

定向传感器网络中的最小化覆盖间隙和 最大化网络生命时间问题的研究

杨辉强, 李德英, 李 政

(数据工程与知识工程教育部重点实验室(中国人民大学), 中国人民大学信息学院, 北京 100872)

摘 要: 本文研究了定向传感器网络中最小化覆盖间隙和最大化网络生命时间的问题. 本文采用的定向感知天线模型, 每个传感器有多个感应方向. 在无线传感器网络中, 最大化网络生命时间和最小化覆盖间隙是两个冲突的目标. 为了在两者之间做出权衡, 文章研究了在生命时间受约束的情况下最小化覆盖间隙问题(MCBLC)和在覆盖间隙受约束的条件下最大化网络生命时间问题(MLCBC). 对于 MCBLC 问题, 我们首先将它模型化为整数规划问题, 并提出两个启发式算法(MCBLC-G 和 MCBLC-G-1). 基于 MCBLC-G (MCBLC-G-1)算法, 利用二分搜索技术得到 MLCBC 问题的算法. 最后, 模拟验证了算法的性能.

关键词: 无线传感器网络; 有向感应天线; 网络生命时间; 覆盖间隙; 启发式算法

中图分类号: TP373 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 2A-138-05

Minimum Coverage Breach and Maximum Network Lifetime in Directional Sensor Networks

YANG Hui-qaing, LI De-ying, LI Zheng

(Key Laboratory of Data Engineering and Knowledge Engineering, Renmin University of China, MOE,
School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In this paper, we discuss the minimum coverage breach and maximum network lifetime problem in directional sensor network. In our directional model, each sensor may have several sensing directions, but only one direction can be activated at the same time. In wireless sensor network, maximizing the network lifetime and minimizing the coverage breach are two conflicting objectives. To make a trade-off between them, we study Minimum Coverage Breach under Lifetime Constraint (MCBLC) problem and Maximum Lifetime under Coverage Breach Constraint problem (MLCBC). For MCBLC problem, we first formulate it as Integer Programming and then propose greedy algorithm (MCBLC-G) algorithm. For MLCBC problem, based on MCBLC-G algorithm, we use binary search technique to get a solution. Extensive simulations have been presented to demonstrate the performance of these algorithms.

Key words: sensor networks; directional sensing antenna; network lifetime; coverage breach; greedy algorithms

1 引言

在无线传感器网络^[1]中, 由于传感器是由电池供应能量, 因此, 节约能量从而延长网络生命时间在设计大规模无线传感器网络中尤为重要.

目标覆盖是无线传感器网络中的一个基本且重要的问题. 在监控物理环境, 目标探测、分类和跟踪等众多应用中, 目标覆盖是这些应用得以实现的基础. 在传统的全向天线感应模型下, 目标覆盖问题已经取得了许多研究成果^[2~6]. 近年来, 定向传感器方面的研究和开发取得了一定的成果^[10]. 与全向传感器相比, 定向传感器有助于节约能量消耗, 从而延长网络生命时间.

在本文中, 作者研究了在网络生命时间受约束的情况下最小化覆盖间隙问题, 即在满足网络总的生命时间不小于给定要求值的情况下最小化网络的覆盖间隙(MCBLC). 所采取的方法是将传感器的所有方向组织成一组方向子集, 每组方向子集为可行覆盖集, 并为每个覆盖子集分配工作时间, 同时最小化网络总的覆盖间隙. 在任何时间内, 只有一个可行覆盖集是处于工作状态. 当某一个可行覆盖集处于工作状态时, 其中的任意一个方向也处于工作状态, 不在可行覆盖集中的其他传感器处于睡眠状态以节约能量. 对应地, 我们也考虑了在覆盖间隙受约束的情况下最大化网络生命时间的问题(MLCBC).

2 相关工作

尽管无线传感器网络覆盖问题已经有大量的研究成果,但是关于定向传感器网络中的覆盖间隙问题的研究工作几乎没有.以前大部分工作都集中在全向模型下的完全覆盖^[2,6-9].在文献[2,6]中,传感器被组织成不相交的子集,每个子集完全覆盖所有节点,目标就是最大化覆盖子集个数.文献[6]提出了一个多项式时间的启发式算法(Most Constrained-Least Constraining Coverage Heuristic)来连续地计算不相交覆盖子集.与文献[2,6]不同,在文献[7~9]中,传感器被组织成可以相交的子集,每个子集完全覆盖所有目标.

文献[11]是与覆盖间隙有关的工作.在文献[11]中,作者将带宽受限制条件下的最小化覆盖间隙问题表示为整数规划,然后提出了 MSCMB 和 GREEDY-MSC 这两个近似算法.

据我们所知,没有现存的工作考虑定向传感器网络中的覆盖间隙问题.本文研究了定向传感器网络中网络生命时间受约束的情况下最小化覆盖间隙问题和覆盖间隙受限制的条件下最大化网络生命时间问题.

3 网络模型和问题描述

本文采用的定向感知传感器模型中,每个传感器有多个感应方向.每个方向的感应区域为以传感器为中心,以感应半径为半径的感应圆盘的一个扇形.初始时,网络中每个传感器是随机分布的.注意一个传感器的两个或多个方向不能同时处于工作状态.当一个方向集合中不存在同一传感器的两个或两个以上方向时,该方向集合称为可行覆盖集.注意可行覆盖集并不保证完全覆盖.

本文考虑以下网络情景.在二维欧几里得平面有一些目标,它们的位置是已知的.为了监控这些目标,大量的传感器分布在目标附近.每个有向传感器可以有 W 个感应方向.为简单起见,我们假设起始时每个传感器有一个随机给定的生命时间值.传感器处于睡眠状态时不消耗能量.传感器从一个方向切换到另一个方向的能量消耗可以忽略不计.

假设 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}$ 是目标集合. $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 是传感器集合. $D = \{d_{ij} \mid i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, W\}$ 为所有传感器的方向集合. L_i 为第 i 个传感器 s_i 的生命时间,即当传感器处于工作状态时能持续的时间.

定义 1 一个调度就是一些有序对 (D_k, t_k) , $k = 1, \dots, K$ 的集合,其中每个 $D_k \subseteq D$ 是一个可行覆盖集. t_k 是 D_k 的工作时间.并且对每个 $s_j \in S$, 在所有可行覆盖集中的总的工作时间不超过其生命时间 L_i , 即 $\sum_{i=1}^K |s_j$

$\cap D_i \mid t_i \leq L_j$. 该调度的生命时间就是所有 t_k 之和,即,

$$TL = \sum_{k=1}^K t_k.$$

定义 2 给定一个调度 $\{(D_k, t_k) \mid k = 1, \dots, K\}$, 总的覆盖间隙(total coverage breach(TCB))定义为:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^M (t_k - t_k z_{kl})$$

其中当 D_k 中至少一个传感器方向能够覆盖目标 r_l 时 $z_{kl} = 1$; 否则 $z_{kl} = 0$. 覆盖间隙率(Breach Rate)定义为:

$$CBR = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^M (t_k - t_k z_{kl})}{M \cdot \sum_{k=1}^K t_k}$$

定义 3 MCBLC 问题:给定一个具有 N 个传感器和 M 个目标的定向传感器网络,每个传感器具有 W 个方向,找出一个覆盖间隙率最小同时其生命时间(TL)至少为 T_0 的调度 $\{(D_k, t_k) \mid k = 1, \dots, K\}$.

定义 4 MLCBC 问题:给定一个具有 N 个传感器和 M 个目标的定向传感器网络,每个传感器具有 W 个方向,找出一个生命时间(TL)最长同时其覆盖间隙率不超过 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 的调度 $\{(D_k, t_k) \mid k = 1, \dots, K\}$.

定理 1 MCBLC 问题和 MLCBC 问题是 NP-hard 问题.

Proof: MCBB 问题^[11]是 MCBLC 问题的特殊情况,因为,如果我们令 MCBLC 问题中每个传感器的方向个数为 1,那么它就是文献[11]中的 MCBB 问题.由于 MCBB 问题已经被证明为 NP-hard 的,因此 MCBLC 问题也是 NP-hard.

文献[10]中的 MDSC 问题是 MLCBC 问题的特例,如果我们令覆盖间隙率为 0,那么它就是文献[10]中的 MDSC 问题.由于 MDSC 问题已经在文献[10]中证明为 NP-hard 的,所以 MLCBC 问题也是 NP-hard.

4 MCBLC 问题的整数规划表示

在这一部分,我们首先将 MCBLC 问题表示为一个整数规划问题.然后我们提出两个启发式算法.

A. 整数规划表示

给定:传感器集合 $S = \{s_1, \dots, s_N\}$; 目标集合 $R = \{r_1, \dots, r_M\}$; 对每个目标 r_l , 定义 $C_l = \{d_{ij} \mid d_{ij} \text{ 覆盖 } r_l\}$.

我们设置两个布尔变量 $x_{i,j,k}$ 和 $z_{k,l}$ 如下:

$$x_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } d_{i,j} \in D_k \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

和

$$z_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } D_k \text{ 覆盖 } r_l \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

MCBLC 可以表示为如下形式:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^M (t_k - t_k \cdot z_{kl}) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^W x_{ijk} \cdot t_k \leq L_i, \text{ for all } s_i \in S \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^W x_{ijk} \leq 1, \forall s_i \in S, k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{d_j \in C_l} x_{ijk} \geq z_{kl}, l = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K t_k \geq T_0 \quad (5)$$

$$\text{where } x_{ijk} = 0, 1 (x_{ijk} = 1 \text{ iff } s_i \in D_k) \quad (6)$$

$$z_{jk} = 0, 1 (z_{jk} = 1 \text{ iff } D_k \text{ covers } r_k) \quad (7)$$

5 关于 MBCLC 问题的算法

在这一部分,我们对 MCBLC 问题提出两个有效的启发式算法。

T_i 表示在迭代过程中传感器 s_i 的剩余时间. 设置每个覆盖集合的工作时间 l_0 . 我们用首先构造 T_0/l_0 个空的集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{\lceil T_0/l_0 \rceil}\}$, 其中 T_0 是所要求的网络生命时间限制. 为了描述上的方便, 定义一个方向的有效覆盖如下: 如果方向 d_{ij} 能覆盖 p 个目标, 其中 q_k 个已经被第 k 个可行覆盖集合所覆盖, 那么方向 d_{ij} 相对于第 k 个可行覆盖集的有效覆盖为 $EC(i, j, k) = p - q_k$. 算法的基本思想是找到一个方向 $d_{i^*j^*}$ 和一个可行覆盖集 C_{k^*} 使得 $EC(i^*, j^*, k^*)$ 在所有的 $EC(i, j, k)$ 取得最大值. MCBLC-G 算法表示如下:

关于 MCBLC 问题的 MCBLC-G 算法

输入: 传感器集合 S , 目标集合 R , S 和 R 之间的覆盖关系. 所要求的网络生命时间约束 T_0 .

输出: 满足生命时间约束的调度.

for $i = 1$ to $\lceil T_0/l_0 \rceil$,

$C_i = \emptyset$

for $i = 1$ to n /* 为每个传感器初始化生命时间为 $T_i^* /$

$T_i = L_i$

Let $S^1 = \{s_i \in S \mid T_i > l_0\}$

while $S^1 \neq \emptyset$

找到 S^1 中一个传感器 s_{i^*} 的方向 $d_{i^*j^*}$ 和一个可行覆盖集 C_{k^*} 使得 $EC(i^*, j^*, k^*)$ 在所有的 $EC(i, j, k)$ 取得最大值.

$C_{k^*} = C_k \cup d_{i^*j^*}$

$T_i^* = T_i^* - l_0$

if $T_i^* < l_0$ then $S^1 = S^1 \setminus \{s_{i^*}\}$

return C

在算法 MCBLC-G 中, 每次我们选择一个具有最大 $EC(i^*, j^*, k^*)$ 的方向. 事实上我们可以利用另一个贪婪函数 $T_i \times EC(i, j, k)$ 来选择一个方向, 其中 T_i 第 i 个传感器的剩余时间, 这样我们得到了另一个启发式算法称之为 MCBLC-G-1.

6 关于 MLCBC 问题的算法

在这一部分, 基于上述算法, 利用二分搜索技术给出 MLCBC 问题的一个算法.

MLCBC 问题最优的网络生命时间在 0 和 $\sum_{i=1}^N L_i$ 之间. 因此, 我们可以利用二分搜索技术来设计算法. 具体地说, 我们首先猜测给定 MLCBC 问题最优的 TL 为上界和下界之间的中点. 然后我们解决生命时间满足猜测值 TL 约束的 MCBLC 问题, 查看算法所得结果的覆盖间隙率. 根据所得的覆盖间隙率与 MLCBC 问题中要求满足的覆盖间隙率之间的关系, 修改上界和下界. 重复以上过程直到上界和下界之间的差距满足所需精度. 该算法具体描述如下:

MLCBC 问题的二分搜索算法

输入: 传感器集合 S , 目标集合 R , S 和 R 之间的覆盖关系, 所要求的覆盖间隙率 α .

输出: 满足覆盖间隙率的调度.

$LB = 0$ /* 初始化为 TL 的下界 */

$UB = \sum_{i=1}^N L_i$ /* 初始化为 TL 的上界 */

$C = \emptyset$ /* 初始化调度为空集 */

while $UB - LB \geq \varepsilon$

$T_0 = \frac{UB + LB}{2}$

通过算法 MCBLC-G (or MCBLC-G-1) 解决总的生命时间满足 T_0 约束的 MCBLC 问题.

假设 β 是 MCBLC-G (or MCBLC-G-1) 算法所得的覆盖间隙率.

if $\beta < \alpha$ then

$LB = T_0$

更新 C 为 MCBLC-G 的输出调度.

else $UB = T_0$

return LB and C

我们将上述利用 MCBLC-G (G-1) 得到的关于 MLCBC 问题的算法相应地称为 MLCBC-G (G-1).

7 模拟

在模拟中, N 个具有感应半径为 r 的传感器和 M 个目标均匀的分布在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的平面区域内. 每个传感器具有 W 个方向. 在所有的模拟环境中, 默认的参数如下: $N = 50$, $M = 10$, $T_0 = 50$, $W = 4$, 所有传感器生命时间初始为 0 到 10 之间的随机数, 覆盖间隙率 $BR = 0.01$.

7.1 算法 MCBLC-G 和 MCBLC-G-1 的模拟结果

图 1 显示了覆盖间隙率 (BR) 和网络中传感器个数之间的关系. 随着网络中传感器个数的增加, 覆盖间隙率变小, 这是因为传感器个数增加, 更多的传感器可用于覆盖. 从图中可以看出, 在某些时候 MCBLC-G-1 比 MCBLC-G 具有更低的覆盖间隙率.

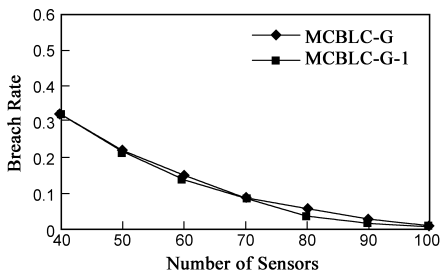


图1 传感器个数对覆盖间隙的影响效果

为了研究传感器感应半径对网络覆盖间隙率的影响,设置传感器的感应半径从 30 递增到 80,步长为 10.从图 2 中可以得知,传感器的感应半径越大,覆盖间隙率越小.因为随着感应半径的增大,每个传感器能覆盖更多的目标.

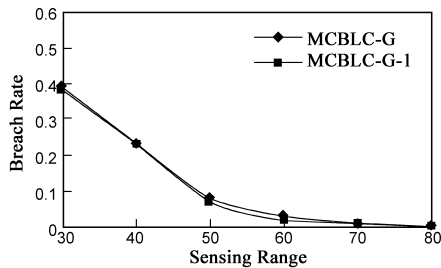


图2 传感器感应半径对覆盖间隙的影响效果

7.2 算法 MLCBC-G 和 MLCBC-G-1 的模拟结果

在模拟实验中,利用网络总的生命时间(TL)作为算法性能度量标准.图 3 显示了网络生命时间和网络中传感器网络个数之间的关系.随着网络中传感器个数的增加,网络的生命得到很大程度的延长.

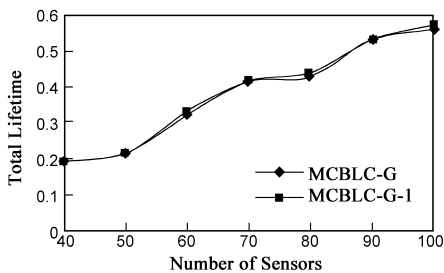


图3 传感器个数对生命时间的影响效果

图 4 表明了传感器感应半径和网络生命时间的关系.网络生命时间随着感应半径的增加而得到延长,因为,感应半径越大,更多的目标能够被一个传感器覆盖.

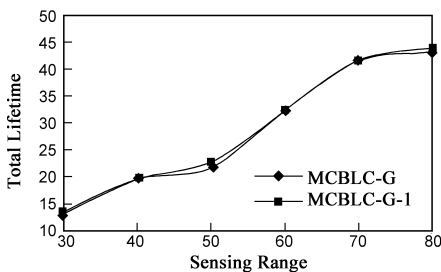


图4 传感器感应半径对生命时间的影响效果

8 结论和未来工作

本文研究了定向传感器网络中的覆盖间隙问题:MCBLC 问题和 MLCBC 问题,首先证明了它们都是 NP-hard 的.然后分别提出了启发式算法.模拟实验验证了所提出的算法的性能.本文中提出的算法都是集中式的,由于集中式算法的诸多限制,在未来工作中,我们将致力于寻找性能良好的分布式算法.

参考文献:

- [1] I Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam, E Cayirci. A survey on sensor networks [M]. IEEE Communications Magazine, 2002. 102 - 114.
- [2] 陈志,王汝传,等.无线传感器网络的自组织机制研究[J].电子学报,2007.35(5):854 - 857.
Chen Zhi, Wang Ru-chuan, Sun Li-juan. Study on self-organization mechanism of wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2007 35(5):854 - 857. (in Chinese)
- [3] D Tian, ND Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[A]. Proc of the ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications[C]. Georgia, USA: ACM press, 2002. 32 - 41.
- [4] X Wang, G Xing, Y Zhang, C Lu, R Pless, C Gill. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks[A]. Proc of the ICENSS [C]. California, USA: IEEE press, 2003. 28 - 39.
- [5] H Zhang, JC Hou. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1 - 2): 89 - 124.
- [6] M Cardei, D-Z Du. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization [J]. ACM Wireless Networks, 2005, 11(3): 333 - 340.
- [7] M Cardei, M-T Thai, Y Li, W Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks[A]. Proc of the IEEE INFOCOM[C]. Miami, USA: IEEE press 2005. 1976 - 1984.
- [8] H Liu, P Wan, C Yi, X Jia, et al. Maximal lifetime scheduling in sensor surveillance networks. Proc of the IEEE INFOCOM [C]. Miami, USA: IEEE press 2005. 2482 - 2491.
- [9] P Berman, G Calinescu, C Shah, A Zelikovsky. Power efficient monitoring management in sensor networks[A], Atlanta Proc of the WCNC[C]. Georgia, USA: IEEE press, 2004, 4: 2329 - 2334.
- [10] Y Cai, W Lou, M Li, X-Y Li. Target-oriented scheduling in directional sensor Networks[A]. Proc of the IEEE INFOCOM [C]. Alaska, USA: IEEE press, 2007. 1550 - 1558.
- [11] C Wang, M Thai, Y Li, F Wang, et al. Minimum coverage breach and maximum network lifetime in wireless sensor networks[A]. Proc of the IEEE GLOBECOM[C]. Washington, USA: IEEE press 2007.

作者简介:



杨辉强 男,1985 年生于安徽黄山.2007 年毕业于安徽大学信息与计算科学系.现为中国人民大学信息学院研究生.主要研究方向为无线传感器网络等.

E-mail: yhqruc@gmail.com



李德英(通信作者) 女,教授、博士生导师.1965 年出生于湖北.1985 年、1988 年分别在华中师范大学获得理学学士、硕士学位.2004 年于香港城市大学计算机科学系获得博士学位.现为中国人民大学计算机科学系教授,主要研究方向为无线传感器与自组织网络、无线 Mesh 网络、算法设计与分析等.

E-mail: deyingli@ruc.edu.cn