

保障监测时延的无线传感器网络感知调度算法

姚道远^① 张宝贤^{①②} 刘海涛^①

^①(中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室 上海 200050)

^②(中科院研究生院计算与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 针对重点区域事件监测应用中, 无线传感器网络需要满足不同监测时延要求, 该文首先分析了点目标监测应用的时延下界, 设计了多项式的最优自适应占空比分布式感知调度算法。在此基础上, 设计了一个面向局部重点区域的事件监测分布式感知调度算法(LDSS)。LDSS 具有较低的计算复杂度和通信复杂度。仿真结果显示, 与现有的随机调度算法相比, LDSS 能获得监测时延更接近于理论时延下界的性能。

关键词: 无线传感器网络; 事件监测; 感知调度; 监测时延; 分布式算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1591-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00752

Algorithms for Detection Latency Guaranteed Scheduling in Wireless Sensor Networks

Yao Dao-yuan^① Zhang Bao-xian^{①②} Liu Hai-tao^①

^①(Key Lab of Wireless Sensor Network and Communications, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

^②(College of Computing and Communication Engineering, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In applications like event detection, a Wireless Sensor Network (WSN) may be required to satisfy various detection latencies. In this paper, the lower bound of average detection latency is first analyzed for point coverage in a WSN. Then a polynomial distributed node sensing scheduling algorithm, which can adaptively adjust the sensing duty of sensor nodes and achieve the minimal detecting latency, is designed according to sensing tasks with various delay requirements. Furthermore, a Low-complexity Distributed Sensing Scheduling (LDSS) algorithm, which can apply to the area monitored by randomly deployed sensors is designed. Simulation results show that LDSS can obtain a lower average detecting latency than existing algorithm with acceptable overhead.

Key words: Wireless Sensor Networks; Event surveillance; Sensing scheduling; Detection latency; Distributed algorithm

1 引言

事件监测^[1]是一类重要的传感器网络应用^[2], 本文面向突发事件检测和汇报应用。由于传感器节点具有电池容量有限和难以更换或二次充电等特点, 事件检测无线传感器网络存在两大关键问题。首先, 系统需要提供所需的事件检测质量, 即任何事件需要在尽可能短的时间内被检测到。其次, 提高协议的效率, 减少节点能耗并考虑节点间能耗均衡。现有的部分研究^[3]集中于提供完全感知覆盖, 潜在的事件能立刻被检测到。但实际应用中, 大部分事件

会持续存在一段时间而不是瞬间消失^[4], 这种特性使得传感器处于较低的感知任务占空比时仍可以监测到事件。本文将重点研究满足应用监测时延要求的节点级感知调度方法。

感知调度主要研究感知覆盖问题^[5,6], 即在保证目标点或区域在任意时刻都至少被 $k(k \geq 1)$ 个节点不间断覆盖的前提下, 如何减少参与执行感知任务的节点总数。但是, 不间断覆盖(或称完全监测)将消耗更多的节点能量, 因而能量利用效率不高。结合无线传感器网络的应用特性和要求, 部分覆盖通过周期性节点睡眠调度(包括感知部件和通信部件)将可以在网络寿命和监测质量之间建立良好的折衷关系, 是本文的主要研究对象。

目前国外有关局部覆盖领域的研究中, 文献[7]等提出了基于精确位置信息的能量高效的节点调度

2009-05-18 收到, 2010-02-08 改回

国家 863 计划项目(2007AA01Z2A8)和国家科技重大专项课题

(2009ZX03006-001, 2009ZX03006-006)资助课题

通信作者: 姚道远 yaody1982@163.com

协议,文献[8]提出了位置无关的分布式扩展网络生存周期的节点调度协议,基本思想为将所有传感器节点随机归类于 $k(k \geq 1)$ 个不相交的节点子集,并按轮次调度。文献[9]分析了平均事件监测时延,节点布设改为与实际更相符的泊松点过程。文献[10]提出在监测和传输两个阶段最小化监测时延的优化算法,既没有探讨全局监测时延,也没有系统地分析节点间协同调度与监测时延之间的关系。文献[11]提出了泊松点分布下的过监测问题,设计了节点间协同唤醒协议,但没有给出时延的下界,也没有探讨平均监测时延、节点密度和调度机制之间的本质联系。以上算法没有讨论自适应节点密度以满足不同应用需求的问题,因此无法灵活调节任务占空比,以支持用户动态可控的监测时延等服务质量。国内相关研究中,文献[12]利用了邻居节点信息减少工作节点数量,但并不是针对具有一定时延容忍度的事件监测应用。文献[13,14]提出面向事件监测的基于栅格的感知调度方法,但要求节点获得一定精度的位置信息,也不是针对满足不同级别 QoS 应用需求的目标设计调度算法。

本文沿着由点到面、由简单到复杂的研究路线,首先分析了基于点目标的事件监测模式的监测性能,获得最小监测时延和相应的条件,指导设计了占空比可自适应调节的分布式最优感知调度算法。在点目标监测算法的启发下,设计了近似最优的局部区域事件监测模式的分布式感知调度算法(LDSS),该算法具有较小的通信和计算开销。仿真结果显示该算法的平均监测延迟只超过理论监测时延下界 10%。相对于随机调度算法,LDSS 算法在满足相同的事件监测时延要求的前提下,能获得更低的感知任务占空比,因此能量效率更高。

2 理论分析和算法描述

首先定义本文需要的一些概念。

(1)点目标 网络中传感器节点监测的区域为单个格点,或者是所有网络内的传感器均可监测到的足够小的区域,如图 1(a)所示的阴影区域。

(2)局部区域 待监测的区域无法被任何单个传感器节点完全覆盖,需要多个传感器联合监测,单个传感器只能覆盖该区域的一部分,如图 1(b)所示的阴影区域(以圆形示例)。

2.1 基本假设

(1)传感器节点的感知模型为 0/1 模型,感知半径为 r_s 。

(2)为保证连通性,要求节点的通信半径 r_c 与感知半径 r_s 满足 $r_c \geq 2r_s$ 。

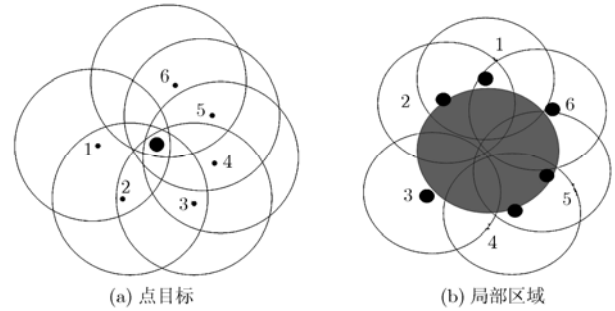


图1 传感器目标检测示意图

(3)所有节点时间同步,维护同一基准时间。节点按照帧周期调度,帧长为 T_C 。每个传感器在一帧中的确定时刻唤醒,工作 T_{ON} 时间后传感器模块进入休眠状态,通常, $T_{ON} \ll T_C$ 。

(4)节点可获得自身与待监测区域中心的距离,也可以通过 RSSI 估计与每个相邻节点之间的距离。

(5)事件监测时延可定义为从事件发生的时刻到事件被成功监测的时刻所经过的时间。

如图1所示,阴影区域为事件可能发生的范围,传感器节点均完整覆盖整个点目标。传感器感知调度如图2所示,文中所用变量见表1。

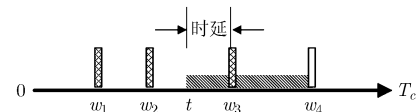


图2 节点调度和事件监测示意图

表1 变量表

参数名	描述
r_s	传感器节点的感知半径
r_c	节点的通信半径
T_C	传感器工作调度周期
D_L	用户定义的最大允许监测时延
λ	网络中节点平均密度
γ	每个感知周期内传感器唤醒概率

2.2 性能分析

定理 1 假设点目标被 k 个传感器覆盖,每个传感器唤醒时间为 w_i , 有 $0 \leq w_i \leq w_{i+1} \leq T_C, 1 \leq i \leq k-1$, 在 P 点发生的事件从发生到被监测的时延的期望值为

$$E[D] = \frac{1}{T_C} \left(\sum_{i=1}^k w_i^2 - \sum_{i=1}^k w_i w_{(i+1) \bmod k} \right) + (w_1 - w_k + T_C / 2) \quad (1)$$

该定理由文献[12]提出,以此为基础得到定理2。

定理2 假设点目标被 k 个传感器覆盖,每个传感器唤醒时间为 w_i ,有 $0 \leq w_i \leq w_{i+1} \leq T_C, 1 \leq i \leq k-1$,则 P 点发生的事件从发生到被监测的时延的期望值当 $w_{i+1} - w_i = T_C/k, i = 1, \dots, k-1$ 时取最小值

$$E_{\min}[D] = T_C/2k \quad (2)$$

定理2给出了点目标监测情况下的最小平均监测时延和对应的节点唤醒时刻的条件,因为节点唤醒时刻需要协同优化方式来确定各自调度,因此称之为协同调度机制。在定理2的基础上得到定理3。

定理3 假设点目标被 k 个传感器完全覆盖, k 个传感器按照定理2给出的协同调度机制工作,但是在每个调度周期的确定的唤醒时刻 w_i 以概率 γ 唤醒,则平均事件监测时延

$$E[D] = \frac{T_C}{2k} \left(\frac{2-\gamma}{\gamma} \right) \quad (3)$$

证明 如果各传感器以概率1唤醒,则事件将在 $T_C/(2k)$ 的平均延迟内被监测到,当各传感器以概率 γ 唤醒,则附加时间 nT_C/k 内被监测到的概率为 $(1-\gamma)^n, n = 0, \dots, \infty$,平均监测时间经计算即可得到。

根据定理2和定理3得到推论1。

推论1 假设点目标被 $K(K \geq 1)$ 个传感器节点完全覆盖,但实际需要的平均最小监测时延为 D_L ,令 $k = T_C/(2D_L)$, $\mu = K/k$, μ 为系统参数,根据 μ 的取值,有以下情况:

(1) $\mu \geq 2$,可以通过将 K 个传感器平均划分为 $\lfloor \mu \rfloor$ 个互不重合的完全覆盖集合 ψ_i 。 $1 < \mu < 2$, K 个传感器节点按照定理2确定各自唤醒时刻,唤醒概率 $\gamma = 2/(\mu+1)$ 。 $\mu > 1$ 对应的类型称为过监测类型。

(2) $\mu = 1$,称为普通监测类型。应用定理2即可满足要求。

(3) $\mu < 1$,传感器布设密度较低,称之为欠监测类型。各传感器连续唤醒 $m = \lceil 1/\mu \rceil$ 次,时间间隔为 $T_C/(mK)$ 。

3 算法描述

3.1 点目标区域监测最优自适应占空比感知调度算法

针对点目标监测的全连通网络,假设应用要求监测时延不大于 D_L , $k = T_C/(2D_L)$ 。首先考虑 $\mu = K/k = 1$ 的普通监测类型。网络工作过程划分为两大阶段,第1阶段是确定监测时刻阶段,第2阶段为值守阶段。首先各传感器估计自身到监测点

$P(x_s, y_s)$ 的距离 d_i ,设置退避定时器 BO_i ,随机选择区间为 $[0, (d_i/r_s) \times BO_{\max}]$,其中 BO_{\max} 为最大退避时间参数。接着节点进入退避状态,在此状态节点可接收控制帧。定时器超时后检测无线信道为空闲则发送唤醒时刻确定帧(DEWU)。DEWU帧携带节点ID,唤醒时刻 w 。如果节点没有接收任何DEWU帧,则随机选择 $w \in (0, T_C/k)$ 。每个节点 s_i 根据接收到的DEWU帧确定自身的唤醒时刻 w_i ,当前接收的分组中最大唤醒时刻记为 w_{\max} ,设置自身唤醒时刻 $w_i = w_{\max} + T_C/k$ 。所有传感器均广播DEWU帧直到本阶段结束。值守阶段各传感器节点在唤醒时刻 w 周期性启动感知模块。 μ 取其他值时,根据推论1可设计类似算法,在此不再赘述。

3.2 面向局部区域的事件监测分布式感知调度算法(LDSS)

考虑局部监测区域为圆形凸区域的一般情况,假设该区域圆心为 $P(x_s, y_s)$,半径为 r_e 。算法设计存在的问题是如果 r_e 值足够大,不可能出现 K 个传感器节点能同时覆盖区域 A ,必然会被分割成多个子区域 $\alpha_i, i = 1, \dots, M$,由不同的传感器集合 ψ_i 监测,存在传感器集合 $\psi_i \cap \psi_j \neq \emptyset$ 的情况。针对局部区域的监测的有效传感器节点 K 的计算方式与点目标不同,局部区域监测中,传感器节点只能覆盖部分区域,首先给出 K 的计算公式,然后通过启发式思路设计近似最优的感知调度算法(LDSS)。

假设与所监测的局部区域相交的节点总数为 N ,以 $r_e = r_s = r$ 为例,给出 K 的计算公式。

如图3所示,圆区域 O 与传感器 S_i 的距离为 d_i ,相交区域面积为 $\text{RED}(d_i) = 4 \int_{d_i/2}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx$,因此

$$K = \sum_{i=1}^N \text{RED}(d_i) / (\pi r^2) \quad (4)$$

假设应用要求监测时延不大于 D_L , $k = T_C/(2D_L)$,描述 $\mu = K/k = 1$ 情况下的LDSS算法,其他情况类似。网络工作过程分为3个阶段:

(1) 邻居信息收集阶段,传感器节点获得邻居节点的基本信息(ID,位置)建立邻居信息列表NIT。各节点独自计算自身感知范围内属于局部区域的比

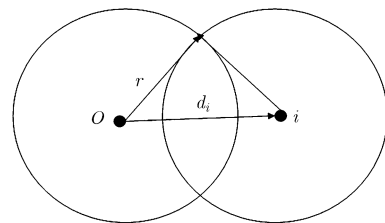


图3 局部区域和节点覆盖区域的重叠部分

例 sr 。

(2) 调整和确定感知时刻阶段, 该阶段包括 τ 个帧。每个帧开始时刻, 各节点根据自身计算的 sr 值在区间 $[0, (1 - sr) \times BO_{\max}]$ 随机选择退避时间, 超时后节点计算并更新自身调度时刻 w 并广播 DEWU 帧。任一节点 i 的更新调度时刻的方法如下: (a) 节点 i 未确定自身调度时刻则将所有邻居节点(邻居数为 n) 的 w_i 值以及 0 和 T_C 按照从小到达的顺序排序, 从所有的 $n + 1$ 个区间中寻找最大区间, 确定自身的调度时刻 w 。(b) 节点 i 已选定自身的调度时刻 w , 需要确定是否更新。准则如下: 将所有邻居节点(含自己)的调度时刻从小到大排序, 得到 n 个区间, 计算每个区间的长度 d_i , 并根据式(5)计算得到均方差 σ_1 , 根据情况(a)假设节点没有选定自身调度时刻, 计算出拟更新的时刻 w^* , 并重新计算均方差 σ_2 , 如果 $\sigma_1 - \sigma_2 > th$, 则更新 $w = w^*$, th 为系统参数, 并在 DEWU 帧中广播更新值。其中(a)在一个周期内完成, (b)在余下的 $\tau - 1$ 个周期内完成, τ ($\tau > 1$) 为系统可调参数。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n+1} (d_i - \bar{d})^2}{n + 2}} \quad (5)$$

其中 $\bar{d} = \left(\sum_{i=0}^{n+1} d_i \right) / (n + 2)$ 。该阶段核心算法的伪代码如算法 1(图 4)所示。

```

1. Input: NIT; //邻居表
   当前获得的邻居唤醒时刻  $w_1, w_2, \dots, w_n$ ; //各变量初值为空
2. if (节点  $s$  的唤醒时刻  $w$  未定)
3.   将  $0, w_1, w_2, \dots, w_n, T_C$  排序;
4.   计算  $d_i = w_{i+1} - w_i, i = 0, 1, \dots, n$ ;
5.   比较  $d_i$  得到  $d_{\max}$ , 获得对应区间  $\langle w_x, w_y \rangle$ ;
6.   确定节点  $s$  的唤醒时刻  $w = (w_x + w_y) / 2$ ;
7. else
8.   将  $w_1, w_2, \dots, w_n, w$  排序;
9.   计算  $d_i = w_{i+1} - w_i, i = 1, \dots, n$ ;
10.  利用式(5)计算均方差  $\sigma_1$ ;
11.  假定自身唤醒时刻  $w$  未定, 重复计算  $w^*$ ;
12.  以  $w^*$  为当前唤醒时刻, 利用式(5)计算均方差  $\sigma_2$ ;
13.  if ( $\sigma_1 - \sigma_2 > th$ )
14.    更新  $w \leftarrow w^*$ ;
15.  endif
16. endif
17. 广播 DEWU 帧;
18. END

```

图 4 局部区域事件监测中节点唤醒时刻更新算法

(3) 值守阶段 各个传感器最终确定自身的调度时刻后, 周期性在选定的时刻唤醒。

3.3 算法复杂度

算法 LDSS 的复杂度为 $O(d \lg d)$, 其中 d 是节点的最大邻居数。

4 算法仿真实验

4.1 仿真场景和参数

仿真场景如图 5 所示, 网络中随机布设 K 个传感器, 节点 1 所在位置代表事件源, 事件发生的范围是以节点 1 所在的位置为圆心, 以 r_e 为半径的圆内。仿真平台为 QualNet-v4.0, 在 QualNet 中设置物理层采用 802.15.4-PHY 协议, 双径模型, 理想无衰落信道, MAC 层采用 802.15.4-MAC 协议, 由节点 1 模拟协调器管理网络, 协调所有节点的通信调度。仿真参数如表 2 所示:

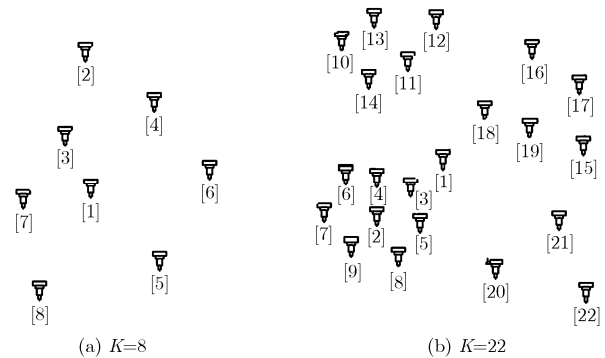


图 5 点目标区域(a)和局部区域(b)的仿真场景图

表 2 仿真参数

参数名	描述	默认值
r_e	事件发生区域范围	20 m
r_s	传感器节点感知半径	20 m
r_c	传感器节点通信半径	44 m
T_C	感知调度周期长度	61.44 ms
T_{SIM}	仿真时间	300 s

4.2 仿真结果

分别仿真了点目标事件监测算法和 LDSS 算法的平均监测延迟, 并分别仿真了对应的随机调度算法的性能, 图 6-图 8 为点目标监测的性能对比图, 图 9-图 11 为局部区域监测的性能对比图。

图 6 中 RD_sim 和 RD_theory 为随机调度算法的仿真和理论结果曲线, OPT_sim 和 OPT_theory 为点目标事件监测算法的仿真和理论结果曲线。由图 6 可以看出, 算法性能和理论分析非常吻合, 相对随机调度算法, 平均监测时延更小。

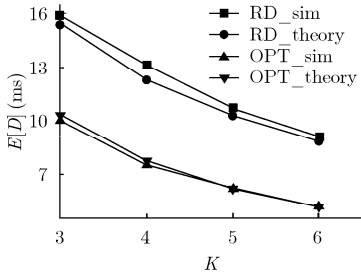


图 6 点目标监测算法(普通监测类型)和随机调度算法的仿真和理论性能对比图

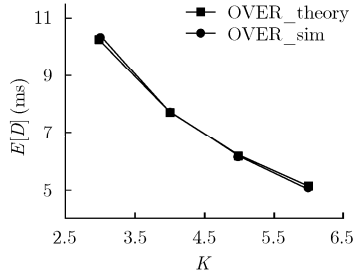


图 7 点目标监测算法(过监测类型)的仿真和分析结果对比图

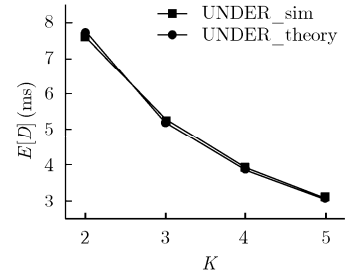


图 8 点目标监测算法(欠监测类型)的仿真和分析结果对比图

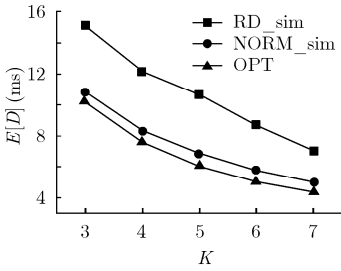


图 9 局部事件监测 LDSS 算法(普通监测类型)与随机调度算法的性能对比图

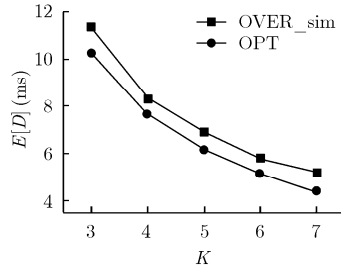


图 10 局部事件监测 LDSS 算法(过监测类型)性能仿真图

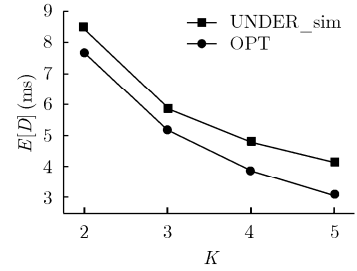


图 11 局部事件监测 LDSS 算法(欠监测类型)性能仿真图

图 7 中 OVER_theory 和 OVER_sim 为点目标监测算法的过监测类型下的理论和仿真结果曲线。X 坐标表示传感器数 k , Y 坐标表示事件监测平均时延。可以看出仿真结果与理论值十分吻合。

图 8 中 UNDER_sim 和 UNDER_theory 分别表示点目标监测算法的欠监测类型的仿真和理论结果曲线。由图可以看出, 仿真结果与理论值十分吻合。由图 6-图 8 得出结论, 本文所设计的点目标监测最优调度算法能正确得到理论分析的性能, 验证了算法设计的正确性。

图 9 X 坐标为有效覆盖节点数 K , Y 坐标为局部事件监测算法的平均时延 $E[D]$ 。RD_sim 表示随机调度算法的平均时延, NORM_sim 表示 LDSS 算法的时延, OPT 表示理论最小时延。由图可以看出, LDSS 算法相对随机感知调度算法能获得更加接近理论下界(定理 2)的最优性能。经过计算发现, LDSS 的平均事件监测延迟只超过理论下界额外 5%~10%。

图 10 是 LDSS 算法的过监测类型的理论最优性能的对比图, 仿真中局部节点密度 $1 < \mu < 2$, 所有节点在每个调度周期 T_C 内均唤醒 1 次。过监测类型的协同调度协议能获得接近于最优的监测时延性能。

由图 11 可以看出, LDSS 算法的欠监测类型也能获得接近于最优的监测时延性能, 统计发现仿真结果最多只超过理论下界 10%。

图 12 是 $T_C = 61.44 \text{ ms}$ 、 $K = k = 4$ 时 LDSS 算

法平均监测时延与调整周期数 τ 的关系曲线图。可以看出, 当 $\tau \geq 4$, 协议性能接近收敛于最优值。

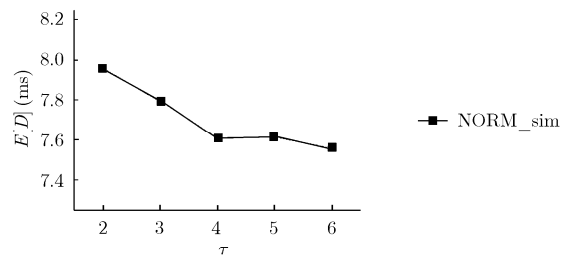


图 12 局部事件监测 LDSS 算法(普通监测类型)平均时延 $E[D]$ 与调整周期数 τ 的关系图

5 结束语

本文首先分析了点目标监测应用中获得理论上的最小监测时延, 并据此设计最优的点目标分布式感知协议, 该协议根据应用服务要求综合考虑了普通监测类型, 过监测类型和欠监测类型 3 种不同的监测类型, 仿真结果验证了协议的正确性。在点目标监测的基础上研究局部事件监测应用, 启发式设计了局部事件监测应用中接近最优性能的分布式感知调度协议, 仿真结果验证了协议相对于随机调度算法更加接近于理论上的时延下界, 且算法复杂度和开销较小。接下来的研究包括大规模无线传感器网络随机布设场景下的感知调度策略, 可以尽可能地在保证监测时延的基础上, 最大化网络寿命。

参 考 文 献

- [1] Brennan S, Mielke A, and Torney D. Radioactive source detection by sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(3): 813-819.
- [2] Yick J, Mukherjee B, and Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Journal of Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [3] Tian D and Georganas N D. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks[J]. *Wireless Communication and Mobile Computing*, 2003, 3(2): 271-290.
- [4] Dutta P, Grimmer M, Arora A, Bibyk S, and Culler D. Design of a wireless sensor network platform for detecting rare, random, and ephemeral events[C]. Proc.IEEE IPSN'05, LA,California, 2005: 497-502.
- [5] Yen L H, and Cheng Y M. Range-based sleep scheduling (RBSS) for wireless sensor networks[J]. *Journal of Wireless Personal Communications*, 2009, 48(3): 411-423.
- [6] Liu J X, Gu N J, and He S S. An energy-aware coverage based node scheduling scheme for wireless sensor networks[C]. ICYCS, Zhangjiajie, China, 2008: 462-468.
- [7] Carburnar B, Grama A, Vitek J, and Carburnar O. Coverage preserving redundancy elimination in sensor networks[C]. Proc. IEEE SECON'04, Santa Clara, CA, USA, 2004: 661-666.
- [8] Liu C, Wu K, and King V. Randomized coverage-preserving scheduling schemes for wireless sensor networks[C]. IFIP Networking 2005, Waterloo Ontario, Canada, 2005: 1-10.
- [9] Jiang J, Liu C, and Wu G F, *et al.* On location-free node scheduling scheme for random wireless sensor networks[C]. ICESS, Xi'an, China, 2005: 484-493.
- [10] Cao Q, Abdelzaher T, He T, and Stankovic J. Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection[C]. IPSN, Los Angeles, CA, 2005: 1-8.
- [11] Zhu Y M and Lionel M N. Probabilistic wakeup: Adaptive duty cycling for energy efficient event detection[C]. MSWiM, Greece, 2007: 360-367.
- [12] 石高涛, 廖明宏. 大规模传感器网络随机睡眠调度节能机制[J]. *计算机研究与发展*, 2006, 43(4): 579-585.
- Shi G T and Liao M H. Random sleep scheduling energy efficient scheme for large wireless sensor networks [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2006, 43(4): 579-585.
- [13] 胡湘华, 杨学军. 面向事件监测的无线传感网感知调度[J]. *软件学报*, 2008, 19(9): 2413-2421.
- Hu X H and Yang X J. Sensing scheduling algorithm of wireless sensor networks for event detection applications [J]. *Journal of Software*, 2008, 19(9): 2413-2421.
- [14] Chen X Y, Lyu M R, and Guo P. Voronoi-based sleeping configuration in wireless sensor networks with location error[C]. ICNSC, Hainan, China, 2008: 1459-1464.
- 姚道远: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向无线传感器网络与个域网协议.
- 张宝贤: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 研究方向无线传感网、无线网络协议与算法.
- 刘海涛: 男, 1968年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向传感器网络.