

# 多跳筛选无线传感器网络决策融合

袁晓光, 杨万海, 史 林

(西安电子科技大学电子工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 为了在保证传感器工作效果的同时控制系统能耗, 在资源受限的无线传感器网络决策融合系统中同时引入传感器信息的多跳传输方式和筛选传输策略。在瑞利分布信道模型下, 推导出该系统的最优融合规则。但该规则需要信道的实时状态信息, 实用性差。为此提出基于信道统计分布信息的次优似然比融合规则, 并给出了小信道信噪比情况下的简化形式。理论分析和仿真表明, 次优规则性能损失较小, 运算量更低, 信息需要更少, 符合资源受限系统的要求; 同时使用筛选策略, 降低了系统的传输能耗。

**关键词:** 决策融合; 无线传感器网络; 似然比检验; 多跳; 筛选策略

**中图分类号:** TN 18

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.48

## Fusion of decisions in multi-hop censoring wireless sensor networks

YUAN Xiao-guang, YANG Wan-hai, SHI Lin

(School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to guarantee a better operation performance for sensors while controlling the system energy consumption, both multi-hop transmission mode and censoring transmission strategy are introduced into the decision fusion of the resource-constrained wireless sensor networks. The optimal fusion rule is derived under the assumption of Rayleigh channel model. However, the optimal fusion rule requires the real-time channel information which is too costly for resource-constrained sensor networks, so a suboptimal likelihood ratio test fusion rule based on the knowledge of channel statistics is proposed. In addition, the simplified form of the suboptimal fusion rule is also given under low channel signal-to-noise ratio (SNR). Theoretical analysis and simulations show that the suboptimal fusion rules need much less computation and information, yet exhibits only slight performance degradation. The introduction of censoring strategy also reduces the energy consumption of system transmission.

**Keywords:** decision fusion; wireless sensor network; likelihood ratio test; multi-hop; censoring strategy

## 0 引 言

无线传感器网络由大量能够采集如温度、湿度、压力等物理量的传感器节点组成。这些传感器具有一定的计算能力, 通过无线方式组成网络, 能够群体协同的完成诸如环境检测、目标探测等任务, 在环境、农业、工业及商业等诸多领域得到了广泛应用。

由于无线传感器节点资源受限的特点, 单个传感器采集到的观测数据并不能完全准确的反映观测对象的真实状态, 在其基础上做出的判断容易产生虚警、漏报等错误。因此, 需要对网络中分布在不同位置的传感器提供的观测数据进行融合, 提高系统的检测性能, 而如果各个传感器都将观测到的原始数据直接传输到融合中心, 会引起很大的传输能耗。为了降低能耗, 需要在各个传感器处首先将观测

数据量化为 1 比特或多比特的局部决策(本文在 1 比特的局部决策的情况下进行研究), 再将局部判决通过无线信道传回融合中心。而以这种方式进行检测的系统就是基于无线传感器网络的分布式决策融合系统。

由于以无线传输的方式进行传感器信息的传递, 分布式决策融合系统的部署难度得以降低; 而运用分布式决策融合的检测方式, 使得资源受限的无线传感器网络在检测性能与系统能耗之间达到了平衡。因而, 近年来在对传统的分布式决策融合系统充分研究的基础上<sup>[1-2]</sup>, 基于无线传感器网络的决策融合问题成为一个新的研究热点并产生了一系列的研究成果: 考虑到无线传感器网络带宽受限的情况, Chamberland 等人给出了决策融合系统中各无线传感器节点上的带宽分配原则<sup>[3]</sup>; 基于瑞利衰减信道, Niu R、李燕君等人对无线传感器网络决策融合系统的融合规则进行

了研究<sup>[4-5]</sup>;而 Niu 和 Xia 则分别在传感器数量不确定的情况下及相关的观测条件下,对无线传感器网络决策融合问题进行了讨论<sup>[6-7]</sup>。

值得注意的是,目前的研究主要着眼于传感器通过无线信道直接向融合中心传输局部决策的单跳传输方式。但是,由于无线传感器网络的资源受限,随着其覆盖范围的扩大,为了在可接受的能耗下保证传感器局部决策的正确传输,袁晓光等人进行了基于多跳的无线传感器网络决策融合问题的研究<sup>[8]</sup>。但是传感器局部决策的多跳传输会增加系统的信息传输次数,反过来又引起系统能耗的上升。相对于现有的无论有、无事件发生,传感器都要向融合中心发送信息的策略,Rago 等人针对低传输速率环境中提出了仅当传感器发现有事件发生时,才向融合中心发送信息的节能的筛选传输策略<sup>[9]</sup>,并且已被应用于单跳的无线传感器网络决策融合系统中<sup>[10-11]</sup>。考虑到应用该策略可减少传感器信息的传输次数,减轻多跳对系统能耗的影响,本文将在同时运用多跳传输方式与筛选传输策略进行传感器信息传递的基础上,对无线传感器网络决策融合问题进行研究。

### 1 系统模型

如图 1 所示,基于无线传感器网络的多跳筛选分布式决策融合系统由传感器、无线信道和融合中心 3 个部分组成( $H_1$  表示有情况发生, $H_0$  表示无情况发生)。下面将分别对各个部分进行说明。

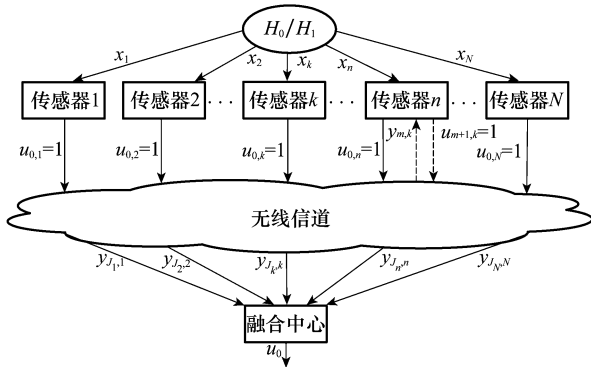


图 1 基于衰减信道的多跳筛选分布式决策融合系统

#### 1.1 传感器

首先,传感器  $i$  根据观测数据  $x_i (i=1, 2, \dots, N)$  进行判断,仅当判断  $H_1$  为真时,通过无线信道发送局部决策  $u_{0,i}=1$  (由实线表示,这里约定传感器对自身局部决策进行的传输计为第 0 步中继传输);同时系统中存在对局部决策的多跳传输:部分传感器如传感器  $n$  接收到来自传感器  $k$  的经过第  $m$  步 ( $m=1, 2, \dots, J_k$ ) 中继传输的局部决策信息  $y_{m,k}$  (由虚线表示),仅当  $y_{m,k}$  不小于传输门限  $\eta_{m,k}$  时,传感器  $n$  以  $u_{m+1,k}=1$  的形式 (由虚线表示) 对  $y_{m,k}$  进行中继传输。上述传感器信息均应用筛选策略进行传输。

#### 1.2 无线信道

传感器  $k$  的局部决策信息  $u_{m,k}=1$ ,经无线信道向传感

器  $n$  进行第  $m$  步中继传输时,受到衰减  $h_{m,k}$  和噪声  $n_{m,k}$  的干扰。当传感器  $n$  接收中继信息时,将得到

$$y_{m,k} = u_{m,k} \cdot h_{m,k} + n_{m,k}, u_{m,k} \in \{0, 1\}$$

式中, $h_{m,k}$  服从瑞利分布,当  $E(h_{m,k}^2)=1$  时,其概率密度函数为  $f(h_{m,k})=2h_{m,k}e^{-h_{m,k}^2}, h_{m,k} \geq 0$ ,噪声  $n_{m,k}$  服从均值为 0,方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。这时信道信噪比为  $SNR=10\log(1/\sigma^2)$ 。同样,融合中心也会接收到类似  $y_{m,k}$  的受到衰减和噪声干扰的传感器的局部决策信息。

### 1.3 融合中心

基于各传感器传输到融合中心的局部决策  $y_{j,i}$  和其他信道参数,融合中心根据预设融合规则得到全局决策  $u_0$ ,判断是否有情况发生。决策融合系统的发现概率及虚警概率分别为  $P_{d0}=P(u_0=1|H_1), P_{f0}=P(u_0=1|H_0)$ 。

## 2 融合规则

多跳无线传感器决策融合系统中,部分传感器的局部判决需要经过其他传感器的中继传递,图 2 以传感器  $k$  为例给出了其局部决策  $u_{0,k}$  经过其他传感器中继,传回融合中心的传输过程。

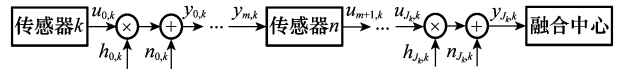


图 2 传感器  $k$  的局部决策的传输过程

我们假设研究的多跳无线传感器决策融合系统中,所有的传感器的观测互相独立,且各个信道的噪声统计分布相互独立。这样可使用简单的似然比判决规则作为使多跳无线传感器决策融合系统贝叶斯风险最小的最优判决规则

$$\Delta = \prod_{k=1}^N \frac{f(y_{j_k,k} | H_1)}{f(y_{j_k,k} | H_0)} \tag{1}$$

与单跳决策融合系统稍有不同,多跳决策融合系统是在已知传感器的发现概率  $P_{dk}=P(u_{0,k}=1|H_1)$  和虚警概率  $P_{fk}=P(u_{0,k}=1|H_0)$  的基础上,使用由于多跳传输而发生改变的修正发现概率  $P_{dk}^{(m)}=P(u_{j_k,k}=1|H_1)$  和修正虚警概率  $P_{fk}^{(m)}=P(u_{j_k,k}=1|H_0)$  进行融合运算的。为了方便对  $P_{dk}^{(m)}$  和  $P_{fk}^{(m)}$  推导,这里首先定义

$$\begin{aligned} P_{j_k,1k} &= P(u_{j_k,k}=1 | u_{0,k}=1, H_1) = \\ & P(u_{j_k,k}=1 | u_{0,k}=1) \\ P_{j_k,2k} &= P(u_{j_k,k}=1 | u_{0,k}=0, H_1) = \\ & P(u_{j_k,k}=1 | u_{0,k}=0) \\ P_{i,1k} &= P(u_{i,k}=1 | u_{0,k}=1) \\ P_{i,k} &= P(u_{i,k}=1 | u_{i-1,k}=1) \\ P_{i,2k} &= P(u_{i,k}=1 | u_{0,k}=0) \\ Q_{i,k} &= P(u_{i,k}=1 | u_{i-1,k}=0) \end{aligned}$$

式中, $k=1, 2, \dots, N; i=0, 1, \dots, J_k$ 。  $P_{j_k,1k}, P_{i,1k}$  和  $P_{i,k}$  分别表示传感器发现目标时,局部决策在传感器与融合中心、负责中继的传感器之间以及局部决策在传感器间中继过程中得到正确传输的概率;而  $P_{j_k,2k}, P_{i,2k}$  和  $Q_{i,k}$  则分别表示传感器局部决策信息在上述的传输对象之间发生错误传递的概率。对于  $P_{dk}^{(m)}$  和  $P_{fk}^{(m)}$  有

$$P_{dk}^{(m)} = P_{dk} P_{J_k,1k} + (1 - P_{dk}) P_{J_k,2k} \quad (2)$$

$$P_{fk}^{(m)} = P_{fk} P_{J_k,1k} + (1 - P_{fk}) P_{J_k,2k} \quad (3)$$

当  $J_k = 0$  时,  $P_{dk}^{(m)} = P_{dk}$  和  $P_{fk}^{(m)} = P_{fk}$ 。由于  $u_{0,k}, y_{0,k}, \dots, u_{J_k,k}, y_{J_k,k}$  构成马尔科夫链, 式(2)、式(3)中的  $P_{J_k,1k}$  和  $P_{J_k,2k}$  可以在已知  $P_{i,1k}, P_{i,k}, P_{i,2k}, Q_{i,k}$  的情况下分别由式(4)和式(5)递推求得

$$P_{m+1,1k} = P_{m+1,k} P_{m,1k} + Q_{m+1,k} (1 - P_{m,1k}) \quad (4)$$

$$P_{m+1,2k} = P_{m+1,k} P_{m,2k} + Q_{m+1,k} (1 - P_{m,2k}) \quad (5)$$

式中,  $m=0, 1, \dots, J_k$ 。由式(4)和式(5)可以看出, 在局部决策的传输过程中如果不出现错误传输或者只出现偶数次错误传输, 则局部决策将得到正确传输, 而当出现奇数次传输错误时, 局部决策的传输将发生错误。

进一步, 通过  $P_{dk}^{(m)}$  和  $P_{fk}^{(m)}$  分别展开条件概率密度函数  $f(y_{J_k,k} | H_1), f(y_{J_k,k} | H_0)$  可得

$$f(y_{J_k,k} | H_1) = \sum_{u_{J_k,k}} f(y_{J_k,k} | u_{J_k,k}, H_1) P_{dk}^{(m)} = \sum_{u_{J_k,k}} f(y_{J_k,k} | u_{J_k,k}) P_{dk}^{(m)} \quad (6)$$

$$f(y_{J_k,k} | H_0) = \sum_{u_{J_k,k}} f(y_{J_k,k} | u_{J_k,k}, H_0) P_{fk}^{(m)} = \sum_{u_{J_k,k}} f(y_{J_k,k} | u_{J_k,k}) P_{fk}^{(m)} \quad (7)$$

### 2.1 最优融合规则

为了简化研究对象, 我们进一步假设所有的无线信道噪声的统计特征都满足相同的高斯分布  $(0, \sigma)$ , 则多跳无线传感器决策融合系统的最优融合规则为

$$\Lambda_1 = \sum_{k=1}^N \log \left[ \frac{P_{dk}^{(m)} e^{-\frac{(y_{J_k,k} - h_{J_k,k})^2}{2\sigma^2}} + (1 - P_{dk}^{(m)}) e^{-\frac{y_{J_k,k}^2}{2\sigma^2}}}{P_{fk}^{(m)} e^{-\frac{(y_{J_k,k} - h_{J_k,k})^2}{2\sigma^2}} + (1 - P_{fk}^{(m)}) e^{-\frac{y_{J_k,k}^2}{2\sigma^2}}} \right] \quad (8)$$

$$\Lambda_2 = \sum_{k=1}^N \log \frac{1 - \left[ \frac{1}{1 + 2\sigma^2} - \frac{\sigma^2}{1 + 2\sigma^2} \sqrt{2\pi} a y_{J_k,k} e^{\frac{(ay_{J_k,k})^2}{2}} \operatorname{erfc}(-ay_{J_k,k}) \right] P_{dk}^{(m)}}{1 - \left[ \frac{1}{1 + 2\sigma^2} - \frac{\sigma^2}{1 + 2\sigma^2} \sqrt{2\pi} a y_{J_k,k} e^{\frac{(ay_{J_k,k})^2}{2}} \operatorname{erfc}(-ay_{J_k,k}) \right] P_{fk}^{(m)}} \quad (12)$$

使用与上一节相同的方法求得传感器的传输门限  $\eta_{m,k}^{cs}$ , 此时有

$$P_{1,1k} = \int_{\eta_{0,k}^{cs}}^{\infty} f_{cs}(y_{0,k} | u_{0,k} = 1) dy_{0,k}$$

$$P_{i,k} = \int_{\eta_{i-1,k}^{cs}}^{\infty} f_{cs}(y_{i-1,k} | u_{i-1,k} = 1) dy_{i-1,k}$$

$$P_{1,2k} = \int_{\eta_{0,k}^{cs}}^{\infty} f_{cs}(y_{0,k} | u_{0,k} = 0) dy_{0,k}$$

$$Q_{i,k} = \int_{\eta_{i-1,k}^{cs}}^{\infty} f_{cs}(y_{i-1,k} | u_{i-1,k} = 0) dy_{i-1,k}$$

使用融合规则  $\Lambda_2$  进行判决, 只要信道的统计分布信息不发生改变, 就不需要调整  $\eta_{m,k}^{cs}$  的数值, 因而也不必反复计算  $P_{J_k,1k}$  和  $P_{J_k,2k}$ , 与  $\Lambda_1$  相比, 计算量大大减小。下面, 将在小信道信噪比情况下, 进一步简化  $\Lambda_2$ 。

**定理 1** 当  $\text{SNR} \rightarrow 0$  时, 融合规则  $\Lambda_2$  可近似为  $\bar{\Lambda}_3$

不失一般性, 这里约定传感器接收到的是由其他传感器发送的中继信号或者来自噪声干扰的概率相等, 通过求解  $f(y_{m,k} | u_{m,k} = 0) = f(y_{m,k} | u_{m,k} = 1)$  中的  $y_{m,k}$  值可得使传感器的中继效果达到最佳的传输门限  $\eta_{m,k}$ 。此时  $\eta_{m,k} = h_{m,k}/2$ 。同时有

$$P_{1,1k} = \operatorname{erfc}(-h_{0,k}/2\sigma)/2$$

$$P_{i,k} = \operatorname{erfc}(-h_{i-1,k}/2\sigma)/2$$

$$P_{1,2k} = \operatorname{erfc}(h_{0,k}/2\sigma)/2$$

$$Q_{i,k} = \operatorname{erfc}(h_{i-1,k}/2\sigma)/2$$

式中,  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  是互补误差函数

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (9)$$

尽管融合规则  $\Lambda_1$  的性能最优, 但是当使用  $\Lambda_1$  进行融合时, 融合中心需要预知传感器局部决策传递过程中的信道状态信息的瞬时值。在实际应用中, 占用的资源很多。因此, 需要寻找更具可行性的融合规则。

### 2.2 次优融合规则

这里提出新的次优融合规则, 与最优融合规则不同, 此规则在计算时, 使用信道的统计分布信息替代了信道的实时状态信息, 这里首先给出  $y_{m,k}$  关于  $u_{m,k}$  的条件概率密度函数<sup>[4-5]</sup>

$$f_{cs}(y_{m,k} | u_{m,k} = 1) = \frac{2\sigma}{\sqrt{2\pi}(1 + 2\sigma^2)} e^{-\frac{y_{m,k}^2}{2\sigma^2}} \left[ 1 + \sqrt{\pi/2} a y_{m,k} e^{\frac{(ay_{m,k})^2}{2}} \operatorname{erfc}(-ay_{m,k}) \right] \quad (10)$$

$$f_{cs}(y_{m,k} | u_{m,k} = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{y_{m,k}^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

式中,  $a = 1/(\sigma\sqrt{1 + 2\sigma^2})$ ;  $m = 0, 1, \dots, J_k, k = 1, 2, \dots, K$ ;  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  的定义与上节相同。根据式(10)和式(11)可得如式(12)所示的新融合规则。

$$\bar{\Lambda}_3 = \sqrt{\pi/2} \cdot \sum_{k=1}^N a (P_{dk} - P_{fk}) \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}\sigma} + \frac{\eta^{cs}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right]^{J_k} y_{J_k,k} \quad (13)$$

**证明** 当  $\text{SNR} \rightarrow 0$  时,  $\sigma \rightarrow \infty, a \rightarrow 0, \operatorname{erfc}(-ay_{J_k,k}) \rightarrow 1, e^{\frac{(ay_{J_k,k})^2}{2}} \rightarrow 1$ 。

则

$$\begin{aligned} \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \Lambda_2 &= \lim_{a \rightarrow 0} \sum_{k=1}^N \log \left[ \frac{1 + \sqrt{\pi/2} \cdot a y_{J_k,k} P_{dk}^{(m)}}{1 + \sqrt{\pi/2} \cdot a y_{J_k,k} P_{fk}^{(m)}} \right] = \\ &= \sqrt{\pi/2} \left( \lim_{a \rightarrow 0} \sum_{k=1}^N a y_{J_k,k} P_{dk}^{(m)} - \lim_{a \rightarrow 0} \sum_{k=1}^N a y_{J_k,k} P_{fk}^{(m)} \right) = \\ &= \sqrt{\pi/2} \cdot \lim_{a \rightarrow 0} \sum_{k=1}^K (P_{dk}^{(m)} - P_{fk}^{(m)}) a y_{J_k,k} \\ & \quad (\text{使用极限 } \lim_{x \rightarrow 0} \log(1 + x) = x) \quad (14) \end{aligned}$$

由式(2)和式(3)可得

$$P_{dk}^{(m)} - P_{fk}^{(m)} = (P_{dk} - P_{fk})(P_{J_k,1k} - P_{J_k,2k}) \quad (15)$$

当  $J_k=0$  时,  $P_{dk}^{(m)} - P_{fk}^{(m)} = P_{dk} - P_{fk}$ 。由于  $P_{1,1k} = P_{1,k}, P_{1,2k} =$

$$Q_{1,k}, \text{ 则 } P_{J_k,1k} - P_{J_k,2k} = \prod_{i=1}^{J_k} (P_{i,k} - Q_{i,k})。$$

当所有信道的  $\sigma \rightarrow \infty$  时,  $P_{i,k} \rightarrow \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{2}\sigma}, Q_{i,k} \rightarrow \frac{1}{2} -$

$\frac{\eta^s}{\sqrt{2\pi\sigma}}$ , 所以有

$$P_{dk}^{(m)} - P_{fk}^{(m)} = (P_{dk} - P_{fk}) \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}\sigma} + \frac{\eta^s}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right]^{J_k} \quad (16)$$

将式(16)代入式(14)可得式(13), 证毕

由于  $\sqrt{\pi/2} \cdot a$  为恒定值, 而当所有传感器的性能参数相同, 即  $P_{dk} = P_d, P_{fk} = P_f$  时 ( $P_{dk} > P_{fk}$ ),  $P_{dk} - P_{fk}$  也是个恒定值, 这时, 融合规则  $\Delta_3$  可以进一步简化为

$$\Delta_3 = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}\sigma} + \frac{\eta^s}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right]^{J_k} y_{J_k,k} \quad (17)$$

融合规则  $\Delta_3$  可以直观地理解为对局部决策信息加权求和,  $\Delta_3$  相对于  $\Delta_1, \Delta_2$  更加简单, 但是由于仅使用信道分布信息, 其检测性能将受到一定影响。

### 3 仿真与性能分析

在本节中, 基于 Matlab6.5 仿真软件, 在信道信噪比  $-10 \text{ dB} \sim 40 \text{ dB}$  (以  $1 \text{ dB}$  为间隔, 每个信噪比下进行 200 万次蒙特卡罗仿真) 的范围内, 对三种融合规则的性能进行仿真分析。图 3 是进行仿真的无线传感器网络决策融合系统的模型。假设任意  $P_{dk} = P_d = 0.5, P_{fk} = P_f = 0.05 (k=1, 2, \dots, N)$ , 传感器的数目  $N=8$ , 系统中所有信道的噪声均服从相同的高斯分布, 各个信道的噪声相互独立(下文中如无特别指出, 则均在上述条件下进行仿真)。

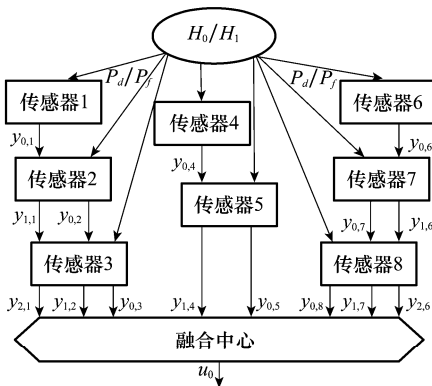


图 3 无线传感器决策融合系统网络模型

图 4 是各信道信噪比均为  $5 \text{ dB}$  条件下三种融合规则的 ROC 曲线图。与理论分析相吻合,  $\Delta_1$  都具有最好的检测性能,  $\Delta_2$  具有十分接近于  $\Delta_1$  的检测性能, 而  $\Delta_3$  的检测性能最低。

文献[12]中提出将偏移系数作为评价检测性能的标准。它可以被看作决策融合系统的输出信噪比, 其值越大, 说明系统的检测性能越好。其定义为

$$DC(\Delta) = \frac{(E(\Delta | H_1) - E(\Delta | H_0))^2}{Var(\Delta | H_0)} \quad (18)$$

式中,  $E(\Delta | H_1)$  和  $E(\Delta | H_0)$  分别为  $H_1$  和  $H_0$  条件下融合结果的数学期望,  $Var(\Delta | H_0)$  是  $H_0$  条件下的方差。相比使用 ROC 曲线, 使用偏移系数可以更方便地比较系统的探测性能。图 5 显示了偏移系数与信道信噪比的关系, 与上节的理论分析吻合,  $\Delta_2$  与  $\Delta_1$  具有相近的检测性能, 当信噪比小于  $0 \text{ dB}$  时,  $\Delta_2$  具有与前两者相似的检测性能。

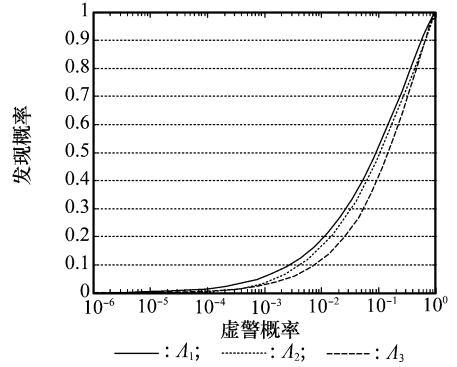


图 4 信噪比  $5 \text{ dB}$  情况下三种融合规则的 ROC 曲线

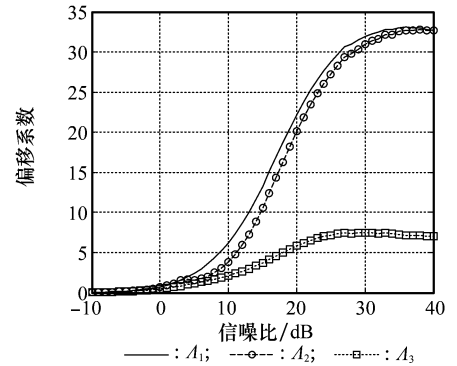


图 5 偏移系数  $DC$  与信道信噪比的关系

图 6 显示了系统发现概率与信噪比的关系(设  $P_{f0} = 0.01$ ), 与图 5 的结论相近,  $\Delta_2$  相对于  $\Delta_1$  的检测性能损失不大, 当信噪比不大于  $0 \text{ dB}$  时,  $\Delta_3$  具有与前两者相似的检测性能; 当信噪比大于  $23 \text{ dB}$  后,  $\Delta_2$  具有与  $\Delta_1$  十分接近的检测性能。

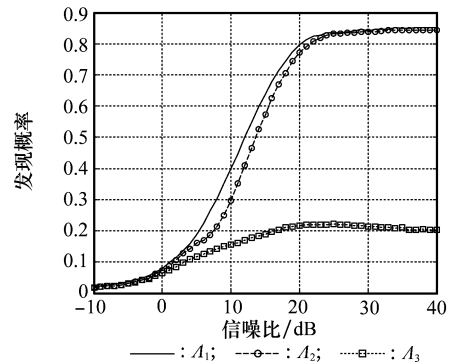


图 6 系统发现概率  $P_d$  与信道信噪比的关系

通常在实际应用中, 很难保证各信道的信噪比相同, 为此, 在其他仿真条件不变的前提下, 针对已知各信道平均信

噪比  $S_0$  的情况,在信道平均信噪比  $S_0$  为  $-10 \text{ dB} \sim 40 \text{ dB}$  的范围内,对三种融合规则重新进行仿真。这里将各信道信噪比调整为: $S_{0,1} = S_{2,6} = S_0 - 6, S_{0,2} = S_{1,4} = S_{0,7} = S_0 - 4, S_{0,5} = S_0 - 2, S_{1,1} = S_{1,6} = S_{0,8} = S_0, S_{0,3} = S_0 + 2, S_{1,2} = S_{0,4} = S_{1,7} = S_0 + 4, S_{2,1} = S_{0,6} = S_0 + 6$ ,其中,  $S_{j,k}$  代表第  $k$  个传感器的局部决策在第  $j$  步中继传输时信道的信噪比,单位均为 dB。图 7 显示了系统发现概率与平均信噪比的关系(设  $P_{f0} = 0.01$ ),对各融合规则之间的检测性能横向比较的结果与图 6 中所示的差异很小。但对每种融合规则的检测结果分别与图 6 中结果进行纵向比较可以看出,当信道信噪比大于  $15 \text{ dB}$  而小于  $30 \text{ dB}$  时,  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的检测性能有所下降,而  $\Delta_3$  的检测性能变化不大。产生上述结果的原因是:当信道信噪比处于中等范围时,对于  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$ ,信道信噪比是其进行决策融合的重要参数,信噪比估计不准确,将影响到  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的检测性能。而  $\Delta_3$  对信道信噪比信息依赖较小,信噪比估计误差对其检测性能的影响不大。总的来说,各融合规则对于较小的信道信噪比估计误差并不敏感,具有实际应用的价值。

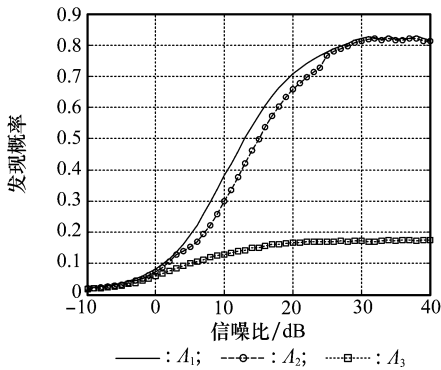


图 7 系统发现概率  $P_d$  与平均信道信噪比的关系

图 8 显示了系统的信息传输总次数与信道信噪比的关系。从总体上讲,当信噪比较低时,较大的噪声水平使得通过门限  $\eta_{m,k}^{cs}$ 、 $\eta_{m,k}$  都无法准确地判断信道中信息的传输状态,因而信息传输总次数较高;随着信道信噪比的提高,噪声干扰逐渐降低,基于门限对信道中是否有信息传输的判断趋于准确,信息传输总次数逐渐下降;当信噪比大于  $30 \text{ dB}$  后,在有信息传输与无信息传输的情况下,信号的幅度差别很大,判断准确性很高,此时,系统信息传输次数逼近理论值  $82.5$  万次。由于相对于固定门限  $\eta_{m,k}^{cs}$ ,动态门限  $\eta_{m,k}$  对噪声的影响更加敏感,在多数情况下,相比  $\eta_{m,k}^{cs}$ ,使用  $\eta_{m,k}$  系统的信息传输总次数更高。在信道信噪比不均匀的情况下,由于门限  $\eta_{m,k}^{cs}$ 、 $\eta_{m,k}$  与实际信噪比不完全匹配,当信噪比大于  $0 \text{ dB}$  而小于  $30 \text{ dB}$  时,相对于信道信噪比估计准确的情况,系统的信息传输总次数增加。总体上讲,使用筛选传输机制,系统中信息传输总次数即使在信噪比很低的情况下也明显低于传统传输机制( $300$  万次),可显著降低系统能耗。

### 4 结 论

本文推导了多跳筛选无线传感器网络决策融合系统的

最优融合规则,并进一步提出了系统资源需求更少的次优融合规则,接着在小信道信噪比下,给出了更为简化的次优规则。理论分析与仿真实验表明,次优融合规则具有一定的实用价值。在实际的应用中,应该根据情况灵活选择不同的融合规则,在检测性能、运算复杂度与系统能耗之间达到平衡。

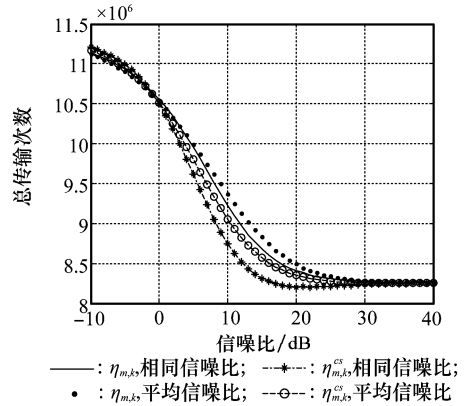


图 8 系统信息传输总次数与信道信噪比的关系

### 参 考 文 献 :

- [1] Chair Z, Varshney P K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 22(1): 98 - 101.
- [2] Willett P K, Swaszek P F, Blum R S. The good, bad, and ugly; distributed detection of a known signal in dependent Gaussian noise [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2000, 48(12): 3266 - 3279.
- [3] Chamberland J, Veeravalli V V. Decentralized detection in sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003, 51(2): 407 - 416.
- [4] Niu R, Chen B, Varshney P K. Fusion of decisions transmitted over Rayleigh fading channels in wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(3): 1018 - 1027.
- [5] 李燕君, 王智, 孙优贤. 资源受限的无线传感器网络基于衰减信道的决策融合[J]. *软件学报*, 2007, 18(5): 1130 - 1137.
- [6] Niu R, Varshney P K. Performance analysis of distributed detection in a random sensor field [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2008, 56(1): 339 - 349.
- [7] Xia Yifan, Zhu Yunmin, Ren Qing'an. The decision fusion in the wireless network with fading channels [C] // *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008, 4075 - 4079.
- [8] 袁晓光, 杨万海, 史林. 多跳无线传感器网络决策融合[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(4): 976 - 981. (Yuan Xiaoguang, Yang Wanhai, Shi Lin. Decision fusion in multihop wireless sensor networks [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4): 976 - 981.)
- [9] Rago C, Willett P K, Bar-Shalom Y. Censoring sensors: a low-communication-rate scheme for distributed detection [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 554 - 568.
- [10] Jiang R, Chen B. Fusion of censored decisions in wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(6): 2668 - 2673.
- [11] 刘向阳, 彭应宁. 基于删除的混合融合准则 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(1): 159 - 162.
- [12] Picinbono B. On deflection as a performance criterion in detection [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(3): 1072 - 1081.