

复杂干扰环境下的分布式多传感器检测

孙庆伟¹, 权太范¹, 王 军¹, 宋晋敏², 王建斌², 陈瑞源²

(1. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001; 2. 航天机电集团二院二部, 北京 100854)

摘 要: 实用多传感器系统应考虑各种环境干扰的复杂性, 然而复杂干扰环境下多传感器数据融合的研究是目前尚未开展的领域. 为此, 本文首先建立了复杂干扰环境下多传感器系统的马尔可夫模型, 给出了状态转移图和状态概率, 并根据该模型推导出复杂干扰环境下多传感器融合检测的四种判决方法. 最后给出了仿真结果, 并分析了检测概率和虚警概率.

关键词: 数据融合; 马尔可夫模型; 分布式检测

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2001) 03-0346-04

Distributed Detection with Multisensor under Complicated Disturbing Environment

SUN Qing-wei¹, QUAN Tai-fan¹, WANG Jun¹, SONG Jin-min², WANG Jian-bin², CHEN Rui-yuan²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. The 2nd Department, The 2nd Academy, Space Electromechanical Group, Beijing 100854, China)

Abstract: The complexity of various environmental disturbances should be considered in applied multisensor systems, but the research of multisensor data fusion under complicated disturbing environment has not been carried out yet. So, this paper presents a Markov model of multisensor system under complicated disturbing environment, and provide state transition diagram and state probability. According to this model, four decision rules of multisensor fusion detection under complicated disturbing environment are deduced. Furthermore, the paper provides simulation results, and analyses detection probability and false probability.

Key words: data fusion; Markov model; distributed detection

1 引言

现代战争中, 作战的双方必然要面临, 或者由于自身的原因, 或者由于对方的袭击而导致传感器故障的情况. 在多传感器系统中, 如果某部或某几部传感器发生故障, 就要及时采取相应措施对多传感器系统进行重新组网, 使其能继续检测目标. 因此研究复杂干扰环境下 (指多传感器网中某一部分发生故障或被破坏的情况) 多传感器防御系统的检测技术是实际系统中所必需的, 也是有重要意义的. 近二十年, 许多科技工作者对多传感器检测技术进行了深入的研究^[1,2], 并得到了重要的结论, 但目前尚没有人探讨复杂干扰环境下的融合检测技术, 因此本文的任务是研究这一特殊的融合检测技术.

本文首先建立了复杂干扰环境下多传感器系统的马尔可夫模型, 然后研究了基于该模型的分布式融合检测技术, 并进行了检测性能分析, 最后给出了仿真结果.

2 复杂干扰环境下多传感器系统的马尔可夫模型

在实际工作中, 多传感器系统中的每一部分都存在不

同的状态, 如果把各部分的状态都考虑进去, 那么系统的总状态数随着传感器数目的增加将会非常庞大, 分析起来十分繁琐. 由于我们更关心传感器的状态, 所以在这里假定其它部分都工作在正常状态下, 而且假定传感器具有两个状态: 正常工作状态和可修复的故障状态.

由 N 部传感器组成的多传感器系统的状态变化过程基本上符合齐次的马尔可夫过程, 第 i ($i = 1, \dots, N$) 部传感器的状态转移图如图1所示. 图中 λ_i 和 μ_i 分别为传感器的故障率和修

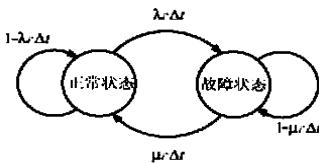


图1 传感器的状态转移图

复率. 设 $P_{n_i}(t)$ 和 $P_{a_i}(t)$ 分别为暂态时传感器的正常状态概率和故障状态概率, P_{n_i} 和 P_{a_i} 分别为稳态时传感器的正常状态概率和故障状态概率, 则

$$P_{n_i}(t) = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} + \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} e^{-(\mu_i + \lambda_i)t} \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$P_{a_i}(t) = \frac{i}{\mu_i + i} - \frac{i}{\mu_i + i} \cdot e^{-(\mu_i + i)^t}, i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$P_{n_i} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{n_i}(t) = \frac{\mu_i}{\mu_i + i}, i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$P_{d_i} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{d_i}(t) = \frac{i}{\mu_i + i}, i = 1, \dots, N \quad (4)$$

此时,系统的状态数为 2^N ,由于各传感器的状态是相互独立的,根据公式(3)和(4)可知,系统处于状态 j 的概率为

$$P_j = \left(\prod_{i \in N_j} P_{n_i} \right) \cdot \left(\prod_{k \in A_j} P_{d_k} \right), j = 1, \dots, 2^N \quad (5)$$

其中, N_j 和 A_j 分别为系统处于状态 j 时的正常传感器集合和故障传感器集合。

3 复杂干扰环境下多传感器系统的融合检测

设多传感器系统由 N 部传感器组成, P_{sd_i} 和 P_{sf_i} 分别为第 i ($i = 1, \dots, N$) 部传感器处于正常状态下的检测概率和虚警概率, P_j 为系统处于状态 j 的概率, ϕ 表示空集. 假设 H_0 表示无目标,假设 H_1 表示有目标.

传感器的决策值为

$$u_i = \begin{cases} 0, & \text{判定为无目标} \\ 1, & \text{判定为有目标} \\ 2, & \text{判定为传感器故障} \end{cases} \quad i = 1, \dots, N$$

融合中心的决策值为

$$u = \begin{cases} 0, & \text{判定为无目标} \\ 1, & \text{判定为有目标} \end{cases}$$

且假定系统中所有的传感器不会同时发生故障.

下面基于上一节介绍的马尔可夫模型,给出了现有的四种融合检测方法在复杂干扰环境下的融合检测结果.

3.1 “and”融合检测方法

复杂干扰环境下的“and”融合检测方法^[3]可表示为

$$u = \begin{cases} 0, & \text{存在判决为 0 的传感器} \\ 1, & \text{所有正常传感器均判决为 1} \end{cases}$$

定理 1 在复杂干扰环境下,经过“and”方法融合检测后,系统的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为

$$P_d = \left(\prod_{i \in N_j} P_{n_i} \right) \cdot \left(\prod_{k \in A_j} P_{d_k} \right) \quad (6)$$

$$P_f = \left(\prod_{i \in N_j} P_{sf_i} \right) \quad (7)$$

由于式(6)、(7)容易推导,这里证明略.

3.2 “or”融合检测方法

复杂干扰环境下的“or”融合检测方法^[3]可表示为

$$u = \begin{cases} 0, & \text{所有正常传感器均判决为 0} \\ 1, & \text{存在判决为 1 的传感器} \end{cases}$$

定理 2 在复杂干扰环境下,经过“or”方法融合检测后,系统的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为

$$P_d = \left\{ P_j \cdot [1 - (1 - P_{sd_i})] \right\} \quad (8)$$

$$P_f = \left\{ P_j \cdot [1 - (1 - P_{sf_i})] \right\} \quad (9)$$

证明略.

3.3 最大后验概率融合检测方法

最大后验概率准则为

$$\frac{P(U|H_1)}{P(U|H_0)} \underset{u=0}{\overset{u=1}{>}} \frac{P(H_0)}{P(H_1)} = \quad (10)$$

其中, $U = (u_1, \dots, u_N)^T$.

定理 3 复杂干扰环境下,最大后验概率融合检测准则为

$$\log \frac{1 - P_{sd_m}}{1 - P_{sf_m}} + \log \frac{P_{sd_n}}{P_{sf_n}} \underset{u=0}{\overset{u=1}{>}} \log \quad (11)$$

其中, $S_0 = \{i | u_i = 0\}$, $S_1 = \{i | u_i = 1\}$, S_0 与 S_1 不同时为空集. 经融合后,系统的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为

$$P_d = \left\{ P_j \cdot \left[U(B) \left(\prod_{i \in S_0} (1 - P_{sd_i}) \right) \left(\prod_{i \in S_1} P_{sd_i} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

$$P_f = \left\{ P_j \cdot \left[U(B) \left(\prod_{i \in S_0} (1 - P_{sf_i}) \right) \left(\prod_{i \in S_1} P_{sf_i} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

其中, M_j 表示集合 N_j 中元素的个数, 2^{M_j} 的含义是:正常传感器集合 N_j 根据每个正常传感器的决策值(1 或 0)的不同所具有的可能状态数. 并且上面两式中,集合 S_0 和 S_1 根据 i 和 j 的变化而变化.

$$B = \log \frac{1 - P_{sd_m}}{1 - P_{sf_m}} + \log \frac{P_{sd_n}}{P_{sf_n}} - \log$$

$$U(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

证明:

$$P(U|H_1) = \left[\prod_{i \in S_0} P_{n_i} (1 - P_{sd_i}) \right] \left[\prod_{i \in S_1} P_{n_i} P_{sd_i} \right] \left[\prod_{k \in A_j} P_{d_k} \right]$$

$$P(U|H_0) = \left[\prod_{i \in S_0} P_{n_i} (1 - P_{sf_i}) \right] \left[\prod_{i \in S_1} P_{n_i} P_{sf_i} \right] \left[\prod_{k \in A_j} P_{d_k} \right]$$

$$\frac{P(U|H_1)}{P(U|H_0)} = \left(\prod_{i \in S_0} \frac{1 - P_{sd_i}}{1 - P_{sf_i}} \right) \left(\prod_{i \in S_1} \frac{P_{sd_i}}{P_{sf_i}} \right)$$

$$\log \frac{P(U|H_1)}{P(U|H_0)} = \log \frac{P_{sd_m}}{1 - P_{sf_m}} + \log \frac{P_{sd_n}}{P_{sf_n}}$$

根据最大后验概率准则(见公式(10))即可得到公式(11). 公式(12)、(13)易证.

3.4 表决融合检测方法

复杂干扰环境下的表决融合检测方法(也称为 k/n 规则)是这样描述的:先制定一个 k/n 规则组 $\{k_n/n, n = 1, \dots, N\}$ 以适应不同系统状态下的要求. 当系统中有 n 部正常的传感器时,则有

$$u = \begin{cases} 1, & Q \geq k_n \\ 0, & Q < k_n \end{cases}$$

其中 Q 为集合 S_1 中元素的数目,且有 $1 \leq k_n \leq n$.

定理 4 在复杂干扰环境下,基于某一 k/n 规则组融合检测后,系统的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为

$$P_d = \sum_{j=1}^{2^N} P_j \cdot \sum_{i=1}^{2^{M_j}} [W(Q - k_{M_j}) \binom{1 - P_{sd_m}}{m} \binom{P_{sd_n}}{n} S_1] \quad (14)$$

$$P_f = \sum_{j=1}^{2^N} P_j \cdot \sum_{i=1}^{2^{M_j}} [W(Q - k_{M_j}) \binom{1 - P_{sf_m}}{m} \binom{P_{sf_n}}{n} S_1] \quad (15)$$

其中, S_0 、 S_1 和 M_j 见定理 3,且

$$W(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

证明略.

当各传感器具有相同性能时,即相同的故障率 μ 、修复率 μ 和相同的检测概率 P_{sd} 、虚警概率 P_{sf} ,且设 P_n 和 P_a 分别为传感器的正常状态概率和故障状态概率,公式(6)~(9)、公式(12)~(15)依次化简为

$$P_d = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} P_{sd}^i \quad (16)$$

$$P_f = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} P_{sf}^i \quad (17)$$

$$P_d = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} \sum_{j=1}^i [C_i^j P_{sd}^j (1 - P_{sd})^{i-j}] \quad (18)$$

$$P_f = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} \sum_{j=1}^i [C_i^j P_{sf}^j (1 - P_{sf})^{i-j}] \quad (19)$$

$$P_d = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} \sum_{j=1}^i [C_i^j U(B) P_{sd}^j (1 - P_{sd})^{i-j}] \quad (20)$$

$$P_f = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} \sum_{j=1}^i [C_i^j U(B) P_{sf}^j (1 - P_{sf})^{i-j}] \quad (21)$$

$$P_d = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} \sum_{j=k_i}^i [C_i^j P_{sd}^j (1 - P_{sd})^{i-j}] \quad (22)$$

$$P_f = \sum_{i=1}^N C_N^i P_n^i P_a^{N-i} \sum_{j=k_i}^i [C_i^j P_{sf}^j (1 - P_{sf})^{i-j}] \quad (23)$$

以上各式中, C_N^i 为 N 个元素中取 i 个元素的组合数,即

$$C_N^i = \frac{N!}{i! \cdot (N-i)!}$$

4 仿真研究

为了便于仿真,这里设各传感器具有相同的性能.由于最大后验概率融合检测方法中的先验概率 $P(H_0)$ 、 $P(H_1)$ 无法获知,所以这里只比较了其它三种方法的性能.

第一组实验研究了系统检测概率 P_d 、虚警概率 P_f 与传感器检测概率 P_{sd} 、虚警概率 P_{sf} 的关系.设 $N=4$; $\mu=0.8$, $\mu=0.09$,则 $P_n=0.9$, $P_a=0.1$;表决融合检测方法中的 k/n 规则组为 $\{2/4 \ 2/3 \ 1/2 \ 1/1\}$.结果见图 2 和图 3.

第二组实验研究了系统检测概率 P_d 、虚警概率 P_f 与传感器数目 N 的关系.设 $\mu=0.8$, $\mu=0.09$,则 $P_n=0.9$, $P_a=0.1$; $P_{sd}=0.7$, $P_{sf}=0.01$;表决融合检测中的 k/n 规则组设为

$\{4/6 \ 3/5 \ 2/4 \ 2/3 \ 1/2 \ 1/1\}$.结果见图 4 和图 5.

第三组实验研究了给定传感器修复率情况下,系统检测概率 P_d 、虚警概率 P_f 与传感器故障率 μ 的关系.设 $N=4$;表决融合检测方法中的 k/n 规则组为 $\{2/4 \ 2/3 \ 1/2 \ 1/1\}$; $P_{sd}=0.7$, $P_{sf}=0.01$ 传感器的修复率为 $\mu=0.8$.则 P_d 、 P_f 随故障率 μ 的变化曲线见图 6、图 7.

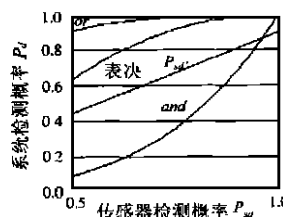


图 2 系统检测概率随传感器检测概率的变化曲线

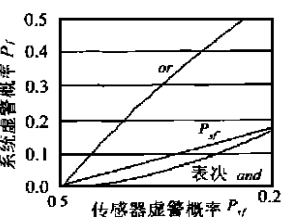


图 3 系统虚警概率随传感器虚警概率的变化曲线

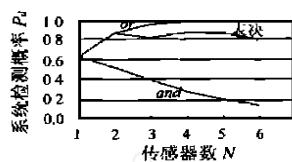


图 4 系统检测概率随传感器数目的变化曲线

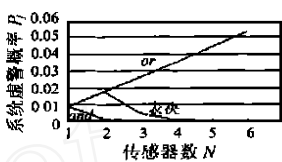


图 5 系统虚警概率随传感器数目的变化曲线

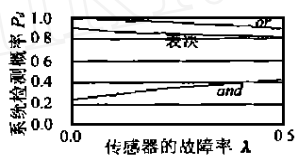


图 6 系统检测概率随传感器故障率的变化曲线

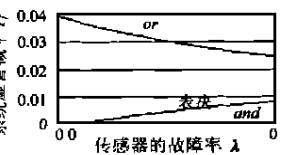


图 7 系统虚警概率随传感器故障率的变化曲线

从图 2~7 可以得到如下关系: $P_d^{or} > P_d^{表决} > P_d^{and}$ 和 $P_f^{or} > P_f^{表决} > P_f^{and}$.表决方法的性能介于其它两种方法之间,“or”方法的检测概率虽然高,但是虚警概率也相当高,而“and”方法则正好相反.表决方法的性能较好,这是因为它的检测概率比“or”方法差的并不多,而比“and”方法好很多;同时,它的虚警概率比“and”方法高的不多,却比“or”方法低很多.

图 2 中的 P_{sd} 和图 3 中的 P_{sf} 分别为复杂情况下传感器的检测概率和虚警概率,且有 $P_{sd} = P_n P_{sd}$ 和 $P_{sf} = P_n P_{sf}$.图中的曲线关系说明了表决方法是三种方法中较好的,且它的各项指标均高于单传感器.

从图 2 和图 3 中还可以看到,在给定的条件下,随着传感器检测概率的增加,系统的检测概率也相应地增加,传感器虚警概率增加,也导致系统虚警概率增加.图 4、图 5 示出,当传感器数目增加时,“or”方法的检测概率和虚警概率都增加,“and”方法正好相反,都减小,而在给定的规则组情况下,表决方法的检测概率变化不大,但虚警概率有很大改善.可见,当我们使用性能较好的表决方法融合时,提高传感器的检测概率、降低传感器的虚警概率、增加传感器的数目(当传感器的数目增加到 4 个以上,性能上的改善会变得非常小)和降低传感器的故障率可以提高系统检测性能.

5 结论

(1) 本文首先建立了复杂干扰环境下多传感器系统的马尔可夫模型,并给出了状态转移图和状态概率;

(2) 在马尔可夫模型基础上,把现有的四种多传感器融合检测方法推广到复杂干扰环境下,解决了复杂干扰环境下的融合检测问题;

(3) 对“and”逻辑判决、“or”逻辑判决和表决法三种方法作了仿真实验,从性能对比中可以看出表决法的检测性能要优于其它两种方法,而且还分析了传感器检测性能、传感器故障率和传感器的数目对系统检测性能的影响.怎样选择表决方法中的 k/n 规则组,是一个需要进一步考虑的问题.

参考文献:

- [1] Z. Chair, P. K. Varshney. Optimal data fusion in multiple sensor detection system [J]. IEEE Trans. on AES, 1986, 22(1): 98 - 101.
- [2] S. C. A. Thomopoulos, R. Viswanathan, D. K. Bougoulas. Optimal decision fusion in multiple sensor system [J]. IEEE Trans. on AES, 1987, 23(5): 644 - 653.
- [3] R. Blum, S. Kassam, H. V. Poor. Distributed detection with multiple sensors: Part —Advanced topics [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(1): 64 - 79.
- [4] R. Viswanathan, P. K. Varshney. Distributed detection with multiple sensor: Part —Fundamentals [J]. Proceedings of The IEEE, 1997, 85(1): 54 - 63.

作者简介:



孙庆伟 1973 年生,于 1998 年在哈尔滨工业大学电子工程专业获硕士学位,现攻读博士学位;研究方向为目标跟踪、数据融合.



权太范 1949 年生,教授,博士生导师,电子所副所长;一直从事新体制雷达和信号处理研究,曾获国家科技进步一等奖和航天工业部科技进步一等奖.研究方向为近代信号处理、目标跟踪、数据融合以及神经网络—模糊推理融合系统.

www.cnki.net