

InSAR 成像匹配制导技术

李凯悦, 付文兴, 陈海峰
(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 为了解决飞行器远程全天候高精度自主导航的问题, 提出一种 InSAR 成像匹配制导技术, 利用 InSAR 生成的高程数据与基准高程图进行精确匹配, 并通过构象模型反演出飞行器的空间位置。分析对比了多种精确地形匹配方法, 采用基于 F. Leberl 数学模型的空间定位方法并分析了误差影响。仿真结果表明, 该方法可以实现飞行器高精度自主导航定位, 大大提高飞行器的适应性和抗干扰能力。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 精确地形匹配; 空间定位

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8110 (2014) -02-0019-06

Research on Technology of InSAR Image Matching Guidance

LI Kai - yue, FU Wen - xing, CHEN Hai - feng
(Beijing Electro - mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: A new technology of InSAR image matching guidance is put forward to solve the autonomous navigation problem for long - endurance aircraft under all - weather condition. The digital elevation model generated from InSAR image and the datum image are matched, and then F. Leberl model is used to inverse the precious space position of aircraft. In this paper, several matching algorithms are simulated comparatively, and the distribution of errors is analyzed. The simulation result shows that this technology applies high precision spacing position, enhancing the adaptability and the ability of anti - jamming for aircraft.

Key words: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR); Accurate terrain matching; Space positioning

0 引言

为了解决远程飞行器的自主导航问题, 我国引进及研仿了高精度小型化惯性导航系统, 但由于惯性导航系统具有随时间发散的特点, 必须采用辅助导航手段对惯导导航误差进行修正。卫星导航技术由于容易受到战场电磁环境的压制性干扰, 甚至受到欺骗性干扰而导致灾难性后果, 因此不能作为依赖性手段; 而传统的地形匹配和下视景象匹配等辅助导航手段在以平原、丘陵地区为主的战场区域将受到限制。干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 是一种新型的空间遥感技术。利用干涉技术, 将合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 获得的图像从二维空间扩展到三维空间, 对目标位置和相对高度进行测量, 从而形成高分辨率的地面目标图像和数字高程地图。采用 InSAR 作为地

形匹配系统传感器, 实现了由航迹匹配向区域匹配的转变, 是实现地形匹配的理想技术途径。

本文提出的 InSAR 匹配制导技术综合运用了传统地形匹配和高精度精确测绘技术的优点, 可以解决山区、丘陵和城市等不同地形条件下的高精度、强适应性匹配定位问题, 可有效提升飞行器制导系统的适应性, 其主要优势有以下几点:

1) 其获取的地形信息量远远大于传统轮廓地形匹配系统, 因此出现重复模式的概率将会大大降低, 地形匹配区的面积将会大幅度减小, 匹配精度也会明显提高。

2) 相比基于激光扫描测距雷达的地形导航方法, InSAR 地形测量传感器没有机械运动, 简化了系统结构, 提高了可靠性。

3) 由于 InSAR 相比光学传感器对烟雾、云层比较敏感, 雷达波能轻易的穿透它们, 具有全天候

收稿日期: 2014-04-18; 修订日期: 2014-08-10。

作者简介: 李凯悦 (1987-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地形匹配方面的研究。

工作且不易受干扰的特点。InSAR 成像匹配系统能够在复杂的战场环境下适应全天候作战。

1 InSAR 成像匹配系统组成及原理

InSAR 成像匹配系统由 InSAR 雷达、气压高度系统、惯性导航系统、相关处理装置组成，以地形基准图作为外部保障，工作原理见图 1。各部分功能如下：

InSAR 雷达：对飞行器下方的地形进行采样，测量飞行器到下方地形之间的距离以及偏角；

气压高度系统：为精确地形辅助导航系统提供飞行器的飞行海拔高度信息。

惯性导航系统：为精确地形辅助导航系统提供飞行器的位置、飞行速度和姿态等信息。

相关处理装置：对 InSAR、气压高度系统和惯性导航系统的输出数据进行采样，综合这些采样数据解算出采样地形的高程数据——采样带，根据采样带与事先装定好的地形基准图作相关处理，确定飞行器当前的位置。此信息用以修正惯性导航系统误差。

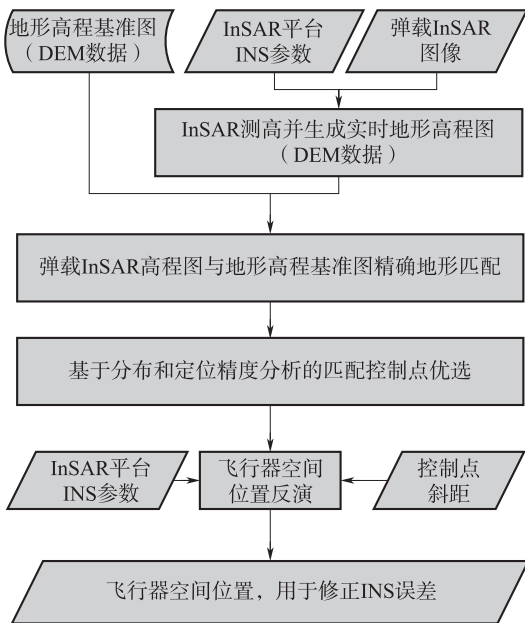


图1 InSAR 匹配制导系统工作原理图
Fig. 1 The principle of InSAR 3D image matching guidance

弹载 InSAR 成像匹配系统的主要工作流程为：

1) 对实时采样得到的地形数据和装订在弹上的地形基准图进行精确匹配定位，为控制点选择

提供依据。

2) 基于控制点分布和空间位置解算的分析结果，选择最优的匹配控制点，根据雷达构象数学模型反演飞行器空间位置。

2 精确地形匹配算法

根据 InSAR 成像匹配制导的原理，首先需要利用实时采样的地形数据与地形基准数据进行精确匹配定位。本文研究了基于区域相关的精确地形匹配算法，对比分析了平方差算法 MSD、绝对差算法 MAD、归一化积相关算法 NPROD、序贯相似检测算法 SSDA，以及金字塔相关匹配算法。其中 NPROD 为最大值算法；MSD 和 MAD 为最小值算法；SSDA 是一种改进了搜索策略的绝对差算法。通过计算相关极值，能得到最佳匹配位置。图 2 为基于区域相关的五种常用三维地形匹配算法在不同高程测量误差条件下的对比仿真结果。其中算法 1 为 MSD 算法，算法 2 为 MAD 算法，算法 3 为改进的 MSD 算法，算法 4 为 SSDA 算法，算法 5 为 NPROD 算法。

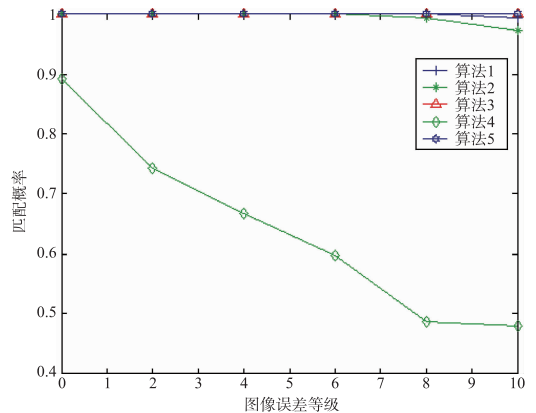


图2 不同高程测量误差等级实时图的匹配概率曲线
Fig. 2 The curve of matching probability at different height error levels

通过对不同相关算法的匹配概率和定位精度的分析和仿真结果看出，采用去均值归一化积相关作为相关性度量效果最好。

3 InSAR 载体平台空间定位技术

对于弹载 InSAR 来说，其最终目标是要实现飞行器自身定位，通过前文的精确地形匹配，实现了弹载地图和实时图像或地形的配准关系，而

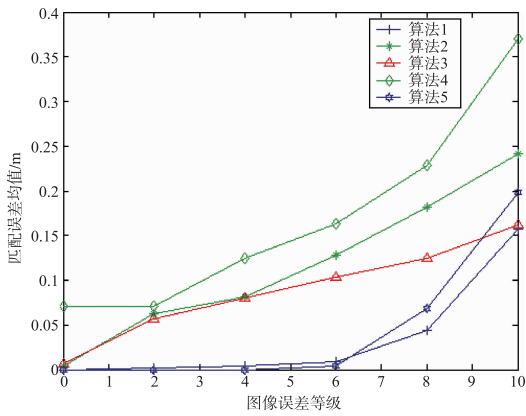


图 3 不同高程测量误差等级实时图的匹配误差均值曲线

Fig. 3 The curve of mean matching error at different height error levels

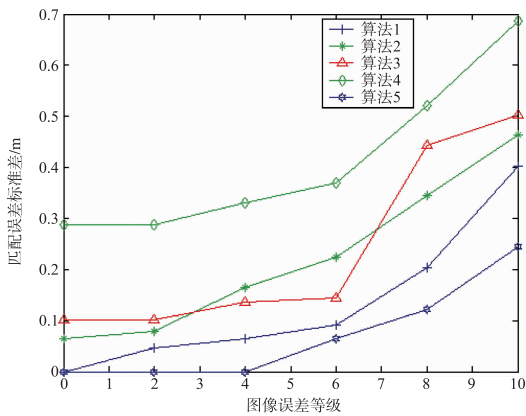


图 4 不同高程测量误差等级实时图的匹配误差标准差曲线

Fig. 4 The curve of standard deviation of matching error at different height error levels

要实现载体的三维空间定位，必须根据上述配准关系进行弹载平台的空间位置解算。

要通过图像中的控制点反演飞行器的空间位置，首先应对雷达图像的构像数学模型进行分析研究。所谓雷达图像的构像数学模型，广义上讲是指地面点的影像坐标 (x, y) 和地面坐标 (X, Y, Z) 之间的数学关系。这里面有两层含义：其一是地面点坐标与相应像点坐标瞬时构像的数学模型；其二是地面点坐标与相应像点在统一像平面坐标系中的像坐标之间的数学模型，应该说这一数学模型表征了雷达影像几何关系，该模型用构像方程来近似表达。

由于弹载 InSAR 图像存在一定的几何畸变，不同像素点的定位精度有一定的差异，通过对不同区域图像定位精度的分析，选择高定位精度的

图像点作为反演的匹配控制点。同时分析匹配控制点的分布对反演定位精度的影响，选择合适的控制点分布模式，并研究控制点的定位误差和测距误差在位置反演过程中的传递，及对平台定位精度的影响。

3.1 F. Leberl 数学模型

F. Leberl 公式是根据雷达图像像点的距离条件和零多普勒条件来表达雷达图像瞬时构像的数学模型。

(1) 距离条件

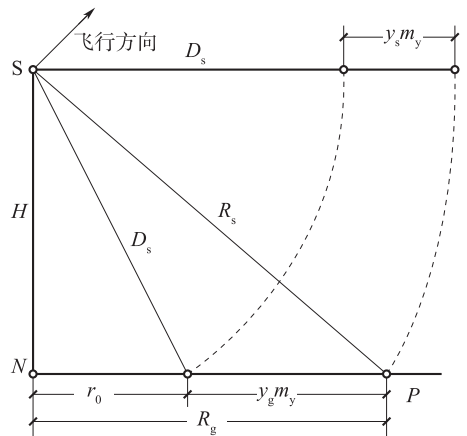


图 5 侧视雷达 (InSAR, SAR) 距离向几何关系

Fig. 5 The geometry relation of InSAR/SAR

如图 5 所示， D_s 为扫描延迟， R_s 为天线 S 到地面点 P 的斜距， R_g 为地面点 P 的地距， H 为天线 S 到数据归化平面（基准面）的航高， y_s 为地面点 P 在斜距显示图像上距离向的像坐标， y_g 为地面点 P 在地距显示图像上距离向的像坐标， r_0 为扫描延迟 D_s 在数据归化平面上的投影， m_y 为距离向图像比例尺分母。因雷达天线的瞬时位置到地面点之间的矢量长度与根据像坐标量测值计算得到的该长度应相等。则对于斜距显示的图像有：

$$\begin{aligned} (X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 \\ = (y_s m_y + D_s)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

对于地距显示的图像有：

$$\begin{aligned} (X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 \\ = (y_g m_y + r_0)^2 + H^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中： (X, Y, Z) 为地面点的物方空间坐标， (X_s, Y_s, Z_s) 为地面点对应的雷达天线瞬时位置的物方空间坐标。

(2) 零多普勒条件

由于运载平台飞行速度矢量与天线至地面点矢量保持垂直, 此时多普勒频移为零, 故称零多普勒条件。用公式表示为:

$$\vec{X}_s(X - X_s) + \vec{Y}_s(Y - Y_s) + \vec{Z}_s(Z - Z_s) = 0 \quad (3)$$

3.2 基于 F. Leberl 构象模型 的飞行器空间位置反演

飞行器空间位置反演的基本原理, 首先假设在平飞段弹道中, 飞行器是近匀速、水平飞行, 在此情况下的反演步骤为: 1) 首先在匹配的图像中选取若干控制点, 2) 根据当时惯导信息和构象模型近似计算起始摄站点与若干控制点的直线距离, 3) 利用非线性最小二乘法准则反算起始摄站点的空间坐标。

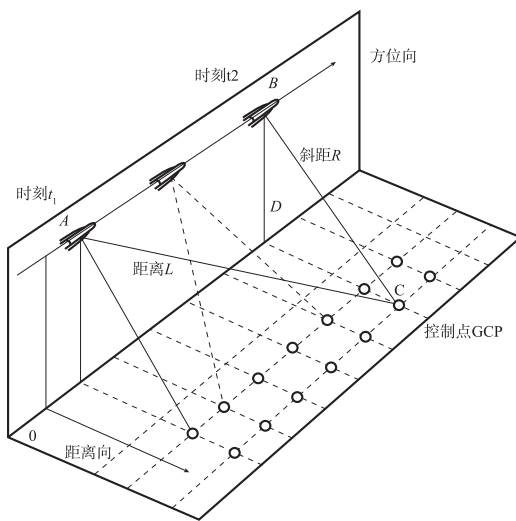


图6 侧视雷达(InSAR, SAR)空间位置反演结构示意图

Fig. 6 The sketch of InSAR/SAR space reversion

如图6所示: 设匹配图像起始摄站点为A, 时刻为 t_1 , 为了反演 t_1 时刻飞行器位置, 必须利用成像中不同时刻 $t_i, i = 1, 2, \dots, n$, 控制点对应的斜距 $\{R_{si}\}, i = 1, 2, \dots, n$ 。这样可以通过惯导信息和斜距 R_{si} 计算控制点与起始摄站点A的距离 $L_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。由于多普勒频率为零, 因此 $\triangle ABC$ 、 $\triangle BDC$ 为直角三角形, 由惯性信息和雷达发射的间隔时间可得如下关系:

$$\begin{aligned} AB &= \sqrt{(X_0 - X_{si})^2 + (Y_0 - Y_{si})^2 + (Z_0 - Z_{si})^2} \\ &= \sqrt{(\vec{X}_s \cdot \Delta t)^2 + (\vec{Y}_s \cdot \Delta t)^2 + (\vec{Z}_s \cdot \Delta t)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

尽管惯性导航器指示的位置是有积累误差的, 但是指示位置的相对关系具有相当的准确度, 也意味着相对向量 $\vec{X}_s, \vec{Y}_s, \vec{Z}_s$ 是准确的。设匹配所得到的控制点集为: $\{GCP_i\} = [X_i, Y_i, Z_i], i = 1, 2, 3, \dots, n$, 通过计算, 控制点集与起始摄站点A之间的关系可以用如下公式计算得到:

$$L_i = \sqrt{(AB_{si})^2 + R_{si}^2} = \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2} \quad (5)$$

展开如下:

$$\begin{aligned} &\sqrt{(\vec{X}_s \cdot \Delta t_{si})^2 + (\vec{Y}_s \cdot \Delta t_{si})^2 + (\vec{Z}_s \cdot \Delta t_{si})^2 + R_{si}^2} \\ &= \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

这就是反演方程, 其中 $\Delta t_{si}, \vec{X}_s, \vec{Y}_s, \vec{Z}_s, R_{si}$ 已知, X_0, Y_0, Z_0 未知。在理论上, 只要知道3个控制点, 即3个独立方程, 就可以求出飞行器的起始位置。

3.3 误差影响分析

1) 控制点集的分布对飞行器定位精度的影响

InSAR图像分辨率为5m, 中心点的侧视角 45° 。飞行器的东北天向的坐标为(0, 0, 20000)。控制点在东北天向的误差标准差均为5m, 在斜距方向上的误差标准差为3m。观察控制点取256个, 且分布在 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 、 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 、 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 、 $4\text{km} \times 4\text{km}$ 、 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 、 $6\text{km} \times 6\text{km}$ 、 $7\text{km} \times 7\text{km}$ 、 $8\text{km} \times 8\text{km}$ 、 $9\text{km} \times 9\text{km}$ 、 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的情况下, 反演200次误差的统计结果如图7所示。

在均匀分布的情况下, 定位精度比在随机分布的情况下要小些, 也即控制点均匀分布比控制点随机分布定位精度要高些。随着控制点集分布范围的扩大, 定位精度越精确。

2) 控制点集个数对飞行器定位精度的影响

InSAR图像大小为 1024×1024 , 分辨率为5m(控制点分布大约在 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 范围内)。中心点的侧视角 45° 。飞行器的东北天向坐标为(0, 0, 20000)。控制点在东北天向的误差标准差均为5m,

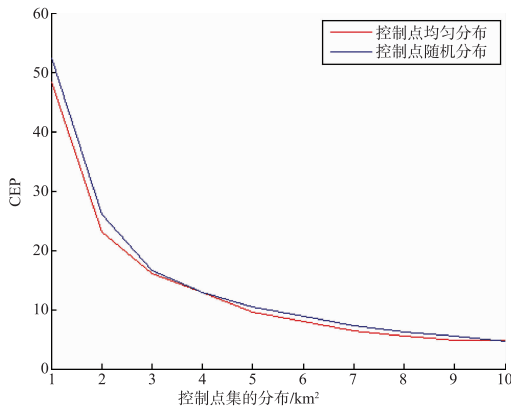


图 7 定位精度随控制点集分布的变化
 Fig. 7 Localization accuracy according to the distribution of control points

在斜距方向上的误差标准差为 3m。控制点的个数增加的情况下，反演 200 次误差的统计结果如图 8 所示。

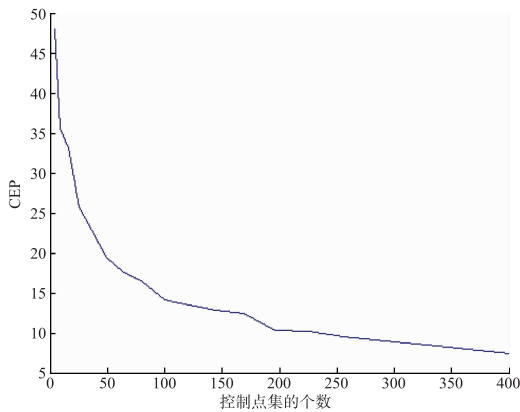


图 8 定位精度随控制点集个数变化
 Fig. 8 Localization accuracy according to the number of control points

仿真结果表明，随着控制点集个数的增加，在东北天三个方向上误差的均值波动变小，且逐渐逼近 0，在东北天三个方向上误差的标准差变小。并且在东向和天向误差均值和方差基本相同。随着控制点集个数的增加，定位也越精确。

3) 控制点三维空间定位及雷达斜距测量误差对飞行器定位精度的影响

InSAR 图像大小为 1024 × 1024，分辨率为 5m (控制点分布大约在 5km × 5km 范围内)。在该范围内均匀选取控制点 256 个。中心点的侧视角 45°。飞行器的东北天向的坐标为 (0, 0, 20000)。分别观察东向噪声标准差增加、北向噪

声标准差增加、天向噪声标准差增加、斜距噪声标准差增加的情况进行四组仿真，反演 200 次误差的统计结果如图 9 所示。

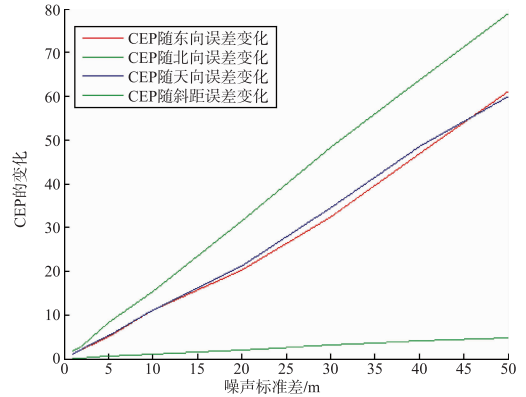


图 9 定位精度随不同方向上噪声的标准差的变化
 Fig. 9 Localization accuracy according to the error levels of different directions

仿真结果表明，随着噪声的标准差逐渐变大，反演结果在东北天三个方向上误差的标准差越来越大，几乎呈线性增长。北向上噪声对反演结果的影响最小，而斜距噪声对反演结果的影响最大。

3.4 小结

首先在 InSAR 图像与基准地形配准基础上，再利用 F. Leberl 数学模型，实现飞行器高精度空间定位。具体分析了定位精度与匹配误差、斜距测量误差、控制点个数的关系。当斜距测量误差 5m，匹配定位误差 20m，控制点分布在 5km × 5km 内 (造成的空间定位误差 10m)，控制点个数在 200 个以上 (造成的空间定位误差 10m)，可以实现空间定位精度 25m。

4 结论

本文提出了一种运用 InSAR 进行飞行器匹配制导的新技术，利用 InSAR 生成的高程数据与基准高程图进行精确匹配，并通过构象模型反演出飞行器的空间位置。仿真验证表明该方法可以达到定位精度 25m，实现高精度的飞行器空间定位。

参考文献

[1] 向敬成, 张明友. 雷达系统 [M]. 电子工业出版社, 2001.
 [2] Lan G. Cumming and Frand H. Wong. 合成孔径雷达成像算法与实现 [M]. 电子工业出版社, 2007.
 [3] Chris Oliver and Shaun Quegan. 合成孔径雷达图像理解

- [M]. 电子工业出版社, 2009.
- [4] John C. Curlander and Robert N. Medonough. 合成孔径雷达系统与信号处理 [M]. 电子工业出版社, 2006.
- [5] 杨士中. 合成孔径雷达 [M]. 国防工业出版社, 1981.
- [6] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用 [M]. 科学出版社, 1989.
- [7] 廖明生, 林琿. 雷达干涉测量原理与信号处理基础 [M]. 测绘出版社, 2003.
- [8] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理 [M]. 武汉大学出版社, 2003.
- [9] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 电子工业出版社, 2005.
- [10] 穆冬. 干涉合成孔径雷达成像技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2001.
- [11] 刘宝泉. 干涉合成孔径雷达测量关键技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2008.
- [12] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论 [M]. 国防工业出版社, 2003.
- [13] 任坤. 基于星载合成孔径雷达干涉测量技术的数字高程模型生成研究 [D]. 南京理工大学, 2004.
- [14] 陶鸥. 干涉合成孔径雷达数据处理及仿真研究 [D]. 中国科学院电子学研究所, 2003.
- [15] Nikolaus P. Faller, Erich H. Meier. First Results with the Airborne Single - Pass DO - SAR Interferometer [J]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 1995, 33 (5): 1231 - 1231.
- [16] A. Currie, T. Bungey, R. Bullock, S. Young, A. Horne, R. White. SINGLE AND MULTIPLE PASS HEIGHT FINDING INTERFEROMETRY FROM AN AIRBORNE PLATFORM [J]. Radar 97, 1997, (449): 117.
- [17] C. E. Livingstone, A. L. Gray, R. K. Hawkins, and R. B. Olsen. CCRS C/X - Band Airborne Synthetic Aperture Radar: An R&D Tool for the ERS - I Time Frame [C]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1988, 3 (10): 11 - 20.
- [18] J. Way, E. A. Smith. The Evolution of synthetic aperture radar systems and their progression to the EOS SAR [C]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29 (6): 962 - 985.
- [19] Howard A. Zebker. The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument [C]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 1992, 30 (5): 935 - 937.
- [20] 赵佩红. 国外无人机载合成孔径雷达简介 [J]. 火控雷达技术, 1999.
- [21] 赵博, 钱正祥, 黄晓雷. 无人机载 SAR 技术应用研究综述 [J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2009.

~~~~~

(上接第 6 页)

- [14] A Nicksch, J Valasek, T W. Strganac, et al. Six Degree of Freedom Dynamical Model of a Morphing Aircraft [C], AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 10 - 13 August 2009, Chicago, Illinois.
- [15] 张公平, 廖志忠, 段朝阳, 张燕, 可变形翼战术导弹飞行动力学联合仿真研究 [J], 航空科学技术, 2013, 3: 71 - 74.
- [16] 张公平, 廖志忠, 段朝阳, 张燕, 可变形翼战术导弹多提动力学特性, 弹箭与制导学报, 2011, 31 (6): 149 - 151.
- [17] 徐孝武, 张炜, 折叠机翼变体飞机的动力学建模与分析 [J], 西北工业大学学报, 2012, 30 (5): 681 - 688.
- [18] 荣思远, 刘家夫, 崔乃刚. 太阳帆航天器研究及其关键技术综述 [J]. 上海航天. 2011, 2: 53 - 62.
- [19] 赵红超, 徐君明, 林嘉新. 变质心控制技术及其应用综述 [J]. 飞航导弹, 2010 (3): 66 - 70.
- [20] 王美仙, 李明, 张子军. 飞行器控制律设计方法发展综述 [J]. 飞行力学, 2007, 25 (2): 1 - 4.
- [21] 王璐, 苏剑波. 基于干扰抑制控制的飞行器姿态跟踪 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30 (12): 1609 - 1616.
- [22] 张政伟, 李霖宇, 刘汉斌等. 变论域模糊控制在无人飞行器马赫数控制中的应用研究 [J]. 推进技术, 2013, 34 (12): 1696 - 1701.
- [23] 包为民. 航天飞行器控制技术研究现状与发展趋势 [J] 自动化学报. 2013, 39 (6): 697 - 702.
- [24] 马建军, 李文强, 李鹏, 郑志强. 飞行器控制分配技术研究现状与展望 [J]. 飞行力学, 2009, 27 (3): 1 - 5.
- [25] 陈勇, 董新民, 薛建平等. 多操纵面飞行器控制分配技术的发展及应用 [J]. 飞行力学, 2012, 30 (4): 289 - 294.
- [26] 姜斌, 赵静, 齐瑞云等. 近空间飞行器故障诊断与容错控制的研究进展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44 (5): 603 - 609.
- [27] 周思羽, 吴文海, 张楠, 张靖. 自主空战机动决策方法综述 [J]. 航空计算技术, 2012, 42 (1): 27 - 31.
- [28] 刘钢, 老松杨, 谭东风, 周智超. 反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展 [J]. 自动化学报, 2013, 39 (4): 347 - 358.
- [29] 张新国. 从自动飞行到自主飞行——飞行控制与导航技术发展的转折和面临的挑战 [J]. 飞机设计, 2003, (3): 55 - 59.