

DOI: 10.7652/xjtuxb201302013

周界监测中的阈值优化和多模态节点协同检测算法

邓遂^{1,2}, 邓瀚林¹, 梁庆伟², 曹红兵¹, 刘海涛¹

(1. 无锡物联网产业研究院, 214213, 江苏无锡; 2. 中科院上海微系统与信息技术研究所
无线传感网络与通信重点实验室, 200050, 上海)

摘要: 为提高无线传感器网络周界监测中多节点的目标协同检测能力, 提出了一种新的阈值优化方法及多模态节点协同检测算法。首先, 在一定的环境噪声下, 采用蒙特卡罗方法建立节点虚警率与节点阈值之间、系统虚警率与系统阈值和节点虚警率之间的映射关系, 通过查表直接获取阈值, 实现了节点和系统阈值优化; 然后, 利用节点的空间分布特性和目标信号信噪比, 对节点检测结果进行加权修正, 实现了多模态节点的检测结果融合; 最后, 通过仿真实验对阈值优化方法和多模态节点协同检测算法进行了验证。仿真结果显示, 相对于单模态节点协同检测算法和简单阈值判决算法, 多模态节点协同检测算法的目标检测率分别提高了约 25% 和 3%。

关键词: 无线传感器网络; 周界监测; 阈值优化; 协同检测

中图分类号: TN914.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)02-0075-06

A New Optimization Method for Thresholds and Collaborative Targets Detection in Perimeter Monitoring

DENG Sui^{1,2}, DENG Hanlin¹, LIANG Qingwei², CAO Hongbing¹, LIU Haitao¹

(1. Wuxi Sensing Net Industrialization Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214213, China; 2. Key Laboratory of Wireless Sensor Network and Communications, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

Abstract: A new optimization method for thresholds and a multi-modal nodes collaborative detecting algorithm are proposed to improve the target detection capability of perimeter monitoring in wireless sensor networks. The optimization of the node and the system thresholds is realized by using the Monte Carlo method to create the mapping table between the node false alarm rates and the node thresholds, as well as the mapping table among the system false alarm rates, the node false alarm rates and system thresholds. Then, the optimal node and system thresholds are obtained by looking up the mapping tables. The results of the multi-modal nodes collaborative detecting is fused by using the distributed characteristics of nodes and target signal-to-noise ratio to revise the weighting of the node detecting results. Simulation experiments and comparisons with the single-modal node collaborative detecting algorithm and the simple thresholds detecting algorithm show that the multi-modal nodes collaborative detecting algorithm increases the target detection rate by about 25% and 3%, respectively.

Keywords: wireless sensor networks; perimeter monitoring; thresholds optimization; collaborative detection

收稿日期: 2012-05-15。 作者简介: 邓遂(1985—),男,博士,工程师;刘海涛(通信作者),男,研究员。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB302901);江苏省自然科学基金资助项目(BK2011035)。

网络出版时间: 2012-12-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121227.1733.001.html>

近年来,机场、港口、码头、油库、电厂、银行等重要民用设施面临的安全形势日益严峻,而基于无线传感器网络的周界监测技术能有效检测入侵目标,提高现有技术手段的可靠性和稳定性,是周界监测技术发展的重要方向。在周界监测传感网中,由于节点分布在监测区域的不同位置,单个节点的目标检测能力有限,因此需要多个节点进行目标协同检测。

对于多传感器节点的目标协同检测问题,目前主要有两种解决思路^[1]:一是所有节点将检测到的信号特征直接发送到融合节点,由融合节点进行数据融合并判决;二是每个节点首先判决是否目标出现,再将判决结果发送到融合节点,由融合节点进行决策融合。目前关于多传感器节点的目标协同检测的大多数研究都是围绕第二种思路展开的,从方法上来看,主要采用基于贝叶斯理论^[2-3]和 Neyman-Pearson 准则^[4]两种方法进行节点阈值优化和检测结果融合,近年来,也有从节点和系统的拓扑等特性^[5-8]和目标信号^[9]等信息着手,运用模糊逻辑方法、证据理论方法^[10]等进行节点检测结果融合,进而实现节点和系统阈值优化的方法。

目标协同检测算法的节点检测和结果融合都涉及到判决阈值优化的问题。现有阈值优化方法^[5-6]主要通过数理统计方法建立阈值与系统指标之间的近似函数关系,这就存在两个缺陷:一是这种方法的适用前提是节点数量足够多,否则会带来较大误差;二是这种方法与具体算法、环境和网络拓扑结构等密切相关,实际上甚至无法得到明确的函数表达式。因此,如何选择和优化目标协同检测算法中的节点阈值和系统阈值,是进行协同检测算法设计时首先需要解决的问题。本文首先通过蒙特卡罗方法建立阈值关系映射表,直接通过查表获取系统阈值,然后提出了一种多模态节点协同检测算法,并通过仿真实验进行了验证。

1 基于阈值判决的目标协同检测

1.1 传感器节点目标协同检测模型

对于单个节点 s_i , 目标检测问题可以表示为如下的二元假设检验问题^[3]

$$\begin{cases} H_0: y_i = n_i \\ H_1: y_i = a_i + n_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: y_i 表示节点采集的信号; a_i 表示目标信号传播至节点 s_i 、由节点 s_i 接收的信号幅度; n_i 表示环境噪声。节点依据一定的判决规则 $g_i(y_i)$ 做出判决 d_i , 判决结果如下

$$d_i = g_i(y_i) = \begin{cases} 0, & H_0 \\ 1, & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

节点 s_i 虚警率定义为 $p_{fi} = P(d_i = 1 | H_0)$, 检测率定义为 $p_{di} = P(d_i = 1 | H_1)$, 漏警率定义为 $p_{mi} = P(d_i = 0 | H_1)$, 显然, $p_{mi} = 1 - p_{di}$ 。

当节点 s_i 完成目标检测后, 会由局部融合中心对 s_i 的判决结果 d_i 进行评估, 得到处理结果为 z_j 。然后利用节点判决结果融合算法对 $\{z_1, z_2, \dots, z_{N_w}\}$ 进行融合, 得出最终判决结果 $d \in \{0, 1\}$ 。至此, 一组传感器节点的目标协同检测模型可以表示为

$$\left. \begin{aligned} d_i &= g_i(y_i) \\ z_j &= h_j(\{d_1, \dots, d_N\}, \{c(s_1), \dots, c(s_N)\}) \\ d &= f_K(\{z_1, z_2, \dots, z_W\}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$; $j=1, 2, \dots, W$; $c(s_i)$ 表示节点 s_i 的特性; h_j 表示对各节点检测结果的评估函数; f_K 表示节点判决结果融合算法。

1.2 采用简单阈值判决的目标协同检测算法^[1,5]

利用一组相同模态的传感器节点进行目标协同检测, 一个简单而直接的方法是在各节点上设置检测阈值, 假设节点 s_i 上的阈值为 τ_i , 进行目标检测时, 若节点 s_i 采集到的信号 y_i 超过阈值 τ_i 则输出 $d_i = 1$, 否则输出 $d_i = 0$; 在系统层面上, 设置系统阈值 T , 若输出检测结果 $d_i = 1$ 的节点个数多于 T , 则最终判决 d 为 1, 否则最终判决 d 为 0。描述如下:

(1) 节点 s_i 采集信号 y_i , 并做出判决 $d_i = I(y_i \geq \tau_i)$, 其中, $I(\xi)$ 为条件判决函数, ξ 为真时输出 1, ξ 为假时输出 0;

(2) 节点将判决结果发送至融合节点;

(3) 融合节点做出判决 $d = I(\sum_{i=1}^N d_i \geq T)$ 。

对于分布在监测区域内的一组相同模态传感器节点, 假设各节点处的环境噪声是独立同分布的, 且分布函数为 G , 即 $P(n_{\text{env}} < x) = G(x)$ (其中 n_{env} 表示环境噪声), 那么节点 s_i 的虚警率 p_{fi} 可以表示为

$$p_{fi} = P(d_i = 1 | H_0) = P(y_i > \tau_i | H_0) = P(n_i > \tau_i) = 1 - G(\tau_i) \quad (4)$$

为便于讨论, 在相同的噪声环境下, 相同模态的传感器节点取相同的节点阈值 τ , 这样虚警率可以表示为 $p_f = 1 - G(\tau)$ 。

类似地, 节点 s_i 的检测率 p_{di} 可以表示为

$$p_{di} = P(d_i = 1 | H_1) = P(y_i > \tau_i | H_1) = P(n_i > \tau_i - a_i) = 1 - G(\tau_i - a_i) \quad (5)$$

在 H_0 为真的情况下, 用 F 表示系统的虚警率, 则有

$$F = P\left(\sum_{i=1}^N d_i \geq T \mid H_0\right) = \sum_{i=T}^N \binom{N}{i} p_i^i (1-p_i)^{N-i} \quad (6)$$

根据中心极限定理,当 N 很大时,系统虚警率 F 有如下的近似表达

$$F \approx 1 - \Phi\left(\frac{T - Np_i}{(Np_i(1-p_i))^{1/2}}\right) \quad (7)$$

类似地,用 D 表示系统的检测率,则有

$$\begin{aligned} D &= P\left(\sum_{i=1}^N d_i \geq T \mid H_1\right) = \\ &= \sum_{i=T}^N \sum_{\pi \in \Gamma} \prod_{j=1}^i p_{d\pi(j)} \prod_{j=i}^N (1-p_{d\pi(j)}) = \\ &= \sum_{i=T}^N \sum_{\pi \in \Gamma} \prod_{j=1}^i (1-G(\tau_j - a_{\pi(j)})) \prod_{j=i}^N G(\tau_j - a_{\pi(j)}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: Γ 是 $1, 2, \dots, N$ 的全排列集合。

2 基于蒙特卡罗的系统阈值优化方法

在一定的环境噪声背景下,传感器节点的虚警率由节点阈值决定,可以利用统计方法获得节点在不同的节点阈值条件下对应的虚警率,当背景环境发生变化时,系统自适应更新节点阈值与虚警率之间的映射关系。

对于简单阈值判决的相同模态节点协同检测算法,系统虚警率 F 可以用式(7)进行近似计算,但是,这种方法要求节点输出判决为 0 或者 1,并且不能满足实际应用中依据实际环境、网络拓扑结构等进行算法实时调整的需要。鉴于此,本文提出一种获得系统虚警率与系统阈值映射关系的方法,该方法步骤如下:

(1)在当前环境下通过设置不同节点阈值 τ ,建立节点阈值与节点虚警率 p_i 的映射关系;

(2)设置不同系统阈值 T ,基于当前网络拓扑结构、节点结果融合算法和不同的节点虚警率等,利用蒙特卡罗方法建立系统虚警率 F 与系统阈值 T 和节点虚警率 p_i 的映射关系;

(3)根据对系统虚警率 F 的要求,以及对节点虚警率 p_i 的要求(也可能是要求在满足系统虚警率 F 的情况下,依据当前环境和节点结果融合算法,选择合适的节点虚警率 p_i 使得系统检测率 D 最大),查找系统虚警率 F 与系统阈值 T 和节点虚警率 p_i 的映射关系,得到系统阈值 T ;

(4)当环境发生变化时,回到步骤(1),更新节点阈值 τ 与节点虚警率 p_i 的映射关系,当系统网络拓

扑结构或节点融合算法等与节点判决和节点判决结果融合有关的特性发生变化时,更新系统虚警率 F 与系统阈值 T 和节点虚警率 p_i 的映射关系。

3 基于节点模态和空间特性的阈值判决协同检测算法

在周界监测应用中,需要对处于不同位置、不同模态的传感器节点检测结果进行融合,得到最终判决结果。本节分析节点判决结果的加权模型,并将基于简单阈值判决的节点协同检测算法扩展为多模态传感器协同检测算法。

3.1 节点判决结果加权模型

简单阈值判决算法忽视了两个问题:①不同节点的接收信号强度存在强弱差异;②节点的空间特性对判决结果有明显的影响。利用节点接收信号、邻居节点接收信号和检测结果对节点的检测结果进行修正,是提高系统检测率的有效方法。

为对不同模态传感器接收信号的强度进行比较和融合,采用信号信噪比作为衡量节点接收信号强度的指标。另外,还要考虑节点空间特性对权重的影响,即距离当前节点越近的节点,其权值应该更大。这样,当节点 s_i 得出判决结果 d_i 后,利用周围最近的 m 个节点的判决结果、当前接收信号的信噪比和距离建立加权模型如下

$$\left. \begin{aligned} w_{ij} &= \frac{1}{(1+k_1 r_{ij}^{k_2})(1+e^{-k_3(R_{SN,j}-R_{SN,i})})} \\ z_i &= \frac{\sum_{j=1}^m w_{ij} d_j}{\sum_{j=1}^m w_{ij}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: w_{ij} 表示节点 s_j 对节点 s_i 的影响因子; $R_{SN,j}$ 和 $R_{SN,i}$ 分别表示节点 s_j 和节点 s_i 的当前接收信号的信噪比; k_1 、 k_2 和 k_3 是常数; m 是选取最近节点的个数; d_j 是邻居节点的判决结果; z_i 是节点经过加权后的判决结果。

3.2 多模态传感器节点协同检测算法

通过各自的映射关系设置不同的节点检测阈值,使得不同模态传感器节点的虚警率相同,多模态传感器节点协同检测算法完成一次目标检测的步骤如下:

(1)节点 s_i 采集信号 y_i ,并做出初步判决 $d_i = I(y_i \geq \tau_i)$,其中 $i=1, 2, \dots, N$ (τ_i 为节点阈值);

(2)节点 s_i 根据距离最近的 m 个节点的判决结果、接收信号信噪比和距离,对初步判决结果 d_i 进

行加权修正,输出加权判决结果 z_i ;

(3)将各节点的加权判决结果分布式相加,结果发送至系统后台,做出最终判决 $d = I(\sum_{i=1}^N z_i \geq T_f)$, 其中 τ_i 是节点阈值,相同模态的节点阈值是相同的,通过查询节点阈值与节点虚警率映射关系得到, T_f 是系统阈值,通过查询系统虚警率与系统阈值、节点虚警率的映射关系得到。需要说明的是,简单阈值判决算法中系统阈值用 T 表示,是一个整数,而多模态传感器节点协同检测算法中的系统阈值不是一个整数,因而用 T_f 表示。

4 仿真实验及结果分析

4.1 系统虚警率映射关系

由于默认所有节点虚警率相同,因此节点虚警率 p_f 统一用 α 表示。图1是相同模态传感器节点简单阈值判决算法的系统虚警率 F 与系统阈值 T 和节点虚警率的映射关系。仿真实验中,假设50个振动传感器节点均匀随机分布在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的检测区域中。

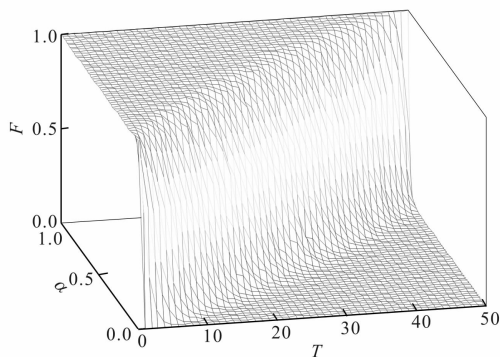


图1 简单阈值判决算法中系统虚警率与系统阈值和节点虚警率的映射关系

图2表示了50个声音传感器节点和50个振动传感器在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 监测区域中的分布情况。图3则是在图2所示的节点分布情况下、采用多模态传感器节点协同检测算法的虚警率 F 与节点虚警率 α 和系统阈值 T_f 的映射关系。

4.2 多模态传感器节点协同检测算法性能分析

仿真实验中,算法分析和测试主要是基于系统检测率指标 D 进行的。与 D 有关的节点和系统参数有节点虚警率 α 、系统虚警率 F 及目标信号的信噪比 R_{SN} 。

为了模拟目标声音信号和震动信号的传播过程,假设声音信号噪声 n_1 和振动信号噪声 n_2 均服

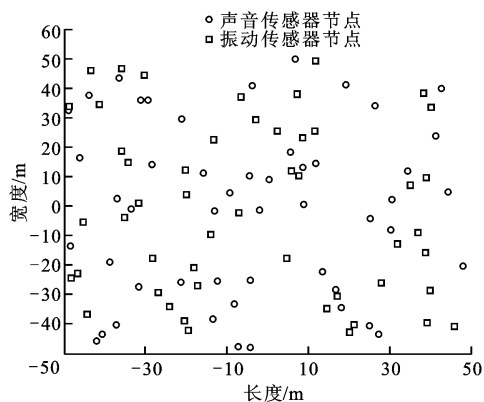


图2 节点分布情况示意图

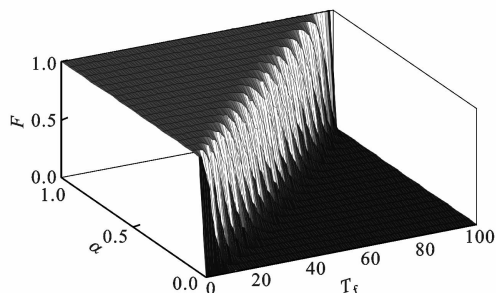


图3 多模态传感器节点协同检测算法的虚警率与节点虚警率和系统阈值的映射关系

从均值为0、方差为1的高斯分布,即 $n_1 \sim N(0,1)$, $n_2 \sim N(0,1)$ 。仿真过程中只考虑距离因素对信号的衰减作用以及环境噪声对信号的影响,由于声音信号的衰减特性是与距离的平方成反比,而振动信号能量的衰减特性是与距离成反比,所以,能量衰减公式分别表示为 $E_{1r} = \frac{E_{10}}{1 + \eta_1 r^2}$, $E_{2r} = \frac{E_{20}}{1 + \eta_2 r}$, 其中 E_{10} 和 E_{20} 分别表示目标发出的声音信号和振动信号能量, E_{1r} 和 E_{2r} 分别表示与目标距离为 r 处的信号剩余能量, η_1 和 η_2 表示衰减因子,分别取值为0.05和1,节点判决结果加权参数 k_1 、 k_2 和 k_3 分别取值1、0.5和0.01。

实验1 为分析节点虚警率 α 对系统检测率 D 的影响,设定所有 α 是相同的,并由0.05递增至0.95; F 设定为0.1;目标发出的声音信号和振动信号信噪比 R_{SN} 均为8 dB。仿真实验结果如图4所示。

由仿真结果可以看到:在节点虚警率 α 相同的情况下,多模态协同检测算法的系统检测率优于简单阈值判决算法;对于只对系统虚警率 F 有要求的情况,图4中 D 的最大值是在节点虚警率为0.3处取得,这说明可通过调整节点阈值改变 α ,使得 D 保持在较高水平。

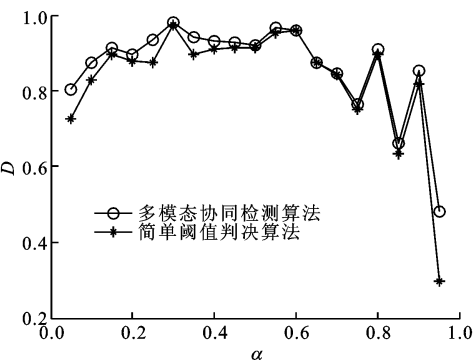


图 4 系统检测率受节点虚警率影响的变化曲线

实验 2 为分析系统虚警率 F 对系统检测率 D 的影响,设定所有节点虚警率 α 为 0.2,目标发出的声音信号和振动信号信噪比 R_{SN} 均为 8 dB,系统虚警率 F 由 0 递增至 0.5。仿真实验结果如图 5 所示。

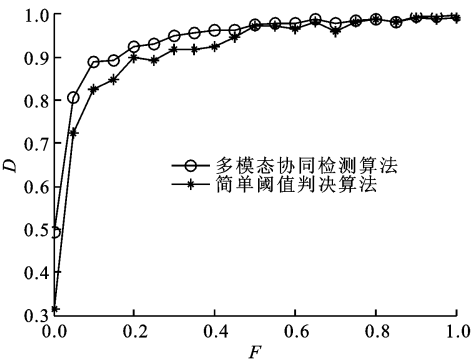


图 5 系统检测率受系统虚警率影响的变化曲线

从图 5 中可以看出:过低的系统虚警率要求会导致系统检测率降低,而适当提高系统的虚警率则可以大幅提高系统检测率;在对系统虚警率要求相同的情况下,多模态协同检测算法明显优于简单阈值判决算法。

实验 3 为分析目标信号信噪比 R_{SN} 对系统检测率的影响,设定系统虚警率 F 为 0.1,所有节点虚警率 α 为 0.2,目标发出的声音信号信噪比 $R_{SN,s}$ 和振动信号信噪比 $R_{SN,v}$ 分别由 -10 dB 递增至 20 dB。仿真结果如图 6、图 7 所示。其中,图 6 表示在目标声音信号信噪比为 0 dB 的情况下,不同信噪比的振动信号对系统检测率的影响;图 7 表示在目标振动信号信噪比为 0 dB 的情况下,不同信噪比的声音信号对系统检测率的影响。

实验 4 简单阈值判决算法本质上也融合了多模态传感器节点的检测结果。为分析多模态融合协同对系统检测率的影响,设定系统虚警率 F 为 0.1,节点虚警率 α 为 0.2。仿真中进行 20 次测试,每次测试 1 000 组目标样本,每组样本中目标发出的声音信

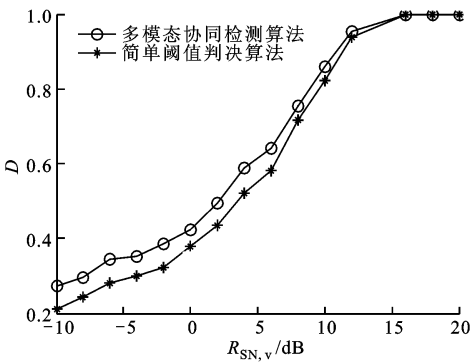


图 6 目标振动信号信噪比对系统检测率的影响曲线

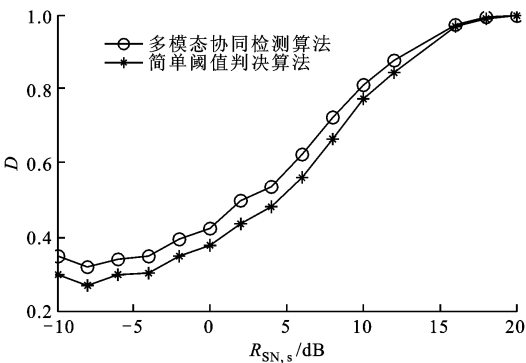


图 7 目标声音信号信噪比对系统检测率的影响曲线

号和振动信号的信噪比分别在 -10 dB 至 20 dB 之间随机取值,目标位置在监测区域中随机出现。分别利用多模态协同检测算法、简单阈值判决算法和 2 种单模态节点简单阈值判决方法进行仿真实验,结果如图 8 所示。

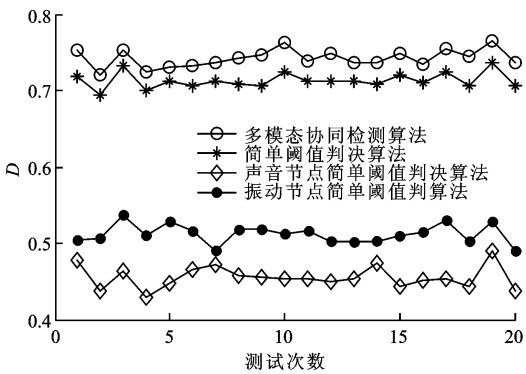


图 8 不同检测算法的系统检测率统计结果

从图 8 中可以看到,仅利用声音传感器节点或者振动传感器节点进行目标检测的系统检测率仅在 50% 左右,而融合了声音传感器和振动传感器检测结果的简单阈值判决算法将系统检测率提高到 72% 左右,多模态协同检测算法的系统检测率比简单阈值判决算法的高约 3%。

5 结 论

本文对周界监测应用中的目标协同检测问题进行了分析研究,首先通过分析系统虚警率的影响因素,提出了一种基于蒙特卡罗方法的系统虚警率与节点虚警率和系统阈值的映射关系方法,依据此映射关系可以直接查找满足系统和节点虚警率要求的系统阈值。在此基础上,提出了一种多模态协同检测算法,利用节点的空间分布特性和接收的目标信号信噪比,对节点的目标检测结果进行加权修正,实现了多模态传感器节点的检测结果融合;然后基于系统虚警率与节点虚警率和系统阈值的映射关系方法,对多模态协同检测算法进行了仿真测试,并与简单阈值检测算法进行了比较。

仿真结果显示,本文提出的多模态协同检测算法,可以在较低的系统虚警率情况下获得较高的系统检测率,提高周界监测系统的目标检测能力,且算法稳定、实用,对于不同的应用环境具有良好的适应性。

参考文献:

- [1] CLOUQUEUR T, PHIPATANASUPHORN V, RAMANATHAN P, et al. Sensor deployment strategy for detection of targets traversing a region [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2003, 8(4): 453-461.
- [2] TENNEY R R, SANDELL N R. Detection with distributed sensors [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, 17(4): 501-510.
- [3] CHAIR Z, VARSHNEY P K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 22(1): 98-101.
- [4] VISWANATHAN R, VARSHNEY P K. Distributed detection with multiple sensors: I fundamentals [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(1): 54-63.
- [5] NIU Ruixin, VARSHNEY P K, CHENG Qi. Distributed detection in a large wireless sensor network [J]. *Information Fusion*, 2006, 7(4): 380-394.
- [6] KATENKA N, LEVINA E, MICHAILIDIS G. Local vote decision fusion for target detection in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(1): 329-338.
- [7] KIEU-XUAN T, KOO I. A collaborative event detection scheme using fuzzy logic in clustered wireless sensor networks [J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2011, 65(5): 485-488.

- [8] WANG Yun, LUN Zhengdong. Intrusion detection in a k -Gaussian distributed wireless sensor network [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011, 71(12): 1598-1607.
- [9] 张彦航, 苏小红, 马培军. 基于最大置信度的多目标检测算法 [J]. *信号处理*, 2012, 28(1): 39-46.
ZHANG Hangyan, SU Xiaohong, MA Peijun. Detection of multi-target based on maximum confidence [J]. *Signal Processing*, 2012, 28(1): 39-46.
- [10] 赵振宇, 徐玉清, 沈晓强, 等. 高效混合式协同检测方法研究 [J]. *无线电通信技术*, 2011, 37(6): 55-57.
ZHAO Zhenyu, XU Yuqing, SHEN Xiaoqiang, et al. Research on high-efficiency mixed cooperative detecting method [J]. *Radio Communications Technology*, 2011, 37(6): 55-57.

[本刊相关文献链接]

- 李彬, 王文杰, 殷勤业, 等. 无线传感器网络节点协作的节能路由传输. 2012, 46(6): 1-6.
- 代亮, 许宏科, 陈婷. 无线传感器网络可分负载调度算法. 2012, 46(6): 23-28.
- 梁庆伟, 姚道远, 巩思亮. 一种保障时延能量高效的无线传感器网络路由协议. 2012, 46(6): 48-52.
- 刘遼, 刘三阳, 冯海林. 双信道无线传感器网络移动代理路由算法. 2012, 46(2): 113-118.
- 李彬, 王文杰, 殷勤业, 等. 一种利用天线旋转的无线传感器网络定位算法. 2011, 45(4): 60-66.
- 金枫, 郑辑光, 曹建福, 等. 一种高吞吐量的无线传感器网络多信道 MAC 协议. 2010, 44(12): 32-37.
- 杨新宇, 孔庆茹, 戴湘军. 一种改进的加权质心定位算法. 2010, 44(8): 1-4.
- 何欣, 桂小林, 安健. 面向目标覆盖的无线传感器网络确定性部署方法. 2010, 44(6): 1-9.
- 代亮, 沈中, 常义林, 等. 无线传感器网络多轮任务调度算法. 2010, 44(6): 27-32.
- 张荣博, 曹建福. 利用蚁群优化的非均匀分簇无线传感器网络路由算法. 2010, 44(6): 33-38.
- 全杰, 钱德沛, 刘轶, 等. 针对事件驱动型传感器网络的多路径编码路由协议. 2010, 44(6): 39-45.
- 安源, 孙利民, 马彩文, 等. 一种能量高效的无线传感器网络等值线监测技术. 2010, 44(2): 56-60.
- 王文杰, 张渭乐, 殷勤业. 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法. 2010, 44(2): 61-66.
- 陈衡, 钱德沛, 伍卫国. 无线传感器网络地理位置路由度量方法. 2009, 43(12): 55-59.
- 方维维, 钱德沛, 褚天舒. 分簇无线传感器网络可靠高效的数据传输方案. 2009, 43(8): 28-32.

(编辑 刘杨)