

海底地形辅助导航 SITAN 算法中二次搜索技术

于家城^{1,2}, 晏 磊¹, 邓 崑¹, 陈家斌²

(1. 北京大学空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;
2. 北京理工大学信息科学技术学院自动控制系, 北京 100081)

摘 要: 在建立搜索模型和跟踪模型的基础上, 提出了二次搜索加一次跟踪的地形辅助导航技术, 通过在不同搜索阶段的卡尔曼滤波器分别满足留数指标和地形坡度指标获得最佳匹配位置, 对传统的 SITAN 算法进行了改进. 计算机仿真结果表明, 改进的 SITAN 算法在理论上更加合理有效, 定位精度更能够满足要求.

关键词: SITAN 算法; 二次搜索; INS; 卡尔曼滤波

中图分类号: U666.12 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2007)03-0474-04

Technique of Two Searches on SITAN Algorithm for Seabed Terrain Aided Navigation

YU Jia cheng^{1,2}, YAN Lei¹, DENG Wei¹, CHEN Jia bin²

(1. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and Applications, Peking University, Beijing 100871, China;
2. Department of Automatic Control, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A Technique of two searches and one track for seabed Terrain aided navigation is put forward with search model and track one. Optimal matching position is obtained through Kalman filtering according to residual index and terrain slope respectively in different stage. Simulation results show that modified SITAN algorithm is more reasonable and effective in theory than before one. Meanwhile, the positioning accuracy is greatly improved.

Key words: SITAN algorithm, Two searches, INS, Kalman filtering

1 引言

地形辅助导航 TAN (Terrain aided navigation) 是近十几年来出现的一种新型导航系统, 它的功能是利用地形的特征信息实现载体自主、隐蔽、连续、全天候的精确导航^[1]. 围绕这门新兴技术, 产生了很多算法, 其中, 上世纪 70 年代美国桑迪亚实验室提出的 SITAN 算法由于计算速度快, 能够满足实时需要在飞行器导航中首先获得了应用, 从而启发人们对此技术的应用研究引入海底导航领域.

SITAN 系统一般由两种工作模式组成, 即搜索模式和跟踪模式^[2]. 搜索阶段采用单态卡尔曼滤波器, 跟踪阶段采用多态卡尔曼滤波器^[3-5], 单态卡尔曼滤波器仅在垂直方向进行滤波, 没有引进地形平面上随机线性化斜率的信息, 从而导致搜索跟踪转换逻辑烦琐复杂. 文献[1]使用三态卡尔曼滤波器, 但在垂直方向和水平方向做了相同处理, 显然与惯导系统垂直通道的发散

性相违背. 为了判断滤波器的收敛性, 文献[2]在搜索阶段使用了一个留数指标, 仿真发现, 采用一次搜索, 在纬度方向滤波基本收敛, 但在经度方向依然存在很大的滤波振荡.

为了符合实际情况, 同时加速系统在经度方向的收敛, 对 SITAN 算法得改进形式较多, 文献[6]应用其改进形式 BITAN 算法验证了各种统计指标与导航精度之间的关系. 本文着重在算法搜索阶段进行了改进设计. 搜索模式采用一组均匀分布在搜索区域内包含三个位置状态的卡尔曼滤波器并行工作. 第一次搜索阶段满足留数指标, 第二次搜索阶段满足梯度指标, 采用的模型是粗模型, 表现为粗搜索, 两次搜索结束即转为跟踪模式. 在跟踪模式下, 采用一个 12 维的卡尔曼滤波器工作, 这是

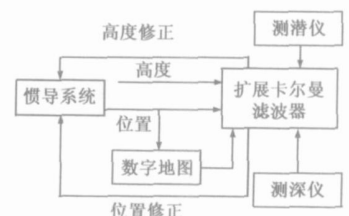


图1 SITAN 导航系统原理框图

一个精确模型, 表现为细校正. 该系统的结构由惯导系统、测潜仪、测深仪、DEM 数据和卡尔曼滤波器五部分组成. 工作原理框图如图 1 所示.

2 滤波器设计

2.1 跟踪模式滤波器

在跟踪阶段, 建立系统精确的状态方程和测量方程(细模型)

惯导系统采用指北方位平台惯导, 载体做匀速直线运动, 采用东北天坐标系, 状态量如此选取:

$$X = [\delta\lambda \ \delta\varphi \ \delta V_E \ \delta V_N \ \alpha \ \beta \ \gamma \ \nabla_E \ \nabla_N, \ \varepsilon_E, \ \varepsilon_N, \ \varepsilon_z]^T$$

具体的状态方程见文献[7]

量测方程:

$$z = h_x \delta\lambda R_m \cos \varphi + h_y R_m \delta\varphi + \gamma_1 \quad (1)$$

2.2 搜索子滤波器垂直通道状态方程

由于惯导系统垂直通道不稳定, 因此为了建立三维搜索模型, 在垂直方向取潜艇估计离底深度与真实离底深度的差值为状态变量. 记惯导指示位置处真实水深与载体所在位置处真实水深的差值:

$$h_{pos} = h_t(x_{ins}, y_{ins}) - h_t(x, y) \quad (2)$$

则有:

$$h_t(x_{ins}, y_{ins}) = h_t(x, y) + h_{pos} \quad (3)$$

从而:

$$\hat{h}_t(x_{ins}, y_{ins}) = h_t(x, y) + h_{pos} + \text{maperror} \quad (4)$$

预测离底深度

$$\begin{aligned} \hat{h} &= \hat{h}_t(x_{ins}, y_{ins}) - \tilde{h}_q \\ &= h_t(x, y) + h_{pos} + \text{maperror} - h_q(x, y) - \gamma_q \\ &= h_s(x, y) + h_{pos} + \text{maperror} - \gamma_q \end{aligned} \quad (5)$$

其中, \tilde{h}_q 为测潜仪测量的实际位置处下潜深度, γ_q 为测潜仪测量误差.

从而有:

$$\tilde{h} - h_s(x, y) = h_{pos} + \text{maperror} - \gamma_q$$

记估计误差: $\delta h = \tilde{h} - h_s(x, y)$

取预测离底深度与测深仪测的离底深度之差为量测值:

$$\begin{aligned} z &= \tilde{h} - \tilde{h}_s = \tilde{h}_t(x_{ins}, y_{ins}) - \tilde{h}_q - \tilde{h}_s \\ &= \tilde{h}_t(x_{ins}, y_{ins}) - \tilde{h}_t \\ &= h_s(x, y) + h_{pos} + \text{maperror} - \gamma_q - h_s(x, y) - \gamma_s \\ &= h_{pos} + \text{maperror} - \gamma_q - \gamma_s \\ &= \delta h - \gamma_s \end{aligned} \quad (6)$$

以 δh 作为状态: $x = \delta h$. 根据文献[5, 8], 在潜艇真实位置附近, $x(t)$ 可视为均值不为零的 AR(1) 序列, 即:

$$x(k+1) = \tau x(k) + (1-\tau)\mu + w_6(k) \quad (7)$$

其中, $w_6(k) \sim N(0, \sigma_w^2)$ 令 $(1-\Phi)\mu = u$,

则系统的状态方程为:

$$x(k+1) = \tau x(k) + u + w_6(k) \quad (8)$$

2.3 搜索模式子滤波器的建立(粗模型)

惯导部分, 在搜索阶段, 潜艇仍匀速直线航行, 加速度计的随机常值飘移近似得到全补偿, 但是还存在加速度计的随机正态飘移未做补偿, 在惯导仪表上所显示的匀速实际是非匀速的, 必须将潜艇的运动信息加入到滤波阵中. 则有: $\delta x = \delta V_E$, $\delta y = \delta V_N$, $\delta V_E = w_1$, $\delta V_N = w_2$, 其中, w_1, w_2 分别为东向, 北向加速度计随机正态漂移.

组成状态向量:

$$X = [\delta x \ \delta y \ \delta v_x \ \delta v_y]^T$$

矩阵形式状态方程:

$$X = F X + W \quad (9)$$

$$\text{其中, } F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$$

离散后的系统为:

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1} X_k + \Gamma_k W_k \quad (10)$$

$$\text{其中, } \Phi_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_k = \begin{bmatrix} T & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & T & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix}$$

这与 2.2 中获得的深度信息共同组成新的状态向量:

$$X = [\delta x \ \delta y \ \delta v_x \ \delta v_y \ \delta h]^T$$

新的状态方程:

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1} X_k + \Gamma_k W_k + U \quad (11)$$

$$\text{其中, } \Phi_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_k = \begin{bmatrix} T & 0 & T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u \end{bmatrix}$$

新的噪声向量:

$$W = [0 \ 0 \ w_1 \ w_2 \ w_6]^T$$

新的量测方程:

$$Z = \begin{bmatrix} h_x & h_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

3 匹配算法设计

算法的基本思想是通过满足不同的性能指标进行两次搜索, 搜索完毕后对惯导系统进行校正。

3.1 并行卡尔曼滤波器布局

在算法刚刚启动时, 以惯导给出的初始位置为中心, 以 1.5 倍的最大经度误差或纬度误差为边长建立搜索区域, 以最大限度的包含载体的真实位置。在搜索区域内划分格网, 在每个格网点上配置卡尔曼子滤波器。所配置的子滤波器见前面所建立的搜索阶段子模型。

3.2 第一次搜索阶段最佳位置估计

在第一次搜索阶段以留数 WRS 最小为准则。对每个子滤波器的匹配程度进行评估和决策, 作为最靠近真实位置的子滤波器。在这里, 使用一个量加权残差平方, 作为搜索过程中考察每一个子滤波器的匹配程度的指标, WRS 越小的子滤波器粗略的被视为匹配程度越好。其计算如下:

$$\text{残差: } e_{k,t} = z_{k,t} - H\hat{x}_{k,t} \quad (13)$$

其中, $Z_{k,t}$ 和 $X_{k,t}$ 分别为第 k 个子滤波器在 t 时刻的观测值和状态值归一化残差:

$$WKS_{k,t} = \rho \frac{(e_{k,t,1})^2}{H_1 P_{k,t} H_1^T + R_1} + (1 - \rho) \frac{(e_{k,t,2})^2}{H_2 P_{k,t} H_2^T + R_2} \quad (14)$$

根据文献[3]对残差进行加权平滑:

$$\begin{aligned} WKS_{k,t} &= \eta WKS_{k,t} + (1 - \eta) WKS_{k-1,t} \\ &= \eta WKS_{k,t} + \eta(1 - \eta) WKS_{k-1,t} + \dots + \\ &\quad \eta(1 - \eta)^{t-1} WKS_{k,1} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, ρ, η 为加权因子 (ρ 初值取 0, η 初值取 1)。计算所有滤波器 $WKS_{k,t}$ 最小值: $WKS_{\min} = \min_k (WKS_{k,t})$, 找到 WKS_{\min} 所在位置的子滤波器位置。

3.3 第二次搜索阶段最佳位置估计

仿真表明, 经过第一次搜索阶段位置估计, 在纬度方向收敛较快, 但是在经度方向匹配过程成为振幅渐小的振荡, 但是振荡周期长, 不易达到稳定, 为了快速收敛, 引入梯度信息和滤波误差信息作为判断准则。考虑在真实位置附近, 收敛误差最小; 同时, 对不同格网点相同的滤波误差具有较大梯度格网点更靠近真实位置, 经过仿真试验, 定义如下性能指标:

$$\text{Slope} = \log \left[\frac{|h_x| + |h_y|}{|\hat{x}_1| + |\hat{y}_1|} \right] \quad (16)$$

其中, h_x, h_y 分别为沿经度、纬度方向地形随机线性化斜率; \hat{x}_1, \hat{y}_1 分别为沿经度、纬度方向滤波误差。在第一次搜索结束后, 纬度方向已达到很高的精度, 因此第二次搜索主要是在经度方向进行的。为了加快搜索速度,

此时可以将匹配区收缩到一个沿经度方向较狭长的区域内。该区域长度为经度误差绝对值加三个格网长度, 宽为三个格网长度。在此区域内, 满足 $\min(\text{Slope})$ 的格网点认为最佳匹配点。

3.4 校正惯导系统

第二次搜索完毕后, 为进一步获得更高的精度, 以第二次估计的位置为中心使用惯导系统细模型对系统进行校正。以校正后的位置做为估计位置, 完成一次搜索跟踪过程。接着进入下一次循环, 直至完成所有导航点的匹配。

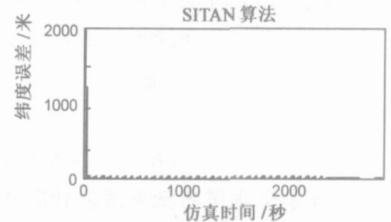
4 系统仿真

在理论分析的基础上, 我们对海底某地形进行了仿真。采用的初始条件为: 初始经度 $\lambda = 124.9^\circ$, 初始纬度 $\varphi = 24.603^\circ$, 初始经纬度误差 0.02° , 陀螺漂移率 $\varepsilon = 0.001^\circ/\text{小时}$, 加速度漂移率 $\nabla = 10^{-5}$ 米/秒², 潜艇航速 $V = 4$ 米/秒。所得结果分别如图 2、图 3 所示。

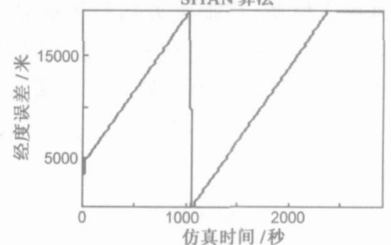
由图中看出, 一次搜索加跟踪的匹配过程在经度方向存在极大振荡, 经过改进的二次搜索加跟踪匹配过程经过 100 秒后, 匹配的经纬度误差皆在 500 米之内, 匹配的稳定性也较好。

5 结论

本文将惯导系统和海洋地理信息紧密结合起来, 充分考虑了导航点的水平信息(属惯导系统)和深度信息(属地形信息), 滤波误差和地形梯度, 通过两次搜索加一次校正来进行匹配, 这样既有对惯导和地形进行全面考虑, 又通过设置权重达到了合理的融合, 具有良好的应用价值和

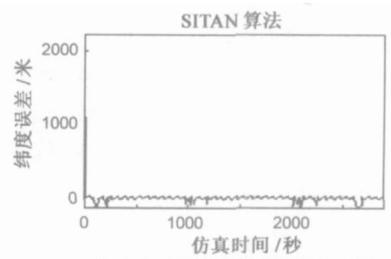


(a)海底地形辅助导航系统经度误差

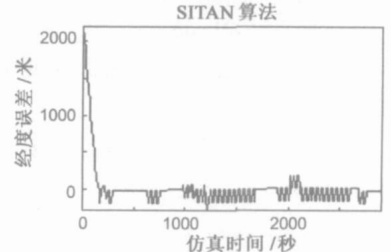


(b)海底地形辅助导航系统纬度误差

图 2 一次搜索加跟踪匹配误差



(a)海底地形辅助导航系统经度误差



(b)海底地形辅助导航系统纬度误差

图 3 二次搜索加跟踪匹配误差

理论意义.

参考文献:

- [1] 苏康,关世义,柳健.卡尔曼连续修正的地型辅助导航系统计算机仿真[J].系统仿真学报,1997,9(2):123-127.
SU Kang, GUAN Shi yi, LIU Jian. Computer simulation of a terrain aided navigation system using continuous kalman updating technique[J]. Journal of System Simulation, 1997, 9(2): 123-127. (in Chinese)
- [2] Larry D Hostetler, Ronald D Andreas. Nonlinear kalman filtering techniques for terrain aided navigation[J]. IEEE Transactions on automatic control, 1983, 28(3): 315-323.
- [3] 张飞舟,文芳,晏磊,葛远声.水下无源导航系统仿真匹配算法研究[J].武汉大学学报信息科学版,2003,28(2):153-157.
ZHANG Fei zhou, Si Wen fang, YAN Lei, GE Yuan sheng. Simulation research on matching algorithm of autonomous underwater navigation system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(2): 153-157. (in Chinese)
- [4] 刘光军,陈晶.海底地形辅助导航系统仿真技术研究[J].计算机仿真,2000,17(2):21-24.
LIU Guang jun, CHEN Jing. Study on simulation techniques for the seabottom mapping system[J]. Computer Simulation, 2000, 17(2): 21-24. (in Chinese)
- [5] 刘光军,袁书明,黄咏梅.海底地形匹配技术研究[J].中国惯性技术学报,1999,7(1):19-22.
LIU Guang jun, YUAN Shu ming, HUANG Yong mei. Study

on seabottom matching techniques[J]. Journal of Chinese Inertial Technology 1999, 7(1): 19-22. (in Chinese)

- [6] 冯浩,晏磊,张飞舟,等.基于辅助惯性导航的数据地图特征分析[J].北京邮电大学学报.2004,27(4):23-27.
FENG Hao, YAN Lei, ZHANG Fei zhou, et al. Data map characteristic analysis based on aided inertial navigation[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications. 2004, 27(4): 23-27. (in Chinese)
- [7] 袁信,俞济祥,陈哲.导航系统[M].北京:航空工业出版社,1993.30-69.
YUAN Xin, YU Ji xiang, CHEN Zhe. Navigation System[M]. Aviation Industry Press, 1993. 30-69. (in Chinese)
- [8] Yan Lei, Yan Ming, Zhang Fei zhou. Seabed terrain simulation and its matched filter design[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 4892: 377-381.

作者简介:

于家城 男,1969年生于山东日照,现为北京大学遥感所博士研究生,主要研究兴趣为导航、制导与控制、系统建模与仿真。

E mail: slyjc@163.com



晏磊 男,1956年出生,现为北京大学教授、博士生导师,主要从事智能导航、智能交通与遥感图像处理等方面的研究。

E mail: Lyan@pku.edu.cn