

## 异构传感器网络多目标多重覆盖策略

罗旭 柴利\* 杨君

(武汉科技大学冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心 武汉 430081)

**摘要:** 在传感器网络环境监测应用中,常存在多种监测对象。此类应用中,每个异构网络节点搭配不同类型的传感器,要求网络部署可多重覆盖监测区以监测各个子对象。针对节点随机分布的传感器网络,该文提出一种平均子网寿命模型以评价网络中某子对象的监测寿命。在给定成本预算与各子对象的基本覆盖率需求下,采用一种基于整数向量规划的多目标多重覆盖算法权衡成本、网络覆盖性能以及网络中不同子对象的监测寿命。该算法分两部分,首先确定监测不同子对象的传感器数量,然后基于平均子网寿命模型,确定不同类型的异构节点数量。针对向量规划问题,文中给出两种不同次优解法。在仿真实验部分,将不同次优解法进行了对比,并分析了算法计算复杂度。仿真示例验证了该文的覆盖算法在多对象监测应用中的有效性。

**关键词:** 传感器网络; 多对象监测; 平均子网寿命; 向量规划; 异构节点

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)03-0690-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00667

## Multi-objective Strategy of Multiple Coverage in Heterogeneous Sensor Networks

Luo Xu Chai Li Yang Jun

(*Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Measurement Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China*)

**Abstract:** In environmental monitoring applications, there are often various objects to be monitored by sensor networks. In this scenario, each heterogeneous node carries some different sensors, and the coverage of multiple areas is required in order to monitor every different subobject. In sensor networks with random distributed nodes, an average subnet lifetime model is proposed to evaluate the average lifetime of nodes sensing one subobject. Given the constraints of cost budget and area coverage of different objects, a multi-objective multi-coverage algorithm based on integer vector programming is proposed to balance the cost and coverage performance, as well as the monitoring life of different subobjects. The algorithm is divided into two steps. The first step is to compute the number of each type of sensors used to monitor one subobject, and the second step is to determine the number of different kinds of heterogeneous nodes based on the average subnet life model. To solve the proposed vector programming issues, two suboptimal methods are given. In the simulation experiments, different suboptimal methods are compared, and the computational complexity of the proposed algorithm is analysed. Simulation examples verify the effectiveness of the proposed algorithm in the multi-objects monitoring applications.

**Key words:** Sensor network; Multi-objects monitoring; Average subnets life; Vector programming; Heterogeneous nodes

### 1 引言

覆盖问题是传感器网络中的基础研究问题之一,一直以来都是研究热点<sup>[1,2]</sup>。覆盖性能常作为传感器网络部署效果的主要参考指标<sup>[2]</sup>,合理覆盖策略的主要目的是为了提高网络的感知能力<sup>[3]</sup>,达到预定的节点覆盖率,面积覆盖率,侦测能力<sup>[4]</sup>或其它覆盖目标。为了延长网络寿命,覆盖策略常考虑网络能

耗<sup>[5,6]</sup>。按照网络监测对象的动静态类型划分,覆盖问题可分为针对静态环境的网络覆盖问题和针对动态事件的网络覆盖问题<sup>[4]</sup>。在节点随机分布的传感器网络静态监测应用中,面积覆盖率由于具有显式评价模型,常作为覆盖性能评价标准。

在许多监测应用中,监测区内常存在多种监测对象。例如,水环境监测中需监测水域温度,盐度,酸碱值等,工厂污染预警需监测多种化学扩散物。由于目前采用的传感器节点硬件成本较高,多对象监测应用中,每个节点装配多种不同类型的传感器,即节点异构。当节点能量一定时,携带的传感器越

2013-05-13 收到, 2013-07-29 改回

国家自然科学基金(60974012, 61171160)资助课题

\*通信作者: 柴利 chaili@wust.edu.cn

多, 节点寿命越短。在多对象监测网络覆盖部署中有两个重要问题需考虑, 即如何以较小的网络成本投入获得理想的网络覆盖性能, 以及如何根据不同子对象的重要性权衡网络中不同子对象的监测寿命。

现有的传感器网络多重覆盖研究主要针对  $K$  重覆盖问题, 主要涉及两大内容: (1) 探讨覆盖区域中的某热点(Point Of Interest, POI)是否可被  $K$  个节点监测到, 如文献[6]提出了一个分布式协议来检查覆盖区内某热点是否可被  $K$  个节点监测到。(2) 探讨覆盖区域中的某点如何被  $K$  个节点监测到, 如文献[7]结合博弈论, 给出了一种分布式  $K$  重覆盖方法; 文献[8]将网络节点分为  $K$  个独立集, 每个独立集都可全覆盖监测区, 为了解独立集划分问题, 将覆盖问题转化为布尔可满足(Boolean satisfiability)问题; 文献[9]在 3 维空间中结合网络连通性探讨了保证  $K$  重覆盖方法的最小空间分布密度。现有的多重覆盖研究主要针对单对象监测, 一个节点携带一个传感器, 而在多对象监测应用中, 一个节点携带多种类型的传感器, 形成节点异构网络, 网络多重覆盖问题为  $K$  个不同类型的传感器如何多重覆盖监测区内某热点以监测各子对象的问题。在单对象监测应用中, 相关覆盖研究讨论了网络投入成本与对象覆盖性能之间的权衡问题<sup>[10]</sup>以及覆盖性能与网络寿命之间的权衡关系<sup>[5,8]</sup>, 而在多对象监测应用中, 成本与覆盖性能之间的权衡问题扩展到网络成本与多个对象的覆盖性能权衡问题, 在满足预期的覆盖性能条件下存在不同子对象的监测寿命权衡问题。现有的覆盖研究对多对象监测中的覆盖问题缺乏考虑, 其覆盖策略不能直接适用于多对象监测。

综合考虑分布在监测区域内监测某子对象的各节点工作寿命, 本文提出一种子网寿命模型, 并以平均子网寿命评价某子对象的监测寿命。在给定不同子对象的面积覆盖率基本需求与网络成本预算的情况下, 针对节点随机分布的传感器网络多对象监测应用中的多重覆盖部署, 本文提出了一种基于整数向量规划的多目标多重覆盖算法, 并给出了相应解法。本文提出的多目标多重覆盖策略可同时解决异构传感器网络多对象监测应用中的投入成本与各子对象覆盖性能之间的权衡问题, 以及网络中不同子对象的监测寿命权衡问题。

针对多对象监测应用中的多重覆盖策略研究, 本文的主要贡献为:

(1) 提出多目标多重覆盖算法, 该算法分为两个部分, 首先以网络成本与各子对象有效面积覆盖率为目标建立整数向量规划模型, 确定监测不同子对

象的传感器数目, 权衡网络投入成本与不同子对象的覆盖性能。而后, 已知监测不同子对象的传感器数目, 以各子对象平均子网寿命为目标建立整数向量规划模型, 搭配异构网络节点, 确定相应异构节点数目, 权衡不同子对象的监测寿命。

(2) 针对提出的向量规划问题, 给出有效次优解法, 并给出算法复杂度分析。

(3) 通过仿真示例验证了本文所提多目标多重覆盖算法的有效性, 比较了不同次优解法的仿真性能, 并分析了算法的求解复杂度。

## 2 基本知识与问题描述

为了具体描述问题, 本文首先引入如下记号:

(1) 记  $K$  个监测对象为  $o_k, k = 1, 2, \dots, K$ 。记  $O_i^k = \{o_{p_1}, o_{p_2}, o_{p_3}, \dots\}$ ,  $p_1, p_2, p_3, \dots \in \{1, 2, 3, \dots, K\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$  ( $I = \sum_{j=1}^K C_K^j$ ), 为  $K$  个对象的  $I$  种不同组合, 记  $m_i$  ( $1 \leq m_i \leq K$ ) 为  $O_i^k$  中的不同子对象个数。

(2) 记监测对象  $o_k$  的传感器成本为  $c_k$ 。 $c^*$  表示给定的传感器成本预算。

(3) 监测对象  $o_k$  的传感器部署在监测区  $Q$  内, 记监测区面积为  $\|Q\|$ , 监测  $o_k$  对象的传感器的感应半径记为  $b_k$ 。监测子对象  $o_k$  的子网寿命记为  $g_k$ , 平均子网寿命记为  $\bar{g}_k$ 。

(4)  $l_k$  表示网络中所投放的监测对象  $o_k$  的传感器数量, 向量  $l = (l_1, l_2, \dots, l_K)$ 。 $n^*$  表示网络中所投放的传感器节点总数量。 $n_i$  表示网络部署中监测多对象  $O_i^k$  的第  $i$  类节点的个数, 向量  $n = (n_1, n_2, \dots, n_I)$ 。

### 2.1 相关定义与假设

**假设 1** 对象  $o_k, k = 1, 2, \dots, K$  存在于同一监控区。

**假设 2** 单个节点最大能量供给为定值, 节点寿命与其携带的传感器数量成反比。

**假设 3** 每个节点至少装配 1 个传感器, 且监测某子对象的传感器仅携带 1 个。

假设 2 衡量了单个节点携带传感器个数与节点寿命的关系, 根据假设 2 可知监测多对象  $O_i^k$  节点的寿命比为:  $1/m_1 : 1/m_2 : \dots : 1/m_I$ 。

**定义 1** 判定函数: 已知多对象组合  $O_i^k$ , 由判定函数  $\text{Boolean}(O_i^k, o_k)$  判定监测多对象  $O_i^k$  的节点是否能监测对象  $o_k$ , 如式(1):

$$\text{Boolean}(O_i^k, o_k) = \begin{cases} 1, & o_k \in O_i^k \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

**定义 2** 面积覆盖概率(area coverage)<sup>[4]</sup>: 面积  $\|Q\|$  被覆盖的比率。面积覆盖率  $\phi(l_k)$  具有其它形式:

$$\phi(l_k) = 1 - e^{-\frac{l_k}{\|Q\|} \pi b_k^2} \quad (2)$$

其中  $l_k/\|Q\|$  为传感器泊松分布密度,  $\pi b_k^2$  为传感器监测范围。

**定义 3** 子网寿命: 将所有监测对象  $o_k$  的节点组成的网络称为子网, 子网内各节点的寿命和称为  $o_k$  对象的子网寿命为

$$g_k = \alpha \sum_{i=1}^I \frac{1}{m_i} n_i \text{Boolean}(O_i^{(K)}, o_k), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

其中  $\alpha$  为寿命比例常数, 即单个节点仅携带一个传感器时的寿命, 本文取 1。

**定义 4** 平均子网寿命: 监测对象  $o_k$  节点的平均工作寿命为

$$\bar{g}_k = g_k/l_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

## 2.2 问题描述

选定监测对象  $o_k$  的传感器, 给定监测对象组合  $O_i^{(K)}$  后, 显然监测对象  $O_i^{(K)}$  的节点携带的传感器个数  $m_i$  可确定, 判定函数  $\text{Boolean}(O_i^{(K)}, o_k)$  的值由式(1)确定。已知背景参数: 覆盖区面积  $\|Q\|$ , 对象传感器感应半径  $b_k$ , 基本面积覆盖率需求  $\Phi_k$ , 传感器成本  $c_k$ , 传感器总成本预算  $c^*$ , 节点总数  $n^*$ , 以及  $m_i$ ,  $\text{Boolean}(O_i^{(K)}, o_k)$  的值 ( $k = 1, 2, \dots, K, i = 1, 2, \dots, I$ )。本文多目标多重覆盖问题为: 求取监测对象  $O_i^{(K)}$  的监测节点的数量  $n_i$ , 以权衡传感器投入成本与不同子对象的有效面积覆盖率, 以及不同子对象的平均子网寿命。该问题直接求解困难, 分为两个子问题, 首先确定监测不同子对象的传感器数目  $l_k$ , 然后, 根据监测不同子对象的传感器数目, 结合平均子网寿命, 求监测对象  $O_i^{(K)}$  的节点的数量  $n_i$ 。

在覆盖约束与成本约束下, 首先确定监测不同子对象的传感器数目  $l_k$ , 有多目标规划问题:

**基本覆盖约束** 给定基本面积覆盖率需求  $\Phi_k$ , 有约束条件:

$$\phi(l_k) \geq \Phi_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

**传感器总成本约束** 传感器成本不能超过价格预算  $c^*$ , 约束条件为

$$\sum_{k=1}^K c_k l_k \leq c^*, \quad l_k \in N^+ \quad (6)$$

**传感器总成本目标** 传感器投入成本最小:

$$\min_l \left\{ f_1 = \sum_{k=1}^K l_k c_k \right\} \quad (7)$$

**有效覆盖率目标** 投入的传感器个数越多面积覆盖率越大, 有效覆盖率目标等价于

$$\max_{l_k} (f_{k+1} = l_k), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

**问题 1** 已知覆盖区面积  $\|Q\|$ , 对象传感器感应半径  $b_k$ , 面积覆盖率  $\phi(l_k) \geq \Phi_k$ , 传感器成本  $c_k$ , 传感器总成本预算  $c^*$ , 综合考虑成本目标式(7)与式(8)各覆盖率目标, 求取传感器个数  $l_k$ , 权衡总成本与有效覆盖率 ( $k = 1, 2, \dots, K$ )。该问题模型如式(9):

$$\left. \begin{aligned} & \text{V-min}_l [f_1 \quad -f_2 \quad -f_3 \quad \dots \quad -f_{K+1}] \\ & \text{s.t. 式(5), 式(6)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 V-min (Vector-minimum) 规划<sup>[11]</sup>属于向量数学规划, 表示对向量内的多个目标同等最小化。

**注 1** 便于问题建模, 多目标规划式(9)中将式(8)的最大化目标  $\max_{l_k} (f_{k+1} = l_k)$  转换为  $\min_{l_k} (-l_k)$ 。

在规划问题式(9)的基础上, 已知不同类型的传感器投入量  $l_k$ , 搭配传感器组合  $O_i^{(K)}, i = 1, 2, \dots, I$ , 求取其对应监测节点的个数  $n_i$ 。

**硬件成本** 节约节点制作(板材, MCU, 收发设备)成本, 节点总数量限定为  $n^*$ , 显然, 节点数目为正整数。有约束:

$$\sum_{i=1}^I n_i = n^*, \quad n_i \in N^+ \quad (10)$$

**传感器数量约束** 基于式(9)模型解得的不同类型传感器的投入个数, 列出传感器数量约束:

$$\sum_{i=1}^I n_i \text{Boolean}(O_i^{(K)}, o_k) = l_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

**问题 2** 已知不同类型的传感器个数  $l_k$ , 监测对象  $O_i^{(K)}$  的节点携带的传感器个数  $m_i$ , 判定函数  $\text{Boolean}(O_i^{(K)}, o_k)$  的值, 节点总数  $n^*$ , 求取不同类型的异构监测节点的数量  $n_i$  以权衡不同子对象的平均子网寿命  $\bar{g}_k$  ( $\bar{g}_k$  为  $n_i$  的函数, 定义如式(4),  $k = 1, 2, \dots, K, i = 1, 2, \dots, I$ )。该问题模型如式(12):

$$\left. \begin{aligned} & \text{V-min}_n [-\bar{g}_1 \quad -\bar{g}_2 \quad -\bar{g}_3 \quad \dots \quad -\bar{g}_K] \\ & \text{s.t. 式(10), 式(11)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

## 3 多目标规划次优解法

设定传感器成本目标与覆盖率之间的权衡权值分别为  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 。设不同子对象的有效覆盖率权衡权值为  $\delta_k$ 。  $\delta_k$  越大, 表明网络部署更偏重对监测对象  $o_k$  的覆盖性能。设监测对象  $o_k$  的子网寿命权值为  $\eta_k$ 。  $\eta_k$  越大, 表明监测对象  $o_k$  的传感器子网越重要, 相应平均子网寿命优先保证(所有权值  $> 0$ )。

### 3.1 基本次优解法

面积覆盖率函数(式(2))为单调函数。令  $\phi(l_k) = \Phi_k$ , 已知覆盖区面积  $\|Q\|$ , 对象传感器感应半径  $b_k$ , 可求得监测对象  $o_k$  的传感器个数至少为  $\lceil -\|Q\| \ln(1 - \Phi_k) / \pi b_k^2 \rceil$  ( $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整)。约束条件

式(5)化为

$$l_k \geq \left\lceil -\frac{\|Q\| \ln(1 - \Phi_k)}{\pi b_k^2} \right\rceil, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

针对 V-min 问题式(9), 采用加权和法将多目标转化为单目标, 变为常规整数规划问题<sup>[12]</sup>求解:

$$\begin{aligned} \min_l \left( F(l) = \varepsilon_1 q_1 f_1 + \varepsilon_2 q_2 \left( \sum_{k=1}^K -\delta_k f_{k+1} \right) \right) \\ \text{s.t. 式(6), 式(13)} \end{aligned} \quad (14)$$

由于价格与传感器个数的量纲不一致,  $q_1, q_2$  用作去量纲化处理 ( $q_1, q_2$  为由极小值比例法<sup>[13]</sup>获取的无量纲化权值):  $q_1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^K (c_k [-\|Q\| \ln(1 - \Phi_k) / \pi b_k^2])}$ ,

$$q_2 = \frac{1}{\sum_{k=1}^K (\delta_k [-\|Q\| \ln(1 - \Phi_k) / \pi b_k^2])}。$$

已知规划问题式(14)的解  $l_k, k = 1, 2, \dots, K$ , 代入约束式(11)。根据平均子网模型式(4)可知, 在规划问题式(12)中, 平均子网寿命  $\bar{g}_k$  的理想目标值为 1, 即要求携带监测对象  $o_k$  的传感器的节点上仅有 1 个传感器。

一般情况下, 各子对象间的权衡权值  $\eta_k$  不等, 若在保障高权值子对象的平均子网寿命的基础上兼顾其它子对象, 则将问题式(12)的优化目标转化为绝对值偏差评价目标; 若重点保障高权值子对象的平均子网寿命则将问题式(12)的优化目标转化为平方评价目标。

(1) 偏差评价:

$$\min_n \left( F(n) = \sum_{k=1}^K \eta_k |1 - \bar{g}_k| \right) \quad (15)$$

在绝对值评价下, 结合平均子网模型式(4)与约束式(11)可知  $1 \geq \bar{g}_k, |1 - \bar{g}_k| \geq 0$ , 去绝对值, 将 V - min 问题式(12)的优化目标转化为常规整数规划目标:

$$\min_n \left( F(n) = \sum_{k=1}^K \eta_k (1 - \bar{g}_k) \right) \quad (16)$$

(2) 平方评价: 将 V - min 问题式(12)的优化目标转化为二次规划目标:

$$\min_n \left( \tilde{F}(n) = \sum_{k=1}^K \eta_k (1 - \bar{g}_k)^2 \right) \quad (17)$$

式(17)为凸二次整数规划目标(目标函数关于  $n$  的 Hessian 矩阵半正定), 此类规划问题易采用分支定界法求解<sup>[14]</sup>。

**注 2** 不失一般性, 权值设定满足  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1$ ,  $\sum_{k=1}^K \eta_k = 1$ ,  $\sum_{k=1}^K \delta_k = 1$ , 当  $\eta_k / l_k = 1/K, k = 1, 2, \dots, K$  时, 加权目标规划式(16)失效, 此时应采用平方目标规划式(17)。

### 3.2 加速次优解法

在求解  $n_i$  的规划策略中, 随着监测对象数  $K$  的增大,  $I = \sum_{j=1}^K C_K^j = 2^K - 1$ , 变量  $n_i$  的个数指数增长, 监测某子对象  $o_k$  的节点类型有  $\sum_{j=0}^{K-1} C_{K-1}^j = 2^{K-1}$  种。减小变量个数, 降低模型复杂度, 快速获取规划解, 给定监测对象  $o_k$  的节点类型的最大个数  $M'_k$ , 要求携带  $o_k$  传感器的节点至少携带  $\tilde{m}_k$  个传感器,  $\tilde{m}_k$  的求取如优化问题式(18):

$$\begin{aligned} \max(\tilde{m}_k) \\ \text{s.t. } \left. \begin{aligned} n^* - l_k &\leq \sum_{k=1}^K l_k - \tilde{m}_k l_k \\ \tilde{m}_k l_k &\leq \sum_{k=1}^K l_k \\ \sum_{j=\tilde{m}_k-1}^{K-1} C_{K-1}^j &\leq M'_k, \tilde{m}_k \in N^+ \end{aligned} \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

已知  $\tilde{m}_k$ , 添加约束条件:

$$n_i = 0, \text{ Boolean}(O_i^{(K)}, o_k) = 1 \wedge (m_i < \tilde{m}_k) \quad (19)$$

由式(18)可知,  $\tilde{m}_k$  的选取不会使得传感器投入大于传感器总数, 即  $\tilde{m}_k l_k \leq \sum_{k=1}^K l_k$ , 同时保证了每个节点都携带传感器, 即  $n^* - l_k \leq \sum_{k=1}^K l_k - \tilde{m}_k l_k$ 。

## 4 覆盖策略求解全流程

选定监测对象  $o_k$  的传感器; 已知背景参数: 覆盖区面积  $\|Q\|$ , 对象传感器感应半径  $b_k$ , 面积覆盖率  $\varphi(l_k) \geq \Phi_k$ , 传感器成本  $c_k$ , 传感器总成本预算  $c^*$ , 节点总数  $n^*$ ; 给定权值  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \delta_k, \eta_k$ , 监测对象  $o_k$  的节点类型的最大个数  $M'_k$ 。本文多目标多重覆盖策略具体过程如下:

步骤 1 通过求解规划问题式(14), 求  $l_k, k = 1, 2, \dots, K$ ;

步骤 2 列出对象的所有可能组合  $O_i^{(K)}, i = 1, 2, \dots, I$ 。确定监测多对象  $O_i^{(K)}$  的节点携带的传感器个数  $m_i$  以及判定函数  $\text{Boolean}(O_i^{(K)}, o_k)$  的值。

步骤 3 依据问题式(18)求  $\tilde{m}_k$  值, 给出约束式(19);

步骤 4 在保障高权值监测子对象的平均子网寿命的基础上兼顾其它子对象, 求解加权线性整数规划问题得  $n_i, i = 1, 2, \dots, I$ 。

$$\begin{aligned} \min_n (F(n) = \sum_{k=1}^K \eta_k (1 - \bar{g}_k)) \\ \text{s.t. 式(10), 式(11), 式(19)} \end{aligned} \quad (20)$$

否则, 重点保障高权值监测子对象的平均子网寿命, 解二次整数规划问题得  $n_i, i = 1, 2, \dots, I$ 。

$$\min_n \left\{ \begin{aligned} & \tilde{F}^y(\mathbf{n}) = \sum_{k=1}^K \eta_k (1 - \bar{g}_k)^2 \\ & \text{s.t. 式(10), 式(11), 式(19)} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

5 仿真示例

例 1 在半径为 10 m 的圆形监测区内, 有 4 种监测对象 A, B, C, D, 监测 A, B, C, D 对象的传感器的感知半径分别为 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 与预算成本  $c^*$  的比为 0.5:2.0:1.0:1.5:77.5。给定  $\Phi_A = 0.94$ ,  $\Phi_B = 0.94$ ,  $\Phi_C = 0.95$ ,  $\Phi_D = 0.94$ 。节点总数限制为  $n = 34$ 。预定权衡比重  $\varepsilon_1 = 0.5$ ,  $\varepsilon_2 = 0.5$ ,  $\delta_C = 0.7$ ,  $\delta_B = \delta_A = \delta_D = 0.1$ ,  $\eta_B = 0.4$ ,  $\eta_C = 0.1$ ,  $\eta_D = 0.2$ ,  $\eta_A = 0.3$ 。

已知不同传感器的感应半径, 根据给定  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$ ,  $\Phi_C$ ,  $\Phi_D$ , 可知监测 A, B, C, D 对象的传感器个数至少为 32,18,12,8。多对象组合  $O_1^{(4)}$  到  $O_{15}^{(4)}$  分别为 {A}, {B}, {C}, {D}, {A,B}, {A,C}, {A,D}, {B,C}, {B,D}, {C,D}, {A,B,C}, {A,B,D}, {B,C,D}, {A,C,D}, {A,B,C,D}。  $m_1$  到  $m_{15}$  分别为: 1,1,1,1,2,2,2,2,2,2,3,3,3,3,4。

算得无量纲化权重  $q_1 = 1/76$ ,  $q_2 = 1/14.2$ 。列出成本投入与覆盖性能均衡规划:

$$\min \left\{ \begin{aligned} & \varepsilon_1 q_1 (0.5l_A + 2l_B + l_C + 1.5l_D) - \varepsilon_2 q_2 (\delta_A l_A + \delta_B l_B + \delta_C l_C + \delta_D l_D) \\ & 0.5l_A + 2l_B + l_C + 1.5l_D \leq 77.5 \\ & l_A \geq 32, l_B \geq 18, l_C \geq 12, l_D \geq 8 \\ & l_A, l_B, l_C, l_D \in N^+ \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

解得:  $l_A = 33$ ,  $l_B = 18$ ,  $l_C = 13$ ,  $l_D = 8$ , 目标值 77.5。

令子网寿命:

$$\begin{aligned} g_A &= \sum_{i=1}^{15} \frac{1}{m_i} n_i \text{Boolean}(O_i^{(4)}, o_A) \\ g_B &= \sum_{i=1}^{15} \frac{1}{m_i} n_i \text{Boolean}(O_i^{(4)}, o_B) \\ g_C &= \sum_{i=1}^{15} \frac{1}{m_i} n_i \text{Boolean}(O_i^{(4)}, o_C) \\ g_D &= \sum_{i=1}^{15} \frac{1}{m_i} n_i \text{Boolean}(O_i^{(4)}, o_D) \end{aligned}$$

已知  $l_A, l_B, l_C, l_D$ , 分别采用偏差评价与平方评价如式(23)和式(24):

$$\min_{n_i} (\eta_A (1 - g_A / 33) + \eta_B (1 - g_B / 18) + \eta_C (1 - g_C / 13) + \eta_D (1 - g_D / 8)) \quad (23)$$

$$\min_{n_i} (\eta_A (1 - g_A / 33)^2 + \eta_B (1 - g_B / 18)^2 + \eta_C (1 - g_C / 13)^2 + \eta_D (1 - g_D / 8)^2) \quad (24)$$

依据式(10), 式(11), 列出约束条件如式(25):

$$\text{s.t. } \left\{ \begin{aligned} & \sum_i n_i = 33, i = 1, 5, 6, 7, 11, 12, 14, 15 \\ & \sum_i n_i = 18, i = 2, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 15 \\ & \sum_i n_i = 13, i = 3, 6, 8, 10, 11, 13, 14, 15 \\ & \sum_i n_i = 8, i = 4, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15 \\ & \sum_{i=1}^{15} n_i = 34 \\ & \{n_i \geq 0, n_i \in N^+, i = 1, 2, \dots, 15\} \end{aligned} \right. \quad (25)$$

情况 1: 无变量个数限制 以式(23)为目标, 式(25)为约束, 得解  $n_4 = 1$ ,  $n_5 = 13$ ,  $n_6 = 8$ ,  $n_7 = 7$ ,  $n_{11} = 5$ , 其余变量值为零。目标值: 0.5200。以式(24)为目标, 式(25)为约束, 得解  $n_1 = 1$ ,  $n_5 = 15$ ,  $n_6 = 8$ ,  $n_7 = 5$ ,  $n_{11} = 3$ ,  $n_{14} = 2$ , 其余变量值为零。目标值: 0.2719。

情况 2: 阈值  $\tilde{m}_C = 3$ 。依据约束式(19)可知:

$$n_4 = n_7 = n_9 = n_{10} = 0 \quad (26)$$

以式(23)为目标, 式(25), 式(26)为约束, 得解  $n_1 = 8$ ,  $n_4 = 1$ ,  $n_5 = 5$ ,  $n_7 = 7$ ,  $n_{11} = 13$ , 其余变量值为零, 目标值: 0.5356。以式(24)为目标, 式(25), 式(26)为约束, 得解  $n_1 = 8$ ,  $n_4 = 1$ ,  $n_5 = 9$ ,  $n_7 = 3$ ,  $n_{11} = 9$ ,  $n_{14} = 4$ , 其余变量值为零, 目标值: 0.2941。

对比上述示例结果如表 1, 有如下推断: (1)从表 1 目标值栏可看出, 尽管加速次优求解可减少有效变量个数, 降低问题复杂度, 但可能使得最小化问题的最优目标值变大。(2)对比情况 1, 情况 2 下的各子对象平均子网寿命, 平方评价相比于偏差评价, 增大了高权值对象的权重, 即增大了对象 B 的平均子网寿命。

例 2 探讨有效变量个数与规划模型计算复杂

表 1 方案对比

	目标值	平均子网寿命				评价方式
		A	B	C	D	
情况 1	0.5200	0.4747	0.4537	0.4359	0.5625	偏差评价
	0.2719	0.4747	0.4722	0.4359	0.5208	平方评价
情况 2	0.5356	0.5556	0.3796	0.3333	0.5625	偏差评价
	0.2941	0.5404	0.4167	0.3333	0.4792	平方评价

度(以求解时间来衡量, 实验工具: MATLAB2010a, 计算机 CPU 双核: 2.80 GHz, 2.79 GHz)间的关系。在多对象监测应用中有 10 种监测对象  $A, B, \dots, J$ , 监测  $A, B, \dots, J$  对象的传感器的个数分别为 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95。节点总数限定 120。 $\eta_E = 0.25$ ,  $\eta_A = 0.15$ ,  $\eta_B = 0.05$ ,  $\eta_C = 0.05$ ,  $\eta_D = 0.04$ ,  $\eta_F = 0.06$ ,  $\eta_G = 0.05$ ,  $\eta_H = 0.05$ ,  $\eta_I = 0.10$ ,  $\eta_J = 0.20$ 。

对比不同情形下, 偏差评价与平方评价下的规划问题求解复杂度(以计算时间衡量, 单位: s)如表 2。其中, 情况 1: 直接根据式(16)与式(17)进行求解, 有效变量总个数为 1023。情况 2: 置  $\tilde{m}_k = 3, k = A, B, \dots, J$ , 有效变量总个数为 968。情况 3: 置  $\tilde{m}_k = 4, k = A, B, \dots, J$  有效变量总个数为 848。情况 4: 置  $\tilde{m}_k = 5, k = A, B, \dots, J$  有效变量总个数为 638。情况 1 为基本次优求解方案, 情况 2~情况 4 采取加速次优求解方案。

从表 2 可知, 二次整数规划, 在相同的模型复杂度下, 其求解复杂度要远远高于线性规划; 有效变量个数的减少可缩短规划解求取时间。

表 2 计算复杂度对比

	变量个数	偏差评价 计算时间(s)	平方评价 计算时间(s)
情况 1	1023	40.7330	15517.5513
情况 2	968	28.1656	15314.9287
情况 3	848	20.1465	4928.4693
情况 4	638	10.6357	4138.7291

## 6 结束语

在节点异构的传感器网络多对象监测应用中, 评价某子对象的监测寿命, 提出平均子网寿命模型。为了权衡投入成本与各子对象的覆盖性能, 以及权衡网络中不同子对象的监测寿命, 本文在相关约束下提出的基于整数向量规划的多目标多重覆盖算法分为两部分, 首先确定监测不同子对象的传感器数量, 然后确定不同类型的异构节点数量。文中给出了向量规划问题的次优解法, 仿真示例部分表明本文的异构传感器网络多目标多重覆盖策略适用于多对象监测。

## 参考文献

- [1] Karl H and Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Network[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005: 316-328.
- [2] 刘丽萍, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1752-1757.  
Liu Li-ping, Wang Zhi, and Sun You-xian. Survey on coverage in wireless sensor networks deployment[J]. *Journal of Electronics & Informations Technology*, 2006, 28(9): 1752-1757.
- [3] Tan R. Exploiting data fusion to improve the coverage of wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(2): 450-462.
- [4] Liu B and Towsley D. A study of the coverage of large-scale sensor networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, Florida, 2004: 475-483.
- [5] Aziz N A, Moheemmed A W, Alias M Y, et al.. Coverage maximization and energy conservation for mobile wireless sensor networks: a two phase particle swarm optimization algorithm[C]. Proceedings of Sixth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, Penang, 2011: 64-69.
- [6] Huang C F and Tseng Y C. The coverage problem in a wireless sensor network[J]. *ACM Mobile Networks and Applications*, 2005, 10(4): 519-528.
- [7] Wang Q, Yan W J, and Shen Y. N-person card game approach for solving SET K-COVER problem in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(5): 1522-1535.
- [8] Ashouri M, Zali Z, Mousavi S R, et al.. New optimal solutions to disjoint set K-coverage for lifetime extension in wireless sensor networks[J]. *IET Wireless Sensor Systems*, 2012, 2(1): 31-39.
- [9] Ammari H M and Das S K. A study of k-coverage and measures of connectivity in 3D wireless sensor network[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2010, 59(2): 243-257.
- [10] Chakrabarty K, Lyengar S S, and Qi H R. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Computer*, 2002, 51(12): 1448-1453.
- [11] Cohon J L. Multiobjective Programming and Planning[M]. North Chelmsford: Courier Dover Publications, 2004: 17-200.
- [12] Gass S I. Linear Programming: Methods and Applications [M]. North Chelmsford: Courier Dover Publications, 2010: 249-280.
- [13] 郭亚军. 线性无量纲化的方法的性质分析[OL]. <http://www.docin.com/p-186656653.html>, 2013.5.  
Guo Ya-jun. Character analysis of linear dimensionless methods[OL]. <http://www.docin.com/p-186656653.html>, 2013. 5.
- [14] 陈志平, 卻峰. 求解中大规模复杂凸二次整数规划问题的新型分枝定界算法[J]. 计算数学, 2004, 26(4): 445-458.  
Cheng Zhi-ping and Que Feng. A new branch-and-bound algorithm for solving large complex integer convex quadratic programs[J]. *Mathematica Numerica Sinica*, 2004, 26(4): 445-458.

罗旭: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。  
柴利: 男, 1972年生, 博士生导师, 研究方向为控制理论应用、信号处理与无线通信等。  
杨君: 女, 1977年生, 副教授, 研究方向为无线传感器网络、无线通信等。