

基于联合感知模型的无线传感器网络连通性覆盖协议

孟凡治,王换招,何 晖

(西安交通大学计算机科学与技术系,陕西西安 710049)

摘 要: 本文研究在没有节点位置信息的情况下,如何有效地保证节点采用联合感知模型且节点通信范围多级可调的无线传感器网络的覆盖质量和连通性.给出了在节点随机部署方式下,网络覆盖质量和网络连通性与工作节点个数、监测区域面积和节点性能参数的关系;设计了一个选取最少工作节点保证网络覆盖质量和网络连通性的调度控制算法(SCA),该算法力求选取出的工作节点位置分布均匀并且网络整体能耗分布均衡.仿真结果表明:采用联合感知模型比采用二进制感知模型保证网络覆盖质量需要的工作节点更少.SCA不仅有效地提供满足应用期望的覆盖质量和连通性,而且减少了能量消耗,实现了能耗负载均衡.

关键词: 无线传感器网络;联合感知模型;覆盖质量(QoC);连通性

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)04-0772-08

Connected Coverage Protocol Using Cooperative Sensing Model for Wireless Sensor Networks

MENG Fan-zhi, WANG Huan-zhao, HE Hui

(Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: This paper focuses on the quality of coverage (QoC) and connectivity problems for wireless sensor networks, considering the cooperative sensing model and the multi-adjustable communication range without location information. For the random deployment policy, the performances of the network QoC and the network connectivity for various number of active nodes, different area of the monitored region and changeable performance parameter of each node are presented respectively. Furthermore, the scheduling control algorithm (SCA) is designed to guarantee the QoC and connectivity of networks with the least number of nodes. It chooses the uniformly-located working nodes and makes sure that the energy consumption of each node consumes homogeneously. Simulation results show that the active node number employed in the cooperative sensing model to provide the desired QoC of networks is less than that of the binary sensing model. And the SCA policy not only provides the desired QoC and connectivity of networks, but also reduces the total energy consumption and balances the energy dissipation among nodes.

Key words: wireless sensor networks; cooperative sensing model; quality of coverage (QoC); connectivity

1 引言

网络覆盖质量和网络连通性是衡量无线传感器网络(WSNs)服务质量的两个重要指标.利用节点的冗余性,通过启发式算法^[1~4]调度节点状态,在满足服务质量要求的前提下轮流关闭节点,能够有效地节约网络能量,延长网络寿命.现有的无需地理位置信息的覆盖控制策略几乎全是基于二进制感知模型的,即当被监测对象(或事件)处在节点的感知区域内时,它被节点监测到的概率恒为1;而当被监测对象处于节点的感知区域之外时,它被监测到的概率恒为0.即对象是否被监测到只由网络中某一个节点决定.但在实际的应用场景中,

对象是否被监测到是由对多个邻近传感器节点感知到的数据进行融合分析而得出的.所以对对象被监测到的概率并不是由某一个节点决定的,而是多个节点共同监测到该对象的概率.对象被一个节点监测到的概率由节点的物理特性、距节点的距离等诸多因素决定.因此联合感知模型^[5](也称为概率感知模型)能够更精确地描述网络的覆盖能力.为了避免传感器节点成为孤立节点而不能将监测到的信息传送到基站,所以必须保证网络是全连通的.

本文针对随机部署传感网络的特性,分析了基于联合感知模型的无线传感器网络的覆盖问题和网络概率性连通问题.并设计了一个选取最少工作节点保证网络

覆盖质量和网络连通性的调度控制算法(SCA).该算法选取出的工作节点位置分布均匀且节点能耗分布均匀,从而有效地延长了网络寿命.

2 相关工作

Tian 等人提出了免职合格规则(off-duty eligibility rule)的分布式覆盖调度算法^[1],节点根据地理位置信息计算邻居节点对自己感知区域的赞助面积(sponsored area),从而计算出节点间的覆盖关系.Ye 等人提出了基于探测的节点密度控制协议 PEAS^[2].Wu 等人提出了一种基于概率的节点冗余度计算方法^[3].根据该方法,节点可以独立计算出自己的冗余度.并提出了无需地理位置信息的节点调度协议 LDAS.但该方法忽略了节点的两跳感知邻居对其感知区域的覆盖贡献,所以 LDAS 选取的工作节点中仍然有大量冗余节点.Wang 等人研究了节点部署服从二维正态分布的传感器网络的覆盖问题^[4].

上面的覆盖控制算法都有一个共同的问题,即在算法的实现中没有考虑网络的连通性.对于网络连通性问题的研究,主要有两种机制:一种是基于节点通信半径固定这一假设,通过对节点状态进行调度,构建 CDS,从而保留骨干节点进行通信工作.CPA 算法^[6]根据节点对之间的连通性将节点划分在不同的区域中,每个时段只要保证每个区域中有一个工作节点就能够保证网络的连通性;另一种是基于节点通信半径可调这一假设的,节点通过动态调整其发射功率(即功率控制^[7,8]),在保证网络连通的前提下,使得网络中节点的能量消耗最小,延长整个网络的生存时间.LMST^[7]通过构建每个节点的局部最小生成树来保证网络连通性的同时节约网络能量.

为了保证传感器网络的覆盖质量和连通性,研究人员开始将焦点集中在如何保证网络连通性覆盖问题上.Liu 等人提出了联合调度算法^[9],在保证覆盖质量的基础上,通过加入额外的通信工作节点来保证网络的连通性.Zhao 等人提出了保证连通的目标覆盖(CTC)^[10],CTC 将全部节点分为多个子集,每个子集都能够保证对特定目标的覆盖和网络的连通.Tezcan 等人提出了逻辑分层的调度方法来保证网络的覆盖质量和连通性^[11].

3 预备知识

为了简化描述,后面的符号将被用到: $\|M\|$ 表示区域 M 的面积. $E[X]$ 表示随机变量 X 的期望值. $P\{A\}$ 表示事件 A 发生的概率. \bar{Z} 表示 Z 的共轭复数. $\text{fourier}(f(x)) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \exp(-iwx) dx = F(w)$ 为函数 $f(x)$

的连续傅里叶变换, $\text{ifourier}(F(w)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w) \exp(ixw) dw = f(x)$ 为函数 $F(w)$ 的连续傅里叶逆变换.

3.1 节点感知模型和相关定义

本文的分析基于联合感知模型^[5],即节点 s 对监测区域 M 中任意位置 q 的感知强度为

$$I(s, q) = \begin{cases} e^{-\alpha d(s, q)}, & 0 < d(s, q) \leq R_s \\ 0, & R_s < d(s, q) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $d(s, q)$ 表示 s 与 q 之间的欧式距离. α 是反映节点感知模块物理性质的设备相关参数. R_s 表示节点的最大有效感知半径.假设集合 S 为部署在监测区域 M 内所有工作节点的集合,则 q 点的联合感知强度^[5]表示为

$$I(q) = 1 - \prod_{s \in S} (1 - I(s_j, q)) \quad (2)$$

定义 1(点被覆盖) 对于区域 M 中任意一点 q ,如果 q 的联合感知强度满足 $I(q) \geq I_{th}$,则 q 被覆盖(即 q 处发生的事件能够被监测到);否则 q 未被覆盖.其中 I_{th} 是感知强度阈值(该值由用户根据节点特性以及应用要求设定).所以 q 的覆盖情况可以表示为

$$\text{Cov}(q) = \begin{cases} 1, & I(q) \geq I_{th} \\ 0, & I(q) < I_{th} \end{cases} \quad (3)$$

在二进制感知模型中,节点 s 的感知区域是以 s 为圆心, r_s 为半径的圆(该圆记为 $C(s, r_s)$,且 $r_s \leq R_s$).在区域 $C(s, r_s)$ 内的点都被 s 覆盖,而在 $C(s, r_s)$ 外的任意点都不能被 s 覆盖.所以二进制感知模型中的 r_s 满足关系式 $e^{-\alpha r_s} = I_{th}$,即 $r_s = -\ln(I_{th})/\alpha$.

定义 2(网络覆盖质量 η) 监测区域 M 被网络覆盖的面积占整个 M 面积的比例,称为网络的覆盖质量,即

$$\eta = \iint_M \text{Cov}(q) dM / \|M\| \quad (4)$$

一个传感器网络可以抽象为一个无向图 $G = (V, E)$,其中 V 和 E 分别是节点的集合和无向边的集合.

定义 3(图的节点度 $d_n(G)$) 对于无向图 $G = (V, E)$,节点 $u \in V$ 的度 $d(u)$ 定义为它的邻居数. G 的节点度定义为 V 内所有节点的度的最小值,即 $d_n(G) = \min_{u \in V} \{d(u)\}$.

定义 4(图的连通度 $d_c(G)$) 对于无向图 $G = (V, E)$,节点对 (u, v) (其中 $u, v \in V$) 的连通度 $d(u, v)$ 定义为连接 u 和 v 的相互独立的路径数. G 的连通度定义为 V 内所有节点对的连通度的最小值,即 $d_c(G) = \min_{u, v \in V} \{d(u, v)\}$.图为连通图等价于 $d_c(G) \geq 1$.

3.2 网络模型

所有传感器节点随机均匀地部署在一个边长为 L 的方形区域 M 内.现假设该网络具有以下性质:

- (1) 节点采用联合感知模型和二进制通信模型.
- (2) 所有节点同构,且节点的最大通信半径 R_{cm} 和

最大有效感知半径 R_s 之间没有特定关系.

(3) $L \gg R_{cm}$ 且 $L \gg R_s$, 即监测区域 M 的边界效应可以忽略.

(4) 节点的通信设备可以通过调整其发射功率, 获得 m 个不同的通信范围 (用 $R_{c1}, R_{c2}, \dots, R_{cm}$ 表示, 且 $R_{c1} < R_{c2} < \dots < R_{cm}$).

3.3 问题描述

假设在监测区域 M 内随机均匀部署了大量节点 (共 N 个). 对于通信模块, 给定节点的可调通信半径级别 $R_{c1}, R_{c2}, \dots, R_{cm}$; 对于感知模块, 给定节点的感知模块设备相关参数 α 和感知强度阈值 I_{th} ($0 < I_{th} < 1$) 以及最大感知半径 R_s . 需要从 N 个节点中选取一个最小工作节点集 φ , 并且确定节点的适当通信半径来保证网络覆盖质量和连通性. 设计适当的工作节点调度控制算法, 使得选取出的工作节点位置分布均匀且节点能耗分布均匀.

4 问题分析

4.1 覆盖问题分析

由定义 1 知, 区域 M 中任意一点 q 被覆盖的概率为 $P\{1 \geq I(q) \geq I_{th}\}$. 由定义 2 知, 网络覆盖质量 η 的期望值为

$$E[\eta] = E \left[\iint_M Cov(q) d_M \right] \cdot \|M\|^{-1} = P\{1 \geq I(q) \geq I_{th}\} \quad (5)$$

为了使监测区域 M 的覆盖质量达到指定覆盖质量要求 (η_0), 只需要保证 $E[\eta] \geq \eta_0$, 即

$$P\{1 \geq I(q) \geq I_{th}\} \geq \eta_0 \quad (6)$$

令 $\ln(1 - I(q)) = x$, 则 $P\{1 \geq I(q) \geq I_{th}\} = P\{\ln(1 - I_{th}) \geq x > -\infty\}$. 用 $pr(x)$ 表示随机变量 x 的概率密度函数, 则

$$P\{\ln(1 - I_{th}) \geq x > -\infty\} = \int_{-\infty}^{\ln(1 - I_{th})} pr(x) d_x \quad (7)$$

在监测区域 M 内随机选取 K_v 个节点作为工作节点, 由式(2)知 $x = \sum_{j=1}^{K_v} \ln(1 - I(s_j, q))$, 所以随机变量 x 的特征函数为

$$\varphi_x(t) = E[\exp(itx)] = E \left[\prod_{j=1}^{K_v} \exp(it \cdot \ln(1 - I(s_j, q))) \right] \quad (8)$$

其中 i 为虚数单位. 由于所有的节点在 M 内服从随机均匀分布, 所以一个节点位于 M 内任意位置的概率均为 $1/\|M\|$, 并且 M 内所有节点的位置关系是相互独立的, 所以

$$\varphi_x(t) = \left((\|M\| - \pi R_s^2) \right.$$

$$\left. + \int_0^{R_s} \exp(it \cdot \ln(1 - \exp(-\alpha r))) 2\pi r dr \right)^{K_v} \cdot \|M\|^{-K_v} \quad (9)$$

令 $\ln(1 - \exp(-\alpha r)) = l$ 则

$$\begin{aligned} \varphi_x(t) &= \left((\|M\| - \pi R_s^2) + \int_{-\infty}^{\ln(1 - \exp(-\alpha R_s))} \exp(itl) \right. \\ &\quad \cdot \frac{2\pi \ln(1 - \exp(l)) \exp(l)}{-\alpha^2(1 - \exp(l))} dl \left. \right)^{K_v} \cdot \|M\|^{-K_v} \\ &= \left((\|M\| - \pi R_s^2) + \int_{-\infty}^{\ln(1 - \exp(-\alpha R_s))} \exp(itl) \cdot f(l) dl \right)^{K_v} \cdot \|M\|^{-K_v} \\ &= \left((\|M\| - \pi R_s^2) + \overline{fourier(f(l))} \right)^{K_v} \cdot \|M\|^{-K_v} \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} f(l) &= \frac{2\pi \ln(1 - \exp(l)) \exp(l)}{-\alpha^2(1 - \exp(l))} (1 - u(l - \ln(1 - \exp(-\alpha R_s)))) \\ u(l) &= \begin{cases} 0, & l < 0 \\ 1, & l > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad \text{所以随机变量 } x \text{ 的概率密度函数 } pr(x) \text{ 可以表示为}$$

$$pr(x) = ifourier(\overline{\varphi_x(t)}) = ifourier \left(\left((\|M\| - \pi R_s^2) + \overline{fourier(f(l))} \right)^{K_v} \cdot \|M\|^{-K_v} \right) \quad (11)$$

由式(6)、(7)和(11)得到

$$\int_{-\infty}^{\ln(1 - I_{th})} ifourier \left(\left((\|M\| - \pi R_s^2) + \overline{fourier(f(l))} \right)^{K_v} \cdot \|M\|^{-K_v} \right) d_x \geq \eta_0 \quad (12)$$

只要保证式(12)成立, 则随机选取的 K_v 个工作节点就能够保证监测区域 M 的覆盖质量达到指定覆盖质量要求. 使用 matlab 可以计算出使式(12)成立的最小 K_v . 文献[12]给出了采用二进制感知模型且不考虑边界效应时, 获得的覆盖质量的期望值与工作节点数 K_{vb} 的关系为 $E[\eta] = 1 - (1 - \pi r_s^2 / \|M\|)^{K_{vb}}$, 其中 r_s 由公式 $r_s = -\ln(I_{th}) / \alpha$ 计算得出. 根据 $1 - (1 - \pi r_s^2 / \|M\|)^{K_{vb}} \geq \eta_0$ 可求出节点采用二进制感知模型时, 保证网络覆盖质量所需要的最少工作节点数 K_{vb} . 表 1 给出了区域 M 的边长为 100m 时, 采用联合感知模型 ($R_s = 10m$) 和采用二进制感知模型保证网络覆盖质量所需要的工作节点数. 从表 1 可以看出: 在相同覆盖质量要求下, 采用二进制感知模型的网络所需要的工作节点数远高于采用联合感知模型的网络. 联合感知模型比二进制感知模型更能体现传感器网络的联合感知特性.

表 1 要求覆盖质量与工作节点数的关系

η_0		0.8	0.85	0.9	0.93	0.96	0.99
$\alpha = 0.1$	K_v	87	99	115	129	153	204
$I_{th} = 0.6$	K_{vb}	196	231	280	323	391	560
$\alpha = 0.2$	K_v	105	118	136	153	180	238
$I_{th} = 0.4$	K_{vb}	244	187	348	402	487	696

4.2 连通问题分析

为了能将传感器监测到的数据传输到基站(Sink 节点),要求工作节点构成的网络必须是全连通的.从概率论角度考虑,只要保证网络为连通网络的概率不低于阈值 τ_1 (τ_1 为大概率事件阈值,本文取 $\tau_1 = 0.98$),即 $P\{d_c(G) \geq 1\} \geq \tau_1$,就能够保证网络为连通网络.下面分析保证网络为连通网络时,工作节点数与节点通信半径之间的数学关系.

假设在监测区域 M 内随机选取 K_n 个节点作为工作节点(分别用 s_1, s_2, \dots, s_{K_n} 表示).用无向图 G 表示由 $V = \{s_1, s_2, \dots, s_{K_n}\}$ 构成的网络,用 $\rho(V, d_n(G) \geq k)$ 和 $\rho(V, d_c(G) \geq k)$ 分别表示保证 $d_n(G) \geq k$ 和 $d_c(G) \geq k$ (其中 $k \geq 1$) 成立的节点最小通信半径.所以对于任意的 V 有

$$\rho(V, d_c(G) \geq k) \geq \rho(V, d_n(G) \geq k) \quad (13)$$

文献[13]证明了对于 $k \geq 1$ 有

$$\lim_{K_n \rightarrow \infty} P\{\rho(V, d_c(G) \geq k) = \rho(V, d_n(G) \geq k)\} = 1 \quad (14)$$

即当 K_n 足够大时,随着节点通信半径的增加,图 G 的节点度和连通度也随着增大.当 G 的节点度从 $k-1$ 增大到 k 时, G 的连通度也从 $k-1$ 增大到 k 的概率将趋近于 1.当 K_n 足够大时,由式(13)和式(14)知

$$\rho(V, d_n(G) \geq k) \in (\rho(V, d_c(G) \geq k) - \epsilon, \rho(V, d_c(G) \geq k)] \quad (15)$$

其中 $\epsilon \rightarrow 0^+$.所以当 $P\{d_n(G) \geq k\}$ 趋近于 1 时有

$$P\{d_c(G) \geq k\} \approx P\{d_n(G) \geq k\} \quad (16)$$

由式(16)知,当 $P\{d_n(G) \geq 1\} \rightarrow 1$ 时,网络为连通网络的概率满足 $P\{d_c(G) \geq 1\} \approx P\{d_n(G) \geq 1\}$.而 $P\{d_n(G) \geq 1\} = P\{\bigcap_{1 \leq j \leq K_n} (d(s_j) \geq 1)\}$,虽然事件 $d(s_j) \geq 1$ 和事件 $d(s_h) \geq 1$ 并不相互独立(如 s_j 是 s_h 的邻居,则 s_h 必然也是 s_h 的邻居.其中 $1 \leq j, h \leq K_n, j \neq h$),但当 K_n 非常大时,它们的关联程度非常的小.所以 $P\{\bigcap_{1 \leq j \leq K_n} (d(s_j) \geq 1)\} \approx \prod_{1 \leq j \leq K_n} P\{d(s_j) \geq 1\}$.又由于所有节点的位置是相互独立的,于是有 $P\{d(s_j) \geq 1\} = P\{d(s_h) \geq 1\}$ (其中 $1 \leq j, h \leq K_n, i \neq j$).所以当 $P\{d_n(G) \geq 1\} \rightarrow 1$ 时有

$$P\{d_c(G) \geq 1\} \approx (P\{d(s_1) \geq 1\})^{K_n} \quad (17)$$

用 R_c 表示节点的通信半径,有

$$P\{d(s_1) \geq 1\} = 1 - \exp(-\pi R_c^2 (K_n - 1) \cdot \|M\|^{-1}) \quad (18)$$

将式(18)的结果代入式(17)得 $P\{d_c(G) \geq 1\} \approx (1 - \exp(-\pi R_c^2 (K_n - 1) \cdot \|M\|^{-1}))^{K_n}$.由大概率事件的现实意义知,只要网络为连通网络的概率达到 τ_1 ,就能

从概率上保证网络为连通网络.从而得到保证网络为连通网络时,工作节点数与节点通信半径应满足

$$(1 - \exp(-\pi R_c^2 (K_n - 1) \cdot \|M\|^{-1}))^{K_n} \geq \tau_1 \quad (19)$$

给定 R_c ,使用 matlab 可以计算出使式(19)成立的最小 K_n ;给定 K_n ,也可以计算出使式(19)成立的最小 R_c .表 2 给出了区域 M 的边长为 100m 时,保证网络为全连通网络所需要的工作节点数与节点通信半径的具体数值关系.从表 2 可以看出:所需要的工作节点数随节点通信半径的增大而减小.图 1 显示了 $R_c = 10$ 和 $R_c = 20$ 时,分别随机选取 308 和 64 个节点作为工作节点时网络的连通性.从图 1 可以看出网络总是全连通的.还可以看出图中有些节点的度仅为 1,如果再减少工作节点的个数,网络很有可能出现不连通的情况.

表 2 节点通信半径与工作节点数之间的关系

R_c	10	12	14	16	18	20
K_n	308	205	146	108	83	64

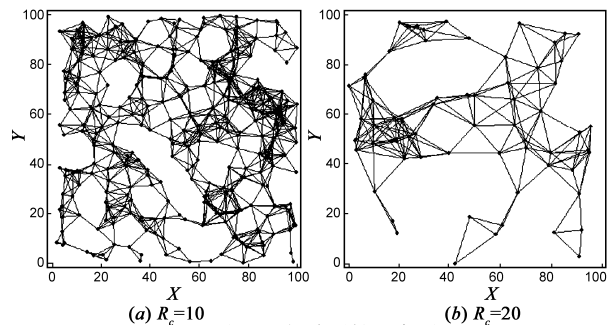


图 1 网络连通性示意图

5 调度控制算法和控制消息复杂度分析

5.1 调度控制算法(SCA)

根据式(12)计算出保证覆盖质量所需要的最少工作节点数 K_n ,用 K_v 替换式(19)中的 K_n ,求出使式(19)成立的最小通信半径 R_c ,如果 $R_c \leq R_{cm}$,则将节点的实际通信半径 R_{com} 设置为不小于 R_c 的最小通信级别,实际需要的工作节点数 K 设置为 K_v ;否则将节点的实际通信半径 R_{com} 设置为 R_{cm} ,并使用 R_{com} 替换式(19)中的 R_c ,求出使式(19)成立的最少工作节点数 K_n ,实际需要的工作节点数 K 设置为 K_n .为了使选取的工作节点位置分布更均匀,在协议中使用局部范围内工作节点密度控制机制,即节点的工作邻居数 n 满足

$$n \geq \lceil \pi R_{com}^2 K / \|M\| \rceil \quad (20)$$

则说明该节点的通信区域内已有足够的工作节点,可以将该节点关闭以节约网络能量.在 SCA 中,每个节点有 3 种运行状态:工作状态(Active),退避状态(Back-Off)和睡眠状态(Asleep).各状态间的转换关系如图 2 所示.在网络初始化时,基站根据用户指定的覆盖质量、传感器节点性能参数和整个检测区域面积计算出

K 、 R_{com} 和 $\lceil \pi R_{com}^2 K / \|M\| \rceil$,并将这些信息发送给区域 M 内的所有节点. M 内所有节点根据基站发送的信息设置自身的通信半径. 随后所有节点通过广播 Hello 消息来获得邻居节点的信息,并将信息存入邻居表中,然后进入工作状态. 当节点的工作邻居个数满足式(20)时,则节点进入退避状态,节点停留在退避状态的时间是随机选取的. 退避时间结束后,节点再次判断其工作邻居数是否满足式(20). 如果不满足则回到工作状态;否则广播一个 Sleep 消息通知其工作邻居更新邻居表,然后进入睡眠状态并停留在睡眠状态一个固定时间(T_s)后再次进入到工作状态. 节点从睡眠状态进入工作状态后广播一个 Probe 消息探测其工作邻居. 收到 Probe 消息的非睡眠状态的节点将更新邻居表信息,并广播 Hello 消息.

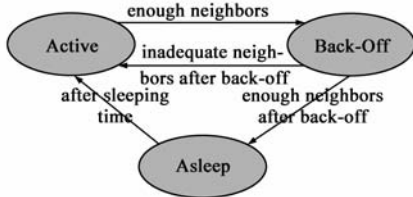


图2 节点状态转移图

SCA 中还加入了基于节点剩余能量的工作节点选取机制^[12],能量少的节点有更大的机会进入睡眠状态. 节点每次的退避时间是在 $[0, T]$ 之间随机产生的,而 T 的计算公式如下:

$$T = \left(1 + \frac{W - W_{\min}}{W_{th}}\right) \cdot T_0 \quad (21)$$

其中 T_0 是一个固定时间基值, W 是节点的剩余能量, W_{\min} 是节点以及它工作邻居剩余能量的最小值, W_{th} 是能量调节阈值. 从式(21)可以看出若节点的剩余能量比其覆盖邻居的剩余能量大的越多,则 T 就会越大,节点进入睡眠状态的几率就越小,从而可以实现节点能耗负载均衡.

5.2 控制消息复杂度分析

SCA 中使用的 3 种控制消息具有统一的消息格式. 每个节点的一个运行周期都由两部分组成:工作时间 T_w 和睡眠时间 T_s . 网络中初始部署节点数为 N ,所有节点轮流工作,但每一时刻实际工作节点数为 K_w ,由式(20)知, $E[K_w] = \lceil \pi R_{com}^2 K / \|M\| \rceil \cdot \|M\| / (\pi R_{com}^2)$. 在一个运行周期内有 $N \cdot E[T_w] = E[K_w] \cdot (E[T_w] + T_s)$,于是 $E[T_w] = E[K_w] \cdot T_s / (N - E[K_w])$. 由式(20)知,每个从睡眠状态进入到工作状态的节点工作邻居数 n 的期望为 $E[n] = \lceil \pi R_{com}^2 K / \|M\| \rceil$,所以一个节点发送一个 Probe 消息后会触发 $E[n]$ 个节点发送 Hello 消息. 在一个节点运行周期内每个节点会发送一个 Sleep 消息和一个 Probe 消息. 所以每个节点单位时间发送的控制

消息个数为 $(2 + E[n]) / (E[T_w] + T_s)$.

6 协议性能评价

为了验证协议的有效性和性能. 使用 OPNET 作为仿真实验平台对协议进行实验和分析. 实验使用与文献^[14]相同的能量模型与参数,发送数据和接收数据的无线通信模型分别为

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\xi_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\xi_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (22)$$

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (23)$$

其中 l 表示数据包的比特位数, d 表示发射距离, E_{elec} 表示无线收发电路所消耗的能量, ξ_{fs} 和 ξ_{mp} 分别表示自由空间模型和多路衰减模型的放大器消耗的能量. 各项实验参数如表 3 所示

表 3 模拟实验参数列表

Parameter	Value
M	100m × 100m
N	400 ~ 900
T_0	5s
T_s	30s, 50s, 70s
W_{th}	0.2J, 0.25J, 0.3J
Node Sampling Frequency	1Hz
R_s	10m
α	0.1
I_{th}	0.6
$R_{c1}, R_{c2}, \dots, R_{cm}$	2m, 4m, ..., 20m
E_{elec}	50nJ/b
ξ_{fs}	10pJ/b/m ²
ξ_{mp}	0.0013pJ/b/m ⁴
Data Packet Size	500B
Broadcast Packet Size	25B
Packet Header Size	25B
Initial Energy	2J/battery
Minimum Energy Limit	0.02J/battery

6.1 协议有效性

图 3 显示了不同节点部署数量情况下,获得的覆盖质量与要求的覆盖质量之间的关系. 从图 3 可以看出,不论部署的初始节点数为多少,SCA 总能够保证要求的覆盖质量且有一定的覆盖冗余,少量的覆盖冗余是很有必要的,因为这样能够增强网络容错能力. 并且在没有地理位置信息的情况下精确提供要求覆盖质量也是不现实的.

图 4 反映了工作节点数与部署节点数之间的关系. 从图 4 可以看出,不论部署的初始节点数为多少,工作节点数只与要求的覆盖质量有关. SCA 的这一性质说明了该协议具有很好的可扩展性. 仔细观察会发现,在相同覆盖质量要求下,图 4 中实际工作节点数比表 1 给出的理论工作节点数要大,这是因为节点的工作邻居数

一定为整数,造成了实际工作节点数比理论计算出的数值大,从而造成图3中获得的覆盖质量略高于要求的覆盖质量.

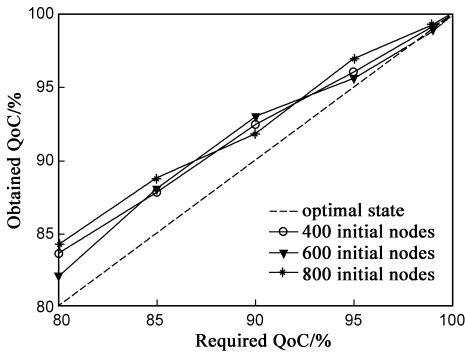


图3 获得的QoC与要求的QoC的关系

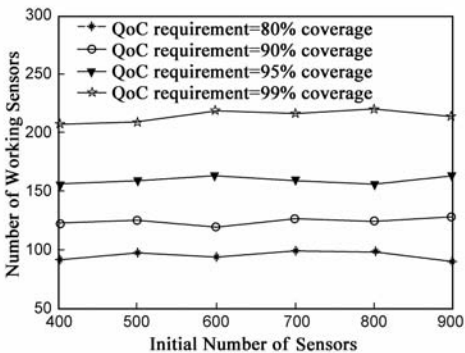


图4 工作节点数与要求的QoC的关系

6.2 工作节点分布均匀性

图5(a)是采用SCA算法调度的工作节点的位置分布图,图5(b)是直接随机选取工作节点的位置分布图.对比5(a)和5(b)能看出,在节点初始部署相同情况下,采用SCA算法调度的工作节点比直接随机选取的工作节点位置分布更均匀.造成这种情形的原因是SCA采用了局部范围内工作节点密度控制机制(即基于工作邻居数的节点调度机制),从而使得SCA比直接随机选取节点调度算法得到的工作节点分布更均匀.

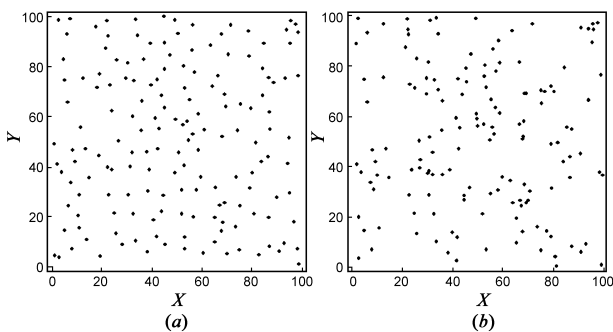


图5 工作节点位置分布图

6.3 控制开销

SCA在选取工作节点时,需要消耗能量收发控制消息,工作节点收发感知到的数据也需要消耗大量能量.

用收发控制消息所消耗的能量占网络整体能耗的比例表示控制开销.图6反映了要求覆盖质量为95%时,部署节点数、节点睡眠时间间隔和控制开销的关系.从图6可以看出,SCA算法的控制开销非常小.另一方面,节点睡眠时间间隔越大,控制开销越小.这是由于 T_s 越大,单位时间内收发的控制消息就越少,从而控制开销也越小.从图6还可以看出,在 T_s 相同的情况下,工作节点密度越大,控制开销也越大.

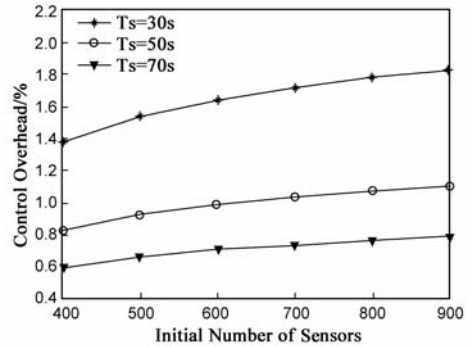


图6 控制开销与节点睡眠时间间隔的关系

6.4 网络寿命

图7是随机部署800个节点时,获得的覆盖质量与时间的关系.与不采用节点调度算法相比,使用SCA调度节点后,虽然增加了少量控制开销,但节点轮流工作,因此极大程度的延长了网络寿命.在网络寿命结束后,获得的覆盖质量从应用要求的覆盖质量快速下降,这也从侧面说明了网络整体能耗分布比较均匀.从图7还可以了解到,网络提供的覆盖质量越高,工作节点数就越多,网络能量消耗就越快,从而网络寿命就越短.这也体现了覆盖质量与网络寿命之间的转换关系.

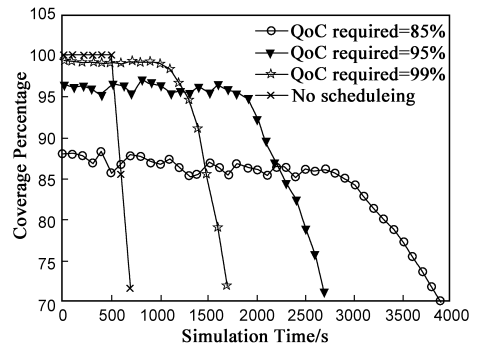


图7 获得QoC相对于时间的关系

6.5 与其它协议的比较

为了比较协议的性能,选取了文献[3]中的LDAS协议和文献[15]中的ELIQoS协议作为比较对象,结果如图8、图9所示.从图8可以看出,三种协议都能够保证网络的覆盖质量,并且有一定的覆盖冗余.但从图9可以看出,在相同的覆盖质量要求下,LDAS和ELQoS的工作节点数远高于SCA的工作节点数.这是由于LDAS

和 ELIQoS 是基于二进制感知模型,而 SCA 采用联合感知模型,联合感知模型能够更精确的描述网络的覆盖能力,从而使用更少的工作节点提供指定的覆盖质量.综合上面的比较结果可以得出,联合感知模型能够更精确的描述网络的覆盖能力,SCA 选举最少的工作节点来保证应用要求的覆盖质量.

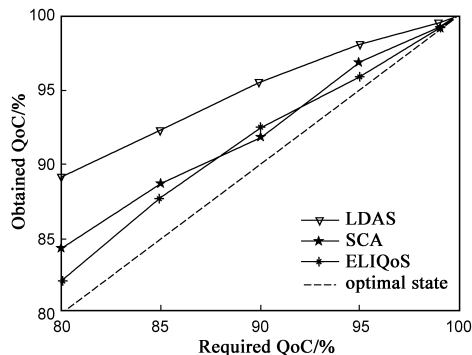


图8 三种算法获得的覆盖质量比较

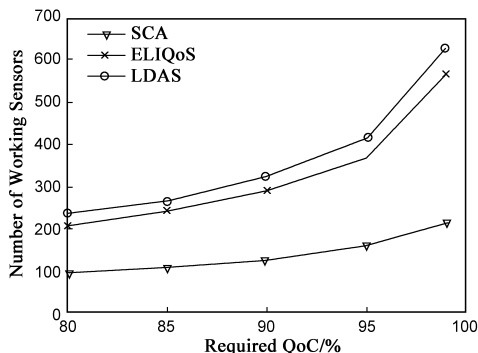


图9 三种算法工作节点数比较

7 总结

为了解决无线传感器网络,在没有节点位置信息的情况下如何能量有效地保证网络连通性覆盖,本文分析了在节点随机部署方式下,网络覆盖质量和网络连通性与工作节点个数、监测区域面积和节点性能参数的关系.需要指出的是节点的感知模型采用了联合感知模型,因为联合感知模型比二进制感知模型能够更精确地描述网络的覆盖能力.根据分析结果设计了一个选取最少工作节点保证网络覆盖质量和网络连通性的节点调度控制算法.仿真结果表明:SCA 不仅有效地提供满足应用期望的服务质量和连通性,而且实现了网络能耗负载均匀,有效地延长了网络寿命.

参考文献:

[1] Tian D, Georganas ND. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[A]. Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)[C]. New York: ACM Press, 2002. 32 - 41.
 [2] Ye F, Zhong G, Cheng J, Lu S, Zhang L. PEAS: a robust ener-

gy conserving protocol for long-lived sensor networks[A]. Proc. of the 23rd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS)[C]. Providence: IEEE Press, 2003. 28 - 37.
 [3] Wu K, Gao Y, Li F, Xiao Y. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks[J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET), 2005, 10(6): 837 - 852.
 [4] Wang D, Xie B, Agrawal DP. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with Gaussian distribution[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(12): 1444 - 1458.
 [5] Zou Y, Chakrabarty K. A distributed coverage- and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans. on Computers, 2005, 54(8): 978 - 991.
 [6] Ding Y, Wang C, Xiao L. An adaptive partitioning scheme for sleep scheduling and topology control in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(9): 1352 - 1365.
 [7] Li N, Hou JC, Sha H. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 4(3): 1195 - 1206.
 [8] 李云, 周娴, 尤肖虎, 刘占军. IMECN: 一种新的无线传感器网络拓扑控制算法[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 48 - 53.
 Li Yun, Zhou Xian, You Xiao-hu, Liu Zhan-jun. IMECN-a new topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 48 - 53. (in Chinese)
 [9] Liu C, Wu K, Xiao Y, Sun B. Random coverage with guaranteed connectivity: joint scheduling for wireless sensor networks[J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2006, 17(6): 562 - 575.
 [10] Zhao Q, Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008, 16(6): 1378 - 1391.
 [11] Teacan N, Wang W. TTS: a two-tiered scheduling mechanism for energy conservation in wireless sensor networks[J]. International Journal of Sensor Networks (IJSNet), 2006, 1(3/4): 213 - 228.
 [12] 王换招, 孟凡治, 李增智. 最大化网络有效寿命的传感器网络覆盖保持协议[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 66 - 70.
 Waog Han-zhao, Meng Fan-zhi, Li Zeng-zhi. Useful lifetime maximization for partial coverage conserve in wireless sensor networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(10): 66 - 70. (in Chinese)
 [13] Penrose MD. On k-connectivity for a geometric random graph[J]. Random Struct. Algorithms, 1999, 15(2): 145 - 164.
 [14] Heinzelman W, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor

networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4):660 – 670.

- [15] 毛莺池, 龚海刚, 刘明, 陈道蓄, 谢力. ELIQoS: 一种高效节能、与位置无关的传感器网络服务质量协议[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(6): 1019 – 1026.

Mao Ying-chi, Gong Hai-gang, Liu Ming, Chen Dao-xu, Xie Li. An energy efficient and location-independent QoS protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(6): 1019 – 1026. (in Chinese)

作者简介:



孟凡治 男, 1985 年出生于四川省彭州市, 西安交通大学计算机科学与技术系硕士研究生, 研究方向为无线网络.

E-mail: mengfzh321@stu.xjtu.edu.cn



何 晖 女, 1970 年出生于河北省承德市, 西安交通大学计算机科学与技术系讲师, 研究方向为普适计算和操作系统.

E-mail: huihe@mail.xjtu.edu.cn



王换招 女, 1963 年出生于山西省万荣县, 工学博士, 西安交通大学计算机科学与技术系副教授, 研究方向为无线网络和嵌入式技术.

E-mail: hzhwang@mail.xjtu.edu.cn

