

文章编号: 1001 - 2486(2003)04- 0089 - 04

## 基于衰减记忆的地形辅助导航算法\*

冯庆堂, 沈林成, 常文森

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 地形辅助导航是解决惯性导航系统定位误差随时间不断增大的缺点的重要方法之一。提出了基于衰减记忆的地形辅助导航算法, 算法使用了一个新的相关算子, 根据量测值存在的历史时间长短, 对量测值赋以不同的权值, 用一个递归表达式递归地计算相关值。该算法在提高定位精度的同时减少了计算量和存储空间, 从而提高计算速度, 并连续输出定位结果。仿真结果表明该算法的正确匹配率、均方根误差和圆概率误差均优于 TERCOM 算法。

**关键词:** 地形辅助导航; 地形匹配; 衰减记忆

**中图分类号:** V249. 32      **文献标识码:** A

## Terrain Aided Navigation Using Fading Memory

FENG Qing-tang, SHEN Lin-cheng, CHANG Wen-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Terrain aided navigation (TAN) is the concept of using terrain height variations below the aircraft to obtain an estimation of the position that is used to limit the error in the INS. A new TAN approach using fading memory is proposed. The basic idea of this approach is using a new type correlation functional value to estimate the navigation position. The correlation function is defined by all the historical measurements with fading memory weight. A set of simulations shows that the method improve the precision and speed of TAN compared with TERCOM.

**Key words:** TAN; TM; fading memory

惯性导航系统 INS(Inertial Navigation System) 已有较长的发展历史, 并在军事和民用领域获得了广泛的应用, 现代的高精度导航系统通常都装有 INS。INS 具有自主性、隐蔽性、抗干扰能力强、短时间内导航精度很高、全天候工作、可连续地实时地输出载体全部运动信息等优点。INS 主要的缺点是导航定位误差随时间积累, 即随着工作时间的增长, 其误差也不断增大。解决这个矛盾的主要途径之一是发展组合导航技术。在组合导航系统中, 往往以 INS 作为主导航系统, 而将其它导航定位误差不随时间积累的导航系统, 如无线电导航、卫星导航、地形导航等作为辅助导航系统组成组合导航系统, 以获得高精度的导航信息。

### 1 地形辅助导航

地形辅助导航 TAN(Terrain Aided Navigation) 是一种自主、隐蔽、连续、全天候的导航技术, 有较高的定位精度, 已经在飞行器导航中应用几十年了。TAN 的原理如图 1 所示, 传感器测量飞行器飞行路径正下方的地形高度, 和存储的参考地图进行比较, 得出飞行器的位置信息。一旦得出对飞行器位置的一个估计值, 便可利用这个估计值修正飞行器 INS 的误差, 这就是所谓的地形辅助导航 TAN。

最著名的 TAN 算法是地形等高线匹配 TERCOM(Terrain Contour Matching) 算法和桑地亚惯性地形辅助导航 SITAN(Sandia Inertial Terrain Aided Navigation) 算法。TERCOM 是一种基于地形高度值相关分析的批处理算法, 并且在地形数据采集过程中不允许飞行器做机动飞行<sup>[1]</sup>。SITAN 算法使用一个改进的扩展卡尔曼滤波器(EFK), 在滤波器算法中对地形进行了局部随机线性化<sup>[2,3]</sup>。这两种算法在特定的领

\* 收稿日期: 2003 - 01 - 08

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 冯庆堂(1973—), 男, 工程师, 博士生。

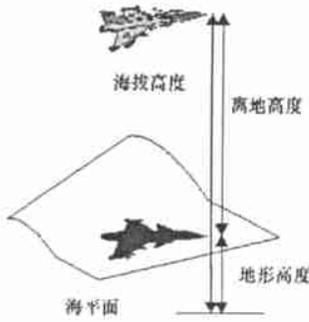


图 1 TAN 示意图

Fig. 1 The illustration of TAN

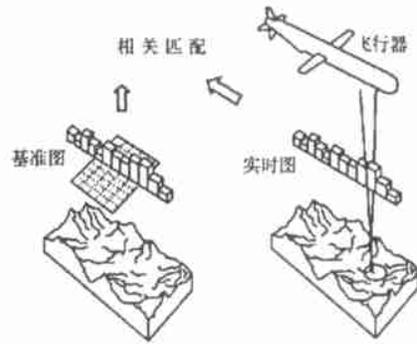


图 2 TERCOM 原理图

Fig. 2 The principle of TERCOM

域都得到了成功的应用。1997 年, Bergman 把贝叶斯方法引入到地形高度匹配问题的求解中<sup>[4]</sup>。用贝叶斯的观点来看, 估计问题就是计算状态的不确定性。这种不确定性由概率密度函数来表示, 仿真的结果表明, 用贝叶斯方法解决 TAN 问题具有较强的鲁棒性。

文献[5]提出了一种衰减记忆卡尔曼滤波中衰减因子的自适应估计方法, 并在 GPS/SINS 组合导航系统中进行了计算仿真。仿真结果表明: 该算法能够较好地估计出衰减因子的大小, 有效地抑制滤波发散, 提高导航精度。考虑到 TERCOM 算法相关计算时, 最近的  $N$  个量测值(采样值)具有相同的权值, 我们提出采用衰减记忆的方法对不同时刻的量测值赋以不同的权值, 使用一种新的相关算子计算相关值, 其实质是一种加权的相关值, 称之为基于衰减记忆的 TAN 算法 FMTAN(Terrain Aided Navigation Using Fading Memory)。仿真结果表明这种新方法的正确匹配率、均方根误差和圆概率误差均优于 TERCOM 算法。

## 2 基于衰减记忆的地形相关算子

TERCOM 算法的原理(如图 2 所示)是: 飞行器在飞越航线上某些特定的地形区域(称为地形匹配区)时, 利用雷达高度表和气压高度表等设备测量沿航线的地形标高剖面(称为实时图), 将测得的实时图与预存的基准图指示的标高剖面进行相关, 按最佳相关确定飞行器的地理位置。地形匹配系统通常使用 MSD 相关度量算子。为了避免由于地形的自相似而造成虚假定位, 要求连续采样时间不能太短, 实时图的长度不能太短; 而为了避免在一次相关匹配过程中惯导的漂移量过大, 又要求连续采样时间不能太长, 实时图的长度不能太长。在 TERCOM 算法的相关计算中, 最近的  $N$  个量测值(采样值)具有相同的权值, 而最近  $N$  个量测值以前的量测值的权值为 0。这样计算有不合理的地方, 我们认为应该在相关计算中考虑所有的量测值, 且距目前时刻越近的量测值具有越高的权值, 而距目前时刻越远的量测值的权值越小。基于此, 我们提出了基于衰减记忆的地形高度匹配相关算子。

定义变量  $e_{m, n}(k)$  如下:

$$e_{m, n}(k) = h_{meas}(k) - h_{DTED}(x_k + m, y_k + n) \quad (1)$$

$$h_{meas}(k) = h_{press}(k) - h_{radar}(k) \quad (2)$$

(1) 式中  $h_{meas}(k)$  为  $k$  时刻根据测量值计算的实时地形高度值,  $h_{DTED}(x_k + m, y_k + n)$  是把  $k$  时刻基本导航系统指示的位置信息  $(x_k, y_k)$  平移  $(m, n)$  个单位像元后, TERCOM 数字地图 DTED 中相应位置的地形高度值。(2) 式中  $h_{press}(k)$  代表  $k$  时刻气压高度表测量的海拔高度值,  $h_{radar}(k)$  代表  $k$  时刻雷达高度表测量的离地高度值。

定义相关算子  $\alpha_{SD_{m, n}}(k)$  如下:

$$\alpha_{SD_{m, n}}(k) = \alpha^0 e_{m, n}^2(k) + \dots + \alpha^i e_{m, n}^2(k - i) + \dots + \alpha^{k-1} e_{m, n}^2(1) = \sum_{i=1}^k \alpha^{k-i} e_{m, n}^2(i) \quad (3)$$

(3) 式中  $\alpha$  是衰减因子,  $0 < \alpha \leq 1$ 。

显然,  $1 \geq \alpha^0 \geq \alpha^1 \geq \dots \geq \alpha^{k-1} \geq 0$ , 权值  $\alpha^{k-i}$  满足算法的要求, 在相关值  $\alpha_{SD_{m,n}}(k)$  的计算中, 距当前时刻  $k$  越近的量测值具有越大的相对权值  $\alpha^{k-i}$ , 当前时刻  $k$  的量测值具有最大的相对权值 1。

(3) 式可以写成如下递归的形式:

$$\alpha_{SD_{m,n}}(k) = \alpha^* \alpha_{SD_{m,n}}(k-1) + e_{m,n}^2(k), \quad m \in I_1, n \in I_2 \quad (4)$$

$I_1, I_2$  是两个整数集合, 即  $I_1 \subseteq I, I_2 \subseteq I$ , 其取值范围和 TERCOM 算法的搜索区相同, 大小与基本导航系统的性能有关。

假设  $e_{\hat{m}, \hat{n}}(k)$  属于正态分布<sup>[6]</sup>, 满足如下条件(此处假设雷达高度表、气压高度表、DTED 地图没有系统偏差):

$$e_{\hat{m}, \hat{n}}(k) \sim N(0, \sigma_e) \quad (5)$$

$\sigma_e$  的大小由雷达高度表、气压高度表、DTED 地图的随机误差决定。

$$\frac{e_{\hat{m}, \hat{n}}(k)}{\sigma_e} \sim N(0, 1) \quad (6)$$

$$\frac{e_{\hat{m}, \hat{n}}^2(k)}{\sigma_e^2} \sim \chi^2(1) \quad (7)$$

$e_{\hat{m}, \hat{n}}(i), i = 1, 2, \dots, k$  独立同分布

$$\alpha_{SD_{\hat{m}, \hat{n}}}(k) = \sum_{i=1}^k \alpha^{k-i} e_{\hat{m}, \hat{n}}^2(i) \quad (8)$$

$$E(\alpha_{SD_{\hat{m}, \hat{n}}}(k)) = \frac{1 - \alpha^{k-1} \sigma_e^2}{1 - \alpha} < \frac{\sigma_e^2}{1 - \alpha} \quad (9)$$

$$D(\alpha_{SD_{\hat{m}, \hat{n}}}(k)) = \frac{2(1 - \alpha^{2(k-1)})}{1 - \alpha^2} \sigma_e^4 < \frac{2\sigma_e^4}{1 - \alpha^2} \quad (10)$$

### 3 基于衰减记忆的地形辅助导航算法

地形高度匹配的过程就是寻找最佳相关值的过程, 也就是寻找使  $\alpha_{SD_{m,n}}(k)$  取得最小值  $\alpha_{SD_{\hat{m}, \hat{n}}}(k)$  的  $(\hat{m}, \hat{n})$  的过程:

$$(\hat{m}, \hat{n}) = \arg \min_{m, n} \alpha_{SD_{m,n}}(k) \quad (11)$$

算法流程:

- (1) 赋初值:  $k = 0, \alpha_{SD_{m,n}}(k) = 0$ ;
- (2) 采样; 采样目前惯导指示的位置坐标  $(x_k, y_k)$ 、雷达高度  $h_{radar}(k)$  和气压高度  $h_{press}(k)$ ;
- (3) 根据公式(1)、(2), 对所有的  $(m, n)$ , 计算  $e_{m,n}(k)$ ;
- (4) 计算相关值; 根据公式(4), 对所有的  $(m, n)$ , 计算  $\alpha_{SD_{m,n}}(k)$ , 找出最小相关值  $\alpha_{SD_{\hat{m}, \hat{n}}}(k)$ ;
- (5) 定位; 如果  $k \geq 1/(1 - \alpha)$ , 根据  $\alpha_{SD_{\hat{m}, \hat{n}}}(k)$  求得  $(\hat{m}, \hat{n})$ , 再根据数字标高地图确定 TAN 位置;
- (6)  $k = k + 1$ , 转(2)。

### 4 仿真及结果

为了验证基于衰减记忆的地形辅助导航算法的性能, 对基于衰减记忆的地形辅助导航算法和 TERCOM 算法在相同的条件下分别进行了仿真, 仿真的主要参数假定如下:

飞行器飞行速度:	0.9 马赫;	搜索框长度:	6000m;
雷达高度表高度均方根误差:	15m;	搜索框宽度:	6000m;
气压高度表高度均方根误差:	3m;	实时图长度 $N$ :	48 点;
惯导定位误差漂移速度		采样频率:	4Hz;
东向: 5m/s; 北向: 5m/s;		TERCOM 算法相关算子:	MSD;

地图网格大小: 60m × 60m;

衰减因子  $\alpha$ : 0.985;

初始点定位均方根误差

东向: 2000m; 北向: 2000m;

在起伏较小的地形和起伏较大的地形上分别进行了 TERCOM 算法和基于衰减记忆的 TAN 算法仿真。仿真结果如图 3、图 4 和表 1 所示。从图 3 和图 4 看出, 基于衰减记忆的 TAN 算法的导航误差直方图分布优于 TERCOM 算法; 从表 1 看出, 基于衰减记忆的 TAN 算法正确匹配率和圆概率误差 CEP 均优于 TERCOM 算法(导航误差指算法估计的位置与真实位置的距离; 正确匹配指导航误差小于地图网格边长的 $\sqrt{2}$  倍, 即 85m; 正确匹配率指正确匹配次数与总的匹配次数的比例)。

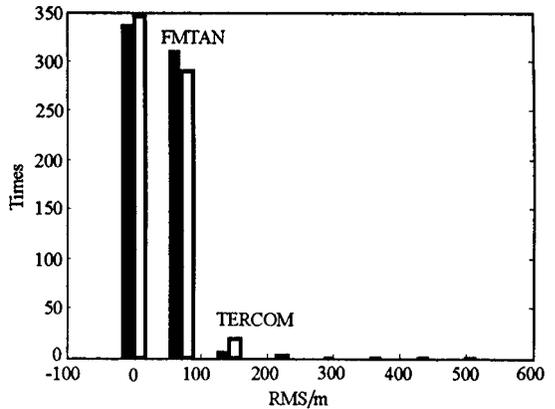
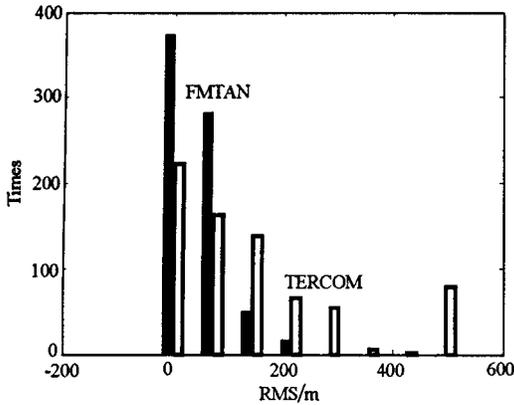


图 3 起伏较小的地形导航误差统计直方图

图 4 起伏较大的地形导航误差统计直方图

Fig. 3 The histogram of errors over flat terrain

Fig. 4 The histogram of errors over rough terrain

表 1 TERCOM 算法和基于衰减记忆的 TAN 算法的仿真结果

Tab. 1 Simulation result of TERCOM and FMTAN

	起伏较小的地形		起伏较大的地形	
	正确匹配率	CEP(m)	正确匹配率	CEP(m)
TERCOM	47.38%	87.39	86.52%	35.44
基于衰减记忆的 TAN	83.47%	34.15	94.03%	35.26

## 参考文献:

- [1] Baker W, Clem R. Terrain Contour Matching [TERCOM] Primer Technical Report ASP-TR-77-61[R]. Aeronautical Systems Division, Wright Patterson AFB, Aug. 1977.
- [2] Andreas R D, Hostetler L D, Bechmann R C. Continuous Kalman Updating of an Inertial Navigation System Using Terrain Measurement[C]. In Proceedings of National Aerospace and Electronics Conference, 1978: 1263-1270.
- [3] 苏康, 柳健. 在不同地形条件下的地形辅助导航系统定位精度评估[J]. 宇航学报, 1998, 19: 84-89.
- [4] Bergman N. Bayesian Approach to Terrain-aided Navigation[C]. In Proc. of SYSID'97, 11<sup>th</sup> IFAC Symposium on System Identification, IFAC, 1997, 1531-1536.
- [5] 耿延睿, 崔中兴. 组合导航系统卡尔曼滤波衰减因子自适应估计算法研究[J]. 中国惯性技术学报, 2001, 9(4): 8-10, 27.
- [6] Gray R A. In-flight Detection of Errors for Enhanced Aircraft Flight Safety and Vertical Accuracy Improvement Using Digital Terrain Elevation Data with an Inertial Navigation System, Global Positioning System and Radar Altimeter[D]. Ph. D. Dissertation, Ohio University, Athens, Ohio, June 1999.