

地形辅助导航系统中的数字地图误差模型辨识*

王 巍 陈 哲

(北京航空航天大学自动控制系·北京, 100083)

摘要: 地形辅助导航系统在引入量测时便引入了与数字地图有关的误差, 含数字地图制作误差及地形随机线性化误差两类. 本文在建立系统误差模型的基础上研究了两类误差产生的机理、影响误差的因素、样本获取的手段及误差模型辨识等问题, 并采用扩维系统仿真的方法研究了误差的平稳特性、白度、模型参数等特性及其对系统精度的影响, 获得了对数字地图误差模型的基本估计.

关键词: 地形辅助导航; 卡尔曼滤波; 地形随机线性化; 模型辨识

1 前 言

地形辅助导航(TAN)技术利用数字地图数据对惯性导航系统(INS)的修正作用来提高导航精度, 与数字地图有关的误差是 TAN 系统中最关键的误差源之一. 对于采用推广的递推卡尔曼滤波算法的 TAN 系统, 现有文献^[1,2]均将数字地图误差简单地当作白噪声处理, 而对其误差机理和影响未作深入分析和处理. 本文对其产生机理、误差性质及对系统精度的影响等进行了理论与仿真研究, 得出了具有理论与应用价值的结论.

2 系统模型与数字地图误差

数字高程地图(DEM)简称数字地图. TAN 系统根据惯导系统输出的位置可在数字地图上找到相应的地形高度, 惯导系统输出的绝对高度与地形高度之差为相对高度的估计值, 它与无线电高度表实测相对高度之差就是系统卡尔曼滤波的量测值. 经滤波可得导航误差的最佳估值, 用以修正惯导系统输出, 获得最佳导航状态.

设 X 为 INS 的状态向量, 记为

$$X = [x \quad y \quad h \quad v_x \quad v_y]^T. \quad (1)$$

(1)式中 x, y, h 分别为飞行器沿东北天方向的三维位置, v_x, v_y 为东北方向速度, 其中 h 为绝对高度. 采用输出校正方式, 卡尔曼滤波器应对 INS 状态的误差作出最佳估计 $\delta\hat{x}$, $x - \delta\hat{x}$ 即 TAN 系统对 INS 输出校正后的最佳估计状态. 同时考虑实时性和精度, 惯导运动方程简化为

$$\begin{cases} \delta\dot{x} = \delta v_x; & \delta\dot{y} = \delta v_y; \\ \delta\dot{h} = 0; & \delta\dot{v}_x = 0; & \delta\dot{v}_y = 0. \end{cases} \quad (2)$$

定义 $\delta x = [\delta x \quad \delta y \quad \delta h \quad \delta v_x \quad \delta v_y]^T$, 对滤波周期 T 离散化的 TAN 系统误差状态方程为

$$\delta x(k+1) = F \cdot \delta x(k) + w(k). \quad (3)$$

式中

* 国防科工委《国防科技应用、基础研究重点项目计划》资助项目.

本文于 1995 年 3 月 23 日, 1995 年 10 月 30 日收到修改稿.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

以下建立系统量测方程. 设 \hat{x} 为 INS 对 x 的输出值, TAN 系统根据 (\hat{x}, \hat{y}) 从 DEM 中查出地形高度 h_d , 此时真实地形高度为 $h_t(\hat{x}, \hat{y})$, 则有

$$h_d(\hat{x}, \hat{y}) = h_t(\hat{x}, \hat{y}) + m_d. \quad (4)$$

式中 m_d 为数字地图制作误差. 估计相对高度为

$$\hat{h}_r = \hat{h} - h_d(\hat{x}, \hat{y}). \quad (5)$$

从无线电高度表引入的实测相对高度为

$$\tilde{h}_r(x, y) = h_r(x, y) + m_r. \quad (6)$$

(6)式中 h_r 为飞行器真实相对高度, m_r 为无线电高度表量测噪声.

设 z 为 TAN 系统的一维测量值, 则

$$\begin{aligned} z &= \hat{h}_r - \tilde{h}_r = \hat{h} - h_d(\hat{x}, \hat{y}) - \tilde{h}_r(x, y) \\ &= h + \delta h - h_t(\hat{x}, \hat{y}) - h_r - m_d - m_r. \end{aligned} \quad (7)$$

地形随机线性化即在飞行器真实位置 (x, y) 处, 用平面方程 $f(x, y)$ 近似地形曲面方程 $h_t(x, y)$, 如图 1 所示. 图中 $f(x, y)$ 是以一定拟合规则在一定拟合区域 Ω 内得出的.

记 $h_x = \frac{\partial f}{\partial x}, h_y = \frac{\partial f}{\partial y}$, 则

$$f(\hat{x}, \hat{y}) = f(x, y) + h_x \delta x + h_y \delta y. \quad (9)$$

由图 1 可知:

$$h_t(x, y) = f(x, y) + m_1, \quad (10)$$

$$h_t(\hat{x}, \hat{y}) = f(\hat{x}, \hat{y}) + m_2. \quad (11)$$

这里 m_1 为地形随机线性化原理性误差, m_2 为方法性误差. m_1 和 m_2 均为 $f(x, y)$ 代替 $h_t(x, y)$ 所引起的误差, m_1 是真实位置处的线性化误差, m_2 为 INS 预测位置处的线性化误差, 二者机理、性质相同, 合称为地形随机线性化误差 m_t .

考虑到 $h - h_t(x, y) - h_r = 0$, 由(7)~(11)式则

$$z = -h_x \delta x - h_y \delta y + \delta h - m_1 - m_2 - m_d - m_r. \quad (12)$$

即有系统量测方程

$$z_k = Hx(k) + m_k. \quad (13)$$

式中 $m_k = -m_1 - m_2 - m_d - m_r$, $H = [-h_x \quad -h_y \quad 1 \quad 0 \quad 0]$.

综上所述:

1) 数字地图对 TAN 系统的影响通过量测方程引入, 其误差成为量测噪声的一部分.

2) 与数字地图有关的误差源有两类, 即数字地图制作误差和地形随机线性化误差. 后者又可分为原理性误差和方法性误差, 其机理相同, 可通过研究方法性误差得到线性化误差

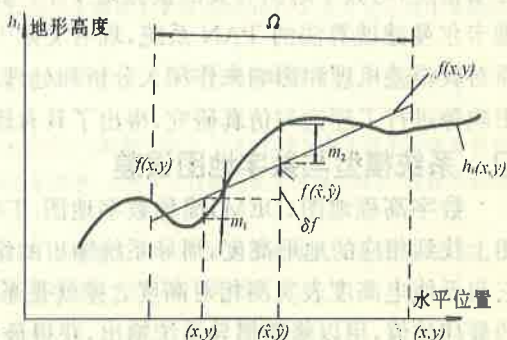


图 1 地形随机线性化机理

特性.

3) (3)式、(13)式为 TAN 系统模型,是本文分析和仿真的依据.

3 数字地图误差模型辨识

3.1 数字地图制作误差模型研究

本文根据 DEM 地图的制作误差获得样本数据. 在某地图制作过程中,对地图上连线的 61 个网格点进行了依次连续循环 10 次的重复采样测量,测得的 610 个数据序列的误差可反映制作误差的基本性质. 该组在几何上等间距的测量序列中每一网格点测量值的均值可视为真值,从而分离出几何误差序列作为样本. 该误差序列如图 2 所示,其均值 $\mu = -1.1006 \times 10^{-6}$,标准差 $\sigma = 1.0435$ 米. 根据制作误差机理和飞行航线的随机性,该样本序列可代表沿数字地图各方向各网格点序列制作误差的恶劣情况(其相关性最强).

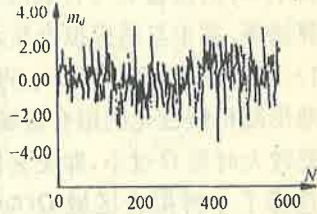


图 2 数字地图制作误差样本

表 1 数字地图制作误差模型

模型阶次	模型参数($p; q$)	拟合残差	置信度 F	$F_{0.95}$
ARMA(1,0)	0.53150	0.23903	-29.268	3.00
ARMA(0,1)	1.13993	—	—	—
ARMA(1,1)	0.75330; 0.31867	0.26845	4.490	3.00
ARMA(1,2)	0.67633; 0.23344, -0.05861	0.26451	-0.046	3.84
ARMA(2,0)	0.44417, 0.16430	0.26440	-0.298	3.84
ARMA(2,1)	0.49189, 0.13894; 0.04905	0.26454	0.023	3.84
ARMA(2,2)	0.70632, -0.02259; 0.26342, -0.06814	0.26453	—	—

本文采用下列步骤建立随机序列模型:

- ①采用参数法和非参数法进行平稳性检验;
- ②求随机序列的自相关函数;
- ③根据自相关函数值采用矩估计法建立 ARMA 模型;
- ④采用逆函数法估计模型的拟合残差;
- ⑤采用 F 检验进行置信度检验.

建模结果表明该序列为平稳随机序列,其模型参数和拟合残差及置信度见表 1,根据拟合残差最小、模型阶次从简且置信度不大于 $F_{0.95}$ 的原则可确定该模型为 ARMA(1,0)或 ARMA(2,0).

3.2 地形随机线性化误差模型研究

由(11)式有 $m_2 = h_r(\hat{x}, \hat{y}) - f(\hat{x}, \hat{y})$,可通过 TAN 系统沿不同航线的飞行仿真,在每个滤波周期读取一次 $h_r(\hat{x}, \hat{y})$ 和线性化方程结果 $f(\hat{x}, \hat{y})$,从而获得方法性误差 m_2 的样本数据. 研究 m_2 即可获得 m_1 的特性.

系统仿真采用的地图为我国辽宁省某地,面积为 $1.27\text{km} \times 36.1\text{km}$,网格距离 d 为 100

米. 仿真初始条件为

$$\text{diag}P_0^{1/2} = [400\text{m} \quad 400\text{m} \quad 400\text{m} \quad 40\text{m/s} \quad 40\text{m/s}],$$

$$\text{diag}Q_0^{1/2} = [5.0\text{m} \quad 5.0\text{m} \quad 5.0\text{m} \quad 0.5\text{m/s} \quad 0.5\text{m/s}],$$

$$R_k^{1/2} = 20\text{m}.$$

影响 m_i 的因素有飞行航线、线性化方法、拟合技术及区域、滤波周期、系统噪声量级和滤波算法等. 其中自适应拟合技术将影响其平稳性, 其它诸因素将影响其大小.

1) 拟合技术与区域对 m_2 的影响.

地形随机线性化的拟合区域 Ω 的选择对 m_2 有相当影响, Ω 越小则 m_2 越小, 但当系统状态误差较大时则 Ω 过小, 即失去拟合意义, 即 (x, y) 值不在 Ω 内, 从而造成更大的系统误差. 本文选择了 4 种拟合区域 $\Omega(6\sigma_x \times 6\sigma_y)$: ① $\Omega_{\max}, \sigma_x = \sigma_y = 400\text{m}$; ② $\Omega_{\text{mean}}, \sigma_x = \sigma_y = 240\text{m}$; ③ $\Omega_{\min}, \sigma_x = \sigma_y = 80\text{m}$; ④ $\Omega_{\text{adp}}, \sigma_x \neq \sigma_y$, 根据实时位置误差自适应选择. 图 3 为拟合区域为 Ω_{adp} 和 Ω_{mean} 时 m_2 的典型数据. 经平稳性检验和建模可知, 固定拟合区域的 m_2 为平稳随机序列, 其方差随拟合区域增大而增大, 模型为 ARMA(1,0) 或 ARMA(2,0), 与 m_d 类似. 采用自适应拟合技术后, m_2 为非平稳序列, 经一个渐小过程后, 成为一个方差很小的平稳随机序列, 从而使系统位置误差经卡尔曼滤波后随之减小. 可见线性化误差的渐小性质正是系统精度提高的原因, 因此一般应采用自适应拟合技术进行随机线性化. 这里自适应的本质即根据卡尔曼滤波实时在线地估计出状态和状态协方差, 根据协方差量级实时确定随机线性化的最优有效信息量, 从而保证最佳估计精度(导航精度).

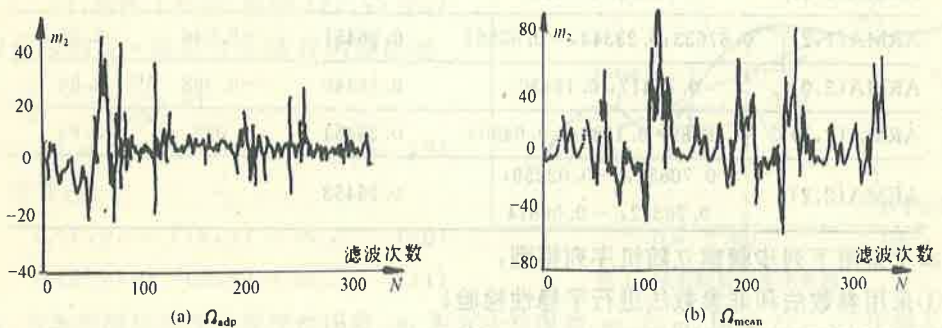


图 3 拟合区域 Ω_{adp} 和 Ω_{mean} 的 m_2 典型数据

2) 线性化方法、滤波周期和系统噪声等因素.

据系统量测方程的建立过程可知, 采用拟合偏差代数和为零原则的拟合方法, 当拟合区域相同时, 比以偏差平方和最小原则的方法所形成的 m_i 较小. 当 Ω 自适应选取时情况较复杂, 线性化方法对 m_i 影响是与 Ω 选取等因素综合作用的. 文献[4]给出了 6 种线性化方法的原理、算法及性能比较. 一般在搜索模式下采用九点拟合法, 跟踪模式下采用平均选点法.

TAN 系统滤波周期 T 增大将使系统精度变差, 使线性化误差的相关性降低, 误差量级也由于拟合区域自适应增大而增大. 表 2 为典型航线上拟合区域、线性化方法、滤波周期变化时 m_2 的标准差. 表中 LCK = 0, 1, 2 分别代表最小二乘拟合法, 九点拟合法, 平均选点法.

系统初始噪声较大时, 直接影响系统精度, 系统自适应地增大拟合区域, 使线性化误差增大. 系统噪声降低时, 影响 m_i 的其它因素起主导作用, 使系统噪声对 m_2 的影响减弱.

表 2 不同 T, Ω 和 TSL 方法 m_2 的标准差

Ω	LCK	T		
		0.5s	1.0s	2.0s
Ω_{\max}	0	25.3878	24.9888	24.2555
	1	20.0942	19.9015	19.1283
Ω_{mean}	0	19.4760	19.2007	18.4724
	1	14.6698	14.5128	13.8331
Ω_{\min}	0	11.3309	11.0932	10.4496
	1	8.2319	7.8528	7.3966
Ω_{sdp}	0	11.8012	12.2080	17.2709
	1	8.9323	7.5190	12.2012
	2	12.6884	13.1623	19.2709

4 数字地图误差对系统精度的影响

DEM 制作误差和固定拟合区域的地形线性化误差均为平稳随机过程 ARMA(1,0) 或 ARMA(2,0), 将其扩展为系统状态, 使系统扩维为经地图误差修正的 6 阶系统, 即

$$\delta x = [\delta x \quad \delta y \quad \delta h \quad \delta v_x \quad \delta v_y \quad e_r]^T,$$

$$w = [w_x \quad w_y \quad w_h \quad w_{v_x} \quad w_{v_y} \quad w_{e_r}]^T,$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \end{bmatrix},$$

$$H = [-h_x \quad -h_y \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad -1].$$

或 7 阶系统, 即

$$\delta x = [\delta x \quad \delta y \quad \delta h \quad \delta v_x \quad \delta v_y \quad e_r \quad e_c]^T,$$

$$w = [w_x \quad w_y \quad w_h \quad w_{v_x} \quad w_{v_y} \quad w_{e_r} \quad w_{e_c}]^T,$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H = [-h_x \quad -h_y \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad 0].$$

上述 a_1, a_2 为 ARMA 模型参数. 由此可通过扩维系统位置精度的仿真研究, 反映出误差对原

系统精度的影响. 自适应拟合的线性化误差影响可由 Ω_{\min} 时 m_2 来反映.

仿真的典型初始条件为

$$\text{diag}P_0^{1/2} = [400\text{m} \ 400\text{m} \ 400\text{m} \ 40\text{m/s} \ 40\text{m/s} \ 40\text{m}],$$

$$\text{diag}Q_0^{1/2} = [5.0\text{m} \ 5.0\text{m} \ 5.0\text{m} \ 0.5\text{m/s} \ 0.5\text{m/s} \ \sigma_e],$$

$$R_k^{1/2} = 20\text{m},$$

$$T = 1.0\text{s}.$$

7阶系统与之类似, σ_e 为误差模型拟合残差.

图4为典型扩维系统位置误差对比. 6阶系统精度略有提高(5%左右), 而由于系统复杂度增加较大, 7阶系统精度略有下降.

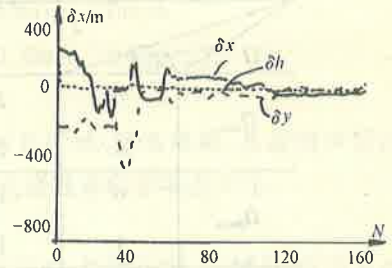
5 结 论

1) 数字地图对系统的影响通过量测方程引入, 其误差成为量测噪声的一部分.

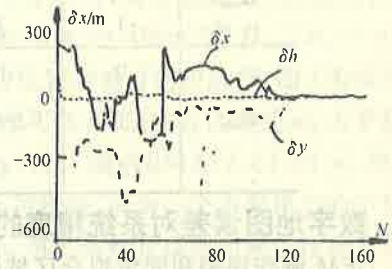
2) 与数字地图有关的误差源有两类, 即制作误差和地形随机线性化误差. 后者可分为原理性误差和方法性误差, 但其机理、特性相同.

3) 制作误差和固定拟合区域的线性化误差均为平稳随机过程, 模型为 ARMA(1,0) 或 ARMA(2,0). 采用自适应拟合的线性化误差为非平稳随机过程, 呈渐小趋势, 这正是系统精度提高的原因.

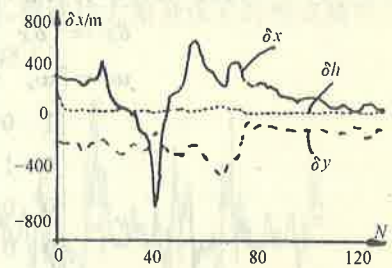
4) 目前数字地图制作水平已能保证制作误差量级很小, 采用自适应拟合技术的线性化误差也迅速减小和白化, 两类误差对系统精度影响较小. 为增加模型模糊性和适应性, 考虑系统简化和实时性需要, 将这些误差近似为白噪声处理是可行的.



(a) 五阶系统位置误差



(b) 六阶系统位置误差



(c) 七阶系统位置误差

图4 典型扩维系统位置误差对比

参 考 文 献

- [1] Andreas, R. D.. Continuous Kalman Updating of an Inertial Navigation System Using Terrain Measurements. NAECON'78, CH1336-7/78 IEEE, 1978, 1263-1270
- [2] Hostetler, L. D.. Nonlinear Kalman Filtering for Terrain-Aided Navigation. IEEE Trans. on Autom. Contr. 1983, AC-28(3): 315-323
- [3] Chen, Z., Yu, P. J., Yang, H.. BUAA Inertial Terrain Aided Navigation (BITAN) Algorithm. Proceeding of 18th Congress of the International Council of the Aeronautical, 1992, 645-654
- [4] Yu Peijun, Chen Zhe and Hung, J. C.. Performance Evaluation of Six Terrain Stochastic Linearization Techniques for TAN. NAECON 91, CH3007-2, IEEE, 1991, 382-388

Identification of DEM-Related Error Models in Terrain Aided Navigation

WANG Wei and CHEN Zhe

(Automatic Control Department, Beijing University of Aeronautics & Astronautics • Beijing, 100083, PRC)

Abstract: When the measurement is introduced into terrain aided navigation system, the DEM (Digital Elevation Map)-Related errors, including DEM-making error and stochastic linearization error, are introduced too. In this paper, based on the system modelling, following issues are discussed: ① the production mechanism of DEM-related errors; ② the factors influencing these errors; ③ the acquiriments of the error samples; ④ the identification of error models; etc.. By means of the augmented system simulations the smooth performance, whiteness, model parameter estimation, and their influences to system accuracy for these errors are explored. Therefore, the basic evaluation of DEM-related error model has been developed.

Key words: terrain-aided navigation; EKF; stochastic linearization; model identification

本文作者简介

王巍 1966年生, 1991年1月毕业于北京航空航天大学自动控制系, 获硕士学位. 现为中国运载火箭技术研究院北京控制仪器研究所工程师、博士生. 已发表学术论文 20 篇.

陈哲 1939年生. 北京航空航天大学教授. 1962年大学毕业, 1966年研究生毕业于北航自动控制系. 1966年留北航从事自动控制与导航领域的教学与科研工作. 兼任 IEEE 工业电子学会 (IES) 北京支会主席、IES 估计与辨识技术委员会主席等职. 至今已在国家级出版社出版专著 8 部, 在国内外学报及国内外会议上发表论文 50 余篇. 作为项目负责人主持科研项目十余项, 大部分已完成. 曾获国防工办暨部级一等奖一项, 部级三等奖一项, 以及其他奖励多项.