

# 基于 Kaman 滤波的数据融合研究

李群力, 傅妍芳

(1 西安工业大学, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 分析了标准 kaman 滤波 (KF) 和自适应 kaman 滤波 (AKF) 的原理, 通过仿真实验, 对两种滤波算法的性能进行了比较。选用凸组合融合算法作为声纳探测的航迹融合算法, 将多声纳融合系统的融合结果和简单交叉定位算法进行了比较研究。仿真实验结果表明: 自适应 kaman 滤波比标准 kaman 滤波具有更好的目标跟踪性能, 多声纳融合结果较简单交叉定位结果的性能有大幅度提高, 所选用的融合算法航迹能够较好的与真实航迹吻合。

**关键词:** 声纳; 数据融合; 卡尔曼滤波; 自适应卡尔曼滤波

**中图分类号:** TP63 **文献标识码:** B

## Multi- Sonar Data Fusion Using Kaman Filter

LI Qun - li FU Yan - fang

(Xi'an Polytechnic University Xi'an Shanxi 710032 China)

**ABSTRACT** With analysis of KF (Kaman filter) and AKF (adaptive Kaman filter), the performances between them are compared by simulation experiment. Choosing the simple convex - combination arithmetic as the track fusion method, the fusion results of both the multi - sonar and the simple cross - orientation are compared and studied. The simulation result shows that AKF is better at targets' trace tracking than KF, meanwhile multi - sonar data fusion is better than simple cross - orientation and the track of data fusion is fit for the real track.

**KEYWORDS** Sonar; Data fusion; Kaman filter; Adaptive kaman filter

### 1 引言

在现代战争中, 电子对抗越来越多, 作战环境越来越复杂, 在这种情况下, 采用单一传感器的跟踪系统要精确跟踪目标, 尤其是高速、大机动目标是非常困难的, 基于数据融合技术的多传感器跟踪系统是解决复杂环境中目标跟踪的有效途径之一<sup>[1]</sup>。

目前, 目标跟踪理论有了很大的发展, 尤其是在跟踪算法的研究上, 理论更是日趋成熟。在跟踪算法中, 主要有线性自回归滤波, 两点外推滤波, 维纳滤波, 加权最小二乘滤波,  $\alpha - \beta$  滤波和卡尔曼滤波, 其中卡尔曼滤波算法在目标跟踪理论中占据了主导地位<sup>[2]</sup>。

本文设计了单部声纳状态估计的标准 kaman 滤波算法和机动目标加速度方差自适应 kaman 算法, 对两种算法的跟踪性能做了比较。针对水下目标的特性, 选取凸组合航迹融合算法作为融合系统的航迹融合算法, 并将融合结果和简单

交叉定位算法作了性能比较。

### 2 标准 kaman 滤波和自适应 kaman 滤波

#### 2.1 标准 kaman 滤波

含有控制项的线性离散时间系统的一般状态方程可以描述为:

$$X(k) = \phi(k, k-1)X(k-1) + \Gamma(k-1)u(k-1) + G(k-1)W(k-1) \quad (1)$$

其中,  $X(k) \in R^n$  是  $k$  时刻目标的状态向量,  $u(k)$  是输入或控制信号。过程噪声  $W(k) \in R^n$  是具有零均值和正定协方差矩阵  $Q(k)$  的高斯噪声向量, 即满足  $E[W(k)] = 0$ ,  $E[W(k)W^T(j)] = Q(k)\delta_{kj}$ ,  $\phi(k) \in R^n$  是状态转移矩阵,  $G(k) \in R^{n \times n}$  是过程噪声分布矩阵,  $\Gamma(k)$  为输入控制加权矩阵。

传感器的通用观测方程可表示为:

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \quad (2)$$

其中,  $Z(k) \in R^m$  是传感器在  $k$  时刻的观测向量, 观测噪声  $V(k) \in R^m$  是具有零均值和正定协方差阵  $R(k)$  的高斯分布

测量噪声向量, 即满足  $E[V(k)] = 0$   $E[V(k)V^T(j)] = Q(k)\delta_{kj}$ 。

状态估计的一步预测方程为:

$$\hat{X}(k/k-1) = \phi(k, k-1)\hat{X}(k-1/k-1) + \Gamma(k-1)u(k-1) \quad (3)$$

一步预测协方差为:

$$P(k/k-1) = E[\tilde{X}(k/k-1)\tilde{X}^T(k/k-1) | Z^{k-1}] = \phi(k, k-1)P(k-1/k-1)\phi^T(k, k-1) + G(k-1)Q(k-1)G^T(k-1) \quad (4)$$

滤波器增益为:

$$K(k) = P(k/k-1)H^T(k)S^{-1}(k) \quad (5)$$

状态更新方程为:

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k/k-1) + K(k)\varepsilon(k) \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &= Z(k) - \hat{Z}(k/k-1) = H(k)\hat{X}(k) + V(k) - \\ H(k)\hat{X}(k/k-1) &= H(k)\tilde{X}(k/k-1) + V(k) \end{aligned} \quad (7)$$

为新息或量测残差。

滤波误差协方差为:

$$\begin{aligned} P(k/k) &= P(k/k-1) - P(k/k-1)H^T(k)S^{-1}(k)H(k)P(k/k-1) \\ &= P(k/k-1) - K(k)S(k)K^T(k) \\ &= [I - K(k)H(k)]P(k/k-1) \\ &= [I - K(k)H(k)]P(k/k-1)[I - K(k)H(k)]^T + \\ &K(k)R(k)K^T(k) \end{aligned} \quad (8)$$

方程 (3)、(4)、(5)、(6)、(8) 便构成了 kalman 滤波算法的基本方程。

## 2.2 自适应 kalman 滤波<sup>[3]</sup>

在实际应用过程中, 当目标出现机动或噪声统计特性取得不准时, kalman 滤波器的性能会迅速下降, 所得到的状态估计与实际状态之间的误差也常常超出公式计算的范围, 出现发散现象。如果在滤波过程中, 利用新的观测数据, 对信号模型、噪声的统计特性等实时进行修正, 以保持最优或次优滤波, 可以很好的抑制发散现象, 这就是自适应滤波。

考虑式 (1) (2) 所表示的离散系统, 采用机动目标的“当前”统计模型时, 系统的加速度发生变化, 对加速度项加入一个零均值有色噪声, 根据周宏仁理论<sup>[4]</sup>, 滤波过程中系统状态的一步预测为:

$$\hat{X}(k/k-1) = f(\hat{X}(k-1), 0) + U(k)\bar{a}(k) \quad (9)$$

把  $x$  方向的  $\ddot{x}(k-1)$  的一步预测值  $\dot{\ddot{x}}(k/k-1)$  看作在  $k$  时刻瞬时“当前”加速度, 即随机机动加速度的均值, 可得到  $x$  方向上的加速度均值自适应算法。设

$$\bar{a}(k) = \dot{\ddot{x}}(k/k-1) \quad (10)$$

代入 (9), 则可以写成如下矩阵形式:

$$\hat{X}(k/k-1) = \phi_1(k)\hat{X}(k) \quad (11)$$

对于状态向量  $x = [x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}]^T$ ,  $\phi_1(k)$  表达和  $Q(k)$

的计算见文献 [3]。

## 3 航迹融合算法<sup>[5]</sup>

多传感器融合系统的结构大致可以分为三类: 集中式、分布式和混合式。集中式融合将所有传感器量测数据都传送到一个中心处理器进行处理和融合, 该结构没有信息损失, 融合结果最优, 但是需要很宽的网络数据链路传输数据, 且融合中心需要较强的处理能力。分布式融合每个传感器都进行预处理, 然后把中间结果送到中心节点, 进行融合处理, 这种融合方法通常也称为航迹融合。混合式融合是集中式和分布式结构的综合。本文所采用的融合结构为分布式, 融合算法选用简单凸组合融合算法。

假定对于同一目标, 传感器  $i$  和  $j$  的局部估计和相应的误差协方差阵分别为  $\hat{X}^m(k/k)$  和  $P^m(k/k)$ ,  $m = i, j$  设相应的状态估计误差为:

$$\begin{cases} \tilde{X}^i(k/k) = X(k) - \hat{X}^i(k/k) \\ \tilde{X}^j(k/k) = X(k) - \hat{X}^j(k/k) \end{cases} \quad (12)$$

二者独立。

若各传感器局部估计误差互不相关, 融合中心对于任意两个传感器之间的航迹融合结果的对称形式为:

$$\hat{X} = P^i(P^i + P^j)^{-1}\hat{X}^i + P^j(P^i + P^j)^{-1}\hat{X}^j \quad (13)$$

相应的任意两个传感器在局部估计误差互不相关的情况下, 航迹融合估计误差的协方差阵为:

$$P = P^i(P^i + P^j)^{-1}P^j \quad (14)$$

将式 (13) 和 (14) 推广到传感器  $N > 2$  时的情况, 设所有传感器估计误差  $\tilde{X}^i = X - \hat{X}^i$  之间互不相关, 则融合方程为:

$$\begin{cases} \hat{X} = [ \sum_{i=1}^N (P^i)^{-1} ]^{-1} \sum_{i=1}^N (P^i)^{-1} \hat{X}^i \\ P^{-1} = \sum_{i=1}^N (P^i)^{-1} \end{cases} \quad (15)$$

当各传感器的局部估计误差相关时, 上述算法是次优的。如果两条航迹都是传感器航迹且不存在过程噪声, 传感器初始时刻的估计误差也不相关时, 简单凸组合融合算法时最优的, 能够得到和中心式融合系统相同的结果。

## 4 仿真实例

### 4.1 仿真实验

实验 1 用主动声纳进行探测, 取探测点为坐标原点, 目标初始坐标 (1000 6000), 初始主航向  $\varphi = 150^\circ$ , 航速  $v = 42\text{kn}$  以  $\omega = 5^\circ/\text{s}$  匀速转弯, 声纳测量的最大距离误差为  $2/100 \times 1000$  D 为声纳的满量程, 方位最大测量误差为  $1.7^\circ$ 。用 KF 和 AKF 进行状态估计, 所得到的估计结果与真实值的比较见表, 距离误差曲线和方位误差曲线分别见图 1 和图 2。

实验 2 用两被动声纳对目标进行探测, 声纳 1 和声纳 2 的坐标为 (0 0) 和 (0 1000)。声纳方位最大测量误差为

1. 2°。用 AKF 滤波, 目标的运动状态和匀速运动, 融合结果和简单交叉定位探测结果的比较见表 2, x 方向上声纳 1 和声纳 2 以及融合结果误差曲线见图 3, 距离融合误差与定位误差比较见图 4, 方位融合误差和定位误差比较见图 5。

实验 3 融合系统和实验 2 一样, 目标运动分为四段, 第一段为加速运动 100 秒, 加速度为  $0.1\text{ m/s}^2$ ; 第二段为左转弯运动 20 秒, 角速度为  $\omega = 5^\circ/\text{s}$ ; 第三段为右转弯运动 20 秒, 角速度为  $\omega = 5^\circ/\text{s}$ ; 第四段为匀速运动 460 秒, 融合航迹和真实航迹的比较见图 6。

表 1 目标匀速转弯 ( $\omega = 5^\circ/\text{s}$ ) 时 KF 和 AKF 仿真数据							
时间 (秒)	20	50	100	200	400	600	
目标实际距离 (米)	7350.7	10771	9260.2	9917.2	10986	8335.8	
目标实际方位 (度)	45.843	73.706	48.271	80.336	61.096	46.039	
KF 估计距离 (米)	7376.8	10738	9402.2	9904.1	10954	8300.6	
KF 距离误差 (%)	0.35411	0.30625	1.5337	0.13233	0.28846	0.42251	
KF 估计方位 (度)	45.944	73.771	48.374	80.696	61.179	45.846	
KF 方位误差 (度)	0.101	0.065	0.103	0.36	0.083	-0.193	
AKF 估计距离 (米)	7486.2	10742	9318.8	9897.5	10970	8325	
AKF 距离误差 (%)	1.8433	0.27563	0.63243	0.10833	0.14144	0.13029	
AKF 估计方位 (度)	46.593	73.744	48.302	80.447	61.14	46.14	
AKF 方位误差 (度)	0.75	0.038	0.031	0.111	0.054	0.101	

表 2 被动声纳数据融合和交叉定位融合仿真数据							
时间 (秒)	20	50	100	200	400	600	
目标实际距离 (米)	5951.2	5796.8	5696.2	6093.8	8632.4	12217	
目标实际方位 (度)	76.8337	70.6916	59.9486	39.1858	11.2890	-2.2079	
融合距离 (米)	5933.8	5835.2	5655	6118.1	8641.6	12199	
融合距离误差 (%)	0.2915	0.6628	0.7226	0.3979	0.1058	0.1471	
融合方位 (度)	76.2039	70.7701	59.8395	39.0825	11.1846	-2.1589	
融合方位误差 (度)	-0.6298	0.0785	-0.1091	-0.1033	-0.1044	0.0490	
交叉定位距离 (米)	6228.8	5254.4	5216.6	5700.1	9071.1	12164	
定位距离误差 (%)	4.6658	9.3568	8.4182	6.4609	5.0815	0.4276	
交叉定位方位 (度)	76.1421	70.9867	60.0745	39.3849	11.0223	-2.1526	
定位方位误差 (度)	-0.6916	0.2951	0.1259	0.1991	-0.2667	0.0553	

注: 所有值均是相对声纳 1 而言, 即相对于坐标原点而言。

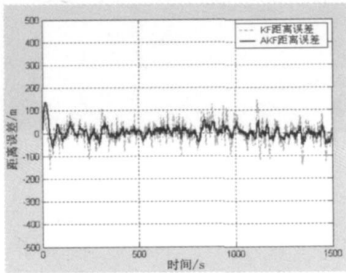


图 1 转弯运动距离误差曲线图

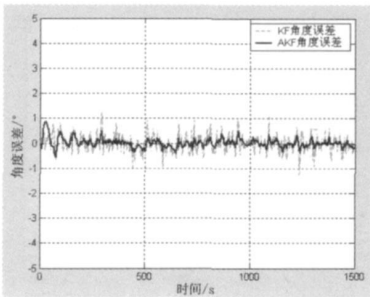


图 2 转弯运动方位误差曲线图

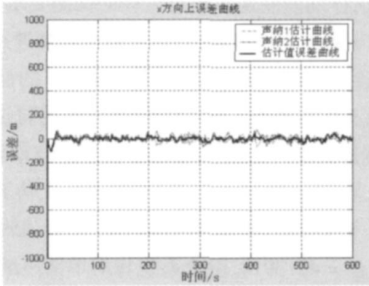


图 3 x 方向上距离误差曲线图

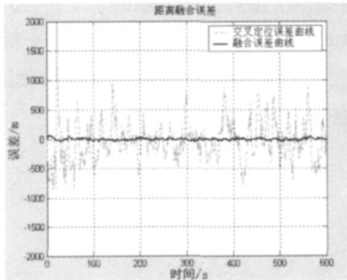


图 4 融合距离与定位距离误差图

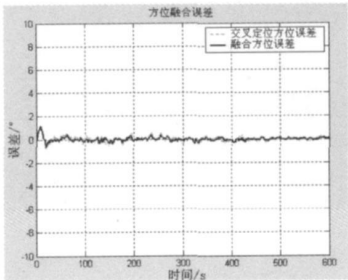


图 5 融合方位与定位方位误差图

4.2 结果分析

1) 从表 1 可以看出, KF 和 AKF 对目标距离估计误差基

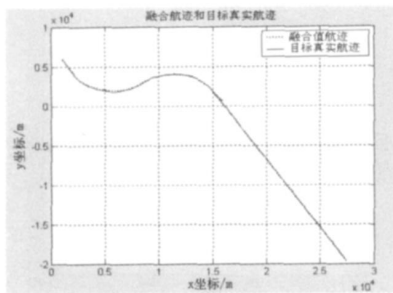


图 6 融合航迹和真实航迹比较图

本控制在 2% 之内,方位误差也较小,故 KF 和 AKF 对目标距离和方位的估计均能满足声纳对目标的探测要求。

2) 从图 1 和图 2 可以看出,当目标存在加速度扰动或对噪声统计特性不准时,AKF 的性能明显比 KF 的性能优越。

3) 从图 3 可以看出,当采用两部声纳同时进行滤波处理,并进行航迹关联时,x 方向上融合误差值与单部声纳滤波误差值相比,改善效果并不明显。进行 100 次仿真实验情况下,x 方向上平均均方差值为: $\sigma_{\text{融合系统}}^2 = 45.8596$ ,  $\sigma_{\text{声纳1}}^2 = 49.0658$ ,  $\sigma_{\text{声纳2}}^2 = 49.3918$ ,融合系统相对单部声纳略有提高。

4) 从表 2 和图 4 可以看出,融合系统的距离误差在 1% 之内,而简单交叉定位距离误差最高值达到 10% 左右。随着目标距离值变大,交叉定位的距离误差值会越来越大,而融合系统的距离误差值则趋向稳定状态。

5) 图 5 表明,融合系统的方位误差值小于简单交叉定位方位误差值。图 6 为融合航迹和真实航迹比较图,从图可以看出,融合系统能够较好的跟踪目标。

## 5 结束语

精确对目标跟踪是编队作战的基础,在目标跟踪算法上,kalman 滤波占有重要的地位。本文对 KF 和 AKF 的性能进行了比较,对融合系统的航迹关联算法进行了研究,仿真实验的结果表明:当目标存在加速度扰动或对噪声统计特性不准时,AKF 比 KF 的性能优越,构建的融合系统较简单交叉定位算法精度得到了大幅度提高,能够满足水下目标跟踪的要求。

## 参考文献:

- [1] 丁兴俊,周德云,胡昌华,王青.基于主/被动雷达双传感器的自适应跟踪算法[J].弹箭与制导学报,2006,26(1):147-149
- [2] 秦勤.雷达目标跟踪的卡尔曼滤波方法的研究[D].大连海事大学硕士学位论文,2006
- [3] 杨万海.多传感器数据融合及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [4] 周宏仁,敬忠良,王培德.机动目标跟踪[M].北京:国防工业出版社,1991.
- [5] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2006.



## [作者简介]

李群力(1971-),男(汉族),陕西礼泉县人,硕士,工程师。主要研究方向为计算机应用研究。

傅妍芳(1978-),女(汉族),甘肃天水县人,博士研究生。主要研究方向为分布交互仿真与仿真网络技术。

