

密集传感器网络中节点随机调度算法研究

吴晓培, 吴跃, 陈湘

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

【摘要】对于密集型传感器网络, 节点交替工作能有效地延长网络的生命周期。该文基于Cover的随机节点调度算法进行深入分析, 首先给出 k -覆盖网络中覆盖强度的定义, 并利用基本概率理论估计 k -覆盖网络的覆盖强度; 然后分析2-覆盖网络中节点密度、覆盖强度以及能量节省水平之间的关系(即部署节点个数 n 和2-覆盖网络的覆盖强度 C_n^2 以及划分COVER个数 c)。该文研究工作对部署容错性较高的能量有效性传感器网络具有一定的指导意义。

关键词 容错性; k -覆盖网络; 节点随机调度; 无线传感器网络

中图分类号 TP393

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.027

Node Scheduling Algorithm for Dense Wireless Sensor Networks

WU Xiao-pei, WU Yue, and CHEN Xiang

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract For dense wireless sensor networks (WSN), nodes working staggerly is one efficient approach of extending network's lifetime. An analysis of random sensor scheduling algorithm based on COVER is conducted in this paper. The definition of coverage intensity in k -coverage network is presented and its corresponding formula is estimated using elementary probability theory. A precise analysis about 2-coverage network and a mathematical relationship among coverage intensity, node density and the level of energy conserving (i.e., the number of deploying nodes n , the coverage intensity of 2-coverage network C_n^2 , and the number of divided Cover c) are proposed. The result can be applied to deploy an energy-efficiency WSN possessing of high fault-tolerant performance.

Key words fault-tolerance; k -coverage networks; random node scheduling; wireless sensor networks

对于能量紧俏的无线传感器网络(WSN), 在保证一定QoS覆盖或连通的前提下, 延长网络的生命周期是传感器网络研究的首要问题。基于活动/睡眠机制的节点调度算法, 能够有效地延长网络的生命周期。目前节点调度算法都假设节点具有活动(ACTIVE)和睡眠(SLEEP)两种状态, 且节点部署密度大, 使部分节点处于活动状态, 可保证原有的QoS覆盖成为可能。节点调度算法可以分为自组织调度^[3-6]算法和基于COVER的调度^[1-2,8]算法。自组织调度算法中, 节点根据严格的几何知识计算节点的覆盖区域是否被邻居节点覆盖(即是否处于冗余状态), 若被邻居节点完全覆盖, 则该节点处于冗余状态, 并通过广播机制通知邻居自己为SLEEP状态, 之后转入节能的SLEEP状态, 睡眠一定时间唤醒自己进入ACTIVE状态, 再通告其邻居节点, 使所有邻居节点根据自身的活动邻居节点重新判断其是否为冗余状

态。该算法为避免节点同时检测自己处于冗余状态而同时转入SLEEP状态产生盲点, 采用基于时钟的回退机制, 并根据节点的能量剩余级别, 选择回退时钟, 有效地解决了负载均衡问题。

基于COVER的随机节点调度算法(随机节点COVER调度算法)在网络初始化时刻, 将网络中所有节点划分为多个互不相交的工作集合。由于WSN的主要任务是检测目标区域, 要求形成的每个工作集合覆盖整个区域, 因此该工作集合可以形象地看作一个盖子(COVER), 每个COVER交替工作, 达到延长网络生命周期的目的。显然, 在一定的网络密度下, COVER个数越多, 每个节点的睡眠时间就越长, 消耗的能量就越少, 网络的生命周期就越长。因此, COVER的个数能反映能量节省水平。该类算法只需在网络初始化阶段执行一次。

文献[1]分别给出了随机Cover算法、分布式贪心

Cover算法和集中式Cover算法。文献[7]利用一种启发式算法构造最小控制集合(minimum dominating set, MDS),使形成的集合交替工作。但是构造MDS需要全局网络信息,不适应大规模网络。由于受环境的影响,节点在任何时刻都可能失效。为了提高网络的容错性,文献[7-8]提出了保证 k -覆盖的节点调度算法。文献[8]指出保证 k -覆盖节点调度是NP难题,并提出自适应方法。文献[7]和文献[8]两者都基于文献[9]的 k -边界覆盖,即节点感应边界上的节点至少被 k 个节点覆盖,若网络中所有节点都为 k -边界覆盖,则网络为 k -覆盖网络。计算节点是否为 k -边界覆盖需精确的地理位置信息,虽然通过在节点内部安装GPS可以获得精确的地理位置信息,但是能量开销非常大,对能量有限的传感器节点来说是一个巨大的挑战。

随机调度算法实现简单、计算开销小、无需通信开销和地理位置信息,符合WSN设计目标。但是由于其随机性,形成的交替工作COVER不能满足期望的(比如覆盖、连通)Qos。

本文对随机节点COVER调度算法进行研究,给出了 k -覆盖网络的覆盖强度。一般情况下,监测区域内任意一点若被2个节点覆盖,即可满足大部分应用的容错要求。

1 相关定义

本文中的符号及涵义如表1所示。

表1 用到的符号及其涵义

符号	涵义
A	感应区域的面积
n	检测区域中部署节点的个数
T	检测时间
c	网络不相交COVER的个数
$C_i(1 \leq i \leq c)$	属于第 i 个COVER节点的集合
k	期望的覆盖度
r	节点的感应半径
s	覆盖感应区域内一定点节点的个数
S	覆盖感应区域内一定点节点的集合
$S_i(1 \leq i \leq c)$	$S_i \subseteq C_i(\cup S_i = S, 1 \leq i \leq c)$ 覆盖一给定点的节点集合
$A_i(1 \leq i \leq c)$	在 $C_i(1 \leq i \leq c)$ 中,对于一定点, 不能使该点满足 k -覆盖点的事件

k -覆盖点:给定一点 p ,在任何时刻,至少被 k 个活动节点覆盖,则称该点是 k -覆盖点。

k -覆盖网络:网络中任意一点 p ,在任何时刻至少被 k 个活动节点覆盖,则称该网络为 k -覆盖网络。

k -覆盖点的覆盖强度(C_p^k):给定一点 p ,其覆盖强度为 $C_p^k = \frac{T_k}{T}$,其中 T_k 表示点 p 至少被 k 个活动节点覆盖的时间, T 表示整个检测时间。

k -覆盖网络的覆盖强度(C_n^k): C_p^k 的数学期望值,且 $C_n^k = E(C_p^k)$ 。

2 随机节点COVER调度算法

网络中的任意节点,在网络初始化时期随机产生一个 $1 \sim c$ 的随机数 i ,并将自己分配给第 i 个COVER,最终形成 c 个交替工作的COVER。假设随机算法执行时间开销为 T_{int} 、当前时钟为 $T_{current}$,则当前工作的COVER为 $COVER_{C_i}$,其中 $i = (T_{current} - T_{int}) \times MOD_c + 1$ 。根据随机节点调度算法形成 c 个COVER沿时间轴 t 交替工作的状况如图1所示。

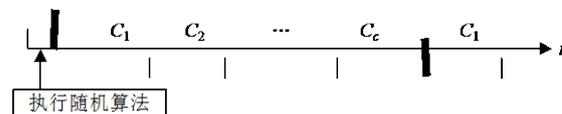


图1 随机调度算法工作示意图

随机节点COVER调度算法实现简单,无需通信开销,但是需要用户预先设定网络划分个数 c 。为了延长网络的生命周期,满足一定的Qos,希望划分的COVER尽可能多地。但是随机算法并没有指出划分COVER的个数 c 、部署节点数 n 、 k -覆盖网络的覆盖度 C_n^k 之间的关系。本文对随机节点COVER调度算法,以及 k -覆盖网络的覆盖强度作深入分析,着重指出2-覆盖网络中部署节点个数 n 与2-覆盖网络覆盖强度 C_n^2 、划分COVER个数 c 之间的关系。

3 随机节点COVER调度算法容错性分析

假设 n 个节点均匀分布在 A 区域内,每个节点具有相同的感应半径 r ,若任意点到一节点的欧式距离 $d < r$,则该点能够被该节点覆盖,并且随机调度算法所形成的 c 个COVER,满足:

$$(1) C_i \cap C_j = \emptyset, i \neq j, \text{ 并且 } 1 \leq i, j \leq c;$$

$$(2) \bigcup_{j=1}^c C_j \subseteq \text{所有节点}。$$

引理1 随机节点调度算法中:

$$C_n^k = 1 - \left(1 - \frac{q}{c}\right)^n \times$$

$$\left(1 + \frac{1}{(c-1)} + \frac{1}{(c-1)^2} + \dots + \frac{1}{(c-1)^{k-1}}\right)$$

式中 q 表示一定点被一节点覆盖(位于其感应区域

之内)的概率。

证明 由于节点均匀地分布在感应区域内, 则任意点被一个节点覆盖的概率为 $q = \frac{\pi r^2}{A}$ 。

假设覆盖区域内某一定点被 s 个节点覆盖, s 个节点随机地分布在 c 个 COVER 中, 并且每个节点归属不同 $C_i (1 \leq i \leq c)$ 的概率为 $\frac{1}{c}$, 对于 $\forall i (1 \leq i \leq c)$, 如果 $|S_i| < k$, 事件 A_i 发生, 则:

$$P(A_i) = \sum_{j=0}^{k-1} \left(\frac{1}{c}\right)^j \left(1 - \frac{1}{c}\right)^{s-j}$$

所以:

$$P(\bar{A}_i) = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} \left(\frac{1}{c}\right)^j \left(1 - \frac{1}{c}\right)^{s-j}$$

引入一个二值随机变量 $X_i (1 \leq i \leq c)$, 若 $|S_i| \geq k$,

则 $X_i = 1$, 否则 $X_i = 0$; 引入新的变量 $X = \sum_{i=1}^c X_i$ 表示满足该定点为 k -覆盖点的 COVER 的个数, 所以:

$$E(X) = \sum_{i=1}^c E(X_i) = c \left[1 - \sum_{j=0}^{k-1} \left(\frac{1}{c}\right)^j \left(1 - \frac{1}{c}\right)^{s-j} \right]$$

$$C_p^k = \frac{E(X) \cdot T}{c \cdot T} = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} \left(\frac{1}{c}\right)^j \left(1 - \frac{1}{c}\right)^{s-j}$$

式中 s 服从概率为 q 的贝努力分布, 即:

$$P(s = j) = \binom{n}{j} q^j (1 - q)^{n-j}$$

所以:

$$C_n^k = E(C_p^k) = E \left[1 - \sum_{j=0}^{k-1} \left(\frac{1}{c}\right)^j \left(1 - \frac{1}{c}\right)^{s-j} \right] = 1 - \left(1 - \frac{q}{c}\right)^n \left(1 + \frac{1}{(c-1)} + \frac{1}{(c-1)^2} + \dots + \frac{1}{(c-1)^{k-1}} \right)$$

当 $k=2$ 时, 即 $C_n^2 = 1 - \left(1 - \frac{q}{c}\right)^n \left(1 + \frac{1}{(c-1)} \right)$ 。

推论 1 已知网络划分个数 c , 若 C_n^2 至少为 t ,

网络中部署节点数 n 最少为 $\left\lceil \frac{\ln\left(\frac{1-t}{2}\right)}{\ln\left(1 - \frac{q}{c}\right)} \right\rceil$, 其中

$$q = \frac{\pi r^2}{A}$$

证明 根据引理1, 可知:

$$C_n^2 = 1 - \left(1 - \frac{q}{c}\right)^n \left(1 + \frac{1}{(c-1)} \right) \geq t$$

不妨设:

$$A = 1 - \left(1 - \frac{q}{c}\right)^n \left(1 + \frac{1}{(c-1)} \right)$$

$$B = 1 - \left(1 - \frac{q}{c}\right)^n \times 2$$

显然 $A \geq B$, 所以只要 B 满足 $B \geq t$, 则必然 $A \geq t$, 由 $B \geq t$, 则推出:

$$n \geq \left\lceil \frac{\ln\left(\frac{1-t}{2}\right)}{\ln\left(1 - \frac{q}{c}\right)} \right\rceil$$

假设 n 个节点均匀分布在一个 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 方形区域内, 并且每个节点的感应半径 $r = 50\text{ m}$ 。在 2-覆盖网络中, 当划分个数为 c 时, 在不同的覆盖强度 C_n^2 下, 部署节点数 n 的下限如图2所示。可以看出, 部署节点 n 的下限值随 C_n^2 的增加而增加; 同时对于一定的 C_n^2 , 其划分个数 c (能量节省水平) 与部署节点 n 成正比。

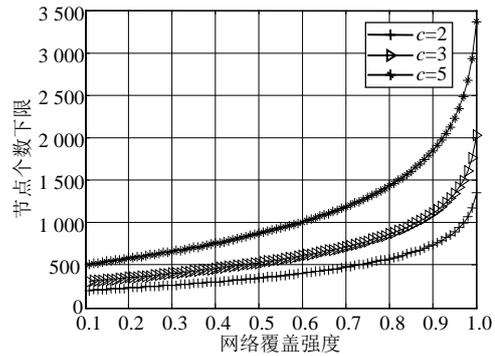


图2 覆盖强度 C_n^2 与部署节点 n 下限之间的关系

推论 2 已知部署节点的个数 n , 并且要求 C_n^2

至少为 t , 则网络划分个数 c 的上限为 $\left\lfloor \frac{q}{1 - e^{-\frac{\ln\left(\frac{1-t}{2}\right)}{n}}} \right\rfloor$,

其中 $q = \frac{\pi r^2}{A}$ 。

证明 根据推论1, 容易推出:

$$c \leq \left\lfloor \frac{q}{1 - e^{-\frac{\ln\left(\frac{1-t}{2}\right)}{n}}} \right\rfloor$$

当节点数为 n 、网络覆盖强度为 $C_n^2 = 95\%$ 时, 随机算法划分 COVER 个数 c 的上限之间的关系如图3所示。可以看出, 若在 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 的网络中部署 2 000 个节点时, 为了最大化地节省能量, 同时又

要保证一定的Qos(2-覆盖), 执行随机算法时, 可以将 c 至多设置为4。

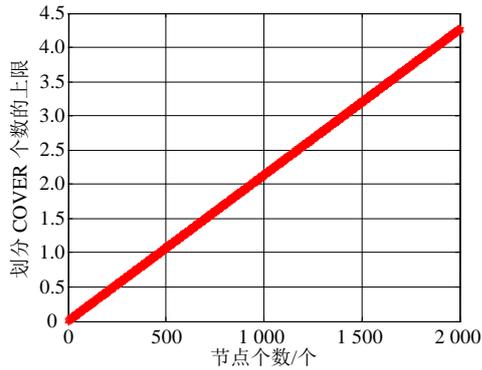


图3 覆盖强度 $C_n^2 = 95\%$ 时, 部署节点数 n 与划分个数 c 上限的关系

4 总 结

在文献[1]的基础上, 对随机节点调度的COVER算法做了深入的分析, 估计 k -coverage网络覆盖的覆盖强度 C_n^k , 并分别分析2-覆盖网络中, 随机算法划分COVER个数 c 、部署传感器节点 n 和 C_n^2 之间的关系, 对容错性能量高效的网络部署具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] ABRAMS Z, GOEL A, PLOTKIN S. Set k -Cover algorithms for energy efficient monitoring in wireless sensor networks[C]//Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2004. New York: Association for Computing Machinery, 2004: 424-432.
- [2] LIU C, WU K, KING V. Randomized coverage-preserving scheduling schemes for wireless sensor networks[C]//Processing IFIP Networking Conference. Heidelberg: Springer Verlag, 2005: 956-967.
- [3] TIAN HE, GEORGANAS D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[C]//Processing ACM Workshop Wireless Sensor Networks and Applications. New York: Association for Computing Machinery, 2002:32-41.
- [4] BULUT, E, KORPEOGLU I. DSSP: Dynamic sleep scheduling protocol for prolonging the lifetime of wireless sensor networks[C]//Advanced Information Networking and Applications Workshops.[S.l.]:[s.n.], 2007: 725-730.
- [5] GAO Yong, WU Kui, LI Fu-bu, et al. Analysis on the redundancy of wireless sensor networks[C]//Processing 2nd ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, 2003. New York: Association for Computing Machinery, 2003: 108-114.
- [6] AZZEDINE B, FEI XIN. Coverage protocols for detecting fully sponsored sensors in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad hoc, Sensor and Ubiquitous Networks. New York: Association for Computing Machinery, 2006: 58-65.
- [7] BABAK P, AMITAVA D. Minimum dominating sets for solving the coverage problem in wireless sensor networks [C]//Ubiquitous Computing Systems—Third International Symposium (UCS 2006). Heidelberg: Springer Verlag, 2006: 454-466.
- [8] GAO Shan, CHINH T U, LI Ying-shu, et al. Sensor scheduling for k -coverage in wireless sensor networks[J]. Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2006, 43(25): 268-280.
- [9] HUANG Chi-fu, TSENGYu-Chee. The coverage problem in a wireless sensor network[J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 1(4): 519-528.

编辑 蒋 晓