

# 一种基于卡尔曼滤波处理的北斗卫星无源组合导航自适应野值剔除方法

王光鼎<sup>①②</sup> 张升康<sup>①②</sup> 杨汝良<sup>①</sup>  
<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)  
<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 在组合卫星导航定位中, 由于导航接收机存在各种噪声和干扰, 使得伪距出现较大的变动, 直接导致定位结果出现野值。本文在卡尔曼滤波技术的基础上, 提出了一种自适应野值剔除方法, 对动态数据野值判断、识别与剔除, 有效地抑制卫星导航中动态数据中的野值对滤波的影响。

**关键词:** 组合卫星导航; 卡尔曼滤波; 野值; 北斗无源定位

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1981-04

## An Adaptive Outlier Algorithm Based on Kalman Filtering for Beidou Satellite Passive Combination Navigation

Wang Guang-ding<sup>①②</sup> Zhang Sheng-kang<sup>①②</sup> Yang Ru-liang<sup>①</sup>  
<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)  
<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In Kalman filtering applications to combination satellite navigation the observation values including outliers are important effect on optimal filtering. The outliers affect the position filtering accuracy and make estimation inaccurate. In this paper, an outlier decision based on adaptive robust Kalman filtering is presented, which can keep orthogonal properties of innovation sequence. Simulation results show that the modified algorithms are effectively resistant to outliers in sampling date.

**Key words:** Combination satellite navigation; Kalman filtering; Outlier; Beidou passive position

### 1 引言

在组合卫星导航过程中, 由于导航接收机本身和导航信号传播环境的影响, 测量数据受到各种随机噪声的污染, 使测量数据可靠性和可用性下降, 导致观测数据中出现野值, 即错误的测量数据, 这些测量值明显偏大或偏小。如果这些数据不剔除, 这些野值对滤波系统会产生很坏的影响, 使估计出现很大偏差, 甚至使滤波系统发散, 影响导航数据的定位结果。

测量野值的识别与剔除方法很多, 如外推拟合法、差分检测法、多项式回归模型检验法等。有人研究利用卡尔曼滤波进行野值处理<sup>[1-4]</sup>, 主要是利用监控、判断基于常速度、常加速度运动模型基础上的状态预测误差滤波矩阵来进行野值剔除。本文提出基于卡尔曼滤波的自适应野值剔除算法, 利用新息进行增益矩阵自适应控制, 以便在动态环境下应用。

通常情况下, 人们假定卡尔曼滤波器中模型噪声  $\omega_k$  和测量噪声  $v_k$  均为零均值白噪声, 且已知模型噪声方差阵  $Q$  和测量噪声方差阵为  $R$ , 实际上由于运动模型变化、测量误差, 系统中存在有不确定性变化量, 噪声方差阵  $Q$  和测量噪

声方差阵  $R$  并不是常数。在定位导航滤波中, 运用卡尔曼滤波、预测算法, 进行实时动态野值数据判断、剔除、滤波, 可明显改善定位导航精度。

### 2 常规卡尔曼滤波算法<sup>[5, 6]</sup>

对于离散线性系统模型, 其状态方程和观测方程如下:

状态方程

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F}_{k,k-1}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{\Gamma}_{k-1}\mathbf{W}_{k-1} \quad (1)$$

观测方程

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (2)$$

其中  $\Phi_{k,k-1}$  为一步状态转移矩阵;  $\mathbf{\Gamma}_{k-1}$  为系统噪声系数矩阵;  $\mathbf{H}_k$  为观测矩阵;  $\mathbf{V}_k$  为观测噪声矩阵;  $\mathbf{W}_{k-1}$  为系统状态噪声矩阵, 且  $\mathbf{W}_k$  与  $\mathbf{V}_k$  互不相关; 满足如下关系:

$$\left. \begin{aligned} E[\mathbf{W}_k] &= 0 \\ \text{cov}[\mathbf{W}_k, \mathbf{W}_j] &= \mathbf{Q}_k\delta_{k,j} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} E[\mathbf{V}_k] &= 0 \\ \text{cov}[\mathbf{V}_k, \mathbf{V}_j] &= \mathbf{R}_k\delta_{k,j} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据上面的系统方程和观测方程, 建立卡尔曼滤波方程如下:

一步状态预测方程

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1,k} = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_k \quad (5)$$

一步观测预测方程

$$\hat{\mathbf{Z}}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k+1,k} \quad (6)$$

一步状态预测误差协方差矩阵:

$$\mathbf{P}_{k+1,k} = \Phi \mathbf{P}_k \Phi^T + \mathbf{Q}_k \quad (7)$$

增益矩阵

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (8)$$

状态滤波方程

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1,k} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k+1,k}) \quad (9)$$

状态滤波误差协方差矩阵

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k+1,k} \quad (10)$$

并得到滤波器新息和新息方差, 表达式如下:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_k = \mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k,k-1} \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \quad (12)$$

### 3 基于卡尔曼滤波的自适应野值剔除

可以将空间运动模型在不同坐标系下(如 ECEF 地心地固坐标系、ENV 东北天站心坐标系)进行三维位置定位、速度求解, 下面就 ENV 坐标系下的东向(E)举例说明, 其它方向可以参照分析。

在实测动态数据滤波处理中, 应用卡尔曼滤波算法, 可根据观测量, 实时检测滤波器新息  $\tilde{\mathbf{Z}}_k$  和新息方差  $\mathbf{C}_k$ , 在观测位置、速度等不同数据来源时, 对滤波器增益控制作相应的设计。为此对常规卡尔曼滤波器结构修改, 在常规卡尔曼滤波器结构的基础上增加利用新息的增益控制环节。在增益控制环节, 利用新息构造新息统计量, 并实时求解统计量的均值、方差根。修改后的卡尔曼滤波器结构如图 1 所示。

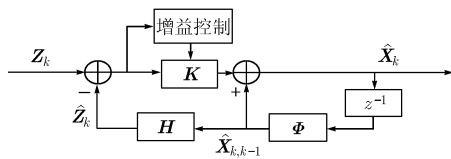


图 1 基于卡尔曼滤波器的自适应野值剔除框图

利用增益控制环节, 对卡尔曼滤波算法得到的增益系数  $\mathbf{K}$  进行在线实时控制, 如果出现大的观测测量值, 则通过增益控制环节对增益系数  $\mathbf{K}$  调小; 如果出现野值, 可以将增益系数  $\mathbf{K}$  置零, 以便实现自适应控制。

#### 3.1 观测数据来自卫星导航距离解算单元

在这种情况下, 仅有距离观测量, 因此观测矩阵:

$$\mathbf{H}_k = [1 \ 0 \ 0] \quad (13)$$

可以得到新息方差  $\mathbf{C}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k$  为一个数, 这时如果新息  $\tilde{\mathbf{Z}}_k$  满足如下条件

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \text{sqrt}(\mathbf{C}_k) \\ |\tilde{\mathbf{Z}}_k| &\leq d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

即首先实时对新息方差求方差根, 并判断新息的绝对值是否小于  $d$  倍的方差根, 其中系数  $d$  可以选定, 正常情况下新息为零均值高斯白分布, 采用  $d = 3$  进行 3 倍方差根判决, 认为 99.7% 的观测数据是没有野值的, 新息绝对值大于 3 倍方差根的观测值为野值, 如果新息的绝对值大于 3 倍的方差根, 则调整增益  $\mathbf{K}_k$ , 使得

$$\mathbf{K}_k = m\mathbf{K}_k \quad (15)$$

其中  $m \in [0,1]$ 。这样状态滤波方程  $\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1,k} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k+1,k})$  将得到修正, 而不会出现滤波发散的情况。如果新息绝对值小于 3 倍的方差根, 则对增益  $\mathbf{K}_k$  不作改变。

#### 3.2 观测量来自卫星导航距离、速度解算单元

对来自卫星导航距离、速度观测量, 有如下观测矩阵:

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

这时新息方差阵  $\mathbf{C}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k$  为一个  $2 \times 2$  的矩阵, 如果新息  $\tilde{\mathbf{Z}}_k$  中距离满足如下条件

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \text{sqrt}[C_k(1,1)] \\ |\tilde{\mathbf{Z}}_k(1,1)| &\leq d_1\lambda_1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

速度满足

$$\left. \begin{aligned} \lambda_2 &= \text{sqrt}[C_k(2,2)] \\ |\tilde{\mathbf{Z}}_k(1,2)| &\leq d_2\lambda_2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

即可以参考前面的叙述, 对位置、速度的新息进行判断, 其中系数  $d_1$ 、 $d_2$  可以选定, 并根据位置新息的判断结果进行实时调整增益  $\mathbf{K}_k$ , 使得修改后的增益矩阵为

$$\mathbf{K}_k = m\mathbf{K}_k \quad (19)$$

其中  $m \in [0,1]$ 。这样使得状态滤波方程  $\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1,k} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k+1,k})$  得到修正, 避免出现滤波发散的情况。

### 4 北斗无源卫星导航方程<sup>[6, 7]</sup>

北斗无源定位系统是从其有源定位改进得到的, 发射的导航电文通过赤道上空的 3 颗地球同步静止卫星(东星、西星、备份星)接收、转发给用户接收机, 用户接收机自行进行导航解算。因此伪距测量包括地面控制站到导航卫星的上行距离和导航卫星到用户的下行距离, 便于建立组合导航方程, 将地面控制站上行距离扣除, 可以得到以卫星为等效空间测量基准的伪距。

$$\rho_j^{SB} = \rho_u^C - \rho_j^{CB} \quad (20)$$

其中  $\rho_u^C$  为地面控制站到用户接收机的伪距;  $\rho_j^{CB}$  为地面控制站到第  $j$  颗导航卫星的上行距离;  $\rho_j^{SB}$  为第  $j$  颗导航卫星到用户接收机的下行距离。

所以北斗导航卫星伪距测量

$$\rho_j^{SB} = \sqrt{(X_j^{SB} - X_u)^2 + (Y_j^{SB} - Y_u)^2 + (Z_j^{SB} - Z_u)^2} + cdt_u^B, \quad j \in [1,3] \quad (21)$$

其中第  $j$  颗导航卫星位置  $(X_j^{SB} \ Y_j^{SB} \ Z_j^{SB})$  以及导航卫星位置变化率  $(\dot{X}_j^{SB} \ \dot{Y}_j^{SB} \ \dot{Z}_j^{SB})$  含在北斗导航电文中,  $dt_u^B$  为北

用户接收机钟差。北斗导航系统的时间基准和坐标基准分别为北斗系统时(BDT)和 BJ54 坐标系。

利用相似椭球原理, 设 BJ54 坐标下的用户接收机位置  $(X_u \ Y_u \ Z_u)$  处于地球海平面上高度  $H$  米, 则

$$1 = \frac{X_u^2 + Y_u^2}{a_u^2} + \frac{Z_u^2}{a_u^2} \quad (22)$$

其中  $\begin{cases} \frac{a_u}{a} = \frac{b_u}{b} = \frac{N+H}{N} \\ N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} \end{cases}$ ,  $a$  为地球椭球长半径,  $b$  为地球

椭球短半径,  $H$  为用户接收机位置高度, 可以通过气压计高度表或者 GPS, GLONASS, 雷达高度表等提供。

根据有关资料<sup>[6, 7]</sup>, 可以得到北斗无源导航观测方程组

$$\left. \begin{aligned} \rho_1^{SB} &= \sqrt{(X_1^{SB} - X_u)^2 + (Y_1^{SB} - Y_u)^2 + (Z_1^{SB} - Z_u)^2} + cdt_u^B \\ \rho_2^{SB} &= \sqrt{(X_2^{SB} - X_u)^2 + (Y_2^{SB} - Y_u)^2 + (Z_2^{SB} - Z_u)^2} + cdt_u^B \\ \rho_3^{SB} &= \sqrt{(X_3^{SB} - X_u)^2 + (Y_3^{SB} - Y_u)^2 + (Z_3^{SB} - Z_u)^2} + cdt_u^B \\ 1 &= \frac{X_u^2 + Y_u^2}{a_u^2} + \frac{Z_u^2}{a_u^2} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

对观测方程组进行线性化, 运用最小二乘的方法得到的用户位置, 再将用户位置转化为 ENV 站心切平面坐标系下坐标  $(x_n \ y_e \ z_v)$ 。以下数据处理分析是在 ENV 坐标系下进行的。

### 5 数据处理分析

本文通过与某协作单位合作, 将北斗无源卫星导航接收机安装在车辆上, 辅助有气压测高计, 在某地进行地面跑车实验, 地面跑车最大为表速 120km/h, 每 1 秒钟定位 1 次, 在 ENV 坐标系下对空间运动进行分解, 得到东向(e)、北向(n)、高程(v)3 个坐标方向的运动模型, 试验中设为常加速度模型。下面以观测数据来自卫星导航距离解算单元, 运动分解以东向运动为例, 进行具体参数说明。

北向运动状态转换矩阵如下式, 其它方向的状态转换矩阵相同,

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & T_s^2/2 \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

北向运动系统噪声系数矩阵如下所示, 其它方向噪声系数矩阵与此式相同,

$$\Gamma_{k-1} = \begin{bmatrix} T_s^3/6 & T_s^2/2 & T_s \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

卡尔曼滤波位置、速度与加速度初值状态选为

$$X(0) = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (26)$$

初始协方差阵,

$$P(0/0) = \Gamma_{k-1} Q \Gamma_{k-1}^T \quad (27)$$

其中  $Q$  在试验中通过调试选为 0.1, 测量噪声协方差  $R_k$  在试验中调试选取 10000。

### 5.1 滤波结果分析

图 2 为北向运动轨迹的数据分析图, 可以看出, 图 2(a)北向实测轨迹有较大的突变点(野值点), 严重影响滤波的精度和效果。采用基于卡尔曼的野值实时剔除算法对数据进行滤波后, 如图 2(b)所示, 可见其野值点基本全部剔除, 运动轨迹相对平滑。

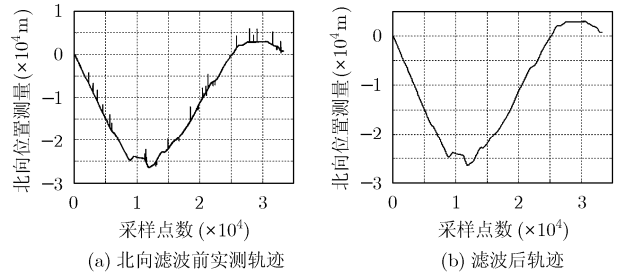


图 2 北向运动轨迹分析

### 5.2 增益控制影响分析

采用不引入增益控制的卡尔曼滤波野值剔除方法得到北向运动轨迹滤波效果如图 3(a)所示, 从图中可以看到在轨迹突然出现大的地方, 测量出现野值, 由于增益没有得到控制, 滤波估计值刚开始跟随野值跳变, 随后出现振荡, 回到正常轨迹点, 在跑车试验中甚至还出现轨迹发散现象, 因此必须进行野值剔除。采用引入增益控制的卡尔曼滤波野值剔除方法得到北向运动轨迹滤波效果如图 3(b)所示, 从图中可以看到在轨迹突然出现大的地方, 测量出现野值, 滤波估计值不跟随野值跳变, 从野值轨迹根部进行提出, 一直到出现正常轨迹点, 没有出现轨迹发散现象。

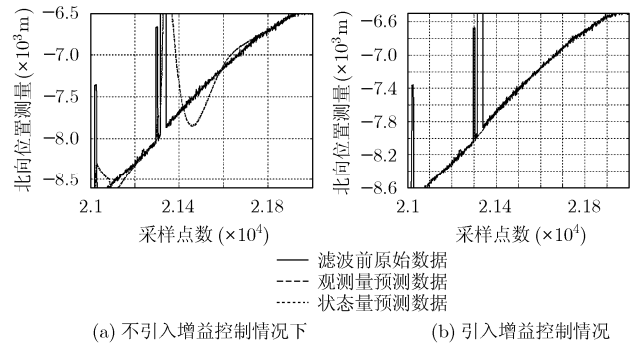


图 3 增益控制影响分析

### 5.3 其它各向运动轨迹分析

本次实验还对其他方向的运动轨迹数据进行处理, 处理的结果如图 4 所示, 其中图 4(a)为东向运动轨迹滤波前后的对比, 图 4(b)为高程滤波对比, 图 4(c)为数据三维轨迹滤波前后对比, 总的来说增益自适应控制滤波器克服了普通卡尔曼滤波器野值变化引起振荡的现象, 对野值剔除及运动轨迹平滑效果明显。表 1 给出了滤波前后, 各向运动轨迹数据残

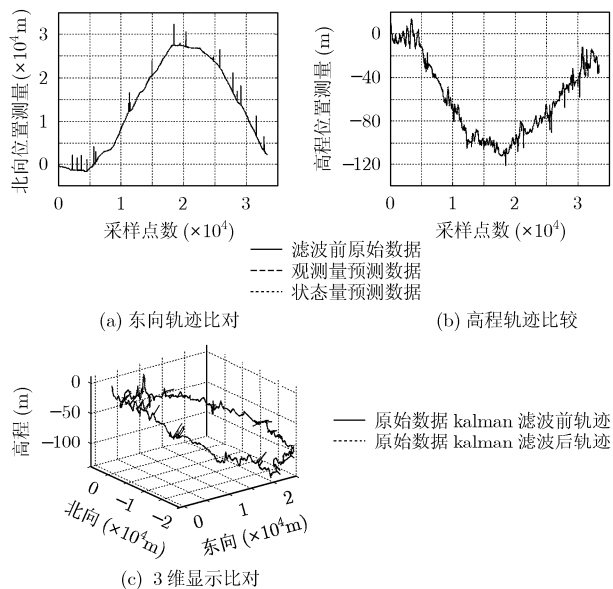


图4 其它各向运动轨迹处理前后比对

表1 卡尔曼滤波野值剔除前后观测新息统计均值/标准差分析表

|    | 采样<br>点数 | 野值提出前均值<br>/标准差(m) | 野值剔除后均值<br>/标准差(m) |
|----|----------|--------------------|--------------------|
| 东向 | 32000    | 18.49/252.43       | -0.13/12.23        |
| 北向 | 32000    | 10.78/178.97       | -0.08/18.12        |
| 高程 | 32000    | 0.0032/1.3314      | 0.0032/1.3314      |

差均值与标准差的比较, 滤波后各向运动轨迹残差均值基本上都接近零, 标准差也有明显的下降, 利用本文提出的结合野值剔除的卡尔曼滤波能够得到很好的分析结果。

## 6 结束语

从分析的结果可以看出, 野值使目标位置运动曲线出现严重偏差, 误差均值明显增大, 使用文中提出的基于控制卡尔曼滤波增益矩阵的自适应野值剔除算法所得的滤波曲线明显优于前者, 结果表明文中的方法能够有效地抑制卫星导航中动态数据中的野值对滤波的影响。另外, 由于此方法不需要考虑野值的分布情况和先验统计特性, 因此算法简单实用, 在工程中具有较好应用价值, 能够提高动态数据滤波精度, 避免卡尔曼滤波发散。在实测应用中有很好的效果。

## 参考文献

- [1] 柳海峰, 姚郁. Kalman 滤波抗野值方法研究[J]. 计算机自动测量与控制, 2001, 9(6): 35-38.  
Liu Hai-feng and Yao Yu. Study for Outliers Based on Kalman Filtering[J]. *Computer Measurement & Control*, 2001, 9(6): 35-38.
- [2] 胡奕明, 秦永元. 目标跟踪系统 Kalman 滤波野值修正算法研究[J]. 火箭与制导学报, 2006, 26(1): 330-334.  
Hu Yi-ming and Qin Yong-yuan. Kalman filter algorithm with outlier improvement base on objective tracking system[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 330-334.
- [3] 高为广等. 基于当前加速度模型的抗差自适应 Kalman 滤波[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 15-18.  
Gao Wei-guang, et al. Adaptive robust kalman filtering based on the current statistical model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(1): 15-18.
- [4] 付梦印, 邓志红等. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 80-86.  
Fu Meng-yin and Deng Zhi-hong et al. Kalman Filtering Theory and Application in Satellite Navigation System[M]. Beijing: Publishing House of Science, 2003: 10-16.
- [5] 周宏仁等. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 11-15.  
Zhou Hong-ren, et al. Mobile Target Tracking[M]. Beijing: Publishing House of Defense industry, 1991: 11-15.
- [6] 边少锋, 李文魁. 卫星导航系统概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 99-117.  
Bian Shao-feng and Li Wen-kui. An Introduction to Satellite Navigation Systems [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry. 2005: 99-117.
- [7] Elliott D. Kaplan 著, 邱致和等译. GPS 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 27-30.

- 王光鼎: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为多模组合导航、卫星轨道计算、数据融合与雷达信号处理等研究。  
张升康: 男, 1980年生, 博士, 研究方向为卫星导航及高精度时间同步技术、微波成像技术。  
杨汝良: 男, 1943年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统总装及新体制。