

ELIQoS :一种高效节能、与位置无关的传感器网络服务质量协议

毛莺池^{1,2,3} 龚海刚^{1,2} 刘明^{1,2} 陈道蓄^{1,2} 谢立^{1,2}

¹(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

²(南京大学计算机科学与技术系 南京 210093)

³(河海大学计算机及信息工程学院 南京 210098)

(maoyc@dislab.nju.edu.cn)

An Energy Efficient and Location-Independent QoS Protocol for Wireless Sensor Networks

Mao Yingchi^{1,2,3}, Gong Haigang^{1,2}, Liu Ming^{1,2}, Chen Daoxu^{1,2}, and Xie Li^{1,2}

¹(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

²(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

³(Computer and Information Engineering College, Hehai University, Nanjing 210098)

Abstract Wireless sensor networks often face the critical problem of maintaining the sufficient sensing coverage (QoS) at an application specific level while keeping a small number of nodes active at any time to save energy. To solve this problem, the relationship between the desired QoS requirement and the minimum number of active nodes is analyzed without the knowledge of location or directional information in the randomly deployed sensor networks. Based on the analytical results, an energy efficient and location-independent QoS (ELIQoS) protocol is proposed, which selects the minimum number of active nodes based on the nodes' energy without using any location information. Simulation and analysis study demonstrates that the ELIQoS protocol can not only reduce the network consumption and balance the energy dissipation among nodes, but can provide the desired QoS requirement effectively.

Key words wireless sensor networks; QoS; coverage; energy-efficiency; scheduling

摘要 如何保证在覆盖足够的监测区域的同时延长网络的寿命是无线传感器网络所面临的最重要问题之一,广泛采用的策略是选出工作节点以满足应用期望的服务质量(即覆盖率),同时关闭其他冗余节点.分析了随机部署网络在已知监测区域大小和节点感知范围情况下,无需节点位置信息,应用期望的服务质量与所需的工作节点数量之间的数学关系.在此基础上提出了一种高效节能、与位置无关的传感器网络服务质量协议(ELIQoS),协议根据节点能量大小,选取最少的工作节点满足应用期望的服务质量.实验结果表明,ELIQoS协议不仅可以有效地提供满足应用期望的服务质量,而且可以减少能量消耗,实现能耗负载均衡.

关键词 无线传感器网络;服务质量;覆盖;节能;状态调度

中图法分类号 TP393

收稿日期:2005-06-08;修回日期:2005-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(60573132);江苏省自然科学基金项目(BK2005411);国家“八六三”高技术研究发展计划基金项目(2004AA112090);国家“九七三”重点基础研究发展规划基金项目(2002CB312002)

1 引言

无线传感器节点的处理能力、通信带宽以及能量等资源非常有限,而且易于失效,无线传感器网络通常采用高密度部署(可高达 20 nodes/m^3)^[1]提高网络性能,但同时产生了可扩展性、信息冗余及无线信道干扰等一系列的问题,所以如何利用冗余节点成为设计无线传感器网络协议需要考虑的关键因素之一。

目前,广泛采用的策略是利用节点冗余性,通过启发式算法^[2,3]对节点状态进行调度,在满足应用期望的服务质量(即覆盖率)的情况下轮流关闭节点,减少能耗。现有的大多数覆盖协议^[2~9]都依赖于外部基础设施(如 GPS、有向天线),根据节点的位置信息计算覆盖关系。但是在传感器节点中嵌入 GPS 不仅成本较高,耗能多,同时存在一些准确定位的问题^[10]。另一方面,没有精确的位置信息很难准确地计算节点间的覆盖关系,关闭节点可能造成盲区。

然而大部分应用并不要求网络一直保持完全覆盖的状态,只要网络对监测区域维持一个合理的覆盖率就可以满足需求,故覆盖率可以作为衡量网络监测功能的服务质量(quality of service, QoS)之一^[11]。因此,本文针对随机部署传感器网络的特性,分析了在已知监测区域大小和节点感知范围情况下,无需节点位置信息,应用期望的服务质量与所需的工作节点数量之间的数学关系。根据分析结果,提出了一种高效节能、与节点位置无关的服务质量协议 ELIQoS。ELIQoS 协议根据节点能量大小选取最少的工作节点,满足应用期望的服务质量,达到节能的目的。

2 相关工作

覆盖问题是无线传感器网络中重要的研究问题之一,目前有许多相关的研究工作^[2~12]。

文献[4,5]分别提出了集中式的算法计算最大覆盖集,不具有良好的可扩展性,而且算法依赖节点的位置信息。Tian 等人在文献[2]中提出了免职合格规则(off-duty eligibility rule),可以根据节点的位置或信号达到角度计算节点间的覆盖关系。由于算

法没有考虑节点覆盖区域可能出现过多的重叠,导致工作节点数量过多,造成额外的能耗。基于探测(probing)的密度控制算法 PEAS^[3]要求每个睡眠节点定期地在其探测范围内探测邻居的状态,若在其探测范围内没有工作节点,则进入工作状态,否则仍处于睡眠状态。PEAS 算法可能导致某些节点持续工作,网络中的节点能耗不均匀,影响覆盖质量。分布式节点密度控制算法 OGDC^[7]讨论了网络覆盖和连通性的关系,并要求节点根据邻居信息、位置信息,计算节点间的覆盖关系。Sanli 等人根据节点位置信息,分析了节点冗余度与区域完全覆盖率之间的数学关系,并提出了基于邻居和基于虚拟栅格的覆盖算法^[8]。Xing 等人也提出了基于虚拟栅格的覆盖协议^[9],通过相邻栅格间的节点协同实现网络监测功能。Gao 等人提出了分析节点冗余度的数学模型^[12]。该模型不依赖于节点位置信息,节点根据邻居数量计算其成为冗余节点的概率。然而该数学模型要求节点事先知道邻居数量,这需要有专门的部件进行判断。

3 网络模型和问题陈述

3.1 网络模型

所有传感器节点随机均匀地部署在一个二维、边长为 L 的监测区域 M 内。现假设该无线传感器网络具有以下性质:

- (1) 相对于节点感知范围而言,监测区域 M 足够大($R_s \ll L$),边界因素可以忽略;
- (2) 所有节点部署后不再移动,无需人为维护,而且是同构的;
- (3) 节点采用布尔感知模型,即每个节点的感知范围是以节点为圆心、传感半径 R_s 为半径的圆,在感知范围内的所有节点都可以接收到其发送的消息,否则接收不到其发送的消息;
- (4) 网络中节点要求达到秒级的时间同步;
- (5) 每个节点无需装备 GPS,且不能通过测量或定位方法获得其具体的物理位置。

随机部署方式认为是易于实现和价格低廉的,而且对于预先未知监测区域情况的应用也是合理的,故网络模型是基于节点随机部署方式的^[13]。对于第 3 项性质,布尔感知模型被广泛地应用在传感器网络的研究工作中^[2~14]。

3.2 相关定义

定义 1. 邻域 (neighbor area). 对于任意一点 $q(x, y) \in M$, 其邻域定义为

$$N(x, y) = \{ \forall (x', y') \in M \mid (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \leq R_s^2 \}.$$

定义 2. 中心区域 M' (center area) 定义为

$$M' = \{ \forall (x, y) \in M \mid (x^2 \leq a) \wedge (y^2 \leq a) \},$$

其中 $a = (L/2 - R_s)^2$.

定义 3. 非中心区域 M'' (non center area) 定义为

$$M'' = \{ \forall (x, y) \in M \mid (x^2 > a) \vee (y^2 > a) \},$$

其中 $a = (L/2 - R_s)^2$, 即 $M'' = M - M'$.

定义 4. 服务质量期望值 q (the desired QoS) 定义为所有工作节点构成的监测区域面积期望占整个监测区域 M 面积的比例, 即

$$q = \frac{((\bigcup_{i=1}^K SR_i) \cap M)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}},$$

其中 SR_i 表示工作节点 S_i 的监测范围; K 表示工作节点的数量; M_{area} 表示整个监测区域的面积;

$((\bigcup_{i=1}^K SR_i) \cap M)_{\text{area}}$ 表示工作节点构成的监测区域与 M 交集的面积. 实际上, 服务质量期望值 q 也表示了网络覆盖率.

3.3 问题定义

假设在监测区域 M 中随机均匀部署 N 个节点, 每个节点 $S_i (1 \leq i \leq N)$ 的监测范围为 SR_i , 需要从 N 个节点中最少选取多少个工作节点, 使得

$$\frac{((\bigcup_{i=1}^K SR_i) \cap M)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}} \geq q$$

满足应用期望的服务质量 (其中 K 是最少选取的工作节点数量), 以及如何选取 K 个工作节点.

4 问题分析

在监测区域 M 中的任意一点 $q(x, y) \in M$, 若其邻域内至少存在一个工作节点, 则认为点 $q(x, y)$ 被覆盖. 设 θ 是区域中任意一点 q 被覆盖的概率.

先讨论如何计算任意一点 q 没有被随机选取的任一工作节点 $S_i (1 \leq i \leq N)$ 覆盖的概率 $P_{q(x, y)}$. 当工作节点 $S_i \in M - N(x, y)$, 则点 q 被认为没有被工作节点 S_i 覆盖, 得到:

$$P_{q(x, y)} = \int_{M - N(x, y)} \phi(x, y) dx dy, \quad (1)$$

其中 $\phi(x, y)$ 表示工作节点 S_i 位于点 q 的概率. 由于节点在监测区域 M 中符合随机均匀分布, 有

$$\phi(x, y) = \frac{1}{M_{\text{area}}}. \text{ 根据式(1)得到:}$$

$$P_{q(x, y)} = \int_{M - N(x, y)} \frac{1}{M_{\text{area}}} dx dy = \frac{M_{\text{area}} - N(x, y)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}} = 1 - \frac{N(x, y)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}, \quad (2)$$

其中 $N(x, y)_{\text{area}}$ 表示点 q 的邻域面积; M_{area} 表示监测区域 M 的面积. 那么, 任意一点 q 没有被 K 个工作节点覆盖的概率:

$$P_{q(x, y)}^K = \prod_{i=1}^K P_{q(x, y)}. \quad (3)$$

设 \bar{M} 表示 M 中没有被 K 个工作节点覆盖的区域 (即盲区), 其面积为 \bar{M}_{area} , 则 \bar{M}_{area} 的期望值为

$$E[\bar{M}_{\text{area}}] = \int_M \int P_{q(x, y)}^K dx dy. \quad (4)$$

节点符合随机均匀分布, 故区域 M 中没有被 K 个工作节点覆盖的区域占区域 M 的期望值为

$$\begin{aligned} E\left[\frac{\bar{M}_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right] &= \frac{\int_M \int P_{q(x, y)}^K dx dy}{M_{\text{area}}} = \\ &= \frac{\int_M \int \left(\prod_{i=1}^K (P_{q(x, y)})\right) dx dy}{M_{\text{area}}} = \\ &= \frac{\int_M \int \left(1 - \frac{N(x, y)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right)^K dx dy}{M_{\text{area}}} = \\ &= \left(1 - \frac{N(x, y)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right)^K. \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)也可表示为区域 M 中任意一点 q 没有被 K 个工作节点覆盖的概率. 因此, 在区域 M 中随机选取 K 个工作节点, 任意一点 q 至少被其中一个工作节点覆盖的概率 θ 为

$$\theta = 1 - E\left[\frac{\bar{M}_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right] = 1 - \left(1 - \frac{N(x, y)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right)^K. \quad (6)$$

根据服务质量期望 q 的定义,

$$\begin{aligned} q &= E\left[\frac{M_{\text{area}} - \bar{M}_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right] = 1 - E\left[\frac{\bar{M}_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right] = \\ &= 1 - \left(1 - \frac{N(x, y)_{\text{area}}}{M_{\text{area}}}\right)^K = \theta, \end{aligned}$$

故服务质量期望 q 可表示为在区域 M 中, 任意一点

至少被一个工作节点覆盖的概率 θ 。

根据式(6),对于 M 中的任意两点,若邻域面积相同,则至少被一个工作节点覆盖的概率相等。对于 $\forall (x,y) \in M'$,邻域面积 $N(x,y)_{area} = \pi R_s^2$ 。对于 $\forall (x,y) \in M''$,邻域面积小于 πR_s^2 。根据给定的网络模型,监测区域 M 足够大($R_s \ll L$), M'' 的面积可以忽略,近似地认为区域 M 中的任一点 q ,邻域面积 $N(x,y)_{area} = \pi R_s^2$ 。因此,区域 M 中任一点至少被一个工作节点覆盖的概率 θ 为

$$\theta = 1 - \left(1 - \frac{N(x,y)_{area}}{M_{area}}\right)^K = 1 - \left(1 - \frac{\pi R_s^2}{L^2}\right)^K \quad (7)$$

故有服务质量期望:

$$q = \theta_{(x,y) \in M} = 1 - \left(1 - \frac{\pi R_s^2}{L^2}\right)^K \quad (8)$$

根据式(8),可以得到随机部署网络在已知区域大小和感知范围情况下,无需节点的位置信息,最少选取 K 个工作节点满足应用期望的服务质量 q 。所以有:

$$K = \left\lceil \frac{\ln(1-q)}{\ln\left(1 - \frac{\pi R_s^2}{L^2}\right)} \right\rceil \quad (9)$$

为了验证式(9)的正确性,将理论分析与模拟实验的结果进行比较(见图1)。可以看出,由式(9)计算得到的工作节点数量与服务质量期望值 q 的关系曲线与模拟实验的结果非常吻合,误差不大于 5%。

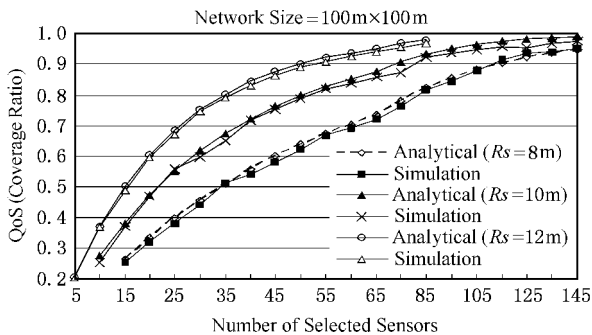


Fig. 1 Comparison of simulation with analytical results for covering a monitored area.

图1 模拟实验与理论分析结果比较

5 ELIQoS 协议

ELIQoS 协议按轮(round)运行,每轮分为工作节点选取和节点监测两个阶段。在节点选取阶段,

每个节点根据能量大小随机地选为候选工作节点,然后根据邻居工作节点数量决定自身状态。在监测阶段,工作节点将收集的数据传送到基站,而其他节点处于睡眠状态。

5.1 工作节点选取机制

在已知监测区域大小和节点感知范围条件下,若给定期望的服务质量 q ,根据式(9)可以得到最少需要选取 K 个工作节点满足需求。在网络中随机选取 K 个节点作为工作节点,满足应用期望的服务质量。显然这是最简单的,不需要消耗额外能量,但是选取机制完全是随机的,导致节点能耗负载不均衡。为此,ELIQoS 协议采用基于节点能量的选取机制,每个节点都有机会选为工作节点,而且能量大的节点尽可能地选为工作节点。

在每一轮,每个节点生成一个在 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数 $Rand_i(1 \leq i \leq N)$,并计算自己在此轮中被选为工作节点的阈值 $T(n)$ 。若 $Rand_i \leq T(n)$,则被选为工作节点,否则关闭其通信设备。计算阈值 $T(n)$ 与文献[15]选取簇头的机制类似,公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} T(n) &= \frac{P_{work}}{1 - P_{work} \times \left(Round \bmod \left\lfloor \frac{1}{P_{work}} \right\rfloor \right)} \\ &\quad \left(\frac{E_{curr}}{E_{max}} + \left(Round \div \left\lfloor \frac{1}{P_{work}} \right\rfloor \right) \times \right. \\ &\quad \left. \left(1 - \frac{E_{curr}}{E_{max}} \right) \right), \forall n \in V, \\ T(n) &= 0, \forall n \notin V, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

其中, P_{work} 为被选为工作节点的概率,即 $P_{work} = \frac{K}{N}$; $Round$ 为协议运行的轮数; $Round_s$ 表示节点连续没有选为工作节点的轮数,当节点成为工作节点后, $Round_s$ 重置为 0; V 表示在已经运行的 n 轮中没有被选为工作节点的集合 $\left(0 \leq n \bmod \left\lfloor \frac{1}{P_{work}} \right\rfloor \leq \left\lfloor \frac{1}{P_{work}} \right\rfloor - 1 \right)$ 。协议每运行 $\left\lfloor \frac{1}{P_{work}} \right\rfloor$ 轮后,网络中所有节点全部重置。因此,当节点在某一轮中被选为工作节点后,在其后若干轮中将不再参与工作节点选取,即 $T(n) = 0$,直到协议运行完 $\left\lfloor \frac{1}{P_{work}} \right\rfloor$ 轮之后。

从式(10)可以看出,若节点在一轮中选为工作节点,那么只有在所有节点都选为工作节点之后才

有机会再选为工作节点. 另一方面, 节点能量越大其阈值 $T(n)$ 就越大, 被选为工作节点的几率就越大, 可以实现节点能耗负载均衡.

5.2 工作节点分布优化

基于节点能量选取机制没有考虑工作节点的分布情况. 为了避免工作节点分布不均匀, ELIQoS 协议根据文献 [12] 提出的节点冗余度数学模型, 对工作节点分布进行优化. 当邻居节点数量大于阈值 α 时, 说明节点成为冗余节点, 可以关闭通信设备; 否则节点必须作为工作节点, 保证网络的覆盖率. 阈值 α 的大小与应用期望的服务质量 q 相关.

设基于节点能量选取的工作节点为候选工作节点, 每个候选工作节点向邻居广播 SAM (status announcement message) 消息, 每个节点记录收到的 SAM 消息. 对于候选工作节点, 若 SAM 消息的数量大于阈值 α , 说明在其邻域内工作节点过于密集, 将状态设为“Sleep”并广播 SAM 消息, 同时邻居节点删除该节点信息; 否则候选工作节点设状态为“Active”, 成为工作节点. 对于非候选工作节点, 若 SAM 消息的数量小于阈值 α , 说明在其邻域内工作节点过于稀疏, 应作为工作节点, 将状态设为“Active”并广播 SAM 消息, 同时邻居节点添加该节点信息; 否则非候选工作节点设状态为“Sleep”, 关闭通信设备.

为避免多个节点同时关闭通信设备, 影响服务质量, ELIQoS 协议引入避让 (back-off) 机制. 即为每个节点设置一个在 $[0, T_w]$ 内均匀分布的随机时间 T_d , 每个节点在等待 T_d 时间之后再行状态决策. 若在等待时间内收到新的 SAM 消息, 则节点更新 SAM 消息表. 经过 T_w 后, 节点或者进入工作状态, 或者进入睡眠状态.

6 性能评价

6.1 模拟实验环境设置和参数

利用 GlomoSim 作为模拟实验平台对 ELIQoS 协议进行分析, 并从以下指标来评价, 即①协议有效性; ②工作节点分布; ③网络寿命; ④整体能量消耗; ⑤通信控制开销; ⑥节点能耗负载. 模拟实验使用与文献 [15] 相同的能量模型与参数, 实验参数见表 1.

模拟实验环境是监测区域大小为 $100\text{m} \times 100\text{m}$, 随机部署节点总数为 200, 节点感知半径为 10m .

Table 1 Simulation Parameters

表 1 模拟实验参数列表

Parameter	Value
Network Size (m)	(100, 100)
Deploy Node Number	200~900
Sensing Range (R_s) (m)	10
Transmission Range (R_t) (m)	25
Sink Position	(150, 200)
Threshold Distance (m)	75
E_{elec} (nJ/b)	50
ϵ_{fs} (pJ/b/m ²)	10
ϵ_{amp} (pJ/b/m ⁴)	0.0013
E_{fusion} (nJ/b/signal)	5
Data Packet Size (B)	500
Broadcast Packet Size (B)	25
Packet Header Size (B)	25
Round	5 TDMA Frames
Initial Energy (J/battery)	2
E_{min} (J/battery)	0.02

6.2 实验结果

(1) ELIQoS 协议有效性

有效的节点状态调度算法可以提供应用期望的服务质量. 图 2 是在不同的节点部署密度情况下, 获得的服务质量与期望值之间的曲线图, 可以看出两者的误差值小于 5%, ELIQoS 协议可以有效地满足应用期望的服务质量.

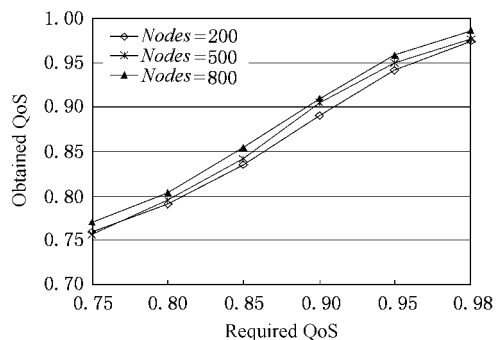


Fig. 2 Required QoS vs. obtained QoS.

图 2 期望的服务质量与获得的服务质量的关系

图 3 反映了选取的工作节点数量与部署节点总数之间的关系. 对于不同的服务质量期望值, 工作节点数量曲线几乎平行于 X 轴, 说明 ELIQoS 协议选取的工作节点数量与部署的节点总数无关, 只依赖于应用期望的服务质量 q . 期望的服务质量越高选取的工作节点数量越多.

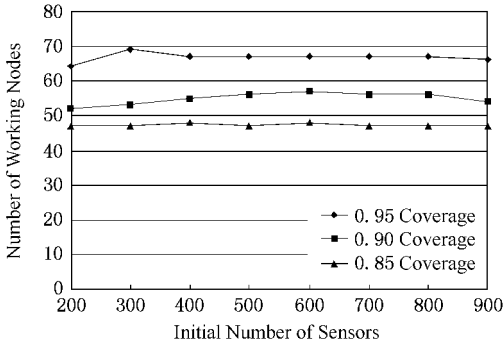


Fig. 3 Working nodes vs. deployed sensor nodes.

图3 工作节点数量与部署节点数量之间的关系

(2) 工作节点分布

图4是服务期望值 $q = 0.9$ 在第100轮时的工作节点分布示意图,选取的工作节点大约覆盖了整个区域的90%面积,并且分布良好.实验表明,ELIQoS协议选取的工作节点数量与监测区域 M 的面积、节点感知范围以及服务质量期望值有关,符合式(9).

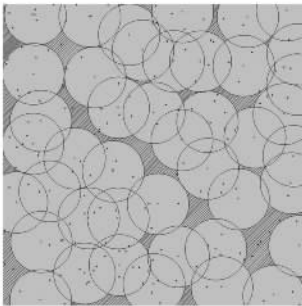


Fig. 4 Working nodes distribution graph ($q = 0.9$).

图4 工作节点分布示意图

(3) 能量消耗

实验利用ELIQoS协议扩展LEACH协议^[15],评价ELIQoS协议在能耗方面的性能.图5和图6分别给出了网络服务质量和整体能耗的曲线:

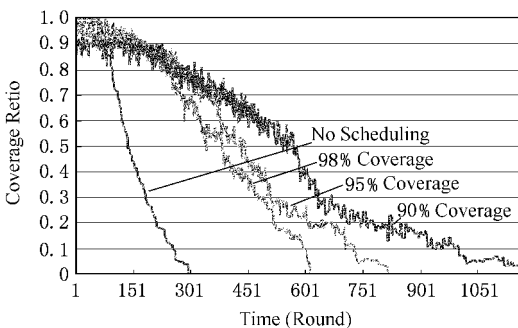


Fig. 5 Coverage ratio vs. time.

图5 获得的服务质量相对于运行时间的关系

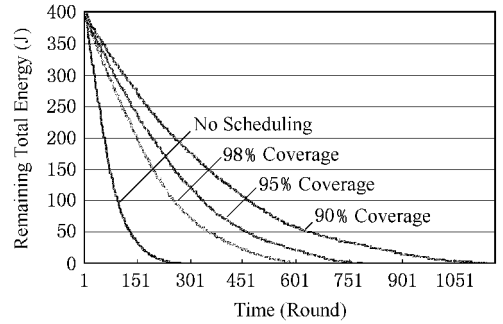


Fig. 6 Remaining total energy vs. time.

图6 网络剩余总能量相对于运行时间的关系

若不采用节点调度,所有节点始终处于工作状态,网络在最初的运行时间内可以提供最大的覆盖率,但是能耗迅速下降,服务质量也迅速下降.ELIQoS协议使节点轮流工作,延长网络寿命,并且可以在较长时间内提供应用期望的服务质量.另一方面,网络提供的服务质量越高工作节点数量就越多,能耗就越大,服务质量下降地也越快,说明网络提供的服务质量与整体能耗之间是一种折中关系.

(4) 控制开销

ELIQoS协议在对节点分布优化时,要消耗能量收发控制消息.工作节点在监测阶段也消耗大量能量发送数据.因此,每轮时间间隔越短节点能耗负载越均衡,但是收发控制消息次数就越多,开销就越大.每轮时间间隔用节点发送TDMA帧数表示,控制开销表示为收发消息能耗占整体网络能耗的比值.图7反映了节点总数、每轮时间间隔和控制开销之间的关系.节点总数为500,服务质量 $q = 0.9$,时间间隔从6个TDMA帧变化到14个TDMA帧,控制开销从12.3%减少到5.47%,说明节点密度比较大时,控制开销对每轮时间间隔是比较敏感的.另一方面,相同的时间间隔,节点密度越大其控制开销越大.但当时间间隔较大时,其控制开销并不是很大,比如部署500个节点,时间间隔为14TDMA帧,

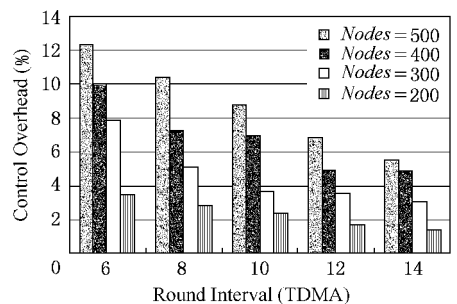


Fig. 7 Control overhead vs. round interval.

图7 控制开销与每轮时间间隔之间的关系

控制开销只有 5.47%。

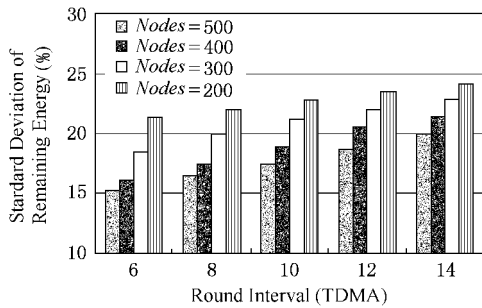


Fig. 8 Standard deviation of node energy vs. round interval.

图 8 节点能耗负载标准偏差与每轮时间间隔的关系

(5) 能耗均衡

用节点剩余能量的标准偏差来评价节点能耗负载情况,标准偏差越小能耗负载越均衡.图 8 反映在协议运行 100 轮时,不同的部署密度和每轮时间间隔,节点能量的标准偏差.部署密度越大,节点能耗负载越均衡,这是由于每个节点的工作邻居数量相差无几,节点轮流工作.另一方面,相同的部署密度,时间间隔越短,工作节点在一轮中耗能就减少,负载就越均衡.

7 结 论

本文针对随机部署传感器网络的特性,分析了在已知监测区域大小和节点感知范围前提下,无需节点位置信息,应用期望的服务质量与所需的工作节点数量之间的数学关系.根据分析的结果,提出了一种高效节能、与节点位置无关的服务质量协议(ELIQoS).协议根据节点能量大小选取最少的工作节点,并对节点分布进行优化,满足应用期望的服务质量.模拟实验结果表明,ELIQoS 协议不仅可以较长时间地提供应用期望的服务质量,而且能够有效地减少能量消耗,实现节点能耗负载均衡.

参 考 文 献

- 1 E. Shih, S. Cho, N. Ickes, *et al.* Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. The 7th Annual Int'l Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom 01), Rome, Italy, 2001
- 2 D. Tian, N. Georganas. A coverage-preserved node scheduling scheme for large wireless sensor network. The 1st Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA '02), Atlanta, USA, 2002

- 3 F. Ye, G. Zhong, S. Lu, *et al.* PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. The 23rd Int'l Conf. Distributed Computing Systems (ICDCS), Providence, USA, 2003
- 4 S. Slijepcevic, M. Potkonjak. Power efficient organization of wireless sensor networks. The IEEE Conf. Communications, Helsinki, Finland, 2001
- 5 M. Cardei, D. MarCallum, X. Cheng, *et al.* Wireless sensor networks with energy efficient organization. Journal of Interconnection Networks, 2002, 3(3/4): 213~229
- 6 Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. ACM MOBICOM '01, Rome, Italy, 2001
- 7 H. Zhang, J. C. Hou. Maintaining scheme coverage and connectivity in large sensor networks. The NSF Int'l Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks, Chicago, USA, 2004
- 8 Hidayet Ozgur Sanli, Hasan Cam. Energy efficient differentiable coverage service protocols for wireless sensor networks. The 3rd IEEE Int'l Conf. Pervasive Computing and Communications (PerCom 2005), Kauai Island, Hawaii, 2005
- 9 G. Xing, C. Lu, R. Pless, *et al.* Co-Grid: An efficient coverage maintenance protocol for distributed sensor networks. The 3rd Int'l Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04), Berkeley, CA, 2004
- 10 I. Stojmenovic. Position based routing in ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(7): 128~134
- 11 S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak, *et al.* Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. IEEE INFOCOM2001, Anchorage, USA, 2001
- 12 Y. Gao, K. Wu, F. Li. Analysis on the redundancy of wireless sensor networks. The 2nd ACM Int'l Conf. Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 03), San Diego, CA, 2003
- 13 S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, W. Heinzelman. Infrastructure tradeoffs for sensor networks. The 1st Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA '02), Atlanta, USA, 2002
- 14 S. Shakkottai, R. Srikant, N. Shroff. Unreliable sensor grids: Coverage, connectivity and diameter. The IEEE InfoCom, San Francisco, USA, 2003
- 15 W. Heinzelman. Application-specific protocol architecture for wireless sensor networks: [Ph. D. dissertation]. Cambridge, MA: MIT, 2000



Mao Yingchi, born in 1976. Ph. D. candidate at Nanjing University. Her main research areas are distributed computing and wireless network.

毛莺池, 1976 年生, 博士研究生, 主要研究方向为分布计算与并行处理。



Gong Haigang, born in 1975. Ph. D. candidate at Nanjing University. His main research areas are distributed computing and wireless network.

龚海刚, 1975年生, 博士研究生, 主要研究

方向为分布计算与并行处理.



Chen Daoxu, born in 1947. Professor and doctoral supervisor at Nanjing University. His main research areas are distributed computing and pervasive computing.

陈道蓄, 1947年生, 教授, 博士生导师, 主

要研究方向为分布计算与并行处理.



Liu Ming, born in 1973. Ph. D. candidate at Nanjing University. His main research areas are distributed computing and wireless network.

刘明, 1973年生, 博士研究生, 主要研究方

向为分布计算与并行处理.



Xie Li, born in 1942. Professor and doctoral supervisor at Nanjing University. His main research areas are distributed computing and network security.

谢立, 1942年生, 教授, 博士生导师, 主要

研究方向为分布计算与并行处理.

Research Background

Wireless sensor networks often face the critical problem of maintaining the sufficient sensing coverage (QoS) at an application specific level while keeping a small number of nodes active at any time to save energy. The solutions usually depend on geography information to check whether a sensor's sensing area can be completely covered by others and schedule the nodes' state. However, at present the node with GPS is infeasible and too costly. In this paper, we analyze the relationship between the desired QoS and the minimum number of active nodes without the knowledge of location information in the randomly deployed sensor networks. Based on the analytical results, we introduce an energy efficient and location independent QoS (ELIQoS) protocol, which selects the minimum number of active nodes based on the nodes' energy without using any location information. Our research work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60573132, Jiangsu Natural Science Foundation under grant No. BK2005411, the National High-Tech Research and Development Program of China (863) under grant No. 2004AA112090, and the National Basic Research Program of China (973) under grant No. 2002CB312002.