

最大化网络有效寿命的传感器网络覆盖保持协议

王换招, 孟凡治, 李增智

(西安交通大学计算机科学与技术系, 710049, 西安)

摘要: 为了保证监测区域覆盖质量,同时延长无线传感器网络有效寿命,构建了一种不需要地理位置信息的异构传感器网络冗余节点决策模型,由此提出了一种最大化网络有效寿命的异构传感器网络覆盖保持协议——ULMPCC. 根据节点剩余能量状况,关闭剩余能量相对较少的所有冗余节点,保留最少的工作节点,从而实现了分布式协作节点调度. 基于剩余能量的选举策略有效地平衡网络中的能量消耗,最大化了网络的有效寿命. 仿真实验表明,ULMPCC 能调度最少的工作节点,保证应用要求的覆盖质量,当期望的覆盖质量大于 90% 时,获得的覆盖质量与期望的覆盖质量的误差小于 1%.

关键词: 覆盖质量;节点调度;网络有效寿命;异构传感器网络

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)10-0066-05

Useful Lifetime Maximization for Partial Coverage Conserve in Wireless Sensor Networks

WANG Huanzhao, MENG Fanzhi, LI Zengzhi

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

Abstract: A decision model of redundant node without the location information is proposed for heterogeneous wireless sensor network to prolong the wireless sensor network useful lifetime as well as to maintain sufficient sensing coverage at a specific application level. Based on the model, a useful lifetime maximization for partial coverage conserve in wireless sensor network (ULMPCC) protocol is proposed. The protocol allows for closing all redundant nodes that have relative less residual energy according to their residual energy states so that the least number of nodes are maintained as working nodes and the distributed collaborative scheduling of nodes is achieved. The residual energy-based election strategy in ULMPCC effectively balances the network energy consumption, and maximizes the useful network lifetime. Simulation results show that ULMPCC guarantees the desired coverage QoS accurately and minimizes the number of active nodes. The error between the resulting coverage QoS and the desired coverage QoS is less than 1% when the desired coverage QoS is greater than 90%.

Keywords: coverage QoS; node scheduling; network useful lifetime; heterogeneous wireless sensor network

能量管理问题是传感器网络研究的重要问题,最有效的节能策略是利用节点的冗余性,通过启发式算法^[1-2]调度节点状态,在满足覆盖质量要求的前提下轮流关闭节点,节约网络能量. 目前,大多数覆

盖控制算法^[3-5]是根据节点的地理位置信息计算覆盖信息,然而基于地理位置信息的覆盖控制算法在没有精确位置信息的情况下很难正常工作. 所以,无需地理位置信息的拓扑控制策略^[6-9]逐渐成为研究

热点. 无需地理位置信息的拓扑控制策略很难实现网络的完全覆盖, 大部分应用也并不要求传感器网络完全覆盖整个监测区域, 只要网络在监测区域维持一个合理的覆盖率就可以满足应用需求. 采用部分覆盖控制策略^[7,9]不仅可以简化网络协议设计, 而且可以使网络配置更加灵活, 用户可以根据应用的需求均衡能量消耗与覆盖度.

本文提出了一种不需要地理位置信息的异构传感器网络冗余节点决策模型, 并在此基础上提出了一种最大化网络有效寿命的异构传感器网络覆盖保持协议——ULMPCC. 该协议可用最少的节点工作来保障应用要求的覆盖质量, 同时采用基于节点剩余能量的工作节点选取机制平衡网络能量消耗.

1 网络模型和问题描述

1.1 网络模型

所有传感器节点随机均匀地部署在一个二维的监测区域 M 内, 且该网络具有以下性质.

(1) 相对于节点的感知半径, 监测区域足够大, 边界因素可以忽略.

(2) 节点密度足够大, 若所有节点工作, 不但能够保证应用要求的覆盖质量, 而且还有较多的冗余节点.

(3) 节点采用布尔感知模型, 任意节点 i 的感知半径为 R_i , 节点 i 的感知区域是以该节点所在位置为圆心, 以 R_i 为半径的圆.

(4) 网络为同构或异构网络, 所有节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$, 且 $R_0 \geq 3.3\delta$ (保证节点的感知半径集中在 $[0, 2R_0]$ 内).

(5) 节点的通信半径 $R_c \geq 4R_0$, 即通信半径大于等于 2 倍的最大感知半径.

1.2 相关定义

定义 1 对于任意节点 i , 其覆盖邻居节点集定义为 $N(i) = \{j \in \phi \mid d(i, j) \leq R_i + R_j, i \in \phi, j \neq i\}$ 式中: ϕ 是所有布置在 M 中节点的集合; $d(i, j)$ 表示节点 i 和节点 j 之间的距离; R_i 和 R_j 分别表示节点 i 和节点 j 的感知半径.

定义 2 网络中所有工作节点构成的监测区域面积占整个 M 的比例称为该网络的覆盖质量, 即

$$\eta = \frac{\text{area}((\cup S_i) \cap M)}{\text{area}(M)}$$

式中: i 为工作节点; S_i 为节点 i 的监测区域; $\text{area}((\cup S_i) \cap M)$ 表示所有工作节点构成的监测区域与 M 相交部分的面积; $\text{area}(M)$ 表示整个监测区

域的面积. 实际上, 也可以用 η 表示网络覆盖率.

定义 3 网络能够保证应用要求覆盖质量的总时间称为网络的有效寿命.

1.3 问题描述

假设在 M 中随机均匀部署大量节点, 所有节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$. 在保证应用要求或者用户提供的覆盖质量的前提下, 建立冗余节点的判断模型, 以及根据冗余节点判断模型设计节点调度策略, 可关闭冗余节点, 节省节点能量, 延长网络的有效寿命.

2 冗余节点分析与协议

2.1 冗余节点分析

定理 1 M 内随机选取 k 个工作节点, 则 M 的覆盖质量期望为

$$E(\eta_k) = 1 - \left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)}\right)^k$$

证明 节点在 M 内服从随机均匀分布, 所以一个节点位于 M 内任意一点的概率为 $1/\text{area}(M)$. M 中任意一点 q 被一个传感器节点 a 覆盖 (a 的感知半径记作 R_a), 则 a 必须位于以 q 为圆心、以 R_a 为半径的圆内 (该圆记作 $\epsilon(q, R_a)$). 所以, q 被 a 覆盖的概率为

$$P_a = \frac{\text{area}(\epsilon(q, R_a))}{\text{area}(M)} \quad (1)$$

由于 a 的感知半径 R_a 服从正太分布 $N(R_0, \delta^2)$, 且 $R_0 \geq 3.3\delta$, 所以 M 中任意一点被一个工作节点覆盖的概率为

$$P = \int_0^{2R_0} P_a \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\delta} \exp\left(-\frac{(R_a - R_0)^2}{2\delta^2}\right) dR_a \quad (2)$$

令 $x = \frac{R_a - R_0}{\delta}$, 则

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{\text{area}(M)} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \left(\int_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} \delta^2 x^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \int_{-\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} 2\delta x R_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \int_{-\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} R_0^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx\right) = \\ &= \frac{1}{\text{area}(M)} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \left(-\delta^2 x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \Big|_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} + \right. \\ &\quad \left. (2\pi)^{1/2} \delta^2 + (2\pi)^{1/2} R_0^2\right) \approx \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)} \quad (3) \end{aligned}$$

由于 M 中所有节点的位置是相互独立的, 于是 M 中任意一节点至少被 k 个工作节点中的一个覆盖的概率为

$$P_k = \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} P^i (1-P)^{k-i} =$$

$$1 - (1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)})^k \quad (4)$$

设 M 中至少被 k 个工作节点中的一个覆盖的区域为 M' , 则 M' 的面积期望为

$$E(\text{area}(M')) = P_k \text{area}(M) \quad (5)$$

所以

$$E(\eta_k) = \frac{E(\text{area}(M'))}{\text{area}(M)} = 1 - (1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)})^k \quad (6)$$

根据定理 1, 可以推出满足应用要求覆盖质量 η_d 所需的最少工作节点数的期望为

$$E(k) = \ln(1 - \eta_d) / \ln(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)}) \quad (7)$$

定理 2 在随机无冲突关闭冗余节点后, 若剩余的工作节点能够准确地提供应用要求覆盖质量 η_d , 则冗余节点的工作覆盖邻居数 n 的期望满足

$$E(n) > (\ln(1 - \eta_d) / \ln(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)}) - 1) \cdot \frac{4\pi R_0^2 + 2\pi\delta^2}{\text{area}(M)}$$

证明 假设关闭冗余节点后的剩余工作节点数为 N , 则这 N 个工作节点仍然满足随机均匀分布. 由于剩余的工作节点能够准确地提供应用要求的覆盖质量, 所以由式(7)知

$$E(N) = \ln(1 - \eta_d) / \ln(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)}) \quad (8)$$

用 R_a 表示节点 a 的感知半径, R_b 表示节点 b 的感知半径. 如果 b 是 a 的覆盖邻居, 则 b 必须位于以 a 为圆心、以 $R_a + R_b$ 为半径的圆内 (该圆记作 $\epsilon(a, R_a + R_b)$). 所以, b 是 a 覆盖邻居的概率为

$$P_{b-a} = \frac{\text{area}(\epsilon(a, R_a + R_b))}{\text{area}(M)} \quad (9)$$

由于所有节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$, 且 $R_0 \geq 3.3\delta$, 所以一个节点是另一个节点覆盖邻居的概率为

$$\begin{aligned} P &= \int_0^{2R_0} \int_0^{2R_0} P_{b-a} \frac{1}{2\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{(R_a - R_0)^2 + (R_b - R_0)^2}{2\delta^2}\right) \cdot \\ &\quad dR_a dR_b = \frac{1}{\text{area}(M)} \left(\int_0^{2R_0} \int_0^{2R_0} 2\pi R_a R_b \frac{1}{2\pi\delta^2} \cdot \right. \\ &\quad \left. \exp\left(-\frac{(R_a - R_0)^2 + (R_b - R_0)^2}{2\delta^2}\right) \cdot \right. \\ &\quad \left. dR_a dR_b + \int_0^{2R_0} \int_0^{2R_0} 2\pi R_a R_b \frac{1}{2\pi\delta^2} \cdot \right. \\ &\quad \left. \exp\left(-\frac{(R_a - R_0)^2 + (R_b - R_0)^2}{2\delta^2}\right) dR_a dR_b \right) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(3)的计算过程知

$$\int_0^{2R_0} \int_0^{2R_0} \pi R_a^2 \frac{1}{2\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{(R_a - R_0)^2 + (R_b - R_0)^2}{2\delta^2}\right) \cdot dR_a dR_b \approx \pi(R_0^2 + \delta^2)$$

由于

$$\begin{aligned} &\int_0^{2R_0} R \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \delta} \exp\left(-\frac{(R - R_0)^2}{2\delta^2}\right) dR = \\ &\int_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} (R_0 + \delta x) \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = R_0 \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} &\int_0^{2R_0} \int_0^{2R_0} 2\pi R_a R_b \frac{1}{2\pi\delta^2} \cdot \\ &\exp\left(-\frac{(R_a - R_0)^2 + (R_b - R_0)^2}{2\delta^2}\right) dR_a dR_b = 2\pi R_0^2 \end{aligned}$$

于是

$$P = \frac{4\pi R_0^2 + 2\pi\delta^2}{\text{area}(M)} \quad (11)$$

剩余的 N 个工作节点中每一个节点的工作覆盖邻居数的期望为

$$\begin{aligned} E(n) &= (E(N) - 1)P = \\ &(\ln(1 - \eta_d) / \ln(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)}) - 1) \frac{4\pi R_0^2 + 2\pi\delta^2}{\text{area}(M)} \end{aligned} \quad (12)$$

所以冗余节点的工作覆盖邻居数 n 的期望满足

$$\begin{aligned} E(n) &> (\ln(1 - \eta_d) / \ln(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)}) - 1) \cdot \\ &\frac{4\pi R_0^2 + 2\pi\delta^2}{\text{area}(M)} \end{aligned} \quad (13)$$

2.2 ULMPPC 协议

由定理 2 知, 一个节点的工作覆盖邻居数如果满足

$$\begin{aligned} n &\geq \lceil (\ln(1 - \eta_d) / \ln(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)}) - 1) \cdot \\ &\frac{4\pi R_0^2 + 2\pi\delta^2}{\text{area}(M)} \rceil \end{aligned} \quad (14)$$

说明该节点是冗余节点, 可以将其关闭以节约网络能量. 在 ULMPPC 中, 每个节点有 4 种运行状态——工作状态 (ACTIVE)、退避状态 (BACK-OFF)、睡眠状态 (ASLEEP) 以及无效状态 (INVALID), 各状态间的转换关系如图 1 所示. 初始网络的所有节点通过广播 HELLO 消息来获得覆盖邻居节点的信息, 并将信息存入覆盖邻居表中, 然后进入工作状态. 当节点的工作覆盖邻居数满足式(14)时, 节点进

入退避状态, 节点停留在退避状态的时间可随机选取. 退避状态结束后, 节点再次判断其工作覆盖邻居

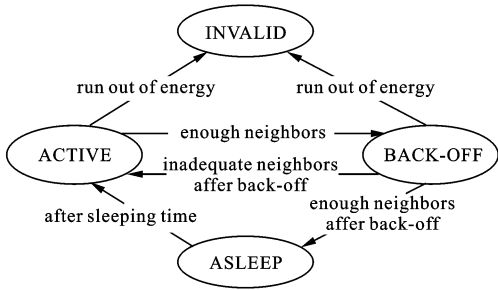


图 1 节点状态转移图

数是否满足式(14),如果不满足则回到工作状态,否则广播一个 SLEEP 消息,通知其覆盖邻居更新覆盖邻居表,然后进入睡眠状态并停留在睡眠状态一段固定时间(T_s)后再次进入工作状态.节点从睡眠状态进入工作状态后广播一个 ASK 消息,索要覆盖邻居节点信息.收到 ASK 消息的非睡眠状态的覆盖邻居节点将更新覆盖邻居表信息,并广播 HELLO 消息.最后,所有节点能量耗尽或节点发生故障进入无效状态.

上面的策略实现了用最少的节点工作来保证应用要求的覆盖质量,这样能最大限度地节约网络能量.由于网络中节点能耗不均匀会导致网络中的某些节点快速耗尽自己的能量而失效,从而形成覆盖漏洞,影响网络的有效寿命,为了最大化网络有效寿命,协议中还加入了基于节点剩余能量的工作节点选取机制,使能量少的节点有更多的机会进入睡眠状态.节点每次的退避时间在 $[0, T]$ 之间随机产生, T 的计算式为

$$T = (1 + \frac{\omega - \omega_{\min}}{\omega_{th}}) T_0 \quad (15)$$

式中: T_0 是一个固定时间基值; ω 是节点的剩余能量; $\omega_{\min}$ 是节点及其工作覆盖邻居剩余能量的最小值; ω_{th} 是能量调节阈值,该值的大小会影响退避时间的长短及节点能耗的均衡性.从式(15)可以看出,节点的剩余能量比其覆盖邻居的剩余能量大得越多,则 T 就越大,节点进入睡眠状态的概率就越小,从而可以实现节点能耗负载均衡.

3 ULMPCC 性能评价

为了验证协议的有效性和性能,利用 OPNET 仿真实验平台对协议进行实验和分析.仿真实验环境:监测区域为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,节点的感知半径服从正态分布 $N(10, \delta^2)$,节点的能耗模型采用文献[8]中的物理节点能耗模型;每个节点拥有的初始能量可以使节点在接收状态持续工作 1 h;节点的传

输率为 56 kb/s ; T_0 和 T_s 分别为 5 s 、 50 s ,一个节点处于接收状态 1 s 所消耗的能量为一个能量计量单位,能量调节阈值 ω_{th} 为 200 个能量计量单位.

3.1 协议的有效性

理想的覆盖控制算法应该利用最少的工作节点保证要求的覆盖质量.图 2 反映了 $\delta=3$ 时获得的覆盖质量与要求的覆盖质量之间的关系.可以看到,无论部署的初始节点数为多少,ULMPCC 均能保证要求的覆盖质量.由于节点的覆盖邻居数为整数,所以造成获得的覆盖质量略高于要求的覆盖质量,但随着要求覆盖质量的不断提高,它们之间的误差快速减小甚至接近于 0.

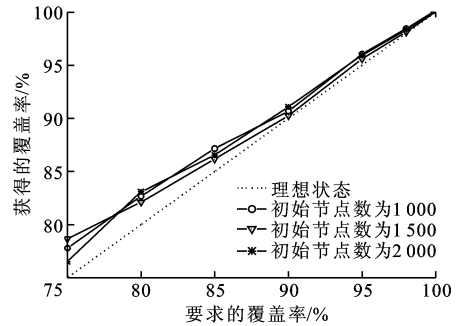


图 2 网络获得的覆盖率与要求的覆盖率的关系

图 3 反映了 $\delta=3$ 时工作节点数与部署节点数之间的关系.可以看出,无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.当 δ 改变时,ULMPCC 也具有这一特性.ULMPCC 的这一性质说明了它具有很好的可扩展性.从图 3 还能够看出,要求的覆盖质量越高,工作节点数就越多.

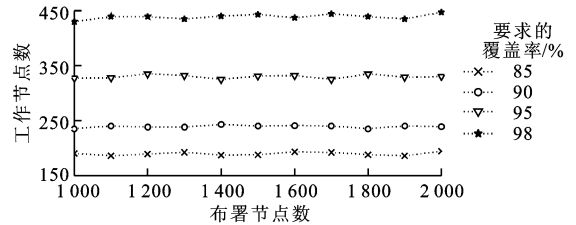


图 3 工作节点数与要求的覆盖率的关系

3.2 能耗均匀性与网络有效寿命

可用节点剩余能量百分比的标准差评价网络能耗的均匀性.图 4 显示的是网络工作 1 h 后节点剩余能量百分比的标准差,可以看出,节点密度高的网络,其能耗分布更均匀,这是由于在低密度网络中,有些节点的覆盖邻居数很少,为了保证覆盖质量,这些节点会一直工作,致使节点能量快速耗尽.从图 4

中还可以看出, w_{th} 越小, 网络能耗越均匀。

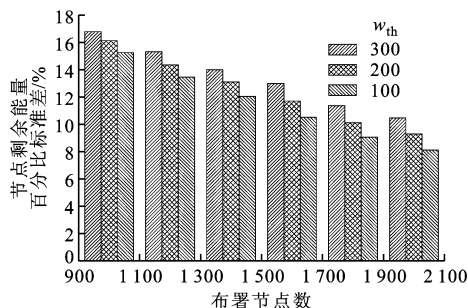


图4 能量消耗的均匀性

图5是获得的覆盖质量与时间的关系。使用ULMPCC协议调度节点后, 节点轮流工作, 由此极大地延长了网络有效寿命。从图5中还可以了解到, 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, 从而网络有效寿命就越短。这也体现了覆盖质量与网络有效寿命之间的转换关系。

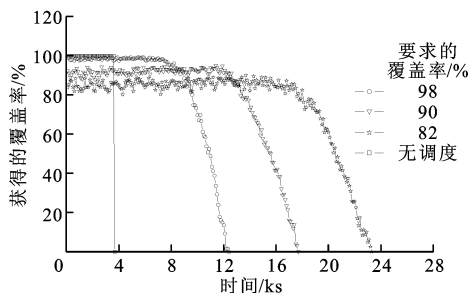


图5 获得的覆盖率相对于工作时间的关系

3.3 与其他协议的比较

为了比较协议的性能, 选取了文献[5]中的NRS协议和文献[8]中的LDAS协议作为比较对象, 结果如图6、图7所示。从图6可以看出, 在相同的覆盖质量下, ULMPCC的工作节点数和NRS的几乎相等。从图7可以看出, ULMPCC获得的覆盖质量能够满足应用要求, NRS则不行, 这也说明ULMPCC选举的工作节点比NRS更为均匀, 所以能提供更高的覆盖质量。由图6还可知, 在相同的覆盖质量下, LDAS的工作节点数比ULMPCC和NRS的多, 同时由图7可知, LDAS获得的覆盖质量也比要求的覆盖质量更高, 这说明LDAS选举的工作节点中还有大量冗余节点。造成这种结果的原因是, LDAS判断冗余节点的数学模型忽略了节点的2跳感知邻居对节点监控区域的覆盖贡献。综合上面的比较结果可以得出, ULMPCC可选举最少的节点工作来保证应用要求的覆盖质量, 它不仅适用

于同构网络, 也适用于异构网络。

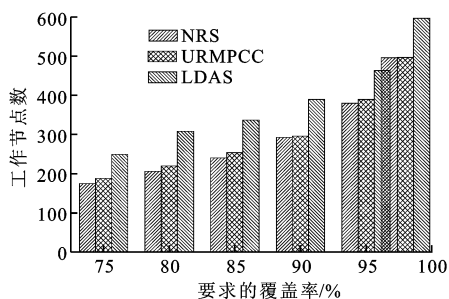


图6 3种协议的工作节点数比较

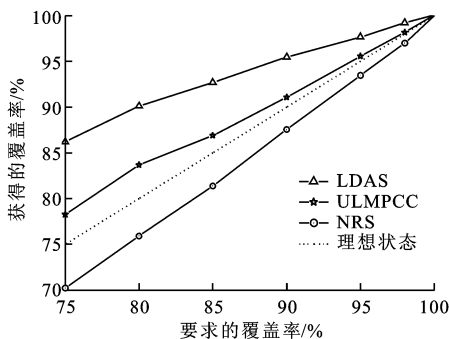


图7 3种协议获得的覆盖率比较

4 结 论

本文分析了随机部署异构传感器网络的冗余节点问题, 并给出了冗余节点的决策模型。该模型无需地理位置信息, 且适用于同构和异构网络。根据分析结果, 本文提出了一种最大化网络有效寿命的异构传感器网络覆盖保持协议, 协议中采用了基于节点剩余能量的选举策略, 使节点的能量消耗分布更为均匀。仿真实验表明, 所提协议能够保留最少的工作节点来提供应用要求的覆盖质量, 从而达到节约网络能量的目的。协议中的能耗均衡策略使节点的能耗分布均匀, 由此延长了网络有效寿命。

参考文献:

- [1] TIAN D, GEORGANAS N D. A Coverage-preserved node scheduling scheme for large wireless sensor networks [C] // Proceedings of 1st International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York, USA: ACM, 2002: 32-41.
- [2] YE Fan, ZHONG G, CHENG J, et al. PEAS: a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks [C] // Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 28-37.
- [3] ZHANG Honghai, HOU J C. Maintaining sensing

- coverage and connectivity in large sensor networks [J]. International Journal of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, 2005, 1 (1/2): 89-124.
- [4] ZHAO Qun, GURUSAMY M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2008, 16 (6): 1378-1391.
- [5] 王换招,董贝,罗寒梅,等. 基于 k -覆盖保证的异构传感器网络节点调度策略 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 940-944.
- WANG Huanzhao, DONG Bei, LUO Hanmei, et al. Node scheduling strategy based on k -coverage guarantee for heterogeneous wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8): 940-944.
- [6] CHOI W, DAS S K. Trade-off between coverage and data reporting latency for energy-conserving data gathering in wireless sensor networks [C]//2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 25-27.
- [7] LIU Benyuan, TOWSLEY D. A study of the coverage of large-scale sensor networks [C]//2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 475-483.
- [8] 刘明,曹建农,郑源,等. 无线传感器网络多重覆盖问题分析 [J]. 软件学报, 2007, 18(1): 127-136.
- LIU Ming, CAO Jiannong, ZHENG Yuan, et al. Analysis for multi-coverage problem in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Software, 2007, 18 (1): 127-136.
- [9] WU Kui, GAO Yang, LI Fulu, et al. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks [J]. Energy Constraints and Lifetime Performance in Wireless Sensor Networks, 2005, 10(6): 837-852.

(编辑 苗凌)