

## 传感器网络面向实时事件捕获的联合部署与调度策略\*

陆汉城, 李燕君<sup>+</sup>, 朱艺华

(浙江工业大学 计算机学院, 浙江 杭州 310023)

### Simultaneous Deployment and Scheduling for Real-Time Event Capture in Sensor Networks

LU Han-Cheng, LI Yan-Jun<sup>+</sup>, ZHU Yi-Hua

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

+ Corresponding author: E-mail: yjli@zjut.edu.cn

**Lu HC, Li YJ, Zhu YH. Simultaneous deployment and scheduling for real-time event capture in sensor networks. Journal of Software, 2011, 22(Suppl. (1)): 182-190. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11020.htm>**

**Abstract:** For real-time surveillance applications based on wireless sensor networks, the requirement for real-time performance and the energy efficiency are two mutually-restricted metrics, which can be satisfied by sleep scheduling. On the other hand, controlled deployment is another method for cost and performance guarantee. This paper manages to put the two apparently independent issues into a simultaneous optimization framework and make tradeoffs among the deployment cost, the network lifetime and the real-time performance. This paper proposes a simultaneous deployment and scheduling strategy based on NSGA-II and obtains Pareto solutions which satisfy multiple metrics. It also analyzes extensively the impact of sensor's duty-cycle factor, the delay constraints and the sensor's sleep mode on deploying and scheduling a performance.

**Key words:** wireless sensor networks; deployment; scheduling; multi-objective optimization; NSGA-II

**摘要:** 基于无线传感器网络的实时监测应用存在着实时性能保障与节能要求之间的矛盾以及部署成本控制问题,可分别通过节点睡眠调度和受控部署来解决.将原本割裂的节点部署与睡眠调度问题纳入统一的优化框架,权衡考虑网络部署成本、网络寿命和实时性能保障等多项指标.提出了基于 NSGA-II 的联合部署与调度策略,得到满足多项指标的 Pareto 解,同时全面分析了节点占空比、延迟约束和节点睡眠模式对部署和调度策略的影响.

**关键词:** 无线传感器网络;部署;调度;多目标优化;带精英策略的非支配排序遗传算法

无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSN)由于其无处不在的感知能力和网络自组织能力特别适用于无人值守的长期监测应用(如生态环境监控、建筑结构健康监测、战场监视等).目前传感器节点按类型和功能的不同,价格从几百元到几千元不等,采用随机部署的系统成本和网络性能都难以估计和控制.针对特定应用,如果能够合理安排网络中传感器节点的数目、类型和空间布局,不仅可以有效节省部署成本,还可以控制和估计整个网络对目标区域的监控性能.此外,由于传感器节点大多采用电池供电,能量资源有限且难以接续,节能问题一直是 WSN 用于长期监测应用的研究热点之一.为了节能,传感器节点通常以一定的占空比工作,周期性地采集环境数据<sup>[1]</sup>,而对于实时监测应用,时断时续的感知能力可能会带来检测延迟甚至事件的漏检.因此,

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61003264, 61070190, 61001126); 浙江省自然科学基金(Z1100455)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

在此类应用中存在着节能要求与实时检测性能保障的矛盾<sup>[2]</sup>,需要对传感器节点进行有效的睡眠调度,使得节点既能以较低的占空比工作,又能满足实时监测性能的需求。

本文首先分析了 WSN 在同步休眠模式和异步休眠模式下对实时事件的感知能力,然后基于分析结果提出了一种面向实时事件捕获的联合部署与调度策略,将节点部署与睡眠调度纳入统一的优化框架中,采用带精英策略的非支配排序遗传算法(non-dominated sort genetic algorithm II,简称 NSGA-II)求解该优化问题,得到满足要求且分布均匀的 Pareto 解,全面分析了节点占空比、延迟约束和节点睡眠模式对部署与调度策略的影响,用户可据此结合实际情况权衡选择网络参数和部署调度策略.本文提出的策略可以为特定的应用量身定做合理的部署与睡眠调度方案,更好地兼顾成本控制、网络寿命以及实时性能保障等多维度需求。

## 1 相关工作

国内外学者对传感器节点的部署与调度问题已经进行了很多研究.在部署问题方面,Zou 等人<sup>[3]</sup>为满足应用区域对覆盖的需求,提出了一种启发式迭代算法 Min-Miss,以最小化累积漏检概率为优化目标,求解相应的部署方案;Zhang 等人<sup>[4]</sup>在文献[3]的基础上进一步考虑了网络中覆盖需求不均匀的情况,根据部署策略与漏检概率为线性不变这一特性,将部署问题转化为整数线性规划问题,提出启发式迭代算法 DIFF\_DEPLOY,获得部署方案;Aitsaadi 等人<sup>[5]</sup>利用禁忌搜索算法,得到了满足覆盖连通要求的差异部署策略;Li 等人<sup>[6]</sup>采用基于进化算法的搜索策略,获得了比文献[5]更多样化的可供权衡的 Pareto 解;贾杰等人<sup>[7]</sup>研究的最优节点集选取问题也是部署问题的一个子问题,提出了基于遗传算法的求解方法.在传感器调度问题方面,Cao 等人<sup>[2]</sup>分析了目标检测性能与响应延迟之间的关系,明确了节点占空比因数对网络性能的影响;并在文献[8]中提出了一种低占空比的睡眠调度策略,保证事件的响应延迟,同时最大化网络寿命;He 等人<sup>[1]</sup>分析了同步和异步睡眠模式下网络的覆盖性能,提出了一种节点动态睡眠调度策略,能有效地提高事件捕获性能.上述对传感器调度问题的研究大多基于随机部署,且采用布尔圆感知模型,由于模型较为简单,因此易于推导闭型表达式进行分析,从而获得较为工整的理论结果,然而在实际中高密度的随机部署对部署成本是一大挑战,且对易于进行人工部署的应用场景来说是一种浪费,并且布尔圆感知模型过分简化了传感器的感知规律,与实际情况相差甚远,会导致实际情况与理论结果的偏差。

综上不难发现,对于传感器节点部署问题的研究大多集中在对某一或某两个指标的优化上,如覆盖性能、连通性能或部署成本等,对网络寿命的优化很难纳入部署问题的优化框架中;而对传感器节点的调度与网络寿命直接相关,目前的研究大多基于随机部署.简而言之,节点部署与睡眠调度问题目前被割裂为两个独立的问题分别研究,如果能充分挖掘它们之间的联系,势必可以得到更优化的部署和调度结果.本文解决了将节点部署与调度纳入统一优化框架的问题,采用了概率协同感知模型,综合考虑了网络的覆盖性能、网络成本、网络寿命以及事件响应延迟限制,根据用户提出的网络性能要求和延迟限制,将节点联合部署与调度问题转化为统一的多目标优化问题,并利用 NSGA-II<sup>[9]</sup>求解该多目标优化问题,得到分布均匀的 Pareto 解,供用户根据实际情况权衡选择。

## 2 系统模型与问题描述

本节给出了系统相关模型和不同睡眠模式下 WSN 的事件捕获能力分析,并在此基础上归纳出联合部署与调度的优化问题.首先,假定 WSN 中每个传感器节点以一定的轮值周期工作,在一个周期  $T$  中工作  $T_w$  时间,其余  $T-T_w$  时间休眠,易知单个节点的占空比为  $T_w/T$ .按照节点起始工作时间的同步与否,可以将整个网络的工作模式分为同步睡眠模式和异步睡眠模式两种,其中同步睡眠是指节点起始工作时间相同,从而整个网络的工作/休眠步调一致;而异步睡眠模式下节点的占空比保持不变,但起始工作时间不同.第 2.2 节和第 2.3 节分别分析了同步睡眠模式和异步睡眠模式下 WSN 的事件捕获能力,第 2.4 节根据分析归纳了联合部署与调度问题的多目标优化一般形式。

## 2.1 感知模型

本文在研究中摒弃了传统的布尔圆感知模型,而采用更加接近实际的指数衰减感知模型<sup>[3]</sup>.具体地,传感器节点  $s_i$  检测到位置  $A$  处发生事件的概率为

$$P(A, s_i) = \begin{cases} 1, & h(A, s_i) \leq r_s \\ e^{-\alpha(h(A, s_i) - r_s)^\beta}, & r_s \leq h(A, s_i) \leq r_l \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  是与传感器硬件相关的参数,  $r_l$  和  $r_s$  是传感器感知半径的两个临界值,  $h(A, s_i)$  为  $A$  和传感器节点  $s_i$  的几何距离. 实际中, 红外和超声波传感器都符合指数衰减的感知模型. 定义  $W$  为目标区域(area of interest, 简称 AoI) 中感知范围覆盖位置  $A$  的传感器节点的集合, 即  $W = \{s_i | h(A, s_i) \leq r_l\}$ , 用  $|W|$  表示集合的元素个数. 由式(1)易得位置  $A$  处发生的事件至少能被一个传感器捕获到的概率为

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A, s_i)), \quad \text{其中}, s_i \in W, i = 1, 2, \dots, n, n = |W| \quad (2)$$

## 2.2 同步睡眠模式下的感知概率

当传感器节点以  $T_w/T$  的占空比工作在同步睡眠模式时, 节点起始工作时间相同. 给定事件捕获的延迟限制  $\tau$ , 假设事件在一个周期内的到达服从均匀分布, 并且存在时间不小于延迟限制, 可以得到定理 1.

**定理 1.** 当 WSN 节点以  $T_w/T$  的占空比工作在同步睡眠模式时, 位置  $A$  处发生的事件在延迟  $\tau$  内至少能被一个节点捕获到的平均概率为

$$\bar{P}_s(A, \tau) = \frac{T_w + \tau}{T} \times \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A, s_i)) \right), \quad \text{其中}, s_i \in W, i = 1, 2, \dots, n, n = |W| \quad (3)$$

证明: 当 WSN 处于同步睡眠模式时, 由于  $W$  为 AoI 中感知范围能覆盖到位置  $A$  的传感器节点集合, 因此  $W$  中的节点可以看作一个超级节点, 式(2)为该超级节点的感知能力表达式. 如图 1 所示, 传感器节点在  $[0, T_w]$  时间处于活跃状态, 在  $(T_w, T)$  时间处于睡眠状态(忽略状态切换的时间). 事件在  $[0, T_w]$  内发生能被传感器立即捕获, 在  $[T - \tau, T]$  内发生能以不大于  $\tau$  的延迟被捕获. 由于事件在  $[0, T]$  内的到达服从均匀分布, 所以事件在  $[0, T_w]$  和  $[T - \tau, T]$  发生的概率为  $(T_w + \tau)/T$ , 因此点  $A$  发生的事件在延迟  $\tau$  内能被传感器节点捕获到的概率  $\bar{P}_s(A, \tau) = \frac{T_w + \tau}{T} \times P(A)$ , 将  $P(A)$  由式(2)代入即可得式(3).  $\square$

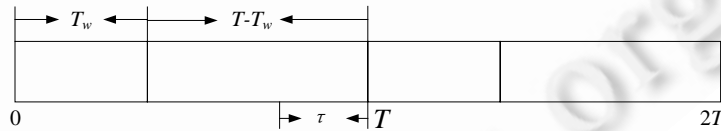


Fig.1 Illustration of a node's sleep schedule

图 1 节点睡眠调度模型示意图

## 2.3 异步睡眠模式下的感知概率

当传感器节点以  $T_w/T$  的占空比工作在异步睡眠模式时, 节点起始工作时间不同. 定义  $W_o(t, \tau)$  为覆盖点  $A$  并且在  $[t, t + \tau]$  时间内曾处于活跃状态的传感器节点的集合, 容易看出,  $W_o(t, \tau) \subseteq W$ . 同样假设事件的存在时间不小于延迟限制  $\tau$ , 可以得到定理 2.

**定理 2.** 当 WSN 节点以  $T_w/T$  的占空比工作在异步睡眠模式时,  $A$  处发生的事件在延迟  $\tau$  内能被传感器捕获到的平均概率为

$$\bar{P}_a(A, \tau) = \frac{\int_0^T Y(t, \tau) dt}{T}, \quad \text{其中}, Y(t, \tau) = 1 - \prod_{s \in W_o(t, \tau)} (1 - P(A, s)) \quad (4)$$

证明:事件在  $t$  时刻发生时,在  $[t, t+\tau]$  内曾处于工作状态的集合为  $W_o(t, \tau)$ ,可以得到  $t$  时刻发生的事件在延迟  $\tau$  内能被传感器捕获到的概率为  $Y(t, \tau) = 1 - \prod_{s \in W_o(t, \tau)} (1 - P(A, s))$ . 在一个周期内事件发生在  $t$  时刻的概率为  $\frac{dt}{T}$ ,  $t$  的范围为  $[0, T]$ . 对于所有时刻  $t$ , 对  $\frac{dt}{T} \times Y(t, \tau)$  求和, 当  $dt \rightarrow 0$  时可以得到定理 2.  $\square$

### 2.4 问题描述

给定部署区域,我们可以从环境模型中提炼出覆盖性能和捕获延迟约束的要求.以面向火灾监测的应用为例,可以按照子区域的危险程度设定节点的覆盖概率和延迟约束,最危险的区域,如化工厂、加油站、树林附近需要节点覆盖概率接近 100%,且设定的延迟约束值较小,周围区域按与危险中心的距离依次递减,而河流附近危险级别最低,只需设置 20%左右的覆盖阈值即可,且设定的延迟约束值也相对较大.为了便于系统的数学描述,我们将区域  $A$  离散化为  $X \times Y$  的栅格,当  $X, Y$  充分大时,每个栅格可看作一个兴趣点(point of interest,简称 PoI).栅格划分的精细程度取决于对目标的精度要求和允许的计算能力.对于任一栅格  $(i, j)$ ,给定覆盖概率阈值  $R(i, j)$ ,要求最终的部署和调度策略能确保发生在该点的事件在延迟约束  $\tau$  内实际被捕获概率  $C(i, j)$  大于或等于阈值  $R(i, j)$ .任意两个栅格之间的距离定义为两个栅格质心间的距离.节点部署策略可以用  $X \times Y$  的布尔矩阵  $D$  表示,  $D$  中的元素  $D(i, j)=0$  标志该 PoI 没有部署传感器节点,而  $D$  中的元素  $D(i, j)=1$  标志该 PoI 部署一个传感器节点,即:

$$D(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{没有部署传感器节点} \\ 1, & \text{部署一个传感器节点} \end{cases}, \text{其中}, 1 \leq i \leq X, 1 \leq j \leq Y \quad (5)$$

将传感器节点的轮值周期  $T$  分为  $M$  个时隙,假设传感器在每个调度周期中的活跃时间为  $N$  个时隙,那么传感器节点的占空比为  $T_w/T=N/M$ .节点的调度策略也用  $X \times Y$  的矩阵表示,记为  $S$ ,  $S$  中的元素  $S(i, j)=k(1 \leq k \leq M)$  表示该 PoI 的传感器节点在第  $k$  个时隙转变为活跃状态,工作  $N$  个时隙后进入睡眠状态.为了方便优化求解,无论该 PoI 是否部署了传感器节点,我们都分配给它一个调度策略,这样每个部署栅格都与一个调度策略相对应,规定当 WSN 处于同步睡眠模式时  $S$  中所有的元素值相同且都设为 1.

此时我们可以将部署和调度问题联合考虑,并纳入统一的多目标优化问题框架,给定覆盖要求  $R$  和延迟限制  $\tau$ ,根据网络寿命要求选择合适的占空比  $N/M$ ,求解部署矩阵  $D$  和调度矩阵  $S$ .优化目标有两个,一是部署的节点数目最少,二是实际事件捕获性能与用户要求之间的误差最小.由式(3)和式(4)可知,实际覆盖性能  $C$  可以根据部署矩阵  $D$  和调度矩阵  $S$  计算得到.定义矩阵  $\Delta$  为实际覆盖性能  $C$  与给定的覆盖要求  $R$  之间的误差,本文研究的联合部署与调度问题可以转化为如下的多目标优化问题形式:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y D(i, j), \text{Min} \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y \Delta(i, j) \\ & \text{w.r.t. } D \text{ and } S \\ & \text{s.t. } D(i, j) \in \{0, 1\}, S(i, j) \in \{1, \dots, M\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{其中}, \Delta(i, j) = \begin{cases} 0, & R(i, j) \leq C(i, j); \\ (R(i, j) - C(i, j)) / R(i, j), & R(i, j) > C(i, j). \end{cases}$$

由于问题(6)的部署子问题可以找到一个实例与图论中的最小几何圆覆盖问题的实例相对应,而最小几何圆覆盖问题是一个经典的 NP 难问题,所以问题(6)也是一个 NP 难问题.

### 3 基于 NSGA-II 的联合部署与睡眠调度策略

对于 NP 难问题无法在多项式时间内找到全局最优解,需要借助启发式算法.启发式算法虽然不能保证能找到全局最优解,但是它能在多项式时间内得到一个最优或者次优解.遗传算法作为一种启发式算法在解决 NP 难问题方面有出色的表现,它多方向和全局搜索的特点使其对于搜索 Pareto 解十分有益<sup>[10]</sup>.NSGA-II 是带精英策略的非支配遗传算法<sup>[10]</sup>,它对于普通遗传算法的主要改进有:将每个个体按照它们的支配与非支配关系进行分层,再做选择操作;采用拥挤度和拥挤度比较算子确保算法能收敛到一个均匀分布的 Pareto 域上;引入精英策

略,将父代种群与其产生的子代种群组合,共同竞争产生下一代.本节采用了 NSGA-II 来求解第 2.4 节中描述的多目标优化问题.

### 3.1 算法流程

算法开始随机产生一个初始种群  $POP_0$ , 大小为  $P\_SIZE$ , 然后对  $POP_0$  计算每个个体的目标函数值并且以此进行快速非支配排序,  $POP_0$  中每个个体得到一个边界序号和聚集距离. 根据边界序号和聚集距离, 采用二元锦标赛进行选择操作(优先考虑边界序号), 然后再对选出的个体采用交叉、变异操作产生一个新的种群  $OFFSPRING\_POP_0$ , 大小同样为  $P\_SIZE$ . 将  $POP_i$  和  $OFFSPRING\_POP_i$  (初始  $i=0$ ) 合并为  $Q_i$ , 大小为  $2 \times P\_SIZE$ . 对  $Q_i$  进行快速非支配排序, 构造边界序号和聚集距离, 根据边界序号和聚集距离依次从  $Q_i$  中选择个体进入下一代种群  $POP_{i+1}$ , 直到  $POP_{i+1}$  大小为  $P\_SIZE$ , 进化代数为  $GEN\_SIZE$ . 具体算法如下:

1. Initialize population  $POP_0$ ,  $Size(POP_0)=P\_SIZE$
2. Evaluate  $F_1(POP_0)$  and  $F_2(POP_0)$
3. Non-Dominated Sort( $POP_0$ )
4. for  $i=0: GEN\_SIZE-1$  do
5.     for  $j=1$  to  $P\_SIZE$  do
6.          $[P_1 P_2]=Select(POP_i)$ ;
7.         do  $OFFSPRING_j=Crossover(P_1, P_2)$  with probability  $p_c$
8.         do  $OFFSPRING_j=Mutate(OFFSPRING_j)$  with probability  $p_m$
9.     end
10.     $Q_i=POP_i \cup OFFSPRING\_POP_i$ ,  $Size(Q_i)=2 \times P\_SIZE$
11.    Evaluate  $F_1(Q_i)$  and  $F_2(Q_i)$
12.    Non-Dominated Sort( $Q_i$ )
13.     $POP_{i+1}=Replace(Q_i)$ ,  $Size(POP_{i+1})=P\_SIZE$
14. end

### 3.2 产生初始种群

由于部署策略已经是由 0、1 组成的布尔矩阵, 所以不需要再进行参数编码, 可以直接产生初始种群. 初始种群的每个个体由节点部署矩阵  $D$  和调度矩阵  $S$  组成, 部署矩阵与调度矩阵一一对应. 我们采取随机方法产生初始种群, 种群大小为  $P\_SIZE$ . 随机产生节点部署矩阵  $D$ :

$$D(i, j) = \begin{cases} 1, & rand < \lambda \times R(i, j) \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\lambda$  是一个可调参数用于调节节点密度, 防止偏差太大而影响算法的收敛速度,  $rand$  是一个 (0,1) 之间的随机数. 随机产生起始时间矩阵  $S$ :

$$S(i, j) = \lceil M \times rand \rceil \quad (8)$$

同样, 式(8)中的  $rand$  也是一个 (0,1) 之间的随机数,  $M$  为时隙数目,  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整. 为了方便下面的遗传操作, 无论该元素对应的部署矩阵中是否布置了节点, 我们为  $S$  的每个元素都产生一个数值, 特别地, 当网络采取同步睡眠模式时,  $S$  中所有元素置为 1.

### 3.3 非支配排序

非支配排序遗传算法最关键的改进在于根据支配关系对个体进行非支配排序, 每个个体得到一个边界序号和聚集距离, 支配关系是通过比较个体的目标函数值得到的. 根据多目标优化问题的描述, 目标函数有两个, 分别用  $F_1$  和  $F_2$  表示,  $F_1$  为部署节点数目,  $F_2$  为实际覆盖性能与覆盖要求之间的归一化误差:

$$F_1 = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y D(i, j), \quad F_2 = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y \Delta(i, j) \quad (9)$$

### 3.4 选择、交叉和变异操作

选择操作体现了自然界中优胜劣汰的思想,保留优秀的个体而淘汰差的个体.选择操作是通过二元锦标赛从父代种群中选择个体,每次随机从父代种群中选择两个个体,优先比较其边界序号,再比较聚集距离,边界序号小的或者边界序号相同聚集距离大的个体将存活.选择出来的个体数目与初始种群数目相同.

交叉操作以一定的概率把两个父代个体的部分基因进行交换,产生新的个体,体现自然界中信息交换的思想.由于每个个体由部署矩阵  $D$  和调度矩阵  $S$  组成,在进行交叉操作时,矩阵  $D$  和调度矩阵  $S$  需要同步进行交叉.首先以概率  $p_c$  确定是否交叉(并随机选择行交叉或列交叉),然后随机取出两个行(列)序号,将两个个体的矩阵  $D$  中两个序号之间的行(列)进行交换,再对矩阵  $S$  中对应的行(列)进行交换.

变异操作是自带基因按小概率扰动产生的变化,它模拟了生物进化的偶然基因突变现象.变异操作能防止最终的结果陷入局部最优.对于部署矩阵  $D$ ,以一定的概率  $p_m$  把其中的一个元素取反(0 变 1,1 变 0);对于调度矩阵  $S$ ,由于  $S$  所对应的部署栅格内实际不一定部署了节点,因此我们采取的策略是依一定概率从  $S$  中随机选择一行(列)并且将该行(列)所有元素加上一个常数并取模( $M$ )再加 1,当网络采用同步睡眠模式时, $S$  中元素永远为 1,不进行变异.

## 4 仿真及性能评价

在本节中,我们利用 MATLAB 对本文提出的联合部署与调度策略进行仿真验证.考虑  $50m \times 50m$  的方形区域,若以  $1m \times 1m$  为单位划分栅格,可离散化为  $50 \times 50$  的栅格,与传感器相关的参数  $\alpha, \beta, r_s$  和  $r_l$  分别设置为 0.5, 1.2, 1 和 7,传感器的调度周期划分为 10 个时隙.图 2 是在此配置下传感器的感知能力示意图.为了方便仿真分析,假设用户的覆盖要求是均匀的,即每个 PoI 的覆盖阈值一致.本文提出的联合部署和调度策略同样适用于覆盖要求不均匀的情况.另外,对于每个用户需求最终得到的部署和调度策略都是一组解,即 Pareto 解,这些 Pareto 解之间是不能直接比较好坏的,用户可以根据情况选择合适的误差范围内的解.图 3 为非支配遗传算法得到的 Pareto 前沿示意图,覆盖性能要求为 0.8(即所有 PoI 覆盖概率阈值为 0.8)、延迟限制为 0 个时隙、占空比为 0.2.横坐标是需要部署的传感器节点数目,纵坐标是实际覆盖性能和用户要求的覆盖性能的平均误差.

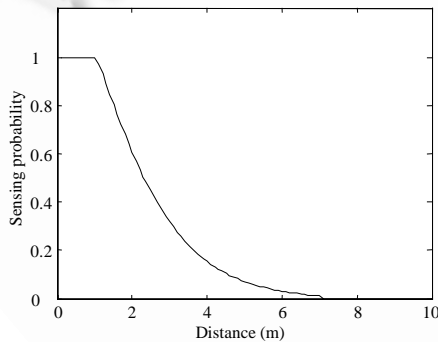


Fig.2 Illustration of exponential sensing model

图 2 指数衰减模型示意图

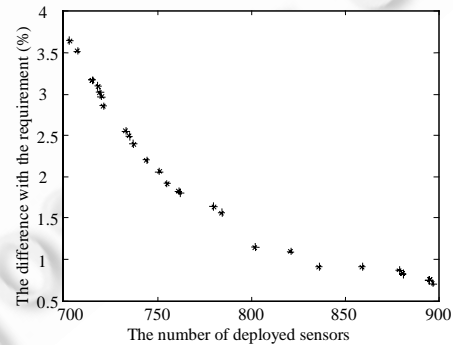


Fig.3 Illustration of Pareto frontier (the number of deployed sensors vs. the difference with the requirement)

图 3 Pareto 前沿示意图  
(部署节点数 vs.覆盖性能误差)

下面几节分别分析了占空比、不同用户需求(包括覆盖性能需求和延迟约束)以及睡眠模式对部署和调度策略的影响.由于每种情况由 NSGA-II 得到的部署和调度策略都是一组 Pareto 解,为了方便性能比较,我们取的比较点是其中覆盖性能与需求的误差在 3% 以内且部署节点最少的解.

#### 4.1 传感器节点占空比对部署与调度策略的影响

图 4 反映了异步睡眠模式的不同占空比因数下,需要部署的节点数目随着覆盖性能要求的变化趋势,延迟约束设置为 0 个时隙,即要求事件即时被捕获到.很明显,在覆盖性能要求相同时,占空比小的网络需要部署更多的节点;占空比相同时,需要部署的传感器节点数目随着覆盖性能要求的降低而减少.然而我们并不能据此直观地判断采用哪种占空比更好,这是因为当覆盖性能要求相同时,虽然占空比低的情况下需要部署的节点数目更多,但此时节点的节能效果更好,网络寿命比占空比高的网络要长.因此,比较时若采用等效节点数目,即用实际部署节点数目与占空比相乘,显得更为合理.例如,占空比为 1 的网络需要部署 100 个节点,而占空比为 0.5 的网络需要部署 170 个节点,可以认为占空比为 0.5 的部署策略更好,因为后者的网络寿命可以认为是前者的两倍(暂时忽略其他能耗),如果全工作的网络要达到同样的网络寿命则需要部署 200 个节点,综合成本更高.

根据上述分析,在图 5 中显示了不同占空比因数下需要部署的等效节点数目随着覆盖性能要求的变化情况,其他设置不变.可以看出,当覆盖性能要求较高时,高占空比和低占空比网络所需的等效节点数目差不多,但它们之间存在着节点数目和网络寿命的博弈,低占空比的网络寿命更长,但需要部署的节点数目更多,而高占空比的网络需要部署的节点数目少,网络寿命相对会减小.在这种情况下,用户可以根据实际条件进行选择.当覆盖性能要求较低时,低占空比网络需要的等效节点数目更少.以覆盖性能要求为 0.4 为例,占空比为 0.2 的网络需要的等效节点数目是全工作网络的 0.7 倍,如果增加节点的代价与接续能量的代价相同,那么显然通过部署较多的节点而采用低占空比的方式工作更加经济、节能,能以相对较小的代价获得更长的网络寿命.

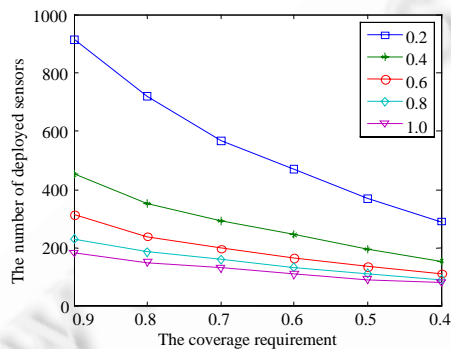


Fig.4 The number of deployed sensors against the coverage requirement for varied duty cycles

图 4 不同占空比因数下部署节点数目随覆盖要求的变化

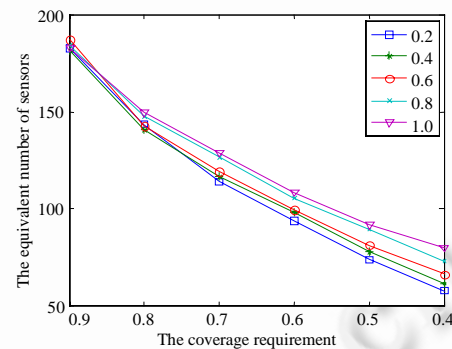


Fig.5 The equivalent number of sensors against the coverage requirement for varied duty cycles

图 5 不同占空比因数下等效部署节点数目随覆盖要求的变化

#### 4.2 延迟约束对部署与调度策略的影响

图 6 反映了延迟约束对部署和调度策略的影响,传感器节点的占空比设置为 0.2,为简化仿真,延迟约束设置为时隙的整数倍.从图中可见,延迟约束的大小对部署策略影响较大,随着延迟约束的增大(允许的捕获延迟变大),所需要部署节点的数目明显减少.比较图 6 和图 4 不难发现,两张图的变化趋势非常相似.实际上,延迟约束增大可以等价地看作增加节点的占空比因数.例如,延迟约束为两个时隙,占空比为 0.2(即工作时间为两个时隙)的网络实际效果与占空比为 0.4 且延迟约束为 0 的情况相同.这说明,如果用户允许的捕获延迟约束比较宽松,实际相当于不增加能耗的同时却增加了节点的占空比,从而可降低部署代价.

#### 4.3 传感器节点睡眠模式对部署与调度策略的影响

为了验证节点睡眠模式对部署与调度策略的影响,本节比较了同步睡眠模式、异步睡眠模式以及 DIFF\_DEPLOY 算法<sup>[4]</sup>所需的等效节点数目.由于 DIFF\_DEPLOY 算法没有考虑延迟约束,因此这里延迟约束置为 0,并且 DIFF\_DEPLOY 算法没有同步、异步睡眠模式之分,节点占空比始终为 1.对于同步睡眠网络,节点的



占空比不能小于覆盖性能要求,并且当各个 PoI 的覆盖性能要求不同时,节点占空比必须取它们的最大值.对于异步睡眠网络,我们根据图 5 的结论选择最佳的占空比以获得最少的等效节点数目.仿真结果如图 7 所示,我们发现异步睡眠模式的网络需要部署的等效节点数目远小于同步睡眠模式的网络和按 DIFF\_DEPLOY 算法部署的情况,而同步睡眠模式下得到的部署策略与采用 DIFF\_DEPLOY 算法得到的部署策略性能相近.这是由于同步睡眠模式的网络实际上没有进行睡眠调度,这也验证了调度策略对部署的影响较大这一结论.

为进一步验证联合部署与调度策略的有效性,我们基于相同的部署策略,比较了联合部署与调度算法和随机睡眠调度对实际覆盖性能的影响.由于联合部署与调度策略得到的是一组 Pareto 解,我们取其中覆盖性能误差在 3% 以内的部署节点最少的解作为参考解,从图 8 可以看出,采用联合部署和调度策略的参考解覆盖性能误差在 2.8% 左右.不改变其部署策略,随机生成每个节点的工作起始时间作为比较,可以看到,随着节点占空比的降低,睡眠调度策略对覆盖性能的影响变大;随着覆盖性能要求的提高,睡眠调度策略对覆盖性能的影响明显变大.特别是当节点占空比为 0.2、覆盖性能要求为 0.9 时,实际覆盖性能和覆盖性能要求误差达 6%,是联合部署与调度策略的 2 倍.这说明,在联合部署与调度策略中,节点的睡眠调度策略能很好地改善实际的覆盖性能,尤其是当节点低占空比工作、覆盖性能要求较高时.

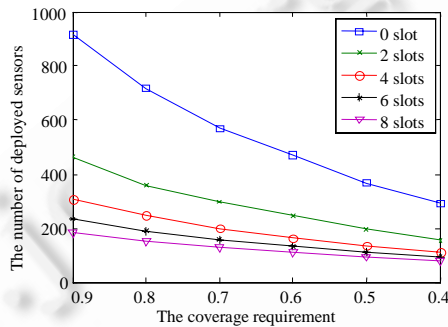


Fig.6 The number of deployed sensors against the coverage requirement for varied delay constraints  
图 6 不同延迟约束下部署节点数目随覆盖要求的变化

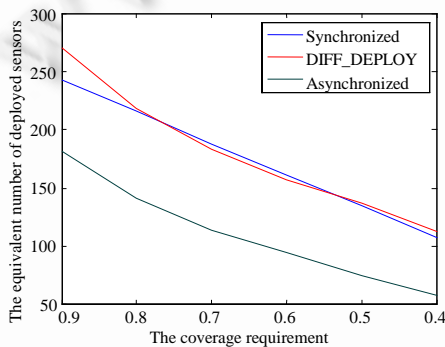


Fig.7 The equivalent number of sensors against the coverage requirement for different strategies

图 7 不同策略下等效部署节点数目随覆盖要求的变化

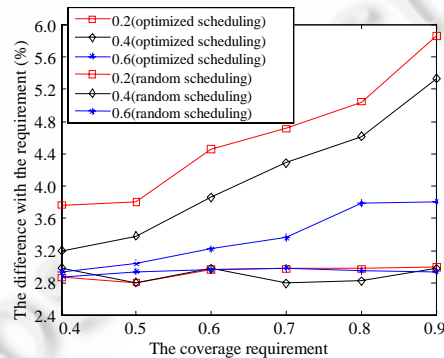


Fig.8 The difference with the requirement against the coverage requirement for optimized and random scheduling

图 8 联合部署调度优化与相同部署情况的随机调度下的网络性能比较

### 5 结 论

本文提出一种基于 NSGA-II 的传感器节点联合优化部署与调度的策略,可以根据应用的覆盖性能要求、给



定的捕获延迟约束,提供一组部署与调度策略集,供用户权衡选择,能更好地兼顾部署成本、网络寿命和实时性能.通过分析节点占空比、延迟约束和节点睡眠模式的对部署调度策略的影响可知,选择较低的占空比工作而部署更多的节点相对于选择较高的占空比工作、部署较少的节点更能节省成本,在容许的延迟约束较为宽松的情况下,选择低占空比的异步睡眠模式网络更加节能,并且,采用本文提出的联合部署与调度策略相比,随机睡眠调度能够获得更优的事件捕获性能.

#### References:

- [1] He SB, Chen JM, Yau D KY, Shao HY, Sun YX. Energy-Efficient capture of stochastic events by global and local periodic network coverage. In: Proc. of the 10th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). New York: ACM Press, 2009. 155–164. [doi: 10.1145/1530748.1530769]
- [2] Cao Q, Yan T, Stankovic J, Abdelzaher T. Analysis of target detection performance for wireless sensor networks. Lecture Notes in Computer Science 3560, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 276–292.
- [3] Zou Y, Chakrabarty K. Uncertainty-Aware and coverage-oriented deployment for sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2004,64(7):788–798. [doi: 10.1016/j.jpdc.2004.03.019]
- [4] Zhang JB, Yan T, Son SH. Deployment strategies for differentiated detection in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). Reston, 2006. 316–325. [doi: 10.1109/SAHCN.2006.288436]
- [5] Aitsaadi N, Achir N, Boussetta K, Pujolle G. A tabu search WSN deployment method for monitoring geographically irregular distributed events. Sensors, 2009,9(3):1625–1643. [doi: 10.3390/s90301625]
- [6] Li YJ, Song YQ, Zhu YH, Schott R. Deploying wireless sensors for differentiated coverage and probabilistic connectivity. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). Sydney, 2010. 1–6. [doi: 10.1109/WCNC.2010.5506350]
- [7] Jia J, Chen J, Chang GR, Zhao LL, Wang GX. Optimal coverage scheme based on genetic algorithm in wireless sensor networks. Control and Decision, 2007,22(11):1289–1292, 1301 (in Chinese with English abstract).
- [8] Cao Q, Abdelzaher T, He T, Stankovic J. Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection. In: Proc. of the Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Los Angeles, 2005. 20–27. [doi: 10.1109/IPSN.2005.1440887]
- [9] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2002,6(2):182–197. [doi: 10.1109/4235.996017]
- [10] Zhen JH. Multi-Objective Evolutionary Algorithm and its Applications. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese).

#### 附中文参考文献:

- [7] 贾杰,陈剑,常桂然,赵林亮,王光兴.无线传感器网络中基于遗传算法的优化覆盖机制.控制与决策,2007,22(11):1289–1292, 1301.
- [10] 郑金华.多目标进化算法及其应用.北京:科学出版社,2007.



陆汉城(1987—),男,江苏扬州人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络,无线网络协议.



朱艺华(1961—),男,博士,教授,主要研究领域为移动计算,无线网络协议.



李燕君(1982—),女,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络.