

文章编号: 1000-8152(2004)04-0635-04

带有色观测噪声系统多传感器标量加权 最优信息融合稳态 Kalman 滤波器

孙书利^{1,2}, 邓自立²

(1. 哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江大学 自动化系, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 基于标量加权多传感器线性最小方差最优信息融合准则, 对被多传感器观测的带有色观测噪声的离散线性随机控制系统, 提出了一种具有两层融合结构的标量加权信息融合稳态 Kalman 滤波器, 它等价于相应的带相关噪声系统的最优信息融合稳态 Kalman 预报器. 最优信息融合稳态预报器可在所有局部预报器达到稳态时, 通过一次融合获得, 且任两个子系统之间的稳态预报误差互协方差阵可通过任选初值迭代求得, 并证明了它的收敛性. 通过将它应用到带三个传感器的雷达跟踪系统验证了其有效性.

关键词: 多传感器; 标量加权最优信息融合; 稳态 Kalman 滤波器; 有色观测噪声; 雷达跟踪系统

中图分类号: O211 **文献标识码:** A

Multi-sensor optimal information fusion steady-state Kalman filter weighted by scalars for systems with colored measurement noises

SUN Shu-li^{1,2}, DENG Zi-li²

(1. Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. Department of Automation, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Based on the multi-sensor optimal information fusion criterion weighted by scalars in the linear minimum variance, a scalar weighting information fusion steady-state Kalman filter with a two-layer fusion structure is given for discrete linear stochastic control systems measured by multiple sensors with colored measurement noises, which is equivalent to an optimal information fusion steady-state Kalman predictor for the corresponding systems with correlated noises. The optimal information fusion steady-state predictor can be obtained only by fusing once after all local predictors reach the steady state. The solutions of steady-state prediction error cross-covariance matrices between any two subsystems can be obtained by iteration with arbitrary initial values, whose convergence is proved. Its effectiveness is shown by applying it to a radar tracking system with three sensors.

Key words: multi-sensor; scalar weighting optimal information fusion; steady-state Kalman filter; colored measurement noises; radar tracking system

1 引言 (Introduction)

信息融合 Kalman 滤波理论在机动目标的组合导航中具有广泛的应用. 有关分布式融合滤波及其应用的研究已有较多报导^[1-7], 文献[3]提出了著名的联合信息融合 Kalman 滤波器. 文献[4]研究了两传感器稳态滤波误差互协方差阵存在的充要条件. 文献[5]提出了一种标量加权信息融合稳态 Kalman 滤波器, 但局部状态估计误差不相关的假设不符合一般情形. 文献[6,7]考虑了局部状态估计误差的相关性, 给出了一种标量加权线性最小方差融合算法, 推广了文献[5]的结果, 并处理了带独立噪声系统的

Kalman 滤波问题. 本文中基于标量加权最优信息融合准则, 对带有色观测噪声多传感器离散线性随机控制系统, 给出了标量加权最优信息融合稳态 Kalman 滤波器, 它等价一个带相关噪声多传感器离散线性随机控制系统的信息融合稳态 Kalman 预报器. 还给出任两个局部预报误差稳态互协方差阵所满足的矩阵方程, 并证明了稳态解的收敛性.

考虑带有色观测噪声的多传感器离散随机控制系统

$$\mathbf{x}(t+1) = \Phi\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \Gamma\mathbf{w}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_i(t) = \bar{\mathbf{H}}_i\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\eta}_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, l, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\eta}_i(t+1) = C_i \boldsymbol{\eta}_i(t) + \boldsymbol{\xi}_i(t), i = 1, 2, \dots, l. \quad (3)$$

其中状态 $\boldsymbol{x}(t) \in \mathbb{R}^n$, 观测 $\boldsymbol{y}_i(t) \in \mathbb{R}^{m_i}$, 已知控制输入 $\boldsymbol{u}(t) \in \mathbb{R}^q$, 有色噪声 $\boldsymbol{\eta}_i(t) \in \mathbb{R}^{m_i}$, $\Phi, B, \Gamma, \bar{H}_i, C_i$ 为适当维数的常矩阵.

假设 1 $\boldsymbol{w}(t) \in \mathbb{R}^r$ 和 $\boldsymbol{\xi}_i(t) \in \mathbb{R}^{m_i}$ 是带零均值、方差阵各为 Q_w 和 Q_{ξ_i} 的独立白噪声 ($i = 1, 2, \dots, l$).

假设 2 初始观测时刻 $t_0 = -\infty$.

假设 3 对任意的 $i = 1, 2, \dots, l$, (Φ, H_i) 为完全可检测对, $(\Phi - \Gamma S_i R_i^{-1} H_i, \Gamma Q_i)$ 为完全能稳对, 其中 $\bar{Q}_i \bar{Q}_i^T = Q_w - S_i R_i^{-1} S_i^T$. 并且

$$\begin{cases} H_i = \bar{H}_i \Phi - C_i \bar{H}_i, S_i = Q_w \Gamma^T \bar{H}_i^T, \\ R_i = \bar{H}_i \Gamma Q_w \Gamma^T \bar{H}_i^T + Q_{\xi_i}. \end{cases} \quad (4)$$

问题是基于观测 $(\boldsymbol{y}_i(t), \boldsymbol{y}_i(t-1), \dots), i = 1, 2, \dots, l$, 求状态 $\boldsymbol{x}(t)$ 的标量加权最优信息融合稳态 Kalman 滤波器 $\hat{\boldsymbol{x}}_0(t|t)$, 使其满足

a) 无偏性, 即 $E\hat{\boldsymbol{x}}_0(t|t) = E\boldsymbol{x}(t)$.

b) 最优性, 即极小化稳态融合估计误差方差阵的 $\text{tr}P_0 = \min\{\text{tr}P\}$. 其中 P 为任一标量加权融合滤波器的方差, P_0 为最优标量加权融合滤波器的方差. tr 表示矩阵的迹.

2 标量加权最优信息融合准则 (Scalar weighting optimal information fusion criterion)

为书写方便, 下面的推导中省略时间 t .

引理^[6,7] 设 $\hat{\boldsymbol{x}}_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 为对 n 维随机向量 \boldsymbol{x} 的 l 个无偏估计, 记估计误差为 $\tilde{\boldsymbol{x}}_i = \boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}}_i$, 且 $\tilde{\boldsymbol{x}}_i$ 与 $\tilde{\boldsymbol{x}}_j (i \neq j)$ 相关, 误差方差和互协方差阵分别为 P_{ii} 和 P_{ij} . 则标量加权最优信息融合估计为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_0 = \bar{\alpha}_1 \hat{\boldsymbol{x}}_1 + \bar{\alpha}_2 \hat{\boldsymbol{x}}_2 + \dots + \bar{\alpha}_l \hat{\boldsymbol{x}}_l. \quad (5)$$

其中最优融合系数 $\bar{\alpha}_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 由下式计算

$$\bar{\boldsymbol{\alpha}} = \frac{A^{-1} \boldsymbol{e}}{\boldsymbol{e}^T A^{-1} \boldsymbol{e}}. \quad (6)$$

其中 $A = \text{tr}P_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, l)$ 为 $l \times l$ 的正定矩阵. $\bar{\boldsymbol{\alpha}} = [\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, \dots, \bar{\alpha}_l]^T$ 和 $\boldsymbol{e} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 均为 l 维向量. 相应的最优信息融合估计误差方差阵为

$$P_0 = \sum_{i,j=1}^l \bar{\alpha}_i \bar{\alpha}_j P_{ij}, \quad (7)$$

且有关系 $\text{tr}P_0 \leq \text{tr}P_{ii}, i = 1, 2, \dots, l$.

3 标量加权最优信息融合稳态 Kalman 预报器 (Scalar weighting optimal information fusion steady-state Kalman predictor)

原系统(1)~(3)等价于如下带相关噪声的新

系统

$$\boldsymbol{x}(t+1) = \Phi \boldsymbol{x}(t) + B \boldsymbol{u}(t) + \Gamma \boldsymbol{w}(t), \quad (8)$$

$$\boldsymbol{z}_i(t) = H_i \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{v}_i(t), i = 1, 2, \dots, l. \quad (9)$$

其中

$$\boldsymbol{z}_i(t) = (I_{m_i} - q^{-1} C_i) \boldsymbol{y}_i(t+1) - \bar{H}_i B \boldsymbol{u}(t),$$

$$H_i = \bar{H}_i \Phi - C_i \bar{H}_i, \boldsymbol{v}_i(t) = \bar{H}_i \Gamma \boldsymbol{w}(t) + \boldsymbol{\xi}_i(t).$$

白噪声 $\boldsymbol{w}(t)$ 与 $\boldsymbol{v}_i(t) (i = 1, 2, \dots, l)$ 相关, 即

$$\begin{cases} E \left\{ \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{v}_i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}^T(k) & \boldsymbol{v}_i^T(k) \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_w & S_i \\ S_i^T & R_i \end{bmatrix} \delta_{tk}, \\ E[\boldsymbol{v}_i(t) \boldsymbol{v}_j^T(k)] = S_{ij} \delta_{tk}, i \neq j. \end{cases} \quad (10)$$

其中 $S_i = Q_w \Gamma^T \bar{H}_i^T, R_i = \bar{H}_i \Gamma Q_w \Gamma^T \bar{H}_i^T + Q_{\xi_i}, S_{ij} = \bar{H}_i \Gamma Q_w \Gamma^T \bar{H}_j^T, \delta_{tk}$ 是 Kronecker 函数.

于是, 带有色观测噪声的原系统(1)~(3)基于观测 $(\boldsymbol{y}_i(t), \boldsymbol{y}_i(t-1), \dots), i = 1, 2, \dots, l$, 求最优信息融合稳态 Kalman 滤波器 $\hat{\boldsymbol{x}}_0(t|t)$ 的问题, 就转化为带相关噪声的新系统(8), (9) 基于新观测 $(\boldsymbol{z}_i(t-1), \boldsymbol{z}_i(t-2), \dots), i = 1, 2, \dots, l$, 求最优信息融合稳态 Kalman 预报器 $\hat{\boldsymbol{x}}_0(t|t-1)$ 的问题.

在假设 1~3 下, 带多传感器新系统(8), (9) 的第 i 个传感器子系统有稳态最优 Kalman 预报器^[8]

$$\hat{\boldsymbol{x}}_i(t+1|t) = \Phi \hat{\boldsymbol{x}}_i(t|t-1) + B \boldsymbol{u}(t) + K_{p_i} \boldsymbol{\varepsilon}_i(t), \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) = \boldsymbol{z}_i(t) - H_i \hat{\boldsymbol{x}}_i(t|t-1), \quad (12)$$

$$K_{p_i} = (\Phi \Sigma_i H_i^T + \Gamma S_i) [H_i \Sigma_i H_i^T + R_i]^{-1}. \quad (13)$$

其中初值 $\hat{\boldsymbol{x}}_i(0| -1) = \boldsymbol{\mu}_0$. K_{p_i} 是稳态一步预报增益阵, $\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)$ 是新息过程, 稳态一步预报误差方差阵 Σ_i 满足如下 Riccati 方程:

$$\begin{aligned} \Sigma_i = & (\Phi - K_{p_i} H_i) \Sigma_i (\Phi - K_{p_i} H_i)^T + \Gamma Q_w \Gamma^T - \\ & \Gamma S_i K_{p_i}^T - K_{p_i} S_i^T \Gamma^T + K_{p_i} R_i K_{p_i}^T, \end{aligned} \quad (14)$$

且式(14)可任选初值 $\Sigma_i(0| -1)$ 迭代计算.

定理 1 带多传感器系统(8), (9) 在假设 1~3 下, 第 i 个和第 j 个传感器子系统之间的稳态 Kalman 预报误差互协方差阵 Σ_{ij} 满足如下矩阵方程:

$$\begin{aligned} \Sigma_{ij} = & (\Phi - K_{p_i} H_i) \Sigma_{ij} (\Phi - K_{p_j} H_j)^T + \Gamma Q_w \Gamma^T - \\ & \Gamma S_j K_{p_i}^T - K_{p_i} S_j^T \Gamma^T + K_{p_i} S_{ij} K_{p_j}^T. \end{aligned} \quad (15)$$

证 由式(8), (9), (11) 与 (12), 第 i 个传感器子系统的局部稳态预报误差方程为^[8]

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_i(t+1|t) =$$

$$(\Phi - K_p H_i) \hat{x}_i(t | t - 1) + \Gamma w(t) - K_p v_i(t). \quad (16)$$

由于 $\hat{x}_i(t | t - 1)$ 属于由 $(w(t - 1), \dots, v_i(t - 1), \dots)$ 生成的线性流行, 则由射影理论^[8] 有 $\hat{x}_i(t | t - 1)$ 不相关于 $v_j(t) (i, j = 1, 2, \dots, l)$. 利用式(10) 和(16) 有第 i 个和第 j 个传感器子系统之间的稳态 Kalman 预报误差互协方差阵为(15). 证毕.

定理 2 带多传感器系统(8), (9)在假设 1~3 下, 第 i 个和第 j 个传感器子系统之间的稳态预报误差互协方差阵 Σ_{ij} 可迭代计算为

$$\Sigma_{ij}(t+1 | t) = (\Phi - K_p H_i) \Sigma_{ij}(t | t-1) (\Phi - K_p H_j)^T + \Gamma Q_w \Gamma^T - \Gamma S_j K_p^T - K_p S_i^T \Gamma^T + K_p S_{ij} K_p^T. \quad (17)$$

其中初值 $\Sigma_{ij}(0 | -1)$ 可任意选取, 且有

$$\Sigma_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Sigma_{ij}(t | t - 1), i, j = 1, 2, \dots, l, i \neq j. \quad (18)$$

证 定义误差 $\delta_{ij}(t)$ 为

$$\delta_{ij}(t) = \Sigma_{ij}(t | t - 1) - \Sigma_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, l, i \neq j. \quad (19)$$

用式(17)减去式(15)有

$$\delta_{ij}(t + 1) = \Psi_i \delta_{ij}(t) \Psi_j^T, \quad (20)$$

其中 $\Psi_i = \Phi - K_p H_i$ 是稳定矩阵^[8]. 由式(20)迭代有

$$\delta_{ij}(t) = (\Psi_i)^t \delta_{ij}(0) (\Psi_j^T)^t. \quad (21)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\Psi_i^t \rightarrow 0, (\Psi_j^T)^t \rightarrow 0$, 于是有

$$\delta_{ij}(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty, i, j = 1, 2, \dots, l, i \neq j. \quad (22)$$

即(18)成立. 因此, 稳态预报误差互协方差阵 Σ_{ij} 可由(15)任选初值 $\Sigma_{ij}(0 | -1)$ 迭代计算. 证毕.

由前面的引理 1, 可得定理 3.

定理 3 带多传感器系统(8), (9)在假设 1~3 下, 有标量加权最优信息融合稳态 Kalman 预报器

$$\hat{x}_0(t | t - 1) = \bar{\alpha}_1 \hat{x}_1(t | t - 1) + \dots + \bar{\alpha}_l \hat{x}_l(t | t - 1). \quad (23)$$

其中 $\hat{x}_i(t | t - 1) (i = 1, 2, \dots, l)$ 由式(11)~(14) 计算, 最优融合系数 $\bar{\alpha}_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 由式(6) 计算. 且最优融合方差 Σ_0 由式(7) 计算, 局部子系统的预报误差方差阵 Σ_i 和互协方差阵 $\Sigma_{ij} (i \neq j)$ 分别由式(14) 和(15) 计算, 其中的 Σ_i 和 Σ_{ij} 即为定理 1 中的 P_{ii} 和 P_{ij} .

定理 3 中的标量加权最优信息融合稳态

Kalman 预报器具有图 1 所示的两层融合结构.

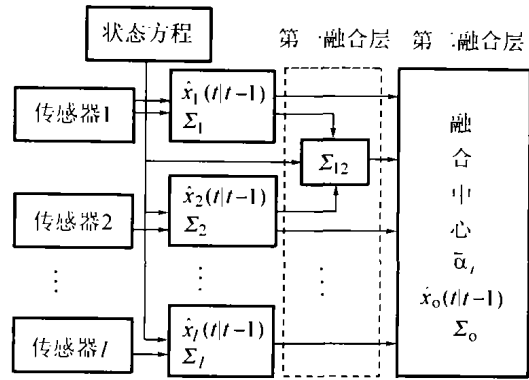


图 1 标量加权最优信息融合稳态 Kalman 预报器的两层融合结构

Fig. 1 Two-layer fusion structure of optimal information fusion steady-state Kalman predictor weighted by scalars

在图 1 中, 第一融合层具有网状并行结构, 用来融合每两个传感器子系统的稳态预报误差以确定它们的稳态预报误差协方差阵; 第二融合层是融合中心, 用来融合所有传感器的预报估值和预报误差方差阵, 以及从第一融合层传来的每两个传感器之间的预报误差互协方差阵, 以确定标量加权系数, 从而获得最终的融合估计.

4 仿真例子 (Simulation example)

考虑带 3 个传感器的跟踪系统

$$x(t + 1) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \end{bmatrix} w(t), \quad (24)$$

$$y_i(t) = \bar{H}_i x(t) + \eta_i(t), \eta_i(t + 1) = c_i \eta_i(t) + \xi_i(t). \quad (25)$$

其中 T 为采样周期, 状态 $x(t) = [s(t) \quad \dot{s}(t)]^T$, $s(t)$ 和 $\dot{s}(t)$ 分别为目标在时刻 tT 的位置和速度. $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 是对位置的观测信号, $y_3(t)$ 是对位置和速度的观测信号, 即 $\bar{H}_1 = \bar{H}_2 = [1 \ 0], \bar{H}_3 = [I_2 \ 0], I_2$ 表示二维单位阵. $\eta_i(t) (i = 1, 2, 3)$ 分别是 3 个传感器的有色观测噪声, c_i 为常数, $\xi_i(t) (i = 1, 2, 3)$ 是带零均值、方差为 Q_{ξ_i} 且独立于 $w(t)$ 的高斯白噪声. $w(t)$ 是带零均值、方差为 Q_w 的高斯白噪声. 下面求标量加权最优信息融合稳态 Kalman 滤波器 $\hat{x}_0(t | t)$.

系统(24), (25)等价于系统

$$x(t + 1) = \Phi x(t) + \Gamma w(t), \quad (26)$$

$$z_i(t) = H_i x(t) + v_i(t), i = 1, 2, 3. \quad (27)$$

其中

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \end{bmatrix},$$

新观测 $z_i(t) = y_i(t + 1) - c_i y_i(t), v_i(t) =$

$T^2/2\mathbf{w}(t) + \xi_i(t)(i = 1, 2, 3), H_1 = [1 - c_1 \quad T],$
 $H_2 = [1 - c_2 \quad T], H_3 = \Phi - c_3 I_2.$ 原系统(24),
 (25)的信息融合稳态 Kalman 滤波问题转化为新系
 统(26), (27)的信息融合稳态 Kalman 预报问题.

在仿真中取 $T = 0.5, Q_w = 1, Q_{\xi_1} = 10, Q_{\xi_2} =$
 $50, Q_{\xi_3} = 20I_2, c_1 = 0.5, c_2 = 0.8, c_3 = 0.7, x(0) =$
 $[0, 0]^T.$ 取 300 个采样数据. 对于系统(26), (27), 易
 验证各子系统是完全可观、完全可控的. 对各局部子
 系统可分别求得局部稳态最优 Kalman 预报器 $\hat{x}_i(t | t - 1)$
 和相应的方差阵 $\Sigma_i(i = 1, 2, 3),$ 即为原
 系统(24), (25)的局部稳态最优 Kalman 滤波器
 $\hat{x}_i(t | t)$ 和相应的方差阵 $P_i(i = 1, 2, 3).$ 可求得各
 子系统的稳态滤波误差方差阵的迹分别为 $\text{tr}P_1 =$
 $9.0045, \text{tr}P_2 = 93.8967, \text{tr}P_3 = 26.1832.$ 应用定理 3
 有标量加权最优信息融合稳态 Kalman 预报器 $\hat{x}_0(t | t - 1)$
 和相应的方差阵 $\Sigma_0,$ 即原系统(24), (25)的
 标量加权最优信息融合稳态 Kalman 滤波器
 $\hat{x}_0(t | t)$ 和相应的方差阵 $P_0.$ 可求得最优融合滤波
 误差方差阵的迹为 $\text{tr}P_0 = 7.5878.$ 可见标量加权信
 息融合稳态 Kalman 滤波器 $\hat{x}_0(t | t)$ 的精度高于各
 局部稳态最优 Kalman 滤波器 $\hat{x}_i(t | t)(i = 1, 2, 3),$
 满足 $\text{tr}P_0 \leq \text{tr}P_i(i = 1, 2, 3).$ 可求得最优融合系数
 为 $\bar{\alpha}_1 = 0.7666, \bar{\alpha}_2 = 0.0343, \bar{\alpha}_3 = 0.1991.$ 由前面求
 得的局部滤波误差方差阵的迹可知所得标量加权融
 合系数是合理的. 另外, 由各方差阵的迹可知虽然第
 二个子系统的估计精度较差, 但融合估计仍能改善
 各单传感器的精度.

5 结论(Conclusion)

基于标量加权信息融合准则, 对带有色观测噪
 声系统给出了具有两层融合结构的标量加权多传感
 器最优信息融合稳态 Kalman 滤波器, 它等价于一个
 带相关噪声系统的最优信息融合稳态 Kalman 预报
 器, 可在各局部子系统达到稳态时, 通过一次融合求
 得稳态加权系数而获得, 避免了每时刻计算加权系
 数, 从而明显减小了计算负担.

参考文献(References):

- [1] BAR-SHALOM Y. On the track-to-track correlation problem [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(2): 571 - 572.
- [2] HASHMIPOUR H R, ROY S, LAUB A J. Decentralized structures for parallel Kalman Filtering [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(1): 88 - 93.
- [3] CARLSON N A. Federated square root filter for decentralized parallel processes [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(3): 517 - 525.
- [4] SAHA R K. An efficient algorithm for multisensor track fusion [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(1): 200 - 210.
- [5] 邓自立, 祁荣宾. 多传感器信息融合次优稳态 Kalman 滤波器 [J]. 中国学术期刊文摘(科技快报), 2000, 6(2): 183 - 184. (DENG Zili, QI Rongbin. Multi-sensor information fusion sub-optimal steady-state Kalman filter [J]. *Chinese Science Abstracts*, 2000, 6(2): 183 - 184.)
- [6] SUN S L. Multi-sensor optimal information fusion Kalman filter with application [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2004, 8(1): 57 - 62.
- [7] 孙书利. 多传感器标量加权最优信息融合稳态 Kalman 滤波器 [J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 208 - 211. (SUN Shuli. Multi-sensor optimal information fusion steady-state Kalman filter weighted by scalars [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(2): 208 - 211.)
- [8] 邓自立. 卡尔曼滤波与维纳滤波-现代时间序列分析方法 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. (DENG Zili. *Kalman Filtering and Wiener Filtering-Modern Time Series Analysis Method* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.)

作者简介:

孙书利 (1971 —), 男, 1996 年毕业于黑龙江大学数学系, 1999 年获该校控制理论与控制工程专业硕士学位, 现为哈尔滨工业大学在职博士生, 研究领域为 Kalman 滤波、信息融合等. E-mail: sunsl@hlju.edu.cn;

邓自立 (1938 —), 男, 1962 年毕业于黑龙江大学数学系, 现为黑龙江大学应用数学研究所和自动化系教授, 研究领域为状态估计、最优滤波、信号处理、时间序列分析等. E-mail: dzl@hlju.edu.cn.