



# 惯性/SAR图像组合导航技术的发展\*

## Development of INS/SAR Image Integrated Navigation System

邵慧 刘建业 熊智/南京航空航天大学导航研究中心

**摘要:**对惯性/SAR图像组合导航技术进行了研究,在SAR图像辅助组合导航系统总体方案设计基础上,总结了SAR图像匹配和惯性/图像信息融合关键技术,分析了基于Hausdorff距离的图像匹配算法、基于局部不变特征的SIFT特征匹配算法、基于SURF特征的图像匹配算法,提出了解决SAR量测非等间隔和滞后的非线性滤波的思路;同时,结合惯性/SAR组合技术的研究现状,对惯性/SAR组合导航技术的研究方向进行了展望,为后续惯性/SAR组合技术的实际应用提供了有益的参考。

**Abstract:** INS/SAR integrated navigation system is researched. Firstly, overall program of the INS/SAR integrated navigation system is designed. Secondly, key technologies of this system are summarized: SAR image matching and the inertial/image information fusion. Three types of image matching algorithm are analyzed: image matching algorithm based on the Hausdorff distance, matching algorithm based on SIFT features and matching algorithm based on SURF features. Nonlinear filtering method is proposed to solve the unequal interval and hysteresis of SAR measurement. At last, the development of INS/SAR integrated navigation in the future is envisaged.

**关键词:** 惯性导航系统; SAR; 图像匹配; 信息融合

**Keywords:** Inertial Navigation System; SAR; image matching; information fusion

### 0 引言

随着现代战争局部化发展趋势,战争对武器系统的要求越来越高,精确打击备受关注,成为衡量和决定战争成败的重要因素。武器系统的精确打击对精确制导技术提出了很高的要求,而精确导航定位正是精确制导的核心。由于惯性器件的精度取决于元器件的生产工艺,而惯性器件精度的提高是有限且成本昂贵,因此,开展惯导与新型传感器的组合导航研究具有重要意义。

合成孔径雷达(SAR)是二战以后发展起来的一种高分辨率成像雷达,利用它可以全天候、全天时、远距离得到类似光学照相的高分辨率雷达图像。与红外成像、光学成像相比,SAR成像具有无可比拟的优越性,利用SAR实时获

得的图像经图像匹配可以给出精确的位置信息,经和惯导的信息融合可以有效地提高导航精度。这种惯性/SAR组合是一种具有高度自主性和高性能的组合导航系统,与目前较为成熟的惯性/光学、惯性/红外等景象匹配组合导航系统相比,具有显著的优势。惯性/SAR组合导航定位精度很高,可以达到米级定位精度,与GPS的P码定位精度相当。为了有效提高军用飞机的作战效能,下一代军用飞行器所装载的导航系统必然是一个具有高性能的组合导航系统,其具有自主性强、可靠性高、不受干扰、定位精度高、全天候工作、且具有智能识别能力等特点,而上述的惯性/SAR组合导航系统将是最为合适而优选的系统。

### 1 惯性/SAR图像辅助组合导航总体方案

#### 1.1 机载SAR成像方式

目前的机载SAR主要有三种成像工作方式。

1) 侧视SAR成像方式,在雷达成像的过程中,SAR的天线方向与载机的飞行方向保持垂直,雷达对平行于飞行方向的地面目标进行条带式成像。

2) 前视SAR成像方式,雷达天线指向方向与载体飞行方向一致,即航迹方向与多普勒方向一致。

3) 斜视SAR成像方式,SAR运动方向并不与雷达波束指向垂直,存在一定的夹角,呈斜交关系模式。

考虑到INS/SAR组合的应用背景和目的,在中程定位阶段,可以将SAR信息用来修正INS;在末端制导阶段,可以将SAR用于导弹的搜索、识别、瞄准、

\* 基金项目:“十一五”优秀航空科学基金(20060852009)项目资助。

引导和攻击。将INS/SAR组合导航应用于中程或末端的导航与定位,飞机在飞行过程中对一片典型区域连续进行成像、匹配、定位,将SAR定位量测连续输入到滤波器中,与惯导的输出进行最优组合和误差估计,从而对惯性系统误差进行持续的修正,获得该段时间位置的最优估计。这样在某段时间内的连续修正工作模式与上述侧视条带成像方式非常吻合<sup>[1]</sup>,图1为侧视成像方式下考虑SAR间断工作特性的INS/SAR组合修正工作原理示意图。

## 1.2 惯性/SAR图像辅助组合导航方案

SAR是一种主动式成像系统,把实时获取的SAR景物图像与从数字地图数据库中查询到的相应于SAR测绘区的地图进行图像匹配,可以得到INS的位置和方位偏差,将其作为观测量经组合滤波可估计出INS的误差,从而可以获得飞行器当前精确的导航信息。

在数字地图数据库的支持下,INS/SAR组合导航系统充分利用两者之间的互补性,取长补短,实现高度自主性和高性能的导航。图2为机载侧视成像方式下INS/SAR组合导航系统方案原理图。从惯性/SAR组合导航系统原理图可以看出,要实现该组合导航系统,主要涉及图像匹配定位、参数传递和组合滤波三大关键技术。其中图像匹配技术和组合滤波技术一直是国内外研究的重点和难点。

## 2 惯性/SAR图像辅助组合导航关键技术

### 2.1 SAR图像匹配技术

SAR景象匹配辅助导航系统中,需要利用SAR实时获取的景物图像和预先存储的数字地图进行匹配,因此,图像匹配算法的合理选择将直接影响到SAR景象匹配辅助导航系统的精度和

可靠性。与一般的图像匹配应用不同,用于SAR景象匹配辅助导航系统的图像匹配算法具有以下特点:

a.基于特征的图像匹配,由于实时获取的SAR图像和数字地图是通过不同的传感器在不同的时间获得的,其图像灰度差别很大、甚至相反,传统的基于灰度索引的匹配算法失效,必须采用基于特征的图像匹配算法才能获得较好的匹配效果。

b.较强的容错和抗干扰能力,考虑到实时获取的SAR图像和存储的机载数字地图在成像过程中受到不同类型、不同强度的噪声干扰,产生不同程度的几何畸变,两图的图像特征必然存在差异,因此,选用的图像匹配算法还必须具有一定的容错和抗干扰能力。

c.实时性,由于SAR景象匹配辅助导航的目的是为惯导提供实时的位置修正信息,因此,图像匹配算法的实时性是至关重要的。

基于特征的匹配根据匹配特征的不同,分为基于点特征的图像匹配、基于边缘特征的图像匹配、基于曲面特征的图像匹配等。目前,基于边缘特征的景象匹配算法研究较多。其中,Hausdorff距离是Daniel P. Huttenlocher等人在研究目标检测时提出来的<sup>[2][3]</sup>,基于Hausdorff距离的边缘图像匹配算法因其计算的简便性而得到广泛应用,其缺点是不能处理目标被遮掩和外部点存在的情形,为此,文献[4]选用部分Hausdorff距离作为图像匹配时的相似性度量,结合二值图像,实现了一种快速有效的图像匹配算法,图3为基于部分Hausdorff距离的图像匹配定位算法的原理示意图,文献[5]提出了一种基于分支特征点的加权Hausdorff距离图像匹配算法,提高了大尺度图像匹配算法的实时性能;文献[6]在以部分Hausdorff

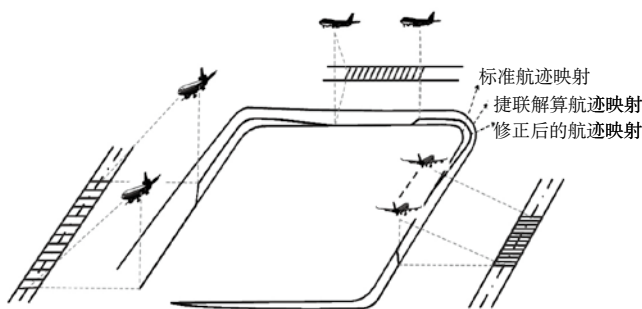
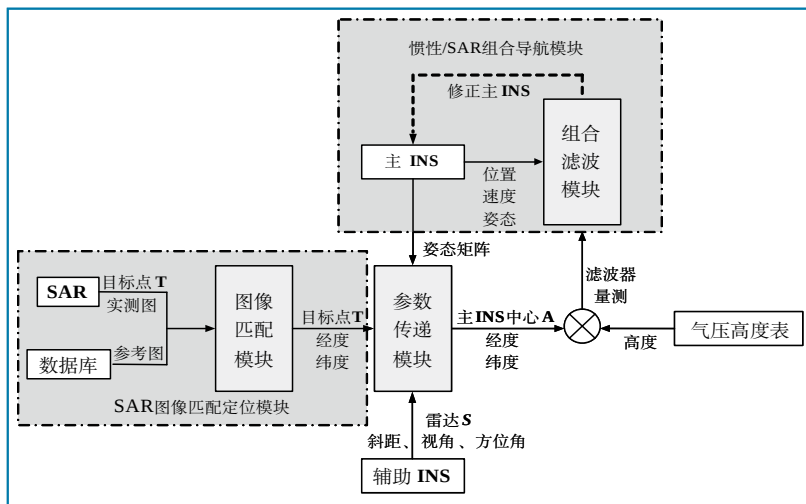


图1(上) 侧视成像方式下的INS/SAR组合修正工作原理图

图2(下) 机载侧视SINS/SAR组合导航方案设计



距离作为图像匹配相似性度量的基础上,结合小波变换的多分辨率思想提取多尺度图像特征,实现了由粗到精的多级分层实时匹配。

基于边缘特征的景象匹配算法有其固有的缺点:实时性能较差;算法对不同图像匹配区域的适应性较差;抗旋转能力和抗尺度变化性能较差。针对这种情况,近年来,基于局部不变特征的SIFT特征匹配算法开始在景象匹配辅助导航中崭露头角。SIFT是David Lowe于1999年提出的局部特征描述子<sup>[7]</sup>,与传统的基于Hausdorff距离的景象匹配算法相比,SIFT特征匹配算法在算法适应性、实时性、抗旋转和尺度变化等方面都表现出了很大的优越性。文献[8]针对景象匹配辅助惯性组合导航系统需要实时精确地获取飞行器位置和相对于预定航迹的航向偏差要求,提出了一种快速有效的基于SIFT特征的图像匹配算法,图5为基于SIFT特征的图像匹配算法流程图。结合惯性/SAR组合导航中对图像匹配技术的性能要求,国内研究者对SIFT特征匹配算法进行了进一步的改进,出现了许多快速、鲁棒、精确的图像匹配算法。

当图像存在高斑点噪声和严重的几何畸变时,SIFT算法并不能很好地满足景象匹配辅助导航系统对匹配定位的性能要求,而且SIFT特征匹配算法计算数据量大、时间复杂度高,因此,有研究者提出了基于SURF特征的景象匹配方法<sup>[9]</sup>。SURF特征检测及描述的整体思想流程与SIFT算法类似,不同的是SURF算法为了提高计算速度,在整个过程中采用了与SIFT不同的方法,在保证鲁棒性的同时仍然具有较好的实时性能。图6为基于SIFT特征的图像匹配算法和基于SURF特征的景象匹配算法仿真效果对比图。

## 2.2 惯性/SAR图像信息融合技术

图像匹配只能提供水平的位置信息和航向信息,而不能提供高度方向的信息,为此,如何解决高度通道发散,并建立相应的组合导航系统数学模型是惯性/SAR组合信息融合技术首要的研究重点。文献[10]较早的提出了气压高度表辅助的惯性/SAR组合导航系统,有效解决了高度通道不可观的问题,实现了具有高度定位精度和较强自主性的INS/SAR组合导航系统。

此外,SAR成像导航系统输出具有其特殊性,在机载应用环境下,SAR图像导航系统一般要求载机处于比较平稳的飞行状态,由于SAR雷达稳定和跟踪能力有限,且在载机非匀速直线运动时会影响SAR的成像,SAR雷达会出现无法正常工作的情况,因此,SAR的量测输出具有随机和间断的输出特性;此外,SAR图像匹配定位输出需要耗用不等的匹配计算时间,因此,

SAR的量测输出还具有非等间隔和滞后的输出特性。为此,结合SAR图像导航系统随机、间断、非等间隔和量测滞后的输出特性,并结合惯性导航系统的误差漂移特性,研究相应的INS/SAR组合修正算法,对于实现机载INS/SAR组合自主精确导航尤为重要。文献[10]采用常规卡尔曼滤波器进行组合滤波,常常会导致滤波精度不高,甚至发散,为此,文献[11]针对该问题,提出了解决量测非等间隔和量测滞后的信息融合算法。

从本质上来说,惯性导航系统是非线性的,直接采用非线性模型研究惯性/SAR组合导航问题,不仅能更准确地描述系统特性,而且不需要很多的约束条件。此外,考虑到机载惯性/SAR组合导航系统中,SAR图像匹配辅助导航系统输出的量测信息将具有很强的非等间隔特性,当量测信息输出的时间间隔较长,惯导的误差得不到及时修正,此

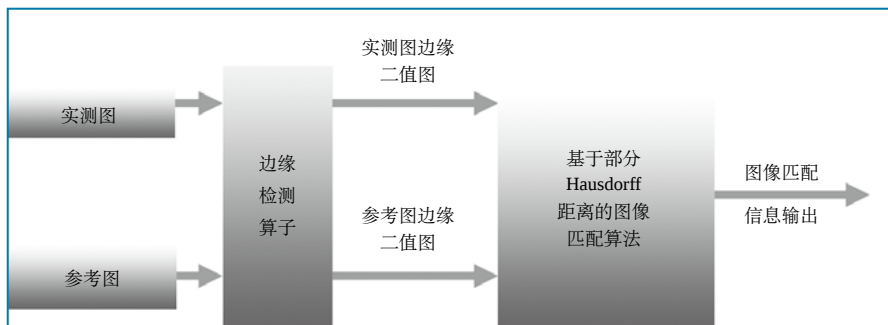


图3 基于部分Hausdorff距离的图像匹配定位算法

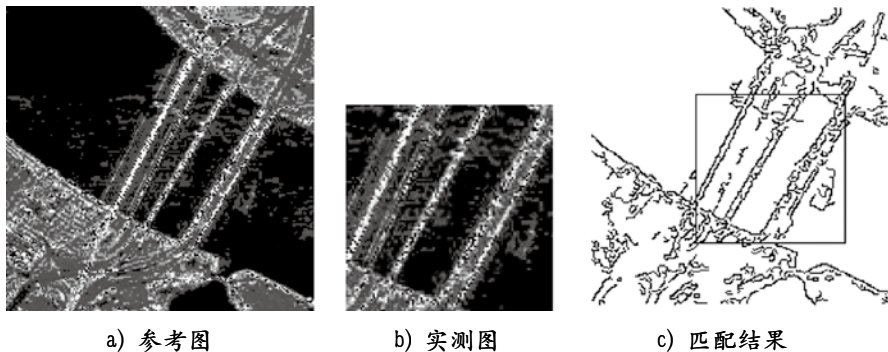


图4 基于部分Hausdorff距离的匹配算法仿真实效果图

时组合导航系统将具有较强的非线性特性。在组合导航非线性特性较强的情况下,采用常规卡尔曼滤波算法时所基于的线性化假设条件难以成立,从而导致滤波精度不高甚至滤波发散。为此,文献[12]直接结合惯导的非线性数学模型,采用非线性的UKF滤波算法,研究了解决SAR量测非等间隔和滞后的非线性滤波算法,实现了对惯导误差的精

确估计和校正。

### 3 惯性/SAR图像组合导航技术现有问题

近年来,国内学者从不同角度对惯性/SAR组合导航中涉及的关键技术展开了深入的研究,但研究内容不外乎上述中的图像匹配技术和信息融合技术,并且对于这两个关键技术的研究也是

相对独立的,针对机载惯性/SAR组合导航技术系统实现的研究涉及较少。主要存在以下问题:

1) 结合SAR的实际工作方式研究其图像匹配定位算法、定位误差修正建模和相应的组合滤波算法方面的研究成果甚少。如对于惯性/SAR信息融合算法进行仿真研究时,没有考虑SAR匹配位置参数的传递过程,忽略了该传递过程中引入的一系列误差<sup>[13]</sup>。

2) 适合实际工程应用的机载数字地图库还不完善。目前国内对于数字地图的研究甚少,多数论文仅提及机载数字地图这一概念,但对于如何结合数字地图数据库及INS的输出确定相应的SAR视区、进而进行数字地图转换获得相应的参考图的研究成果更是少见。

3) 针对SAR图像导航系统的误差精确建模的研究还不完善。SAR图像导航系统的导航误差主要来源于两个方面:一方面来源于利用惯性导航信息对实时图像进行预处理时所引入的尺度和旋转误差;另一方面则是在图像预处理后,由于图像匹配定位算法自身所引入的匹配定位误差。而现有的误差模型还无法精确的表征SAR图像导航系统的误差源。

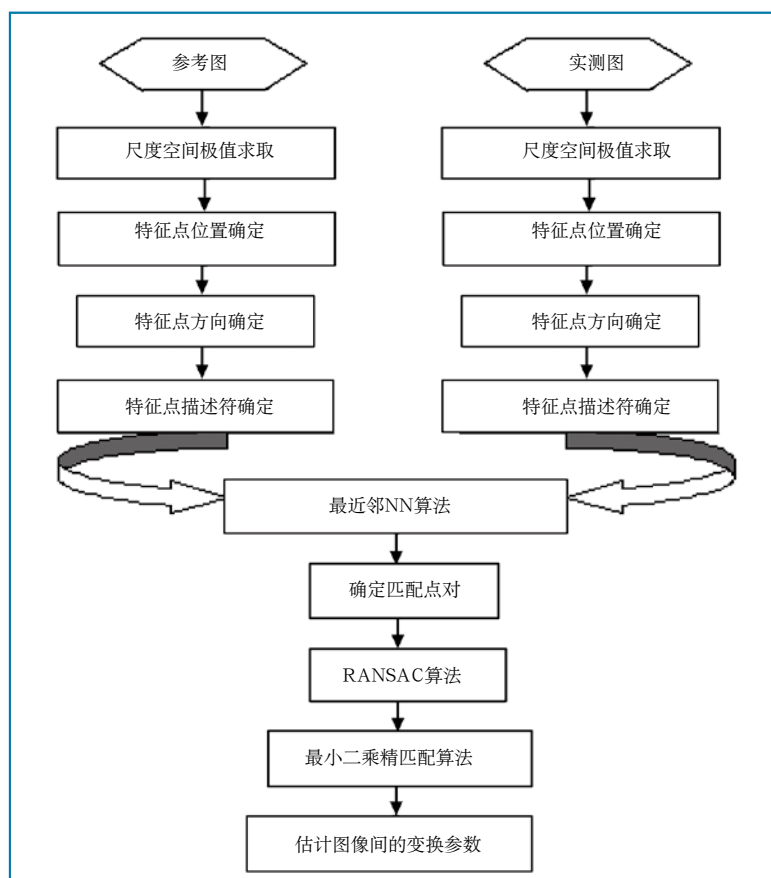
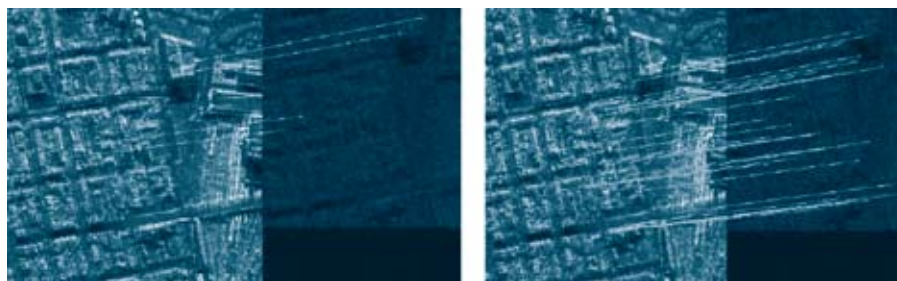


图5 基于SIFT特征的图像匹配算法流程图



a) SIFT特征匹配图

b) SURF特征匹配图

图6 SAR图像在斑点噪声影响下的特征匹配结果

### 4 惯性/SAR图像组合导航技术发展预测

在惯性/SAR组合导航系统中,结合目前对惯性/SAR组合技术的研究现状,本文对惯性/SAR组合导航技术的研究趋势进行展望。

1) 针对机载SAR成像工作模式的惯性/SAR组合导航系统工程实现和验证研究。惯性/SAR组合导航技术将从现有的理论仿真验证为主,逐步转入以工程实现和机载性能验证为主的验证研究阶段,将主要解决系统工程化实

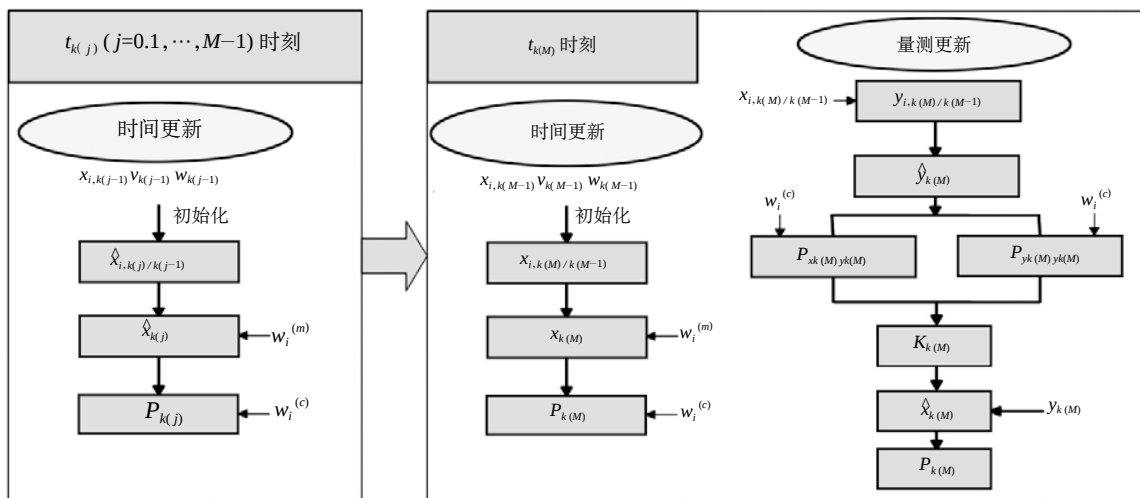


图7 解决非等间隔量测的非线性滤波算法流程图

现中所面临的具体问题。

2) 实时高效的机载数字地图/SAR图像匹配算法。机载数字地图库的完备和图像匹配算法的工程化性能直接影响到SAR图像导航系统的实现,这将是未来惯性/SAR组合系统实现需要突破的关键技术瓶颈。

3) SAR图像导航系统误差特性的信息融合工程化实现算法。将在SAR图像导航系统误差建模的基础上,完成相应的最优信息融合算法建模,从而有效提高组合系统精度。

AST

## 参考文献

- [1] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977–1000.
- [2] Daniel P. Huttenlocher, Michael E. Leventon, William J. Rucklidge. Visually-Guided navigation by comparing two-dimensional edge images. Proceedings CVPR'94, IEEE Computer Society Conference, 1994.6, 842–847.
- [3] Daniel P. Huttenlocher, Gregory A. Klanderman, William J. Rucklidge. Comparing images using the Hausdorff Distance. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1993.9, 15(9): 850–863.
- [4] 熊智, 刘建业, 曾庆化, 赖际舟. 景象匹配辅助导航中的图像匹配算法研究[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(1): 29–33.
- [5] 冷雪飞, 刘建业, 熊智. 基于分支特征点的导航用实时图像匹配算法[J]. 自动化学报, 2007, 33(7): 678–672.
- [6] 熊智, 熊卫东, 冷雪飞, 刘建业. 景象匹配辅助导航中多级实时匹配算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 726–730.
- [7] David G. L. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 2004, 2(60): 91–110.
- [8] 陈方, 熊智, 许允喜, 刘建业. 惯性组合导航系统中的快速景象匹配算法研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2308–2316.
- [9] 王先敏, 曾庆化, 熊智, 刘建业, 庄瞳. 结合惯性导航特性的快速景象匹配算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2055–2059.
- [10] 熊智, 刘建业, 林雪原. 高度辅助的INS/SAR组合导航系统研究[J]. 中国空间科学技术, 2003, 8(4): 62–66.
- [11] 刘建业, 熊智, 段方. 考虑量测滞后的INS/SAR组合导航非等间隔滤波算法研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 626–631.
- [12] 王丹, 熊智, 陈方, 刘建业. 考虑SAR图像导航量测特性的SAR/INS组合导航非线性滤波[J]. 应用科学学报, 2010, 28(4): 381–386.
- [13] 卜彦龙, 潘亮, 牛佚峰, 胡国昌, 沈林成. INS/SAR组合导航参数传递建模及精度分析[J]. 航空学报, 2009, 30(3): 526–533.

## 作者简介

邵慧, 硕士研究生, 主要研究方向为惯性技术及组合导航。

刘建业, 教授, 博导, 主要研究方向为卫星定位与惯性导航技术、航空航天组合导航系统信息融合技术。

熊智, 研究员, 博士, 主要研究领域为惯性技术、景象匹配辅助导航、天文导航及惯性组合导航等领域。