

## 基于聂曼-皮尔逊准则和无线信道的一种次最优分布式检测算法

刘英坤 冯新喜 党宏刚 潘平俊

(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

**摘要:** 在实际检测中,从本地检测器至融合中心的无线信道通常无法保证为理想传输信道,于是传统的基于理想信道的优化检测算法要做相应调整。基于非理想信道该文研究了一种次优检测算法,应用聂曼-皮尔逊(NP)规则推导出各节点的判决形式,根据概率知识求出各节点的虚警概率和检测概率,然后用迭代的方法得到虚警概率在一定范围内系统检测概率最大时各个节点的检测门限。最后通过仿真说明了信道的非理想性确实影响了系统的检测性能。

**关键词:** 无线信道;似然比检测;最优化检测

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2650-04

## A Suboptimal Detection Arithmetic Based on Neyman-Pearson Rule and Wireless Channel in the Distributed Detection

Liu Ying-kun Feng Xin-xi Dang Hong-gang Pan Ping-jun

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

**Abstract:** In the actual detection, the wireless channels from the local detectors to fusion center usually can't be the ideal channel, so the traditional optimal detection arithmetic based on the ideal channel is rectified accordingly. In this paper, a suboptimal detection arithmetic is studied based on non-ideal channel, using Neyman-Pearson (NP) rule the decision forms of every node are derived, according to the probability theory knowledge, the false alarm probability and the detection probability of every node are obtained, in order to maximize the detection probability restricted a constant of the false alarm probability, the iterative arithmetic is applied to find the detective threshold of every node. Finally the simulation shows that the non-ideal channel affect the detection performance of system surely.

**Key words:** Wireless channel; Likelihood ratio test; The optimal detection

### 1 引言

分布式检测系统是指由多个分布在不同空间位置上的检测器和一个融合中心组成,首先由各个检测器完成对检测空间中目标的检测,然后将各自的局部决策送至融合中心,经过融合处理形成系统的最终检测结果。分布式检测的研究可以追溯到20世纪60年代。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>[1]</sup>,此后分布式检测步入了多元化研究阶段,首先从拓扑结构上有并行<sup>[1]</sup>、串行<sup>[2]</sup>、树型<sup>[3]</sup>、混合型、星型等等,每一种结构都具有一定的检测特点,究竟选哪一种拓扑结构要根据实际需要。再从优化程度上考虑分三种:固定本地判决规则,最优化融合中心的判决规则<sup>[1]</sup>;固定融合中心的判决规则,最优化本地判决规则<sup>[4]</sup>;同时优化本地检测器和融合中心的判决规则<sup>[5,6]</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,即本地判决准确无误的传输至融合中心,在许多重要应用领域,由于带宽、信道衰落和信道噪声等因素

的影响,理想传输信道通常无法保证,信道传输存在一定的错误,如再应用以上算法,势必降低系统的检测性能。对于非理想信道的分布式检测也有文献研究过<sup>[7,8]</sup>,但只是限于二进制对称信道的并行和两检测器串行的分布式检测算法。

另外如果本地检测器与融合中心的距离比较远,就会加剧信道的非可靠性和增加信道的传输能量,这时就要在并行结构<sup>[9]</sup>的基础上增加中继节点,从而缩短传输距离,于是并行结构就变成了树型结构。为了进一步完善分布式检测的系统理论,本文基于衰减和附加噪声的非理想无线信道,系统拓扑结构为树型结构,应用NP准则推导出各节点的优化检测形式,最后在多种情况下对系统进行仿真,说明了非理想信道对系统的检测性能影响。

### 2 系统模型

为了计算的简单,本文用7个检测器构成的树型结构来具体阐述算法,如图1所示。1, 2, 4, 5号节点为叶节点,叶节点只基于自己的观测量 $y_i$ 作出判决 $u_i = 0$ 或 $1$ ,并且假设各叶节点的观测量之间是统计独立的,然后将判决结果通过无线信道传输至3号和6号中继节点,3号和6号节点只

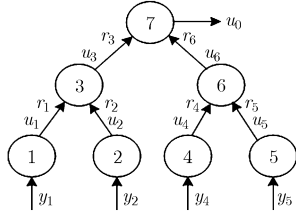


图 1 无线信道的分布式检测系统图

基于收到的叶节点判决结果  $r_i$  做出自己的判决结果  $u_i$ , 然后将自己的判决结果同样通过无线信道传输至 7 号终节点, 终节点基于接收到的 3, 6 号节点的判决结果  $r_i$  做出系统的最终判决结果  $u_0$ . 各节点的判决结果进行二进制相位键控 (2PSK) 调制, 通过平滑衰减和附加噪声的无线信道传至上一级父节点, 父节点接收的信号为

$$r_j = \sqrt{\rho g_j} (2u_j - 1) + n_j \quad (1)$$

其中  $g_j$  为第  $j$  条信道的信道增益,  $\rho$  为节点检测器的信噪比,  $n_j$  为第  $j$  条信道的附加噪声, 符合标准正态分布  $N(0,1)$ , 并且假设各信道之间是独立同分布的. 节点  $j$  的虚警概率和检测概率分别定义为  $P_{F,j} = \Pr(u_j = 1 | H_0)$ ,  $P_{D,j} = \Pr(u_j = 1 | H_1)$ . 融合中心采用 NP 判决规则, 即在系统虚警概率  $P_{F,0} \leq \alpha$  的情况下使系统检测概率  $P_{D,0}$  最大化来得到各节点的最优判决规则。

### 3 各节点最优化判决规则的建立

#### 3.1 终节点判决规则的推导

假设各本地检测器的观测量和各信道都是统计独立并且同分布, 由于终节点判决规则为 NP 准则, 所以在节点 7 的判决形式可简化为似然比检验<sup>[10]</sup>:

$$A(r) = \frac{L(r_3 r_6 | H_1, g_3 g_6)}{L(r_3 r_6 | H_0, g_3 g_6)} = \prod_{j=3,6} \frac{p(r_j | H_1, g_j)}{p(r_j | H_0, g_j)} \stackrel{H_1}{>} \stackrel{H_0}{<} t_0 \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} p(r_j | H_1, g_j) &= \sum_{u_j} p(r_j | u_j, H_1, g_j) P(u_j | H_1) \\ &= P_{D,j} p(r_j^{(1)}) + (1 - P_{D,j}) p(r_j^{(0)}) \\ p(r_j | H_0, g_j) &= P_{F,j} p(r_j^{(1)}) + (1 - P_{F,j}) p(r_j^{(0)}) \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} p(r_j^{(1)}) &= p(r_j | u_j = 1, g_j) = p((\sqrt{\rho g_j} (2u_j - 1) + n_j) | u_j = 1, g_j) = p(n_j | u_j = 1, g_j) = p(r_j - \sqrt{\rho g_j}) \\ p(r_j^{(0)}) &= p(r_j | u_j = -1, g_j) = p(n_j | u_j = -1, g_j) = p(r_j + \sqrt{\rho g_j}) \end{aligned}$$

令  $\chi(r_j) = p(r_j | H_1, g_j) / p(r_j | H_0, g_j)$ ,  $\chi(r_j)$  可简化为

$$\chi(r_j) = \frac{P_{D,j} a_j + 1 - P_{D,j}}{P_{F,j} a_j + 1 - P_{F,j}}, \quad j = 3, 6 \quad (3)$$

其中  $a_j = \exp(2\sqrt{\rho g_j} r_j)$ , 将式(3)代入式(2), 并且两边取对数, 就获得终节点的似然比检测:

$$\sum_{j=3,6} \chi'(r_j) \stackrel{H_1}{>} \stackrel{H_0}{<} t'_0 \quad (4)$$

其中  $\chi'(r_j) = \log(\chi(r_j))$ ,  $t'_0 = \log(t_0)$ ,  $t_0$  是终节点的门限, 式(4)就是终节点的判决形式, 其中信道增益  $g_j$  是已知的。

另外由式(4)可得到终节点的虚警概率为

$$P_{F,0} = P\left(\sum_{j=3,6} \chi'(r_j) > t'_0 | H_0\right) \quad (5)$$

由全概率公式得

$$\begin{aligned} P_{F,0} &= \sum_{u_3, u_6} P(u_3 | H_0) P(u_6 | H_0) \\ &\cdot P\left(\sum_{j=3,6} \chi'(r_j) > t'_0 | u_3, u_6, H_0\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $P(u_3 | H_0) = P_{F,3}^{u_3} (1 - P_{F,3})^{1-u_3}$ ,  $P(u_6 | H_0) = P_{F,6}^{u_6} (1 - P_{F,6})^{1-u_6}$  将式(3)代入式(6), 由于  $r_j = (2u_j - 1)\sqrt{\rho g_j} + n_j$ ,  $a_j = \exp(2\sqrt{\rho g_j} r_j)$ , 得

$$\begin{aligned} P_{F,0} &= \sum_{u_3, u_6} P(u_3 | H_0) P(u_6 | H_0) \\ &\cdot P\left(\sum_{j=3,6} \chi'_{u_j}(n'_j) > t'_0 | u_3, u_6\right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\chi'_{u_j}(n'_j) = \log \frac{P_{D,j} e^{(2u_j-1)2\rho g_j^2 + 2\sqrt{\rho n'_j}} + 1 - P_{D,j}}{P_{F,j} e^{(2u_j-1)2\rho g_j^2 + 2\sqrt{\rho n'_j}} + 1 - P_{F,j}}$ ,  $n'_j \sim C(0, g_j^2)$ , 令  $\Gamma'_{u_3 u_6} = \sum_{j=3,6} \chi'_{u_j}(n'_j)$ ,  $\Gamma'_{u_3 u_6}$  的概率分布函数为  $F'_{\Gamma'_{u_3 u_6}}(\cdot)$ , 那么式(7)可表示为

$$P_{F,0} = 1 - \sum_{u_3 u_6} P(u_3, u_6 | H_0) F'_{\Gamma'_{u_3 u_6}}(t'_0) \quad (8)$$

应用概率理论, 并且假定  $P_{D,j} > P_{F,j}$ ,  $\chi'_{u_j}(n'_j)$ , ( $j = 3, 6$ ) 的概率密度函数和分布函数可分别表示为

$$\begin{aligned} f'_{\chi'_{u_j}}(y) &= \frac{(P_{D,j} - P_{F,j}) e^y}{(P_{D,j} - P_{F,j}) e^y ((1 - P_{F,j}) e^y - (1 - P_{D,j}))} \\ &\times \frac{1}{\sqrt{8\pi\rho^2 |g_j|}} \exp\left[-\frac{1}{8\rho g_j^2} \left(\log \frac{(1 - P_{F,j}) e^y - (1 - P_{D,j})}{P_{D,j} - P_{F,j} e^y} (2u_j - 1) 2\rho g_j^2\right)^2\right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$F'_{\chi'_{u_j}}(t) = \begin{cases} 0, & t < \log((1 - P_{D,j}) / (1 - P_{F,j})) \\ Q\left(\frac{1}{2|g_j| \sqrt{\rho}} \left[\frac{(1 - P_{F,j}) e^t - (1 - P_{D,j})}{P_{D,j} - P_{F,j} e^t} - 2\rho g_j^2\right]\right), & \log \frac{1 - P_{D,j}}{1 - P_{F,j}} < t < \log \frac{P_{D,j}}{P_{F,j}} \\ 1, & t > \log(P_{D,j} / P_{F,j}) \end{cases} \quad (10)$$

其中  $Q(x) = \int_{-\infty}^x g(s) ds$ ,  $g(s)$  为正态分布的概率密度函数, 又由于  $\chi'_{u_j}(n'_j)$ ,  $j = 3, 6$  的独立性,

$$F'_{\Gamma'_{u_3 u_6}}(t'_0) = \int_{A_1}^{B_1} f'_{\chi'_{u_3}}(y) F'_{\chi'_{u_6}}(t'_0 - y) dy \quad (11)$$

由式(10)可看出:  $A_1 = \log((1 - P_{D,3}) / (1 - P_{F,3}))$ ,  $B_1 = \log(P_{D,3} / P_{F,3})$ 。

同理系统总的检测概率  $P_{D,0}$  为

$$P_{D,0} = 1 - \sum_{u_3, u_6} P(u_3, u_6 | H_1) F_{F_{u_3 u_6}}(t'_0) \quad (12)$$

由式(8)和式(12)看出, 要得到终节点的虚警和检测概率, 必须已知中继节点3和节点6的虚警、检测概率。

3.2 中继节点判决规则的推导

系统应用 NP 准则, 终节点的判决为似然比检验, 但由于信道是衰竭并附加噪声的非理想信道, 于是中继节点最优判决的解析式是不容易得到的, 那就撇开中继节点的最优检测, 选择一种次优的检测方案, 仍然应用似然比检测, 这样就大大减少了计算量。中继节点3和节点6的判决推导与终节点的推导是类似的, 这里只以节点3为例来具体说明, 其似然比检测为

$$\sum_{j=1,2} \chi'(r_j) \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} t'_3 \quad (13)$$

其中  $\chi'(r_j) = \log(\chi(r_j))$ ,  $(j = 1, 2)$ ,  $t'_3$  是节点3的检测门限。

那么节点3的虚警和检测概率为

$$P_{F,3} = 1 - \sum_{u_1 u_2} P(u_1, u_2 | H_0) F_{F_{u_1 u_2}}(t'_3) \quad (14)$$

$$P_{D,3} = 1 - \sum_{u_1, u_2} P(u_1, u_2 | H_1) F_{F_{u_1 u_2}}(t'_3) \quad (15)$$

其中  $F_{F_{u_1 u_2}}(t'_3) = \int_{A_1}^{B_1} f_{\chi_{u_1}}(y) F_{\chi_{u_2}}(t'_3 - y) dy$ ,  $f_{\chi_{u_1}}(y)$  的表达式同式(9), 其中  $j = 1$ ,  $F_{\chi_{u_2}}(t'_3 - y)$  的表达式同式(10), 其中  $j = 2$ , 积分上下限分别为  $A_1 = \log((1 - P_{D,1}) / (1 - P_{F,1}))$ ,  $B_1 = \log(P_{D,1} / P_{F,1})$ 。同理要得到中继节点3的虚警和检测概率, 必须已知叶节点1和节点2的虚警和检测概率。

3.3 叶节点判决规则的推导

同中继节点的情况类似, 由于信道的非理想性, 叶节点的最优化判决很难得到, 但是叶节点又确实需要判决规则, 为了计算的简单, 叶节点的判决仍然使用似然比检测, 即

$$A(y_j) = \log \frac{p(y_j | H_1)}{p(y_j | H_0)} \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} t'_j, \quad j = 1, 2, 4, 5 \quad (16)$$

$t'_j$  为判决门限, 假定观测量  $y_j$  的概率分布是已知的, 令  $F_i(\cdot)$  是  $y_j$  在假设  $H_i, i = 0, 1$  的分布函数, 那么对于叶节点  $j$  的虚警概率为  $P_{F,j} = 1 - F_0(t'_j)$ , 检测概率为  $P_{D,j} = 1 - F_1(t'_j)$ 。

因此系统 NP 规则演变为固定  $P_{F,0}$  使检测概率  $P_{D,0}$  最大来确定门限  $t'_j, j = 1, \dots, 7$ 。通常在分布式检测中, 解析的结果是不可能得到的, 只有通过穷尽的迭代搜索来确定各节点的检测门限, 并且在搜索某一节点的门限时, 假定其它所有节点的门限都不变。

4 系统仿真

假定检测系统是从附加高斯白噪声中检测直流信号, 即  $y = s + n, n \sim N(0, 1)$ , 其中  $\rho_j = \rho = 2$ , 各节点判决都为似然比检测, 信道采用二进制相位键控的调制方式来传输各节点的判决信息, 并且信道符合瑞利分布, 通过式(7), 式

(11), 式(12), 式(14), 式(15)和式(16)来迭代搜索出门限的最优值。图2展示了3检测器系统与7检测器系统在两种条件下的接收机输出特性曲线: (a)各节点判决结果通过理想信道传输到上一级节点, (b)各判决结果通过无线信道传输到上一级节点。很明显由于信道衰竭和附加噪声, 直接影响到系统性能。图3阐述了3种关于优化门限设计的接收机输出特性曲线, (c)同一父节点的子节点采用相同的检测门限, (d)各节点采用最优化检测门限, (f)所有的中继节点采用相同的检测门限, 所有的叶节点采用相同的检测门限。由图3看出条件(d)的性能是最好的, 但搜索最优解的过程是异常复杂的, 条件(c)、条件(f)的计算量就明显降低, 但是带来的是性能的降级。

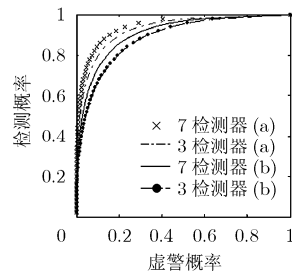


图2 信道和节点数不同的检测系统 ROC 曲线

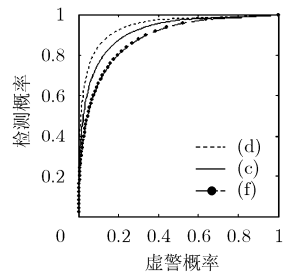


图3 不同检测门限的系统 ROC 曲线

5 结束语

本文基于非理想信道应用 NP 规则研究了树型结构各节点的判决形式, 为了计算的简单和系统的可实现性, 选择了一种次优方案, 即在终节点、中继节点和叶节点都采用似然比判决, 根据特定的系统虚警概率使系统的检测概率取得最大, 从而搜索迭代出各节点的检测门限。最后通过各种情况的仿真表明非理想信道的确影响了系统的检测性能, 各节点应用优化门限的性能好于子节点门限相同的性能。

参考文献

- [1] Tenney R R. Detection with distributed sensors[J]. *IEEE Trans. on AES*, 1981, 17(2): 501-510.
- [2] Viswanathan R. Optimal serial distributed decision fusion [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1988, 24(4): 366-375.
- [3] Tang Z B, Pattipati K P, and Kleinman D L. Optimization of detection networks: Part II - Generalized Tree structures[J]. *IEEE Trans. on Syst. Man Cybern.*, 1993, 23(1): 211-221.
- [4] Chair Z. Optimal data fusion in multiple sensors detection system[J]. *IEEE Trans. on AES*, 1986, 22(1): 98-101.
- [5] 李宏, 王昭, 相明, 赵俊渭, 宫先仪. 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, Zhao Jun-wei, and Gong Xian-yi. An algorithm for Global optimization of distributed

- sonar data fusion[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2000, 18(2): 232-235.
- [6] 相明, 韩崇昭, 赵俊渭, 李钢虎. 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 Chong-zhao, Zhao Jun-wei, Li Gang-hu. Detection fusion algorithm for distributed Neyman-Pearson detection system with Serial structures[J]. *Journal of Detection & Control*, 2002, 24(3): 5-10.
- [7] Chen B and 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. on Inform Theory*, 2005, 51(2): 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 Xiao-guo, Li Yan-jun, and 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.
- [9] Israfil Banceci and Ghassan Al-Regib. Parallel Distributed Detection for Wireless Sensor Networks: Performance Analysis and Design[C], *IEEE Globecom 2005 Proceedings*, Atlanta, 2005, 12: 2420-2424.
- [10] 白银生, 赵俊渭, 相明. 基于 NP 准则的水生信号检测信息融合[J]. *信息与控制*, 2003, 32(6): 517-520.
- Bai Yin-sheng, Zhao Jun-wei, Xiang Ming. Information fusion of underwater acoustic signal detection based on NP criterion[J]. *Information and Control*, 2003, 32(6): 517-520.
- 刘英坤: 女, 1973 年生, 工程师, 博士生, 研究方向为多检测器分布式检测融合算法.
- 冯新喜: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多检测器目标检测、跟踪及态势评估.
- 党宏刚: 男, 1973 年生, 工程师, 研究方向为计算机网络安全.
- 潘平俊: 男, 1977 年生, 助理工程师, 博士生, 研究方向为多检测器目标跟踪.