

SINS/GPS 组合平滑估计在机载 SAR 实时运动补偿中的应用

宫晓琳* 秦婷婷

(北京航空航天大学惯性技术重点实验室 北京 100191)

(北京航空航天大学新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室 北京 100191)

摘要: 针对机载合成孔径雷达(SAR)实时成像运动补偿对高精度运动参数的需求, 该文提出一种基于捷联惯性导航系统/全球定位系统(SINS/GPS)组合 Rauch-Tung-Striebel (R-T-S)平滑估计的实时运动补偿方案。该方案在实时卡尔曼滤波的基础上, 对 SAR 每一次合成孔径时间段内的滤波结果再进行后向平滑递推, 进一步修正滤波结果。仿真试验和飞行成像数据处理结果表明, 该方案可以有效提高合成孔径时间段内运动参数的估计精度。

关键词: 合成孔径雷达; 运动补偿; 捷联惯性导航系统/全球定位系统组合; 平滑估计

中图分类号: TN959.73; U666.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)07-1560-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01258

Application of Smoothing Algorithm in SINS/GPS Integrated System for Airborne SAR Real-time Motion Compensation

Gong Xiao-lin Qin Ting-ting

(Science & Technology on Inertial Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Novel Inertial Instrument and Navigation System Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering the urgent need of high precision motion parameter for SAR motion compensation in real-time, a motion compensation scheme using the Strapdown Inertial Navigation System/Global Positioning System (SINS/GPS) integrated system based on Rauch-Tung-Striebel (R-T-S) smoothing method is proposed. In this scheme, the Kalman filtering is done firstly and based on this, the backward smoothing iteration is performed for correcting the filter's results during each synthetic aperture moment. The results of numerical simulation and flight-test data processing show that the scheme can effectively improve the precision of estimates of the motion parameter in the synthetic aperture moment.

Key words: SAR; Motion compensation; Strapdown Inertial Navigation System/Global Positioning System (SINS/GPS) integration; Smoothing estimation

1 引言

机载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种机载对地面目标精细成像的技术, 在国土测绘、地质勘探等领域有重要用途, 同时还具有重要的军事用途^[1, 2]。SAR 成像基本原理要求载机做匀速直线运动。实际中, 由于设备性能、大气湍流等因素的影响, SAR 天线相位中心偏离理想的匀速直线运动^[3, 4]。由此造成的运动误差, 将对 SAR 成像质量产生不可忽视的影响, 因此需对其进行精确测

量和补偿^[5, 6]。

基于捷联惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的组合测量系统是目前机载 SAR 获取空间运动参数的主要手段^[7]。在对地观测应用中, 该系统主要由一个惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、一套 GPS 接收机、一个导航计算机(Navigation Computer System, NCS)以及一套后处理软件组成^[8]。

机载 SAR 成像可分为实时成像和离线成像两种方式。针对实时成像, 工程上普遍采用卡尔曼滤波(Kalman Filtering, KF)进行 SINS/GPS 实时组合来获得运动参数^[9]。而对于离线成像, 常采用平滑估计方法利用更多的量测信息, 进一步提高估计精度。目前, 为克服滤波估计精度低的不足, 文献[10]和文献[11]提出一种双捷联方案, 即在合成孔径时间段内

2013-08-20 收到, 2014-03-24 改回

国家自然科学基金(61004129, 61121003, 61233005), 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-12-LZGF-014)和国家 973 计划项目(2009CB724002)资助课题

*通信作者: 宫晓琳 gongxiaolin@buaa.edu.cn

采用重新启动的纯捷联解算结果进行运补。该方案满足了 0.5 m 分辨率机载 SAR 实时运动补偿的要求,但合成孔径时间仅为 15 s。由于雷达信号波长以及载机飞行速度的不同,合成孔径时间从十几秒到一百秒不等甚至更长^[12],而且随着成像分辨率的提高,SAR 对运动参数精度的要求也越来越高。此时,纯捷联算法随时间积累的误差将使该方案难以满足要求。

由机载 SAR 成像处理过程可知,实时成像是将每次合成孔径时间内的运动参数一起用于成像补偿,因此是“准实时”成像。也就是说,可以在每个合成孔径时间结束时将该段运动参数发送给 SAR 成像处理系统。针对这一特点,本文提出将离线估计方法——Rauch-Tung-Striebel(R-T-S)固定区间平滑应用于机载 SAR 实时成像用 SINS/GPS 组合测量系统。仿真试验和飞行成像数据处理验证了本文所提方法的有效性。

2 基于 R-T-S 平滑的 SINS/GPS 组合运动补偿方案设计

设计思路:在 SINS/GPS 组合测量系统实时组合中,采用 KF 进行前向滤波(时间前进方向);当一次合成孔径时间开始时,机载 SAR 实时成像处理计算机向导航计算机(NCS)发起运动补偿请求信号,NCS 在前向滤波的同时开始存储滤波参数和滤波结果;当合成孔径时间结束时,成像处理计算机向 NCS 发起运动补偿结束信号,NCS 开启平滑估计器,利用所有时刻的量测信息和前向滤波结果对该合成孔径时间段内的运动参数进行后向递推,并通过前馈误差控制器修正前向滤波的估计结果,得到该合成孔径时间内的平滑最优运动参数,发送给成像处理计算机。基于 R-T-S 平滑的 SINS/GPS 组合运动补偿方案算法模块框图如图 1 所示。

3 R-T-S 固定区间平滑算法

R-T-S 固定区间平滑是利用固定时间区间中得到的所有量测值,来估计这个区间中每个时刻的状态^[13]。该算法包括前向滤波和后向递推两个部分。其中,前向滤波采用标准 KF,计算并存储每一时刻的状态值和相应参数;后向递推则是将前向过程的存储值作为输入量,利用后向递推公式获得最优的平滑估计结果。

考虑线性离散系统:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}_{k+1/k} \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

式中 $k = 0, 1, \dots, N$; $\mathbf{X}_k \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; $\mathbf{F}_{k+1/k} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{G}_k \in \mathbf{R}^{n \times l}$ 为系统噪声矩阵; $\mathbf{Z}_k \in \mathbf{R}^m$ 为量测向量; $\mathbf{H}_k \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 为量测矩阵; $\mathbf{w}_k \in \mathbf{R}^l$; $\mathbf{v}_k \in \mathbf{R}^m$ 分别为系统噪声和量测噪声向量,并且假定 \mathbf{w}_k , \mathbf{v}_k 是互相独立的零均值高斯白噪声,协方差分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 。

标准离散型 KF 基本方程为^[14]

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1/k} = \mathbf{F}_{k+1/k} \hat{\mathbf{X}}_k \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{k+1/k} = \mathbf{F}_{k+1/k} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1/k}^T + \mathbf{G}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{G}_k^T \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k}) \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{R}_{k+1}^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^{-1} = \mathbf{P}_{k+1/k}^{-1} + \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{R}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1} \quad (7)$$

式中 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1/k}$ 为状态一步预测; $\hat{\mathbf{X}}_k$ 为状态估计; $\mathbf{P}_{k/k-1}$ 为一步预测均方误差阵; \mathbf{K}_{k+1} 为滤波增益阵; \mathbf{P}_k 为估计均方误差阵。在给定初始值 $\hat{\mathbf{x}}_0$ 和 \mathbf{P}_0 时,根据 t_k 时刻的量测 \mathbf{Z}_k ,可以递推计算得到 k 时刻的状态估计。

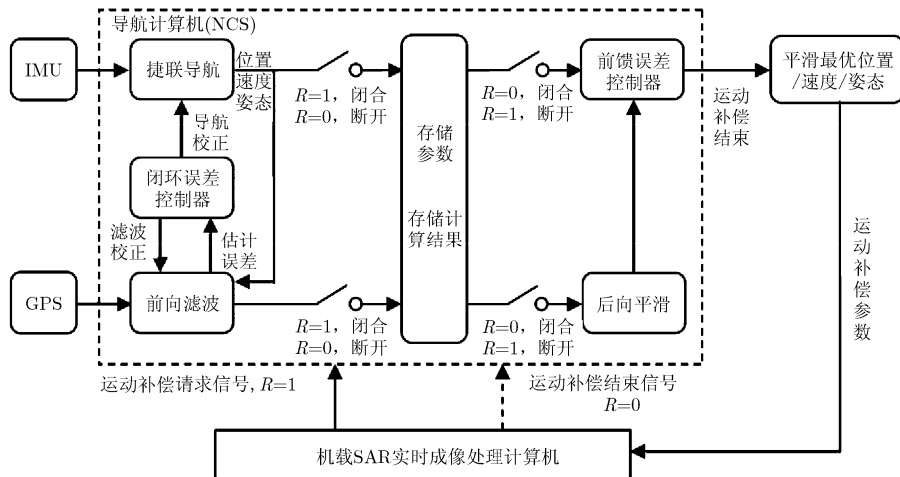


图1 基于R-T-S平滑的SINS/GPS组合运动补偿方案算法模块框图

在卡尔曼滤波过程中,按 $k = 0, 1, \dots, N - 1$ 的顺序方向计算并存储各时刻的状态一步预测 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1/k}$ 、状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1}$ 、状态转移矩阵 $\mathbf{F}_{k+1/k}$ 、估计均方误差阵 \mathbf{P}_k 和一步预测均方误差阵 $\mathbf{P}_{k+1/k}$ 。当 KF 结束后,利用存储的数据,按 $k = N - 1, N - 2, \dots, 0$ 的逆时方向进行 R-T-S 固定区间平滑算法递推。

R-T-S 固定区间平滑算法递推公式为^[15]

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/N} = \hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{A}_k (\hat{\mathbf{X}}_{k+1/N} - \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k}) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{k/N} = \mathbf{P}_k + \mathbf{A}_k (\mathbf{P}_{k+1/N} - \mathbf{P}_{k+1/k}) \mathbf{A}_k^T \quad (9)$$

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1/k}^T \mathbf{P}_{k+1/k}^{-1} \quad (10)$$

式(8)~式(10)的边界条件为 $\hat{\mathbf{X}}_{N/N}$ (即 KF 中的 $\hat{\mathbf{X}}_N$) 和 $\mathbf{P}_{N/N}$ (即 KF 中的 \mathbf{P}_N), \mathbf{A}_k 为平滑增益矩阵。

4 SINS/GPS 组合测量系统建模

SINS/GPS 组合测量系统数学模型是进行平滑估计的基础,包括状态方程和量测方程两部分。导航坐标系选择东北天地理坐标系。

4.1 状态方程

状态方程的核心是惯性导航系统误差方程^[16],由姿态误差方程、速度误差方程、位置误差方程组成。此外,将陀螺和加速度计的常值漂移和常值偏置也扩充为状态。姿态、速度、位置误差方程为^[17, 18]

$$\dot{\phi} = \phi \times \omega_{in}^n + \delta\omega_{in}^n - \mathbf{C}_b^n \epsilon^b \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \delta\dot{\mathbf{V}} = & -\phi^n \times \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta\mathbf{V}^n \\ & - (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times \mathbf{V}^n + \mathbf{C}_b^n \nabla^b \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta\dot{L} = & -V_N \delta h / (R_M + h)^2 + \delta V_N / R_M + h \\ \delta\dot{\lambda} = & -\frac{V_E \sin L}{(R_N + h) \cos^2 L} \delta L - \frac{V_E}{(R_N + h)^2 \cos L} \delta h \\ & + \frac{1}{(R_N + h) \cos L} \delta V_E \\ \delta\dot{h} = & \delta V_U \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(11)~式(13)中的变量含义参见文献[19]。

将标定补偿后的陀螺和加速度计误差近似为随机常值和白噪声,并由以下微分方程描述:

$$\dot{\epsilon}_x = 0, \quad \dot{\epsilon}_y = 0, \quad \dot{\epsilon}_z = 0 \quad (14)$$

$$\dot{\nabla}_x = 0, \quad \dot{\nabla}_y = 0, \quad \dot{\nabla}_z = 0 \quad (15)$$

式中 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 和 $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 分别为载体系 3 个坐标轴上陀螺的常值漂移和加速度计常值偏置。

由式(11)~式(15)所示的方程,可得形如式(1)所示的状态方程。状态变量 $\mathbf{X} = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta V_E \ \delta V_N \ \delta V_U \ \delta L \ \delta \lambda \ \delta h \ \epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]^T$ 。其中下脚标 E, N 和 U 分别代表东向,北向和天向; ϕ_E, ϕ_N 和 ϕ_U 为数学平台失准角; $\delta V_E, \delta V_N$ 和 δV_U 分别为东

向,北向和天向速度误差; $\delta L, \delta \lambda$ 和 δh 分别为纬度误差、经度误差和高度误差;过程噪声 $\mathbf{w} = [w_{\epsilon_x} \ w_{\epsilon_y} \ w_{\epsilon_z} \ w_{\nabla_x} \ w_{\nabla_y} \ w_{\nabla_z}]^T$,包括陀螺和加速度计的随机误差(不包括随机常值误差);过程噪声方差阵 \mathbf{Q} 根据 SINS/GPS 组合系统的惯性器件噪声水平选取。

4.2 量测方程

取 SINS 与 GPS 输出的位置和速度之差作为观测量,可得形如式(2)所示的 SINS/GPS 组合测量系统滤波量测方程。量测变量 $\mathbf{Z} = [\delta V'_E \ \delta V'_N \ \delta V'_U \ \delta L' \ \delta \lambda' \ \delta h']^T$,其中各元素分别为捷联解算与 GPS 的东向速度、北向速度、天向速度、纬度、经度和高度之差;量测矩阵 $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_V \ \mathbf{H}_P]^T$,其中 $\mathbf{H}_P = [\mathbf{0}_{3 \times 6} \ \text{diag}(R_M + h, (R_N + h) \cos L, 1) \ \mathbf{0}_{3 \times 6}]$, $\mathbf{H}_V = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \ \text{diag}(1, 1, 1) \ \mathbf{0}_{3 \times 9}]$ 。 $\mathbf{v} = [v_{\delta V'_E} \ v_{\delta V'_N} \ v_{\delta V'_U} \ v_{\delta L'} \ v_{\delta \lambda'} \ v_{\delta h'}]$ 为量测噪声,方差阵 \mathbf{R} 根据 GPS 的位置、速度噪声水平选取。

5 试验验证与分析

为验证本文提出的基于 R-T-S 平滑的运动补偿方案的有效性,进行仿真验证和飞行成像数据的处理验证。

5.1 仿真试验与分析

飞行轨迹设定:参照机载 SAR 成像多次飞行的试验轨迹数据,采用轨迹发生器生成一条典型的 S 机动+U 型仿真飞行轨迹,如图 2 所示。并在机动转弯处,考虑横滚角的变化。飞行时间共计 1300 s。其中,速度为 100 m/s,初始航向角为 40°、俯仰角和横滚角均为 0°。飞行过程:飞机首先从 A 点匀速飞行 100 s 至 B 点;然后在 200 s 内完成 S 机动;之后从 C 点匀速飞行 400 s 至 D 点,180°转弯(耗时 200 s),之后从 E 点匀速飞行 400 s 至 F 点。

惯性器件噪声选取:陀螺常值漂移和随机漂移均为 0.1°/h,加速度计常值偏置为 100 μg ,加速度计随机偏置为 50 μg 。GPS 速度量测噪声为 0.03 m/s,水平位置量测噪声为 0.1 m,高度量测噪声为 0.15 m。

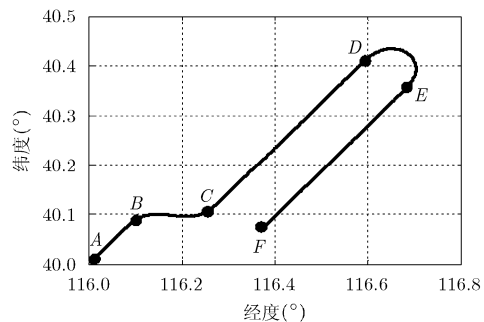


图 2 仿真试验飞行轨迹

在 *CD* 和 *EF* 成像段中任意选取两个时段作为触发的合成孔径时间, 时长分别为 30 s 和 100 s。对这两种情况进行仿真, 并将本文方法(R-T-S)与 KF、捷联解算(记为捷联)进行对比分析。两种合成孔径时间情况下的仿真结果如图 3~图 8 所示。

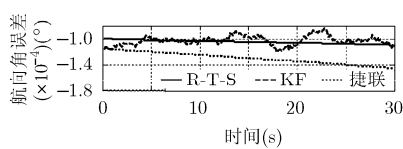
仿真试验结果定性分析: 从图 3~图 8 可以看出, 针对合成孔径时间分别为 30 s 和 100 s 这 2 种情况, 捷联解算的姿态、速度和位置误差均随时间呈发散趋势, 且误差随合成孔径时间的增长而增大; KF 滤波估计的误差曲线波动较大; R-T-S 平滑估计的误差曲线最为平稳, 在 KF 滤波的基础上获得了最好的相对精度。

仿真试验结果定量分析: 对合成孔径时间为 100 s 时捷联解算、KF 滤波和 R-T-S 平滑这 3 种方

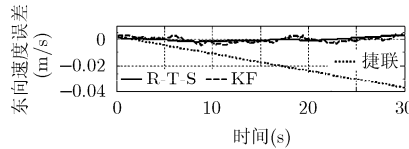
法的运动参数误差的标准差(Standard Deviations, STD)进行统计, 如表 1 所示。

表 1 100 s 合成孔径时间内运动参数误差(STD)

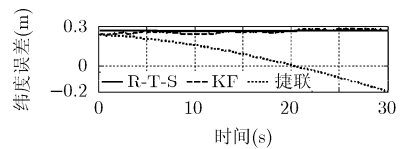
运动参数误差	捷联	KF	R-T-S
航向角误差(°)	0.001580	0.000532	0.000485
俯仰角误差(°)	0.001613	0.000216	0.000019
横滚角误差(°)	0.000028	0.000004	0.000002
东向速度误差(m/s)	0.039211	0.002283	0.000807
北向速度误差(m/s)	0.015597	0.001629	0.000617
天向速度误差(m/s)	0.028753	0.001776	0.001057
纬度误差(m)	0.769648	0.012331	0.006567
经度误差(m)	4.790050	0.037949	0.022112
高度误差(m)	1.544700	0.015518	0.010131



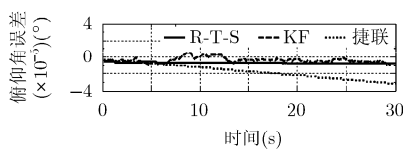
(a) 航向角误差



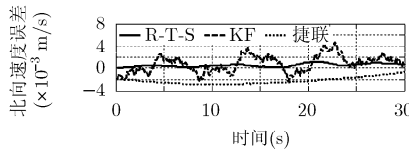
(a) 东向速度误差



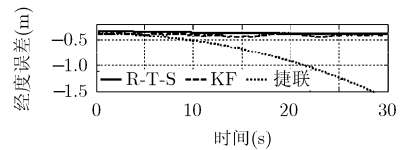
(a) 纬度误差



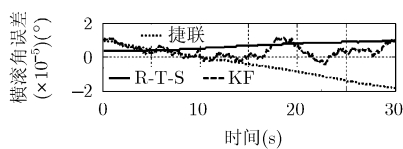
(b) 俯仰角误差



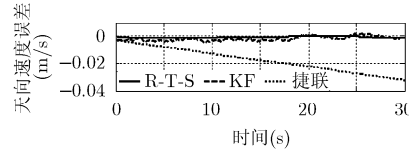
(b) 北向速度误差



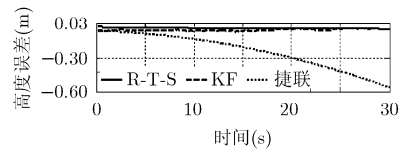
(b) 经度误差



(c) 横滚角误差



(c) 天向速度误差

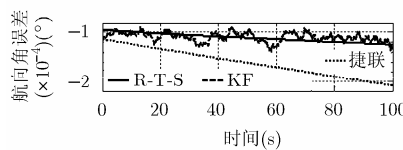


(c) 高度误差

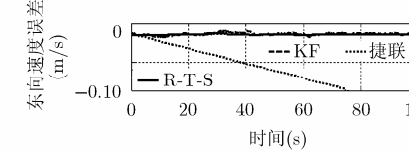
图 3 姿态误差(合成孔径时间为 30 s)

图 4 速度误差(合成孔径时间为 30 s)

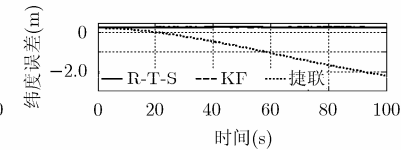
图 5 位置误差(合成孔径时间为 30 s)



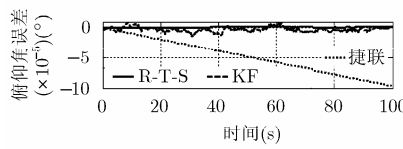
(a) 航向角误差



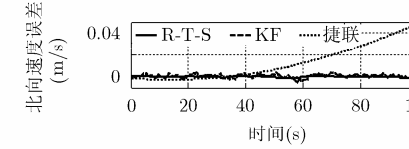
(a) 东向速度误差



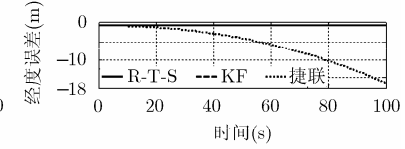
(a) 纬度误差



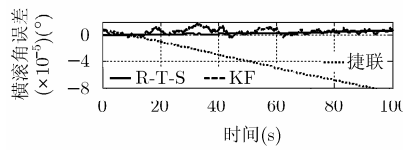
(b) 俯仰角误差



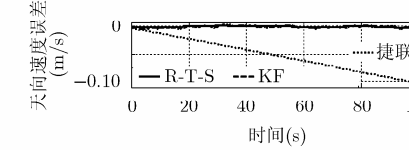
(b) 北向速度误差



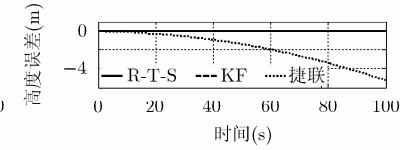
(b) 经度误差



(c) 横滚角误差



(c) 天向速度误差



(c) 高度误差

图 6 姿态误差(合成孔径时间为 100 s)

图 7 速度误差(合成孔径时间为 100 s)

图 8 位置误差(合成孔径时间为 100 s)

从表 1 所示的运动参数标准差可以看出,平滑估计的运动参数误差标准差最小,其次是滤波估计,再次是捷联解算。

从以上定性和定量分析来看,与捷联解算和滤波估计相比,在合成孔径时间段内平滑估计方法在平滑度上具有明显的优势,提高了运动参数的相对精度。由于 R-T-S 平滑方法需要后向递推过程,因此相比 KF 会需要更长的计算时间。对不同合成孔径时间 R-T-S 延时情况进行统计,当合成孔径时间分别为 30 s 和 100 s 时,该方法耗时分别为 0.09 s 和 0.29 s。耗时均较短,可以满足 SAR 实时成像的要求。

此外,实际情况下,飞机很难保持理想的匀速直线运动,存在正弦扰动。故在仿真试验中考虑在直线成像段的航向上叠加正弦扰动的情况,在此基础上验证本文方法的有效性。正弦扰动幅度约 10 m,周期为 32 s,如图 9 所示。选取 100 s 合成孔径时间对 3 种方法的运动参数误差进行统计,统计结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,3 种方法的运动参数误差与不叠加正弦扰动的情况相比基本相当,个别参数略有增大。其中 R-T-S 方法的运动参数误差最小,KF 滤波次之,与未叠加正弦扰动的仿真结论相同。

5.2 飞行试验数据处理与分析

采用 SINS/GPS 组合测量系统与相机的联合飞行试验对本文所提方案进行验证。试验场地为拥有大量地面控制点的检校场,所有地面控制点均经过长期静态观测,具有较高的位置精度。试验设备包括基于挠性陀螺 IMU 的 SINS/GPS 组合测量系统和一款哈苏相机,试验载机为 A2C 水上超轻型飞机。其中 GPS 天线安装在飞机的顶部,相机和 IMU 安装在飞机后座。

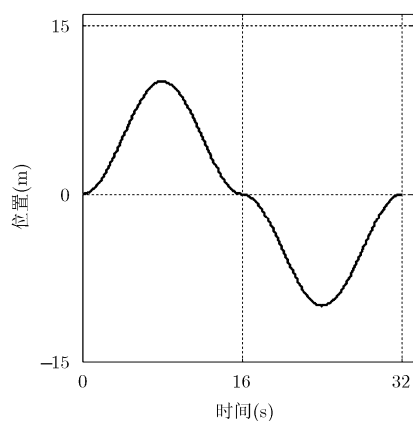


图 9 正弦扰动图

表 2 叠加正弦扰动情况下 100 s 合成孔径时间内运动参数误差(STD)

运动参数误差	捷联	KF	R-T-S
航向角误差(°)	0.005017	0.002216	0.000708
俯仰角误差(°)	0.001476	0.000187	0.000029
横滚角误差(°)	0.000631	0.000020	0.000010
东向速度误差(m/s)	0.049675	0.001127	0.000679
北向速度误差(m/s)	0.046535	0.001031	0.000702
天向速度误差(m/s)	0.027253	0.001487	0.000710
纬度误差(m)	2.067636	0.010191	0.007406
经度误差(m)	3.776247	0.022835	0.012747
高度误差(m)	1.387210	0.012069	0.007327

SINS/GPS 组合测量系统器件精度: 3 个陀螺的常值漂移和随机漂移均约为 $0.1^\circ/\text{h}$, 3 个加速度计的常值偏置和随机偏置均约为 $100 \mu\text{g}$ 。系统的速度量测噪声为 0.01 m/s , 位置量测噪声为 $10 \text{ mm}+1.5 \text{ ppm}$ 。

由 GPS 数据绘制的飞行轨迹如图 10 所示。在成像区域(虚线框)中有一系列的离散成像点,利用地面控制点信息和成像数据,通过空中三角测量法可以得到高精度的姿态和位置信息,将其作为本文算法精度对比的基准。目前,空中三角测量法是一种国内外公认的有效检验 SINS/GPS 组合测量系统精度的方法。本次飞行试验位置姿态基准由中国测绘院提供,由地面控制点信息和成像数据通过空中三角测量法解算得到。本次飞行试验条件良好,地面控制点信息精确已知并且天气晴朗,这些因素确保空中三角测量法可以获得最高的位置和姿态精度,以使其结果可作为 SINS/GPS 组合测量系统的基准。

在成像区域内选择一段连续的 100 s 数据,作为一个合成孔径时间段。该段数据中共有 20 个成像点(基准点)。表 3 为该时间段内捷联解算、KF 和 R-T-S 这 3 种方法的运动参数误差的标准差。

从表 2 的数据可以看出,R-T-S 平滑估计的相对误差明显小于 KF 滤波估计和捷联解算的结果,与仿真结论一致,初步验证了本文所提方法在实际应用中的可行性和有效性。

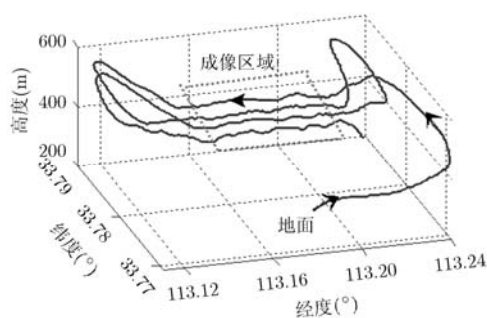


图 10 飞行试验轨迹曲线

表3 100 s 合成孔径时间内运动参数误差(STD)

运动参数误差	R-T-S	KF	捷联
航向角误差(°)	0.003880	0.004231	0.006246
俯仰角误差(°)	0.005231	0.005250	0.005252
横滚角误差(°)	0.003887	0.003879	0.003991
纬度误差(m)	0.017446	0.024004	1.130561
经度误差(m)	0.070889	0.084613	5.714377
高度误差(m)	0.013305	0.014240	0.266839

6 结束语

本文针对高分辨率机载 SAR 实时成像对高精度运动参数的需求, 提出一种新的基于 SINS/GPS 组合测量系统的 SAR 实时成像运动参数测量方案。该方案利用 SAR “准实时” 成像这一特点, 将 R-T-S 平滑估计方法应用于 SINS/GPS 实时组合的数据处理中。通过仿真与实际飞行数据的处理验证了方法的有效性, 为高精度机载 SAR 实时成像用运动参数的测量提供了新的途径。

致谢 感谢中国测绘科学研究院协助完成飞行试验并提供空中三角测量解算的高精度姿态和位置信息。

参考文献

- [1] Huang S Q and Liu D Z. Some uncertain factor analysis and improvement in spaceborne synthetic aperture radar imaging[J]. *Signal Processing*, 2007, 87(12): 3202-3217.
- [2] Pedlar D N and Coe D J. Target geolocation using SAR[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(1): 35-42.
- [3] 徐建平, 皮亦鸣. 压缩感知SAR成像中的运动补偿[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(2): 294-299.
Xu Jian-ping and Pi Yi-ming. Motion compensation for compressive sensing SAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 294-299.
- [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.
Zhang Ying-jie, Wang Yan-ping, Tan Wei-xian, et al. Motion compensation for airborne forward looking synthetic aperture radar with linear array antennas[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 168-179.
- [5] Evan C Z and David G L. 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.
Li Fang-fang, Qiu Xiao-lan, Meng Da-di, et al. Effects of motion compensation errors on performance of airborne dual-antenna InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 559-567.
- [7] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. *电子学报*, 2001, 29(12): 1824-1828.
Xing Meng-dao and Bao Zheng. Motion parameter estimation based SAR imaging[J]. *Acta Eletronica Sinica*, 2001, 29(12): 1824-1828.
- [8] Che Huan, Liu Peng, Zhang Feng-shan, et al. A deeply coupled GPS/INS integrated navigation system suitable for high dynamic environments[C]. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings Lecture Notes in Electrical Engineering*, Guangzhou, 2012, 159: 617-626.
- [9] Chiang K W, Huang Y W, Li C Y, et al. An ANN embedded RTS smoother for an INS/GPS integrated positioning and orientation system[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(2): 2633-2644.
- [10] 郭智, 丁赤飏, 房建成, 等. 一种高分辨率机载SAR的运动补偿方案[J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(2): 174-180.
Guo Zhi, Ding Chi-biao, Fang Jian-cheng, et al. A motion compensation system for high resolution airborne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(2): 174-180.
- [11] 韩锐, 薛敦伟, 李凉海. 基于GPS/IMU组合导航的机载SAR运动补偿方案的误差分析及仿真验证[J]. *遥测遥控*, 2009, 30(3): 41-46.
Han Rui, Xue Dun-wei, and Li Liang-hai. Analysis and simulation of motion compensation system for SAR based on GPS/IMU integrated navigation[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2009, 30(3): 41-46.
- [12] 徐晓丹. 机载合成孔径雷达的运动补偿研究[D]. [博士学位论文], 武汉理工大学, 2003.
Xu Xiao-dan. Research on motion compensation of airborne synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], Wuhan University of Technology, 2003.
- [13] Rauch H E, Tung F, and Striebel C T. Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems[J]. *AIAA Journal*, 1965, 3(8): 1445-1450.
- [14] Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H-Infinity, and Nonlinear Approaches[M]. First Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006: 293-294.
- [15] Simon D and Shmaliy Y S. Unified forms for Kalman and finite impulse response filtering and smoothing[J]. *Automatica*, 2013, 49(6): 1892-1899.
- [16] Groves P D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems[M]. London Artech House, 2008: 151-153.
- [17] Goshen-Meskin D and Bar-Itzhack I Y. Unified approach to inertial navigation system error modeling[J]. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1992, 15(3): 648-653.
- [18] Lee Man-hyung, Park Chul-won, Lee Soo-kil, et al. Observability analysis techniques on inertial navigation systems[J]. *Journal of System Design and Dynamics*, 2012, 6(1): 28-44.
- [19] 宫晓琳, 张蓉, 房建成. 固定区间平滑算法及其在组合导航系统中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2012, 20(6): 687-693.
Gong Xiao-lin, Zhang Rong, and Fang Jian-cheng. Fixed-interval smoother and its applications in integrated navigation system[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20(6): 687-693.

宫晓琳: 女, 1980年生, 讲师, 研究方向为组合估计方法。

秦婷婷: 女, 1988年生, 硕士生, 研究方向为惯性/卫星组合导航。