

斜视情况下机载顺轨干涉 SAR 敏感度分析

张慧^{*①②④} 洪峻^{①③} 李纪传^{①③④} 明峰^{①③}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^③(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^④(中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 顺轨干涉合成孔径雷达(ATI-SAR)具有检测慢速运动目标径向速度的能力,其测速精度受各干涉参数精度的影响。敏感度分析是衡量各干涉参数误差对径向速度误差影响程度的一种主要手段。目前关于 ATI-SAR 的研究主要针对正侧视情况进行,没有考虑斜视角存在的情况。鉴于此,该文首先推导了斜视情况下 ATI-SAR 测量目标径向速度的表达式,进而得到了斜视情况下目标径向速度关于各干涉参数的敏感度大小。通过机载参数仿真,得到了正侧视及斜视情况下不同测速精度要求对各干涉参数的误差要求,为实际机载系统的误差分析和定标需求提供了量化参考。

关键词: SAR; 顺轨干涉; 斜视; 敏感度

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2207-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01582

Sensitivity Analysis of Along-track Interferometric Synthetic Aperture Radar in the Presence of Squint

Zhang Hui^{①②④} Hong Jun^{①③} Li Ji-chuan^{①③④} Ming Feng^{①③}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Beijing 100190, China)

^③(Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China)

^④(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Along-Track Interferometric Synthetic Aperture Radar (ATI-SAR) has the potential to measure the radial velocities of slowly moving targets. The accuracy of the radial velocity is limited by the accuracy of the interferometric parameters. Sensitivity equations are good ways to analyze the impact of the system parameters on interferometric SAR. Available sensitivity analysis for ATI-SAR mainly focuses on the case of no squint angle. In this paper, the expression of the radial velocity in the presence of squint is derived firstly, and the sensitivity equations are further obtained. Moreover, the sensitivity of the interferometric parameters is simulated with airborne parameters, and the accuracy requirements for different parameters are given for different velocity accuracy requirements, which provide quantitative reference for real airborne ATI-SAR analysis and calibration requirement analysis.

Key words: SAR; Along-Track Interferometry (ATI); Squint; Sensitivity

1 引言

顺轨干涉合成孔径雷达 (Along-Track Interferometric Synthetic Aperture Radar, ATI-SAR)最早是1987年由美国喷气实验室的Goldstein和Zebker提出的^[1]。ATI-SAR具有检测慢速运动目标的能力,最初被广泛用于洋流径向速度^[1-3]检测

中,后来一系列机载实验又证明了其具有地面动目标指示(GMTI)的能力^[4-7]。随着星载系统的发展,ATI-SAR的顺轨基线长度不断增大,其应用扩展到了舰船测速^[8]及交通流检测^[9]方面。与传统的交轨干涉SAR(Cross-Track Interferometric SAR, XTI-SAR)及差分干涉SAR^[10](differential interferometric SAR)不同,典型的机载顺轨干涉SAR系统由两个或两个以上天线以一定的间隔沿飞行方向安置在机身,理想情况下两个天线按照完全

2013-10-16 收到, 2014-02-28 改回

国家自然科学基金(61101200)资助课题

*通信作者: 张慧 123happy.zh@163.com

相同的轨迹以一定的时间间隔先后对同一场景进行成像。由于在此时间间隔内,运动目标的位置发生了变化,而静止目标的位置不发生任何改变,即一定时间间隔后运动目标到两副天线的距离历程不同而静止目标则相同,因此在成像后的两幅 SAR 图像中,运动目标在两幅图像中的相位不同而静止目标在两幅图像中的相位相同。当对两幅图像进行复共轭相乘时,静止目标的干涉相位即被消去,得到的干涉相位图中仅包含了运动目标的速度信息。

但是在实际飞行中,由于受到大气扰动和强风等因素的影响,载机的位置和姿态都会发生变化,此时两个天线不再按照完全相同的轨迹飞行,从而产生交轨基线分量和交轨干涉相位^[1]。另外,导航数据的精度以及系统参数的精度也会带来干涉相位误差^[12,13],从而影响测速精度。因此要得到精确的径向速度信息必须对这些参数进行分析和标定。敏感度方程描述了各干涉参量的变化对目标径向速度测量精度的影响程度,是干涉 SAR 误差影响及定标需求分析中以中一种常用的方法^[14]。

文献[11]和文献[15]都对正侧视情况下的 ATI-SAR 进行了敏感度分析。但是在实际系统中,一方面由于平台的偏航、俯仰或者天线的指向误差等会引入很小的斜视角^[11],另一方面有些系统在设计本身就使波束指向具有一定的斜视角,如美国 Massachusetts 大学开发的双波束干涉系统 UMass DBI(Dual-Beam Interferometry, DBI),该系统具有 4 个天线组成的两组 ATI 干涉波束,即向前斜视的前视天线对和向后斜视的后视天线对^[16]。鉴于上述两个方面,有必要对斜视情况下的 ATI-SAR 进行敏感度分析。

本文的结构安排如下:第 2 节首先以正侧视为例介绍了 ATI-SAR 测量运动目标径向速度的原理,进而推导了斜视情况下目标径向速度关于干涉相位

的数学表达式;第 3 节得出了斜视情况下目标径向速度关于各干涉参量的敏感度大小,并通过机载参数仿真得出了不同测速精度要求下对各个干涉参量(如干涉相位、平台速度、平台高度、基线长度、斜视角等)的精度要求,为实际机载 ATI-SAR 系统的分析和处理提供了参考;第 4 节总结全文。

2 ATI-SAR 的工作原理及斜视情况下分析

2.1 ATI-SAR 的工作原理介绍

机载 ATI-SAR 系统具有 3 种工作模式:标准模式(单发双收)、乒乓模式(双发双收)和双基线模式(双发交替收),具体参见文献[17]。为简便,本文的分析均以乒乓模式为例进行说明,即两个天线交替地发射和接收自己发射的电磁波,两个天线之间的有效基线长度等于两个天线之间的实际顺轨基线长度。

图 1 为正侧视情况下 ATI-SAR 的工作原理图。其中图 1(a)为理想情况下 ATI-SAR 的成像几何,此时后置天线完全按照前置天线的轨迹进行运动,经过一定的时间间隔后后置天线的位置与之前前置天线的位置重合;图 1(b)为非理想情况下的成像几何,此时由于偏航等非理想因素导致后置天线不完全按前置天线的轨迹运动,而是存在一定的位置误差。图 1(b)中的坐标系 xyz 是以 t 时刻前置天线的位置 $A_1(t)$ 为原点建立的右手坐标系,其中 z 轴垂直水平面向上, x 轴沿飞行方向向前, y 轴与二者组成右手坐标系。图 1 中 $A_1(t)$ 、 $A_2(t)$ 分别为 t 时刻前置天线和后置天线的天线相位中心位置; $R_1(t)$ 和 $R_2(t+\Delta t)$ 分别为 t 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻前置天线和后置天线距运动目标的斜距;两个天线相位中心之间的距离为 B ,此距离称为物理基线长度。理想情况下时间间隔 $\Delta t = B/v_p$,其中 v_p 是平台的运动速度。假

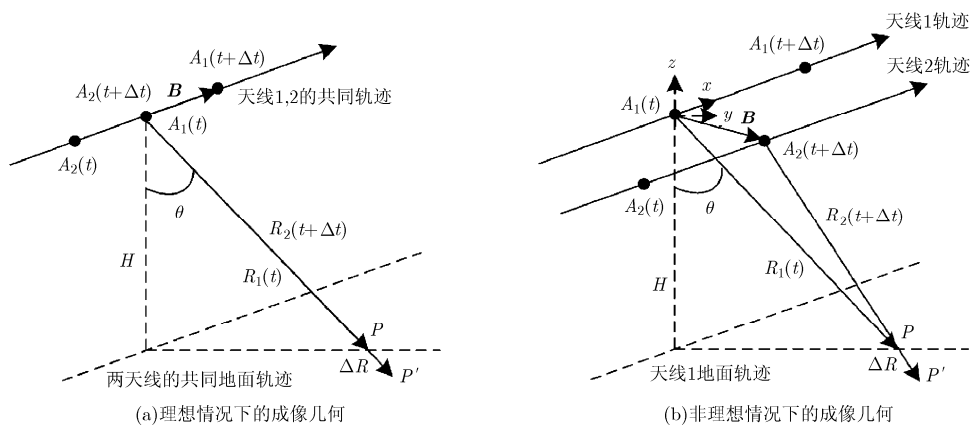


图 1 正侧视情况下 ATI-SAR 的成像几何

设运动目标的径向速度恒定, 且用 v_r 表示, 则在此时间间隔内, 目标沿视线方向运动的距离为 $v_r \Delta t$, 因此在此时间间隔内目标到两天线的斜距变化为 $\Delta R = v_r \Delta t$, 从而使两幅天线对应的图像经过复相乘后得到的干涉相位大小为

$$\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \Delta R = -\frac{4\pi B v_r}{\lambda v_p} \quad (1)$$

进而可以得到理想情况下运动目标径向速度的表达式。

$$v_r = -\frac{\lambda v_p}{4\pi B} \phi \quad (2)$$

在实际飞行中, 由于载机的偏航、俯仰等姿态变化, 以及天线的安装误差等, 两个天线的天线相位中心并不能够按照完全相同的轨迹运动, 如图 1(b) 所示。假设图中 $A_1(t)$ 和 $A_2(t + \Delta t)$ 之间的向量为 \mathbf{B} , 忽略天线 2 的指向误差, 则 \mathbf{B} 的 x 分量为 0, 即 $\mathbf{B} = (0, B_y, B_z)$, 设下视角为 θ , 不考虑两个天线之间的波束指向误差, 可得目标运动引起斜距差为

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_2(t + \Delta t) - R_1(t) \\ &= v_r \Delta t - B_y \sin \theta + B_z \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

此时的干涉相位大小为

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} (v_r \Delta t - B_y \sin \theta + B_z \cos \theta) \quad (4)$$

由式(4)可以得出目标径向速度的表达式:

$$v_r = -\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \phi - B_y \sin \theta + B_z \cos \theta \right) \quad (5)$$

此时沿飞行方向两个天线之间的实际距离记为 B_x , 称为顺轨基线分量, 则 $\Delta t = B_x / v_p$ 。因此, 式(5)中的干涉相位既包含了顺轨基线 B_x 引起的顺轨相位分量, 又包含了垂直基线分量 B_y 和 B_z 引起的交轨相位分量, 此交轨分量成分包含了地形的高程信息及平地效应。因此当存在交轨基线分量时, 即使没有高程信息也需要进行去平地效应, 从而得到正确的顺轨相位。

2.2 斜视情况下测速公式的推导

图 2 为斜视情况下的 ATI 成像几何, 图 2 中考虑了两个天线轨迹不完全重合的非理性情况。其中 β 为斜视角; 同样, \mathbf{B} 为 t 时刻前置天线相位中心与 $t + \Delta t$ 时刻后置天线相位中心之间的位置向量, 忽略天线 2 的指向误差, 则 \mathbf{B} 的 x 分量为 0, 即 $\mathbf{B} = (0, B_y, B_z)$ 。

假设天线与目标之间的距离远大于天线的孔径长度以及两个天线之间的距离, 则由图 2 可得 ATI 时间间隔内两副天线之间的斜距差为

$$\Delta R(t) = v_r \Delta t - B_y \cos \beta \sin \theta_0 + B_z \cos \beta \cos \theta_0 \quad (6)$$

其中 $\cos \beta = R_0 / R$, $\cos \theta_0 = (H - h) / R_0$, R_0 是最短斜距, R 为 t 时刻天线 1 到目标的斜距, H 和 h 分

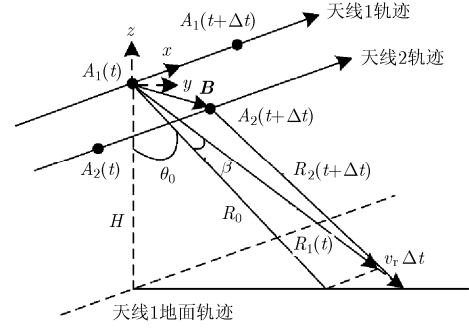


图 2 斜视情况下 ATI-SAR 的成像几何

别为载机和目标相对参考平面的高度, θ_0 为最短斜距与 z 轴的夹角。

斜距差反映的干涉相位大小为

$$\phi = -4\pi / \lambda \cdot \Delta R = -4\pi / \lambda$$

$$\cdot (v_r \Delta t - B_y \cos \beta \sin \theta_0 + B_z \cos \beta \cos \theta_0) \quad (7)$$

进而可以得到目标径向速度的表达式:

$$v_r = -\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \phi - B_y \cos \beta \sin \theta_0 + B_z \cos \beta \cos \theta_0 \right) \quad (8)$$

令斜视角 β 为 0, 则式(8)可简化为

$$v_r = -\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \phi - B_y \sin \theta + B_z \cos \theta \right) \quad (9)$$

这与式(5)及文献[11]中给出的正侧视情况下的表达式一致。式(8)就是斜视情况下 ATI-SAR 系统测量的目标径向速度的表达式。

3 敏感度分析及误差精度要求仿真

从目标径向速度的表达式式(5)和式(8)可以看出, 影响目标径向速度的主要参量为 $[\phi, \Delta t, B_y, B_z, H, h, R, \beta]$ 。下面通过分析目标径向速度关于各参量的敏感度及不同测速精度下系统对各参量的误差要求, 得到待定标参量及分别需要达到的定标精度。

3.1 敏感度方程

敏感度方程的基本思想是利用偏微分代替偏增量, 从而衡量各个干涉参数的变化对测速精度的影响程度。

利用式(8)对径向速度关于各干涉参量求偏导, 可以得出斜视情况下各干涉参量对应的敏感度方程:

$$\frac{\partial v_r}{\partial \phi} = -\frac{1}{\Delta t} \frac{\lambda}{4\pi} = -\frac{v_p}{B_x} \frac{\lambda}{4\pi} \quad (10a)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial v_p} = -\frac{1}{B_x} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \phi - B_y \cos \beta \sin \theta_0 + B_z \cos \beta \cos \theta_0 \right) \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial H} &= \frac{\partial v_r}{\partial \theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial H} = -\frac{1}{\Delta t} (B_y \cos \theta_0 + B_z \sin \theta_0) \\ &\cdot \cos \beta \cdot \frac{1}{\sqrt{R_0^2 - (H - h)^2}} \end{aligned} \quad (10c)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial h} = -\frac{\partial v_r}{\partial H} \quad (10d)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial B_x} = \frac{v_p}{B_x^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \phi - B_y \cos \beta \sin \theta_0 + B_z \cos \beta \cos \theta_0 \right) \quad (10e)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial B_y} = \frac{1}{\Delta t} \cos \beta \sin \theta_0 \quad (10f)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial B_z} = -\frac{1}{\Delta t} \cos \beta \cos \theta_0 \quad (10g)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial R_0} = \frac{\partial v_r}{\partial \theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial R_0} = \frac{1}{\Delta t} (B_y \cos \theta_0 + B_z \sin \theta_0) \cdot \cos \beta \cos \theta_0 / \sqrt{R_0^2 - (H - h)^2} \quad (10h)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial \beta} = -\frac{1}{\Delta t} (B_y \sin \theta_0 - B_z \cos \theta_0) \sin \beta \quad (10i)$$

正侧视情况下的目标径向速度关于各个干涉参量的敏感度是斜视情况下的特例, 即如果令等式组(10a)~(10h)中的斜视角 β 为0, 则即为正侧视情况下目标径向速度关于各个干涉参量的敏感度大小, 与文献[11]中的结果相同。斜视角 β 的影响程度与垂直基线分量 B_y 和 B_z 的大小有关, 这是由于斜视角主要影响交轨干涉相位分量的精度, 进而对目标径向速度精度产生影响; 当交轨基线分量不存在时斜视角对顺轨相位大小没有影响。

3.2 不同测速精度对各干涉参量精度的要求

通过上面得出的正侧视及斜视情况下的敏感度方程, 可以得到不同测速精度要求对各干涉参数精度的要求。下面按照表1所给的机载ATI-SAR系统的参数进行仿真。其中物理基线是两个天线之间的实际距离。

表1 机载仿真参数

中心频率	9.6 GHz	物理基线	1 m
平台速度	150 m/s	偏航角, 俯仰角	5°, 1°
飞行高度	6 km	顺轨基线分量	0.9960 m
目标高度	0 m	跨航向基线分量	0.0871 m
下视角	25° ~ 60°	垂直方向基线分量	0.0175 m

3.2.1 对干涉相位 ϕ 的精度要求 由上面的分析可知, 斜视角存在与否对目标径向速度关于干涉相位的敏感度没有影响, 因此在正侧视和斜视情况下对干涉相位的精度要求的分析是相同的。根据式(10a), 可以得出不同波段下径向速度关于干涉相位的敏感度(图3(a))以及平台速度为150 m/s时, 不同测速精度要求下对干涉相位误差的要求(图3(b))。

从图3(a)中可以看出, X波段敏感度最小, 即

波长越短, 干涉相位误差对测速精度的影响越小。从图3(b)中可以看出, 当测速精度要求为0.05 m/s时, 要求的相位误差须小于0.134 rad(7.68°); 当测速精度要求为0.01 m/s时, 要求的相位误差须小于0.0268 rad(1.54°)。

3.2.2 对平台速度 v_p 的精度要求 令式(10b)中的斜视角为0, 则可以得到正侧视情况下不同下视角对应的目标径向速度关于平台速度的敏感度。图4(a)显示了不同波段下不同下视角所对应的敏感度大小。可见, 在本文给出的仿真条件下, 入射角越小, 敏感度越大, 即平台速度的变化对测速精度的影响越大, 且波长越短影响越小。以X波段为例, 选择敏感度最大时对应的干涉相位的最大值 π 及较小的下视角25°, 可以得到不同测速精度条件下对平台速度误差的要求, 如图4(b)所示。

从图4(b)中可以看出, 当径向速度测量精度要求达到0.01 m/s时, 平台的运动速度误差须控制在0.13 m/s以内。而在没有垂直基线误差的条件下, 即顺轨基线长度等于物理基线长度时, 两个垂直基线分量均为0, 0.01 m/s的测速径向要求的平台速度误差为1.28 m/s, 远低于上面的0.13 m/s。

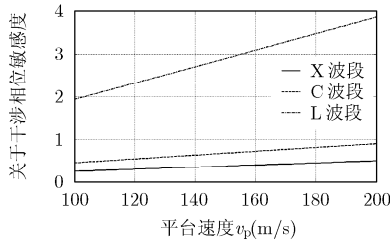
图5(a)为下视角25°时仿真的不同斜视角情况下目标径向速度关于平台速度的敏感度, 可见在其他条件一致时, 在此仿真条件下, 目标径向速度关于平台速度的敏感度随着斜视角的增大而减小。

3.2.3 对平台高度 H , 目标高度 h 的精度要求 由于待测量的目标的径向速度关于平台高度和目标高度的敏感度大小相同, 二者仅有正负号的差别, 因此这里只对平台高度进行分析, 一定测速精度要求下目标高度的精度要求和平台高度的精度要求相同。由式(10c)可见, 敏感度大小与波段无关, 在此不妨以X波段、正侧视条件为例进行仿真。图6(a)为X波段下的敏感度随下视角的变化, 图6(b)为入射角为25°时不同测速精度对应的平台高度或者目标高度的精度要求。

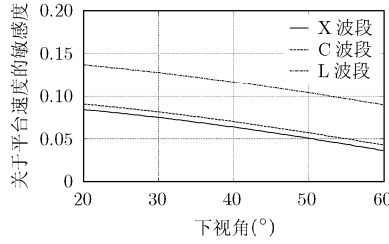
由图6(b)可以看出, 当测速精度要求达到0.01 m/s时, 要求平台高度的误差不超过2.73 m。当下视角变小时对平台高度/目标高度的精度要求更高。

图5(b)为下视角为25°时不同斜视角对应的目标径向速度关于平台/目标高度的敏感度, 与3.2.2节中的结论一致, 在此仿真条件下, 目标径向速度关于平台/目标高度的敏感度随斜视角的增大而减小。

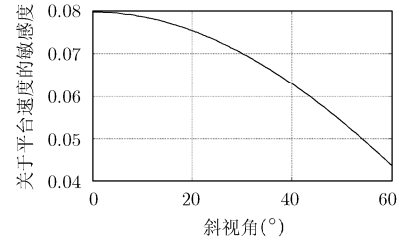
3.2.4 对顺轨基线分量 B_x 的要求 同上面的分析, 令式(10e)中的斜视角为0, 可以得到正侧视条件下不同波段线径向速度关于顺轨基线分量的敏感度大



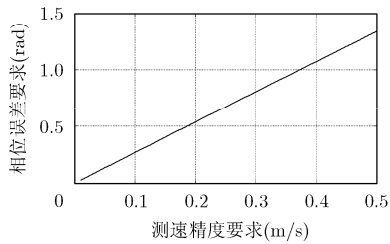
(a)不同波段下关于干涉相位的敏感度



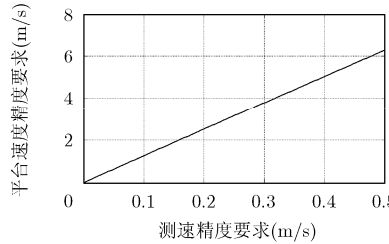
(a)不同下视角下关于平台速度的敏感度



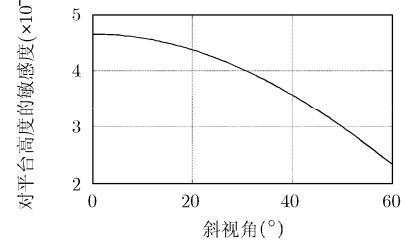
(a)不同斜视角对应的平台速度的敏感度



(b)不同测速精度对干涉相位的精度要求



(b)不同测速精度对平台速度的精度要求



(b)不同斜视角下关于平台高度的敏感度

图3 径向速度对干涉相位的敏感度

图4 径向速度对平台速度的敏感度

图5 不同斜视角下径向速度关于平台速度及高度的敏感度

小,如图7(a)所示,从图中可以看出,对于3个波段,下视角越大敏感度越大。因此在图7(b)中选择较大的下视角60°进行分析,给出了不同测速精度要求下对顺轨基线分量精度的要求。可以看出,在此仿真条件下,当测速精度要求为0.01 m/s时, B_x 的误差不得超过 7.2×10^{-4} m,即0.72 mm。

选择入射角60°时仿真不同的斜视角对应的目标径向速度关于顺轨基线长度的敏感度曲线,其走势与图5(a),5(b)一致,即随着斜视角的增大,目标径向速度关于顺轨基线长度的敏感度降低。

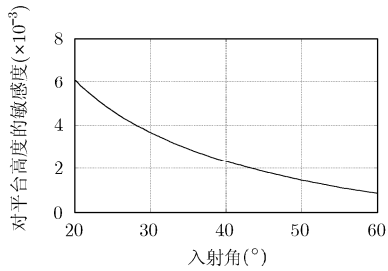
3.2.5 对交轨基线分量 B_y 和 B_z 的要求 由式(10f),式(10g)可以得出目标径向速度关于 B_y 和 B_z 的敏感度,且易得出,随着斜视角的增大,目标径向速度关于两个垂直基线分量的敏感度均减小,即正侧视情况下敏感度最大。如图8(a)所示,当斜视角一定时(如斜视角为0°时),入射角越大径向速度关于 B_y 的敏感度越大,入射角越小,径向速度关于 B_z 的敏感度越大。因此对于一定测速精度要求计算二者的最小误差时,对 B_y 应选择最大的入射角(如60°),对 B_z 应选择最小的入射角(如25°)。在此条件下,不同精度要求下对 B_y 和 B_z 的误差要求如图8(b)所示。当速度精度要求为0.01 m/s时, B_y 的误差不能超过0.077 mm, B_z 的误差不能超过0.073 mm。

3.2.6 对斜距 R 的精度要求 根据式(10h),可以看出,斜视角的存在使目标径向速度对斜距的敏感度稍微降低,且敏感度与波长无关。由于正侧视情况下敏感度最大,因此这里以正侧视为例进行仿真。图9(a)为不同入射角下的敏感度变化,可以看出随着入射角增大径向速度关于斜距的敏感度减小,因

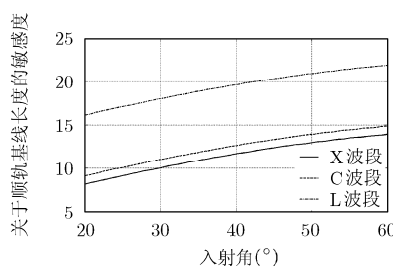
此在图9(b)中计算不同测速精度要求下对斜距误差的要求时,需要选择较小的入射角,如25°。从图9(b)中可以看出,当测速精度要求为0.01 m/s时,斜距误差不大于2.86 m。

3.2.7 关于斜视角的敏感度 从式(10i)可以看出,径向速度关于斜视角的敏感度与波长无关。针对第1节中的分析,这里分别选取较小的斜视角5°和较大的斜视角45°为例进行仿真。其中图10(a)为不同斜视角情况下径向速度关于斜视角的敏感度随入射角的变化,从图中可以看出斜视角越大目标径向速度关于斜视角的敏感度越大,且敏感度随入射角的增大而增大;图10(b)为选择最大入射角60°时不同斜视角下不同测速精度要求对应的斜视角误差要求。对于较小的斜视角,如5°,当测速精度要求为0.01 m/s时,要求斜视角误差不超过0.66°,而当斜视角较大时,如45°,则要求不超过0.08°,精度要求更高。

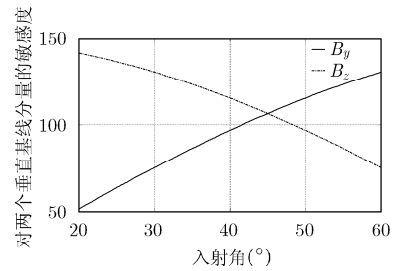
以上给出了目标径向速度关于各个干涉参数的敏感度,以及不同测速精度要求下对各个干涉参数精度的要求曲线。由上述分析可见,斜视角的存在使得3.2.2~3.2.7节中相应的干涉参数对应的敏感度减小。综合上述仿真结果,可以将不同测速精度要求下对上述各干涉参量的误差要求列于表2,为了涵盖较大的测速精度范围,表2中取较低的测速精度0.3 m/s,中等测速精度0.1 m/s及较高的测速精度0.01 m/s为例说明对各个干涉参数的精度要求,仿真参数对应于表1。对于其他波段及其他系统参数同样可以按照上述分析得到相应的结果。



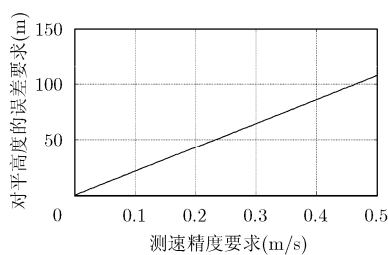
(a) X波段下关于平台高度的敏感度



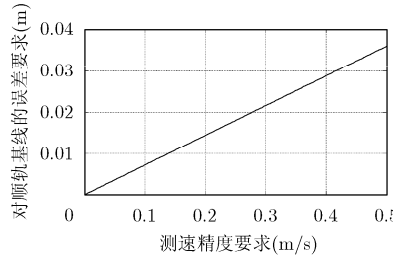
(a)不同下视角下关于顺轨基线分量的敏感度



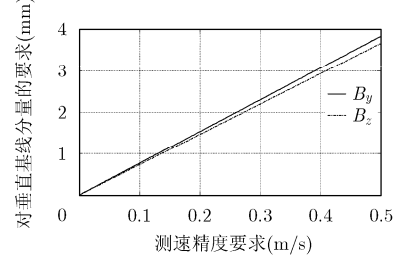
(a)不同入射角下关于两个垂直基线分量的敏感度



(b)不同测速精度对平台/目标高度的要求



(b) 60°入射角时不同测速精度对顺轨基线误差的要求

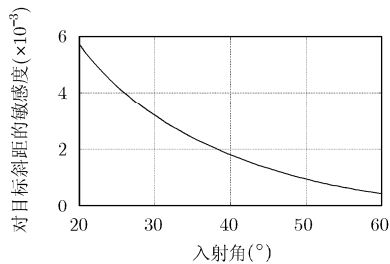


(b)不同测速精度对垂直基线分量误差的要求

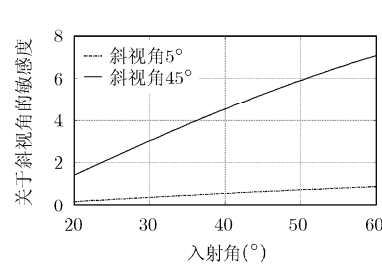
图6 径向速度关于平台高度的敏感度

图7 径向速度对顺轨基线长度的敏感度

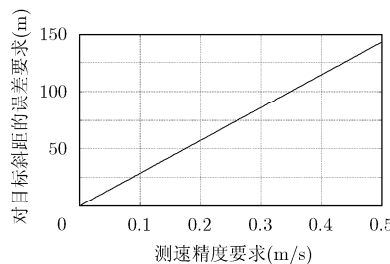
图8 径向速度对交轨基线长度的敏感度



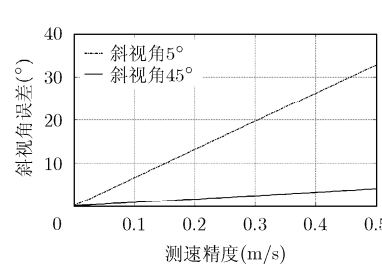
(a)不同入射角下目标速度关于斜距的敏感度



(a)不同斜视角下敏感度随入射角的变化



(b)不同测速精度要求下对斜距的精度要求



(b)不同测速精度要求对斜视角的精度要求

图9 径向速度对目标斜距的敏感度

图10 径向速度关于斜视角的敏感度

表2 X波段下不同测速精度要求对应的各参量的精度要求

干涉参数	测速精度(m/s)			干涉参数	测速精度(m/s)		
	0.3	0.1	0.01		0.3	0.1	0.01
ϕ (°)	46	15.36	1.54	B_x (mm)	21.6	7.19	0.72
v_p (m/s)	3.75	1.25	0.13	B_y (mm)	2.31	0.77	0.077
H (m)	64.5	21.5	2.15	B_z (mm)	2.20	0.73	0.073
h (m)	64.5	21.5	2.15	R (m)	85.8	28.6	2.86
$(5^\circ)\beta$ (°)	19.6	6.55	0.66	$(45^\circ)\beta$ (°)	2.43	0.81	0.08

4 结束语

现代遥感正朝着高分辨率、高测量精度的方向不断发展,对 ATI-SAR 系统的测速精度要求也越来越高,而要达到较高的测速精度必须对 ATI-SAR 系统进行误差源分析并且对影响测速精度的各个干涉参量进行分析和标定。敏感度分析是量化描述干涉 SAR 测速精度与各干涉参量误差关系的重要手段。鉴于目前对机载 ATI-SAR 系统的大多数分析都是针对正侧视情况的状况,该文推导了斜视成像几何下目标径向速度的表达式,并得到了斜视情况下的敏感度方程。另外,本文通过机载 ATI-SAR 参数仿真了正侧视及斜视情况下目标径向速度关于各个干涉参量的敏感度,给出了不同测速精度要求下各个干涉参量的误差要求,这些仿真结果和结论为实际机载系统中的误差分析及不同测速精度下的定标需求提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Goldstein R M and Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. *Nature*, 1987, 328: 470-475.
 - [2] Kim Duk-jin, Moon W M, Moller D, *et al.* Measurements of ocean surface waves and currents using L- and C-band along-track interferometric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2821-2832.
 - [3] Romeiser R, Runge H, Suchandt S, *et al.* Quality assessment of surface current fields from TerraSAR-X and TanDEM-X along-track interferometry and Doppler centroid analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2759-2772.
 - [4] Imel D A. AIRSAR along-track interferometry data[R]. Oak Grove Drive, Pasadena, 2002.
 - [5] Chapin E and Chen C W. Airborne along-track interferometry for GMTI[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, 24(5): 13-18.
 - [6] Suchandt S and Runge H. Along-track interferometry using TanDEM-X: first results from marine and land applications [C]. 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, Germany, 2012: 392-395.
 - [7] Zhang Wei-dong, Song Nuan, Dong Xing-wen, *et al.* Airborne SAR-ATI-GMTI data processing[C]. 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Qingdao, 2013: 122-125.
 - [8] Subhandt S, Runge H, and Steinbrecher U. Ship detection and measurement using the TerraSAR-X dual receive antenna mode[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, 2010: 2860-2863.
 - [9] Suchandt S, Runge H, Breit H, *et al.* Automatic extraction of traffic flow using TerraSAR-X along-track interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 807-819.
 - [10] 钟雪莲, 向茂生, 郭华东, 等. 机载重轨干涉合成孔径雷达的发展[J]. 雷达学报, 2013, 2(3): 367-381.
Zhong Xue-lian, Xiang Mao-sheng, Guo Hua-dong, *et al.* Current development in airborne repeat-pass interferometric synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(3): 367-381.
 - [11] Moccia A and Rufino G. Spaceborne along-track SAR interferometry: performance analysis and mission scenarios [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(1): 199-213.
 - [12] Oliver H. Calibration of airborne along-track interferometric SAR system for accurate measurement of velocities [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, 2001, 1: 558-560.
 - [13] Zhang Wei-dong, Song Nuan, and Zhang Jian-feng. Airborne SAR-ATI-GMTI influence factor analysis[C]. International Conference on Computer and Information Application, Taiyuan, 2012: 1255-1258.
 - [14] Mallorqui J J, Bara M, and Broquetas A. Sensitivity equations and calibration requirements on airborne interferometry[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, 2000, 6: 2739-2741.
 - [15] 王欣. 机载 ATI-SAR 基线定标方法研究[D]. [硕士论文], 中国科学院电子学研究所, 2012.
Wang Xin. Study on baseline calibration method for airborne ATI-SAR[D]. [Master dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
 - [16] Frasier S J and Camps A J. Dual-Beam interferometry for ocean surface current vector mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(2): 401-414.
 - [17] Zhang Yu-hong. Along Track Interferometry Synthetic Aperture Radar (ATI-SAR) techniques for ground moving target detection[R]. Final Technical Report, Hillside Terrace Marcy New York, 2006.
- 张 慧: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为机载顺轨干涉 SAR 定标及处理。
洪 峻: 男, 1960 年生, 研究员, 长期从事合成孔径雷达定标及定量遥感应用技术研究。
李纪传: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。
明 峰: 男, 1977 年生, 副研究员, 主要从事 SAR 定标理论与量化的研究。