

一种抑制卡尔曼滤波发散的实时数据处理方法

梁民赞^{1,2}, 陆扬¹, 周新鹏¹

(1. 广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 由于水声环境的复杂性和水声信道的时空变特性及水下航行载体的机动性, 水声定位系统测量的弹道样点野值较多, 平滑性差。介绍了一种野值的自动剔除和卡尔曼滤波递推处理方法, 克服了滤波发散。文中选取距离 D 的倒数作为状态变量, 使得 $1/D$ 是近似线性变化的, 此时量测方程的误差也近似是线性的, 卡尔曼滤波器的表现是稳定的, 并且是渐近无偏的。卡尔曼滤波的递推形式, 滤波增益矩阵 K_k 的离线计算出, Q_k 和 R_k 值选取固定值, 野值设定门限自动剔除, 使滤波器收敛和稳定时间短, 实现了对快速目标的跟踪和滤波输出, 没有出现发散现象。该方法的特点是实时性好, 对快速目标具有良好的跟踪能力, 而且能达到工程上应用的精度要求。

关键词: 实时数据处理; 卡尔曼滤波; 滤波增益; 不稳定控制

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-05-0761-03

A real-time data processing method for controlling Kalman filter instability

LIANG Min-zan^{1,2}, LU Yang¹, ZHOU Xin-peng³

(1. Unit 91388, PLA, Zhanjinag 524022, Guangdong, China; 2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Under complex ocean environment, the acoustic channel is a random channel in space-time domains. Because of this fact and the mobility of underwater carriers, many measuring samples that deviate from the true trajectory can be obtained in underwater positioning system, and lead to the worse smoothness of measurement. A real-time data processing and recursive algorithm, which gets rid of error trajectory samples automatically for Kalman filter, is proposed to solve the problem of filtering instability. The reciprocal of distance D is selected as a state variable, and $1/D$ is considered changing linearly. So the error of measuring equation is linear, the Kalman filter can continue operating stably with unbiased estimation. Using a recursive Kalman filtering method, calculating filtering gain matrix K_k beforehand, fixing the value of Q_k and R_k , and getting rid of error trajectory samples automatically by setting threshold, as a consequence, can make the filter operation convergent and stable in a short time with good performances in aspects of real-time processing and accurately tracking ability to high speed targets.

Key words: real-time data processing; Kalman filter; filtering gain; instability control

1 引 言

在水声对抗中, 需要对快速目标(如鱼雷)进行实时跟踪, 根据时延估计或者方位交汇计算得到的弹道曲线往往起伏很大, 为了提高定位精度, 引入了卡尔曼滤波器对数据进行滤波处理。在卡尔曼滤波计算中, 常会出现这样一种现象: 当量测值数目 k 不

断增大时, 按滤波方程计算的估计均方误差阵趋于零或趋于某一稳态值, 但估计值相对实际的被估计值的偏差却越来越大, 而导致跟踪结果逐渐偏离真实状态的现象, 这种现象称为滤波器的发散。此外, 当增益过小时也会导致发散, 这时候新的信息量已经由于增益过小而不再具有修正作用了, 则可能的情况是滤波越来越偏离真实轨迹, 以致发散。

2 卡尔曼滤波器的数学模型

卡尔曼滤波算法是线性无偏最小方差递推滤

收稿日期: 2007-11-30, 修回日期: 2008-03-08

作者简介: 梁民赞(1981-), 男, 广东化州人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为水声定位。

通讯作者: 陆扬, E-mail: CG300@sina.com.cn

波,其估计性能是最优的,而递推计算形式能适应实时处理的需要。设系统的状态方程和测量方程分别为^[1]:

$$\mathbf{X}_k = \boldsymbol{\phi}_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \boldsymbol{\Gamma}_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} \quad (1)$$

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

式中: \mathbf{X}_k 为 k 时刻的 n 维状态矢量,即被估计矢量; $\boldsymbol{\phi}_{k/k-1}$ 为 $n \times n$ 维状态转移矩阵, $\boldsymbol{\Gamma}_k$ 为 $n \times r$ 维动态噪声矩阵, \mathbf{W}_k 为 r 维动态噪声; \mathbf{Z}_k 为系统的 m 维观测噪声序列, \mathbf{H}_k 为 k 时刻量测矩阵($m \times n$), \mathbf{V}_k 为 k 时刻的 m 维观测噪声。关于系统过程噪声和观测噪声的统计特性,假定如下:动态噪声(\mathbf{W}_k)与观测噪声(\mathbf{V}_k)是互不相关的零均值白噪声序列,即对所有的 k, j ,有

$$\mathbf{E} \mathbf{W}_k = 0, \mathbf{E} \mathbf{V}_k = 0 \quad (3)$$

$$\text{Cov}(\mathbf{W}_k, \mathbf{W}_j) = \mathbf{E} \mathbf{W}_k \mathbf{W}_j^T = \mathbf{Q}_k \delta_{kj}$$

$$\text{Cov}(\mathbf{V}_k, \mathbf{V}_j) = \mathbf{E} \mathbf{V}_k \mathbf{V}_j^T = \mathbf{R}_k \delta_{kj}$$

$$\text{Cov}(\mathbf{W}_k, \mathbf{V}_j) = \mathbf{E} \mathbf{W}_k \mathbf{V}_j^T = 0 \quad (4)$$

式中: \mathbf{Q}_k 为系统过程噪声 \mathbf{W}_k 的 $r \times r$ 维对称非负定方差矩阵; \mathbf{R}_k 为系统观测噪声 \mathbf{V}_k 的 $m \times m$ 维对称正定方差矩阵。则 \mathbf{X}_k 的估计 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 可按下述方程求解:状态估计为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \boldsymbol{\phi}_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \boldsymbol{\phi}_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}) \quad (5)$$

最优滤波增益矩阵为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (6)$$

预测误差协方差阵为:

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \boldsymbol{\phi}_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\phi}_{k/k-1}^T + \boldsymbol{\Gamma}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \boldsymbol{\Gamma}_{k-1}^T \quad (7)$$

滤波误差协方差阵为:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} \quad (8)$$

滤波器的增益矩阵 \mathbf{K}_k 与观测无关,因此它可预先离线算出,从而减少在线计算量,提高实时处理能力。给定了初值 $\hat{\mathbf{X}}_0$ 和 \mathbf{P}_0 ,根据 k 时刻的观测值 \mathbf{Z}_k ,就可以递推计算出 k 时刻的状态估计 \mathbf{X}_k 。

实际应用中,卡尔曼滤波器常常会出现发散。引起滤波器发散的主要原因有两点:

(1)描述系统动力学特性的数学模型和噪声的统计模型不准确,不能真实地反映物理过程,使模型与获得的量测值不匹配,导致滤波器发散。这种模型过于粗糙或失真引起的发散称为滤波发散。

(2)卡尔曼滤波是递推过程,随着滤波步数的增加,舍入误差逐渐积累。如果计算机字长不够长,这种积累误差有可能使估计的均方误差阵失去非负定性甚至失去对称性,使增益阵的计算值逐渐失去合适的加权作用而导致发散。这种由计算舍入

差积累引起的滤波器发散称为计算发散。

3 抑制发散的方法

3.1 状态变量的选取

在这里,卡尔曼滤波的数学模型采用三阶运动模型,即匀加速运动模型。状态变量的选取在很大程度上取决于系统模型所描述的物理现象。事实上,大多数的水下系统都属于非线性系统(一般在直角坐标系下,运动状态方程是线性的,而测量方程是非线性的)。例如,在实际工程中,若选择目标距离 D 为状态变量,则系统模型描述的状态方程是线性的,量测方程的误差是非线性的。但卡尔曼滤波器一般用于线性系统,当观测与状态变量间存在非线性关系时其滤波效果较差。因此,选取 $1/D$ 为状态变量,当 D 线性变化时,有^[2]:

$$\frac{1}{D_k} \doteq \frac{1}{D_{k-1}} + T \left[\frac{\dot{1}}{D_k} \right] \quad (9)$$

这里, $[\dot{1}/D_k] = [1/D_k - 1/D_{k-1}]/T$ 表示距离的倒数 $1/D$ 在 k 时刻的变化率。这表明,当 D 线性慢变化时, $1/D$ 也可视为是近似线性变化的,因此可选择 $1/D$ 作为状态变量,此时,量测方程的误差也近似是线性的。

除了状态变量外,还需要考虑滤波初值的选取。要求初始状态的估值具有无偏性,即要求 $E\{\hat{X}_0\} = E\{X_0\}$,以及要求协方差矩阵: $\mathbf{P}_0 = E\{X_0 X_0^T\} = \mathbf{M}_0$ 是已知的,在这里,采用三点法得到初值。由文献[3-5]可知,增益曲线是呈指数规律衰减的,新的观测值的修正作用越来越小,为了防止滤波器发散,在这里用限定下限法抑制滤波器发散,即当增益下降到某一定值时,让它不再下降,使其固定在一个下限上,以加强当前输入值的引导作用。

3.2 野值的自动剔除

由于水听器本身、水声环境的影响,或者数据传输中的种种原因,都可能使所给出的量测序列中包含某些错误的量测值,工程上称之为野值。它们或是量级上与正常量测值相差很大,或者量级上虽没有明显差别,但是误差超越了正常状态所允许的误差范围。如果不将这些野值预先剔除掉,将给数据处理带来很大的误差,特别是在应用递推滤波方法对目标进行实时跟踪时,将导致滤波发散。下面讨论野值的自动剔除方法。

设对状态 \mathbf{X}_k 的测量值为 Z_1, Z_2, \dots, Z_{k-1} ,预测值为 $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$,预测残差为 d_k ,有:

$$d_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1} \quad (10)$$

式中 d_k 是均值为零的高斯随机量,其协方差矩阵为:

$$E[d_k, d_k^T] = H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k \quad (11)$$

式中 $P_{k/k-1}$ 表示预测误差协方差矩阵, R_k 为量测噪声协方差矩阵。

利用预测残差的上述统计性质可对 Z_k 的每个分量进行判别,判别式为:

$$|d_k(i)| \leq C \sqrt{H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_{k(i,i)}} \quad (12)$$

式(12)中下角 (i, i) 表示对角线上的第 i 个元素, $d_k(i)$ 表示 d_k 的第 i 个分量, C 为常量,可取 3 或 4。如果式(12)成立,判别 $z_k(i)$ 为正确观测量,反之,判别 $z_k(i)$ 为野值,其中 $z_k(i)$ 为 Z_k 的第 i 个分量。

野值的自动剔除方法主要表现在递推滤波过程中,基本思想是:当式(12)不成立,即判别 $z_k(i)$ 为野值时,在递推滤波求得增益矩阵 K_k 后,在软件中自动把 K_k 的第 i 行元素全部冲为零,以下计算滤波值 $\hat{X}_{k/k}$ 和滤波误差协方差矩阵 $P_{k/k}$ 的公式不变。

4 试验结果

计算机仿真时,设测量误差为高斯随机的,均值为 0,均方差为 30.0m,采样间隔 1s。在吉林松花湖的开阔水域进行了湖上试验,定位系统采用 4 元阵,同步方式,同步周期为 0.8s。试验数据处理的流程为:先设定门限剔除野点,然后进行卡尔曼滤波。仿真和湖试结果如图 1~4 所示。

当目标机动时,由于数学模型的失配,当估计的误差协方差不是以实际误差协方差为界时,出现滤波器发散。如果不采取限定发散措施,会使滤波器出现崩溃,采取了抑制发散措施后,轨迹的起伏变小,具有平滑连续性。定位误差计算取 $(\sigma_x + \sigma_y)/2$, σ_x, σ_y 分别为滤波后横坐标、纵坐标与真值的差值。滤波后,卡尔曼滤波误差均方差为 13.6m,使定位精度提高了 50%。卡尔曼滤波器的收敛和稳定的时间为 200s,快于传统的卡尔曼滤波器时间(稳定约需要 400s),这对快速目标的实时跟踪有很大的意义。

5 结论

在直角坐标系中,本文选取距离 D 的倒数作为状态变量,使得 $1/D$ 是近似线性变化的,此时量测方程的误差也近似是线性的,卡尔曼滤波器的表现是稳定的,并且是渐近无偏的。卡尔曼滤波的递推形式,滤波增益矩阵 K_k 的离线可计算出, Q_k 和 R_k 值

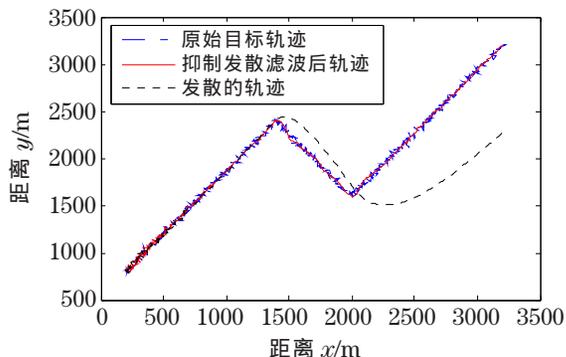


图 1 采取抑制发散措施的滤波轨迹图

Fig.1 Location track using the controlling instability method

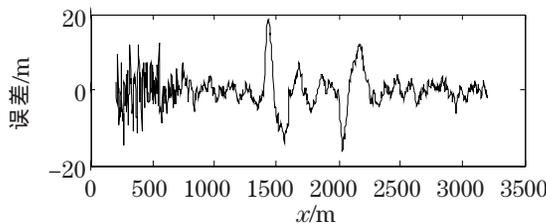


图 2 滤波后误差

Fig.2 Error after filtering

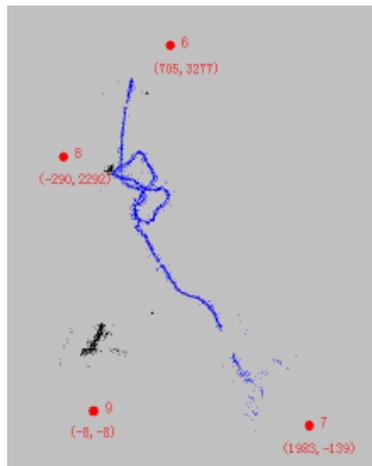


图 3 滤波前湖试轨迹

Fig.3 Locating track before filtering in lake experiment

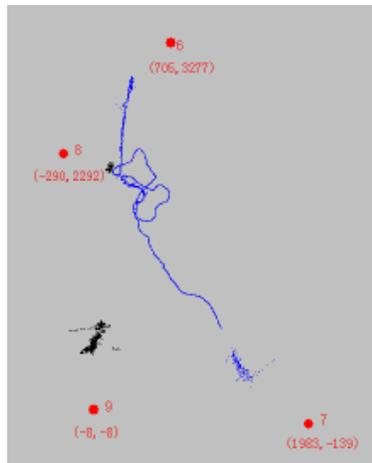


图 4 采用本文介绍方法滤波后湖试轨迹

Fig.4 Locating track using the proposed filtering method in lake experiment

选取固定值,野值设定门限自动剔除,使滤波器收敛和稳定时间短,实现了对快速目标的跟踪和滤波输出,没有出现发散现象。

实际工程应用中,由于水声信道的畸变等因素影响,测量数据存在不确定因素导致产生野值。应该指出,对实际测量数据的处理,只有在对野值进行有效剔除的前提下才能得到理想的滤波效果。

参 考 文 献

- [1] 项楚琪, 田坦. 离散估计导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1989: 155-157.
XIANG Chuqi, TIAN Tan. The principle of discrete estimation[M]. Harbin: Journal of Harbin Shipbuilding Engineering Institute. 1989. 155-157.
- [2] 樊羚珂. 卡尔曼滤波在无源测距声呐中的应用[J]. 哈尔滨船舶

工程学院学报, 1986, 7(2): 211-213.

FAN Lingke. The application of Kalman filtering in passive ranging sonars[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1986, 7(2): 211-213.

- [3] 王欣, 王德隼. 离散信号的滤波[M]. 北京: 电子工业出版社.
WANG Xin, WANG Dejun. Discrete-time signal filtering [M]. Beijing: Electronic Industries Press.
- [4] 关欣, 何友, 衣晓. 纯方位水下被动目标跟踪与卡尔曼滤波[J]. 舰船电子工程, 2002, (3): 12-17.
GUAN Xin, HE You, YI Xiao. Bearing-only underwater emitter track and Kalman filtering[J]. Ship Electronic Engineering, 2002, (3): 12-17.
- [5] 高磊, 徐德民, 任章. 自适应推广 Kalman 滤波应用于水下被动目标定位[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(5): 8-10.
GAO Lei, XU Demin, REN Zhang. Adaptive extended Kalman filtering for bearing-only underwater emitter location in modified polar coordinate[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(5): 8-10.

中国声学学会水声学分会 2009 年学术会议 征 文 通 知

经中国声学学会水声学分会工作委员会研究决定,拟定于 2009 年 5 月底或 6 月初在大连市(暂定)召开全国水声学学术交流会议,交流近年来我国水声科技工作者在水声学研究领域内取得的新成果、新工艺和新技术,欢迎大家积极投稿,踊跃参加会议。现将有关征文事项通知如下:

征文内容:

1. 海洋中声传播、混响、环境噪声及舰船噪声;
2. 声纳目标反射与散射;
3. 声纳系统的设计和预报;
4. 水声信号处理技术;
5. 水声匹配场技术;
6. 水下目标分类识别技术;
7. 水声对抗;
8. 换能器及水下声系统;
9. 目标环境模拟器与声纳仿真技术;
10. 水声工程在海洋开发及航海中的应用;
11. 海洋物理及观测技术。

征文要求:

1. 论文内容不涉及保密问题,可以公开发表,并请按照通知所附的模板格式进行排版(采用“word”文件,具体要求见附件)。
2. 投稿方式:采用 e-mail 方式投稿,投稿专用邮箱为:shuishenghui@yahoo.com.cn
3. 提交的论文篇幅不超过 3 页(包括标题、公式、图表、参考文献等),经专家审阅后决定是否录用,未录用的稿件恕不退还。
4. 录用的论文将向作者发出录用通知,请在通知规定的日期内将版面费寄到秘书处(费用另行通知),逾期不交者,将不编入会议论文集。
5. 征文截止日期:2009 年 3 月 31 日,录用通知发出日期:2009 年 4 月 30 日。
6. 论文集将由《声学技术》杂志正式出版。

联系方式:

- 联系人:胡长青;Tel:021-64048159-204,021-64035270(直)
E-mail:hchq@mail.ioa.ac.cn
丁玉薇;Tel:021-64048159-222,021-64174105(直)
E-mail:ssxh-ssxh@vip.163.com
杨益新;Tel:029-88460373,13991835275
E-mail:yxyang@nwpu.edu.cn
王竹湘;Tel:0571-56782271,13588375039

备注:会议具体日期和会址另行通知。