

一种带宽约束的无线传感器网络节点调度算法^①

匡林爱^{②*} 蔡自兴^{*③}

(* 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

(** 湘潭大学信息工程学院 湘潭 411105)

摘要 研究了无线传感器网络在带宽受限时怎样最小化覆盖裂口,同时最大化网络生命期的问题。将带宽限制理解为活动节点的活动邻居数限制,且认为由于带宽约束,当需要的带宽大于实际能提供的带宽时,覆盖裂口就可能发生。进而提出了一种最小覆盖裂口的混合整数规划模型,并提出了一种求解此问题的启发式算法,同时也研究了带宽和节点数对网络覆盖的影响。仿真实验表明,增加节点数可延长网络的生命期,增加带宽可减少裂口的发生,这与理论分析的结果是一致的。

关键词 无线传感器网络(WSN), 算法, 整数规划, 问题求解, 带宽, 能量保护

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是由许多以电池供电,具有感测、计算和无线通信能力的传感器节点组成的网络^[1]。由于 WSN 的节点是电池供电的,所以它的一个关键问题是能量效率,因此节省能量,延长 WSN 的生命期在设计大规模 WSN 时非常重要。

WSN 应用中存在一个非常重要的覆盖问题,覆盖问题的最终目标是被监测对象在任何时刻都至少有一个节点监测它^[2]。一个随机部署的 WSN,为保证覆盖度,部署的节点数通常多于目标数,因此,一些目标将被冗余覆盖。为延长网络生命期,一种潜在的方法是使用不相交覆盖,如文献[3-6],节点被组织成互斥的子集,每个子集都可在活动状态和睡眠状态间切换,在任何时刻,有且仅有一个子集是活动的,并且活动子集能覆盖所有目标。当节点被组织成互斥子集时,WSN 的生命期就与能构建的子集数密切相关,通过最大化构建子集个数,WSN 的生命期能有效延长。此外,由于电池的放电特性,节点在活动状态和睡眠状态间切换也能延长电池的生命期^[7]。然而,上述方法都没有考虑到通信带宽的问题。带宽在文献[8]中被定义为“单通道上使用时分复用方案中的时间片段总数,或多通道方案中的可用通道总数”。本文也采用此定义。WSN 的最终目

的是及时提供所有感测数据给观测者(通常在基站),为确保数据能及时传送给基站,一个重要的需求就是要有足够的带宽。在文献[8]中,作者考虑的是每个节点能直接将感测数据发送给基站的情形,因此,带宽限制被理解成同时活动的节点数限制,然而,在大部分的 WSN 应用中,节点与基站的通信一般以多跳方式实现,因此,本文将活动节点的活动邻居数限制看成带宽限制,研究了 WSN 在一跳邻居数受限时的最小覆盖裂口问题(minimum coverage breach under neighbors constraint, MCBN),并形式化描述了 MCBN 问题,提出了一个求解 MCBN 问题的混合整数规划模型和解决 MCBN 问题的一种启发式算法。

1 相关研究

通过选择不相交子集的方法来解决 WSN 的覆盖问题有了很多的研究成果。文献[3]研究了在 WSN 中寻找最大覆盖集问题,并证明了此问题是 NP-完全问题;文献[4]尝试使用集中式算法解此问题,但需要许多节点处于活跃状态;文献[5]提出了一种分布式最优地理密度控制(optimal geographical density control, OGDC)算法,并证明了当通信半径至少是感测半径的 2 倍时,完全覆盖意味着连通;文献[6]使用了遗传算法技术,提出了一种基于 II 型非劣排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algo-

① 国家自然科学基金(90820302)资助项目。

② 男,1974 年生,硕士,讲师;研究方向:人工智能,无线传感器网络, E-mail: lin_ai@163.com; kla@xtu.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: zxczai@mail.csu.edu.cn

(收稿日期:2009-03-06)

gorithm II, NSGA-II) 的改进的搜索算法来选择最优覆盖集; 文献[9]通过引入市场竞争来研究 WSN 的覆盖问题。

在需要多跳通信的网络中, 在基站周围的节点由于转发外围节点的数据将更快地消耗能量。对于随机均匀部署的 WSN 来说, 网络的生命期将主要由基站周围的节点生命决定。文献[10, 11]研究了节点怎样部署才能达到延长网络生命期的目的, 这是研究延长网络生命期的另一个方向。

尽管对 WSN 覆盖问题进行了广泛的研究, 但很多研究在组织节点子集时并没有考虑带宽约束。据我们所知, 第一次考虑此问题的是文献[8], 作者将带宽受限最小裂口问题建模成整数规划问题, 节点被组织成不相交的子集, 每个子集的节点数小于等于带宽数, 子集的个数等于 n/W (n 表示节点数, W 表示带宽), 当 n 不能被 W 整除时, 则向上取整或向下取整, 并提出了两种启发式算法——松弛法 RELAXATION 和最小裂口法 MINBREACH, 然而, 由于子集数固定, 网络的生命期也是固定的, 并且, 不相交约束并不能获得最小覆盖裂口, 如文献[12]所述, 有 3 个传感器 $\{s_1, s_2, s_3\}$, 3 个目标 $\{o_1, o_2, o_3\}$, 其中, s_1 覆盖 $\{o_1, o_2\}$, s_2 覆盖 $\{o_2, o_3\}$, s_3 覆盖 $\{o_1, o_3\}$, 假设带宽约束 $W = 2$, 网络的最小生命期 $T_0 = 1.5$, 一个最优的不相交子集方案是 $\{s_1, s_2\}$ 活动 1 单位时间, 然后 $\{s_3\}$ 活动 0.5 单位时间, 这种情况下的裂口率为 $\frac{0.5 \times 1}{3 \times 1.5} \approx 11.1\%$ 。然而, 如果使用相交子集 $\{\{s_1, s_2\}, \{s_2, s_3\}, \{s_1, s_3\}\}$, 每个子集活动 0.5 单位时间, $T_0 = 1.5$ 条件依然满足, 但裂口率却为 0。基于此种情况, 文献[12]对文献[8]进行了改进, 通过松弛不相交约束, 不仅在相同的网络生命期条件下可以获得更小的覆盖裂口率, 而且也能平衡覆盖裂口率和网络生命期, 这对许多应用来说是非常重要的。

然而, 上述考虑带宽限制的子集选择算法也仅仅是考虑节点能直接和基站通信的情况, 带宽限制被看成子集的节点数限制, 但对于需要通过中间节点转发通信的情况, 带宽就不能看成子集的节点数了, 而应该看成能和节点直接通信的邻居数, 也就是一跳邻居数了。

2 问题描述

在这节中, 我们给出在一跳邻居数约束下的最

小覆盖裂口问题的形式定义和求解此问题的一种启发式方法。假设由 n 个节点 $s_i (i = 1, \dots, n)$ 组成的无线传感器网络, 覆盖 m 个目标 $o_k (k = 1, \dots, m)$, 所有节点都拥有相同的初始能量, 设单位能量为 1, 用活动时长来表示能量消耗, 即节点可以活动一个单位时长。

定义 1^[12]: 一组由 $(S_j, t_j) (j = 1, \dots, p)$ 组成的序偶集称为调度, 其中 S_j 表示节点集 $\{s_i, i = 1, \dots, n\}$ 的一个非空子集, t_j 表示 S_j 的持续活动时长。所有 t_j 的累计称为一个调度的总寿命 (total lifetime, TL), $TL = \sum_{j=1}^p t_j$ 。

定义 2^[12]: 给定一个调度, 则所有未覆盖目标的时长累计称为总覆盖裂口 (total coverage breach, TCB), $TCB = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^m (t_j - t_j \times z_{jk})$, 其中, 当 S_j 中至少有一个节点覆盖目标 o_k 时 $z_{jk} = 1$, 否则 $z_{jk} = 0$ 。将总覆盖裂口与总寿命的比在所有目标间平均后的结果称为裂口率 (breach rate, BR), $BR = \frac{TCB}{m \cdot TL}$ 。

定义 3: MCBN(W, T_0) 问题。 给定一个由 n 个节点 $s_i (i = 1, \dots, n)$ 组成的 WSN 和 m 个目标, 找一个调度 $(S_j, t_j) (j = 1, \dots, p)$, 使得在满足总寿命至少为 T_0 时, 总覆盖裂口最小, 并且, 每个节点 $s_i (i = 1, \dots, n)$ 在 $S_1, \dots, S_p$ 中出现的时长累计最多为 1, 在每个 $S_j (j = 1, \dots, p)$ 中, 它的一跳邻居数 $\leq W$, 即带宽约束为 W 。

2.1 MCBN 问题的混合整数规划表示

给定由 n 个节点组成的集合 $S, S = \{s_1, \dots, s_n\}$, m 个目标组成的集合 $O, O = \{o_1, \dots, o_m\}$, 对每个目标 o_k , 定义 $C_k = \{i \mid s_i \text{ 覆盖目标 } o_k\}$, $M_i = s_i$ 覆盖的目标数, $N_{ij} = \{s_k \mid s_k \text{ 能和 } s_i \text{ 直接通信}, s_i, s_k \in S_j, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, p, |N_{ij}| \text{ 表示 } N_{ij} \text{ 包含的节点数}。x_{ij} = \begin{cases} 1 & s_i \in S_j \\ 0 & s_i \notin S_j \end{cases}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, p, t_j \in (0, 1) \text{ 表示分配给 } S_j \text{ 的时长}。$

形式化此问题如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^m (t_j - t_j \cdot z_{jk}) \\ \text{s. t.} & \sum_{j=1}^p x_{ij} \cdot t_j \leq 1, \quad \forall s_i \in S \\ & \sum_{i \in C_k} x_{ij} \geq z_{jk}, \quad \forall o_k \in O, j = 1, \dots, p \\ & |N_{ij}| \leq W, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, p \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^p t_i \geq T_0$$

这里 $x_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, p$
 $z_{jk} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, p, k = 1, \dots, m$
 $0 \leq t_j \leq 1$

第一个约束条件确保每个节点所有分配的活动时长累计不超过它的总生命期。

第二个约束条件暗示当 $z_{jk} = 1$ 时每个目标 o_k 至少被 S_j 的一个节点覆盖,当 $z_{jk} = 0$ 时意味着裂口发生。

第三个条件是带宽约束条件,也即在当前子集中节点的一跳邻居数不超过带宽限制。

第四个条件是总生命期约束条件,它确保网络的总生命期至少为 T_0 。

显然,这是一个混合整数规划问题,是一个 NP-完全问题,求解此问题可以先松弛相关条件变成线性规划问题,然后再求解。

2.2 MCBN 的启发式算法

对上述混合整数规划问题进行求解至少需要 $O(n^3)$ 运行时间,对大规模无线传感器网络来说,这是不可负担的^[12]。为解决这个难点,本文提出了一种快速贪婪式启发算法 GMCBN,此算法适用于有一定覆盖冗余度的通信需要经过转发实现的无线传感器网络。

为了公平地让每个节点在组织子集时都有选中的机会,GMCBN 算法预设了一个时间粒度 l_0 ,它表示每个活动子集的活动时长,节点的已活动时长越长,其被选中的优先级越低。相应地,我们设置总的活动次数 $p = T_0/l_0$ 。

在组织节点子集时,既可以优先考虑剩余能量,也可以优先考虑节点的覆盖目标数,或者同时考虑,本文中用参数 α 来表示剩余能量的重要程度, $1 - \alpha$ 来表示节点覆盖目标数的重要程度。当 $\alpha = 0.5$ 时,表示剩余能量和覆盖数同等重要。由于剩余能量和节点覆盖数不是一个量级,因此,需要先对它们分别做归一化处理。

算法描述如下:

(1) 初始化每个节点的生命期为 1,时长累积为 0;

(2) 设置每个节点的已处理标志为 0,每个目标的已覆盖标志为 0;

(3) 选择覆盖目标数和剩余能量这两项指标最优的节点,判断是否破坏已选节点的带宽限制,如果是,转(5),否则转(4);

(4) 选取此节点,设置被覆盖目标的已覆盖标志为 1;

(5) 设置此节点的已处理标志为 1;

(6) 判断是否还有节点未处理或有目标未覆盖,如果有,转(3);

(7) 更新时长累积,更新选取节点的剩余能量;

(8) 时长累积是否达到要求,如果没有,转(2);

(9) 结束。

算法伪代码如下:

l_0 = 时长粒度值

$T_i = 1, i = 1, \dots, n$

$t = 0$

$j = 1$

while $t < T_0$

$SC_j = \emptyset$

$q_i = 0, i = 1, \dots, n$

$u_k = 0, k = 1, \dots, m$

$TM_i = M_i, i = 1, \dots, n$

while $\exists q_i = 0$ and $\exists u_k = 0$

$$r = \text{index of } \max \left(\alpha \cdot \frac{T_i}{\sum_{q_i=0} T_i} + (1 - \alpha) \cdot \frac{TM_i}{\sum_{q_i=0} TM_i} \right)$$

$q_r = 1 \quad \text{if } |N_{N_j}| \leq W$

if $\sum_{i=1}^n T_i \geq T_0 - t$

$SC_j = SC_j \cup \{s_r\}$

Update $u_k, k = 1, \dots, m$

Update $TM_i, i = 1, \dots, n$

endif

endif

endwhile

$t = t + l_0$

Update $T_i, s_i \in SC_j$

Output SC_j

$j = j + 1$

endwhile

3 试验

在这节中,我们用裂口率作为衡量标准评估了 GMCBN 的性能,同时也和文献[12]提出的 GMSC (greedy maximal set covers) 算法进行了比较。仿真过程中,传感器和目标都均匀随机部署在 $100\text{m} \times 100\text{m}$

的区域内,对算法的评估过程中,主要考察带宽和传感器节点数对算法性能的影响。

我们仿真了 3 种不同的场景,图 1 至图 4 显示了 GMCBN 算法和 GMSC 算法的比较结果,仿真中的缺省参数 $n = 70, m = 40, W = 4, R_s = 25, R_c = 50$,

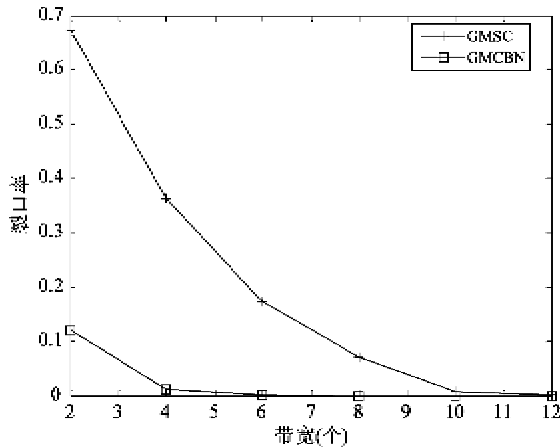


图 1 带宽对裂口率的影响图

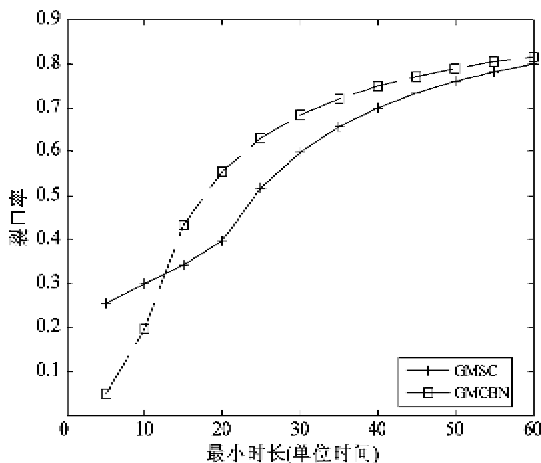


图 2 最小时长对裂口率的影响图

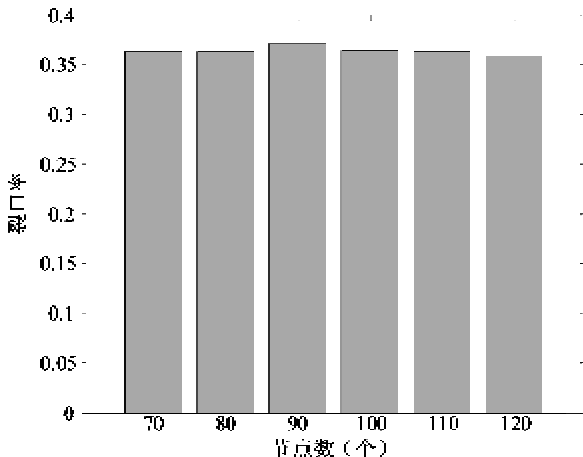


图 3 节点数对 GMSC 裂口率的影响图

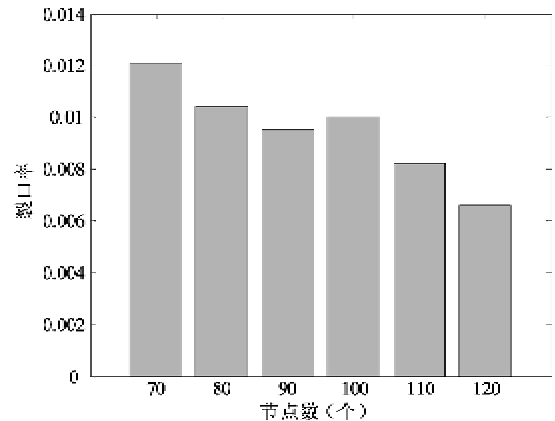


图 4 节点数对 GMCBN 裂口率的影响图

参照文献[13],本文也用第一个耗尽能量节点的生命期作为衡量整个网络系统生命期的标准 T_0 。

图 1 表示的是在不同带宽下的裂口率,带宽从 2 增加到 12,每次递增 2,可以看出,裂口率随带宽的增加而降低,它说明带宽是影响网络覆盖性能的一个重要因素,当带宽增加到一定程度后,裂口率可以等于零,这是因为随带宽的增加,在 GMSC 算法中,子集中的节点数会越来越多,在 GMCBN 算法中,同时参与的邻居数也越来越多。由于 GMCBN 算法参与的节点数比 GMSC 算法多,和模型预测的一样, GMCBN 算法比 GMSC 获得了更小的裂口率。

图 2 显示了不同最小时长约束对裂口率的影响,可以看出,裂口率随最小时长的增加而增加,说明牺牲覆盖性能可以延长网络的生命期。在某个时间内, GMCBN 算法的裂口率比 GMSC 算法要小,据观察,此时长与节点的覆盖冗余度有关,在试验中, 50 次试验的平均冗余覆盖度为 8.216,可以计算出此时长为 14.378,在这个时间内,节点都是冗余覆盖的,但超过此时长约束后,不管怎样组织节点子集,必定有目标不能被覆盖。

为了研究在带宽约束下增加节点数对裂口率的影响,将节点数从 70 增加到 120,每次增加 10 个,从图 3 可以看成,增加节点数对 GMSC 影响很小,这是因为在 GMSC 算法中,每个子集的节点数受带宽限制,每次参与的节点最大数是固定的,裂口率只与节点的覆盖目标数有关,但对 GMCBN 算法影响非常大。从图 4 可以看出,随节点数的增加,裂口率下降,这是因为,增加节点数,也就意味邻居数增加,因此覆盖的目标数也将增加。

总之,仿真结果显示,有限带宽极大地影响着网络覆盖性能与网络生命期,为平衡这两个目标,仿真结果给出了在不同应用中优化配置的一些有用的建

议,将带宽理解为一跳邻居数限制更符合现实的应用环境。

4 结 论

WSN 的能量和带宽有限的,因此,可以通过最优组织节点以实现最大化网络生命期和最小化覆盖裂口。本文研究了在带宽受限约束下最小覆盖裂口问题,本文的方法是将节点组织成子集,但不要求子集的互斥,只要求每个子集中节点的一跳邻居数满足约束条件,从而提出了一种贪婪启发式算法 GM-CBN。仿真实验表明,在带宽限制相同时,GM-CBN 算法的裂口率低于 GMSC 算法的裂口率。在节点覆盖有冗余时,在相同最小时长约束下,GM-CBN 算法的裂口率低于 GMSC 的裂口率,但如果节点没有覆盖冗余,GM-CBN 算法的裂口率略高于 GMSC 的裂口率。增加节点数不会明显影响 GMSC 的裂口率,但 GM-CBN 算法的裂口率会明显减小。由于生物计算方法的优越性,将生物计算方法引入到节点集的选择将是我们下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] Pottie G J, Kaiser W J. Wireless sensor networks. *Communications of the ACM*, 2000,43(5): 51-58
- [2] Ghosh A, Das S K. Review: Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: A survey. *Pervasive and Mobile Computing*, 2008,4(3): 303-334
- [3] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. In: Proceedings of the IEEE Conference on Communications, Helsinki, Finland, 2001. 472-476
- [4] Tian D, Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, New York, USA, 2002. 32-41
- [5] Zhang H H, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks*, 2005,1(2): 89-124
- [6] Jia J, Chen J, Chang G R, et al. Efficient cover set selection in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2008,34(9): 1157-1162
- [7] Benini L, Castelli G, Macii A, et al. A discrete-time battery model for high-level power estimation. In: Proceedings of Conference on Design, Automation and Test in Europe, Paris, France, 2000. 35-39
- [8] Cheng M X, Ruan L, Wu W L. Achieving minimum coverage breach under bandwidth constraints in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 24th IEEE Conference on Computer Communications, Miami, USA, 2005. 2638-2645
- [9] Peng L, Wang D S, Zhao L. An algorithm based on market competition for wireless sensor network connectivity and coverage. In: Proceedings of International Conference on Information and Automation 2008, Piscataway, NJ, USA, 2008. 379-383
- [10] Wang D M, Xie B, Agrawal D P. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with Gaussian distribution. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008,7(12): 1444-1458
- [11] Zhang Z J. Analysis of distribution uniformity of nodes in wireless sensor networks. *High Technology Letters*, 2007,13(1): 65-68
- [12] Wang C, Thai M T, Li Y S, et al. Minimum coverage breach and maximum network lifetime in wireless sensor networks. In: Proceedings of Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07), Washington D. C., USA, 2007. 1118-1123
- [13] Wang D, Liu J C, Zhang Q. Mobility-assisted sensor networking for field coverage. In: Proceedings of Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07), Washington D. C., USA, 2007. 1190-1194

A coverage-preserving node scheduling scheme under bandwidth constraints for wireless sensor networks

Kuang Linai^{* **}, Cai Zixing^{*}

(^{*} College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(^{**} College of Information and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

Abstract

This paper addresses the problem that how wireless sensor networks under bandwidth constraints minimize the coverage breach and maximize the lifetime. The paper regards the number of activity neighbors of an activity node as bandwidth constraints, and suggests that with the limited bandwidth, a coverage breach can occur if the number of activity neighbors is less than the actual requirement, and then presents the minimum breach problem by using a mixed integer-programming model and provides a heuristic algorithm for the problem. The effects of increasing the number of activity neighbors and increasing the number of sensors on sensor network coverage are studied through numerical simulations. The simulation results reveal that as the number of sensors increases, network lifetimes can be improved, and the coverage breach decreases as the bandwidths increasing, which coincides with the theoretical analysis very well.

Key words: wireless sensor network (WSN), algorithm, integer programming, problem solving, bandwidth, energy conservation