

文章编号: 1001-0920(2012)06-0945-04

二进制检测声音传感器网络协作检测效能研究

刘忠¹, 罗浩^{1,2}, 薛锋¹, 任雄伟¹

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 2. 海军装备研究院, 北京100161)

摘要: 为研究表决融合检测准则对声音传感器网络系统探测效能的影响, 先将监测区域进行网格化, 然后定义两个用于评价传感器网络检测效能的指标, 并以定理的形式给出了其计算方法. 仿真分析表明, 所提出的效能指标可用于定量评价系统的检测效能, 为检测准则中参数的选取和网络部署方案的优化提供了理论依据.

关键词: 传感器网络; 协作检测; 表决融合检测准则; 检测效能

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Research on cooperative detection efficiency for binary-detection acoustic sensor networks

LIU Zhong¹, LUO Hao^{1,2}, XUE Feng¹, REN Xiong-wei¹

(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China. Correspondent: LUO Hao, E-mail: luohao123_ren@163.com)

Abstract: In order to study the influence of the voting fusion regulation on detection efficiency of acoustic sensor network, sensor field is discretized into multiple grids, and two metrics are defined to evaluate the detection capability of the sensor network. Calculation methods for the metrics are given with theorem descriptions. Simulations indicate that the proposed metrics can evaluate the detection efficiency of the system in a quantitative style, and they can provide theoretic evidence for the parameter selection of the detection regulation and the optimization of the sensor deployment scheme.

Key words: sensor network; cooperative detection; voting fusion regulation; detection efficiency

1 引言

传感器网络的协作检测算法对于提高系统的检测性能具有重要意义. 文献[1]在计算网络对监测区域内任一网格点的漏警概率时, 采用了“或”融合检测准则. [2-3]提出了信息覆盖的概念, 并研究了信息覆盖对参数估计的影响. [4]采用求和或者 l^2 -norm融合准则融合多个传感器节点的检测信息, 在虚警概率和漏检概率不变的情况下扩大了有效感知区域. [5]提出了一种理论分析模型TAM(triangular analytical model), 用于分析3个传感器节点的协作检测能力. [6]提出了一种高效覆盖的水下传感器网络的部署策略, 其采用Neyman-Pearson融合检测准则计算局部正三角形网格或正方形网格部署对网格内任一点的检测概率, 但该文没有从网络整体的角度对系统检测性能进行分析与评价.

目前, 对于采用表决融合检测准则的系统检测效

能分析尚不多见. 表决融合检测准则是一种经典的检测融合策略, 它设置检测到目标的条件为系统中至少有 m 个节点检测到目标. 由于该检测融合算法只需要各节点将自身的二进制检测结果(“0”或“1”)发送给融合中心, 传输的数据量很少, 适用于能量受限的传感器网络^[7-8]. 本文选择声能量测量传感器网络为研究对象, 研究了表决融合检测准则对系统检测性能的影响, 提出两种用于评价传感器网络对监测区域整体检测效能的指标, 并给出了这两种指标的计算方法. 仿真分析表明, 所提出的指标可用于定量评价系统的检测效能, 为系统选择表决融合检测准则的参数和部署方案提供了理论依据.

2 网络描述

假设传感器网络由1个融合中心和 N 个同类的声音传感器网络节点构成. 传感器节点被限定部署在平面监测区域 R 中, 各声音传感器节点可通过测量周

收稿日期: 2010-11-20; 修回日期: 2011-02-21.

基金项目: 国家863计划项目(2007AA01Z309); 湖北省自然科学基金项目(2007ABA187, 2009CDB301).

作者简介: 刘忠(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事系统建模与仿真等研究; 罗浩(1983-), 男, 博士生, 从事传感器网络协作检测与跟踪的研究.

围环境的声音能量并与阈值进行比较来判断是否存在目标,若存在目标,则给融合中心发送“1”.融合中心采用表决融合准则(当网络中有 m 个或 m 个以上节点检测到目标时,判断系统检测到目标)对目标是否存在作出最终决策.

根据文献[9-10],声音传感器节点通过对一个时间间隔内采样得到的 M 个采样点信号进行处理,得到所测量的声音信号能量,可假设第 i 个节点的声能量测量模型为

$$y_i(t) = g_i \frac{S(t)}{d_i^2(t)} + \varepsilon_i(t). \quad (1)$$

其中: $d_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个节点到目标的欧几里德距离, g_i 为增益, $S(t)$ 为 t 时刻目标辐射的声音能量, $\varepsilon_i(t)$ 为测量噪声. 如果 M 足够大 ($\gg 30$), 则 ε_i 可以用一个正态分布来很好地近似, $\varepsilon_i \sim N(\eta_i^2, 2\eta_i^2/M)$, η_i^2 为声音信号测量模型中零均值高斯白噪声的方差. 若已知或通过测量得到了 ε_i 的统计特性, 并指定每个传感器 i 的虚警率 $P_f = \alpha$, 则根据雷曼-皮尔逊定理可以设定各传感器节点的检测阈值为

$$E_{th,i} = \sqrt{2\eta_i^2/M} Q^{-1}(\alpha) + \eta_i^2, \quad (2)$$

其中 $Q^{-1}(\cdot)$ 是 $Q(\cdot)$ 的逆函数. $Q(\cdot)$ 被定义为

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (3)$$

若通过式(2)设定各传感器的能量检测阈值, 则传感器 i 的检测概率为

$$P_d = Q\left(Q^{-1}(\alpha) - g_i \frac{S(t)}{d_i^2(t) \sqrt{2\eta_i^2/M}}\right). \quad (4)$$

由于 $Q(\cdot)$ 是严格单调递减函数, 由式(4)可知, 单个节点对目标的检测概率随节点到目标距离的增加而减小.

3 指标的提出及计算方法

3.1 指标定义

由于节点对目标的检测概率随目标与节点之间距离的变化而变化, 对于监测区域内的某一点, 各节点对其检测概率可能各不相同. 理论上, 根据融合检测准则, 可以求出网络对监测区域内每一点的检测概率, 但是为了评价网络在整体上对监测区域的检测概率或虚警概率, 需要作一定的近似处理.

为了对传感器网络对监测区域的检测概率和虚警概率进行定义, 首先对监测区域进行网格化处理, 如图1所示. 监测区域被划分为 n 行和 l 列网格, 处于第 j 行、第 i 列的网格记为网格 C_{ij} , 网格的中心点记为网格点 g_{ij} .

定义 1 假设融合中心采用表决融合准则(当网络中有 m 个或 m 个以上节点检测到目标时, 判断系统检测到目标)对传感器网络内是否存在目标作出

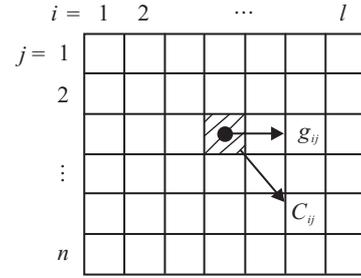


图 1 监测区域的网格划分

判断, 定义传感器网络对监测区域 R 的检测概率为

$$P^N(K \geq m|R, H_1) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n P^N(K \geq m|C_{ij}, H_1) P(T \in C_{ij}|H_1). \quad (5)$$

其中: $P^N(K \geq m|C_{ij}, H_1)$ 为网络中至少有 m 个节点检测到网格 C_{ij} 内目标的概率, $P(T \in C_{ij}|H_1)$ 为目标处于网格 C_{ij} 内的概率, K 为网络中检测到目标的节点个数, H_1 为假定目标存在.

定义 2 假设融合中心采用表决融合准则对传感器网络内是否存在目标作出判断, 定义传感器网络对监测区域 R 的虚警概率为

$$P^N(K \geq m|R, H_0) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n P^N(K \geq m|C_{ij}, H_0) P(T \in C_{ij}|H_0). \quad (6)$$

其中: $P^N(K \geq m|C_{ij}, H_0)$ 为网络中至少有 m 个节点检测到网格 C_{ij} 内目标的虚警概率, $P(T \in C_{ij}|H_0)$ 为目标处于网格 C_{ij} 内的虚警概率, H_0 为假定目标不存在.

3.2 指标的计算

根据定义, 可对以上给出的两个指标进行计算. 首先, 需要确定网络对监测区域内每一个网格的检测概率, 由于无法得到网络对网格内任一点的检测概率密度函数或虚警概率密度函数, 这里给出了近似方法. 当网格划分得足够小时, 有 $P^N(K \geq m|C_{ij}, H_1) \approx P^N(K \geq m|g_{ij}, H_1)$, $P^N(K \geq m|C_{ij}, H_0) \approx P^N(K \geq m|g_{ij}, H_0)$. 下面给出 4 个定理用于求解传感器网络对任一网格点 g_{ij} 的检测概率和虚警概率.

定理 1 对传感器网络中的节点进行编号, 假设网络中有 N 个节点, 编号从 1 到 N , 则前 $n(m+1) \leq n \leq N$ 个节点中至少有 m 个节点检测到 g_{ij} 存在目标的概率的递推计算公式为

$$\begin{aligned} P^n(K \geq m|g_{ij}, H_1) &= \\ P^{n-1}(K \geq m|g_{ij}, H_1) + \\ P^{n-1}(K \geq m-1|g_{ij}, H_1) P_n(x=1|g_{ij}, H_1). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $P_n(x=1|g_{ij}, H_1)$ 为第 n 个节点对网格点 g_{ij} 的

检测概率; x 为决策变量, $x = 1$ 表示判定目标存在, $x = 0$ 表示判定目标不存在.

证明 将前 n 个节点分为两部分, 一部分为前 $n - 1$ 个节点, 另一部分为第 n 个节点. 前 n 个节点中至少有 m 个节点检测到目标的情况又可分为两种: 一种情况是前 $n - 1$ 个节点中已经至少有 m 个节点检测到目标; 另一种情况是前 $n - 1$ 个节点中只有 $m - 1$ 个节点检测到目标, 同时第 n 个节点检测到目标. 因此, 式 (7) 给出的概率等式成立. \square

定理 2 对传感器网络中的节点进行编号, 假设网络中有 N 个节点, 编号从 1 到 N , 则在没有目标存在的情况下, 前 $n(m + 1 \leq n \leq N)$ 个节点中至少有 m 个节点检测到 g_{ij} 存在目标的概率的递推计算公式为

$$P^n(K \geq m | g_{ij}, H_0) = P^{n-1}(K \geq m | g_{ij}, H_0) + P^{n-1}(K \geq m - 1 | g_{ij}, H_0)P_n(x = 1 | g_{ij}, H_0), \quad (8)$$

其中 $P_n(x = 1 | g_{ij}, H_0)$ 为第 n 个节点对网格点 g_{ij} 的虚警概率.

证明略.

定理 3 对传感器网络中的节点进行编号, 假设网络中有 N 个节点, 编号从 1 到 N , 则网络 (N 个节点) 中至少有 $m(1 \leq m \leq N)$ 个节点检测到 g_{ij} 存在目标的概率的计算公式为

$$P^N(K \geq m | g_{ij}, H_1) = \sum_{k=m}^{n-1} P^k(K = m - 1 | g_{ij}, H_1)P_{k+1}(x = 1 | g_{ij}, H_1) + P^m(K = m | g_{ij}, H_1). \quad (9)$$

证明略.

定理 4 对传感器网络中的节点进行编号, 假设网络中有 N 个节点, 编号从 1 到 N , 则在没有目标存在的情况下, 网络 (N 个节点) 中至少有 $m(1 \leq m \leq N)$ 个节点检测到 g_{ij} 存在目标的概率的计算公式为

$$P^N(K \geq m | g_{ij}, H_0) = \sum_{k=m}^{n-1} P^k(K = m - 1 | g_{ij}, H_0)P_{k+1}(x = 1 | g_{ij}, H_0) + P^m(K = m | g_{ij}, H_0). \quad (10)$$

证明略.

由于本文假设所有传感器均为同类的具有恒虚警检测概率的传感器, 传感器网络内的每个节点对于监测区域内的任一点的虚警概率都是相同的, 采用表决融合检测准则后, 系统对监测区域内任一点的虚警概率也是相同的. 根据式 (10) 可以推导出声音传感器

网络对监测区域内任一点的虚警概率的计算公式为

$$P^N(K \geq m | g_{ij}, H_0) = P_f^m \sum_{k=m-1}^{n-1} C_k^{m-1} (1 - P_f)^{k-m+1}, \quad (11)$$

其中 P_f 为所指定的单个节点对目标进行检测的虚警概率.

4 仿真分析

选取仿真场景如下: $N = 25$ 个声传感器节点以确定性的部署方式部署在长为 1000 m, 宽为 1000 m 的监测区域, 见图 2. 假设各节点声能量检测模型中的参数相同, 参数 $g_i = 1, S(t) \equiv 4000, M = 500, \eta_i^2 = 5$.

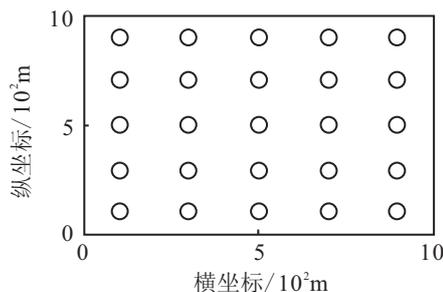


图 2 监测区域中节点的部署

图 3 为单个节点取不同虚警概率时, 节点对目标的检测概率随目标到节点间距离的变化曲线. 从图中可以看出, 节点对目标的检测概率随目标到节点距离的增大而减小; 对于目标到节点的距离固定的情况, 指定虚警率越高的节点, 其检测概率也越大. 将监测区域划分成 100×100 个方形网格, 每个网格的边长为 10 m, 通过式 (9) 可以计算出传感器网络对每一个

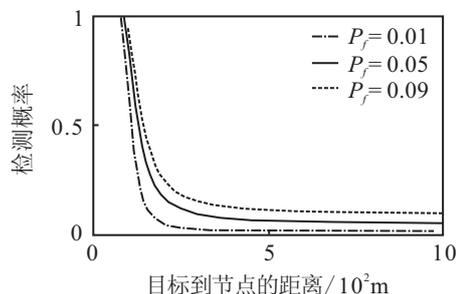


图 3 单个节点对目标的检测概率曲线

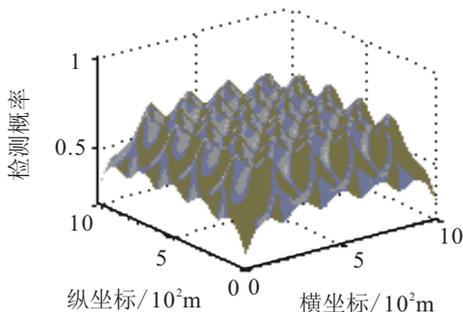


图 4 传感器网络对监测区域的检测概率曲面

网格点的检测概率. 指定单个节点检测的虚警概率为 $\alpha = 0.05$, 融合检测准则取网络中至少有 $m = 3$ 个节点检测到目标, 图 4 给出了传感器网络对整个监测区域的检测概率曲面, 通过该检测概率曲面, 可以对传感器网络对整个监测区域的检测概率有一个比较全面的认识.

因为事先不知道目标在监测区域内的分布, 所以可认为目标在监测区域内服从均匀分布, 即目标处于任一网格的概率相等. 表 1 给出了 m 取不同值时, 传感器网络对监测区域的检测概率和虚警概率. 从该表可以看出, m 的取值越大, 传感器网络的检测概率越小, 传感器网络的虚警概率也越小; 对于本仿真的场景而言, 若期望系统对监测区域的检测概率在 0.6 以上, 对监测区域的虚警概率在 0.15 以下, 则融合检测准则的参数 m 取 3 比较合适. 保持 m 的值取 3 不变, 若假设以上仿真实验中的节点随机部署在监测区域中, 则系统对监测区域的检测概率将发生变化. 表 2 给出了某次随机部署与上述确定性部署对应的系统检测概率和虚警概率, 由该表可以看出, 该随机部署方案使得系统在对监测区域的检测概率上小于确定性的部署方案, 因此它劣于图 2 所示的确定性部署方案.

表 1 融合检测参数对网络检测效能的影响

m	$P^{25}(K \geq m R, H_1)$	$P^{25}(K \geq m R, H_0)$
1	0.993 9	0.722 6
2	0.881 1	0.357 6
3	0.625 1	0.127 1
4	0.342 5	0.034 1

表 2 部署方式对网络检测效能的影响

部署	$P^{25}(K \geq 3 R, H_1)$	$P^{25}(K \geq 3 R, H_0)$
确定	0.625 1	0.127 1
随机	0.603 9	0.127 1

5 结 论

本文对采用表决融合检测准则的二进制检测声传感器网络的协作检测效能进行了研究, 提出了两种用于评价传感器网络对监测区域整体检测效能的指标, 并给出了这两种指标的计算方法. 除用于声能量测量传感器网络外, 所提出的指标还可推广到其他信号能量测量的传感器网络中. 另外, 所提出的指标可用于确定表决融合检测准则的参数, 指导传感器网络部署方案的设计.

参考文献(References)

- [1] Dhillon S S, Chakrabarty K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks[C]. Proc of IEEE Wireless Communications and Networking. Los Angeles: IEEE Press, 2003: 1609-1614.
- [2] Wang B, Wang W, Srinivasan V, et al. Information coverage problems in wireless sensor networks[J]. J of Internet Technology, 2005, 6(1): 1-8.
- [3] Wang B, Chua K C, Srinivasan V, et al. Scheduling sensor activity for point information coverage in wireless sensor networks[C]. Proc of the 4th Int Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks. Boston: IEEE Press, 2006: 1-8.
- [4] Wang W, Srinivasan V, Chua K C, et al. Energy-efficient coverage for target detection in wireless sensor networks[C]. Proc of the 6th Int Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Cambridge: IEEE Press, 2007: 313-322.
- [5] Zou X Y, Cao Y. Collaborative detection probability of mobile target for coverage in large-scale WSN[C]. Proc of the 3rd Int Conf on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai: IEEE Press, 2007: 2710-2714.
- [6] 黄艳, 梁韡, 于海斌. 一种高效覆盖的水下传感器网络部署策略[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1035-1039. (Huang Y, Liang W, Yu H B. A deployment strategy for effective coverage in underwater sensor networks[J]. J of Electronics and Information Technology, 2009, 31(5): 1035-1039.)
- [7] Djuric P M, Vemula M, Bugallo M F. Signal processing by particle filtering for binary sensor networks[C]. Proc of the 11th IEEE Digital Signal Processing Workshop and IEEE Signal Processing Education Workshop. New Mexico: IEEE Press, 2004: 263-267.
- [8] Djuric P M, Vemula M, Bugallo M F. Target tracking by particle filtering in binary sensor networks[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(6): 2229-2237.
- [9] Sheng X H, Hu Y H. Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with sensor networks[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(1): 44-53.
- [10] Li D, Hu Y H. Energy based collaborative source localization using acoustic micro-sensor array[J]. J of EUROSIP Applied Signal Process, 2003(4): 321-337.