

非均匀分布下无线传感器网络节点调度机制

凡高娟^{1,2}, 孙力娟¹, 王汝传¹, 黄海平¹, 肖甫¹, 李靖¹

(1. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003; 2. 河南大学 计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004)

摘 要: 针对传统依赖精确位置信息的计算复杂和无位置信息部署受限性等弊端, 从理论上对节点部署方式进行分析, 提出一种非均匀分布下的无线传感器网络节点调度 NDNS(non-uniform distribution node scheduling) 机制, 该机制利用节点与邻居节点的距离信息, 对节点覆盖冗余进行判别, 适应于任意分布下的网络部署方式。通过实验对机制进行了性能分析和验证, 结果表明该方案在保证网络覆盖的前提下, 有效地延长了网络生存时间。

关键词: 无线传感器网络; 非均匀分布; 节点调度

中图分类号: TP309

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)03-0010-08

Non-uniform distribution node scheduling scheme in wireless sensor networks

FAN Gao-juan^{1,2}, SUN Li-juan¹, WANG Ru-chuan¹, HUANG Hai-ping¹, XIAO Fu¹, LI Jing¹

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Aiming at the defect that high computational complexity of exact location information and the distribution limitation of location information-free in traditional schemes, the node distribution was analyzed theoretically. A node scheduling scheme NDNS (non-uniform distribution node scheduling) was proposed which satisfies with different random distribution. The precision for node redundancy evaluating was improved by using the distance information between the sensor and its neighbors and applicable to any distribution deployment. The scheme was analyzed and validated for performance through experiments. The numerical experiments results illustrate that the longer network lifetime was achieved in preserving networks coverage.

Key words: wireless sensor networks; non-uniform distribution; node scheduling

收稿日期: 2009-08-03; 修回日期: 2010-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60973139, 60773041, 61003039, 61003236); 江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE 2010197, BE 2010198); 江苏省级现代服务业发展专项基金资助项目; 江苏省高校自然科学基金基础研究基金资助项目(10KJB520013); 国家和江苏省博士后基金资助项目(20100471353, 20100471355); 江苏高校科技创新计划项目(CX10B-196Z, CX10B-197Z, CX10B-198Z, CX10B-199Z, CX10B-200Z); 江苏省六大高峰人才项目(2008118); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金资助项目(kjs1022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60973139, 60773041, 61003039, 61003236); Scientific & Technological Support Project (Industry) of Jiangsu Province (BE 2010197, BE 2010198); Special Fund for the Development of Modern Service Industry of Jiangsu Province; Jiangsu Provincial Research Scheme of Natural Science for Higher Education Institutions (10KJB520013); Postdoctoral Foundation of China and Jiangsu Province (20100471353, 20100471355); Science & Technology Innovation Fund for Higher Education Institutions of Jiangsu Province (CX10B-196Z, CX10B-197Z, CX10B-198Z, CX10B-199Z, CX10B-200Z); The Six Kinds of Top Talent of Jiangsu Province (2008118); Jiangsu Provincial Key Laboratory for Computer Information Processing Technology (kjs1022)

1 引言

无线传感器网络是由大量低功耗、通信与计算能力微小的传感器节点构成相互协作的自治网络系统,完成对目标的感知、环境的监测,具有广阔的应用前景^[1]。在这些应用中,网络覆盖反映了无线传感器网络对物理世界的监测能力,常作为描述无线传感器网络监测服务质量(QoS, quality of service)的标准^[2]。另一方面,无线传感器节点由电池提供能量,部署在人无法到达的区域,对电池更换或充电十分困难,其节点的能量消耗决定了无线传感器网络的生存时间。然而,既保证网络检测服务质量,又能充分利用节点能量十分困难。人们往往通过密集部署(密度高达 20 node/m^3)来保证网络监测质量^[3]。但是,如果所有的节点全部处于工作状态,当某个事件发生时,会同时触发多个节点发送数据,造成数据包间发送冲突,降低网络吞吐量,从而消耗过多能量,缩短整个网络生存时间。因此,需要采用有效的节能策略,在保证监测质量的前提下,延长网络生存时间。

节点调度是指在不降低网络覆盖的前提下,通过合理组织网络中节点的工作状态,尽可能延长网络生存时间。节点调度的核心问题之一,是如何判别无线传感网络中的覆盖冗余节点。当前,研究者在位置信息精确已知的条件下,来判别覆盖冗余节点:Tian^[4]等提出免职合格规则(off-duty eligibility rule),根据节点位置或信号到达角度计算节点间的覆盖关系;Lin^[5]研究随机调度下节点覆盖与能耗的关系;文献[6]利用 sponsored sector 和 effective angle 来判别节点覆盖,提出若一个节点的圆周被邻居节点覆盖,则说明这个节点覆盖冗余的节点;Zhang^[7]基于圆周覆盖讨论大规模网络覆盖与连通的关系,提出分布式节点密度控制 OGDC (optimal geographical density control)算法。文章指出若节点的传输半径大于或者等于节点的感知半径的 2 倍,活动节点又能够覆盖整个监测区域,则处于活动状态的节点也是连通的。以上研究基于节点位置信息精确已知的前提下,获取无线传感器网络节点位置信息主要存在 2 方面问题:一是获取信息过程复杂,能量消耗大;二是获取信息精度难以保证。通常,获取网络节点位置信息主要有向天线、定位算法和 GPS 3 种方法。采用有向天线方法,通过硬件设备来获取节点的位置信息极大地增加了节点的成本

和相应的能量开销;采用定位算法,节点间位置信息的传递、计算和维护过多消耗了能量,甚至节点调度所节约的能量被定位中消耗的能量抵消^[8];采用 GPS 方法,在室内环境中难以达到精确定位。此外,在实际应用中,上述 3 种定位算法只能为节点提供粗略的位置信息,在大规模无线传感器网络难以提供精确定位服务。

为解决能量消耗大和信息精度难以保证的问题,研究者提出不依赖于精确位置信息条件下的节点调度方案。Gao^[9]依据相邻节点个数,分析了节点覆盖冗余的概率模型,指出当节点存在 11 个邻居节点时,节点成为覆盖冗余节点的概率为 90% 以上。Wu^[10]依据文献[9]中的相邻节点个数,提出概率分析模型的 LDAS(lightweight deployment-aware scheduling)算法。其概率分析模型只能在一跳邻居条件下才能成立,节点调度后,其网络的覆盖冗余比较大。Tian^[11]提出依据相邻节点个数,概率分析与相邻节点的最近距离 3 种方法来判别冗余。Zhang^[12]在距离信息已知的节点调度方案。Younis 等^[13]通过节点距离和二跳邻居信息,设计 LUC 算法判别节点是否冗余,并在此基础上设计 LUC-1 和 LUC-P 分布式调度算法。Yen 等^[14]提出基于距离的节点调度算法,利用节点与邻居节点的距离信息对覆盖冗余进行判别。然而,上述节点调度方案的实现都是基于均匀分布或者确定性部署条件下来实现。在无线传感器网络应用中,对节点部署通常难以满足均匀分布,所以上述理论分析模型在非均匀部署下难以体现网络特征,运行调度算法后,不能有效地保证网络的监测服务质量。

本文提出一种非均匀分布下的无线传感器网络节点调度 NDNS (non-uniform distribution node scheduling)机制,该方案不依赖于节点精确位置信息,既能满足任意随机分布的节点部署情形,又能有效保证网络覆盖。文章组织结构如下:第 2 节给出问题描述;第 3 节详细介绍节点调度方案;第 4 节分析节点调度中单个节点的能量消耗,并对节点调度方案进行仿真实验;最后是结束语。

2 问题描述

在描述问题之前,做如下假设:

- 1) 网络中所有节点的位置信息未知;
- 2) 网络中节点采用随机部署(非均匀部署或均匀部署),所有节点部署后不再移动;

3) 网络中所有节点的感知半径相等, 且任意 2 个节点不存在重叠现象;

4) 网络中节点采用布尔感知模型。即每个节点的覆盖区域是以节点为圆心, 以 R 为感知半径的圆;

5) 网络中所有节点都同时工作时, 网络覆盖率为 100%;

6) 节点的通信半径至少是感知半径的 2 倍(根据文献[7]可知, 该条件下活动节点不但能覆盖整个监测区域, 而且是连通的)。

问题描述如下:

设 A 表示监测区域面积, A_{active} 表示当前处于活动状态的节点的覆盖区域。不难得出, 在网络某个运行时刻, 网络覆盖率 η 可以表示为

$$\eta = \frac{A_{\text{active}} \cap A}{A} \times 100\% \quad (1)$$

把整个网络的生存时间记作 T , 记 C_{th} 为网络应用中所要求达到的网络覆盖率。节点调度目标如下:

$$\begin{cases} \text{Maximize } T \\ \text{Subject to } \eta \geq C_{\text{th}} \end{cases} \quad (2)$$

当 $C_{\text{th}}=1$ 时, 网络覆盖为 100%。

3 非均匀分布的节点调度方案

非均匀分布的节点调度机制中, 每个节点采用分轮运行方式。具体分为邻居发现、冗余判别和节点调度 3 个阶段, 如图 1 所示。邻居发现阶段负责邻居节点信息的采集, 冗余判别阶段负责判断节点是否满足休眠条件, 节点调度阶段完成节点状态之间的转换。

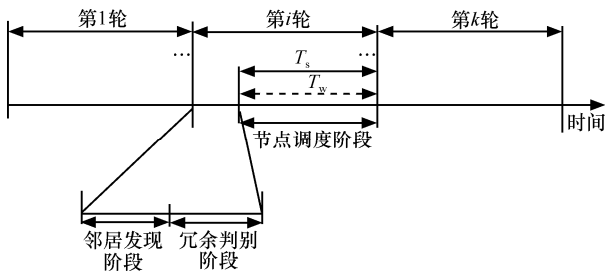


图 1 节点休眠调度划分

3.1 邻居发现阶段

在邻居发现阶段, 需要采集邻居节点个数和邻居节点距离信息^[15]。任意节点 i 的邻居节点是指与该节点的距离小于或等于 $2R$ 的所有活动节点(工作节点)集合 $N(i)=\{j|d_{ij} \leq 2R\}$, 其中, d_{ij} 表示节点 i 与

j 之间的欧氏距离。

寻找相邻节点个数步骤为: 1) 节点发送广播消息; 2) 收集相邻节点的回复信息; 3) 获得邻居节点个数、距离信息。相邻节点距离信息, 采用文献[16, 17]中的方法获得。

3.2 冗余判别阶段

假定监测区域 A 内, 随机部署 m 个传感器节点。 S_i 表示节点 i 的覆盖区域, $i = 1, 2, 3, \dots, m$ 。 j 是 i 的邻居节点, $N(i)=\{j|j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}, n < m\}$ 表示 i 的邻居节点集合。节点 i 被所有邻居节点的覆盖率 θ 表示为

$$\theta = \frac{(\bigcup_{j \in N(i)} S_j) \cap S_i}{S_i} \quad (3)$$

记 $\overline{S_{N(i)}}$ 为不被邻居节点集 $N(i)$ 覆盖区域, 有

$$\theta = \frac{S_i - \overline{S_{N(i)}}}{S_i} \quad (4)$$

下面计算 $\overline{S_{N(i)}}$, 如图 2 所示, 假定任意点 ζ 落入区域 S_i , 则 ζ 的概率分布函数 $f(\zeta)=1/S_i$ 。记 $S(\zeta)_{ij} = S_i \cap S_j$, ζ 不被 j 覆盖的概率 p 为

$$p = \int_{S_i - S(\zeta)_{ij}} f(\zeta) d\zeta = \frac{S_i - S(\zeta)_{ij}}{S_i} = 1 - \frac{S(\zeta)_{ij}}{S_i} \quad (5)$$

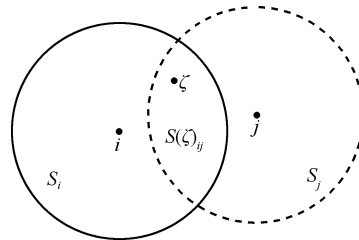


图 2 $S(\zeta)_{ij}$ 实例

于是, ζ 不被所有邻居节点覆盖的概率为

$$\prod_{j=1}^n p = \prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{S(\zeta)_{ij}}{S_i} \right) \quad (6)$$

那么 ζ 至少被其中一个邻居节点覆盖的概率为

$$\varphi = 1 - \prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{S(\zeta)_{ij}}{S_i} \right) \quad (7)$$

那么 $\overline{S_{N(i)}}$ 的数学期望为

$$E(\overline{S_{N(i)}}) = \iint_{S_i} \left(\prod_{j=1}^n p \right) dx dy$$

由于邻居节点在 S_i 内随机分布，故 S_i 中没有被 n 个邻居节点覆盖的区域的期望为

$$\overline{S_{N(i)}} = E(\overline{S_{N(i)}}) = \iint_{S_i} \left(\prod_{j=1}^n p \right) dx dy \quad (8)$$

把式(8)代入式(4)，得

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{S_i - \overline{S_{N(i)}}}{S_i} \\ &= 1 - \frac{\iint_{S_i} \left(\prod_{j=1}^n p \right) dx dy}{S_i} \\ &= 1 - \frac{\iint_{S_i} \left(\prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{S(\zeta)_{ij}}{S_i} \right) \right) dx dy}{S_i} \\ &= 1 - \prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{S(\zeta)_{ij}}{S_i} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

由式(7)、式(9)可知， $\theta = \varphi$ ，即节点的覆盖率 θ 等于节点内任意一点至少被邻居节点覆盖的概率 φ 。

根据式(9)，发现 ζ 落入 $S(\zeta)_{ij}$ 的概率只与 $S(\zeta)_{ij}$ 的面积大小有关。把节点 i 到邻居节点 j 的距离记作 d_{ij} ，不难求出 $S(\zeta)_{ij}$ 的面积 $S(d_{ij})_{ij}$

$$S(d_{ij})_{ij} = \begin{cases} 2R^2 \arccos(d_{ij}/2R) \\ -d_{ij} \sqrt{R^2 - (d_{ij}/2)^2}, & d_{ij} \leq 2R \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

当 $\theta = 1$ ，即相邻节点的覆盖率达到 100%，节点 i 为完全覆盖冗余节点。

3.3 节点调度阶段

节点的状态共有 3 类：活动 (active) 状态，预休眠 (pre-sleep) 状态，休眠 (sleep) 状态。由于每个节点调度采用分轮运行，仅对在某一轮内，节点调度算法进行描述。假设网络初始运行时，所有节点都处于活动状态。

算法步骤如下。

步骤 1 如果当前节点是活动节点，若有数据到达，对数据分组进行处理；若无数据，进入步骤 2。

步骤 2 采用 3.2 节的方法，判断是否冗余节点。

步骤 3 若当前节点不是冗余节点，返回步骤 1。

步骤 4 若当前节点是冗余节点，发送一个预休眠消息 (pre-sleep message) 给其邻居节点，进入预休眠状态，并启动一个延迟计时器 T_{backoff} 。

步骤 5 侦听信息。如果在 T_{backoff} 内收到相邻节点预休眠消息分组，返回步骤 1；如果在 T_{backoff} 内未收到休眠分组，节点进入休眠状态。

步骤 6 休眠时间 T_s 结束，开始新一轮调度，返回步骤 1。

4 能量分析与仿真实验

4.1 单个节点能量分析

假设时轮开始时刻为 T_1 ，进入休眠状态时刻 T_2 ，休眠状态结束时刻 T_3 ，结束休眠新时轮开始时刻 T_4 。设节点处于活动状态单位时间消耗的能量为 E'_{active} ，在休眠时单位时间消耗的能量为 E'_{sleep} ，从图 3 中可以得出。

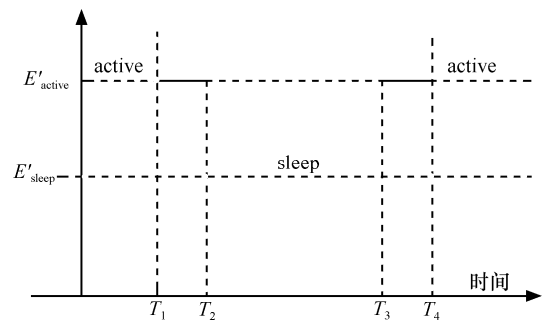


图 3 单个节点能量分析

节点消耗的能量为

$$E_{\text{total}} = E'_{\text{active}} ((T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)) + E'_{\text{sleep}} (T_3 - T_2) \quad (11)$$

则单个节点采用休眠机制后，节约的能量为

$$E_{\text{save}} = (E'_{\text{active}} - E'_{\text{sleep}}) (T_3 - T_2) \quad (12)$$

特殊地，如果节点始终处于活动状态或始终处于休眠状态，则 $T_1 = T_2$ ， $T_3 = T_4$ 。

如果节点始终处于活动状态，消耗的能量为

$$E_{\text{total}} = E'_{\text{active}} (T_4 - T_1) \quad (13)$$

如果节点始终处于休眠状态，消耗的能量为

$$E_{\text{total}} = E'_{\text{sleep}} (T_4 - T_1) \quad (14)$$

4.2 仿真实验

主要进行了 2 个方面的仿真实验。

首先，验证 NDNS 的有效性，包括 3 个方面：

1) 验证单个节点的判别精确性，判断其是否覆盖冗余节点；2) 验证整个网络生存时间的有效性；3) 节点随机部署，采用 NDNS 的活动节点分布图，验证算法稳定性。

其次,进行 NDNS 的参数分析。包括 3 个方面: 1) 保证一定网络覆盖基础上,总节点部署数量和活动节点个数之间的关系; 2) 单个节点休眠的覆盖率和网络覆盖率、网络生存时间之间的关系; 3) 单个节点休眠的覆盖率和网络剩余能量、网络生存时间之间的关系。

实验在 MATLAB 环境中运行。所有仿真实验基于如下假设: 所有节点部署在 100m×100m 的区域,每个节点的感知半径为 15m。实验采用文献[18]中所使用的能量模型,即节点在传输、空闲和休眠状态的能耗消耗比率为 20:4:0.01。若单个节点始终处于非休眠状态,其生存时间为 400~500s。假设整个仿真过程处于理想状态,即节点间距离信息不受信号碰撞和无线信道等因素的影响。

4.2.1 NDNS 有效性

1) 单个覆盖冗余节点判别的精确性。

众所周知,当所有节点精确位置已知情况下,很容易判断某个节点是否冗余节点。首先,在区域内随机部署节点,采用文献[7]方法判别其是否覆盖冗余节点。其次,分别采用文献[10]的方法和本文非均匀分布下覆盖冗余判别方法,对该节点覆盖度进行判别,测试本文算法的有效性。

单个节点覆盖判别方法如下:在区域内任取一个节点,将该节点感知区域离散化为 601×601 个像素点,根据感知半径的大小和周围所有邻居节点的坐标,计算节点内的像素被其邻居节点覆盖的情况。每个像素点数据结构为

```
Struct point{
int x, //像素点横坐标
int y, //像素点纵坐标
bool cover //是否被邻居节点覆盖
};
```

图 4 是文献[7,10]和本文 NDNS 的实验结果对比,图中结果是 100 次实验的平均值。从图 4 可以看出,在相邻节点数小于 11 的情况下,2 种节点调度机制都有误差。NDNS 比实际精确值要偏高,而 LDAS 的方法比实际精确值要偏低。从误差偏离程度来看,非均匀分布由于采用节点间距离信息,节点覆盖冗余判别的标准差总是小于 LDAS 中采用的覆盖冗余判别方法。

随着邻居节点个数增加,节点的邻居覆盖期望呈上升趋势。当邻居节点个数大于 11 时,2 种节点调度机制计算结果准确率都能达到 100%。

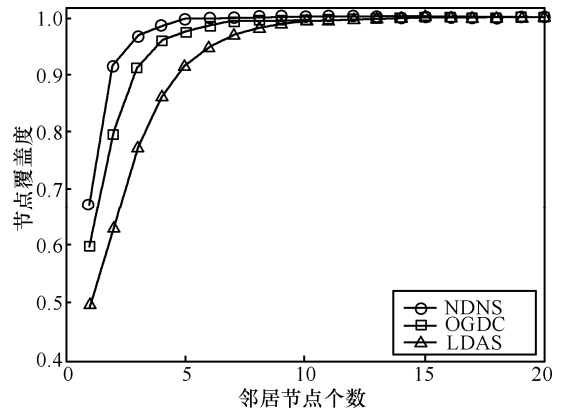


图 4 单个覆盖冗余节点的判别比较

2) 网络生存时间的有效性。

当所有节点精确位置未知,节点覆盖冗余判别的十分困难。网络覆盖度判别不准确,影响节点调度(活动节点个数和网络有效覆盖率)的性能,进而影响到整个网络的生存时间。正如前面提到,目前大多数节点调度机制,都是在节点部署符合均匀分布前提条件下设计,而本文非均匀节点调度方案满足任意随机分布的节点部署。为验证 NDNS 的有效性,在监测区域均匀部署 200 个节点前提下,分别采用 LDAS、NDNS 和没有采用节点调度方案时,在网络生存时间与网络覆盖率关系的比较。

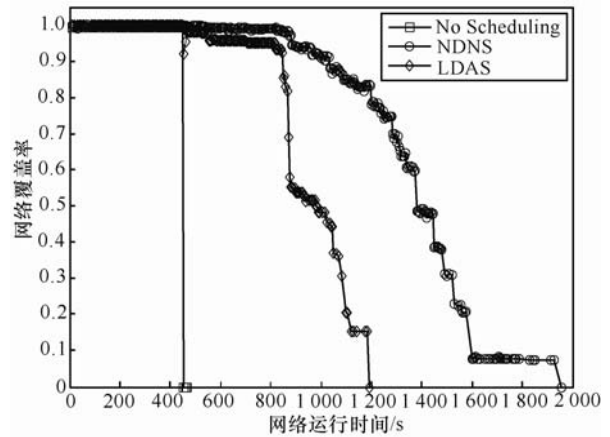


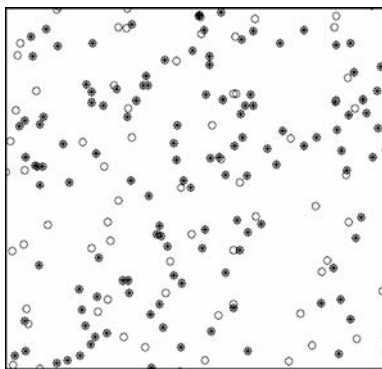
图 5 均匀分布下网络覆盖率与网络生存时间关系

图 5 是节点部署符合均匀分布条件下,采用 LDAS 和 NDNS 的网络覆盖率与网络生存时间关系对比图。假设如果网络的覆盖率低于 80% 时,网络已不可用^[19]。从图 5 可以看出,全部节点始终处于活动时,网络生存时间 483s; 采用 LDAS, 其网络生存时间延长到 900s; 采用 NDNS 时,其生存时间延长到 1300s。这充分说明,采用 NDNS 能有效的延长网络生存时间。此外,网络运行 483s 后,在网络运行时间相同

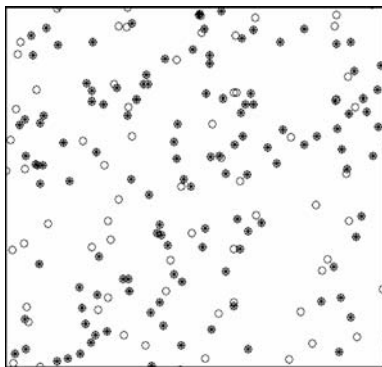
的条件下,NDNS的网络覆盖率始终高于LDAS算法。

3) 节点随机部署, NDNS 的活动节点分布。

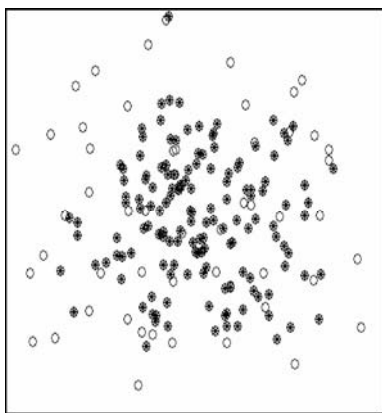
图 6 显示了在监测区域内部署 200 个节点, NDNS 的活动节点在网络中的分布情况。其中, 实心节点代表休眠节点, 空心节点代表活动节点。图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)分别是节点部署符合均匀分布, 泊松分布和正态分布, 采用 NDNS 后的活动节点分布情况。从图中可以看出, 无论网络处于何种随机分布, 采用 NDNS, 活动节点在整个网络区域中规律部署。这说明, 节点在任意部署条件下, NDNS 具有很高的稳定性。



(a) 均匀分布



(b) 泊松分布



(c) 正态分布(均值 0,标准差 20)

图 6 随机分布下 NDNS 的活动节点分布情况

4.2.2 NDNS 参数分析

1) 活动节点个数和总节点个数。

图 7 展示了保证一定网络覆盖基础上, NDNS 部署总节点数量和需要至少保持活动节点个数之间的关系。节点覆盖率 θ 分别 98%、95%、90%和 85%时, 部署节点与活动节点数量之间关系。

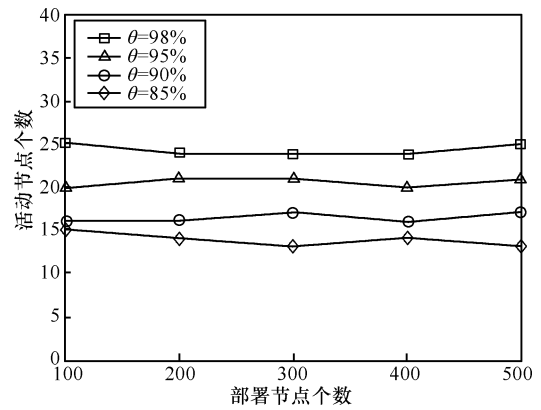


图 7 部署节点与活动节点个数之间关系

从图 7 可以看出, 在保证网络覆盖率前提下, 所需要的活动节点数随网络覆盖要求的提高而增多, 但随着部署节点数的增加, 达到节点覆盖需要的活动节点数趋于平衡趋势, 网络覆盖处于饱和状态。

2) 网络覆盖率和网络生存时间。

图 8 说明 NDNS 网络覆盖率和网络生存时间之间的关系。网络中单个节点休眠要求的覆盖率 θ 分别为 98%、95%、90%和 85%, 运行节点调度后, 其网络覆盖率与网络生存时间之间关系。

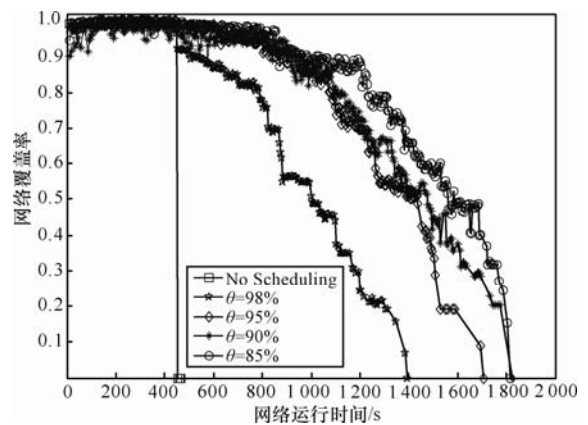


图 8 网络覆盖率与网络生存时间关系

从图 8 可以看出, 若不采用节点调度机制, 即网络中全部节点处于活动状态时, 网络的生存时间仅为 483s。采用 NDNS, 若要求节点冗余覆盖率达到为 98%时, 网络的生存时间为 1395s, 若要求节点覆

盖率达到 85% 时,网络的生存时间可达到 1815s。从中可以看出,在初始节点能量和感知半径相同的条件下,节点冗余覆盖率与节点调度后的网络覆盖率和网络运行时间呈反比关系:要求节点冗余覆盖率越高,其网络覆盖率越小,网络生存时间相应延长很少。在网络运行前 500s 时间内,可以达到 90%~100% 的网络覆盖率,但随着网络的运行及个别节点能量耗尽,网络的覆盖率随不同的节点覆盖率要求呈不同的下降趋势。若要求网络覆盖率低于 80% 时网络不可用^[19],相对于不采用节点调度机制,NDNS 在网络生存时间延长 2.5 倍以上。

3) 网络剩余能量和网络生存时间关系。

图 9 显示了 NDNS 网络总剩余能量和网络生存时间的关系。从网络剩余能量上可以看出网络运行过程中节点能量消耗情况。不采用节点调度算法,网络的能量消耗随着时间的增加,呈近似直线下下降趋势。而 NDNS 随节点覆盖率要求不同,其能量消耗趋势呈缓慢下降趋势。

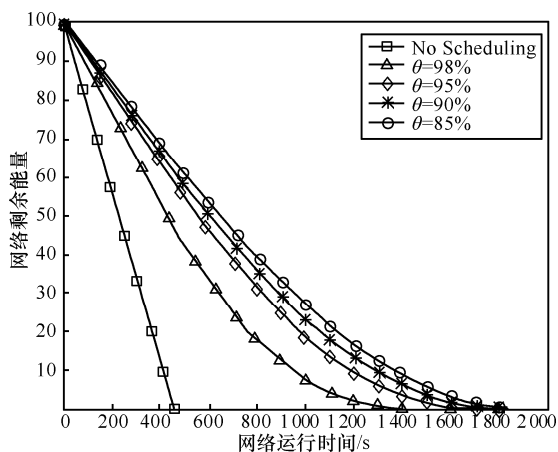


图 9 网络剩余能量与网络生存时间关系

5 结束语

本文研究非均匀分布下无线传感器网络节点调度,提出 NDNS。NDNS 是一种节点部署符合非均匀分布的节点调度,但它也可以适用于均匀分布或精确部署,具有很好的通用性。与 OGDC 和 LDAS 同等条件下的仿真对比实验表明,NDNS 算法具有较好的稳定性,在网络覆盖保证的前提下,能有效延长网络的生存时间。下一步研究:1) 实验中,发现一个有趣现象:当所有单个节点休眠要求的覆盖率分别达到 98%、95%、90% 和 85% 以上时,网络覆盖率在某网

络运行时间内能达 90% 以上。那么单个节点冗余覆盖率和整个网络覆盖率之间到底存在什么样的关系,还需要进一步分析;2) 实际应用中,节点间的距离信息容易受环境变化影响。因此,需要加入实际环境因素影响,设计相应的节点调度方案。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I, SU W, SANKARASUBDAM Y. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4):393-422.

[2] 陶丹, 孙岩, 陈后金. 视频传感器网络中最坏情况覆盖检测与修补算法[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2284-2290.

TAO D, SUN Y, CHEN H J. Worst-case coverage detection and repair algorithm for video sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2284-2290.

[3] SHIH E, CHO S, ICKES N, et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Rome, Italy, ACM Press, 2001. 272-287.

[4] TIAN D, GEORGANAS N. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications[C]. Atlanta, Georgia, USA, ACM Press, 2002.32-41.

[5] LIN J W, CHEN Y T. Improving the coverage of randomized scheduling in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(1): 4807-4812.

[6] JAEKYU C, GILSOO K, TAEKYOUNG K, et al. A distributed node scheduling protocol considering sensing coverage in wireless sensor networks[A]. IEEE 66th Vehicular Technology Conference[C]. Baltimore, MD, IEEE Computer Society, 2007. 352-356.

[7] ZHANG H, HOU J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad-hoc and Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1): 89-124.

[8] STOJIMENOVIC I. Position based routing in ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40 (7): 128-134.

[9] GAO Y, WU K, LI F. Analysis on the redundancy of wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications[C]. San Diego, CA, USA, ACM Press, 2003.108-114.

[10] GAO Y, WU K, LI F, et al. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10(6): 837-852.

[11] TIAN D, GEORGANAS N. Location and calculation-free node-scheduling schemes in large wireless sensor networks[J]. Ad Hoc

Networks, 2004, 2(1): 65-85.

- [12] ZHANG M Z, CHAN M C, ANANDA A. Coverage protocol for wireless sensor networks using distance estimates[A]. IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks[C]. San Diego, CA, IEEE Computer Society, 2007.183-192.
- [13] YOUNIS O, KRUNZ M, RAMASUBRAMANIAN S. Location-unaware coverage in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2008, 6(7): 1078-1097.
- [14] YEN L H, CHENG Y M. Range-based sleep scheduling (RBSS) for wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2009, 48(3): 411-423.
- [15] BEJERANO, Y. Simple and efficient k-coverage verification without location information[A]. The 27th Conference on Computer Communications(INFOCOM'08)[C]. Phoenix, AZ, IEEE Computer Society, 2008. 291-295.
- [16] ALAVI B, PAHLAVAN K. Modeling of the TOA-based distance measurement error using UWB indoor radio measurements[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(4): 275-277.
- [17] WEN C Y, MORRIS R D, SETHARES W A. Distance estimation using bidirectional communications without synchronous clocking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 1927-1939.
- [18] HILL J, SZEWCZYK R, WOO A, *et al.* System architecture directions for networked sensors[J]. ACM SIGPLAN Notices, 2000, 35(11): 93-104.
- [19] YE F, ZHONG G, LU S, *et al.* Energy Efficient Robust Sensing Coverage in Large Sensor Networks[R]. UCLA Technical Report, 2002.

作者简介:



凡高娟(1983-), 女, 河南周口人, 博士, 河南大学计算机与信息工程学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制。



孙力娟(1963-), 女, 江苏南京人, 南京邮电大学计算机学院教授、博士生导师、院长, 主要研究方向为无线传感器网络、计算机软件在通信中的应用和信息安全。



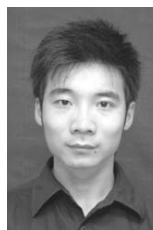
王汝传(1943-), 男, 安徽合肥人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机软件、计算机通信、信息安全、无线传感器网络、移动 Agent 技术等。



黄海平(1981-), 男, 福建三明人, 博士, 南京邮电大学计算机学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、计算机软件在通信中的应用和信息安全。



肖甫(1980-), 男, 湖南邵阳人, 南京邮电大学计算机学院讲师、博士后, 主要研究方向为无线传感器网络、计算机软件在通信中的应用和信息安全。



李靖(1985-), 男, 江苏南京人, 南京邮电大学计算机学院硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。