

MEMS IMU 随机误差建模在 SAR 运动补偿中的应用

庄晋升^{1,2,3} 汪丙南^{1,2} 向茂生^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 微波成像技术重点实验室 北京 100190;

3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:随着 SAR 小型化发展趋势,低精度小型化微机电系统惯性测量系统(MEMS IMU)在 SAR 运动补偿中越来越受到重视。鉴于 MEMS IMU 中随机误差较大,为提高其短时间内相对运动测量精度,从 IMU 测量误差对 SAR 成像的影响分析出发,采用基于时间序列分析方法对 MEMS IMU 中随机误差进行建模,并构建 Kalman 方程对 IMU 原始数据进行了滤波处理,减小了随机误差,从而降低随机误差在合成孔径时间内对 SAR 运动补偿的影响。机载 SAR 飞行试验数据处理结果表明,此方法能够有效的减小随机误差,提高 SAR 图像聚焦质量。

关键词:合成孔径雷达;运动补偿;微机电惯性测量装置;随机误差建模;卡尔曼滤波

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Application of MEMS IMU random error modeling in SAR motion compensation

Zhuang Jinsheng^{1,2,3} Wang Bingnan^{1,2} Xiang Maosheng^{1,2}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This is a kind of trend that the synthetic aperture radar (SAR) system needs mini-aturization. With dramatically reduced cost, size, precision and weight, micro electromechanical system inertial measurement unit system (MEMS IMU) has played a major role in SAR motion compensation. It has to take measures to improve the measurement precision of the relative motion within a short time in view of a large random error in MEMS IMU. Firstly, the influence of measurement error on SAR imaging has been analyzed. Secondly, ARMA model has been set up by analyzed the unsystematic error using time series theory. And then, the Kalman equation has been designed and it has been used to filter the IMU raw data. It turns out that the method can be used to reduce the random error which can be helpful to reduce the influence of random noise on SAR motion compensation in a synthetic aperture time Airborne SAR flight test data processing result has proved that the method proposed in this paper can effectively decrease the random error, improve the SAR focusing image quality.

Keywords: SAR; motion compensation; MEMS IMU; random error modeling; Kalman filter

1 引言

合成孔径雷达是一种主动式遥感,具有全天时、全天候的特点,使用不同的信号频率可以对不同的物体有一定的穿透能力,在地物测量、资源探索等领域有着广泛的应用^[1]。

目前,对于小型化、经济化、适用于无人机的高分辨率成像雷达的需求越来越多,以及无人机技术的提升和民用

商业化要求的不断增加,小型化已经成为 SAR 在地球观测及军事应用中的迫切需求^[2-3]。为了实现高分辨率的机载合成孔径雷达,运动补偿是关键。由于大气气流和载体本身存在不稳定的情况,飞机存在扰动,SAR 天线相位中心会偏离理想的匀速直线运动^[4]。这种扰动会反映到雷达回波上,导致图像模糊,降低图像精度,因此运动补偿问题是 SAR 成像的一个关键问题^[5-6]。常规能够业务化运行的有人机平台 SAR,通常装载高精度大型定位定姿系统(posi-

收稿日期:2015-04

tion and orientation system, POS)用于 SAR 运动补偿,例如加拿大 Applanix 公司的 POS AV 610,重量高达 4.49 kg,大小规格为 163 mm×165 mm×163 mm。这种大型 POS 在成本、体积、重量方面已经难以满足 SAR 小型化技术发展要求。

随着材料技术的发展新的微机电系统惯性测量元件开始广泛使用,与传统惯性测量元件相比,MEMS IMU 具有体积小、重量轻、成本低、抗冲击、可靠性高等优点,以现在使用的 STIM300 为例,重量只有 55 g,大小规格是 38.60 mm×35.90 mm×20.00 mm,而且价格上更便宜。虽然 MEMS IMU 元件具有小型化、轻量化、廉价的优点,但是 MEMS 理论和技术的完善,与传统的惯性器件相比,MEMS IMU 的精度低 1~3 个数量级,也达不到高精度分辨率 SAR 的处理要求。

其中,IMU 误差是其主要的误差源之一。因此需要对 MEMS IMU 误差进行测试和建模补偿。影响精度的主要原因就是 MEMS IMU 存在的误差,在惯性技术中通常将惯性器件的误差模型分为静态误差模型、动态误差模型和随机误差模型,其中静态误差和动态误差是确定性误差,确定部分具有规律性,可以通过实时补偿法进行消除。所以降低随机误差能够有效提高 MEMS IMU 的测量精度。文献[7-8]。研究了从原理上研究应用低成本惯导进行 SAR 运动补偿,但是没有研究器件本身误差对 SAR 成像的影响。研究重点是研究 MEMS IMU 的随机误差,进行随机误差建模提高 SAR 运动补偿的精度。

2 MEMS IMU 测量误差对 SAR 成像的影响

由于扰动气流以及飞控系统误差使得载体的难以按照匀速直线运动,此时 IMU 测量数据的机载 SAR 运动补偿的几何关系如图 1 所示,其中 R_A 、 R_B 、 R_C 和分别表示地面目标与理想航线、测量航线和实际航线之间的距离。那么从图可以得到雷达回波的运动补偿残余相位误差为:

$$\varphi_{\sigma}(t) = \varphi_{AB}(t) - \varphi_{AC}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda}[R_B(t) - R_C(t)] \quad (1)$$

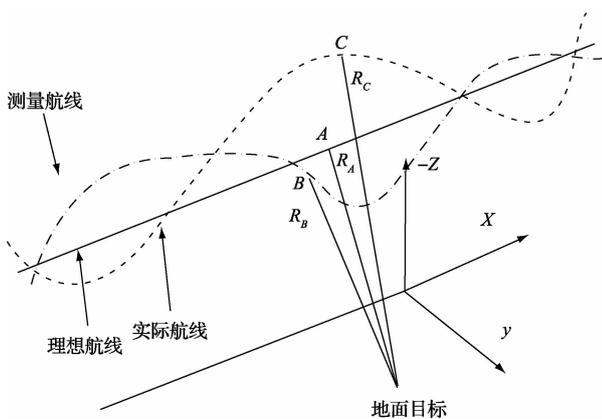


图 1 机载 SAR 运动补偿的几何关系

IMU 系统由三个正交的加速度计和三个正交的陀螺仪组成,其中陀螺仪直接测量平台的角速率参数,经过一次积分获得平台的姿态信息,加速度计可以直接测量平台运动的加速度参数,并可通过积分得出的平台的速度和位移参数,采用捷联的形式,直接安装在平台上,IMU 的与 SAR 天线的几何关系图如图 2 所示。

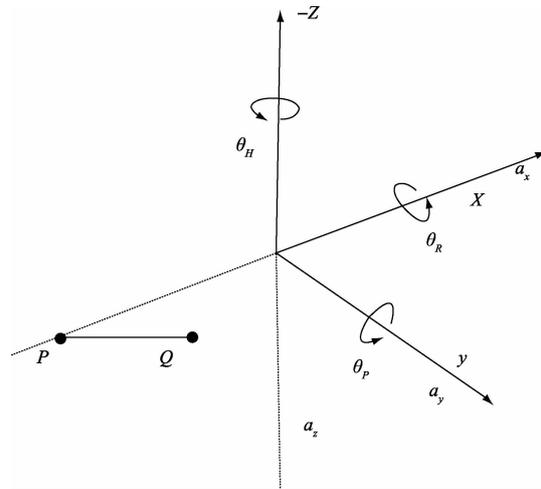


图 2 机载 SAR 天线与 IMU 的几何关系

IMU 需要测量的是 P 位置的运动参数,由于存在杠杆臂效应,实际测量点 Q 会与 P 点有一定的位置偏差,此时 IMU 处的位置可表达为:

$$R_Q(t) = R_0 + V_0 t + \int_0^t \int_0^t a(\tau) d\tau dt' \quad (2)$$

式中: R_0 、 V_0 、 $a(\tau)$ 分别表示 IMU 的初始位置、初始速度和加速度的真值,而 Q 处的位置测量值可以表示为:

$$R_Q'(t) = R_0' + V_0' t + \int_0^t \int_0^t a'(\tau) d\tau dt' \quad (3)$$

式中: R_0' 、 V_0' 、 $a'(\tau)$ 表示 IMU 初始位置、初始速度和加速度的测量值。于是 P 处的真实位置通过测量位置 Q 处的杠杆臂转换得到。则 P 处的位置的真实值和测量值可以表达为:

$$R_P(t) = A[\theta]d_{PQ} + R_Q(t) \quad (4)$$

$$R_P'(t) = A[\theta]d_{PQ} + R_Q'(t) \quad (5)$$

式中: d_{PQ} 为杠杆臂矢量, A 为姿态角 θ 的矩阵,其中 θ_R 、 θ_P 、 θ_H 分别表示横滚角、俯仰角、偏航角,那么转换矩阵 A 可以表示为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_R & -\sin\theta_R \\ 0 & \sin\theta_R & \cos\theta_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_P & 0 & \sin\theta_P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_P & 0 & \cos\theta_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_H & -\sin\theta_H & 0 \\ \sin\theta_H & \cos\theta_H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

结合式(4)(5)可知,IMU 测量误差所造成的位置误差可表示为:

$$\delta R(t) = \delta R_0 + \delta V_0 t + \int_0^t \int_0^{\tau} \delta a(\tau) d\tau dt' + \{A[\theta] - A[\theta]\} d_{PQ} \quad (7)$$

前两项主要来源于 IMU 的定位精度和测速精度;影响的是常值误差和线性误差。第 3 项主要来源于 IMU 的加速度测量误差,这项指标依赖于 IMU 中加速度计和陀螺仪的性能,第 4 项是杠臂误差,与陀螺仪测得的姿态角有关。

IMU 的加速度测量误差主要取决于加速度计和陀螺仪的性能。为了进行量化分析,将加速度测量误差 $\delta a(t)$ 表示为关于加速度计和陀螺仪性能参数的函数^[8],即:

$$\delta a(t) = -\varphi(t) \times [a_{\sigma}(t) - g] + \delta a_{\sigma}(t) \quad (8)$$

式中: $a_{\sigma}(t)$ 为加速度计的测量误差, g 为重力加速度, $\varphi(t)$ 为姿态角误差,可表示为:

$$\varphi(t) = \varphi_0 - \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau \quad (9)$$

式中: φ_0 表示初始姿态角的测量误差, $\epsilon(t)$ 表示陀螺仪的角速率测量误差。将式(9)代入式(8),则 IMU 的加速度测量误差 $\delta a(t)$ 可表示为:

$$\delta a(t) = \delta a_{\sigma}(t) + [\varphi_0 - \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau] \times [g - a_{\sigma}(t)] \quad (10)$$

结合式(6)、(7),可以看出通过 IMU 中的陀螺仪获得的姿态信息对运动测量产生两方面影响:一方面,实际中 IMU 与天线间存在杠臂效应,姿态角通过杠臂传递影响天线相位中心位置;另一方面姿态角对加速度计的积分路径产生影响,从而最终影响天线位置信息。再结合式(10),可以分析得出,加速度计测量误差影响 IMU 的加速度测量误差,通过两次积分后,影响二阶位置误差;陀螺仪则经过三次积分后,影响三阶位置误差。

由文献[9]可以知道,线性和常值误差会导致图像的地理坐标偏移,不影响图像的分辨率,而二阶和三阶等高次项误差,不仅会影响图像的地理坐标偏移,还会造成图像的散焦,影响分辨率。

3 MEMS 随机误差建模与滤波

分析了 MEMS IMU 测量误差对 SAR 成像的影响,而 MEMS IMU 的测量误差由确定性误差和随机误差组成,确定性误差可以在使用前经过标定去除影响,而对于 MEMS IMU 随机误差比较大,不能忽视,需要采用方法来减小随机误差。提高 MEMS IMU 测量精度的技术途径有两种:

1) 从制作工艺出发,优化器件本身结构设计,提高加工工艺水平;

2) 通过软件补偿的方法在器件应用的时候进行补偿,建立合适的误差模型,利用合适的误差补偿算法。

随机时间序列是指通过对随机过程进行采样,得到按照时间顺序排列的数据。时间序列分析法是直接利用进过采样得到的随机时间序列来建立差分方程。由

此,它把一个高度相关的平稳随机时间序列表达成一个数字递推的形式,即把该平稳随机时间序列当作由各时刻出现的白噪声和各时刻相关的随机时间序列所组成^[10],时间序列模型特点是建模需样本数量少,且方便实用,是 MEMS IMU 随机误差建模与补偿的有效手段。本节重点讨论基于时间序列分析的 Kalman 滤波算法对 MEMS IMU 随机误差的补偿,进而对 SAR 进行运动补偿。

3.1 数据建模

按照时间序列的建模要求,建模基本流程如图 3 所示,在 MEMS IMU 的随机误差信号建立时序模型前,需要对数据进行预处理,使其满足零均值、平稳、正态时间序列^[11]要求,接着对预处理数据进行平稳性和正态性检验,优选原始数据,重复上述步骤直至满足建模条件为止,从而获取可建模的 MEMS IMU 测量数据。

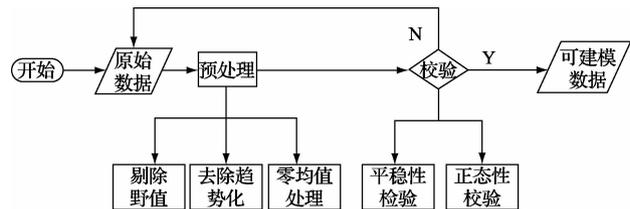


图 3 数据建模预处理和检验流程

预处理过程包含 3 个步骤:

1) 剔除野值: MEMS IMU 在数据采集过程中存在振动、摇摆、冲击等工作不稳定的状态,会有野值出现,对后续处理过程的处理精度有一定的影响,所以在数据建模前必须要除去野值,在这里采取的是拉依达准则。拉依达准则判断原则为:某个数据值大于这组数据标准差 3 倍(一般是 3~5 倍,这里取为 4 倍)时,用其中一个数据或者平均值来替代该数据^[12]。

2) 去除趋势化: MEMS IMU 的数据会呈现出趋势性或季节性,主要表现为一次或二次多项式关系,需要获得去掉趋势项后的 MEMS IMU 数据。这里采用多元回归的方法估出去掉。

3) 零均值处理: MEMS IMU 受环境条件和电气参数等因素影响,原始信号中包含常值分量和随机分量,时间序列分析建模针对的是测量数据中的随机误差,测量数据的常值分量通过均值估计予以消除,并不影响随机误差时间序列分析建模。

在经过预处理后,需要进行数据检验,以确定数据是否符合建模要求,数据检验包含两个方面:

1) 要通过统计检验的方法来检验数据是否平稳,这里采用了实际应用中最多的非参数检验法即游程检验法^[13];

2) 随机时间序列的正态性分布的特性,可以通过最基本的三阶矩与四阶矩来检验或者通过拟合优度检验来验

证。如果检验结果不能满足建模要求,通过优选 IMU 原始测量数据,剔除不稳定部分,获得可用于建模的测量数据。

获取可建模数据后,即可开展时间序列分析建模。为了进一步分析平稳时间序列的统计特性,根据时间序列的观测值构造一个带有参数的数学模型,使这种“参数化”模型既能反映产生时序的具体物理过程或动态系统的规律性,又能将相互关联的时序转化为相互独立的白噪声序列,以便进行分析和处理。实际中常用的时间序列模型包括:AR 模型、MA 模型以及 ARMA 模型。

设 MEMS IMU 随机误差自回归滑动平均模型 ARMA(n, m)一般方程为:

$$x(k) = \varphi_1 x(k-1) + \varphi_2 x(k-2) + \dots + \varphi_n x(k-n) + \omega(k) + \theta_1 \omega(k-1) + \theta_2 \omega(k-2) + \dots + \theta_m \omega(k-m) \quad (11)$$

式中: n 为 AR(自回归)模型阶数, m 为 MA(滑动平均)模型阶数, $\varphi_1, \dots, \varphi_n, \theta_1, \dots, \theta_m$ 分别为对应模型参数, $x(k)$ 为 MEMS IMU 随机误差的状态, $\omega(k)$ 是均值为零,方差为 δ_1 的白噪声,由经过模型拟合后的残差信号的协方差确定。

当 $n=0$ 时,模型简化为 m 阶 MA 模型即:

$$x(k) = \omega(k) + \theta_1 \omega(k-1) + \theta_2 \omega(k-2) + \dots + \theta_m \omega(k-m) \quad (12)$$

当 $m=0$ 时,模型简化为 n 阶 AR 模型即:

$$x(k) = \varphi_1 x(k-1) + \varphi_2 x(k-2) + \dots + \varphi_n x(k-n) + \omega(k) \quad (13)$$

AR 自回归模型中,时间序列自身与其前一个或前几个时刻的观测值有关或有依赖性,通过前几个时刻观测值线性组合估计出当前值。其成立的基本假设待估计序列残差为高斯白噪声,具有自相关函数“拖尾”偏相关函数“截尾”的性质。对于任一相关随机时序总可用一个互相独立的正态白噪声经过加权叠加后获得,即 MA 滑动平均模型。该模型假设随机信号序列与噪声序列具较强的相关性,与 AR 模型相反,其自相关函数“截尾”,偏相关函数“拖尾”。ARMA 自回归滑动平均模型包含了两种模型的特点,假设待估计随机信号与自身和噪声序列均具有相关性。对于实际的 MEMS IMU 来说,需根据实际随机误差特性选择合适的时间序列模型对随机误差进行估计。通常来说, MEMS IMU 中随机误差组成较为复杂,随机序列相关程度不一,需根据实际器件测量数据对齐进行具体建模分析,通过具体信息准则判断具体时间序列模型的适用性。

实际数据处理表明^[14], MEMS IMU 时间序列建模阶数一般不超过 3 阶,因此在模型参数等于 3 的范围内选取。而对于实际实现的系统, ARMA 模型的自回归阶数大于或等于滑动平均阶数,本文拟从 AR(1)、AR(2)、AR(3)、ARMA(1,1)、ARMA(2,1)中选取。

有了可以建模的数据后,需要采用参数估计方法来估

计出 ARMA 的模型参数,这里采用最小二乘法估计出模型参数,然后利用 Akaike 信息准则中的 AIC、FPE 准则对各阶模型进行检验,从模型中选取 AIC 值和 FPE 值最小的作为 MEMS IMU 的模型^[15]。

3.2 卡尔曼滤波器设计

建立了随机误差模型以后,可以采用 Kalman 滤波方法,滤除随机误差。从系统观点出发,认为 MEMS IMU 误差是以白噪声为输入的系统的输出,然而在 Kalman 方程中,量测噪声和系统驱动噪声必须都是白噪声,而这里的系统噪声为有色噪声,如果按照理想状态进行处理,必将造成滤波发散,因此需要采用状态扩增法,进行滤波器改进^[16]。以 ARMA(2,1)模型为例,设系统的状态向量为:

$$X_k = [x_k, x_{k-1}, \omega_k] \quad (14)$$

式中: ω_k 为 MEMS IMU 真实数据, x_k 为 ARMA 模型对应的随机误差。系统的状态方程和量测方程分别为:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ \omega_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{k,k-1} & 0 \\ I & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} W_{k-1} \quad (15)$$

$$Z_k = H_k X_k + V \quad (16)$$

式中: W_{k-1} 是均值为 0,方差为 δ_1 的白噪声序列; V 是均值为 0,方差为 δ_2 (取为静态下信号的方差) $\Phi_{k,k-1}$ 为由 ARMA(2,1)模型参数确定的矩阵^[16]。

滤波器初始参数如下:状态初值: $X_k = [0, 0, 0]$, 误差协方差阵: $P_0 = I$ (单位阵), 系统噪声方差阵: $Q = \delta_1 \cdot I$, 量测噪声协方差阵: $R = \delta_2$ 。

4 数据实验

实际建模用的 MEMS IMU 采用的是如图 4 所示的挪威 sensoror 公司生产的 STIM 300, STIM300 陀螺的偏置不稳定性为 $0.5^\circ/\text{h}$, 陀螺角随机游走为 $0.15^\circ/\sqrt{\text{h}}$, 基于温度梯度的陀螺偏移误差为 $10^\circ/\text{h}$, 加速度计偏置不稳定性为 0.05 mg , 轴对准误差为 1 mrad 。STIM300 的重量小于 55 g , 体积小于 35 cm^3 。开展了机载 X 波段 SAR 飞行试验,将 MEMS IMU STIM300 搭载在中国科学院奖状 II 型飞行平台上,同时平台上还安装了高精度 POS AV610 系统,作为小型惯导运动测量的参考真值,本节从静态、动态两方面对 MEMS IMU 数据进行了处理,并进一步与差分 GPS 输出结果进行组合导航处理,最后输出的运动参数应用到 SAR 成像运动补偿中。



图 4 挪威 sensoror 公司的 STIM 300

以陀螺仪 Z 轴为例,经过数据预处理后,获得可建模数据,利用 MATLAB 里面的 armax 函数估计参数,然后估计出相应模型的 AIC 和 FPE 值,从中选择 AIC 和 FPE 值最小的模型,模型的准则值如表 1 所示。

表 1 ARMA 模型的确定

评估 准则	AR(1)	AR(2)	AR(3)	ARMA(1,1)	ARMA(2,1)
AIC	-4.835	-4.855	-4.875	-4.892	-4.948
FPE	0.007 789	0.007 779	0.007 768	0.007 719	0.007 666

由表可以看出,随着 AR 自回归模型阶数增大,信息准则值逐渐变小,模型对数据的拟合效果更好;比较 ARMA(1,1)与 AR(3)可知,ARMA(1,1)模型估计效果更好,表明待估计随机信号不仅依赖于自身,还与残差噪声 $w(k)$ 具有较强的相关性;ARMA(2,1)模型具有最小的 AIC 和 FPE 值,更适用于 MEMS 陀螺仪 Z 轴随机误差模型,模型参数估计结果如下:

$$x(k) = 0.839 7x(k-1) + 0.128 8x(k-2) +$$

$$w(k) + 0.959 6w(k-1) \quad (17)$$

式中: $x(k)$ 为陀螺仪随机误差的状态, $w(k)$ 是均值为零,方差为 0.007 778 的白噪声,由经过模型拟合后的残差信号的协方差确定。

采用 ARMA(2,1)模型对采集的 STIM300 数据进行建模,然后依据 3.2 节中滤波器设计进行滤波,自此完成数据建模滤波的全部过程,其他轴和加速度计的过程类似,不再赘述。

4.1 随机误差建模滤波结果

取 MEMS IMU 的陀螺仪 Z 轴静态数据为例,代表陀螺仪静态数据处理,实验数据为飞机起飞前静止时的数据,由于随机误差以及扰动的存在,数据呈随机时间序列形式,结果如图 5 所示。

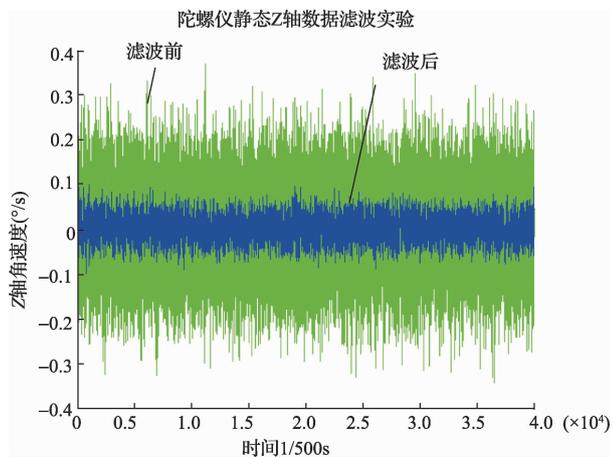


图 5 陀螺仪静态 Z 轴数据滤波实验

可以从图中明显看出噪声有了显著的降低,滤波后的误差的方差由原先的 $1.20E-05(^{\circ}/s)^2$ 降低为 $1.18E-06$

$(^{\circ}/s)^2$, 方差减小为原先的 10 倍。

再取加速度计 Z 轴静态输出为例,代表加速度计静态数据处理,加速度计 Z 轴记录了天线方向的加速度,在静止的时候,输出为重力加速度,经过滤波后的数据对比如图 6 所示。

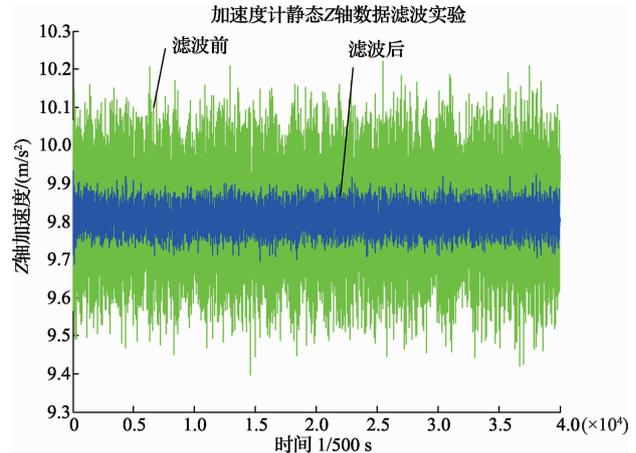


图 6 加速度计静态 Z 轴数据滤波实验

可以从图中明显看出噪声有了显著的降低,滤波后的误差的方差由原先的 $0.012(m/s^2)^2$ 降为 $7.912E-04(m/s^2)^2$, 方差减小了十多倍。

取 MEMS IMU 的陀螺仪 Z 轴动态数据为例,代表动态数据处理,实验数据为飞机起飞后平稳飞行时进行成像时的运动数据,如图 7 所示。

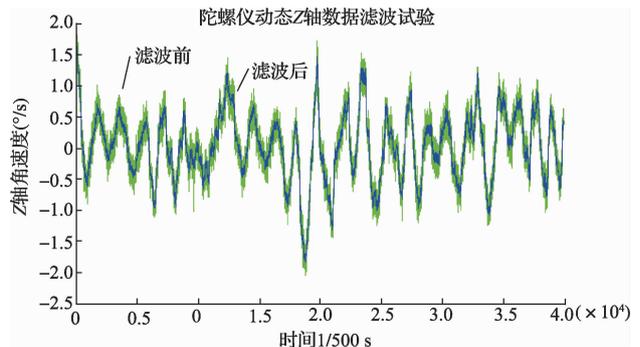


图 7 陀螺仪动态 Z 轴数据滤波实验

可以从图中明显看出噪声有了显著的降低,并且陀螺仪的主体信号没有破坏,证明方法是可行的。对其他轴加速度计和陀螺仪同样处理,获得的结果类似,不再赘述。

4.2 机载 SAR 成像试验

惯导数据经过建模滤波后,获得处理后 MEMS IMU 数据,然后分别将滤波前后的数据与差分 GPS 输出结果进行组合滤波处理,最终得到的平台的位置和姿态参数,将 POS610 的运动参数作为飞行平台的运动真值,将组合导航后的数据和 POS610 的差值作为测量误差。图 8 为

SAR 成像时间内随机误差建模滤波前后的斜距误差变化情况,可以看到在成像的时间内,建模滤波处理后 SAR 斜距误差变化幅度从 10 mm 下降到 5 mm,局部优于 2 mm,基本能够满足 X 波段图像中等分辨率聚焦要求。

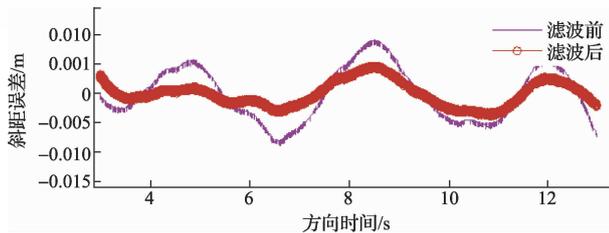


图 8 SAR 成像时间内滤波前后斜距误差变化

进一步进行面目标成像对比试验,如图 9 所示,上图为随机误差滤波前成像图,下图是随机误差滤波后成像图。

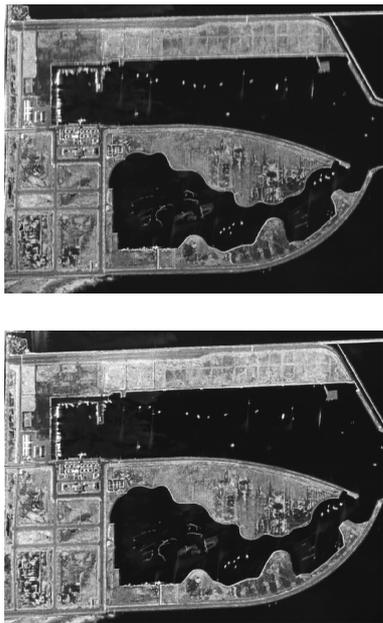


图 9 随机误差滤波对比(上:前 下:后)

取局部地区两幅图对比,如图 10 和 11 所示。

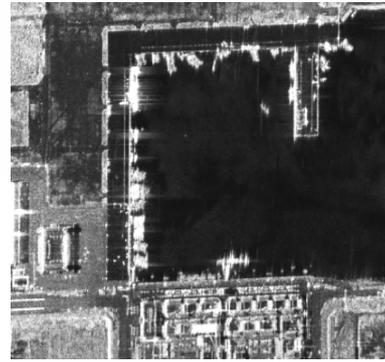
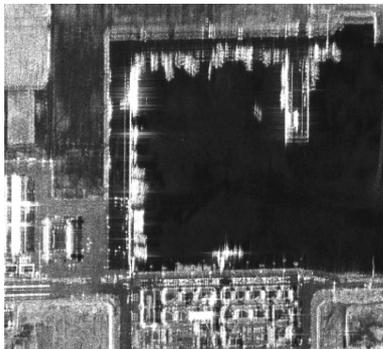


图 10 局部地区对比图(上:前 下:后)

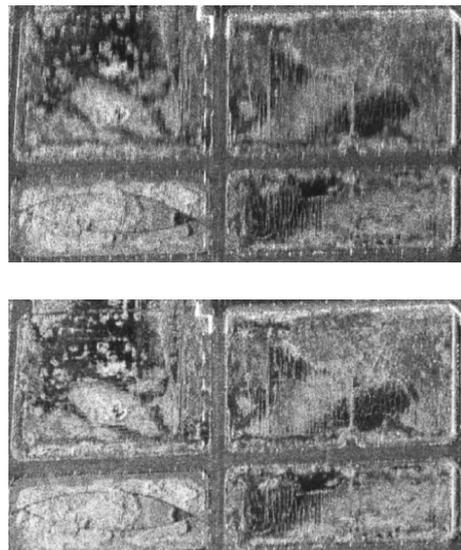


图 11 局部地区对比图(上:前 下:后)

由图可知,经过随机误差建模滤波后,聚焦质量和信噪比均有所提升,图像视觉效果有所改善。

5 结 论

采用了 MEMS IMU 对 SAR 进行运动补偿,分析了 MEMS IMU 的测量误差对 SAR 成像的影响,针对其中的随机误差,利用基于时间序列分析方法,对其进行数学建模,设计了 Kalman 滤波器,对 STIM300 原始数据进行了滤波,试验结果表明,经滤波后 MEMS IMU 测量随机误差得到有效降低,机载 SAR 成像试验结果表明提出的方法能够改善 SAR 图像聚焦质量,提高 MEMS IMU 运动补偿精度。

参 考 文 献

- [1] 雷斌,丁赤飏. 一种基于 SAR 图像视觉特征的改进像素掩蔽方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11):37-41.

- [2] 陈少华, 韩冰, 雷斌. SAR 海冰 MRF 分割精度与图像质量的关系研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(3):31-35.
- [3] 高许岗, 雍延梅. 无人机载微型 SAR 系统设计与实现[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(1): 35-38.
- [4] 张英杰, 王彦平, 谭维贤, 等. 机载前视阵列 SAR 运动补偿研究[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 168-179.
- [5] ZAUGG E C, LONG D G. Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 2990-2998.
- [6] 李芳芳, 仇晓兰, 孟大地, 等. 机载双天线 InSAR 运动补偿误差的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 559-567.
- [7] 刘瑞华, 赵云仙. 基于低成本 INS 的机载 SAR 运动补偿研究[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(1): 9-13.
- [8] MAO Y, XIANG M, WEI L, et al. The effect of IMU inaccuracies on airborne SAR imaging[J]. Journal of Electronics (China), 2011, 28(4-6): 409-418.
- [9] 郑波浪. 机载高分辨率合成孔径雷达运动补偿研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006.
- [10] 王姝, 常玉清, 赵珍, 等. 基于 Fisher 特征投影差异度的间歇过程故障预报[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2):441-446.
- [11] 李杰, 张文栋, 刘俊. 基于时间序列分析的 Kalman 滤波方法在 MEMS 陀螺仪随机漂移误差补偿中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 2215-2219.
- [12] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 第 5 版. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [13] 滕云龙, 师奕兵. GPS 载波相位测量数据的时间序列分析建模研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(9):18-22.
- [14] 蔡雄. 硅微机械陀螺仪的随机误差建模与补偿[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [15] 杨叔子. 时间序列分析的工程应用 [M]. 第 2 版. 武汉:华中科技大学出版社, 2007:227-265.
- [16] 苏滢滢, 蒋心怡, 沈斌. 有色噪声的实时滤波处理[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(4): 143-145.
- [17] 袁赣南, 梁海波, 何昆鹏, 等. MEMS 陀螺仪随机漂移的状态空间模型分析及应用[J]. 传感技术学报, 2011, 24(6): 853-858.

作者简介

庄晋升, 1990 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为合成孔径雷达运动补偿系统和方法。

E-mail: zhuangjinsheng90@126.com

汪丙南, 1984 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为干涉合成孔径雷达信号仿真和处理方法。

E-mail: wbn@mail.ie.ac.cn

向茂生, 1964 年出生, 研究员, 博士生导师。主要研究方向为干涉合成孔径雷达系统技术和方法。

E-mail: xms@mail.ie.ac.cn