

# 基于非理想信道的分布式多检测器软决策融合算法

刘英坤, 冯新喜, 党宏刚, 潘平俊

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**在实际检测中由于带宽、信道衰落和信道噪声等因素的影响,从本地检测器至融合中心的信道通常无法保证为理想传输信道。对在非理想信道状态下检测系统的性能优化算法进行了研究,并且为了提高检测性能和合理的利用通信资源,在本地应用软判决判决。根据聂曼-皮尔逊规则推出本地检测器和融合中心的优化判决形式。最后通过两检测器系统仿真表明,应用软判决确实提高了系统的检测性能,而非理想信道的恶化又确实降低了系统的检测性能。

**关键词:**检测融合;非理想信道;聂曼-皮尔逊(NP)规则

**中图分类号:** TN936.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)02-0044-04

分布式检测研究是数据融合的一部分<sup>[1]</sup>。Tenney 和 Sandell 将贝叶斯检测理论推广到两检测器的分布式检测中<sup>[2]</sup>,此后分布式检测步入了多元化研究阶段,首先从拓扑结构上分有并行<sup>[2]</sup>、串行<sup>[3]</sup>、树型<sup>[4]</sup>等,每一种结构都具有各自的检测特点。从优化程度考虑可分3种:①固定本地判决规则,最优化融合中心的判决规则<sup>[2]</sup>;②固定融合中心的判决规则,最优化本地判决规则<sup>[5]</sup>;③同时优化本地检测器和融合中心<sup>[6]</sup>。以上所有算法都有一前提:本地检测器至融合中心的传输信道为理想信道。但在实际检测过程中,由于带宽、信道衰减及信道噪声等因素的影响,信道传输存在一定的误差,如再应用以上算法,会降低系统的检测性能。然而基于非理想信道的分布式检测在文献[7]、[8]中有过研究,但其都是本地检测器在二进制对称信道情况下采用硬判决的检测算法。若各检测器仅向融合中心传送1位判决信息,而该信息并不能充分反映检测器的观测信息,则会降低系统融合性能。所以各检测器可根据系统的通信能力,传送多位决策信息至融合中心,从而提高系统融合性能。

为了进一步完善分布式检测的系统理论,文中的传输信道为无记忆非理想信道,本地检测器采用软判决方案,然后根据 NP 规则推出本地检测器和融合中心的优化判决形式。最后通过两检测器系统仿真表明了该算法的可行性。

## 1 系统模型

分布式检测系统由  $N$  个本地检测器、 $N$  条独立的非理想信道和一个融合中心构成。本地检测器基于自己的观测量  $y_i$  进行软判决得到判决结果  $u_i$  和可信度信息  $C_i$ ,然后将本地判决结果和可信度信息通过一非理想信道传输至融合中心,融合中心根据接收到的判决结果  $r_i$  和可信度信息  $D_i$  做出最终的判决结果  $u_0$ 。本文中的非理想信道为无记忆信道,为了表达的简单,可信度信息  $C_i$ 、 $D_i$  取1位二进制数,各状态的转换图如图1所示,假设各信道的状态转换概率相同,用矩阵  $P$  来表示:

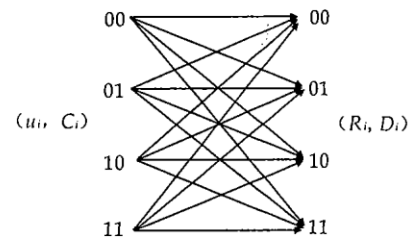


图1 各状态转换图

Fig.1 The shifting figure of channel states

收稿日期:2007-06-26

作者简介:刘英坤(1973-),女,山东莱州人,工程师,博士生,主要从事多检测器分布式检测算法研究。

E-mail:ms.liu@56.com

$P = [a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}; a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}; a_{31}, a_{32}, a_{33}, a_{34}; a_{41}, a_{42}, a_{43}, a_{44}]$ 。其中  $a_{21}$  表示  $(u_i = 0, C_i = 1)$  经过非理想信道,在融合中心接收到  $(r_i = 0, D_i = 0)$  的概率,矩阵  $P$  的其它元素依次类推。各转移概率可由仿真或测试数据来估计,因此在融合中心矩阵  $P$  为已知的。

## 2 本地检测器和融合中心的优化检测算法

系统中所有本地检测器和融合中心的最优化判决算法都是基于 NP 规则得到的,在  $P_{F_0} = \alpha$  的条件下,使下面的目标函数取得最大值:

$$F = P_{D_0} - \lambda(P_{F_0} - \alpha) \quad (1)$$

式中:  $P_{D_0}$ 、 $P_{F_0}$  分别为系统的检测概率和虚警概率,且  $P_{D_0} = P(u_0 = 1 | H_1)$ ,  $P_{F_0} = P(u_0 = 1 | H_0)$ 。

### 2.1 本地检测器的软判决算法

采用逐个最优化的方法来推导本地检测器的最优化判决规则,即在优化任一检测器的判决规则就是固定其它检测器判决规则不变来使其达到最优化。

本地检测器的判决  $u_i = 1$  表示判决目标出现,  $u_i = 0$  表示判决没有目标,  $y_i$  为第  $i$  个本地检测器的观测量,假定各观测量之间是统计独立的,在两种假设下的概率分布函数分别为  $p(y_i | H_1)$ 、 $p(y_i | H_0)$ 。式(1)中的检测概率  $P_{D_0}$  根据本地检测器  $i$  的判决结果  $u_i$  展开并整理得:

$$P_{D_0} = P(u_0 = 1 | u_{0i} = 0, H_1) + A(u_0, u_i, H_1)P(u_i = 1 | H_1) \quad (2)$$

式中,  $A(u_0, u_i, H_1) = P(u_0 = 1 | u_i = 1, H_1) - P(u_0 = 1 | u_i = 0, H_1)$ 。同理可得系统的虚警概率为

$$P_{F_0} = P(u_0 = 1 | H_0) = P(u_0 = 1 | u_i = 0, H_0) + A(u_0, u_i, H_0)P(u_i = 1 | H_0) \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1),整理可得

$$F = C + \int_{y_i} [A(u_0, u_i, H_1)P(u_i = 1 | y_i)p(y_i | H_1) - \lambda A(u_0, u_i, H_0)P(u_i = 1 | y_i)p(y_i | H_0)] dy_i \quad (4)$$

式中,  $C = P(u_0 = 1 | u_i = 0, H_1) - \lambda P(u_0 = 1 | u_i = 0, H_0) + \lambda \alpha$ , 对于本地检测器  $i$  的判决来说  $C$  为常数。并且如果融合中心采用单调增的融合规则<sup>[8]</sup> 就可得到:  $A(u_0, u_i, H_j) > 0$ , ( $j = 0, 1$ )。于是在  $P_{F_0} = \alpha$  的条件下,为了使式(4)中的目标函数最大,那么本地检测器  $i$  的优化判决规则为

$$\frac{p(y_i | H_1)}{p(y_i | H_0)} \begin{matrix} u_i = 1 \\ > \\ u_i = 0 \end{matrix} \lambda \frac{A(u_0, u_i, H_0)}{A(u_0, u_i, H_1)} \quad (5)$$

上式中  $\lambda$  由给定的系统虚警概率  $\alpha$  决定。由式(5)看出本地检测器的判决形式为似然比判决,其判决过程就是将其似然函数  $\Lambda(y_i) = p(y_i | H_1)/p(y_i | H_0)$  与本地门限  $K = \lambda A(u_0, u_i, H_0)/A(u_0, u_i, H_1)$  进行比较,当  $\Lambda(y_i) \geq K_i$  时,判决目标出现,反之则判决没有目标。 $\Lambda(y_i)$  超过或低于门限  $K_i$  的多少,实际上反映了检测器判决的可信度。本地检测器的可信度可通过对  $\Lambda(y_i)$  相对于  $K_i$  的偏差进行有限位的量化来获得,量化位数由系统的传输能力决定。若存在某一数值  $A_i$ 、 $B_i$ ,  $A_i \in [K_i, \infty)$ ,  $B_i \in (-\infty, K_i]$ , 使得  $P(\Lambda(y_i) > A_i | H_0) \approx 0$ ,  $P(\Lambda(y_i) < B_i | H_1) \approx 0$ , 则仅需对区间  $[B_i, K_i]$ ,  $[K_i, A_i]$  进行量化即可,数值  $A_i$  和  $B_i$  可根据切比雪夫不等式得到。

设本地检测器的判决可信度  $C_i$  用  $m$  位二进制数描述:

当  $\Lambda(y_i) \geq K_i$  时,  $K_{i,j}^1 = K_i + j(A_i - K_i)/M$ ,  $j = 0, 1, \dots, M-1$ ,  $M = 2^m$ , 如果  $K_{i,j}^1 \leq \Lambda(y_i) < K_{i,j+1}^1$ , 则判决  $u_i = 1$  的可信度为:  $C_i = j$ 。

当  $\Lambda(y_i) < K_i$  时,  $K_{i,j}^0 = K_i - j(K_i - B_i)/M$ ,  $j = 0, 1, \dots, M-1$ ,  $M = 2^m$ , 如果  $K_{i,j+1}^0 \leq \Lambda(y_i) < K_{i,j}^0$ , 则判决  $u_i = 0$  的可信度为:  $C_i = j$ 。

另外根据各似然比的分布函数和各  $K_{i,j}^1$ 、 $K_{i,j}^0$  的值可计算出  $P(u_i, C_i | H_i)$  的值:

$$P(u_i = n, C_i = j | H_k) = \int_{K_{i,j}^n}^{K_{i,j+1}^n} p(\Lambda_i | H_k) d\Lambda_i, (n = 0, 1) \quad (6)$$

### 2.2 融合中心算法的建立

本地判决和可信度信息  $U_c = (u_1, C_1, u_2, C_2, \dots, u_N, C_N)$  通过非理想信道传输至融合中心,融合中心收到的本地判决和可信度信息  $R_c = (r_1, D_1, r_2, D_2, \dots, r_N, D_N)$ , 应用 NP 规则<sup>[10]</sup> 来推导最优化判决,则融合中

心的检测概率和虚警概率可以表示为

$$P_D^f = \sum_{R_c} P(u_0 = 1 | R_c) P(R_c | H_1) \quad (7) \quad P_F^f = \sum_{R_c} P(u_0 = 1 | R_c) P(R_c | H_0) \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(1),可得

$$F = \sum_{R_c} P(u_0 = 1 | R_c) [P(R_c | H_1) - \lambda(R_c | H_0)] + \alpha\lambda \quad (9)$$

对于任意给定的系统虚警概率  $\alpha$ , ( $0 < \alpha < 1$ ), 根据式(9) 使系统检测率达到最大的最优融合规则为

$$P(u_0 = 1 | R_c) = \begin{cases} 1, & \Lambda(R_c) > \lambda \\ \gamma, & \Lambda(R_c) = \lambda \\ 0, & \Lambda(R_c) < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\Lambda(R_c) = P(R_c | H_1) / P(R_c | H_0)$ ; 融合中心的判决门限  $\lambda$  和随机化因子  $\gamma$  由给定的系统虚警概率决定。

根据观测量和信道的统计独立性,得:

$$P(R_c | H_j) = \prod_{i=1}^N P(r_i, D_i | H_j), \quad j = 0, 1 \quad (11)$$

式中  $P(r_i, D_i | H_j)$  由概率转移矩阵  $P$  和  $P(u_i, C_i | H_j)$  来求得:

$$\begin{cases} P(r_i = 0, D_i = 0 | H_j) = a_{11}P(u_i = 0, D_i = 0 | H_j) + a_{21}P(u_i = 0, C_i = 0 | H_j) + a_{31}P(u_i = 0, C_i = 1 | H_j) + a_{41}P(u_i = 1, C_i = 1 | H_j) \\ P(r_i = 0, D_i = 1 | H_j) = a_{12}P(u_i = 0, D_i = 0 | H_j) + a_{22}P(u_i = 0, C_i = 0 | H_j) + a_{32}P(u_i = 0, C_i = 1 | H_j) + a_{42}P(u_i = 1, C_i = 1 | H_j) \\ P(r_i = 1, D_i = 0 | H_j) = a_{13}P(u_i = 0, D_i = 0 | H_j) + a_{23}P(u_i = 0, C_i = 0 | H_j) + a_{33}P(u_i = 0, C_i = 1 | H_j) + a_{43}P(u_i = 1, C_i = 1 | H_j) \\ P(r_i = 1, D_i = 1 | H_j) = a_{14}P(u_i = 0, D_i = 0 | H_j) + a_{24}P(u_i = 0, C_i = 0 | H_j) + a_{34}P(u_i = 0, C_i = 1 | H_j) + a_{44}P(u_i = 1, C_i = 1 | H_j) \end{cases} \quad (12)$$

### 3 仿真结果

以两检测器系统来进行仿真,假设本地检测器的观测量服从高斯分布,概率密度函数为:  $f_{y_i|H_1}(y_i|H_1) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-(y_i - a_i)^2/2)$ ,  $f_{y_i|H_0}(y_i|H_0) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-y_i^2/2)$ 。  $a_1 = a_2 = 2.5$ , 本地检测器采用似然比判决。另外非理想信道的概率转换矩阵中各元素为:  $a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44} = 0.8$ ,  $a_{21} = a_{31} = a_{12} = a_{13} = a_{24} = a_{42} = a_{43} = a_{43} = 0.1$ ,  $a_{14} = a_{41} = a_{32} = a_{23} = 0$ 。各本地检测器传送 1 位判决信息及  $m$  位可信度信息至融合中心, 当  $m = 0, 1, 2$  bit 时, 融合系统的性能对比如图 2 所示, 可见随着可信度信息位数的增加, 融合系统的性能呈上升趋势, 但位数太多, 计算量就增大, 一般取  $m \leq 2$  即可。图 3 为  $m = 1$  时, 3 种信道情况的输出机特征曲线(ROC)和本地检测器的 ROC。①  $a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44} = 0.9$ ,  $a_{21} = a_{31} = a_{12} = a_{13} = a_{24} = a_{42} = a_{34} = a_{43} = 0.05$ ,  $a_{14} = a_{41} = a_{32} = a_{23} = 0$ ; ②  $a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44} = 0.6$ ,  $a_{21} = a_{31} = a_{12} = a_{13} = a_{24} = a_{42} = a_{34} = a_{43} = 0.15$ ,  $a_{14} = a_{41} = a_{32} = a_{23} = 0.1$ ; ③理想信道:  $a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44} = 1$ , 转换矩阵的其它元素都为 0。由图 3 看出信道状态越理想, 系统性能越好, 当信道错误传输达到一定程度, 融合后的性能就不如本地检测器的检测性能。

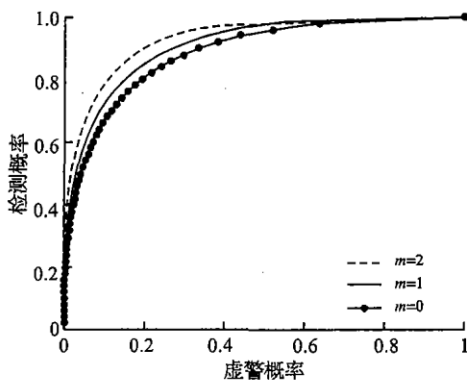


图2 不同可信度信息位数的系统 ROC 曲线  
Fig. 2 The ROC of different reliability bits

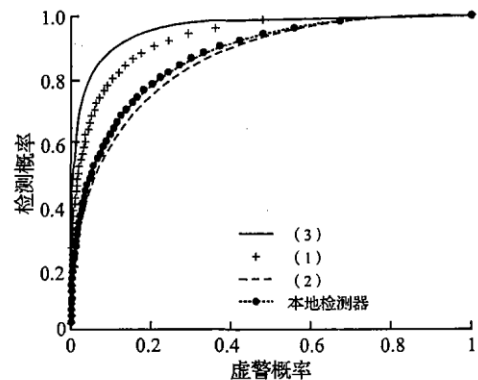


图3 不同信道状况的 ROC 曲线  
Fig. 3 The ROC of different channel states

## 4 结论

由于本地检测器至融合中心的通信能力不止传输一位,为了合理的使用通信资源,又为了提高系统的检测性能,在本地使用软判决方案。从本地检测器至融合中心的传输信道为无记忆非理想信道,基于 NP 规则推出了本地检测器和融合中心的判决形式。最后以两检测器系统为例具体仿真了该算法,表明检测性能随着可信度位数的增加而好转,但随着检测器数目的增加,计算量大大增加,建议可信度位数不能太大;同时检测性能又将随着信道状态的恶化而降低。

### 参考文献:

- [1] 吴松林. 基于集成维修信息的数据融合及应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2001, 2(2): 4-8.  
WU Songlin. Information Fusion Based on Integrated Maintenance Information and its Application[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2001, 2(2): 4-8. (in Chinese)
- [2] Tenney R R. Detection with Distributed Sensors[J]. IEEE Trans on AES, 1981, 17(2): 501-510.
- [3] Viswanathan R. Optimal Serial Distributed Decision Fusion[J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(4): 366-375.
- [4] Tang Z B, Pattipati K P. Optimization of Detection Networks: Part II - Tree Structures[J]. IEEE Trans on SMC, 1993, 23(2): 211-221.
- [5] Chair Z. Optimal Data Fusion in Multiple Sensors Detection System[J]. IEEE Trans on AES, 1986, 22(1): 98-101.
- [6] 李宏, 王昭, 相明, 等. 一种全局最优的多基阵声纳数据融合方法[J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(2): 232-235.  
LI Hong, WANG Zhao, XIANG Ming, et al. An Algorithm for Global Optimization of Distributed Sonar Data Fusion[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2000, 18(2): 232-235. (in Chinese)
- [7] Chen B, Willett P K. On the Optimality of the Likelihood - ratio Test for Local Sensor Decision Rules in the Presence of Non - ideal Channels[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, IT - 51: 693 - 699.
- [8] 梁小果, 李言俊, 张科. 一种非理想信道条件下双传感器检测系统的融合算法研究[J]. 探测与控制学报, 2006, 28(4): 30-33.  
LIANG Xiaoguo, LI Yanjun, ZHANG Ke. Research on Fusion Algorithm for a Kind of Two - sensor Distributed Detection System With Non - ideal Communication Channel[J]. Journal of Detection & Control, 2006, 28(4): 30-33. (in Chinese)
- [9] 相明, 韩崇昭, 赵俊渭, 等. 基于串行系统配置结构的分布式 Neyman - Pearson 检测融合算法[J]. 探测与控制学报, 2002, 24(3): 5-10.  
XIANG Ming, HAN Chongzhao, ZHAO Junwei, et al. Detection Fusion Algorithm for Distributed Neyman - Pearson Detection System with Serial Structures[J]. Journal of Detection & Control, 2002, 24(3): 5-10. (in Chinese)
- [10] Xiang M, Zhao J W. On the performance of distributed Neyman - Pearson Detection Systems[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 2001, 31(1): 78-83.

(编辑:田新华,徐楠楠)

## The Fusion Algorithm of Soft Decision in Distributed Detection Based on Non - ideal Channel

LIU Ying - kun, FENG Xin - xi, DANG Hong - gang, PAN Ping - jun

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In the actual detection, due to bandwidth, channel fading and channel noise, the ideal channel can not be assured from the local detector to fusion centre. In this paper, the global optimal detection algorithm is studied based on the non - ideal channels. In addition, in order to improve the detection performance and use communicated resource rationally, the soft decision is applied in local detector. According to Neyman - Pearson rule the optimal decision forms of local detectors and the fusion centre are derived. Finally, simulations of two detectors show that by using soft decision the detection performance is improved, and the worsening of the non - ideal channel absolutely depresses the detection performance of the system.

**Key words:** detection fusion; non - ideal channel; Np rule