多平台协同跟踪中的传感器分配方法研究

王航宇[1]，李　鹏[1]，张　泉[2]

(1. 海军工程大学电子工程学院　武汉　430033;　2. 中国人民解放军91446部队　河北 涿州　072750)

【摘要】 多平台多传感器的协同探测是协同作战的重要组成部分，如何有效地进行传感器管理是协同探测问题的关键。该文提出了一种基于 H_∞ 滤波器目标跟踪的传感器分配方法，用集合论中关系的概念定义了传感器目标分配集，建立了传感器管理的分配模型，将每一种传感器的检测方案看成一个 H_∞ 滤波器，根据 H_∞ 滤波误差上限 γ 选择最佳的分配方案。

关　键　词　协同探测;　H_∞ 滤波器;　传感器管理;　目标跟踪

中图分类号　TP391　　　　**文献标识码**　A

Study on Sensor-Assignment Method of Cooperative Target-Tracking on Multiple Platforms

WANG Hang-yu[1]，LI Peng[1]，ZHANG Quan[2]

(1. School of Electronic Engineering, Navy University of Engineering　Wuhan　430033;

2. Unit 91446, Pepole's Liberation Army　Zhuozhou　Hebei　072750)

Abstract　Cooperative detection of multiple sensors on multiple platforms is an important composition in cooperative engagement. How to manage these sensors is the key problem of cooperative detection. A sensor-assignment approach based on H_∞ filter is presented in this paper. The main idea is to define sensor-assignment scheme set according to the concept of relation in set theory, and regard every sensor-assignment scheme as an H_∞ filter. So the optimal scheme can be chosen based on error upper limit γ of H_∞ filtering.

Key words　cooperative detection;　H_∞ filter;　sensor management;　target-tracking

实现协同探测是协同作战的关键，多平台多传感器管理是协同探测的基础，而动态的传感器目标分配是传感器管理的重要内容。动态传感器目标分配是指对每一个传感器目标分配方案建立相应系统状态空间模型，根据一定的准则评价各个分配方案，再确定最优方案。在系统状态空间模型中，系统的状态往往不能直接测量得到，因此需要用系统的输入/输出信息来重构系统的状态向量，或估计系统状态向量的某个线性组合。假设系统和测量中存在的扰动为白噪声或具有已知谱密度的噪声，可以用估计误差方差作为衡量滤波器的性能指标，进而通过最小化这一性能指标来设计最优滤波器。文献[1]中以Kalman滤波器为基础对传感器管理算法进行了研究。然而，在大多数情况下系统扰动的统计特性是难以确定的，如果将扰动看作是具有有限能量的任意信号，就可以利用扰动输入到估计误差的传递函数的 H_∞ 范数作为衡量滤波器的性能指标，通过限制这一性能指标在给定阈值之内来设计系统的 H_∞ 滤波器。

H_∞ 滤波器在雷达设计、故障检测、信号处理等领域中已有了广泛的应用。本文探讨了基于 H_∞ 滤波器的传感器管理方法，将每一种传感器的检测方案看作一个 H_∞ 滤波器，分别计算每个滤波器(方案)的 H_∞ 误差上限 γ，γ 值最小的方案就是要选择的分配方案。

1　H_∞ 滤波器设计[2-4]

考虑由状态方程描述的线性时不变系统 Ⅰ：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{w}(t) \quad x_0 = 0 \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}\boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{z}(t) = \boldsymbol{L}\boldsymbol{x}(t) \end{cases} \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{x}(t) \in R^n$ 是系统的状态向量；$\boldsymbol{y}(t) \in R^r$ 是测量输出；$\boldsymbol{w}(t) \in R^m$ 是噪声信号(包括过程和测量噪声)；$\boldsymbol{z}(t) \in R^p$ 是待估计的信号向量；x_0 是初始状态，

收稿日期：2006－03－14；修回日期：2006－07－21

作者简介：王航宇(1965－)，男，博士，教授，主要从事舰艇指挥控制系统方面的研究；李　鹏(1974－)，男，硕士，讲师，主要从事舰艇作战系统方面的研究；张　泉(1963－)，男，学士，教授，主要从事作战运用系统方面的研究.

假定其是已知的，且不失一般性，可以假定 $x_0 = 0$。

在滤波器的设计中，总是假定式(1)系统是渐近稳定的。由于估计误差依赖于式(1)系统的状态，因此，式(1)系统的稳定性对于保证估计误差的有界性是必要的。对给定的常数 $\gamma > 0$，要求设计一个渐近稳定的线性滤波器Ⅱ：

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) = \boldsymbol{A}_f \hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{B}_f \boldsymbol{y}(t) \quad \hat{\boldsymbol{x}}_0 = 0 \\ \hat{z}(t) = \boldsymbol{C}_f \hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{D}_f \boldsymbol{y}(t) \end{cases} \tag{2}$$

使得从扰动输入 $\boldsymbol{w}$ 到估计误差 $\tilde{\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{z} - \hat{\boldsymbol{z}}$ 的传递函数 H_∞ 范数小于给定的常数 γ。具有这样性质的滤波器Ⅱ称为是系统Ⅰ的一个 H_∞ 滤波器。定义：

$$\tilde{\boldsymbol{x}}(t) = [\boldsymbol{x}(t)^{\mathrm{T}} \quad \hat{\boldsymbol{x}}(t)^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$$

则滤波误差动态方程是：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(t) = \hat{\boldsymbol{A}}\tilde{\boldsymbol{x}}(t) + \hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{w}(t) \quad \tilde{x}_0 = 0 \\ \boldsymbol{z}(t) = \hat{\boldsymbol{C}}\tilde{\boldsymbol{x}}(t) + \hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{w}(t) \end{cases} \tag{3}$$

式中

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{B}_f\boldsymbol{C} & \boldsymbol{A}_f \end{bmatrix} \\ \hat{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B}_f\boldsymbol{D} \end{bmatrix} \\ \hat{\boldsymbol{C}} = [\boldsymbol{L} - \boldsymbol{D}_f\boldsymbol{C} - \boldsymbol{C}_f] \\ \hat{\boldsymbol{D}} = -\boldsymbol{D}_f\boldsymbol{D} \end{cases} \tag{4}$$

则 H_∞ 滤波器的设计问题是要求设计滤波器II，使得滤波误差动态系统式(3)是渐近稳定的，且扰动 $\boldsymbol{w}$ 到估计误差 $\tilde{z}$ 的传递函数 $\boldsymbol{H}_{\tilde{z}w} = \hat{\boldsymbol{C}}(s\boldsymbol{I} - \hat{\boldsymbol{A}})^{-1}\hat{\boldsymbol{B}} + \hat{\boldsymbol{D}}$ 满足 $\|\boldsymbol{H}_{\tilde{z}w}\| < \gamma$。

2 基于 H_∞ 滤波器的目标跟踪传感器分配模型

设 $C = \{c_1, c_2, \cdots, c_n\}$ 表示被跟踪的目标的集合，则跟踪问题传感器管理模型就是决定每一个采样时刻用哪一种方案对某个目标进行检测，使检测误差的上限最小。$S = \{s_1, s_2, \cdots, s_m\}$ 表示传感器集合，$M = S \times T = \{<s_1, t_1>, <s_1, t_1>, \cdots, <s_n, t_m>\}$，$P(M)$ 表示 M 的幂集合 $P(M) = \{m_0, m_1, \cdots, m_d\}$。其中，$<,>$ 表示序偶，$d = 2mn - 1$。可用的检测方案是 $P(M)$ 的一个子集，记为 $B(M)$，$B(M) = \{b_1, b_2, \cdots, b_l\}$，即可用的检测方案共有 l 种。方案中包含三种情况：(1) 一个传感器只对一个目标进行检测；(2) 一个传感器对多个目标进行检测；(3) 多个传感器同时对一个目标进行检测。

(1) 先考虑一个简单的情况：设有一个目标 c，可选择的传感器集合 $S = \{s_1, s_2, \cdots, s_m\}$，用传感器 s 对目标 c 进行观测。

状态方程观测方程为 $\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}\boldsymbol{w}(t) \\ z(t) = \boldsymbol{L}\boldsymbol{x}(t) \end{cases}$

滤波器是 $\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) = \boldsymbol{A}_f \hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{B}_f \boldsymbol{y}(t) \\ \hat{z}(t) = \boldsymbol{C}_f \hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{D}_f \boldsymbol{y}(t) \end{cases}$。这时，从扰动 $\boldsymbol{w}$ 到估计误差 $\tilde{z}$ 的传递函数 $\boldsymbol{H}_{\tilde{z}w} = \hat{\boldsymbol{C}}(s\boldsymbol{I} - \hat{\boldsymbol{A}})^{-1}\hat{\boldsymbol{B}} + \hat{\boldsymbol{D}}$ 满足 $\|\boldsymbol{H}_{\tilde{z}w}\| < \gamma$。

对可选择的传感器集合 $S = \{s_1, s_2, \cdots, s_m\}$ 中所有的传感器 s 进行以上设计，可以分别得到 m 个 γ 值：$\gamma_1, \gamma_2, \cdots, \gamma_m$，如果 $\gamma_k = \min\{\gamma_1, \gamma_2, \cdots, \gamma_m\}$，表示应该用传感器 s_k 对目标 c 进行观测，这时，得到的检测误差的上限最小。

(2) 考虑用多个传感器观测一个目标 c 时的情况：为了使问题的描述简明，假设有两种可选择的方案 $B(M) = \{b_1, b_2\}$，其中 $b_1 = \{<s_1, c>, <s_2, c>\}$，$b_2 = \{<s_3, c>, <s_4, c>\}$

采用方案 b_1 时，状态方程和观测方程分别是：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{y}_1(t) = \boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}_1\boldsymbol{w}(t) \\ z_1(t) = \boldsymbol{L}_1\boldsymbol{x}(t) \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{y}_2(t) = \boldsymbol{C}_2\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}_2\boldsymbol{w}(t) \\ z_2(t) = \boldsymbol{L}_2\boldsymbol{x}(t) \end{cases}$$

它们对应滤波器是：

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) = \boldsymbol{A}_{f1}\hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{B}_{f1}\boldsymbol{y}_1(t) \\ \hat{z}_1(t) = \boldsymbol{C}_{f1}\hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{D}_{f1}\boldsymbol{y}_1(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) = \boldsymbol{A}_{f2}\hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{B}_{f2}\boldsymbol{y}_2(t) \\ \hat{z}_2(t) = \boldsymbol{C}_{f2}\hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{D}_{f2}\boldsymbol{y}_2(t) \end{cases}$$

滤波误差的上限分别是 γ_1，γ_2。

采用方案 b_2 时，同样得到滤波误差的上限分别是 γ_3，γ_4。

如果 $\max\{\gamma_1, \gamma_2\} < \max\{\gamma_3, \gamma_4\}$，则应选用方案 b_1，否则，选用方案 b_2。也就是说，当多个传感器对单个目标检测时，取每组中最大值的最小值对应的方案。

(3) 考虑用多个传感器观测多个目标时的情况：为了使问题的描述简明，假设有四个传感器 s_1、s_2、s_3、s_4，同时检测两个目标 c_1, c_2，有两种可选择的方案 $B(M) = \{b_1, b_2\}$。其中：$b_1 = \{<s_1, c_1>, <s_2, c_2>\}$，$b_2 = \{<s_3, c_1>, <s_4, c_2>\}$。

采用方案 b_1 时，状态方程和观测方程分别是：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_1(t) = \boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}_1(t) + \boldsymbol{B}_1\boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{y}_1(t) = \boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}_1(t) + \boldsymbol{D}_1\boldsymbol{w}(t) \\ z_1(t) = \boldsymbol{L}_1\boldsymbol{x}_1(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_2(t)=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}_2(t)+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{w}(t)\\ \boldsymbol{y}_2(t)=\boldsymbol{C}_2\boldsymbol{x}_2(t)+\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{w}(t)\\ z_2(t)=\boldsymbol{L}_2\boldsymbol{x}_2(t)\end{cases}$$

它们对应滤波器分别是：

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{x}}_1(t)=\boldsymbol{A}_{f1}\hat{\boldsymbol{x}}_1(t)+\boldsymbol{B}_{f1}\boldsymbol{y}_1(t)\\ \hat{z}_1(t)=\boldsymbol{C}_{f1}\hat{\boldsymbol{x}}_1(t)+\boldsymbol{D}_{f1}\boldsymbol{y}_1(t)\end{cases}$$

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{x}}_2(t)=\boldsymbol{A}_{f2}\hat{\boldsymbol{x}}_2(t)+\boldsymbol{B}_{f2}\boldsymbol{y}_2(t)\\ \hat{z}_2(t)=\boldsymbol{C}_{f2}\hat{\boldsymbol{x}}_2(t)+\boldsymbol{D}_{f2}\boldsymbol{y}_2(t)\end{cases}$$

滤波误差的上限分别是γ_{11},γ_{12}。其中γ有两个下标，第一个表示对应的方案，第二个表示对应的传感器。

采用方案b_2时，同样得到滤波误差的上限分别是γ_{13},γ_{14}。其中γ有两个下标，第一个表示对应的方案，第二个表示对应的传感器。

如果$\max\{\gamma_{11},\gamma_{12}\}<\max\{\gamma_{13},\gamma_{14}\}$，应运用方案$b_1$，否则，选用方案$b_2$。

3 传感器分配模型的求解

完成滤波器设计后，H_∞滤波器滤波误差上限的求取是问题的关键，下面通过一个实例说明利用MATLAB求解滤波误差上限γ的过程[5-6]：

考虑系统：

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{b}\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{d}_1\boldsymbol{w}(t)$$

$$\boldsymbol{y}(t)=\boldsymbol{c}\boldsymbol{x}(t)+d_2\boldsymbol{w}(t)$$

式中 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}-2&-1&4\\1&5&1\\-1&0&1\end{pmatrix}$；$\boldsymbol{b}=\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}$；$\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}=\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix}$；$\boldsymbol{d}_1=\begin{pmatrix}0.2\\0.1\\0.2\end{pmatrix}$；$d_2=0.3$；$\boldsymbol{w}(t)$为零均值高斯白噪声，$\boldsymbol{w}=\boldsymbol{E}\{\boldsymbol{w}(t)\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(t)\}=1$。该系统的特征值是$\{-0.453\,1+1.496\,9\mathrm{i},\ -0.453\,1-1.496\,9\mathrm{i}, 4.906\,2\}$，系统不稳定，要求利用状态反馈，$\boldsymbol{u}(t)=K\boldsymbol{x}(t)$使系统稳定且满足以下指标。

(1) 系统稳定且稳态的状态协方差阵：

$$\boldsymbol{P}<\begin{pmatrix}0.3&0&0\\0&0.3&0\\0&0&0.2\end{pmatrix}$$

(2) 系统的极点位于以-2为圆心，1为半径的圆盘内。

(3) $\|\boldsymbol{H}(s)\|_\infty<0.7$。其中$\|\boldsymbol{H}(s)\|_\infty=\boldsymbol{c}[s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{b}\boldsymbol{K})]^{-1}\boldsymbol{d}_1+\boldsymbol{d}_2$。

用MATLAB和MIS[7]计算得到$K=\left[-1.554\,6,-7.712\,0,-0.923\,8\right]$，利用lyap( )和eig( )函数可以计算得到闭环系统的特征值$\{-2.487\,3+0.735\,8\mathrm{i},-2.487\,3-0.735\,8\mathrm{i},-1.215\,9\}$，用normhinf ( )函数计算得到$\|\boldsymbol{H}(s)\|_\infty=0.360\,2$。

4 结 论

本文提出了一种用于目标跟踪问题的基于H_∞滤波器指标的传感器分配方法，利用集合论中的关系建立了传感器-目标的配对模型，并将传感器分配方案与滤波器结合起来。由控制理论的知识知道，滤波器设计问题是输出反馈控制器设计问题的一个对偶问题，因此，不确定系统鲁棒控制问题的处理方法都可以用来解决滤波器的设计问题。这类方法的优点是不需要对目标的概率统计特性作假设，只要目标的扰动是具有有限能量的任意信号就可以使用此类方法，所以，本文的方法更具有普遍性。

参 考 文 献

[1] DITZLER E A. A demonstration of multi-sensor tracking[C]// Proceedings of 1987 Tri-Svc Data fusion symposium. Warminster, Pa: JHU/APL, Laurel, Md Pubished, 1987.

[2] IWASAKI T, SKELTON R E. All controllers for the general H∞ control problem: LMI existence conditions and state space formulas[J]. Automatica, 1994, 30(8): 1307-1317.

[3] GRIGORIADIS K M, SKETON R E. Low-order control design for LMI problems using alternating projection methods[J]. Automatica, 1996, 32(8): 1117-1123.

[4] DOYLE J C, GLOVER K, KHARGONEKAR P P, et al. State-space solutions to standard H2 and H∞ control problems[J]. IEEE Trans Auto Contr, 1989, AC-34(8): 831-847.

[5] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB语言及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

[6] 魏克新, 王云量, 陈志敏, 等. MATLAB语言与自动控制系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社. 1997.

[7] GAHINET P M, NEMIROVSKI A. The LMI control toolbox[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. [S.l.]: IEEE, 1994.

编 辑 税 红