

## 面向事件监测的无线传感网感知调度\*

胡湘华<sup>+</sup>, 杨学军

(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

### Sense Scheduling for Event Detection in Wireless Sensor Networks

HU Xiang-Hua<sup>+</sup>, YANG Xue-Jun

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: E-mail: huxianghua@nudt.edu.cn

**Hu XH, Yang XJ. Sense scheduling for event detection in wireless sensor networks. Journal of Software, 2008,19(9):2413-2421.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2413.htm>

**Abstract:** In this paper, an efficient grid-based sense scheduling method for event detection in Wireless Sensor Networks is proposed. After grid-partitioning sensors in target environment, the sensors within each grid elect one representative to carry up the sense task in turn, which has low communication overhead, balanced energy consumption and good scalability. It is shown by analysis and simulation that the grid-based sense scheduling can achieve energy saving proportional to the node density and better detection delay than random scheduling. The method also provides means to balance network lifetime and detection quality by adjusting size of grids and duty time of nodes.

**Key words:** wireless sensor networks; event detection; energy saving; sense scheduling; detection delay

**摘要:** 针对事件监测应用的特点,提出了一种简单、有效的基于栅格的无线传感网感知调度方法。该方法首先对目标环境进行栅格划分,然后由栅格内的节点选举出代表轮流执行监测任务,具有通信开销小、电量消耗均衡、可扩展性好的特点。通过分析和模拟可知,基于栅格的感知调度可以获得与节点密度成正比的电量节省,并且在事件监测质量上优于随机调度方法。而且,通过调整栅格尺寸和节点工作时间,可以为平衡网络寿命和发现延迟提供有效的手段。

**关键词:** 无线传感网;事件监测;节能;感知调度;发现延迟

**中图法分类号:** TP393      **文献标识码:** A

作为一种崭新的信息获取方式,无线传感网(wireless sensor networks)<sup>[1-4]</sup>目前已成为国内外广泛研究的热点课题,在诸如军事侦察、环境监测、灾难抢险等各种领域具有广泛的应用前景<sup>[3,4]</sup>。事件监测是其中一种主要的应用类型。以战场监测应用为例,通过飞机或装甲车辆散布在敏感区域的微传感器负责监测敌方的行动,如空投的士兵、开过的坦克等。一旦发现入侵的目标,无线传感网必须快速反应并且迅速跟踪,将战场动态及时汇报给作战指挥员或启动地雷、导弹等武器进行防御性攻击。总之,无线传感网需要满足事件监测应用的下列基本

\* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2002AA1Z2105 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2007-01-09; Accepted 2007-05-24

需求:首先,由于监测任务的时间跨度一般都比较长,因此要求无线传感网保证较长的工作寿命;其次,事件的发生一般具有不可预测性和瞬间发生性,即大部分时间不会发生,而一旦发生必须即时发现和快速响应。

由于微传感器使用的电池容量有限而且难以更换,电源成为影响无线传感网工作寿命的瓶颈问题.节点调度则是一种延长无线传感网工作寿命的有效方法,即在一定的时间阶段和空间范围内,调度一部分节点进入工作状态,执行感知或通信任务,调度另一部分节点进入睡眠状态,从而提高网络级的能耗效率,延长工作寿命.注意到事件监测应用中的节点大部分时间都处于静默状态,发生在节点间的通信操作次数很少,而用于环境感知的电量将占整个系统电量消耗的主要部分.因此,本文研究工作的重点放在节点的感知调度方法上.

目前,大量的感知调度方法研究的主要内容是感知覆盖问题<sup>[5,6]</sup>,即保证目标环境在任意时刻都被节点的感知范围完全覆盖的前提下,如何减少参与感知任务的节点数量.对于事件监测应用来说,完全覆盖使得节点能够在第一时间发现事件,保证了事件的监测质量;但是,不间断的完全覆盖策略必然消耗更多的电量,影响了网络的工作寿命.局部覆盖策略为实现网络寿命和事件监测质量的折衷提供了进一步的可能性:目标环境在每个时刻只有局部被活跃节点覆盖,同时保证目标环境的每一个位置在有限的时间内都会被节点所感知.也就是说,在空间上是局部覆盖,在时间上是完全覆盖.文献[7]中提出的随机调度方法 RIS 基于时间同步支持,把时间划分为固定大小的时间片.在每个时间片的起始时刻,每个节点独立地以概率  $p$  进入工作状态、以概率  $(1-p)$  进入睡眠状态,所以,网络寿命可以近似延长  $(1/p)$  倍.Chao 等人在文献[8]中采用基于预设时间表的 RIS 方法,微观上每一个节点在每一个时刻处于激活状态的概率是  $p$ ;宏观上在指定区域内,每一个时刻处于激活状态的节点的平均数目是  $pN$  ( $N$  是区域内的节点总数).根据局部覆盖策略,本文提出一种基于栅格的感知调度方法,并且通过理论分析和实验仿真验证了它能够有效地延长网络寿命,同时具有优于随机调度方法的事件响应时间.

本文第 1 节给出事件监测的系统模型.第 2 节详细描述基于栅格的感知调度方法以及栅格代表选举算法.第 3 节从理论和实验两个方面对方法的性能进行分析和验证.最后给出结论.

## 1 系统模型

假设目标环境是二维平面上的  $L \times L$  正方形区域,数量为  $N$  的微传感器通过飞机撒播的方式随机、均匀地分布在目标环境内.记目标环境的面积为  $A=L^2$ ,节点密度  $d=N/A$ .假设每个节点的通信和感知范围都是以节点为圆心的圆形区域,所有节点具有相同的通信半径  $R$  和感知半径  $r$ ,且满足  $R>r$ .为描述方便,称以节点为中心、 $R$  为半径的圆形区域为节点的通信范围,称以节点为中心、 $r$  为半径的圆形区域为节点的感知范围.与节点的感知范围相对应的是目标的暴露范围.在本文中,称以目标为中心、 $r$  为半径的圆形区域为目标的暴露范围.所有节点通过节能、低成本的定位手段,可以估算出自己的位置信息,并且临近节点之间可以实现不严格的时间同步.基于上述假设条件,可以得到下面的关于节点分布特征的定理.

**定理 1.** 假设  $N$  个微传感器节点随机、均匀地分布在面积为  $A$  的目标环境内,节点的感知半径为  $r$ ,那么,以  $r$  为半径的感知范围内存在  $n$  个节点的概率是

$$\frac{\left(\pi r^2 \frac{N}{A}\right)^n}{n!} e^{-\left(\pi r^2 \frac{N}{A}\right)}, n=1,2,\dots,N \quad (1)$$

证明:由泊松定理可知,当  $n$  很大、 $p$  很小时,二项分布  $B(n,p)$  近似于泊松分布  $P(\lambda)$ ,其中, $\lambda=np$ .因为节点在目标环境随机均匀分布,所以,位于感知范围  $\pi r^2$  内的节点数量服从二项分布  $B(N,\pi r^2/A)$ .而传感网的节点总数  $N$  一般都足够大,且分布的目标环境面积  $A$  很大,即  $\pi r^2/A$  非常小.所以满足上述条件的二项分布可以近似为泊松分布  $P(N \times (\pi r^2/A))$ ,即  $P(\pi r^2(N/A))$ .得证.  $\square$

为了描述方便,记  $\alpha=\pi r^2(N/A)=\pi r^2 d$ ,物理意义是指位于感知范围内的节点数量的平均值.上述定理可以理解:任意一个物理位置被  $n$  个节点所覆盖的概率是  $\frac{\alpha^n}{n!} e^{-\alpha}$ ,其中, $n=0,1,2,\dots,N$ .

最后,本文用响应时间来描述事件监测质量,包括节点发现事件的延迟和引发响应的延迟两部分.其中,引发响应的延迟可能是把事件产生的消息从节点传送到基站的延迟,也可能是从节点发现事件到触发分布在目

标环境内的效应器动作的时间.本文主要研究节点发现事件的延迟,并给出定义.

**定义 1.** 事件的发现延迟定义为从目标事件的发生到第 1 个节点发现该事件的时间间隔.

实际上,由于事件发生的不确定性和节点在目标环境分布的随机性,用户关心的是事件的最大发现延迟和发现延迟的概率分布.前者是从目标事件的发生到第 1 个节点发现该事件的时间间隔上限,后者则描述了发现延迟的概率特征.

### 2 基于栅格的感知调度

本文提出的基于栅格的感知调度方法分为初始化和监测两个阶段:初始化阶段负责执行对目标环境的栅格划分;监测阶段则分成轮,在每轮由选举出的栅格代表节点代表栅格内的其他节点执行监测任务.下面分别对这两个阶段进行详细的说明.

#### 2.1 栅格划分

GAF 协议<sup>[9]</sup>是一种以保证网络连通性为目标的通信调度方法,主要内容是把目标环境划分成互不重叠、相同大小的栅格区域,在每个栅格中,由节点轮流执行路由转发功能.本文提出的感知调度方法借鉴了 GAF 的栅格划分方法,从而可以有效地保证网络的连通性.栅格划分必须满足下列两个条件:(1) 位于同一个栅格内的任意两个节点之间可以直接通信;(2) 位于相邻两个栅格内的任意两个节点之间可以直接通信.相邻的含义包括水平相邻、垂直相邻和对角线相邻.

如图 1 所示,设每个栅格的边长是  $g$ ,为了满足上述条件,处于相邻栅格内的任意两个节点间的距离必须小于节点的通信半径,即  $(2g)^2 + (2g)^2 \leq R^2 \Rightarrow g \leq \frac{R}{\sqrt{8}}$ .与前一节类似,可以证明分布在每个栅格内的节点数量服

从以  $\beta = g^2 \frac{N}{A} = g^2 d$  为参数的泊松分布,即每个栅格内的节点数量为  $n_g$  的概率是  $\frac{\beta^{n_g}}{n_g!} e^{-\beta}, n_g = 0, 1, 2, \dots, N$ .

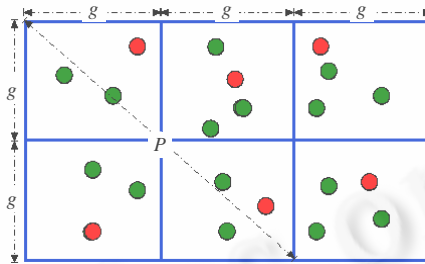


Fig.1 Grid partition

图 1 栅格划分

在初始化阶段,每个节点获得自己的位置信息,然后根据事先预定的目标环境的位置信息和栅格的大小,可以确定自己所属的栅格编号  $g_j$ ,并且通过交换和统计邻居信息获得同一栅格内的节点总数  $n_g^j$ .此外,邻近的节点之间也可以利用节能、低成本的不同步手段获得不严格的时间同步.对于整个无线传感网的工作时间来说,初始化阶段的时间长度仅占很小的比例,因而可以合理地忽略其造成的电量开销.

#### 2.2 代表选举

节点结束初始化阶段的栅格划分后进入监测阶段.监测阶段在时间上划分为轮,每一轮中每个栅格内只有一个代表节点处于工作状态,而其他所有节点都进入睡眠.通过轮流替换工作节点,可以保证任意一个位置都在有限的时间内被节点感知覆盖,同时,也可以实现节点之间均衡地消耗电池的电量.

在详细描述代表选举算法之前,通过图 2 所示的例子说明算法的基本思想.节点在初始化阶段除了执行定位操作和确定栅格节点总数以外,还负责执行代表选举算法,选举出进入监测阶段后第 1 轮的代表节点.此后,每一轮结束前都会再次执行代表选举算法,选举出下一轮的代表节点.如图 2 所示,每轮的时间长度设为  $T_a$ ,在每轮

结束前的  $T_s$  时间长度内执行选举算法,选举下一轮本栅格内的代表节点.当选代表节点的概率依赖于节点剩余电量的比例和连续未当选的次数,节点的剩余电量比例越高,连续未当选次数越多,当选下一轮代表的可能性就越大.基于上述选举原则,既可以有效地保证节点间电池电量消耗的均衡性,又保证了节点在有限的时间间隔内当选执行感知任务.同时,该算法有效地减少了通信和计算的开销,适应于无线传感网的应用需求.在后文中,我们将通过理论分析和实验结果来验证这种算法对于延长网络寿命、保证事件监测质量的效果.

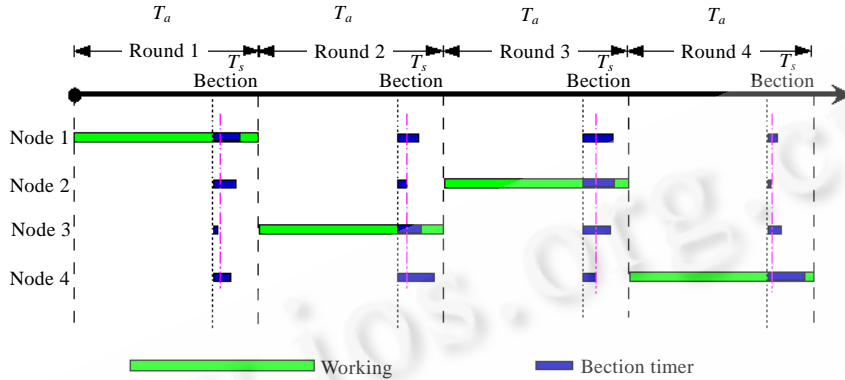


Fig.2 Example of representative election

图2 代表选举协议实例

算法 1. 代表选举.

输入: {节点号  $n_i$ , 栅格号  $g_j$ , 选举轮数  $k=1,2,3,\dots$ };

输出: {决定节点  $n_i$  是否成为栅格  $g_j$  下一轮的代表节点}.

- 01: IF {剩余电量  $E_{current}$  低于期望阈值  $E_{predict}$ }
- 02:     *PREDICT*=True
- 03: ELSE
- 04:     *PREDICT*=False
- 05: ENDF
- 06: 构造选举信息 [ $k, g_j, n_i, PREDICT$ ]
- 07: 计算投票定时器的时间长度  $t_i^k T_s$
- 08: 启动定时器, 等待定时器触发或接收到本栅格内其他节点的选举消息
- 09: IF {接收到本栅格内其他节点的选举消息}
- 10:     IF {*PREDICT*==True}
- 11:         栅格  $g_j$  的节点总数  $n_g^j = n_g^j - 1$
- 12:     ENDIF
- 13:     取消定时器, 放弃选举, 重新睡眠
- 14: ELSE
- 15:     广播选举消息, 当选第  $k+1$  轮代表节点
- 16: ENDF

算法中, 节点  $n_i$  在第  $k$  轮的投票定时器的时间长度是  $t_i^k T_s$ , 其中,  $t_i^k$  的计算公式是

$$t_i^k = 1 - \frac{1}{n_g^j} \left[ \frac{E_{current}}{E_{init}} + \left( \frac{r}{n_g^j} \right) \left( 1 - \frac{E_{current}}{E_{init}} \right) \right] \quad (2)$$

在上述计算公式中,  $n_g^j$  是栅格  $g_j$  中的节点总数,  $\frac{1}{n_g^j}$  表示栅格内每个节点具有平等的被选举权;  $r$  是节点连

续未当选代表的轮数,一旦当选为代表后,重置为 0;  $E_{current}$  是节点电池当前剩余的电量;  $E_{init}$  是节点电池的初始电量.可以看出,  $\frac{E_{current}}{E_{init}}$  越大,  $t_i^k$  越小,  $t_i^k T_s$  的值也越小,节点广播选举消息的时刻就越早,当选代表的可能性就越大.也就是说,通过引入  $E_{current}$  和  $E_{init}$ ,使电量消耗比例最低的节点优先当选代表.对于长时间没有当选代表的节点,当  $r$  达到  $n_g^j$  时,  $t_i^k T_s$  的值取最小值,使得当选代表的可能性最大.

另外,算法还考虑了节点由于电量耗尽所造成的影响.节点在选举时需要比较剩余电量和期望阈值.期望阈值的设定取决于节点工作一轮所消耗的电量.如果节点的剩余电量仅能满足下一轮的消耗,那么在完成下一轮的代表工作后,将由于电量不足而无法进行再下一轮的代表工作.因此,在选举消息中将设置 *PREDICT* 为真,如果该节点当选,那么其他节点将因获知这一消息而减少本栅格的节点总数  $n_g^j$ .

### 3 性能分析

#### 3.1 网络寿命

首先对栅格内节点的电量消耗进行分析.节点的感知部件和无线通信部件在工作状态下单位时间的电量消耗分别是  $\varepsilon_s$  和  $\varepsilon_c$ .考虑到节点数量是  $n_g^j$  的栅格  $g_j$ ,每一轮的时间长度为  $T_a$ .以不采用任何调度方法的情况作为基准,所有节点都同时打开感知部件和通信部件,因此,电量消耗总量为  $E_{naive} = n_g^j(\varepsilon_s + \varepsilon_c)T_a$ .在基于栅格的感知调度方法中,每一轮的代表节点替代其他节点执行感知和通信的任务,其余节点仅在长度为  $T_s$  的选举阶段打开通信设备,参与下一轮代表节点的选举.代表节点的电量消耗是  $(\varepsilon_s + \varepsilon_c)T_a$ ,剩余节点的电量消耗的总量是  $(n_g^j - 1)\varepsilon_c T_s$ .因此,得到电量消耗比值:

$$\frac{E_{grid}}{E_{naive}} = \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_c)T_a + (n_g^j - 1)\varepsilon_c T_s}{n_g^j(\varepsilon_s + \varepsilon_c)T_a} \quad (3)$$

当设置  $\frac{T_a}{T_s}$  较大时,上述比值近似于  $n_g^j$ .即栅格的网络寿命为基准的  $n_g^j$  倍.

在栅格内的选举阶段,第 1 个广播选举消息的节点当选代表,其他接收到该消息的节点取消自己的选举消息广播.因此,发生在选举阶段的发送操作是一次,而接收操作是  $(n_g^j - 1)$  次.总之,通信操作数是  $n_g^j$ ,而文献[10]中提出的 FULL 算法的是  $(3n_g^j - 2)$  次,RANDOM 算法是  $e \times n_g^j$  次.比较而言,本文的代表选举算法的通信开销仅为 FULL 和 RANDOM 算法的 30%.

#### 3.2 发现延迟

前文已经假设目标环境中每个位置都至少被一个节点所覆盖.在基于栅格的感知调度方法中,因为每个节点在  $\max\{n_g^j\} \times T_a$  时间内都会成为代表节点而进入工作状态,因此,对于静止的目标事件来说,最大发现延迟是  $\max\{n_g^j\} \times T_a$ ;而对于运动的目标事件来说,如果覆盖目标的运动轨迹的节点恰好在目标经过时处于睡眠状态,那么发现延迟无穷大,也就是说无法发现目标.但是对于事件监测应用来说,单次事件的不确定性使得发现延迟的概率特征更具有实际意义.使用文献[11]提出的概率分析方法,可以证明上面设想的最差情况是一种极小概率事件,实际的发现延迟仍然可以很好地满足应用的需求.

##### 3.2.1 理论基础

首先引入下面的概率论基本定理:

**定理 2.** 假设事件  $D$  在单个实验中发生的概率是  $p$ ,且实验的次数服从以  $\alpha$  为参数的泊松分布,那么,在所有实验中事件  $D$  至少发生一次的概率是

$$P = 1 - e^{-p\alpha} \quad (4)$$

对发现延迟的概率特征进行分析的基本思路是:首先考虑目标的暴露范围内只存在一个节点的情况,计算目标发现延迟  $t$  的概率.然后,根据定理 1 的证明,落在目标暴露范围内的节点数量服从泊松分布,因此,可以利用

定理 2 得到至少被一个节点所覆盖时的目标发现延迟  $t$  的概率.

3.2.2 静态目标

如图 3 所示,假设目标的暴露范围只存在一个节点  $C$ ,且节点  $C$  所在栅格中的节点总数  $n_g=3$ ,则可知节点  $C$  在  $n_g T_a$  时间内会有  $T_a$  的时间处于工作状态,即节点  $C$  可以发现静态目标的概率是  $\frac{T_a}{n_g T_a} = \frac{1}{n_g}$ .因此,节点  $C$  在  $t$  时间内发现静态目标的概率是  $P(t_d \leq t) = \frac{1}{n_g} \left(1 + \frac{t}{T_a}\right)$ ,其中,  $0 \leq t \leq (n_g - 1)T_a$ .又因为每个栅格内的节点数量为  $n_g$  的概率是  $\frac{\beta^{n_g}}{n_g!} e^{-\beta}$ ,所以得到单节点覆盖静态目标情况下的发现延迟小于  $t$  的概率是

$$P(t_d \leq t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-\beta} \beta^k}{k!} \times \frac{1}{k} \left(1 + \frac{t}{T_a}\right) \right) = \left(1 + \frac{t}{T_a}\right) e^{-\beta} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta^k}{k \times k!}$$

设  $f(m) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{m^k}{k \times k!}$ , 有  $f'(m) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{m^{k-1}}{k!} = \frac{e^m - 1}{m}$  且  $f(0) = 0$ , 所以  $f(\beta) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta^k}{k \times k!} = \int_0^{\beta} \frac{e^x - 1}{x} dx$ , 从而得到

$P(t_d \leq t) = \left(1 + \frac{t}{T_a}\right) e^{-\beta} \int_0^{\beta} \frac{e^x - 1}{x} dx$ . 为便于书写,记  $\delta = e^{-\beta} \int_0^{\beta} \frac{e^x - 1}{x} dx$ , 则上述公式简化为

$$P(t_d \leq t) = \left(1 + \frac{t}{T_a}\right) \delta \tag{5}$$

其中,  $0 \leq t \leq \left(\frac{1}{\delta} - 1\right) T_a$ . 上面得到的是目标的暴露范围内只存在一个节点的情况下“发现延迟小于  $t$ ”这一事件发生的概率.在目标环境中,目标暴露范围内的节点数量服从以  $\alpha$  为参数的泊松分布,因而可以利用定理 2 得到“静态目标发现延迟小于  $t$ ”的概率是

$$DP_{static} = 1 - e^{-\alpha P(t_d \leq t)} = 1 - e^{-\alpha \left(1 + \frac{t}{T_a}\right) \delta} \tag{6}$$

其中,  $0 \leq t \leq \left(\frac{1}{\delta} - 1\right) T_a, \alpha = \pi r^2 d, \beta = g^2 d$ .

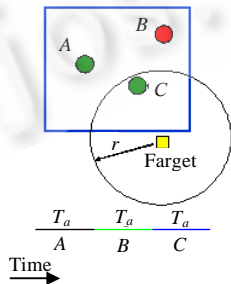


Fig.3 Detection delay of immobile targets with one node

图 3 单节点覆盖静态目标情况下的发现延迟

3.2.3 动态目标

接下来考虑动态目标的发现延迟.假设在目标环境内出现的是以速度  $v$  匀速直线运动的点目标,即不考虑目标的物理尺寸和形状.如图 4 所示,目标从  $A$  点运动到  $B$  点,距离为  $L_t$ .

在图 4 中,线段  $\overline{AB}$  是目标的运动轨迹,阴影部分是从 A 运动到 B 的过程中目标暴露范围的合集,称为目标的暴露区域.显然,只有位于目标暴露区域内的节点才可能发现运动目标,而位于暴露区域之外的节点不可能发现运动的目标.所以,接下来考虑在目标暴露区域内只存在一个节点情况下的目标发现延迟.

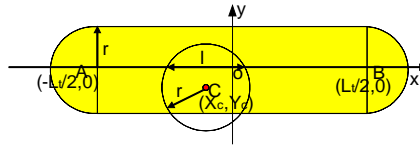


Fig.4 Detection delay of mobile targets with one node

图 4 单节点覆盖运动目标情况下的发现延迟

如图 4 所示,假设  $A(-L/2,0)$ 和  $B(L/2,0)$ 分别是目标运动的起点和终点,节点  $C(X,Y)$ 是位于目标暴露区域内的唯一节点,目标通过节点  $C$  的感知范围的轨迹长度为  $l$ .因为目标以速度  $v$  直线运动,所以它暴露在节点  $C$  的感知范围内的时间长度是  $l/v$ .因此,目标被节点  $C$  发现的概率是  $DP_C = \min\left\{\delta\left(1 + \frac{l}{vT_a}\right), 1\right\}$ .对于速度较快的运动目标,即满足  $v \geq 2r/\left(\frac{1}{\delta} - 1\right)T_a$  时,目标被节点  $C$  发现的概率是  $DP_C = \delta\left(1 + \frac{l}{vT_a}\right)$ .

注意到  $l$  的取值与节点  $C$  的位置  $(X,Y)$  相关,因此需要计算目标被暴露区域内任意节点所发现的平均概率,即将发现概率对暴露区域进行面积积分并求平均值.最终得到目标暴露区域内只存在一个节点的情况下,目标发现延迟小于  $t$  的概率是

$$P(t_d \leq t) = \delta\left(1 + \frac{\pi r t}{vT_a(2vt + \pi r)}\right) \tag{7}$$

由于分布在目标暴露区域的节点数量同样服从以  $\gamma = (\pi r^2 + 2rvt) \times d$  为参数的泊松分布,因此,根据定理 2 得到“运动目标发现延迟小于  $t$ ”的概率是

$$\begin{aligned} DP_{static} &= 1 - e^{-\gamma P(t_d \leq t)} \\ &= 1 - e^{-\gamma\left(\delta\left(1 + \frac{\pi r t}{vT_a(2vt + \pi r)}\right)\right)} \end{aligned} \tag{8}$$

### 3.2.4 实验模拟

为了进一步验证事件发现延迟,按照表 1 所列出的参数,使用 Matlab 工具对本文提出的基于栅格的感知调度方法进行了一系列的模拟实验,并与文献[7]中的随机调度方法进行了比较.在模拟静态目标的事件监测时,第 1 种方法是设定  $T_a=1$ ,分别对  $g=20,30,40,50$  进行 4 组模拟实验;每组模拟执行 10 000 次,每次随机地在目标区域内生成目标出现的位置,模拟得到发现该目标的延迟,对 10 000 次实验中延迟小于 1,2,3,...,10 的次数进行统计,并计算其发生概率.第 2 种方法则是设定  $g=40$ ,分别对  $T_a=0.5,1,2,4$  进行 4 组与前面类似的模拟实验,计算发现延迟的概率分布.运动目标的事件监测模拟实验与静态实验基本相同,不同的是需要随机生成目标的运动方向.出于简化的考虑,目标运动的轨迹完全落在目标环境内.

模拟结果如图 5 和图 6 所示,可以得到下列结论:首先,模拟数据与概率分布曲线非常吻合,证明了前面理论分析结果的正确性;其次,在固定节点每轮的工作时间  $T_a=1$  的条件下,栅格边长  $g$  越大,在时间  $t$  内发现目标的概率越低.以  $t=0$  为例,对应于  $g=20,30,40,50$  的概率依次大约是 0.96,0.77,0.56,0.41.这是因为栅格面积越大,栅格内的节点数越多,每个节点被激活的频率相对降低.在固定栅格边长  $g=40$  的条件下,节点每轮工作时间  $T_a$  越长,时间  $t$  内发现目标的概率就越低.以静态目标  $t=1$  为例,对应于  $T_a=0.5,1,2,4$  的概率依次大约是 0.91,0.78,0.68,0.61.原因与前面相同,每个节点的工作时间变长,使得每个节点被激活的频率也相对降低;第三,无论是静态目标还是运动目标,都存在有限的发现延迟  $t$ ,具有接近 1 的发生概率.而且,运动目标的最大发现延迟比静态目标的最大发现延迟更小.这是因为目标的运动使得可以发现它的节点数量增多,相当于增加了每个节点被激活的频率,

从而更快地发现目标事件;第四,设定相同的节点工作时间长度和比例,基于栅格的感知调度获得的事件监测质量优于随机调度方法,这是由于栅格的划分保证了工作节点分布的均衡性,避免了随机调度方法可能存在的工作节点“扎堆”的问题。

Table 1 Parameters of simulation

表 1 模拟参数

Parameter	Value
Target area ( $L \times L$ )	600×600
Node number ( $N$ )	1800
Average density ( $d$ )	1/200
Sence radius ( $r$ )	20
Target speed ( $v$ )	40
Duration ( $T_a$ )	0.5,1,2,4
Grid size ( $g$ )	20,30,40,50

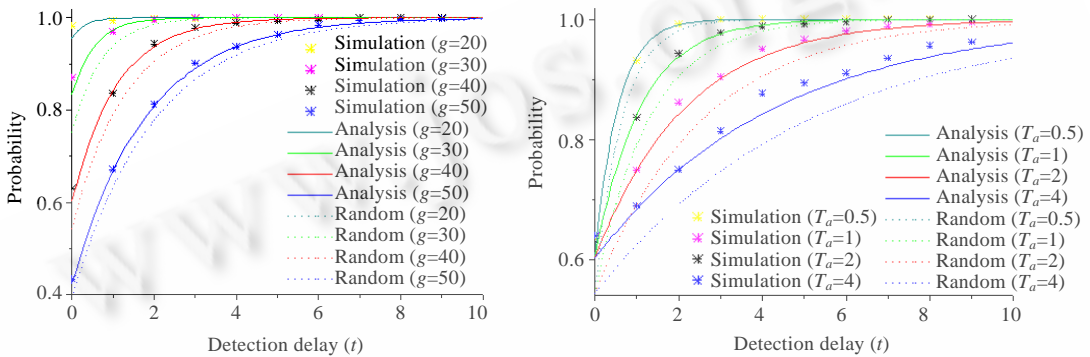


Fig.5 Probability of detection delay for immobile target

图 5 静态目标发现延迟概率分布

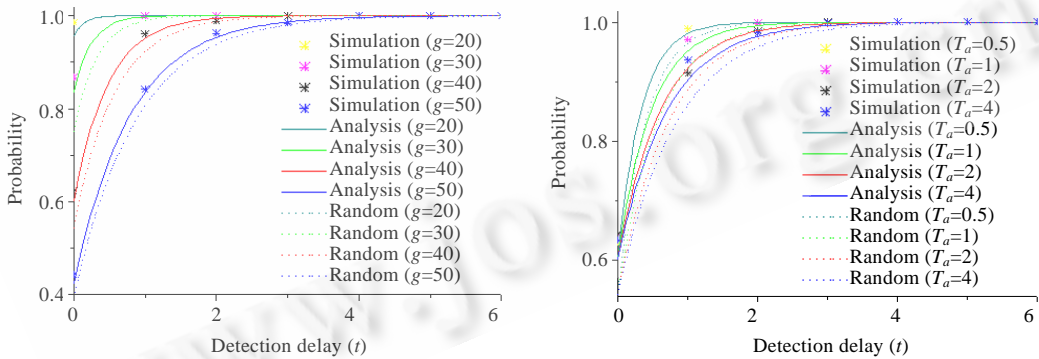


Fig.6 Probability of detection delay for mobile target

图 6 运动目标发现延迟概率分布

### 4 总结

本文针对事件监测应用的特点,以延长网络寿命和缩短事件发现延迟为目标,基于局部覆盖策略提出了一种简单、有效的基于栅格的感知调度方法.作为一种基于本地位置信息的分簇方法,栅格划分设计具有开销小、可扩展性好的特点,在保证网络通信连通的前提下,能够实现节点的均匀划分和负载,以及能耗的均衡分布,同时延长了网络寿命,具有良好的可扩展性.本文提出的栅格代表节点选举算法是一种分布式算法,结合考虑了节点的电量消耗比例和当选代表节点的次数,既可以有效地保证节点间电池电量消耗的均衡性,又能够保证节点



在有限的时间间隔内当选执行感知任务.同时,与目前已有的选举算法比较,该算法有效地减少了通信和计算的开销,适应于无线传感网的应用需求.而且,模拟实验证明了基于栅格的感知调度方法在事件监测质量上优于随机调度方法.通过调节感知调度方法中的栅格大小和每轮工作时间等参数,可以有效地控制网络寿命和发现延迟之间的平衡.基于性能分析和模拟实验可以发现,通过调整栅格大小和工作时间,可以控制网络寿命.给定栅格大小,通过调节节点的每轮工作时间,可以在一定的概率内保证目标事件的发现延迟,满足应用需求;反过来,给定节点每轮工作时间,通过调整栅格大小,也可以在一定的概率内保证目标事件的发现延迟小于应用需求.

**致谢** 在此,我们向对本文工作给予支持和建议的同行,尤其是香港理工大学计算学系的曾东雄副教授、曹建农教授、梁匡华副教授和陈振冲教授表示感谢.

### References:

- [1] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(8):102–114.
- [2] David C, Deborah E, Mani S. Overview of sensor networks. *IEEE Computer Society*, 2004,4:41–49.
- [3] Mainwaring A, Culler D, Polastre J, Szewczyk R, Anderson J. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2002)*. New York: ACM Press, 2002. 88–97.
- [4] Xu N, Rangwala S, Chintalapudi KK, Ganesan D, Broad A, Govindan R, Estrin D. A wireless sensor network for structural monitoring. In: *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004)*. Baltimore: ACM, 2004. 13–24.
- [5] Jiang J, Fang L, Zhang HY, Dou WH. An algorithm for minimal connected cover set problem in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006,17(2):175–184 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/175.htm>
- [6] Ren Y, Zhang SD, Zhang HK. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006, 17(3):422–433 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm>
- [7] Kumar S, Lai TH, Balogh J. On  $k$ -coverage in a mostly sleeping sensor network. In: *Proc. of the 10th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2004)*. Philadelphia: ACM, 2004. 144–158.
- [8] Gui C, Mohapatra P. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks. In: *Proc. of the 10th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. (MOBICOM 2004)*. Philadelphia: ACM, 2004. 129–143.
- [9] Xu Y, Heidemann JS, Estrin D. Geography-Informed energy conservation for ad hoc routing. In: *Proc. of the MOBICOM*. 2001. 70–84.
- [10] Paolo S, Janos S. Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks. In: *Proc. of the Wireless Sensor Networks*. Springer-Verlag, 2004. 17.
- [11] Cao Q, Yan T, Stankovic J, Abdelzaher T. Analysis of target detection performance for wireless sensor networks. In: *Proc. of the 1st IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing in Sensor Networks (DCOSS 2005)*, Vol. 3560. Marina del Rey: Springer-Verlag, 2005. 276.

### 附中文参考文献:

- [5] 蒋杰,方力,张鹤颖,窦文华.无线传感器网络最小连通覆盖集问题求解算法. *软件学报*,2006,17(2):175–184. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/175.htm>
- [6] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法. *软件学报*,2006,17(3):422–433. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm>



胡湘华(1977—),男,湖南邵阳人,博士生,主要研究领域为嵌入式系统软件,无线传感网.

杨学军(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为高性能计算,体系结构,编译.