

文章编号:1000-6893(2007)05-1162-06

# 运动补偿用惯性器件误差对 SAR 成像分辨率的影响研究

盛蔚, 房建成, 韩晓英

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

## Study on Effect of Inertial Device Error in Motion Compensation Subsystem on SAR Image Resolution

Sheng Wei, Fang Jiancheng, Han Xiaoying

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of  
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 为提高合成孔径雷达(SAR)系统的性价比,必须根据 SAR 成像分辨率的要求和整体系统参数,设计相应精度的运动补偿用捷联惯导系统。在确定 SAR 运动补偿系统方案和安装方式的基础上,分析不同方向的加速度计和陀螺仪误差对天线相位中心位置测量误差的影响,并利用位置测量误差与 SAR 成像分辨率之间的关系,进一步明确了不同方向的加速度计和陀螺仪对 SAR 成像分辨率的影响。研究表明:基于 SAR 的工作原理和安装方式, $x$  方向加速度计和  $y$  方向陀螺仪对 SAR 成像分辨率的影响明显比其他惯性器件严重;相同误差水平的惯性器件对 SAR 成像分辨率的影响随着合成孔径时间和工作波长的不同而不同,时间越长,波长越短,影响则越严重。SAR 成像仿真证明了结论的正确性。研究结果对于研制高性价比 SAR 成像运动补偿系统有一定的理论指导意义。

**关键词:** 遥感信息工程; SAR 成像分辨率; 运动补偿; 惯性器件误差; 加速度计常值偏置; 陀螺仪常值漂移  
**中图分类号:** TN951      **文献标识码:** A

**Abstract:** This paper explores the relationship between inertial device error and synthetic aperture radar (SAR) image resolution in order to improve the performance and cost ratio of SAR motion compensation system. The relationship will help the researchers to develop the SAR motion compensation subsystem with corresponding precision. First this paper describes the solution and fixing way of SAR motion compensation subsystem, and then figures out the different influence of inertial device error (on different axes) on antenna position measurement precision. Finally the relation between SAR image resolution and inertial device error is established by taking advantage of the relation between SAR image resolution and antenna position measurement error. From the analysis and emulation it can be seen that the accelerometer on  $x$ -axis and the gyro on  $y$ -axis are much more important than other inertial devices for SAR image resolution. However, even though inertial devices with same accuracy are used different SAR wave lengths and coherent times will cause different image resolutions. Emulations of SAR image of single point target verify the above conclusions.

**Key words:** remote sensing information engineering; SAR image resolution; motion compensation; inertial device error; accelerometer bias; gyro drift

合成孔径雷达(SAR)高分辨率遥感成像具有全天候成像、穿透成像和立体成像等其他遥感方式无法比拟的优势。空(天)基 SAR 成像原理要求天线相位中心沿平直航线匀速运动<sup>[1-2]</sup>。

实际上,气流扰动和飞控系统误差使得 SAR 天线相位中心难以保持严格平直匀速运动,实际

航线偏离理想航线,见图 1。这将导致 SAR 方位方向(即天线相位中心运动方向)回波相位噪声和误差增大,甚至失去线性调频特性;经过匹配滤波成像处理后,将引起 SAR 图像指标的恶化,图像难以聚焦,因此空(天)基 SAR 高分辨率成像的核心技术是在成像过程中对 SAR 天线相位中心运动参数精确测量,并依据测量信息对 SAR 回波信号相位进行精确补偿以提高成像分辨率,称为 SAR 运动补偿技术。

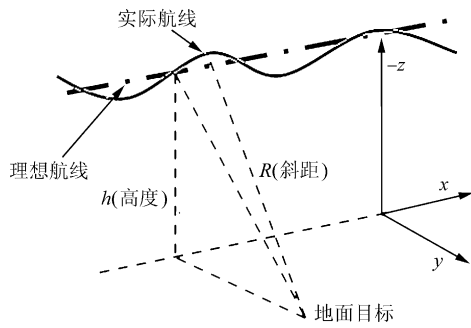


图 1 机载 SAR 运动补偿的必要性

Fig. 1 Necessary of motion compensation for airborne SAR

在过去的二十余年里,研究人员对运动补偿相关技术开展了深入的研究。一类是针对光学成像系统的运动补偿技术<sup>[1]</sup>,在光学成像系统运动补偿中需要运动测量和空间稳定两方面技术,其中运动测量部分主要依赖对光学图像像素点信息的提取和运动参数辨识技术,考虑到成本和系统的复杂性很少用到高精度硬件测量装置,因此目前的成像分辨率无法显著提高,同时成像算法实时性较差;另一类是针对 SAR 成像的运动补偿技术<sup>[3-5]</sup>,雷达成像领域的研究人员重点探索了运动参数测量误差对成像分辨率的影响,缺乏对运动参数测量误差原因的探讨,因此仍然无法依据成像分辨率确定对运动参数测量系统方案和器件误差的要求。A. Kallus 等人也基于基本的惯性导航原理,建立了运动参数测量精度与器件性能之间的简单对应关系<sup>[6]</sup>,但是尚未直接将运动参数测量误差对应到 SAR 成像指标,并且在测量误差估计中忽略了惯性导航各个通道之间的耦合特性,因此其依据惯性器件误差估计 SAR 天线相位中心位置测量误差的可信度很低。本文将从惯性导航原理出发,确定 SAR 运动补偿系统的方案,并基于设计方案和完备的惯性导航原理研究器件误差对 SAR 天线相位中心测量误差以及成像分辨率的直接影响。

### 1 一种 SAR 运动补偿 IMU 安装方式及加速度计误差影响分析

SAR 运动补偿系统的成本动辄几十万、上百万,很大程度上增加了 SAR 整机成本。为此,探讨一种能够适当降低成本的 SAR 运动补偿用捷联惯导的安装方式,即令 SAR 运动补偿系统中的惯性测量单元(IMU)3 个正交测量轴中的

$x$  轴指向成像条带的中央(即  $x$  轴与天线波束中心线方向一致), $y$  轴指向载机飞行前向, $z$  轴满足右手定则指向垂直  $x-y$  平面的斜上方。如此安装方式保证了  $x-y$  测量轴与地面成像条带中心位于同一平面,见图 2,本文称之为机体坐标系(b 系)。

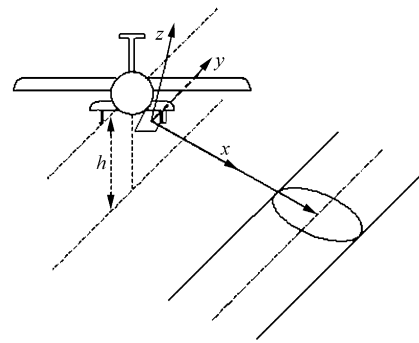


图 2 IMU 安装方式及机体坐标系

Fig. 2 Fixing way of IMU and body-frame

方位向回波可表示为<sup>[7]</sup>

$$S_A(t) = \exp[-j4\pi R(t)f_c/c] \quad (1)$$

式中: $S_A(t)$ 为 SAR 方位方向回波; $R(t)$ 为合成孔径时间内的距离历程; $f_c$ 为载波频率; $c$ 为光速; $j$ 为虚数单位; $\pi$ 为圆周率。由方位方向回波式(1)可见,导致方位回波相位误差的主要因素是天线相位中心的三维位置测量误差在斜距方向的投影。不考虑 IMU 测量中心和天线相位中心的偏差,IMU 实时给出天线相位中心的三维位置测量信息。以下依据图 2 的安装方式,分析机体系三维位置测量误差在斜距方向的投影,如图 3 和图 4 所示。

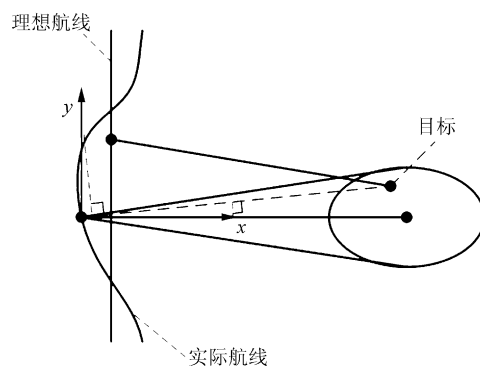
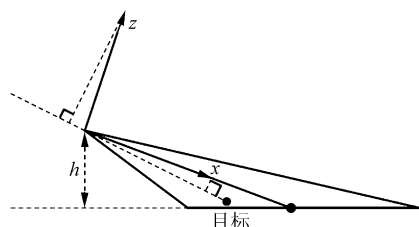


图 3  $x, y$  两轴位置误差及其在斜距方向投影

Fig. 3 Position errors on  $x$  and  $y$ -axes and their projections on slant range direction

图 4  $z$  轴位置误差及其在斜距方向投影Fig. 4 Position error on  $z$ -axis and its projection on slant range direction

由图 3 和图 4 可见,

$$\delta x_r \in \left[ \Delta x \cos \frac{\Delta\theta_{3\text{dB}}}{2}, \Delta x \right] \quad (2)$$

$$\delta y_r \in \left[ 0, \Delta y \sin \frac{\Delta\theta_{3\text{dB}}}{2} \right] \quad (3)$$

$$\delta z_r \in \left[ 0, \Delta z \sin \frac{\Delta\theta_{3\text{dB}}}{2} \right] \quad (4)$$

式中:  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  为机体系 3 轴测量误差;  $\delta x_r, \delta y_r, \delta z_r$  为机体系 3 轴测量误差在斜距方向的投影分量;  $\Delta\theta_{3\text{dB}}$  为波束宽度, 且假设天线各向波束宽度一致。

假设机体系  $x, y, z$  轴位置测量误差  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  均相等, 假设天线尺寸  $\varnothing 0.5\text{ m}$ , SAR 工作波长  $0.03\text{ m}$ , 则 SAR 成像用天线波束宽度  $\Delta\theta_{3\text{dB}}$  的典型值为

$$\Delta\theta_{3\text{dB}} = \frac{\lambda}{l} = \frac{0.03}{0.5} = 0.06\text{ rad} = 3.44^\circ \quad (5)$$

式中:  $l$  为天线长度;  $\lambda$  为波长。  $x$  轴向位置测量误差在斜距方向投影最小值是  $y$  轴、 $z$  轴向位置测量误差在斜距方向投影最大值的

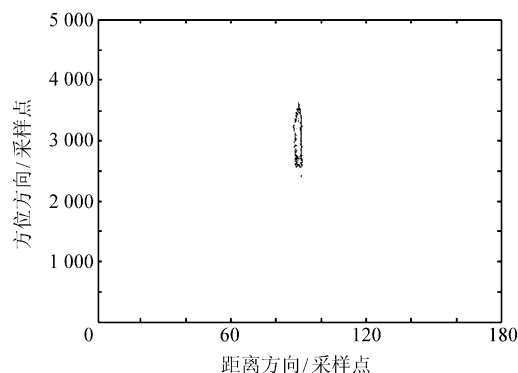
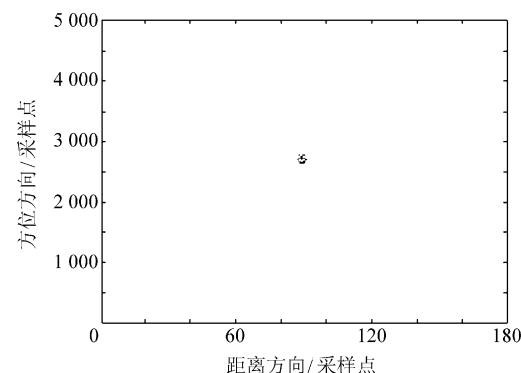
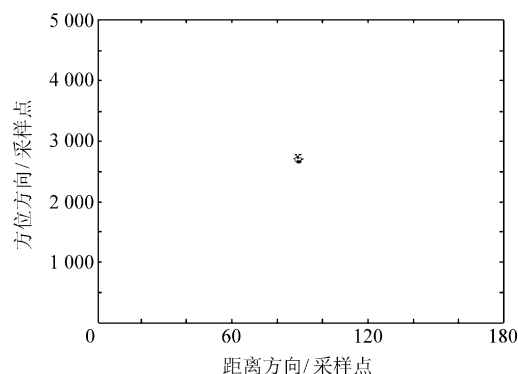
$$\Delta x \cos \frac{\Delta\theta_{3\text{dB}}}{2} \bigg/ \left( \Delta y \sin \frac{\Delta\theta_{3\text{dB}}}{2} \right) = 33\text{ 倍} \quad (6)$$

由此可见, 尽可能提高  $x$  轴位置测量精度, 适当降低  $y$  轴、 $z$  轴位置测量精度是提高 SAR 斜距测量精度和运动补偿系统性价比的一条有效途径。

仿真方案和条件: 假设在合成孔径起始时刻初始对准无误差(关于初始对准误差对 SAR 成像分辨率的影响将在后续文章中给出), 首先对比 3 个方向的加速度计零偏对 SAR 成像分辨率的影响。飞行高度  $4\ 000\text{ m}$ , 作用距离  $15\ 000\text{ m}$ , 采样频率  $2\ 000\text{ Hz}$ , 飞行速度  $100\text{ m/s}$ , 天线尺寸  $\varnothing 0.5\text{ m}$ , SAR 工作波长  $0.03\text{ m}$ , 假设每个加速度计零偏均为  $0.01g$ 。仿真结果: 如图 5~图 7 所示(单个点目标 SAR 图像)。

仿真结果分析: 仿真结果证明了  $x$  轴加速度计误差对 SAR 成像分辨率的影响远大于其他两轴加速度计误差的影响, 因此 SAR 运动补偿用

IMU 3 轴加速度计选型可有所区别, 在保证测量精度的前提下降低系统成本。

图 5  $x$  轴加速度计偏置  $0.01g$ , 其他器件无误差Fig. 5 SAR imaging result of point target while only  $x$ -axis accelerometer bias is  $0.01g$ 图 6  $y$  轴加速度计偏置  $0.01g$ , 其他器件无误差Fig. 6 SAR imaging result of point target while only  $y$ -axis accelerometer bias is  $0.01g$ 图 7  $z$  轴加速度计偏置  $0.01g$ , 其他器件无误差Fig. 7 SAR imaging result of point target while only  $z$ -axis accelerometer bias is  $0.01g$ 

## 2 陀螺仪误差对 SAR 成像分辨率的影响

由 1 节分析可知, 影响 SAR 成像分辨率的是合成孔径时间内天线相位中心斜距测量误差<sup>[8-9]</sup>, 陀螺仪对天线相位中心位置测量误差的

影响不如加速度计那样直接,陀螺仪误差首先经过捷联惯导姿态微分方程影响姿态测量误差,再进一步经过捷联惯导速度、位置误差微分方程体现为对位置测量误差的影响。

依照 1 节中提出的安装方式,首先在地理坐标系(t 系),即东-北-天坐标系内讨论 IMU 陀螺仪误差引起的天线相位中心位置测量误差,而后转换到机体坐标系。

地理坐标系速度和姿态误差微分方程为

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_{xt} &= \frac{V_{yt}}{R} \tan L \cdot \delta V_{xt} + \left( 2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_{xt}}{R} \tan L \right) \cdot \\ \delta V_{yt} &+ \left( 2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_{xt}}{R} \sec^2 L \right) V_{yt} \delta L - \phi_{yt} g + \nabla_x \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_{yt} &= - \left( 2\omega_{ie} \sin L + \frac{2V_{xt}}{R} \tan L \right) \delta V_{xt} - \\ &\left( 2\omega_{ie} \cos L \cdot V_{xt} + \frac{V_{xt}^2}{R} \sec^2 L \right) \delta L + \phi_{xt} g + \nabla_y \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_{zt} &= 2 \frac{V_{yt}}{R} \delta V_{yt} + 2 \left( \omega_{ie} \cos L + \frac{V_{xt}}{R} \right) \delta V_x - \\ &\left( 2\omega_{ie} \sin L \right) V_{xt} \delta L + \nabla_z \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{xt} \\ \dot{\phi}_{yt} \\ \dot{\phi}_{zt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{\delta V_{yt}}{R} \\ \frac{\delta V_{xt}}{R} \\ \frac{\delta V_{xt} \tan L}{R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_{ie} \sin L \cdot \delta L \\ \omega_{ie} \cos L \cdot \delta L \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 0 & -\phi_{zt} & \phi_{yt} \\ \phi_{xt} & 0 & -\phi_{xt} \\ -\phi_{yt} & \phi_{xt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos L \\ \omega_{ie} \sin L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{xt} \\ \epsilon_{yt} \\ \epsilon_{zt} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $L, \lambda, h$  为经纬度、高度; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$  为经纬度、高度误差; $v_{xt}, v_{yt}, v_{zt}$  为地理系三维速度; $\delta v_{xt}, \delta v_{yt}, \delta v_{zt}$  为地理系三维速度误差; $R, \omega_{ie}$  为地球半径、自转角速度; $g$  为重力加速度; $\phi_{xt}, \phi_{yt}, \phi_{zt}$  为地理系三维姿态; $\Delta \phi_x, \Delta \phi_y, \Delta \phi_z$  为地理系三维姿态误差; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$  为三维加速度计偏置; $\epsilon_{xt}, \epsilon_{yt}, \epsilon_{zt}$  为三维陀螺仪漂移。

分析式(7)~式(10)可知,速度微分方程等式右侧各项中在合成孔径时间内保持常值的项将成为影响成像分辨率的二次位置测量误差。毫无疑问,加速度计常值偏置将直接影响二次位置测量误差;陀螺仪常值漂移经过三次积分过程影响位置测量误差,即姿态微分方程、速度微分方程和位置微分方程,则会产生三次以上位置测量误差。

三次以上位置误差导致合成孔径时间内 SAR 方位向回波的三次以上相位误差,在地理坐标系的分析证明陀螺仪误差对 SAR 成像分辨率的影响整体而言不如加速度计显著。

为了分析具体每个陀螺仪误差对 SAR 运动补偿和成像分辨率的影响,将地理坐标系下的误差转换到机体坐标系下进行分析<sup>[9]</sup>。地理坐标系与机体坐标系之间的坐标转换矩阵为  $C^b$ ,

$$[\delta L^b \quad \delta \lambda^b \quad \delta h^b]^T = C^b [\delta L \quad \delta \lambda \quad \delta h]^T \quad (11)$$

将机体坐标系下的三维测量误差向斜距投影,并且利用 1 节中结论求得真实位置误差上限:

$$\max \{ \delta \Delta l \} = \Delta x + \Delta y \sin \frac{\theta_{3dB}}{2} + \Delta z \sin \frac{\theta_{3dB}}{2} \quad (12)$$

式中: $\Delta x = \delta \lambda^b R \cos L$ ;  $\Delta y = \delta L^b R$ ;  $\Delta z = \delta h^b$ 。

式(7)~式(12)解析描述了 SAR 天线相位中心位置测量误差的上限。

由捷联惯导基本原理可知,姿态误差主要引起地理系与机体系坐标转换矩阵有误差,即加速度计测量基准不准确,从而导致位置测量误差。加速度计测量误差由两部分构成,运动加速度测量误差和重力加速度分量测量误差。因为 SAR 成像过程中尽量保持匀速直线运动,运动引起的加速度测量误差可忽略不计,因此姿态误差  $\Delta \phi_{x/y/z}$  与加速度测量误差  $\Delta \alpha_{x/y/z}^g$  近似满足

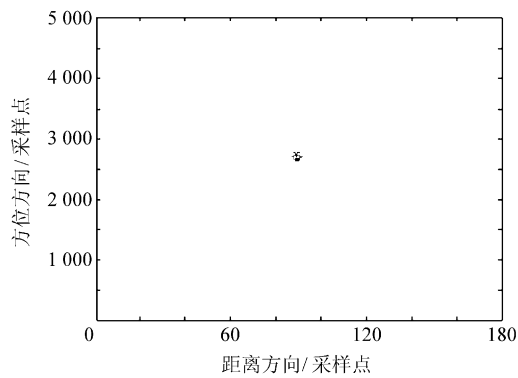
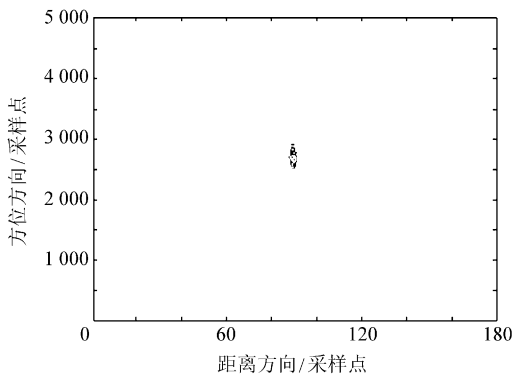
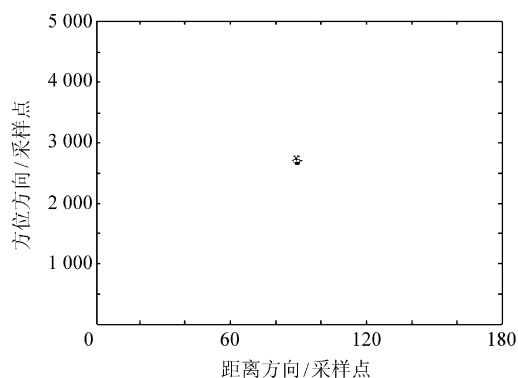
$$\left. \begin{aligned} \Delta \alpha_x^g &= g \cdot \Delta \phi_y \\ \Delta \alpha_y^g &= -g \cdot \Delta \phi_x \\ \Delta \alpha_z^g &= -g \cdot \Delta \phi_y \cdot \Delta \phi_x \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

根据 1 节中结论,机体坐标系  $x$  轴方向的位置误差对运动补偿精度影响最大,是其他两轴测量误差的 33 倍。由式(13)可知,姿态角误差  $\Delta \phi_y$  对运动补偿精度影响也近似为  $\Delta \phi_x, \Delta \phi_z$  对运动补偿精度影响的 33 倍,而陀螺仪常值漂移与姿态角误差之间满足积分关系,  $T_A$  为 SAR 合成孔径时间

$$\Delta \phi_{x/y/z} = \int_{t=0}^{t=T_A} \epsilon_{x/y/z} dt \quad (14)$$

因此  $y$  轴陀螺仪常值漂移对 SAR 成像分辨率的影响远大于其他两轴陀螺仪。下面通过仿真证实这一结论。

仿真方案和条件与 1 节相同,仿真结果如图 8~图 10 所示(单个点目标 SAR 图像)。

图 8  $x$  轴陀螺漂移  $1 (^{\circ})/h$ , 其他器件无误差Fig. 8 SAR imaging result of point target while only  $x$ -axis gyro drift is  $1 (^{\circ})/h$ 图 9  $y$  轴陀螺漂移  $1 (^{\circ})/h$ , 其他器件无误差Fig. 9 SAR imaging result of point target while only  $y$ -axis gyro drift is  $1 (^{\circ})/h$ 图 10  $z$  轴陀螺漂移  $1 (^{\circ})/h$ , 其他器件无误差Fig. 10 SAR imaging result of point target while only  $z$ -axis gyro drift is  $1 (^{\circ})/h$ 

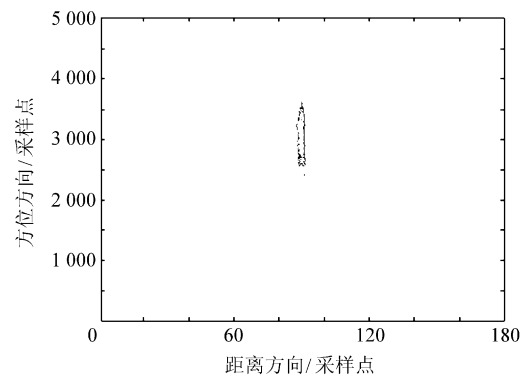
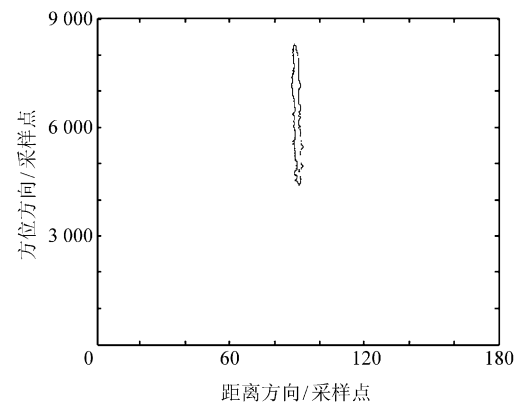
仿真结果分析:仿真结果证明  $y$  轴陀螺仪常值漂移对 SAR 成像分辨率的影响远大于其他两轴陀螺仪,同时陀螺仪误差对 SAR 成像分辨率的影响小于加速度计的影响。

### 3 合成孔径时间与工作波长对成像分辨率的影响

众所周知,正是由于惯性导航系统数据率高

且平滑的特性,即使在合成孔径时间之外可采用 GPS 等组合滤波校正惯性导航误差,在合成孔径时间内仍必须采用纯惯性导航测量天线相位中心位置。纯惯性导航是测量误差随工作时间积累,因此当合成孔径时间增加时,同样误差水平的器件将引起 SAR 成像分辨率的进一步恶化。

仿真条件与 1 节相同,但载机运动速度由  $100 \text{ m/s}$  减慢到  $60 \text{ m/s}$ ,在其他条件不变的情况下 SAR 合成孔径时间增加近一倍。仿真结果见图 11 和图 12(单个点目标 SAR 图像)。

图 11  $x$  轴加速度计偏置  $0.01g$ ,  $V=100 \text{ m/s}$ Fig. 11  $x$ -axis accelerometer bias is  $0.01g$ ,  $V=100 \text{ m/s}$ 图 12  $x$  轴加速度计偏置  $0.01g$ ,  $V=60 \text{ m/s}$ Fig. 12  $x$ -axis accelerometer bias is  $0.01g$ ,  $V=60 \text{ m/s}$ 

由图 11 和图 12 对比可见,在飞行速度减慢的情况下,同样的器件误差导致方位方向分辨率降低近  $50\%$ ,同时目标成像幅度降低近  $50\%$ 。

波长对 SAR 成像分辨率的影响主要体现为相同的位置测量误差对于短波长信号引起的相位误差更加显著,

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta Rf_c}{c} \quad (15)$$

仿真条件与 1 节相同,但发射信号波长由  $0.030 \text{ m}$  降低到  $0.003 \text{ m}$ ,其他条件不变。仿真结果见图 13 和图 14(单个点目标 SAR 图像)。

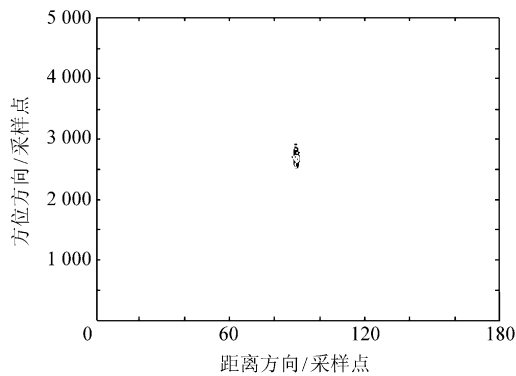


图 13  $y$  轴陀螺漂移  $1 (^{\circ})/h$ , 波长 =  $0.030 \text{ m}$

Fig. 13  $y$ -axis gyro drift  $1 (^{\circ})/h$ , wavelength =  $0.030 \text{ m}$

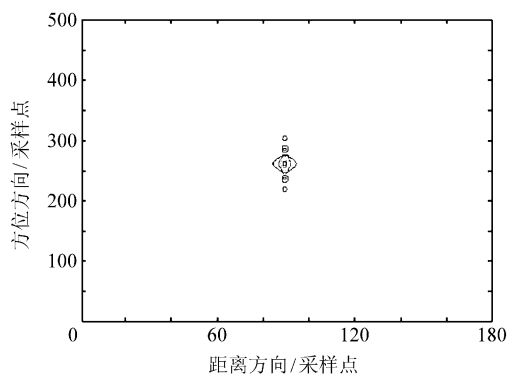


图 14  $y$  轴陀螺漂移  $1 (^{\circ})/h$ , 波长 =  $0.003 \text{ m}$

Fig. 14  $y$ -axis gyro drift  $1 (^{\circ})/h$ , wavelength =  $0.003 \text{ m}$

由图 13 和图 14 对比可见,在发射信号波长减小到原来 10% 的情况下,同样的器件误差导致 SAR 图像分辨率进一步降低。

#### 4 结 论

(1) 所提出的运动补偿系统安装方式能够保证补偿精度并减小运动补偿系统成本,这是因为 SAR 运动补偿系统与一般的捷联惯性导航系统有明显不同,导航需要控制空间三维位置误差,而运动补偿只需要精确测量天线与目标连线的真实距离,即斜距,等效为对一维测量误差的要求。

(2) 在上述安装方式下, $x$  方向加速度计误差对 SAR 成像分辨率的影响远大于其他两轴加速度计误差的影响, $x$  方向加速度计的常值误差直接体现为斜距测量的二次误差,影响成像分辨率。

(3)  $y$  轴陀螺误差对 SAR 成像分辨率影响远大于其他两轴陀螺误差,陀螺仪常值漂移与重力加速度相乘后与加速度计常值误差的影响相同。

(4) 相同的惯性器件误差对 SAR 成像分辨率的影响随着合成孔径时间和波长的不同而不同,时间越长,波长越短,影响越严重,可见 SAR 成像分辨率是多系统参数共同作用的结果。

#### 参 考 文 献

- [1] Jin J S, Zhu Zhigang, Xu Guangyou. A stable vision system for moving vehicle[J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(1):32-39.
- [2] 李笑郁,毛士艺. 干涉 SAR 相位展开算法的比较和改进[J]. 航空学报,2001,22(S1):S115-S119.  
Li Xiaoyu, Mao Shiyi. Comparison and discussion of interferometric SAR phase unwrapping algorithms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(S1): S115-S119. (in Chinese)
- [3] 白霞,洪文,毛士艺. 机载 SAR 系统平台运动容差分配方法[J]. 电子与信息学报,2004,26(3):357-363.  
Bai Xia, Hong Wen, Mao Shiyi. A method of allowable platform motion errors allocation in airborne SAR system[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004, 26(3): 357-363. (in Chinese)
- [4] 曹福祥,保铮,袁建平,等. 用于 SAR 运动补偿的 DGPS/SINS 组合系统研究[J]. 航空学报,2001,22(2):121-124.  
Cao Fuxiang, Bao Zheng, Yuan Jianping, et al. DGPS/SINS integrated system used in SAR motion compensation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(2):121-124. (in Chinese)
- [5] Fornaro G, Franceschetti G, Perna S. Motion compensation errors: effects on the accuracy of airborne SAR images[J]. IEEE Transaction on AES, 2005, 41(4):1338-1352.
- [6] De Camara Macedo K A, Scheiber R. Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR[J]. IEEE GRSL, 2005, 2(2):172-176.
- [7] 丁赤彪. 基于惯导系统的机载 SAR 运动补偿精度分析[J]. 电子与信息学报,2002,24(1):12-18.  
Ding Chibiao. Error analysis of airborne SAR motion compensation using INS[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(1):12-18. (in Chinese)
- [8] 徐晓丹,卢凌,何凯. 机载 SAR 运动补偿系统设计与算法研究[J]. 武汉理工大学学报,2002,26(6):722-724.  
Xu Xiaodan, Lu Ling, He Kai. System designing and algorithm of motion compensation with airborne SAR[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 26(6): 722-724. (in Chinese)
- [9] 柴霖,袁建平,方群,等. 基于 SAR 的组合导航系统仿真研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(5):1252-1254.  
Chai Lin, Yuan Jianping, Fang Qun, et al. Simulation of integrated navigation based on SAR[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1252-1254. (in Chinese)

作者简介:



盛蔚(1972—)女,博士,副教授。主要研究方向:MEMS 惯性器件研制、组合导航以及惯性技术在 SAR 运动补偿中的应用等。

E-mail:shengwei@buaa.edu.cn

(责任编辑:鲍亚平,张利平)