

# 导弹发射车 SINS/GNS 定位定向技术<sup>\*</sup>

黄 巍,王跃钢,沈 琰,徐洪涛

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

摘 要:针对导弹发射车对导航系统的全自主性及精度的特殊要求,提出将地磁匹配定位定向系统与惯性导航系统进行组合。地磁匹配过程中采用了基于 Hausdorff 距离的相似算法。基于 U-卡尔曼滤波算法,对 SINS/GNS 全自主定位定向组合系统与捷联惯导系统单独定位定向在同一条件下的误差情况进行了对比仿真。仿真结果表明,装有地磁匹配惯导系统的导弹发射车定位定向的精确度有了明显提高,滤波收敛性较好。

关键词:捷联惯性导航系统;地磁匹配;定位定向;U-卡尔曼滤波;仿真

中图分类号:TJ768.2 文献标志码:A

## SINS/GNS Positioning and Orientation for Missile Launching Vehicle

HUANG Wei, WANG Yuegang, SHEN Yan, XU Hongtao

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Focused on the special requirements for independence and precision of navigation system in missile launching vehicle, the navigation program which matches inertial guidance system with geomagnetic matching positioning and orientation system was put forward. The similar algorithm based on Hausdorff range was adopted in the geomagnetic matching process. The SINS/GNS independent positioning and orientation system was designed under the same condition, the two different errors (SINS/GNS and SINS) were compared and simulated based on the UKF. The simulation result shows that the positioning and orientation accuracy of the missile launching vehicle equipped with SINS/GNS is improved evidently and the filter convergence has great reliability.

**Keywords:** SINS; geomagnetic matching; positioning and orientation; UKF; simulation

### 0 引言

车载定位定向系统是用于路基导弹、制导炮弹等武器机动发射的设施,它在导弹发射车上有着重要的应用。文中研究采用激光陀螺捷联惯导系统(SINS)为主导航系统,通过与地磁导航系统(GNS)组合,构成车载自主定位定向系统。该定位定向系统不依靠 GPS,是一种全自主的导航系统,可以满足导弹无依托快速机动发射的要求,并可在长期隐蔽待机条件下保障导弹武器系统的快速反应能力。

### 1 地磁匹配定位定向

#### 1.1 地磁匹配定位的原理

地磁场是一个矢量场,是地球的固有资源,

具有被动式全天时、全天候、全地域的特点。我国地磁测量精度已达到  $0.0003\text{nT}$  ( $1\text{Gs} = 10^5\text{nT}$ , 地磁场为  $50000\text{nT}$ )。地球基本磁场变化十分缓慢,年变率在千分之一以下<sup>[1]</sup>。地球表面以及近地空间的地磁场在不同地区是不同的,这种不同性构成了不同地区的一种典型特征;因此地磁匹配定位技术作为一种隐蔽性很强的无源导航技术,具有更好的隐蔽性和抗干扰性。地磁匹配具有以下几个显著的优点<sup>[2]</sup>:可与惯导系统组合使用,校正惯性导航系统的积累误差;属于被动无源导航,具有良好的隐蔽性和抗干扰性;可弥补地形匹配等导航方式在跨平原、水域时存在的缺陷。同时,高精度低成本弱磁测量仪器(磁通门传感器、磁阻传感器)的出现,也为采用地磁匹配来实现导航定位提供了硬件基础。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-07-05

作者简介:黄巍(1984-),男,安徽黄山人,硕士研究生,研究方向:导航、制导与控制。

地磁匹配是一种自主式导航方法,通过实时采集一维地磁场强来获得二维定位。首先将载体所经过的区域划分为网格,取每个网格上的平均地磁场强作为该网格的地磁场强,这样就形成了地磁匹配基准图。当载体进入该匹配区域时,地磁匹配测量仪实时地采集所处位置的地磁特征;一连串测量值就可以形成一个测量序列。利用其他导航系统提供的辅助信息(如位置、速度)将该测量序列与数据库的某一区域进行相关匹配,获得最佳匹配位置,便可以完成对载体航线误差的纠正。利用此位置信息修正惯性导航系统,对惯性导航系统的误差进行抑制,可实现长航时、高精度导航。地磁匹配定位原理如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

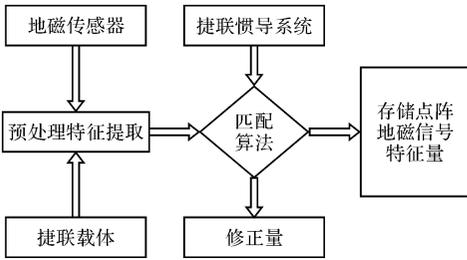


图 1 地磁匹配原理框图

### 1.2 基于 Hausdorff 距离的相似算法

地磁匹配算法是地磁匹配定位系统研究中最主要的内容,也是地磁匹配定位系统要解决的核心技术之一。为实现地磁匹配定位的工程应用,必须研究高效、实时的地磁匹配算法。地磁匹配算法应具备较强的抗干扰能力、容错适应能力,较高的匹配精度和较低的计算复杂度;目前可以借鉴现有的较为成熟的地形匹配算法以及成熟的图像匹配算法。地磁匹配的过程,实际上是将实时测出的地磁场强数据列与预存地磁场强数据库进行相关处理的过程。度量实时测量序列和基准数据库中任一子序列的相似性程度有多种算法,目前的基本方法是相似度量算法,文中引入了图像匹配中常用的基于 Hausdorff 距离的相似算法。

Hausdorff 距离(以下简称 HD)是一种极大极小距离,它主要用于测量两个点集的匹配程度。它的引入使地磁匹配基于一种新的测度。给定两个有限点集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$  和  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_p\}$ , 则  $A, B$  之间的 HD 定义如下:

$$H(A, B) = \max(d(A, B), d(B, A)) \quad (1)$$

其中:

$$d(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (2)$$

$$d(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (3)$$

式中:定义  $\| \cdot \|$  为在点集  $A$  和  $B$  上的某种距离范数<sup>[4]</sup>;  $d(A, B)$  称为有向 Hausdorff 距离。再求出点集  $A$  中所有点到点集  $B$  的距离,然后将这些距离由小到大排序,其中序号为  $k$  的距离即为  $h_k(A, B)$ 。

在 HD 距离的基础上采用 LTS-HD 法,有向距离  $h_{LTS}(A, B)$  用距离序列的线性组合来定义:

$$h_{LTS}(A, B) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k d_B(a)_{(i)} \quad (4)$$

其中  $d_B(a)_{(i)}$  表示序列  $(d_B(a)_{(1)} \leq d_B(a)_{(2)} \leq \dots \leq d_B(a)_{(N_A)})$  中的第  $i$  个距离值。

## 2 SINS/GNS 组合导航系统结构设计

### 2.1 建立系统模型

设计组合导航系统,该系统输入分为两个部分,其核心部分为惯性导航系统,第二部分是地磁匹配导航系统,两个导航系统的输出数据输入到主滤波器进行滤波,得到最优滤波结果。地磁反馈校正惯导卡尔曼滤波示意图见图 2<sup>[1]</sup>。在此选取对导航影响较大的误差进行研究,并建立模型。

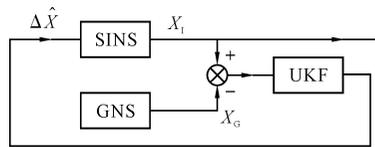


图 2 地磁反馈校正惯导卡尔曼滤波示意图

取状态矢量为:

$$X = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta V_E \ \delta V_N \ \delta V_U \ \delta j \ \delta \lambda \ \delta h \ \epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \nabla_{rx} \ \nabla_{ry} \ \nabla_{rz} \ \nabla B_x \ \nabla B_y \ \nabla B_z]^T \quad (5)$$

其中: $\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_U, \delta \phi, \delta \lambda, \delta h$  分别为惯导系统的姿态误差角、速度误差、位置误差,  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  为地理坐标系的等效东向、北向、天向陀螺随机漂移,  $\nabla_{rx}, \nabla_{ry}, \nabla_{rz}$  为地理坐标系的等效东向、北向、天向加速度计偏置,  $\nabla B_x, \nabla B_y, \nabla B_z$  为地理坐标系的等效东向、北向、天向地磁场误差量。

取陀螺仪随机噪声漂移  $(\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz})$ 、加速度计随机噪声漂移  $(\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az})$  及磁场计随机噪声漂移  $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$  为系统噪声:

$$W(t) = [\omega_{gx} \ \omega_{gy} \ \omega_{gz} \ \omega_{ax} \ \omega_{ay} \ \omega_{az} \ \sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z]^T \quad (6)$$

建立系统量测方程。磁场强度观测矢量定义为:

$$Z_B = C_b g \begin{bmatrix} B_{x_{bm}} \\ B_{y_{bm}} \\ B_{z_{bm}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{lx} \\ B_{ly} \\ B_{lz} \end{bmatrix} = H_B X(t) + \Delta V_B(t) \quad (7)$$

式中:  $[B_{x_{bm}} B_{y_{bm}} B_{z_{bm}}]^T$  为三轴捷联磁场计的输出值;  $[B_{lx} B_{ly} B_{lz}]^T$  为车载磁场数据库中即时位置的磁场强度值(为地球坐标系中的数值)。 $\Delta V_B(t)$  为三轴捷联磁场计的磁场测量误差。

将  $Z_B$  与位置观测矢量  $Z_p$ 、速度观测矢量  $Z_v$  合并得到系统量测方程:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} Z_p(t) \\ Z_v(t) \\ Z_B(t) \end{bmatrix} = H(t)X(t) + DV(t) \quad (8)$$

再利用 UKF 算法对 SINS 和 GNS 组合导航方式输出的数据进行数据融合滤波计算, 得出最优估计值<sup>[6]</sup>。

### 2.2 控制策略设计

为了更好地发挥惯性/地磁匹配组合导航系统的性能, 在利用地磁匹配定位系统的匹配结果对惯性导航系统的误差进行修正的同时, 必须充分利用惯性导航系统的输出信息辅助地磁匹配定位系统, 以提高地磁匹配的匹配精度和实时性。基于这种考虑, 有如下几点:

1) 利用惯导输出的位置信息来辅助地磁匹配系统。将匹配区大小选为开始地磁匹配时惯导位置误差的  $3\sigma \sim 5\sigma$ , 不仅减少了前期制作地磁匹配基准图的工作量, 而且也减少了实时匹配过程中的搜索区域, 有利于提高匹配的实时性和精度。

2) 利用惯导输出的航向信息来辅助地磁匹配系统。可以利用惯导航向信息减少地磁匹配在基准图中的序列搜索量, 也有利于提高匹配的实时性和精度。

3) 利用惯导输出的姿态角信息构造出其他匹配特征量, 如磁场东向分量、北向分量、天向分量、水平分量和磁偏角、磁倾角等, 使地磁匹配特征量具有可选性。

4) 在连续匹配过程中利用惯导输出的位置信息来判断地磁匹配结果的正确性。惯导的短

时精度是较好的, 短时间内输出的位移变化量是精确的, 可以据此判断地磁匹配结果的正确性。

## 3 惯性/地磁匹配组合导航系统仿真

### 3.1 仿真实验条件:

对导弹车辆行驶路程进行航迹仿真, 仿真过程中加入车载导航系统中常用的里程仪和高度表, 设定仿真时间为 2100s。初始经度为东经 108.909°, 纬度为北纬 34.246°, 高度为 380m, 速度为 0m/s; 陀螺常值漂移 0.02°/h, 噪声 0.01°/h; 加速度计随机常值零偏  $1 \times 10^{-4} g$ , 噪声  $1 \times$

$10^{-5} g$ ; 捷联惯导初始东、北、天 3 个方向的位置误差均为 100m, 东向和北向的观测噪声均方差均为 0.1m,

天向的观测噪声均方差为 0.2m, 利用 MATLAB 分别对 SINS、SINS/GNS 系统的误差方程进行解算, 得出东、北、天向的误差曲线, 图 3 为组合导航系统东、北、天向的位置误差曲线。其中, 实线表示

SINS /GNS 组合定位定向系统的误差, 点线表示 SINS 定位定向系统的误差。

### 3.2 结果分析

对以上各误差仿真曲线进行分析, 总结如下:

- 1) 仿真结果表明地磁匹配算法无原理性错误。
- 2) 由仿真实验的匹配精度及匹配误差的收敛性来看, SINS/GNS 组合算法具有较高的精度, 且收敛性较好。

3) 从仿真图中可以看出, SINS/GNS 组合导航的东、北、天向误差较之 SINS 有很大减小, 东向位置误差可控制在 10m 以内, 北向位置误差可控制在 12m 以内, 天向位置误差可控制在 15m 以内。

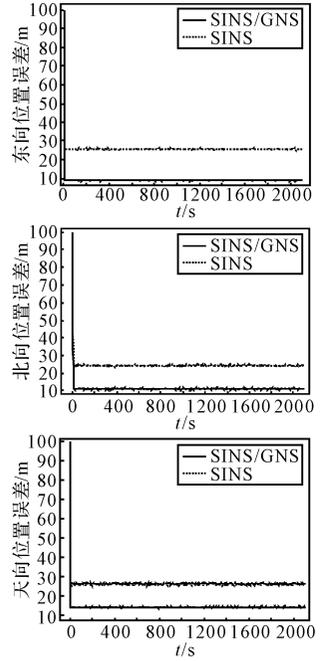


图 3 组合导航系统的位置误差曲线

表 2 速度和失准角估计误差均方根

| 状态估计量                       | EKF     | RBAUKF |
|-----------------------------|---------|--------|
| $\delta v_e / (\text{m/s})$ | 0.0696  | 0.0653 |
| $\delta v_n / (\text{m/s})$ | 0.0561  | 0.0557 |
| $\phi_e / (^\circ)$         | 0.9700  | 0.9473 |
| $\phi_n / (^\circ)$         | 0.6798  | 0.6246 |
| $\phi_u / (^\circ)$         | 10.0363 | 6.7875 |

从图 1 至图 3 可以看出, RBAUKF 与 EKF 相比,收敛速度更快,估计精度更高。待滤波稳定(取 100s 后),求取状态估计量的均方根值如表 2,直观的看出 RBAUKF 相比于 EKF 更高的估计精度:UKF 对  $\phi_u$  估计误差有效值为 6.8' 左右, EKF 大于 10'; 对于水平姿态角, RBAUKF 对  $\phi_e$ 、 $\phi_n$  的估计误差精度也比 EKF 好。证明了 RBAUKF 在非线形滤波中有较好的效果。

### 4 结 论

对于具有加性噪声的动态方程,当状态方程为非线形而量测方程为线性时, RBAUKF 有很好的滤波效果。在大方位失准角情况下, RBAUKF 可以在较短的时间内完成摇摆基座上的对准,与 EKF 相比,避免了将系统非线形状态方程线性化带来的误差,保证系统具有较快的收敛速度和高导航精度。同时,与标准的 UKF 相比, RBAUKF 利用较少的 Sigma 采样点数,滤波过程中只更新一次 Sigma 点,降低了计算复杂

度。因此,在 SINS 大方位失准角下 RBAUKF 是一种行之有效的非线形滤波方法。

参考文献:

[1] 万德钧, 房建成. 惯性导航初始对准[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998.

[2] 付梦印, 邓志红, 张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] Julier S J, Uhlmann J K, Durrant-Whyte H F. A new approach for filtering nonlinear system[C]// Proceedings of the American Control Conference Seattle, Washington; 1995, 6:1628-1632.

[4] Julier S J, Uhlmann J K, Durrant-Whyte H F. A new approach for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.

[5] Yanling Hao, Zhilan Xiong, Feng Sun. Comparison of unscented Kalman filters[C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China, Aug. 2007;895-899.

[6] Xinyu Xu, Baoxin Li. Rao-Blackwellised particle filter with adaptive system noise and its evaluation for tracking in surveillance [C]// Proc. SPIE, Vol. 6077, Jan. 2006.

[7] 潘泉, 杨峰, 叶亮, 等. 一类非线形滤波器—UKF 综述[J]. 控制与决策, 2005(5):481-489.

(上接第 61 页)

### 4 结 论

文中介绍了地磁匹配定位技术的基本原理和特点,研究了地磁匹配定位技术的基于 Hausdorff 距离的相似算法。在以上研究地磁匹配定位定向技术的基础上,对其与惯性导航的组合导航进行了仿真;仿真结果表明采用地磁匹配辅助惯导系统可以更好地提高组合定位定向系统的精度。

参考文献:

[1] 晏登洋. 惯性/地磁组合导航技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[2] 乔玉坤, 王仕成, 张琪. 地磁匹配制导技术应用于导

弹武器系统的制约因素分析[J]. 飞航导弹, 2006 (8):39-41.

[3] 谢仕民. 地磁匹配定位技术算法及惯导组合导航仿真[C]// 西安惯性技术学会第十届学术交流会论文集, 2007:5-14.

[4] 徐洪波, 彭卫, 苏建忠. 基于 Hausdorff 距离的地形匹配[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(5): 375-377.

[5] 陈莹, 韩崇昭. 基于 Hausdorff 距离的 3 维模型匹配的改进方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10 (3):326-331.

[6] Julier S, Uhlmann J, Durrant-Whyte H F. A new method for the non-linear transformations of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.