

一种基于机载无源北斗系统的改进卡尔曼滤波算法

陈玉峰¹, 罗继勋¹, 祝晓辉¹, 徐剑²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军驻江苏地区军事代表室, 江苏 南京 210016)

摘要:针对广泛研究的无源北斗定位系统,由于定位接收机本身不精确、环境噪声以及人为干扰等因素的影响,而导致相应的量测序列出现某些粗大的错误数据。这些数据在数量级上与正常量测值的差值较大,其差值超过了允许的误差范围,它们会明显影响卡尔曼滤波过程和降低系统的定位精度,造成系统的不稳定甚至滤波发散。提出了一种利用卡尔曼滤波剔除动态野值改进的算法,该方法提高了卡尔曼滤波器在机载环境下的跟踪能力,由于降低了状态方程的维数,滤波的实时性得到提高,经试飞数据验证,由该算法滤波后无源北斗系统的定位精度可以达到92 m,能够满足一般空中用户的需要。

关键词:无源定位;伪距;卡尔曼滤波;定位精度

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)03-0020-04

在信息化的今天,北斗卫星导航系统已成为核心基础设施。由于北斗定位卫星动态定位时,信号易丢失,数据采集误差大,定位精度不高。在动态数据处理中,需要提高卡尔曼滤波实时性和有效性。基于矩阵外积的快速滤波算法^[1],滤波实时性好,但精度有待提高。而把载体的高度信息加入量测方程的方法,改善了北斗定位精度^[2],但方程维数增多,计算时间长。基于计算复杂度和定位准确性考虑,本文提出一种改进的卡尔曼滤波算法,降低了状态方程的维数,滤波的实时性得到较大的提高,滤波器剔除野值后避免发散,使数据的有效性更好。

1 机载无源北斗数据模型的建立

Schwarz^[3]提出动态导航定位数据处理宜采用定常速度和定常加速度模型。因为在试飞过程中,飞机一般沿预订航线以巡航速度作匀速直线运动,但也会出现某些机动,如爬升、转弯,从而飞机产生一定加速度,所以试飞情况符合 Schwarz 提出的模型的要求。

2 离散卡尔曼方程的建立

为消除动态飞行中产生的误差,需要将真实的状态从各种随机干扰中的估计出来。在动态数据处理中,采用卡尔曼滤波方法来提取所需要的数据。

在站心坐标系下(N, E, U),分别对北向、东向、天向无源北斗数据进行滤波。以北向滤波为例,取无源北斗系统^[4-6]的北向状态变量为 $X = [x, \dot{x}, \ddot{x}]$, 式中 x 为北向的位置, \dot{x} 为北向速度, \ddot{x} 为北向加速度。建立的离散卡尔曼基本方程如下:

$$\begin{cases} \text{状态方程: } X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} W_{k-1} \\ \text{观测方程: } Y_k = H X_k + V_k \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2007-01-15

基金项目:国防预研基金资助项目(413220398)

作者简介:陈玉峰(1969-),男,哈尔滨人,博士生,主要从事无线电通信、卫星导航研究。E-mail:harbincyf@126.com

式中: $\Phi_{k,k-1}$ 为系统的状态转移矩阵; $\Gamma_{k,k-1}$ 为系统干扰噪声矩阵, W_{k-1} 和 V_k 是互不相关且均值为零的高斯白噪声系列。方差分别为 Q_k 和 R_k 。

$$\text{北向卡尔曼滤波时: } \Phi, \Gamma, H \text{ 确定为 } \Phi = \begin{pmatrix} 1 & T & 0.5T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \Gamma = \left[\frac{T^3}{6}, \frac{T^2}{2}, T \right]^T, H = [1, 0, 0]^T, \text{ 矩阵 } \Phi, \Gamma, H$$

中 T 为数据采样间隔, 北斗数据采样间隔 T 为 0.125 s。

整个滤波过程包括预报与量测, 计算公式汇总如下:

$$\text{状态预测} \quad \hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (2)$$

$$\text{预测协方差} \quad P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T \quad (3)$$

$$\text{状态滤波} \quad \hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k (Z_k - H \hat{X}_{k,k-1}) \quad (4)$$

$$\text{滤波增益} \quad K_k = P_{k,k-1} H^T (H P_{k,k-1} H^T + R_k)^{-1} \quad (5)$$

$$\text{状态预测} \quad P_k = (I - K_k H) P_{k,k-1} \quad (6)$$

式(2)和(3)称为预报方程, 它是根据所求参数 X 的动态变化规律, 从当前时刻的参数值预报下一时刻参数值 $\hat{X}_{k,k-1}$ 。由此可见: 如果式(1)建模误差较大, 不能正确反映参数的动态变化规律, 那么基于此模型预报会产生较大误差, 甚至使滤波器发散、结果完全失真。式(4)是状态滤波方程, 它是基于外部观测结果, 对参数预报值进行修正, 从而给出最优滤波值, 并估计相应结果的协方差阵。

卡尔曼滤波理论本身是完善的, 然而实际应用中却存在不少问题。卡尔曼本人在推导滤波方程时, 包括对统计模型要求, 即

$$\begin{cases} E(W_i) = 0, E(V_i) = 0, E(W_i V_i^T) = 0 \\ E(W_i W_j^T) = Q_i \delta_{ij}, E(V_i V_j^T) = R_i \delta_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

上式意味系统噪声和量测噪声必须是零均值白噪声, 实践中难以满足这个条件, 此时的统计模型中就存在误差噪声。

2.1 滤波数值不稳定原因及解决方法

由于机载北斗接收机计算时, 受到有效字长的限制, 使滤波算法在计算时易产生舍入误差积累, 误差协方差阵失去正定性或对称性, 从而出现数值计算的不稳定现象^[5]。为此, 在高动态北斗数据滤波过程中, 进行状态方程的降维处理, 把最初地球坐标系下一个九维的状态变量转化为站心坐标系下3个三维状态变量, 使得式(3)协方差阵的预报计算效率大大提高。

2.2 χ^2 检验法剔除野值

如前所述, 飞行中北斗接收机会出现随机干扰误差^[7], 从而导致相应的量测序列出现粗大的错误数据, 这些数据被称之为“野值”。这些“野值”会明显影响卡尔曼滤波过程和系统的定位精度, 造成系统的不稳定甚至滤波发散^[8]。因此, 在进行滤波过程中必须对北斗无源接收机采集的数据进行判断和识别, 找出并剔除野值点。 χ^2 检验法^[9-10]是基于卡尔曼滤波的残差进行检验的。残差的公式为: $\alpha(k) = Z(k) - H(k) \hat{X}_{k,k-1}$, $\alpha(k)$ 是零均值高斯白噪声, 其方差为: $P_a(k) = H(k) - P_{k|k-1} H^T(k) + R(k)$, 构造判别公式如下:

$$|\alpha(k)| > m \sqrt{P_a(k)} \quad (8)$$

式中, m 为常数, 若上式成立, 则判断该次测量值为野值, 否则为正常值。 m 越小, 对野值判断的要求就越严格, 在卡尔曼滤波的野值剔除中 m 值取为 4。在滤波和剔除野值后, 再进行北斗定位精度的分析。

3 实验结果及分析

根据试验方案确定, 试飞载机同时装有北斗和差分 GPS 接收机。分别对机载 GPS 和北斗数据进行采集, 这里只对北斗飞行数据定量分析, 以差分 GPS 输出数据为实际试飞测量基准数据。

3.1 北斗数据卡尔曼滤波前后坐标轨迹

图1、图2给出了飞机的 GPS/BD 卡尔曼滤波前后轨迹, 飞机在东经 99.67° - 99.8°, 北纬 40.35° - 40.41°; 东经 100.15° - 100.52°, 北纬 40.79° - 40.85° 等区域飞机处于大坡度转弯状态, 在对应时间段内有丢失卫星信号现象发生。北斗数据出现发散趋势(图1中水平黑线部分), 滤波后数据较平坦, 从图2可以较清

楚地看出,北斗数据与 GPS 数据重合较好。在整个飞行过程中,北斗接收机接收信号会受到飞机飞行姿态的影响,不同的飞行阶段飞机的姿态不同。下面针对不同的飞行阶段,进行了分段处理。

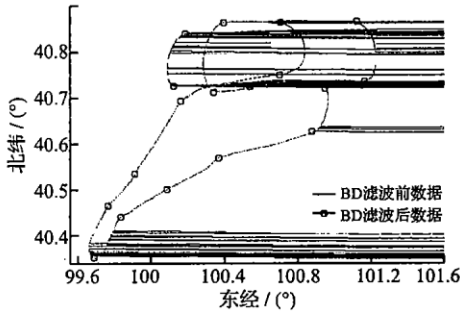


图 1 BD 数据卡尔曼滤波前后轨迹

Fig. 1 Orbit of Kalman filter before and after of BD data

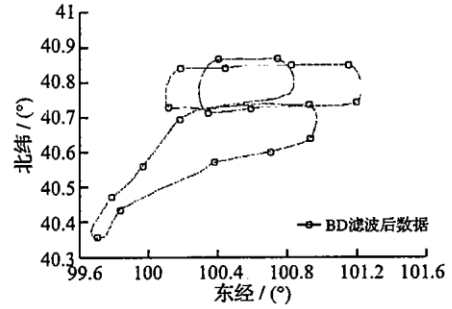


图 2 GPS/BD 卡尔曼滤波后轨迹

Fig. 2 Orbit of Kalman filter after of GPS/BD

3.2 分段分析北斗定位精度

分析北斗数据表明:如图 3、图 4 所示,在起飞爬升和平飞阶段,数据完整性较好。由东向转向北向转弯阶段,转弯坡度较大,北斗接收机天线接收东星信号受到影响,数据没有处理,分段定位结果见表 1。

表 1 不同飞行阶段的无源定位结果

Tab. 1 The results of the passive location in different flying stages

项目	1	2	3	4	5
方差(3σ)	66.736 5	93.802 1	86.566 2	136.719 4	80.386 3
BD 起始点位置	295	2 699	6 313	11 640	15 769
GPS 起始点位置	300	2 661	6 317	11 650	15 785
飞行状态	起飞爬升	平飞	平飞	平飞	平飞
数据处理点数	2 157	3 115	5 222	3 705	4 674

总共采样点数 26 263 个,其中有效点数 24 496 个,数据有效点数为 93.27%,无源定位精度在 3σ 条件下为 92.842 1 m。

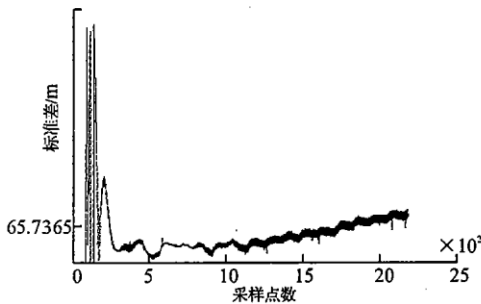


图 3 起飞爬升阶段定位精度

Fig. 3 The location precision at the stage of taking off and climbing

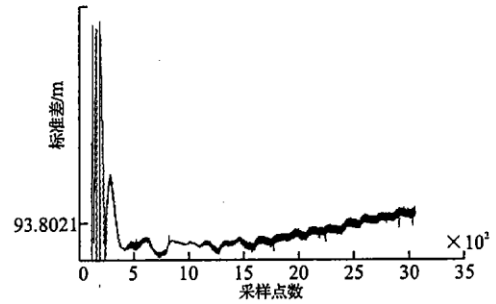


图 4 平飞阶段定位精度

Fig. 4 The location precision at the flat stage of flying

4 结论

本文提出改进卡尔曼滤波算法,其状态方程降低维数后,利用 χ^2 检验法剔除动态野值,并根据北斗有效位置信息进行估计和补偿。实验结果表明:①飞行过程中,北斗和 GPS 系统的定位曲线重合较好,两者位置相差的平均距离为 92.842 1 m,具有较好的位置精度,说明设计实现的北斗接收机和滤波算法,在飞机巡航状态下,可以满足空中一般用户需要;②在北斗接收机丢失信号的时间段内,位置数据开始有发散的趋势,但飞机的大坡度转弯时间不长,只要接收到两颗卫星信号的情况下,北斗接收机仍然有数据输出,没有影响到飞行轨迹曲线的连续性;③在基于北斗无源定位系统的卡尔曼滤波算法中,能够根据北斗三星的有效位置信息进行估计和补偿,提高北斗导航系统的精度,具有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 董绪荣,陶大欣. 一个快速 Kalman 滤波方法及其在 GPS 动态数据处理中的应用[J]. 测绘学报,1997,26(3):222 - 226.
DONG Xurong, TAO Daxin. An Efficient Kalman Filtering Algorithm and Its Application in Kinematic GPS Data Processing [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,1997,26(3):221 - 226. (in Chinese)
- [2] 王 慧,陈 伟. 基于 Kalman 滤波无源动态定位算法研究[J]. 武汉理工大学学报,2006,30(2):228 - 231.
WANG Hui, CHEN Wei. Research on Passive Dynamical Positioning Algorithm Based on Kalman Filter [J]. Journal of Wu-Han University of Technology,2006,30(2):228 - 231. (in Chinese)
- [3] Schwarz K P, Cannon M, Wong R A. Comparison of GPS Kinematic Models of the Determination of Position and Velocity Along a Trajectory [J]. Manuscripta Geodaetica. 1989,14(5):241 - 245 .
- [4] 赖际舟,刘建业. 基于北斗双星定位系统的组合导航滤波算法实现研究[J]. 宇航学报,2005,26(1):108 - 109.
LAI Jizhou, LIU Jianye. Research on Realization of Filtering Method in Intergrated on Beidou Double - star Position System [J]. Journal of Astronautics,2005,26(1):108 - 109. (in Chinese)
- [5] Gao Y, Krakiwsky F J, Liu Z W. A New Algorithm For Filtering a Correlated Measurement Sequence [J]. Manuscripta Geodaetica,1992,17(2):87 - 95. .
- [6] 彭志专,冯金富,聂光成,等. 基于修正扩展卡尔曼序贯滤波的信息融合算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(5):33 - 36.
PENG Zhizhuan, FENG Jinfu, NIE Guangshu, et al. A Novel Fusion Algorithm Based on Modified Extend Kalman Sequential Filtering[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition,2007,8(5):33 - 36. (in Chinese)
- [7] Meyn S P, Lyndon J. Model Reference Adaptive Control of Time Varing and Stochastic Systems [J]. IEEE Trans on Auto Control,1993,38(12):1738 - 1735.
- [8] Martin C, Mintz M. Robust Filtering and Prediction For Linear Systems with Uncertain Dynamics: A Game - theoretic Approach [J]. IEEE Trans on Automatic Control,1983,28(9):888 - 896.
- [9] Brunback B D, Srinath M D. A Chi - square Test for Fault - detection in Kalman Filters [J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1978,2(6):552 - 554.
- [10] Ren Da. Failure Detection of Dynamical Systems with the State Chi - square Test [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics,1994,17(2):271 - 277.

(编辑:田新华,徐楠楠)

An Improved Kalman Filter Algorithm Based On Airborne BeiDou Passive System

CHEN Yu - feng¹, LUO Ji - xun¹, ZHU Xiao - hui¹, XU Jian²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Military Deputy Agency in Nanjing of Air Force, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: The region passive locating system, named Beidou, nowadays is under extensive research, the inaccuracy of receiver, environmental noise, man - made interference and other factors will cause false data in the relevant measuring arrays. The difference between these data and the normal value in terms of quantity is larger and exceeds the allowed range of error, which will obviously affect the Kalman filtering process and cause the decrease of the position precision. All these will lead to instability of the system and even the disperse of filtering. This paper presents an improved algorithm, the principle of which is to reject the dynamic fault tolerant by using Kalman filter. This method upgrades the tracing ability of the filter under the airborne environment. The real - time character is improved because of the decrease in the dimension numbers of the state equation. Verified from the trying out data, the locating precision of the system can reach up to 92 meters, filtered by the algorithm, thus it can meet the general needs of the users in the air.

Key Words: passive location; pseudo - range; Kalman filter; location precision