

射频供能传感网面向融合检测的部署调度方法*

李燕君¹, 陈雨哲¹, 林瑞仲², 池凯凯¹, 胡亚红¹



¹(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

²(诺基亚通信系统技术(北京)有限公司浙江分公司, 浙江 杭州 310053)

通讯作者: 林瑞仲, E-mail: rzlin@126.com

摘要: 当射频供能传感网应用于目标检测时,对节点的部署位置和充电/感知调度表进行合理规划可有效提高系统检测质量.基于融合检测模型,首先归纳了使得系统检测质量最大化的节点部署和调度联合优化问题,证明了该问题是 NP 完全问题.然后分析了融合半径对检测率的影响,提出了基于贪婪算法的节点部署调度联合优化算法.通过小规模网络、大规模网络及基于真实数据集的仿真,将该算法分别与全局最优解、分阶段优化贪婪算法进行了性能比较.实现结果表明:所提出的联合优化贪婪算法获得的系统检测质量在各组仿真中均优于分阶段贪婪算法,并且在小规模网络中接近于全局最优解.

关键词: 融合检测;节点部署;节点调度;射频供能传感网

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 李燕君,陈雨哲,林瑞仲,池凯凯,胡亚红.射频供能传感网面向融合检测的部署调度方法.软件学报,2020, 31(12):3852-3866. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5877.htm>

英文引用格式: Li YJ, Chen YZ, LIN RZ, Chi KK, Hu YH. Deployment and scheduling for fusion-based detection in RF-powered sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2020,31(12):3852-3866 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5877.htm>

Deployment and Scheduling for Fusion-based Detection in RF-powered Sensor Networks

LI Yan-Jun¹, CHEN Yu-Zhe¹, LIN Rui-Zhong², CHI Kai-Kai¹, HU Ya-Hong¹

¹(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

²(Nokia Solutions and Networks System Technology (Beijing) Co., Ltd. Zhejiang Branch, Hangzhou 310053, China)

Abstract: When RF-powered sensor network is applied to target detection, rational planning of sensor placement and charging/sensing schedule is an effective way to improve the system detection quality. Based on the fusion-based detection model, firstly, the joint optimization problem of sensor placement and scheduling problem is formulated to maximize the system detection quality. The problem is proved to be NP-complete. Then after analyzing the impact of fusion radius on the detection rate, a joint optimization greedy algorithm (JOGA) is proposed to solve the problem. Finally, the performance of the proposed JOGA is compared with those obtained by exhaustive search and two-stage greedy algorithm (TSGA), an algorithm that optimizes sensor placement and scheduling separately, through extensive numerical simulations as well as simulations based on real data traces collected from a vehicle detection experiment. Results show that, the proposed JOGA always outperforms TSGA in all the simulation scenarios, and is near optimal in small-scale networks.

Key words: fusion-based detection; sensor placement; sensor scheduling; RF-powered sensor networks

* 基金项目: 国家自然科学基金(61772472, 61872322, 61472367); 浙江省自然科学基金(LZ21F020005); 浙江省属高校基本科研业务费专项资金(RF-A2019002); 国家重点研发计划(2018YFB0204003)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61772472, 61872322, 61472367); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LZ21F020005); Fundamental Research Funds for the Provincial Universities of Zhejiang (RF-A2019002); National Key R&D Program of China (2018YFB0204003)

收稿时间: 2018-10-16; 修改时间: 2019-04-20, 2019-06-16; 采用时间: 2019-08-04

传统的由电池供电的无线传感网由于电池容量的限制,通常只具有有限的生命周期.对于部署在恶劣无人值守环境的传感网系统来说,更换电池代价太大甚至无法实施.近年来,射频(radio frequency,简称 RF)供能技术的突破^[1-6],为低功耗传感节点提供了一种全新的能量接续的可行方案.通过这种技术,节点能将接收到的射频信号能量转化为电能.捕获能量的功率不等,取决于能量源的发射功率和节点与能量源的距离.尽管射频供能技术所能提供的能量功率较小,远不及太阳能、风能等传统的能量捕获技术,但是它不受日照强度及天气等不稳定因素影响,利用专门部署的射频能量源,能够向具有射频能量转化器的低功耗传感节点提供相对稳定和可预测的能量.目前已设计开发的射频供能系统包括 Intel 公司和华盛顿大学开发的无线识别感知平台 WISP^[7]、Ossia 公司的 Cota 系统^[8]、Powercast 公司的 Powercaster 能量源和射频能量采集芯等^[9].以 WISP 为例,WISP 标签可集成包括温度传感器、光照传感器、加速度计、红外传感器以及低功耗摄像头 WISPcam^[10]等在内的多种传感模块,它可以从商用 RFID 阅读器捕获能量,存储于电容以支持传感和计算,通过后向散射通信技术^[11],将感知数据传输给阅读器,其典型应用包括环境监测、动作检测、仪表读数以及安全监控等.

当传感网用于目标检测应用时,通常需要最大化或确保一定的系统检测质量.在传统的由电池供电的传感网中,许多文献研究了通过优化传感节点的部署位置来最大化或确保检测质量^[12-14].然而,对于射频供能节点来说,传感和充电不能同时进行,充电会导致检测的中断.以 WISP 为例,一个带有 100 μ F 电容的 WISP 标签在距离阅读器 10m 时,需要充电 155s 才能达到其工作电压阈值,以驱动传感、计算和通信^[15].因此,当射频供能传感网用于检测应用时,不但需要考虑节点部署位置的优化,还需要协调各个节点的充电/感知调度,以保证持续的系统检测性能.当我们通过传感节点的量测数据来判定系统检测性能时,存在一个重要问题,即噪声对传感器量测信号的干扰会造成系统检测性能的不确定性.很多文献采用的 0-1 检测模型是一种确定性模型,无法刻画噪声带来的检测或然性,并且这种确定性模型也未能考虑传感节点间协同检测的情况.为此,一些文献提出多传感器融合检测,用于对抗噪声和提高检测质量^[12-14].实际上,这种方法已经在基于传感网的很多应用,如目标检测、跟踪和识别中采纳.然而,在射频供能传感网中采用融合检测会增大计算开销.单个目标的检测率将取决于目标周围处于工作状态的节点的量测值,而系统检测性能与整个网络中传感节点与监测点的位置分布、目标本身的特性、噪声的特性及传感节点的充电/感知调度存在复杂的关联.在面向融合检测的射频供能传感网中,同时优化节点的部署和充电/感知调度以达到较高的系统检测质量,非常具有挑战.

本文考虑的问题是给定射频能量源位置和一定个数的射频供能节点,如何确定节点的部署和充电/感知调度,以最大化系统检测质量.本文的主要贡献和创新在于:(1) 在射频供能传感网中,首次采用更接近实际的融合检测模型,归纳了使系统检测质量最大化的传感节点部署调度联合优化问题,证明了该问题是一个 NP 完全问题;(2) 分析了融合检测半径对于检测结果的影响,为防止采样信噪比过低的节点参与融合检测,推导了保证检测质量单调递增性的融合半径取值上限;(3) 基于该融合半径上限设计了节点部署与调度联合优化贪婪算法,该算法由于同时考虑检测率和能量捕获功率,可保证每次新增节点都能最大程度地提升系统检测质量;(4) 通过在小规模网络、大规模网络及基于真实数据集的仿真,将该算法分别与全局最优解,分阶段优化贪婪算法进行了性能比较,验证了本文所提算法的优越性.

1 相关工作

传感节点的部署和调度问题在传统的由电池供电的传感网中已有大量研究,其中大部分工作将部署和调度视为两个不同的问题.文献[12]采用融合检测模型,基于聚类算法和模拟退火算法提出了节点部署策略,能够在满足给定的检测率及虚警率阈值的前提下,最小化节点部署成本.文献[13]提出了基于 Dempster-Shafer 理论的融合检测方法,基于遗传算法设计了满足检测率要求的节点部署方案.文献[14]研究了在数据中心如何部署节点检测过热服务器的问题,基于融合检测框架提出了两类优化问题,即:给定节点个数,研究如何部署使得检测率最大;和给定检测率要求,如何部署使得所需节点个数最少.在电池供电的传感网中,研究节点调度问题主要是为了延长网络寿命.文献[16]设计了一种传感节点调度算法,在每个时隙动态选择节点子集保证检测率大于设定阈值,最大程度地延长网络寿命.文献[17]提出一种基于自动学习机的节点睡眠调度方法,目标是每次唤醒

最少的节点覆盖指定区域,并且保证唤醒节点间相互连通.少量文献同时考虑了节点的部署和调度问题^[18,19]:文献[18]研究了一种有效的算法可以同时优化节点部署位置和调度表,该算法的特点是采用了一种保证检测质量持续较高的平衡调度机制;文献[19]先采用人工蜂群算法和粒子群算法优化节点部署位置,然后提出一种启发式算法确定节点调度方案,其优化目标是在确保被监测目标覆盖要求的前提下最大化网络寿命.

上述在电池供电的传感网中对节点部署和调度问题的研究对射频供能传感网有一定的借鉴意义,但其方法和结果不能照搬到射频供能传感网的研究中.原因在于:一方面,在射频供能传感网中,传感节点的部署位置不但影响检测质量,还影响其捕获到的能量,传感节点的位置、待检测目标的位置和能量源的位置之间存在着复杂的关联;另一方面,对节点进行调度的目的不再是延长网络寿命,而是确保及时地充电以支持持续不间断的监测.文献[20]在能量捕获传感网中研究了节点部署问题,其目标是部署最少的节点使得所有的目标都能够被覆盖,节点与汇聚点有连通路径,且节点满足能量中性要求,设计了两种部署算法实现网络持续不间断工作.文献[21]分别设计了集中式和分布式的节点调度算法,在每个时隙唤醒一部分节点,目标是在保证网络连通性的同时最大化检测质量.文献[22]在能量捕获传感网中研究了节点调度问题,针对监测点处随机到达事件的检测,设计了集中式和分布式节点调度算法,最大化事件检测质量.文献[23]研究了能量捕获传感网中的复合事件检测问题,设计了贪婪节点调度算法来调度不同类型的传感器,以最大化复合事件检测率.虽然上述文献针对能量捕获传感网的节点部署和调度问题取得了一定的研究成果,但它们均将节点的部署和调度问题分开考虑;大多文献采用简单的 0-1 检测模型或概率检测模型,未能考虑检测的或然性和节点间的协作;大多文献考虑的是捕获太阳能的传感网,认为节点具有恒定的能量捕获功率,不涉及能量源位置分布对节点部署和调度的影响,而在射频供能传感网中,节点捕获能量与其距离能量源的相对位置密切相关,进而又影响到节点的充电/感知调度.因此,本文在面向融合检测的射频供能传感网中研究节点的部署和调度问题更具挑战.

2 系统模型

2.1 网络模型与假设

假设在平面区域 F 内有 N 个监测点,用集合 $O=\{o_1, o_2, \dots, o_N\}$ 表示,其中: $o_n=(x_n, y_n) \in F$ 表示第 n 个监测点的位置坐标; I 个传感节点候选部署位置用集合 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_I\}$ 表示,其中, $s_i=(x_i, y_i) \in F$ 表示第 i 个候选部署位置的坐标; M 个位置固定的射频能量源用于为传感节点供能,用集合 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ 表示,其中, $c_m=(x_m, y_m) \in F$ 表示第 m 个能量源的位置坐标.将每个监测周期划分为 J 个等长的时隙,时隙长度为 1 个单位时间.令 $P=\{p_{n,j} | n=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, J\}$,其中, $p_{n,j} \in [0, 1]$ 表示监测点 o_n 处在第 j 个时隙有目标出现的概率.传感节点本身没有电源,完全由射频能量源供能,充电后可以对监测点出现的目标进行信号采样和融合检测.节点的部署和调度方案可用一个 $I \times J$ 的布尔矩阵 $A=\{a_{i,j} | i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J\}$ 表示,其中, $a_{i,j} \in \{0, 1\}$,再引入 0-1 指示变量 $v_i = 1_{\{\sum_{j=1}^J a_{i,j} > 0\}}$ 用于表示候选位置 s_i 处是否部署节点.若 $v_i=1$,表示有节点部署于 s_i 处,进一步,若 $a_{i,j}=1$,表示部署于 s_i 处的节点在第 j 个时隙处于工作状态,否则处于充电状态;若 $v_i=0$,则 s_i 处未部署节点.

2.2 传感模型

传感节点通过采集目标发出的物理信号进行目标检测.许多物理信号(如声信号、震动信号、热信号等)的能量随距离发生衰减.候选位置 s_i 处的节点采集到与其距离为 $d_{i,n}$ 的监测点 o_n 处的目标的信号能量 $W_{i,n}$ 可以表示为^[12]

$$W_{i,n} = \begin{cases} W_0, & d_{i,n} \leq d_0 \\ \frac{W_0}{(d_{i,n}/d_0)^u}, & d_{i,n} > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, W_0 是目标原始信号能量, u 为衰减系数, d_0 是与目标和节点尺寸相关的常量.在实际中,传感节点的量测值还会受到环境噪声的干扰.假设在候选位置 s_i 处的噪声信号强度 N_i 服从均值为 0, 方差为 σ^2 的正态分布,那么候选位置 s_i 处的节点实际采样到监测点 o_n 处的信号能量 $U_{i,n}$ 为

$$U_{i,n} = W_{i,n} + N_i^2 \quad (2)$$

2.3 融合检测模型

融合检测是提高系统检测性能广泛采用的方法^[24]。我们采用如下融合检测方法:对于当前时隙,将位于某一个监测点融合半径 R 范围内且处于工作状态的节点归为同一个簇,簇成员将采集的信号能量发送到簇头,簇头将收到的信号能量均值与设定的阈值比较,从而判断监测点处是否有目标出现。融合半径 R 是决定哪些节点参与融合检测的关键参数:一方面,过于保守的融合半径会将一些可提高检测质量的节点划分到簇外,使得检测质量降低;另一方面,过大的融合半径会让较远节点低信噪比的采样结果参与融合,导致检测性能下降。我们将在第 4.1 节中具体分析融合半径的最佳取值。

检测系统通常采用检测率和虚警率来衡量检测质量:检测率是有目标出现能被正确检测出来的概率,而虚警率是没有目标却被误判为有目标出现的概率。基于本文采用的融合检测方法,在监测点 o_n 出现的目标在第 j 个时隙的检测率 $P_D^{(n,j)}$ 为

$$P_D^{(n,j)} = \mathbb{P} \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j}} \sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j} (W_{i,n} + N_i^2) > \eta_{n,j} \right) = 1 - \mathbb{P} \left(\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j} \left(\frac{N_i}{\sigma} \right)^2 \leq \frac{\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j} (\eta_{n,j} - W_{i,n})}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

其中, $r_{i,n} = 1_{\{d_{i,n} \leq R\}}$ 为 0-1 指示变量,表示候选位置 s_i 处的节点是否在监测点 o_n 的融合半径 R 内; $\eta_{n,j}$ 表示监测点

o_n 在第 j 个时隙内对应的检测阈值。令 $Y = \sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j} \left(\frac{N_i}{\sigma} \right)^2$, 由于 N_i/σ 服从均值为 0、方差为 1 的标准正态分布,

可知 Y 服从自由度为 $\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j}$ 的卡方分布,用 $F_Y(\cdot)$ 表示其累积分布函数,则公式(3)可被改写为

$$P_D^{(n,j)} = 1 - F_Y \left(\frac{\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j} (\eta_{n,j} - W_{i,n})}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

类似地,监测点 o_n 在第 j 个时隙的虚警率 $P_F^{(n,j)}$ 为

$$P_F^{(n,j)} = \mathbb{P} \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j}} \sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j} N_i^2 > \eta_{n,j} \right) = 1 - F_Y \left(\frac{\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j} \eta_{n,j}}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

2.4 能量捕获模型

采用文献[25]中提出并验证的基于自由空间传播模型 Friis 公式的能量捕获经验模型。具体地,与能量源 c_m 相距 $d_{i,m}$ 的候选位置 s_i 处的节点能量捕获功率可表示为

$$P_h^{(i,m)} = \begin{cases} \omega \frac{G_s G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d_{i,m} + \varepsilon)} \right)^2 P_s, & d_{i,m} \leq d_{th} \\ 0, & d_{i,m} > d_{th} \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_s 为能量源发射功率; G_s, G_r 分别为能量源和节点的天线增益; L_p 是极化损耗; λ 为波长; ε 是调节参数,以保证捕获功率的取值有限; ω 为整流效率; d_{th} 表示能量源的最大充电距离,其表达式为

$$d_{th} = \sqrt{\omega \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{G_s G_r P_s}{L_p P_{th}} - \varepsilon} \quad (7)$$

其中, P_{th} 是可获得有效捕获能量的接收功率阈值。当存在多个射频能量源时,在候选位置 s_i 处节点的能量捕获功率可认为是从 M 个能量源捕获功率值的加和^[25],即:

$$P_h^{(i)} = \sum_{m=1}^M P_h^{(i,m)} \quad (8)$$

3 问题描述与分析

基于第2节的系统模型,我们给出本文研究问题的形式化定义,并证明该问题是 NP 完全问题.

3.1 问题定义

本文研究问题的目标是最大化系统检测质量 Q . 给定监测周期内各个监测点处目标出现的概率 \mathbf{P} 、节点部署和调度方案 \mathbf{A} 及各监测点在各时隙内检测阈值集合 $\mathbf{N} = \{\eta_{n,j} | n=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,J\}$, 检测质量 Q 的表达式为

$$Q = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J p_{n,j} P_D^{(n,j)}(\mathbf{A}, \mathbf{N}) \quad (9)$$

为了控制虚警率,要求各监测点在各个时隙内的虚警率均不可超过给定的阈值 α :

$$P_F^{(n,j)}(\mathbf{A}, \mathbf{N}) \leq \alpha \quad (10)$$

假设节点处于工作状态时的能耗功率为 P_c , 候选位置 s_i 处的节点每个周期可分配的工作时隙数为 B_i , 那么节点需满足能量中性条件,即:

$$B_i P_c \leq (J - B_i) P_h^{(i)} \quad (11)$$

因此,候选位置 s_i 处的节点每个周期内可分配的工作时隙数最多为

$$B_{\max}^{(i)} = \left\lfloor \frac{J P_h^{(i)}}{P_h^{(i)} + P_c} \right\rfloor \quad (12)$$

在第2.1节中,我们引入了 0-1 指示变量 v_i , 用于表示候选位置 s_i 处是否部署节点,即:

$$v_i = 1_{\{\sum_{j=1}^J a_{i,j} > 0\}} \quad (13)$$

若给定 K 个节点,则 v_i 满足:

$$\sum_{i=1}^I v_i = K \quad (14)$$

候选位置 s_i 处的节点每个周期内实际工作时隙数不可超过其最多可分配的工作时隙数,即:

$$\sum_{j=1}^J a_{i,j} \leq v_i B_{\max}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, I \quad (15)$$

综上所述,本文研究的问题定义如下.

问题 1. 给定 K 个节点, M 个射频能量源集合 \mathbf{C} , N 个监测点集合 \mathbf{O} 以及 I 个传感节点候选部署位置集合 \mathbf{S} . 如何确定 K 个节点的部署及调度方案 \mathbf{A} 以及各监测点各时隙的检测阈值集合 \mathbf{N} , 使得系统检测质量 Q 最大化, 且各监测点满足虚警率限制条件, 节点满足工作时隙限制条件.

结合公式(9)中的目标函数表达式, 以及公式(10)、公式(13)~公式(15)中的限制条件表达式, 问题 1 的形式化定义如下:

$$\left. \begin{aligned} \max_{\mathbf{A}, \mathbf{N}} Q &= \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J p_{n,j} P_D^{(n,j)}(\mathbf{A}, \mathbf{N}) \\ \text{s.t. } P_F^{(n,j)}(\mathbf{A}, \mathbf{N}) &\leq \alpha, n=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, J \\ \sum_{i=1}^I v_i &= K \\ \sum_{j=1}^J a_{i,j} &\leq v_i B_{\max}^{(i)}, i=1, 2, \dots, I \\ v_i &= 1_{\{\sum_{j=1}^J a_{i,j} > 0\}}, i=1, 2, \dots, I \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3.2 问题转化

问题 1 的解包含 K 个节点的部署及调度方案以及 N 个监测点在 J 个时隙的检测阈值.根据 Neyman-Pearson 法则^[24],当虚警率恰好达到给定阈值 α 时的检测率最大.因此,结合公式(5)求解 $P_F^{(n,j)} = \alpha$,可得到最优检测阈值:

$$\eta_{n,j} = \frac{\sigma^2 F_Y^{-1}(1-\alpha)}{\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j}} \quad (17)$$

其中, $F_Y^{-1}(\cdot)$ 为卡方分布的累积分布函数 $F_Y(\cdot)$ 的逆函数.由此,问题 1 可转化为如下等价问题.

问题 2. 给定 K 个节点, M 个射频能量源集合 C , N 个监测点集合 O 以及 I 个传感节点候选部署位置集合 S . 如何确定 K 个节点的部署及调度方案 A , 使得系统检测质量 Q 最大化, 且检测阈值满足限制条件, 节点满足工作时隙限制条件.

因此,问题 2 的形式化定义如下:

$$\left. \begin{aligned} \max_A Q &= \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J p_{n,j} P_D^{(n,j)}(A) \\ \text{s.t. } \eta_{n,j} &= \frac{\sigma^2 F_Y^{-1}(1-\alpha)}{\sum_{i=1}^I r_{i,n} a_{i,j}}, n=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,J \\ \sum_{i=1}^I v_i &= K \\ \sum_{j=1}^J a_{i,j} &\leq v_i B_{\max}^{(i)}, i=1,2,\dots,I \\ v_i &= 1_{\{\sum_{j=1}^J a_{i,j} > 0\}}, i=1,2,\dots,I \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3.3 问题复杂度分析

定理 1. 问题 2 是 NP 完全问题

证明:为证明问题 2 是 NP 完全问题,我们将问题 2 归约为一个已知的 NP 完全问题—— k -不相交集合覆盖判定问题^[26]($k \geq 2$). k -不相交集合覆盖判定问题的描述如下:给定一个包含 N 个元素的集合 $\mathcal{U}=\{u_1,\dots,u_N\}$,令集合 $\mathcal{V}=\{\mathcal{V}_1,\mathcal{V}_2,\dots\}$ 为 \mathcal{U} 的子集构成的集合,即 $\forall i, \mathcal{V}_i \subseteq \mathcal{U}$,判断能否找到 \mathcal{V} 的 k 个不相交的子集,且每个子集的并集均为 \mathcal{U} . 对于任意一个 k -不相交集合覆盖判定问题的实例,我们构造问题 2 的实例.首先,令信号衰减系数 $u \rightarrow +\infty$,令噪声信号的方差 $\sigma^2=0$,可得检测阈值均为 0.这样,检测模型简化为:当目标距离节点不超 d_0 时,可 100% 检测到该目标,否则不能检测到.接着令 $K=I$,即各个候选部署位置处均部署 1 个节点.进一步地,令 $B_i=1$,即部署的节点在一个周期内工作时隙个数均为 1,该条件可通过控制能量源的位置达到.这样,集合 \mathcal{U} 中的每个元素 u_n 对应集合 O 中的一个监测点,集合 \mathcal{V} 中的每个 \mathcal{V}_i 对应位于 s_i 处的节点,该节点能覆盖集合 O 中的若干监测点,只要位于 s_i 处的节点处于工作模式(不妨假设在第 j 个时隙处于工作模式)且与监测点 o_n 的距离不超过 d_0 ,则有 $P_D^{(n,j)}=1$.

综上可得问题 2 的判定问题的一个特例:给定包含 N 个监测点的集合 O ,包含 K 个传感节点的集合 S ,每个节点在 J 个时隙内只工作 1 个时隙,判断是否存在这 K 个节点的调度方案,使得检测质量 $Q = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J p_{n,j}$.该特例的构造可在多项式时间内完成,所以问题 2 是 NP 难问题.又易知问题 2 属于 NP,因此问题 2 是 NP 完全问题. \square

4 算法设计

本节首先分析了融合半径对检测率的影响,给出了融合半径取值上限,然后提出了基于贪婪算法的节点部署调度联合优化方案.

4.1 融合半径分析

融合半径的设定,对最终的检测性能有关键影响:如果设定的融合半径过大,较远节点低信噪比的采样结果参与融合会导致检测性能下降.我们举例说明该问题:假设节点 s_1 和 s_2 分别距离目标 d_1 和 d_2 ,令 $d_1=10\text{m}$,将 d_2 从 10m 变化至 20m ,并且将融合半径设置为与 d_2 相等的值,比较由单个节点 s_1 得出的检测率 $P_D(s_1)$ 和由节点 s_1, s_2 通过融合检测得出的检测率 $P_D(s_1, s_2)$,结果如图 1 所示.由图 1 可知:当引入 s_2 进行融合检测时,检测率 $P_D(s_1, s_2)$ 并不总高于 $P_D(s_1)$.当 d_2 大于 16m 时,通过融合检测得到的检测率 $P_D(s_1, s_2)$ 反而低于 $P_D(s_1)$.因此,该示例中融合半径 R 的取值上限应为 16m ,否则,融合检测会对检测质量带来负面影响.

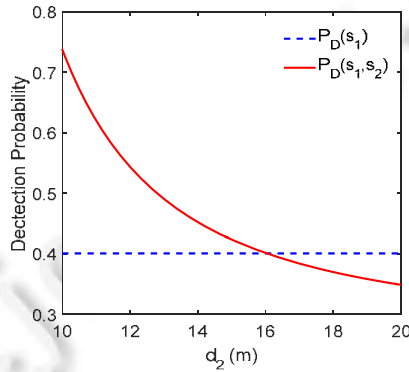


Fig.1 Analysis of the fusion radius ($W_0=200\text{W}$, $d_0=1\text{m}$, $u=2$, $\sigma^2=1$, $\alpha=0.01$)

图 1 融合半径分析示意图($W_0=200\text{W}$, $d_0=1\text{m}$, $u=2$, $\sigma^2=1$, $\alpha=0.01$)

对于一般情况下融合半径的取值上限,我们有如下定理:

定理 2. 假设监测点 o_n 在第 j 个时隙,其融合半径 R 范围内有 $k_{n,j}$ ($k_{n,j} \geq 2$) 个处于工作状态的节点,给定虚警率阈值 α ,保证检测率函数单调递增的融合半径 R 需满足以下充分条件:

$$R \leq W^{-1}(\sigma^2(F_{Y_2}^{-1}(1-\alpha) - F_{Y_1}^{-1}(1-\alpha))) \quad (19)$$

其中 $W^{-1}(\cdot)$ 是信号能量函数 $W(d)$ 的逆函数, Y_1 和 Y_2 分别服从自由度为 $k_{n,j}-1$ 和 $k_{n,j}$ 的卡方分布.

证明:令 $S' \subseteq S$ 为节点集合 S 的一个子集,且 $|S'| = k_{n,j} - 1$ ($k_{n,j} \geq 2$).假设 S' 满足:

$$P_D^{(n,j)}(S' \setminus \{s\}) \leq P_D^{(n,j)}(S'), \forall s \in S' \quad (20)$$

为保证检测率函数单调递增,第 j 个时隙在监测点 o_n 的融合半径 R 范围内额外引入一个工作节点参与融合检测需满足以下条件:

$$P_D^{(n,j)}(S' \cup \{s\}) \geq P_D^{(n,j)}(S'), \forall s \in S \setminus S' \quad (21)$$

根据公式(4)和公式(17),公式(21)可改写为

$$P_D^{(n,j)}(S' \cup \{s\}) - P_D^{(n,j)}(S') = F_{Y_1} \left(\frac{\sigma^2 F_{Y_1}^{-1}(1-\alpha) - \sum_{s_i \in S'} W_{i,n}}{\sigma^2} \right) - F_{Y_2} \left(\frac{\sigma^2 F_{Y_2}^{-1}(1-\alpha) - \sum_{s_i \in S' \cup \{s\}} W_{i,n}}{\sigma^2} \right) \geq 0 \quad (22)$$

由于卡方分布的累积分布函数具有以下性质:

$$F_{Y_1}(c_1) > F_{Y_2}(c_1), \mathcal{D}(Y_1) < \mathcal{D}(Y_2) \quad (23)$$

$$F_{Y_1}(c_1) > F_{Y_1}(c_2), c_1 > c_2 \quad (24)$$

其中, $\mathcal{D}(\cdot)$ 表示自由度.由此可推断出满足不等式(22)的充分条件:

$$W_{s,n} \geq \sigma^2(F_{Y_2}^{-1}(1-\alpha) - F_{Y_1}^{-1}(1-\alpha)) \quad (25)$$

其中, $W_{s,n}$ 为额外引入节点 s 关于监测点 o_n 的采样值.根据公式(1)可得:

$$R \leq W^{-1}(\sigma^2(F_{Y_2}^{-1}(1-\alpha) - F_{Y_1}^{-1}(1-\alpha))) \quad (26)$$

定理得证. □

我们进一步用函数 $\mathcal{W}(k_{n,j})$ 来表示不等式(25)的右半部分.大量数据结果显示:当虚警率阈值 $\alpha < 0.45$ 时, $\mathcal{W}(k_{n,j})$ 为单调递减函数.而在实际应用中,虚警率阈值一般会设定为一个较小的值,例如 0.05 或 0.1.考虑在 $k_{n,j}=2$ 且节点 s 位于融合区边缘的最坏情况,令 $R=W^{-1}(\mathcal{W}(2))$,即可保证在任何情况下检测率函数为单调递增.

4.2 节点部署调度联合优化贪婪算法

由于问题 2 是 NP 完全问题,提出贪婪算法对节点部署和调度进行联合优化求解该问题,算法简称为 JOGA (joint optimization greedy algorithm).JOGA 的运行逻辑见算法 1,具体地,JOGA 首先计算节点部署在各个候选部署位置处时的最大可分配工作时隙数 $B_{\max}^{(i)}$.接着,迭代地遍历所有未部署传感节点的候选位置,对于其中每个候选位置,再进一步遍历各个时隙,选取 $B_{\max}^{(i)}$ 个使得函数 Q 值最大的时隙作为节点部署在该候选位置时的工作时隙,其余时隙作为充电时隙,如果多个时隙的函数值相同,则从中随机选取.每次遍历完成后选择一个使得系统检测质量最大的候选部署位置及其对应的节点调度,更新矩阵 A .如果多个候选部署位置的系统检测质量值相同,同样从中随机选取.

算法 1. 节点部署及调度联合优化贪婪算法 JOGA.

输入:相关模型参数,节点个数 K ,虚警率阈值 α ,融合半径 R ;

输出:节点部署及调度方案 A .

```

1:  $A = \text{zeros}(I, J)$ ;  $k = 0$ 
2: for  $s_i \in S$  do
3:   根据公式(12)计算  $B_{\max}^{(i)}$ .
4: end
5: while  $k < K$  do
6:    $Q = \text{zeros}(I, J)$ ;  $A' = A$ ;
7:   for  $s_i \in S$  do
8:     for  $j = 1 : J$  do
9:       假设在候选部署位置  $s_i$  额外部署一个节点,并在第  $j$  个时隙处于工作模式,令  $A'(i, j) = 1$ ;
10:      令  $Q(i, j) = \sum_{n=1}^N p_{n,j} P_D^{(n,j)}(A')$ ;  $A' = A$ ;
11:     end
12:     找出  $Q(i, \cdot)$  中最大的  $B_{\max}^{(i)}$  个元素,用  $J^{(i)}$  表示这  $B_{\max}^{(i)}$  个元素的列编号,令  $A'(i, J^{(i)}) = 1$ ;
13:      $\text{sum\_}Q(i) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J p_{n,j} P_D^{(n,j)}(A')$ ;  $A' = A$ ;
14:     end
15:      $i = \arg \max_{s_i \in S} \text{sum\_}Q$ ;  $A(i, J^{(i)}) = 1$ ;  $k = k + 1$ ;  $S = S \setminus \{s_i\}$ ;
16: end

```

下面分析该算法的时间复杂度.首先,遍历候选部署位置点计算 $B_{\max}^{(i)}$ 的时间复杂度为 $O(I)$,对应算法 1 的第 2 行~第 4 行;其次,while 循环一共运行 K 次,每次最多需遍历 I 个候选部署位置,对于每个候选位置需遍历 J 个时隙,对于每个时隙,计算 $Q(i, j)$ 需遍历 N 个监测点,因此时间复杂度为 $O(N)$,对应算法 1 的第 10 行;然后在第 12 行中寻找 $B_{\max}^{(i)}$ 个最大元素的时间复杂度为 $O(J \log J)$.在第 13 行中计算 $\text{sum_}Q(i)$ 需要遍历所有监测点的所有时隙,因此时间复杂度为 $O(JN)$;最后,第 15 行找出 $\text{sum_}Q$ 的最大值的时间复杂度为 $O(I)$.综上,该算法的时间复杂度为 $O(I + K(I(JN + J \log J + JN) + I)) = O(KIJ(N + \log J))$.

5 性能评估

本节首先引入基准算法,然后介绍了仿真设置,最后通过多组在小规模网络、大规模网络以及真实数据集

上的仿真评估了本文所提算法的性能.

5.1 基准算法

- 穷举法

通过穷举的方式遍历所有可能的节点部署及调度方案,从中选出全局最优解,其时间复杂度较高.给定 K 个节点,节点部署位置的排列组合有 C_I^K 种,每个节点调度方案至多有 $C_J^{B_{\max}^{(i)}}$ 种.因此,穷举法的时间复杂度为

$$O(JN \sum_{h=1}^K \prod_{s_j \in S^{(h)}} C_J^{B_{\max}^{(i)}}).$$

其中, $S^{(h)} \subseteq S$ 表示节点部署位置的第 h 个排列组合,只能用于小规模网络.

- 分阶段贪婪算法

简称为 TSGA(two-stage greedy algorithm)^[27],将传感节点的部署与调度分开考虑,分为两个阶段.

- (1) 第 1 阶段,假定每个传感节点在所有时隙均处于工作模式,TSGA 迭代地遍历所有未部署节点的候选部署位置,每次选择使得检测质量最大的位置放置节点.该阶段的时间复杂度为 $O(KIN)$;
- (2) 第 2 阶段,依次确定这 K 个节点的调度方案,TSGA 遍历所有部署节点的所有时隙,每次选择使得检测质量 Q 值最大的时隙作为节点的工作时隙.该阶段的时间复杂度为 $O(KJ(N+\log J))$.

综上所述,分阶段贪婪算法的时间复杂度为 $O(K(IN+JN+J\log J))$.我们将分别在小规模和大规模网络中以及利用真实数据集将提出的 JOGA 与 TSGA 进行性能比较.

5.2 参数设置

小规模网络的区域大小为 $3\text{m} \times 3\text{m}$.监测点随机分布在区域内,1 个能量源和 5 个传感节点候选部署位置规则分布,如图 2(a)所示.进一步设定 $P_s=3\text{W}, K=3, J=4, W_0=10\text{W}$.融合半径 R 的取值根据第 4.1 节的分析得到, $R=1.97\text{m}$.

大规模网络的区域大小为 $30\text{m} \times 30\text{m}$.监测点同样随机分布在区域内,9 个能量源和 121 个候选部署位置规则分布,如图 2(b)所示.且设定 $J=8, W_0=72\text{W}$.融合半径 R 的取值同样基于第 4.1 节的分析得到, $R=5.28\text{m}$.

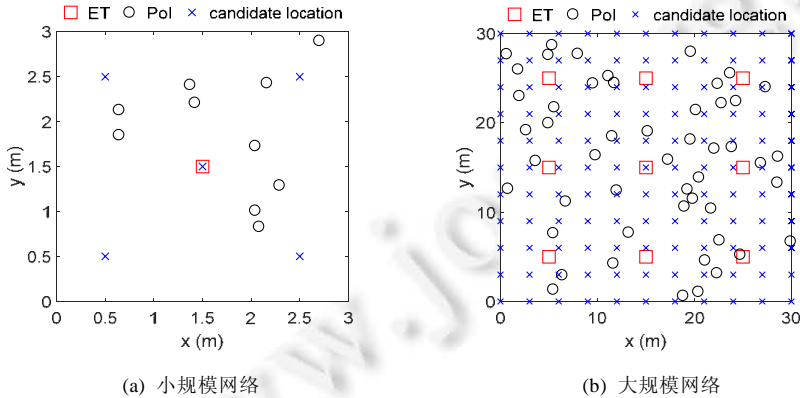


Fig.2 Visualization of small-scale and large-scale network

图 2 小规模网络 and 大规模网络示意图

为得到监测点 o_n 在第 j 个时隙内出现目标的概率 $p_{n,j}$,假设监测点处有目标周期性出现.具体地,对于监测点 o_n ,在每个周期均有目标在第 t_n 个时隙的起始时刻出现,并在该周期内随机停留一段时间.假设其停留时间 t 服从期望为 $1/\mu$ 的右截尾指数分布,其概率密度函数的表达式为

$$f(t) = \begin{cases} \mu e^{-\mu t} (1 - e^{-\mu J})^{-1}, & 0 < t \leq J \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (27)$$

由此可知,监测点 o_n 在第 j 个时隙有目标出现的概率 $p_{n,j}$ 可由公式(28)计算得到:

$$p_{n,j} = \begin{cases} \int_{j+J-t_n}^J f(t)dt, & j < t_n \\ \int_{j-t_n}^J f(t)dt, & j \geq t_n \end{cases} \quad (28)$$

$\forall o_n \in O, j = 1, 2, \dots, J, t_n = 1, 2, \dots, J$

图 3(a)和图 3(b)分别为一个周期内目标在监测点处停留时间的概率密度函数和出现概率 $p_{n,j}$ 的示意图.在以下所有仿真中,目标在监测点停留时间的期望均为 $[1, J/2]$ 的随机整数, t_n 设置为 $[1, J]$ 的随机整数.

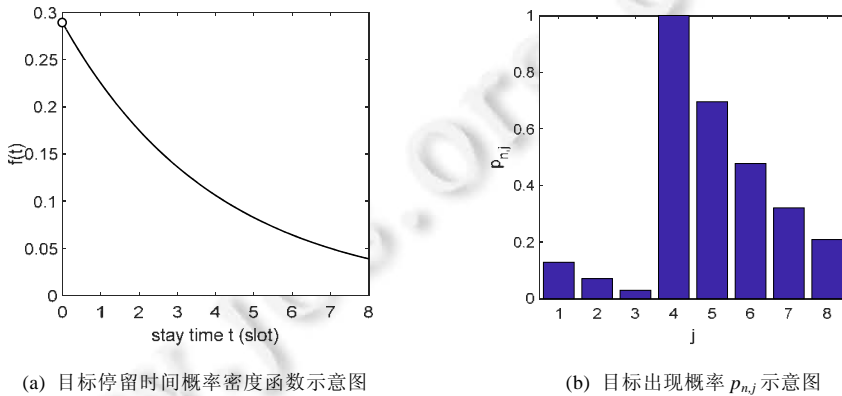


Fig.3 Illustrations of the PDF of the stay time and the target appearance probability $p_{n,j}$, $J=8, \mu=0.25, t_n=4$

图 3 目标停留时间概率密度函数及目标出现概率 $p_{n,j}$ 示意图, $J=8, \mu=0.25, t_n=4$

上述未提及的其他仿真参数见表 1,其中,能量捕获模型的相关参数与文献[25]中的参数一致,节点能耗功率与文献[28]中提到的红外传感器的能耗功率一致.此外,小规模和大规模网络的所有仿真结果均为基于 100 组包含不同监测点位置和参数目标的随机样本计算得出的平均值.

Table 1 Simulation settings

表 1 仿真参数设置

参数	取值
射频能量源发射功率 $P_s(W)$	1~3
射频能量源发射天线增益 $G_s(dBi)$	8
节点接收天线增益 $G_r(dBi)$	2
极化损耗 $L_p(dB)$	3
波长 $\lambda(m)$	0.33
调节参数 $\epsilon(m)$	0.2316
整流效率 η	0.3
节点能耗功率 $P_c(mW)$	0.88
接收功率阈值 $P_{th}(W)$	1×10^{-6}
信号衰减系数 u	2
常数 $d_0(m)$	1
噪声信号方差 σ^2	1
虚警率阈值 α	0.01

5.3 小规模网络仿真性能比较

在小规模网络中,将本文提出的 JOGA 与 TSGA 和穷举法得到的最优解(OPT)进行了比较.图 4 显示了变化监测点个数 N ,3 种算法的性能比较.观察图 4 可知:随着监测点个数的增加,3 种算法得到的系统检测质量也随之增大,并大致呈线性增长. JOGA 性能优于 TSGA,更为接近最优解.具体地, JOGA 与 OPT 的差距平均为 1.86%,最大 2.34%,相比 TSGA 将检测质量平均提高了 3.5%,最多提高了 4.89%.由于穷举法较高的时间复杂度,我们没有进行更多的仿真,但在第 5.4 节大规模网络仿真中,我们变化了更多参数进行测试.

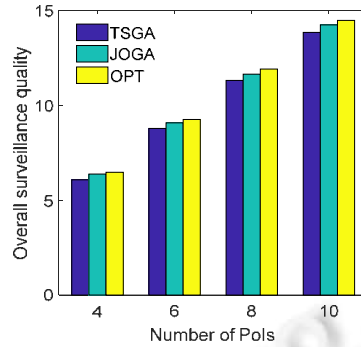


Fig.4 Performances of JOGA, TSGA and OPT with the increase in the number of points of interest (PoI)

图4 小规模网络中,随监测点个数的增加,JOGA,TSGA 与 OPT 算法的性能比较

5.4 大规模网络仿真性能比较

在大规模网络中,将本文提出的 JOGA 与 TSGA 在不同仿真设置下进行了比较.图 5(a)显示了变化给定节点个数 K ,JOGA 和 TSGA 的性能比较.观察图 5(a)可知:随着给定节点个数的增加,两种算法得到的系统检测质量均随之增大.这是由于更多节点参与了目标监测.但增益逐渐减小并趋于稳定.尽管由于检测率函数过于复杂,我们无法从理论上证明目标函数为次模函数,但是目标函数具有与次模函数类似的性质,即边际增益递减.总的来说,在不同给定节点个数下,本文提出的 JOGA 均优于 TSGA,将检测质量平均提高了 27.89%,最多提高了 33.68%.

图 5(b)显示了变化射频能量源发射功率 P_s ,JOGA 和 TSGA 的性能比较.观察图 5(b)可知:随着能量源发射功率的增大,两种算法得到的系统检测质量均随之增大.这是由于节点的充电功率增大使得可分配的工作时隙增加,从而提高了检测质量.各组实验结果中,本文提出的 JOGA 均优于 TSGA,将检测质量平均提高了 76.62%,最多提高了 137.97%.

图 5(c)显示了变化监测点个数 N ,JOGA 和 TSGA 的性能比较.观察图 5(c)可知:与小规模网络的仿真结果类似,随着监测点个数的增加,两种算法得到的系统检测质量均随之增大,增长趋势大致为线性,与小规模网络的结果一致.这是由于本文定义的系统检测质量为各个监测点检测质量之和.各组实验结果中,本文提出的 JOGA 均优于 TSGA,将检测质量平均提高了 25.11%,最多提高了 27.67%.

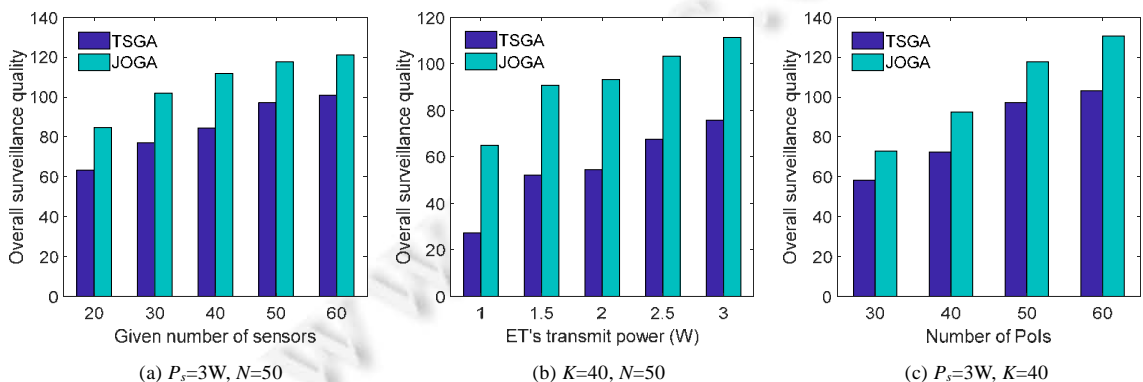


Fig.5 Performance comparison of JOGA and TSGA in large-scale networks

图5 大规模网络中,JOGA 与 TSGA 的性能比较

5.5 真实数据集仿真性能比较

我们进一步采用真实的采样数据集来验证算法的性能,数据集源于美国 DARPA 的 SensIT 车辆检测实验项

目^[29].本节仿真采用的数据包含标定过的真实数据和声音信号采样数据,其中:声音信号采样数据是两栖攻击车行驶通过一条公路时,由 18 个传感节点以 0.75s 的采样周期记录的;标定过的真实数据包括节点的地理位置和由 GPS 记录的车辆轨迹数据.我们用其中两辆车的声音采样数据作为训练集来估计传感模型.图 6 显示了真实声音信号采样数据随距离的变化.估计得到的传感模型参数为 $W_0=21.59W, d_0=2.6m, u=2, \sigma^2=0.01$.此外,设定 $\alpha=0.01, J=8$,并基于第 4.1 节的分析设定融合半径 $R=75.28m$.如图 7 所示,我们在车辆的行驶轨迹上选择了 16 个点作为监测点,将候选部署位置设置为这 18 个传感节点的地理位置,在轨迹周围布置了 10 个能量源.

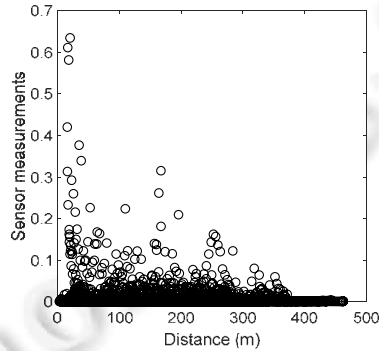


Fig.6 Acoustic signal energy measurements with respect to the distance

图 6 随距离变化的声信号采样值

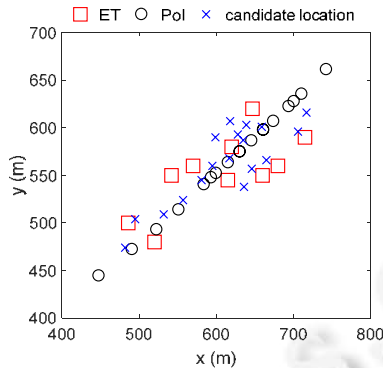


Fig.7 Visualization of the network deployed for a real vehicle detection experiment

图 7 基于真实车辆检测实验的网络示意图

为了验证本文提出算法的有效性,我们首先基于估计的传感模型分别执行 JOGA 和 TSGA 两种算法,得出相应的节点部署调度方案;然后,对每个监测点的每个时隙按照第 5.2 节设置的目标出现概率进行 1 000 次伯努利实验.对于有目标出现的时隙,我们找到该监测点融合半径内的传感节点,利用其真实的采样值进行融合检测.由于数据集中包含车辆轨迹数据和节点的地理位置数据,我们可以直接获取车辆出现时对应的节点采样值.此时的检测率为成功检测的次数与目标出现次数的比值.

图 8(a)显示了不同给定节点个数下,JOGA 与 TSGA 的性能比较.随着给定节点个数的增加,两种算法得到的系统检测质量呈现波动性增大.其主要原因是,实际地形等复杂因素使得估计的传感模型与真实情况存在差异.但是本文提出的 JOGA 相比 TSGA 性能更优,将系统检测质量平均提高了 83.11%,最多提高了 196.90%.

图 8(b)显示了不同能量源发射功率下,JOGA 与 TSGA 的性能比较.由图可知:随着能量源发射功率的增大,两种算法得出的系统检测质量也随之增大,但同样存在一定的波动.本文提出的 JOGA 相比 TSGA 将检测质量平均提高了 136.88%,最多提高了 222.66%.

图 8(c)显示了不同的监测点个数下, JOGA 与 TSGA 的性能比较. 由图可知: 随着监测点个数的增加, 两种算法得出的系统检测质量也随之增大. 各组实验结果中, 本文提出的 JOGA 均优于 TSGA, 将检测质量平均提高了 77.17%, 最多提高了 106.32%.

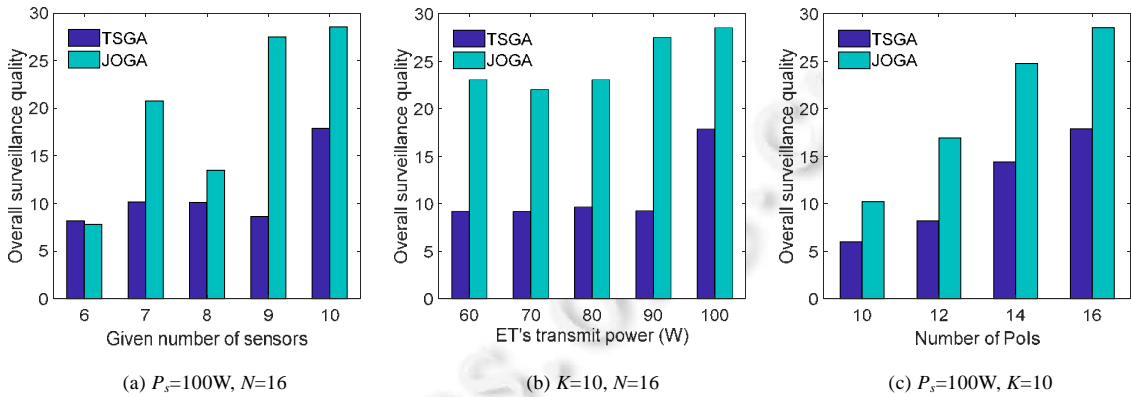


Fig.8 Performance comparison of JOGA and TSGA using real data traces

图 8 基于真实数据集的 JOGA 与 TSGA 的性能比较

6 结束语

当射频供能传感网应用于监测任务时, 对传感节点的位置和充电/感知调度表进行优化, 对于保证应用服务质量非常重要. 本文针对采面向融合检测的射频供能传感网, 研究了节点部署和调度联合优化问题. 将该问题归纳为一个带限制条件的优化问题, 并证明了它是 NP 完全问题. 分析了检测融合半径对于检测性能的影响, 基于贪婪算法设计了节点部署与调度联合优化算法. 通过小规模网络、大规模网络及基于真实数据集的仿真, 在不同参数下, 将该算法分别与全局最优解、分阶段优化贪婪算法进行了性能比较. 实现结果表明: 本文提出的联合优化贪婪算法获得的系统检测质量在各组仿真中均优于分阶段贪婪算法, 并且在小规模网络中接近于全局最优解. 本文的研究对于射频供能传感网的实际部署和调度维护具有重要意义.

References:

- [1] Niyato D, Kim DI, Maso M, Han Z. Wireless powered communication networks: Research directions and technological approaches. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(6): 88–97. [doi: 10.1109/MWC.2017.1600116]
- [2] Lu X, Wang P, Niyato D, Kim DI, Han Z. Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1413–1452. [doi: 10.1109/COMST.2015.2499783]
- [3] Lu X, Wang P, Niyato D, Kim DI, Han Z. Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 757–789. [doi: 10.1109/COMST.2014.2368999]
- [4] Bi SZ, Zeng Y, Zhang R. Wireless powered communication networks: An overview. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 10–18. [doi: 10.1109/MWC.2016.7462480]
- [5] Hu C, Wang Y, Wang H. Survey on charging programming in wireless rechargeable sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2016, 27(1): 72–95 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4883.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004883]
- [6] Dai HP, Chen GH, Xu LJ, Liu YH, Wu XB, He T. Effective algorithm for placement of directional wireless chargers. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2015, 26(7): 1711–1729 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4618.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004618]
- [7] WISP. <https://sensor.cs.washington.edu/WISP.html>
- [8] Cota. <http://www.ossia.com/cota>
- [9] Powercaster. <http://www.powercastco.com>

- [10] Naderiparizi S, Parks AN, Kapetanovic Z, Ransford B, Smith JR. WISPCam: A battery-free RFID camera. In: Proc. of IEEE Int'l Conf. on RFID. San Diego: IEEE, 2015. 166–173. [doi: 10.1109/RFID.2015.7113076]
- [11] Huynh NV, Hoang DT, Lu X, Niyato D, Wang P, Kim DI. Ambient backscatter communications: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018. [doi: 10.1109/COMST.2018.2841964]
- [12] Chang XM, Tan R, Xing GL, Yuan ZH, Lu CY, Chen YX, Yang YX. Sensor placement algorithms for fusion-based surveillance networks. *IEEE Trans. on Parallel & Distributed Systems*, 2011,22(8):1407–1414. [doi: 10.1109/TPDS.2011.115]
- [13] Senouci MR, Mellouk A, Aitsaadi N, Oukhellou L. Fusion-Based surveillance WSN deployment using Dempster-Shafer theory. *Journal of Network & Computer Applications*, 2016,64:154–166. [doi: 10.1016/j.jnca.2015.12.014]
- [14] Wang XD, Wang XR, Xing GL, Chen JZ, Lin CX, Chen YX. Intelligent sensor placement for hot server detection in data centers. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2013,24(8):1577–1588. [doi: 10.1109/TPDS.2012.254]
- [15] Fu LK, Cheng P, Gu Y, Chen JM, He T. Optimal charging in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2016,65(1):278–291. [doi: 10.1109/TVT.2015.2391119]
- [16] Yang QQ, He SB, Li JK, Chen JM, Sun YX. Energy-Efficient probabilistic area coverage in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2015,64(1):367–377. [doi: 10.1109/TVT.2014.2300181]
- [17] Mostafaei H, Montieri A, Persico V, Pescapé A. A sleep scheduling approach based on learning automata for WSN partial coverage. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017,80:67–78. [doi: 10.1016/j.jnca.2016.12.022]
- [18] Krause A, Rajagopal R, Gupta A, Guestrinet C. Simultaneous optimization of sensor placements and balanced schedules. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2011,56(10):2390–2405. [doi: 10.1109/TAC.2011.2164010]
- [19] Mini S, Udgate SK, Sabat SL. Sensor deployment and scheduling for target coverage problem in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2014,14(3):636–644. [doi: 10.1109/JSEN.2013.2286332]
- [20] Yang CL, Chin KW. On nodes placement in energy harvesting wireless sensor networks for coverage and connectivity. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2017,13(1):27–36. [doi: 10.1109/TII.2016.2603845]
- [21] Ren XJ, Liang WF, Xu WZ. Quality-Aware target coverage in energy harvesting sensor networks. *IEEE Trans. on Emerging Topics in Computing*, 2015,3(1):8–21. [doi: 10.1109/ETC.2014.2371543]
- [22] Dai HP, Wu XB, Xu LJ. Practical scheduling for stochastic event capture in energy harvesting sensor networks. *Int'l Journal of Sensor Networks*, 2015,18(1-2):85–100. [doi: 10.1504/IJSNET.2015.069862]
- [23] Tian XZ, Liu G, Guo M, He JC, Zhu YN. Strategy to improve composite event capture ratio in energy harvesting networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2017,28(Suppl.(1)):20–29 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17003.htm>
- [24] Varshney PK. *Distributed Detection and Data Fusion*. New York: Springer Science+ Business Media, 1997. 6–32.
- [25] He SB, Chen JM, Jiang FC, Yau DKY, Xing GL, Sun YX. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(10):1931–1942. [doi: 10.1109/TMC.2012.161]
- [26] Cardei M, Du DZ. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization. *Wireless Networks*, 2005,11(3):333–340. [doi: 10.1007/s11276-005-6615-6]
- [27] Chen YZ. *Deployment strategies of sensors and chargers in radio frequency powered networks* [Master's Thesis]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019 (in Chinese with English abstract)
- [28] Dutta P, Grimmer M, Arora A, Bibyk S, Culler D. Design of a wireless sensor network platform for detecting rare, random, and ephemeral events. In: Proc. of IEEE Int'l Symp. on Information Processing in Sensor Networks. Boise: IEEE, 2005. 70. [doi: 10.1109/IPSNS.2005.1440983]
- [29] Duarte MF, Hu YH. Vehicle classification in distributed sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2004, 64(7):826–838. [doi: 10.1016/j.jpdc.2004.03.020]

附中文参考文献:

- [5] 胡诚,汪芸,王辉.无线可充电传感器网络中充电规划研究进展.软件学报,2016,27(1):72–95. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4883.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004883]

- [6] 戴海鹏,陈贵海,徐力杰,刘云淮,吴小兵,何田.一种高效有向无线充电器的布置算法.软件学报,2015,26(7):1711-1729. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4618.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004618]
- [23] 田贤忠,刘高,郭敏,何佳存,祝驿楠.能量捕获网络中提高复合事件捕捉率策略.软件学报,2017,28(Suppl.(1)):20-29. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17003.htm>
- [27] 陈雨哲.射频供能网络的节点及能量源部署策略[硕士学位论文].杭州:浙江工业大学,2019.



李燕君(1982-),女,博士,教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网.



池凯凯(1980-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网.



陈雨哲(1994-),男,硕士,主要研究领域为无线供能网络.



胡亚红(1971-),女,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网及大数据处理.



林瑞仲(1978-),男,博士,高级工程师,主要研究领域为物联网及移动通信.

www.jos.org.cn