

鲁棒惯性地形辅助导航算法研究*

赵龙†

(北京航空航天大学飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

(2011年7月20日收到; 2011年9月23日收到修改稿)

传统的地形轮廓匹配 (terrain contour matching, TERCOM) 算法在速度误差和航向误差较大时可靠性下降, 基于扩展 Kalman 滤波的北航惯性地形辅助惯性导航 (BUAA inertial terrain aided navigation, BITAN) 算法在初始位置误差或高度表测量噪声较大时, 系统无法准确定位, 导致系统的鲁棒性降低. 为解决上述问题, 对 BITAN 算法进行改进, 发展了鲁棒北航惯性地形辅助导航 (robust BUAA inertial terrain aided navigation, RBITAN) 算法. RBITAN 算法根据平均绝对差、均方差和交叉相关算法的统计决策信息设计了搜索模式算法, 以基于扩展 Kalman 滤波原理的 BITAN 算法作为跟踪算法, 综合了 TERCOM 算法和 BITAN 算法的优点, 提高了算法的鲁棒性. 利用真实的数字高程模型和试飞数据进行仿真验证, 并和 BITAN 算法进行比较. 仿真结果验证了 RBITAN 算法可以在较大初始位置误差和较大高度表测量噪声时准确定位, 提高了算法的鲁棒性.

关键词: 地球物理场导航, 地形轮廓匹配, 北航惯性地形辅助导航, 鲁棒性

PACS: 43.60.Jn, 84.30.Vn, 91.10.Fc

1 引言

在军用和民用领域中应用的导航系统几乎都要求实时、可靠地提供载体的位置、速度和姿态信息. 依靠单一的导航系统很难满足要求. 将惯性导航系统与卫星定位系统信息进行融合来提供载体的运动信息已被广泛应用. 但由于卫星定位信号易受干扰或欺骗, 甚至信号转发源被摧毁, 不能够长期提供稳定可靠的定位信息, 在军用和民用领域中尚不能完全依赖卫星定位来辅助惯性导航实现飞行器精确导航定位. 因此, 发展具有自主性强和较高精度的地形辅助导航技术已成为提高飞机、巡航导弹等武器系统战斗力的有效手段之一^[1,2].

经过近 60 年的发展, 已经发展成熟的地形辅助导航方法有两类: 一类是基于相关运算的地形轮廓匹配算法, 例如传统的地形轮廓匹配 (terrain contour matching, 简记为 TERCOM) 算法^[3,4]; 另一类是基于扩展 Kalman 滤波的地形辅助惯性导航算法 (sandia inertial terrain aided navigation, 简记为 SITAN)^[5,6]. 虽然这些方法已成功应用在许多型号的飞机和精确制导武器上, 而且 SITAN 算法

比 TERCOM 算法具有更好的实时性. 但在实际应用中, 两种算法各有优缺点. TERCOM 算法对系统传感器误差有严格要求, 当传感器误差过大时系统可靠性降低; 由于地形数据具有较高的非线性特性, SITAN 算法需要对地形函数进行线性化, 在初始位置误差大以及地形梯度变化剧烈区域内容易造成滤波发散. 因此, SITAN 算法和 TERCOM 算法的鲁棒性依然是需要重点解决的核心问题. 为提高地形辅助导航系统的鲁棒性, 文献 [7] 提出的基于概率数据关联滤波器 (probabilistic data association filter, 简记为 PDAF) 的地形匹配算法能够遏制速度误差对系统匹配概率的影响, 性能优于传统的 TERCOM 算法, 但对系统测量噪声较为敏感, 导致系统的鲁棒性不高. 文献 [6] 提出的 HELI/SITAN 算法采用多模自适应估计技术 (multi mode adaptive estimation, 简记为 MMAE), 保证了在初始位置误差大的情况下也能得到可靠的位置估计值, 定位圆概率误差小于 50 m, 并且降低了伪定位率, 但其采用 47 个单状态滤波器进行复位计算, 计算量较大. 文献 [8] 提出了局部可观测性理论, 从理论上分析了地形粗糙度与地形辅助导航系统可靠性间

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61039003) 和中国航空基础科学基金 (批准号: 20090818004, 20100851018) 资助的课题.

† E-mail: flylong@buaa.edu.cn

的关系, 定性和定量地分析了地形辅助惯性导航的修正作用. 文献 [9] 在 SITAN 算法的基础上发展了北航惯性地形辅助导航算法 (BUAA inertial terrain aided navigation algorithm, 简记为 BITAN), 使系统的定位精度达到 50.3 m (圆概率误差), 进而又提出了 BITAN 的改进算法 BITAN II 算法, 使定位精度达到 39.5 m, 并使伪定位率由 2.19% 降至 1.56%^[10]. 无论是传统的 SITAN 算法还是改进后的 BITAN 算法, 其实质都是将非线性的系统状态方程和观测方程进行线性化处理, 通过扩展 Kalman 滤波器来处理测量的地形高程与预期的地形高程之差 δh , 以连续估计并修正惯导系统的位置与速度误差, 因此只适用于滤波误差和预测误差很小的情况. 然而由于地形特征是非线性的, 当系统具有较强的非线性或初始误差较大时, 无法保证扩展 Kalman 滤波给出的估计为系统最优解, 而且当初始位置误差较大或者在地形斜率变化剧烈的区域中会使滤波发散^[11]. 为解决此问题, 文献 [11] 提出了一种组合地形辅助导航系统 (combined terrain aided navigation system, 简记为 CTAN), 利用相关算法和并行卡尔曼滤波器算法分别计算载体的位置信息, 通过组合二者的结果来修正由测量噪声和地图误差引起的估计误差. 英国不列颠宇航公司 (BAE) 将 SITAN 系统和 TERCOM 系统相结合, 开发了地形剖面匹配系统 (terrain profile matching, 简记为 TERPROM), 应用在多个国家多种型号的飞机上^[12]. 但文献 [12] 主要介绍了 TERPROM 系统的功能, 没有详细介绍其实现过程. 文献 [13] 介绍了一种将 TERCOM 算法和 SITAN 算法相结合的适合航空用的地形匹配算法.

本文在修正文献 [13] 中错误的基础上, 提出一种鲁棒惯性/地形辅助惯性导航算法, 将传统 TERCOM 算法与改进的 BITAN II 算法相结合, 在搜索模式下采用 TERCOM 算法, 保证在初始误差大的情况下能够快速定位, 在跟踪模式下采用扩展 Kalman 滤波实现地形辅助惯性导航, 提高系统的鲁棒性.

2 传统的地形匹配算法

2.1 地形轮廓匹配算法 (TERCOM)

TERCOM 通过对测得航迹下方的地形高程序列与机载数字基准图数据进行相关分析, 确定飞行器的估计位置, 其典型算法有三种^[14]:

交叉相关 (COR) 算法

$$J_{\text{COR}} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L T_A(i) \cdot T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y), \quad (1)$$

平均绝对差 (MAD) 算法

$$J_{\text{MAD}} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |T_A(i) - T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y)|, \quad (2)$$

均方差 (MSD) 算法

$$J_{\text{MSD}} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [T_A(i) - T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y)]^2, \quad (3)$$

式中, L 为采样地形轮廓长度, $T_A(i)$ 为计算获得的第 i 个地形高程值 ($i = 1, 2, \dots, L$), $T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y)$ 为对应的第 i 个数字地图高程值, $D(T_A)$ 表示地形高度序列 $T_A(i)$ 的方差, x, y 为所选进行匹配的网格中心坐标, τ_x, τ_y 为飞行器在相邻两次采样之间飞行器在两坐标轴上飞行经过的距离, 若飞行器匀速飞行, 则二者为常值. 最佳定位位置使 J_{COR} 最大, J_{MAD} 和 J_{MSD} 最小.

2.2 BITAN II 算法

BITAN II 算法是通过扩展 Kalman 滤波器来处理测量的地形高程与预期的地形高程之差 δh , 以连续估计并修正惯导系统的位置与速度误差. BITAN II 算法由三种工作模式及模式转换控制逻辑组成, 即搜索模式、跟踪模式、丢失模式以及三种模式转换控制逻辑^[10].

2.2.1 搜索模式

在搜索模式下, 采用单状态并行卡尔曼滤波器阵列对飞行器的实际位置进行搜索, 其数学模型为^[10]

$$X_{j,k+1} = X_{j,k} + T\omega_k, \quad (4a)$$

$$Z = \hat{h}_{r_j} - \tilde{h}_{r_j}, \quad (4b)$$

式中, $X_{j,k}$ 为 k 时刻第 j 个子滤波器的状态估计值, T 为采样周期, ω_k 为高度通道系统噪声, \hat{h}_{r_j} 为地形高度估计值, \tilde{h}_{r_j} 为地形高度测量值.

计算每个子滤波器的平滑加权残差平方 (SWRS) 为^[10]

$$WRS_{j,k} = \frac{(Z_{j,k} - X_{j,k})^2}{P_{j,k} + R}, \quad (5)$$

$$SWRS_{j,k} = \alpha WRS_{j,k} + (1 - \alpha) SWRS_{j,k}, \quad (6)$$

式中, $Z_{j,k}$ 和 $X_{j,k}$ 分别为第 j 个子滤波器在 k 时刻的观测值和状态值, $WRS_{j,k}$ 为归一化残差平方,

$P_{j,k}$ 和 R 分别为系统的状态方差阵和测量噪声方差阵, α 为加权因子. 将 $SWRS$ 作为子滤波器匹配程度好坏的指标来确定定位判据, 判断是否进入跟踪模式.

2.2.2 跟踪模式

当获得飞行器的实际位置后, 系统由搜索模式转入跟踪模式. 跟踪模式采用 5 状态 Kalman 滤波器实时完成地形匹配计算, 并对惯导系统误差进行修正. BITAN II 算法跟踪模式的数学模型为^[10]

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \mathbf{X}_k + \Gamma_k \omega_k, \quad (7)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H} \mathbf{X} + \gamma, \quad (8)$$

式中, $\mathbf{X} = [\delta x, \delta y, \delta h, \delta v_x, \delta v_y]^T$ 为状态变量, $\Phi_{k+1,k}$ 为一步状态转移矩阵, Γ_k 为系统噪声矩阵, $\mathbf{H} = [-h_x \quad -h_y \quad 1 \quad 0 \quad 0]$ 为量测矩阵, δx 为 x 方向的位置误差, δy 为 y 方向的位置误差, δh 为高度误差, δv_x 和 δv_y 分别为 x 方向和 y 方向的速度误差, h_x 和 h_y 分别为 x 和 y 方向上的地形斜率, γ 为测量噪声.

文献 [10] 设计了适用于起伏较大地形和平坦地形的可靠定位准则, 并设计了防止伪定位的准则以及从跟踪模式转入搜索模式的准则.

BITAN II 算法的跟踪工作模式对初始定位精度有较高要求, 当 BITAN II 算法的初始定位误差较小时, BITAN II 算法的匹配精度和运算量都比较理想, 而且在测量地形高程数据为低信噪比时, 导航定位精度明显优于 TERCOM 算法. 然而 BITAN II 算法是传统 SITAN 算法的改进算法, 当地形高程变化过于剧烈、不能满足线性化假设时, 定位精度将下降; 当初始位置误差较大时, 在地形线性化时会造成拟合区域线性化误差增大, 无法满足卡尔曼滤波对局部线性化的要求, 使得滤波发散, 导致 BITAN II 算法无法实现正确匹配定位. 因此在初始位置误差大以及测量噪声较大时, 实现准确定位可提高系统鲁棒性.

3 鲁棒惯性/地形辅助导航算法

3.1 算法工作原理

TERCOM 算法在较大初始位置误差时可以获得正确的匹配位置, 但不适用于飞行器机动飞行. BITAN II 算法允许飞行器机动飞行且能够实时对惯导系统误差进行修正, 但当地形信息是局部不可观测时, 系统会出现伪定位. 综合 TERCOM 算法

和 BITAN II 算法的优点, 采用 TERCOM 算法构造搜索模式算法, 并利用 BITAN II 算法的跟踪模式算法, 构成一个具有鲁棒性的惯导/地形辅助导航算法. 算法的工作流程如图 1 所示.

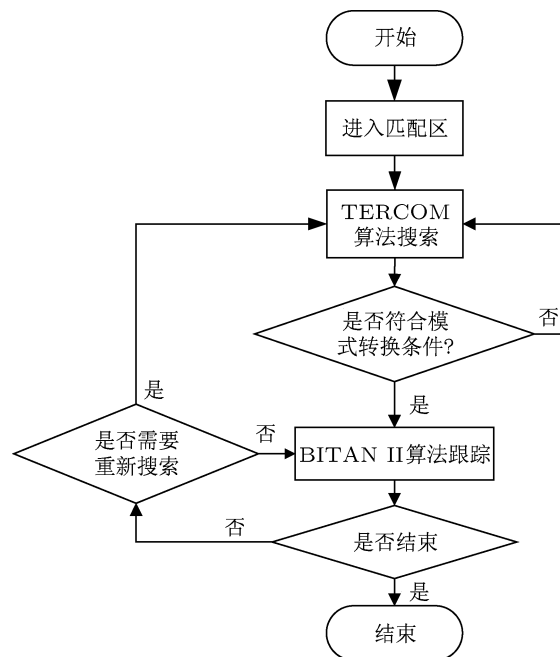


图 1 鲁棒惯性地形辅助导航算法流程图

3.2 搜索模式

TERCOM 算法中的 MAD, MSD 和 COR 算法都属于统计决策类算法, MAD 和 MSD 算法属于距离决策类算法, 而 COR 算法属于形状决策类算法. 当测量数据没有误差时, 两类算法会定位在同一位置处; 当测量存在误差时, 且误差尚未淹没地形起伏程度时, 两类算法的匹配位置会有差别. 利用两类算法的特点, 构造一个联合概率事件, 而且两类算法是一个联合概率事件中的理想结果, 两类算法同时定位在一个误差范围内的概率是两类算法定位概率的乘积, 因此两类算法同时定位于一个相同的错误位置是一种小概率事件, 即对于相同的测量数据, 两类算法都匹配于同一位置, 则认为匹配是可靠的^[13]. 因此, 利用这一理论, 采用三种算法分别计算匹配信息, 然后进行一致表决, 进而确定匹配位置的可靠性, 完成初始位置误差大的情况下惯性/地形辅助导航系统的快速搜索定位和跟踪模式转换.

进入匹配区后, 地形匹配系统进入搜索模式. 在搜索模式下, 首先利用 COR, MAD, MSD 算法分别进行三次地形匹配, 然后根据这三次匹配结果进

行一致性表决,连续三次表决通过方可进入跟踪模式.一致性表决的准则是:两类算法的定位误差都在1个网格内,则认为一致性表决通过;三次连续匹配定位的误差都在规定的误差范围内,则认为定位是可靠的.为了保证每次表决的独立性,表决时各次匹配定位间隔必须大于连续匹配时的匹配间隔,保证每次匹配时地形轮廓是无关的^[13].

3.3 模式转换

惯性/地形辅助导航系统的搜索模式结束后,转入跟踪模式.在模式转换过程中,根据惯导的速度误差在短时间内漂移很小的特性,利用惯导输出的位置信息序列进一步表决,保证系统的鲁棒性和匹配的精确性,具体步骤为^[13]:

1) 记录搜索模式下连续三次通过表决的匹配结果和时间,并以第三次匹配的匹配结果作为系统跟踪算法的初始位置;

2) 根据系统跟踪算法计算出当前时刻的匹配位置,经度 $\lambda(k)$ 和纬度 $L(k)$;

3) 根据前五次匹配定位结果,推算出5个当前时刻的位置估计值,经度 $\hat{\lambda}_{(k-n)}(k)$ 和纬度 $\hat{L}_{(k-n)}(k)(n=1,2,\dots,5)$,其计算公式为

$$\hat{\lambda}_{(k-n)}(k) = \lambda(k-n) + \frac{\int_{k-n}^k \bar{V}_E dt}{R_N \cos(L_{(k-n)}(k))}, \quad (9a)$$

$$\hat{L}_{(k-n)}(k) = L(k-n) + \frac{\int_{k-n}^k \bar{V}_N dt}{R_M}, \quad (9b)$$

式中 \bar{V}_E, \bar{V}_N 分别为惯导东向和北向从 $k-n$ 到 k 时刻的平均速度, R_M, R_N 分别为子午圈和卯酉圈半径, $n=1,2,\dots,5$;

4) 将系统跟踪算法解算出来的当前时刻匹配位置与由(9)式推算出来的5个当前时刻估计位置分别相减,当误差小于阈值的次数大于三次时,则认为系统跟踪算法解算出来的当前时刻匹配位置 $\lambda(k)$ 和 $L(k)$ 是正确的;否则,视当前匹配结果无效,放弃此次匹配结果;

5) 若连续五次匹配结果无效,则重新搜索;若连续五次匹配结果有效,则由搜索模式转入跟踪模式;未完成连续五次匹配时,则返回第2)步;

6) 在跟踪一段时间后,惯导累积了较大的误差,为防止系统跟踪算法滤波发散,强制地形匹配系统重新进入搜索模式,使搜索模式与跟踪模式交替进行.

4 仿真实验

在处理器为 Intel Pentium 2.0 Hz,内存为 2.0 G 的计算机上,利用 Matlab7.1 进行仿真试验.

4.1 仿真实验 1

4.1.1 仿真条件 1 及其结果

利用实际地图进行仿真验证,地图大小为 1800 m×1200 m,地图分辨率为 100 m/网格.东向和北向的初始位置误差均为 800 m,速度误差为 1 m/s,匹配周期为 0.8 s,高度表噪声标准差从 3 m 变到 30 m.

采用 BITAN II 和 RBITAN 算法进行仿真,不同高度表噪声情况下两种搜索算法准确定位所需要的搜索次数如表 1 所示.在 4600 m×4600 m 的搜索区内,每一次搜索,BITAN II 用时 0.031 s(计算机系统时间),RBITAN 算法用时 0.281 s,高度表噪声标准差分别为 5 m, 8 m 和 30 m 时两种算法定位结果如图 2 所示.为了区分搜索阶段和跟踪阶段,两种算法在搜索过程中不修正惯导系统误差.

表 1 高度表噪声对两种搜索算法耗时的影响

高度表噪声 标准差/m	BITAN II 算法 搜索次数	RBITAN 算法 搜索次数
3	14	5
5	17	5
6	21	5
8	33	5
10	80	5
11	531	5
12—30	无法定位	5

通过对表 1 和图 2 进行分析,在高度表噪声不超过 8 m 时,两种算法的定位误差都在 100 m 以内,而且在搜索模式下 BITAN II 算法的耗时(0.031 s/次×33 次=1.023 s)比 RBITAN 算法(0.281 s/次×5 次=1.405 m)少;当高度表噪声超过 8 m 时,RBITAN 算法搜索模式明显比 BITAN II 算法快,而且当高度表噪声超过 11 m 时,BITAN II 算法无法完成搜索定位,而 RBITAN 算法仍然能够实现搜索定位.这是因为在搜索模式下,BITAN II 算法采用的单状态并行卡尔曼滤波器阵列是基于单次观测值,而且对以往观测值进行加权,并通过残差的大小来构造滤波器收敛准则.残差可分为两部分,一部分由定位漂移引起的残差,另一部分为测量随机噪声引起的.高度表随机噪声较大

时导致残差中由定位误差引起的残差所占比例减小,进而使得平滑加权残差平方 $SWRS$ 的大小不能真实反映位置偏差,导致 BITAN II 算法无法实现搜索定位. 而 RBITAN 算法采用的 TERCOM 算法是基于多次测量值构成的高度剖面进行匹配,而且利用 MAD 算法、MSD 算法和 COR 算法进行多次表决来构造搜索模式准确定位准则,只要高度表噪声未达到改变高度剖面形状时都能够准确定位.

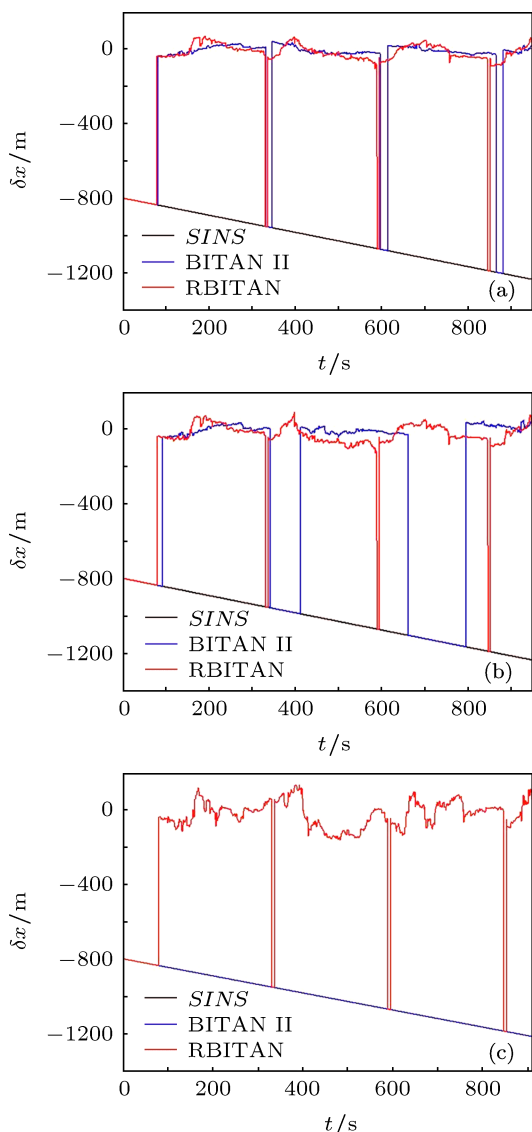


图2 初始位置误差 800 m 时 x 方向的位置误差 (a) 高度表误差为 5 m; (b) 高度表误差为 8 m; (c) 高度表误差为 30 m

4.1.2 仿真条件 2 及其结果

在仿真条件 1 的基础上,将初始位置误差设为 2500 m,高度表噪声标准差分别取 5 m 和 11 m 时,采用 BITAN II 和 RBITAN 算法进行仿真的结

果如图 3 所示.

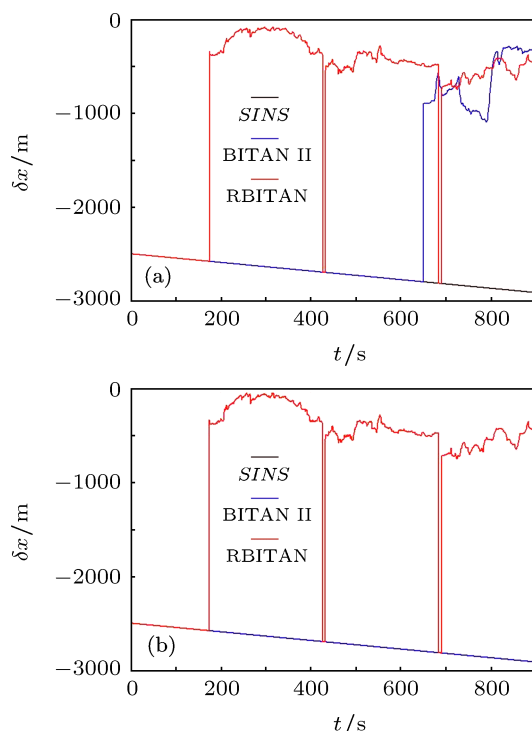


图3 初始位置误差 2500 m 时 x 方向的位置误差 (a) 高度表误差为 5 m; (b) 高度表误差为 11 m

通过对图 3 进行分析,在初始位置误差大的情况下,BITAN II 算法的搜索模式会出现错误定位,而 RBITAN 算法的定位误差在 500 m 以内.这是因为在初始位置误差大的情况下,使得平滑加权残差平方 $SWRS$ 的大小不能真实地反映位置的偏差,导致系统搜索模式出现较大的定位误差,较大的搜索位置误差会使跟踪阶段地形线性化的区域变大,使得线性化后的地形特征不满足局部可观测理论,导致系统定位错误.而 RBITAN 算法只要初始位置误差包含于搜索区内,而且高度表噪声未达到改变高度剖面形状时都能够实现定位.

4.2 仿真实验 2

利用实际机载试飞数据进行实验测试,惯导、气压高度表、雷达高度表以及差分 GPS 数据的采样频率为 50 Hz,实际数字地图大小为 55000 m \times 25000 m,以差分 GPS 指示位置为真实位置(轨迹).采用 BITAN II 和 RBITAN 算法进行离线实验验证结果如图 4 所示.

从图 4 中可以看出,在搜索模式下,RBITAN 算法比 BITAN II 算法收敛快,而且 RBITAN 算法的定位误差在 100 m 以内,而 BITAN II 算法的定位误

差达到 200 m, 进一步验证了 RBITAN 算法的性能.

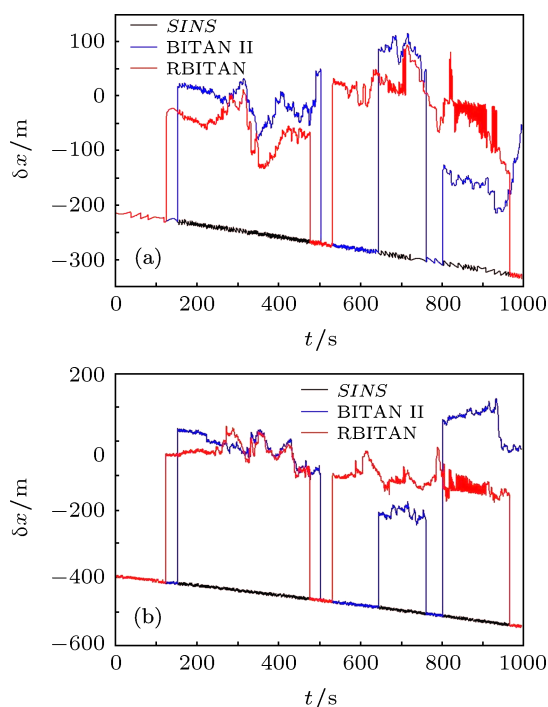


图 4 实际试飞数据的位置误差 (a) x 方向的位置误差; (b) y 方向的位置误差

5 结论

本文针对 TERCOM 算法和 BITAN II 算法的优点, 将二者进行组合, 发展了鲁棒性强的 RBITAN

算法. 该算法在搜索模式下采用 TERCOM 算法, 并利用经典的 MAD, MSD 和 COR 算法设计了一致性表决搜索策略以及模式转换策略, 在跟踪模式下采用扩展 Kalman 滤波实现惯性/地形辅助导航. 利用仿真数据和实际试飞数据对 BITAN II 算法和 RBITAN 算法进行了仿真验证, 通过对仿真结果进行分析可以得出以下结论.

1) RBITAN 算法在高度表测量噪声未改变高度剖面形状时, 系统均能准确定位; 而 BITAN II 在高度表测量随机噪声导致的滤波残差大于位置漂移引起的滤波残差时, 系统就无法准确定位.

2) RBITAN 算法在有较大位置误差时可准确定位, 而 BITAN II 算法在较大位置误差时无法准确定位, 甚至出现错误定位.

3) RBITAN 算法在搜索模式下利用统计决策方法作为系统定位的准则, 鲁棒性增强.

总之, 通过理论分析和仿真验证, RBITAN 算法对高度传感器精度要求低, 使用范围广, 适合飞行器机动飞行的情况下做连续匹配. 但由于 RBITAN 算法在跟踪模式下依然采用对地形线性化后通过扩展 Kalman 滤波实现系统状态估计, 当由地形信息构成的局部可观测矩阵是不可观测时, 系统无法完成定位. 因此, 为进一步提高系统的鲁棒性, 在本文工作的基础上还需进一步研究基于非线性最优估计的地形辅助惯性导航算法.

- [1] Qiu Z H 1999 *Navigation* **3** 1 (in Chinese) [邱致和 1999 导航 **3** 1]
- [2] Vadlamani A K *Ph. D. Dissertation* (Ohio: Ohio University)
- [3] Golden J P 1980 *SPIE* **238** 10
- [4] Priestley N 1999 *IEEE Position Location and Navigation Symposium* (USA: IEEE) p482
- [5] Boozer D D, Lau M K, Fellerhoff J R 1985 *IEEE National Aerospace and Electronics Conference* (USA: IEEE) p351
- [6] Jeff H 1990 *IEEE Position Location and Navigation Symposium* (USA: IEEE) p616
- [7] Feng Q T 2004 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [冯庆堂 2004 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [8] Chen Z 1991 *IEEE Transaction on Industrial Electronics* **36** 491
- [9] Chen Z, Yu P J, Yang H 1993 *Technology Reference of Chinese Aviation* 1 (in Chinese) [陈哲, 余培军, 杨慧 1993 中国航空科技文献 1]
- [10] Pei Y B, Chen Z 1996 *IEEE Industrial Electronics, Control, and Instrumentation* (USA: IEEE) p1675
- [11] Xie J C, Zhao R C, Xia R 2007 *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments* (USA: IEEE) p145
- [12] Cowie M, Wilkinson N, Powlesland R 2008 *IEEE Location and Navigation Symposium* (USA: IEEE) p1219
- [13] Wu K, Zhao L 2010 *Piezoelectrics and Acoustooptics* **32** 754 (in Chinese) [吴康, 赵龙 2010 压电与声光 **32** 754]
- [14] Yuan X, Yu J X, Chen Z 1993 *Navigation System* (Beijing: Aviation Industry Press) p205 (in Chinese) [袁信, 俞济祥, 陈哲 1993 导航系统 (北京: 航空工业出版社) 第 205 页]

Robust inertial terrain aided navigation algorithm*

Zhao Long[†]

(*Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 20 July 2011; revised manuscript received 23 September 2011)

Abstract

The traditional terrain contour matching (TERCOM) algorithm has worse reliability when velocity error or course error is larger. The extend Kalman filtering (EKF) algorithm based BUAA inertial terrain aided navigation (BITAN) algorithm fails to correctly position, leading to a decline of robustness when large initial position error or altimeter noise error occurs. In this paper, we introduce a Robust BUAA inertial terrain aided navigation (RBITAN) algorithm, which is an improved algorithm of BITAN. In the RBITAN algorithm a searching mode approach is designed by the statistic properties of mean absolute difference algorithm, mean square difference algorithm and cross correlation algorithm. The RBITAN gathers the advantages of both the TERCOM algorithm and the BITAN algorithm, and it adopts EKF based BITAN algorithm as the tracking approach. The algorithm is verified by both real digital altitude model and flight-test data. Compared with the BITAN algorithm, the RBITAN algorithm is robust, for it can achieve accurate positioning and tolerate large initial position error or altimeter noise error.

Keywords: geophysical field navigation, traditional terrain contour matching, BUAA inertial terrain aided navigation, robustness

PACS: 43.60.Jn, 84.30.Vn, 91.10.Fc

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61039003) and the Aeronautical Science Foundation of China (Grant Nos. 20090818004, 20100851018).

[†] E-mail: flylong@buaa.edu.cn