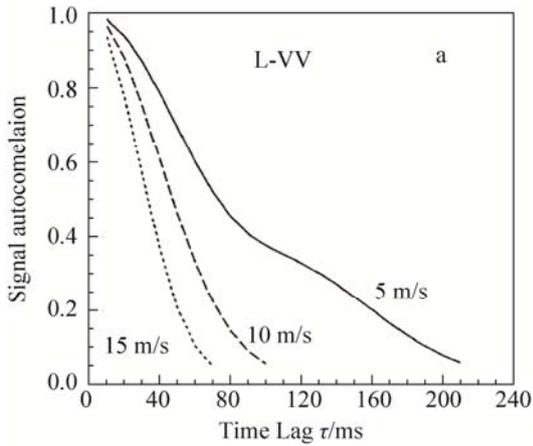


图2 干涉图像相关性随时间延迟变化曲线图

Fig. 2 The relation curves between the correlation and the time leg

3 速度分辨率分析

有关洋流测速的文献中没有提及最小可检测速度的概念^[6-13],而是用速度分辨率和测速误差作为系统的性能指标。本节主要进行洋流测速的速度分辨率分析,在第4节中给出洋流测速误差分析。

按照文献[5]中给出的公式:

$$\frac{\Delta v_{ATI}}{\Delta \phi} = \frac{c}{720 f_e \sin(\theta_{inc})} \frac{1}{\tau} \left[\frac{ms^{-1}}{deg} \right] \quad (6)$$

其中 Δv_{ATI} 代表单位径向速度的变化(速度分辨率), $\Delta \phi$ 代表单位干涉相位的变化(干涉相位分辨率), c 代表光速, f_e 表示载频, θ_{inc} 表示入射角, τ 表示时间延迟。

通常的 ATI 系统对于干涉相位的分辨率最大为 1° , 而速度分辨率为 0.05 m/s 即可满足实际洋流测速要求^[5]。

假如星载 ATI-SAR 系统的波束入射角为 30° , 载频为 1.25 GHz , 卫星速度为 7478 m/s , 可以得到 $\frac{\Delta v_{ATI}}{\Delta \phi}$ 和时间延迟 τ 之间的关系曲线如图 3(a)所示。可以看出, 该比值随着时间延迟的增加而逐渐减小。

由于 $\tau = \frac{d}{V}$, 则上述公式可以变换为:

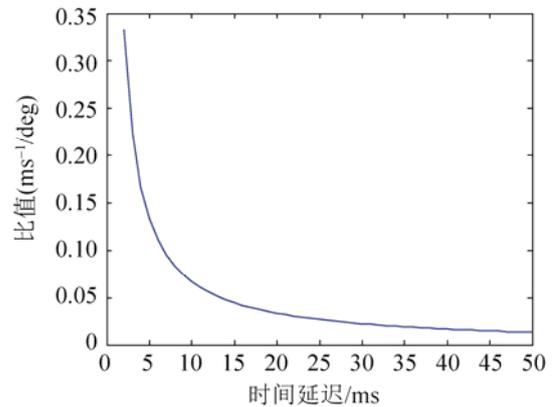
$$\Delta v_{ATI} = \frac{c}{720 f_e \sin(\theta_{inc})} \cdot \frac{V}{d} \cdot \Delta \phi \left[\frac{ms^{-1}}{deg} \right] \quad (7)$$

令 $\Delta \phi = 1^\circ$, 则在上述系统参数下, 可以得到速度分辨率 Δv_{ATI} 和基线长度 d 之间的关系曲线如图 3(b)所示。从图中可以看出, 随着基线长度的增加, 速度分辨率逐渐变高。

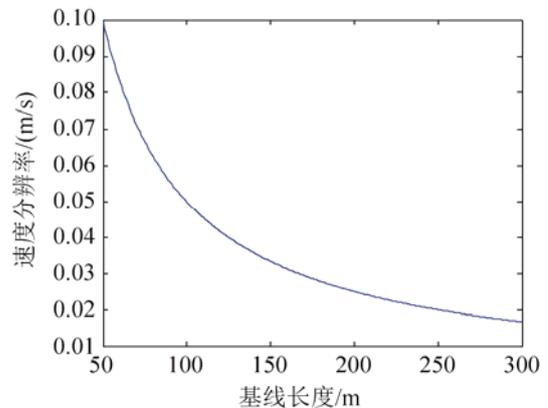
在最大的干涉相位分辨率以及可满足实际需求的速度分辨率下, 即令 $\Delta v_{ATI} = 0.05 \text{ m/s}$, $\Delta \phi = 1^\circ$, 可以得到最短基线长度和入射角度的关系为:

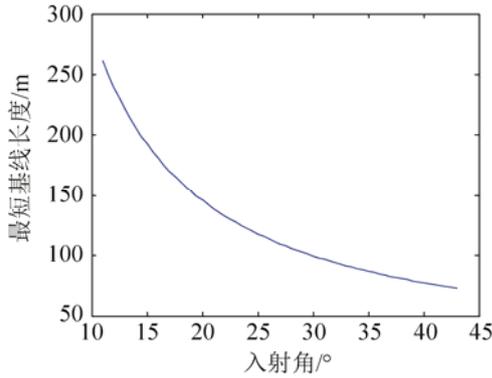
$$d_{min} = \frac{c \cdot V}{36 \cdot f_e \cdot \sin(\theta_{inc})} \quad (8)$$

同样利用上述系统参数, 在入射角为 $11^\circ - 43^\circ$ 范围内, 要使得速度分辨率达到 0.05 m/s , 相应的最短基线长度范围如图 3(c)所示。从图 3(c)中可以看出, 随着入射角的增加, 所需要的最短基线长度反而减小。



(a) 速度分辨率/干涉相位分辨率--时间延迟关系曲线图

(b) 速度分辨率与基线长度关系曲线(入射角 30°)



(c) 为满足速度分辨率要求不同入射角下的最短基线长度

图 3 速度分辨率分析曲线

Fig. 3 The analysis curves of velocity resolution

4 测速精度分析

为了分析影响洋流速度测量精度的误差源, 将式(1)改写为:

$$V_r = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{12} - \frac{B_z}{2} \cos \theta - \frac{B_y}{2} \sin \theta \right) \quad (9)$$

Φ_{12} 超过 2π 后将会涉及相位模糊的问题, 对于洋流测速来说, 由于洋流速度通常较慢, 因此可以考虑将 Φ_{12} 的范围限定在 $[-\pi, \pi]$ 之内, 对应的速度范围为 $[-V_{rm}, V_{rm}]$, 其中 V_{rm} 表示最大不模糊速度, 它与时间延迟 τ 的关系可以表示为:

$$\tau = \frac{\lambda}{4V_{rm}} \quad (10)$$

根据余弦定理可以得到关于天线视角的表示式:

$$\cos \theta = \frac{a^2 + R^2 - (r_e + h)^2}{2aR} \quad (11)$$

其中, R 表示卫星相对观测目标的斜距, h 表示观测目标的平均海拔高度, r_e 表示地球半径, a 表示卫星轨道半径。

在式(9)中, 与洋流测速有关的各个分量之间是互不相关的, 则洋流测速误差可以表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_{V_r}^2 = & \left(\frac{\partial V_r}{\partial V} \right)^2 \sigma_V^2 + \left(\frac{\partial V_r}{\partial d} \right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial V_r}{\partial \Phi_{12}} \right)^2 \sigma_{\Phi_{12}}^2 + \\ & \left(\frac{\partial V_r}{\partial B_y} \right)^2 \sigma_{B_y}^2 + \left(\frac{\partial V_r}{\partial B_z} \right)^2 \sigma_{B_z}^2 + \\ & \left(\frac{\partial V_r}{\partial h} \right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{\partial V_r}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial V_r}{\partial R} \right)^2 \sigma_R^2 \quad (12) \end{aligned}$$

结合式(9)(10)(11), 式(12)中的各个偏导可以分别表示为:

$$\frac{\partial V_r}{\partial V} = \frac{1}{d} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{12} - \frac{B_z}{2} \cos \theta - \frac{B_y}{2} \sin \theta \right) \quad (13)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial d} = -\frac{4V_{rm}}{\lambda d} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{12} - \frac{B_z}{2} \cos \theta - \frac{B_y}{2} \sin \theta \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial \Phi_{12}} = \frac{V_{rm}}{\pi} \quad (15)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial B_y} = \frac{2V_{rm}}{\lambda} \sin \theta \quad (16)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial B_z} = \frac{2V_{rm}}{\lambda} \cos \theta \quad (17)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial h} = -\frac{4V_{rm} r_e}{\lambda R a} \left(\frac{B_z}{2} + \frac{1}{\tan \theta} \frac{B_y}{2} \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial a} = \frac{4V_{rm}}{\lambda} \left(\frac{1}{R} - \frac{\cos \theta}{a} \right) \left(\frac{B_z}{2} + \frac{1}{\tan \theta} \frac{B_y}{2} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial R} = \frac{4V_{rm}}{\lambda} \left(\frac{1}{a} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \left(\frac{B_z}{2} + \frac{1}{\tan \theta} \frac{B_y}{2} \right) \quad (20)$$

其中, σ_V , σ_d , $\sigma_{\Phi_{12}}$, σ_{B_y} , σ_{B_z} , σ_h , σ_a , σ_R 分别表示卫星 2 的速度测量误差, 基线长度测量误差, 干涉相位误差, 双星重叠位置 y 轴方向测量误差, 双星重叠位置 z 轴方向测量误差, 高度测量误差, 轨道半径测量误差, 斜距测量误差。

在最差的情况下, 有:

$$\frac{V}{d} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{12} - \frac{B_z}{2} \cos \theta - \frac{B_y}{2} \sin \theta \right) \cong V_{rm} \quad (21)$$

$$B_y \cong B_z \cong B_{\max} = \max \{ |B_y|, |B_z| \} \quad (22)$$

其中, B_{\max} 表示 B_y 与 B_z 的最大值, 这里称为基线控制误差。

另外, 在下面的洋流测速误差分析中, 统一将测速误差量除以最大值 V_{rm} 形成无单位的数值以便于简化分析。下面分别推导上述误差源对应的洋流测速误差表达式。

(1) 卫星 2 的速度测量误差引起的洋流测速误差根据式(13)和式(21), 可得:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial V_r}{\partial V} \right| \frac{\sigma_V}{V_{rm}} = & \left| \frac{1}{d} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{12} - \frac{B_z}{2} \cos \theta - \frac{B_y}{2} \sin \theta \right) \right| \frac{\sigma_V}{V_{rm}} = \frac{\sigma_V}{V} \quad (23) \end{aligned}$$

(2) 沿航迹间距测量误差引起的洋流测速误差

根据式(14)和式(21), 可得:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial d} \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_d}{V_{rm}} = \left. \frac{4V_{rm}}{\lambda d} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{12} - \frac{B_z}{2} \cos \theta - \frac{B_y}{2} \sin \theta \right) \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_d}{V_{rm}} = 4 \frac{V_{rm}}{\lambda V} \cdot \sigma_d \quad (24)$$

(3) 干涉相位误差引起的洋流测速误差

根据式(15)和式(21), 可得:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial \Phi_{12}} \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_{\Phi_{12}}}{V_{rm}} = \frac{V_{rm}}{\pi} \frac{\sigma_{\Phi_{12}}}{V_{rm}} = \frac{\sigma_{\Phi_{12}}}{\pi} \quad (25)$$

而干涉相位误差可以表示为:

$$\sigma_{\Phi_{12}} = |\sigma_{\Phi_\gamma}| + |\sigma_{\Phi_e}| \quad (26)$$

式中: σ_{Φ_γ} 表示由相干系数的大小决定的相位误差, σ_{Φ_e} 表示由通道误差导致的干涉相位误差, 这2个误差是相互独立的。 σ_{Φ_γ} 可以表示为:

$$\sigma_{\Phi_\gamma} = \frac{1}{\sqrt{2N_L}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (27)$$

其中, N_L 表示多视处理时的视数, γ 表示总的相干系数。

干涉 SAR 图像的相干系数与图像的 SNR、基线对应的时间延迟、空间基线误差等因素有关^[13], 且这些因素之间相互独立, 他们对应的相干系数的乘积便是总的相干系数计算公式。由于在上述误差模型中, 空间基线误差作为一个误差源被单独进行分析, 因此这里就不考虑它对干涉图像相干性的影响。

与信噪比 SNR 有关的相干系数可以表示为:

$$\gamma_1 = \frac{SNR}{1+SNR} \quad (28)$$

与时间延迟有关的相干系数 γ_2 可以从图 2 中查到, 则总的相干系数可以表示为:

$$\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \quad (29)$$

(4) 双星重叠位置 y 轴方向测量误差引起的洋流测速误差

根据式(16)和式(21), 可得:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial B_y} \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_{B_y}}{V_{rm}} = \frac{2V_{rm}}{\lambda} \sin \theta \frac{\sigma_{B_y}}{V_{rm}} = \frac{2}{\lambda} \cdot \sin \theta \cdot \sigma_{B_y} \quad (30)$$

(5) 双星重叠位置 z 轴方向测量误差引起的洋流测速误差

根据式(17)和式(21), 可得:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial B_z} \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_{B_z}}{V_{rm}} = \frac{2V_{rm}}{\lambda} \cos \theta \frac{\sigma_{B_z}}{V_{rm}} = \frac{2}{\lambda} \cdot \cos \theta \cdot \sigma_{B_z} \quad (31)$$

(6) 高度测量误差引起的洋流测速误差

根据式(18)和式(21), 可得:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial h} \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_h}{V_{rm}} = \frac{4V_{rm} r_e}{\lambda R a} \left(\frac{B_z}{2} + \frac{1}{\tan \theta} \frac{B_y}{2} \right) \frac{\sigma_h}{V_{rm}} \cong \frac{4r_e}{\lambda R a} \left(1 + \frac{1}{\tan \theta} \right) \frac{B_{\max}}{2} \cdot \sigma_h \quad (32)$$

(7) 轨道半径测量误差引起的洋流测速误差

根据式(19)和式(21), 可得:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial a} \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_a}{V_{rm}} = \frac{4V_{rm}}{\lambda} \left(\frac{1}{R} - \frac{\cos \theta}{a} \right) \left(\frac{B_z}{2} + \frac{1}{\tan \theta} \frac{B_y}{2} \right) \frac{\sigma_a}{V_{rm}} \cong \frac{4}{\lambda} \left(\frac{1}{R} - \frac{\cos \theta}{a} \right) \left(1 + \frac{1}{\tan \theta} \right) \frac{B_{\max}}{2} \cdot \sigma_a \quad (33)$$

(8) 斜距测量误差引起的洋流测速误差

根据式(20)和式(21), 可得:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial R} \right|_{V_{rm}} \frac{\sigma_R}{V_{rm}} = \frac{4V_{rm}}{\lambda} \left(\frac{1}{a} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \left(\frac{B_z}{2} + \frac{1}{\tan \theta} \frac{B_y}{2} \right) \frac{\sigma_R}{V_{rm}} \cong \frac{4}{\lambda} \left(\frac{1}{a} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{\tan \theta} \right) \frac{B_{\max}}{2} \cdot \sigma_R \quad (34)$$

5 洋流测速误差计算实例

为了更加形象的表示系统参数与测速误差之间的关系, 我们借助 MATLAB 软件进行仿真分析。仿真实验中采用的系统参数分别为: 视角为 30° , 载频为 1.25 GHz, 卫星速度为 7 478 m/s, 地球半径取 6 371 km, 基线长度设为 300 m, 即两星间距

为 500 m(一发两收模式), 轨道高度 750 km, 地面平均海拔高度 300 m, 最大通道相位误差 8°。

系统参数测量误差分别为: 卫星 2 的速度测量误差为 0.05 m/s, 沿航迹间距测量误差 5×10^{-3} m, SNR=20 dB, 多视处理的视数为 8, 双星重叠位置 y 轴测量误差 5×10^{-3} m, 双星重叠位置 z 轴测量误差 5×10^{-3} m, 高度测量误差 10 m, 轨道半径测量误差 1 m, 斜距测量误差 2 m, 基线控制误差 5 m, 通过图 2 可查得 300 m 基线对应的干涉图像相干系数约为 0.61。

在上述参数下, 可得到 8 个误差源对应的洋流测速误差(相对于最大不模糊速度 V_m), 如表 1 所示。其中, 最大不模糊速度 V_m 经计算为 1.794 7 m/s, 代入表 1 可得 8 个误差源引起的具体测速误差值。

表 1 各误差源对应的洋流测速误差值

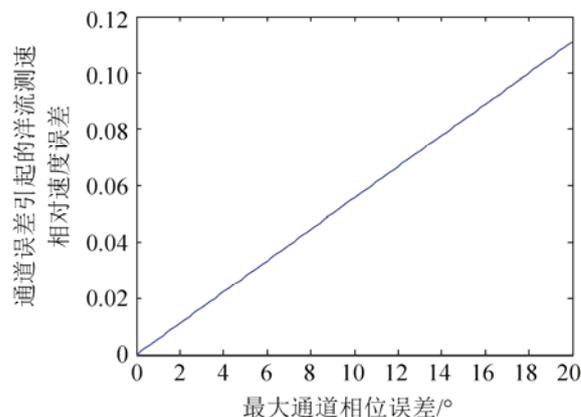
Tab. 1 The current velocity errors with respect to different error sources

误差源	引起的洋流测速误差	
卫星 2 的速度测量误差	$6.69 \times 10^{-6} \times V_m$	1.20×10^{-5} m/s
基线长度测量误差	$1.67 \times 10^{-5} \times V_m$	3.00×10^{-5} m/s
干涉相干系数误差	$0.11 \times V_m$	0.15×0.20 m/s
位误差 通道相位误差	$0.04 \times V_m$	V_m 0.07 m/s
双星重叠位置 y 轴方向测量误差	$0.02 \times V_m$	0.04 m/s
双星重叠位置 z 轴方向测量误差	$0.04 \times V_m$	0.08 m/s
高度测量误差	$0.01 \times V_m$	0.02 m/s
轨道半径测量误差	$2.59 \times 10^{-6} \times V_m$	4.65×10^{-6} m/s
斜距测量误差	$8.05 \times 10^{-5} \times V_m$	1.44×10^{-4} m/s
总的测量误差(RMS)	$0.16 \times V_m$	0.29 m/s

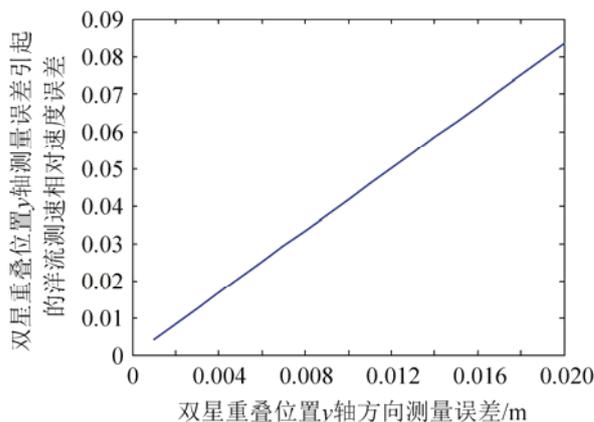
从表 1 中可以看出, 对洋流测速影响比较大的误差来源有: 干涉相位误差, 双星重叠位置 y 轴方向测量误差, 双星重叠位置 z 轴方向测量误差, 高度测量误差。为了进一步观察上述 4 个误差源对洋流测速误差的影响, 这里分别绘制相应的误差曲线图, 如图 4 所示(注: 图中纵坐标表示的均是相对于 V_m 的相对测速误差)。

通过图 4 可以看出主要的误差源对测速误差

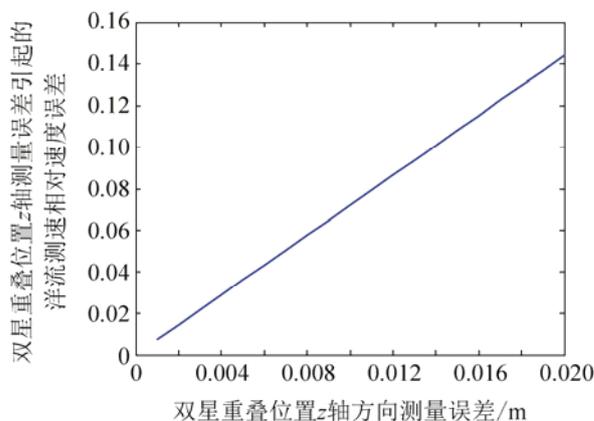
的定量关系, 在实际应用中需要把相应的误差源控制在适当的范围之内。另外, 从公式(27)~(29)可以看出, 测速误差还与 SNR, SAR 多视处理的视数、两幅 SAR 图像的相关系数有关系。对这些关键参数进行仿真, 结果如图 5 所示。



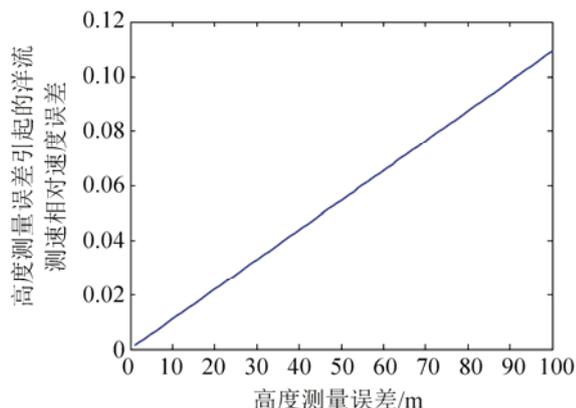
(a) 不同通道相位误差下的洋流测速相对误差图



(b) 双星重叠位置 y 轴方向测量误差对应的测速误差图



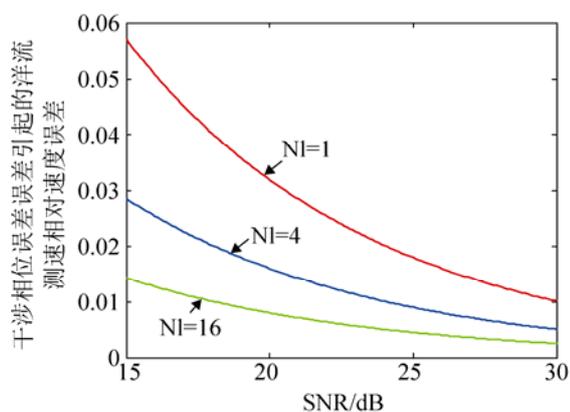
(c) 双星重叠位置 z 轴方向测量误差对应的测速误差图



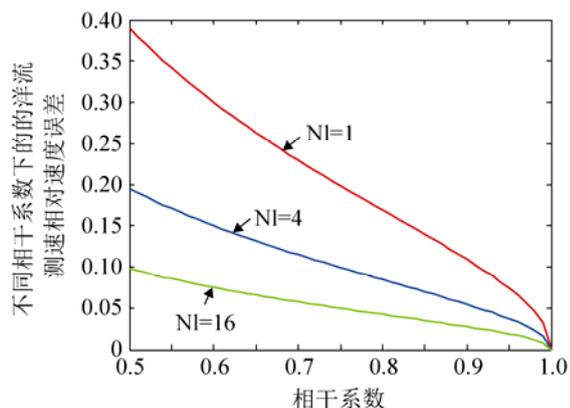
(d) 高度测量误差对应的测速误差图

图4 主要误差源的测速相对误差图

Fig. 4 The velocity relative error curves with main error sources



(a) 不同 SNR 和多视视数对应的相对测速误差



(b) 不同相干系数下的洋流测速相对误差曲线

图5 测速误差曲线图

Fig. 5 The velocity error curves with different error sources

从图 5 中可以看出,提升系统的 SNR、SAR 多视处理的视数、2 幅 SAR 图像的相关系数这 3 个物理量,可以有效地改善相对测速精度。

此外,通过表 1 可以发现,测速误差的大小是由最大不模糊速度决定的。如果系统的最大不模糊速度越小,则测速误差也就越小。而系统的最大不模糊速度和基线长度有关(基线越长,最大不模糊速度越小)。故在一定范围内,基线长度越长,对应的测速误差越小。这再次说明了长短基线结合的优势,即通过短基线的数据来解速度模糊(扩大最大不模糊速度范围),通过长基线来进行洋流速度测量(提高速度测量精度)。这些结论在实际 ATI-SAR 系统的设计中有着重要的作用。

6 结论

本文研究了星载 ATI-SAR 系统的基本原理,分析了星载 ATI-SAR 系统进行洋流测速时的关键参数和性能指标:基线长度、速度分辨率、测速误差。特别是通过误差传递公式,建立了洋流测速误差的具体计算公式,实现了星载 ATI-SAR 系统洋流测速误差的定量分析。通过分析与仿真得出了相关结论,为星载 ATI-SAR 系统的设计奠定基础。

下一步将对星载 ATI-SAR 系统的信号处理环节进行详细研究。

参考文献:

- [1] Roland R, Hartmut R. Theoretical Evaluation of Several Possible Along-Track InSAR Modes of TerraSAR-X for Ocean Current Measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2013, 45(1): 21-35.
- [2] Roland R, Judith S, Detlef S. Global Current Measurements in Rivers by Spaceborne Along-Track InSAR [C]// 2005 IEEE Radar Conference. USA: IEEE, 2005: 71-74.
- [3] Stephen J F, Adriano J C. Dual-Beam Interferometry for Ocean Surface Current Vector Mapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2014, 39(2): 401-414.
- [4] Roland R, Donald R T. Numerical Study on the Along-Track Interferometric Radar Imaging Mechanism of Oceanic Surface Currents [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2013, 38(1): 446-458.

(下转第 3874 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 3868 •