

## 无线传感器网络中近似事件检测节点调度问题\*

高 静, 李建中

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

通讯作者: 高静, E-mail: gaojinghit@163.com

**摘 要:** 在异构的无线传感器网络中, 组成事件的不同类型的数据之间具有较强的相关性. 为了减少能量的消耗, 可以通过收集组成事件的部分感知数据来近似地检测该事件. 提出近似事件检测的节点调度问题. 将网络中的节点分成若干个集合, 每个集合轮流工作, 在保证收集到的部分数据能够有效地近似检测目标事件的同时, 最大化网络的生命周期. 证明了近似事件检测的节点调度问题是 NP 完全问题, 并给出了基于贪心策略的近似比为 1/2 的近似算法. 实验结果表明, 方法能够有效延长网络的生命周期.

**关键词:** 无线传感器网络; 事件检测; 睡眠调度

中文引用格式: 高静, 李建中. 无线传感器网络中近似事件检测节点调度问题. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (1)): 11-18. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14002.htm>

英文引用格式: Gao J, Li JZ. Nodes scheduling for approximate event detection in wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 11-18 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14002.htm>

## Nodes Scheduling for Approximate Event Detection in Wireless Sensor Networks

GAO Jing, LI Jian-Zhong

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Corresponding author: GAO Jing, E-mail: gaojinghit@163.com

**Abstract:** In heterogeneous wireless sensor networks, a strong relation exists among different types of data being composed into an event. Energy consumption can be reduced by collecting partial data to approximately detect the event. A node scheduling problem for approximate event detection is proposed. The nodes in the network are organized into subsets that are activated successively. The lifetime of the network is maximized on the condition that the partial data collected can be formed as an approximation of the event. The node scheduling problem for approximate event detection is proved to be NP-complete. A greedy-based approximate algorithm is devised with 1/2 as the approximate ratio. The experimental results illustrate that the lifetime of the network can be prolonged effectively.

**Key words:** wireless sensor networks; event detection; sleep scheduling

随着无线通信技术和电子技术的发展, 无线传感器网络已经广泛应用于医疗监护、交通管理、国防和环境监测等领域<sup>[1-4]</sup>. 广泛的应用前景和多样的需求对传感器网络的服务质量提出了更高的要求. 在很多应用中网络中部署了大量的异构节点, 这些异构的节点带有不同的部件, 具有不同的计算、感知和通信能力. 异构性能显著提高无线传感器网络的灵活性和健壮性<sup>[5]</sup>.

网络中的异构节点能够产生不同类型的数据, 我们称为多模态数据. 由于感知数据的时空相关性, 在系统监测中, 这些多模态数据互相关联和补充, 共同反应系统的状态和监测对象的信息, 并且提高监测的准确性和可靠性. 例如在森林监测系统中, 当发生火灾时, 较高的光强通常伴随着较高的温度, 光强数据和温度数据共同用来反映火灾事件.

事件监测是传感器网络中一种非常重要的应用<sup>[6-12]</sup>. 在异构的传感器网络中, 事件由不同感知器件产生的

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61033015, 61190115, 60831160525)

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

多模态数据组成.我们将事件分成基本事件和复合事件.基本事件是事件的最小单位,仅由单一模态的数据构成,用来描述监测对象某一侧面的特征.复合事件由多种满足一定的时间和空间约束的基本事件构成,用来反映监测对象的整体信息.例如在战场监测系统中,光强、声音、烟雾、震动和视频传感器共同用来监测爆炸事件.当爆炸发生时,检测到爆炸的每一种类型的传感器分别产生基本事件,这些基本事件合成爆炸这一复合事件.

快速准确地检测事件是无线传感器网络必须提供的服务.然而,在实际应用中,由于节点的资源有限性,实时的收集事件所涉及的所有的多模态数据是十分困难的.在组成事件的多种数据中,一些数据(例如音频和视频等多媒体数据)在传输和处理过程中会产生巨大的能量和带宽的消耗,并导致较大的时延.另外,事件在网络中发生的概率通常不高,实时的收集所有的事件数据无疑会造成较大的能耗,并且在没有发生事件的情况下收集到的数据价值是十分有限的.由于环境噪声和感知器件误差的影响,感知数据本身就带有一定的不确定性.同时也为了降低能量的消耗和延长网络的生命周期,使用近似的方法来检测事件是更好的选择.组成事件的感知数据之间具有较强的时空关联性,不同类型的数据从不同的侧面反映事件的信息.在数据收集的过程中,这些数据相互补充,共同完善事件的信息.当部分具有代表性的数据被检测到时,就能够近似的判定事件是否发生.由于不需要实时的收集所有的数据,近似的事件检测模式能够有效的降低能量的消耗,延长网络的生命周期.

本文研究基于近似事件检测的节点睡眠调度问题.假设系统检测的复合事件  $E$  由  $k$  种基本事件组成,这些基本事件由不同节点产生的不同类型的感知数据生成.由于使用近似事件检测模式,并不需要实时的监测所有的  $k$  种基本事件数据.系统检测到特定的部分数据即可判定事件是否发生,我们将这部分数据称为事件  $E$  的一种近似模式.系统中可能存在多种不同的事件近似模式.假设系统给定  $m$  种事件的近似模式,需要求解一种节点的调度策略,也就是将节点分成若干个子集合,这些集合中的节点依次轮流工作,同一时刻只有一个集合中的节点工作,其他集合中的节点处于睡眠状态,每个集合中节点工作一段时间之后,进入睡眠状态,下一个集合中的

节点被唤醒进入工作状态.给定  $m$  种事件  $E$  的近似模式,本文研究节点的最佳调度方案,在保证事件能够满足近似模式的条件下,即保证事件能够被有效的检测的情况下,最大化网络的生命周期.例如图 1 所示,完整确定的检测目标处发生的事件需要{1,2,3,4}共 4 类节点.由于这 4 类节点数据之间具有相关性,检测第 1 种节点数据和第 4 种节点数据也能近似的检测目标处发生的事件,如近似情况 1 所示.近似情况 2 表示检测第 2 种节点数据和第 3 种节点数据同样能够近似反映事件的信息.因此,可以将节点分成两个集合{1,4}和{2,3},两个集合中的节点轮流工作,延长网络的生命周期.

本文研究了基于近似事件检测的节点调度问题,在保证事件检测有效性的情况下延长网络的生命周期.分析了基于近似事件检测的节点调度问题的复杂性,证明该问题是 NP 完全问题.给出了求解基于近似事件检测的节点调度问题的近似算法,并分析了算法的近似比.实验结果表明本文的方法能够有效地求解最优调度策略,延长网络的生命周期.

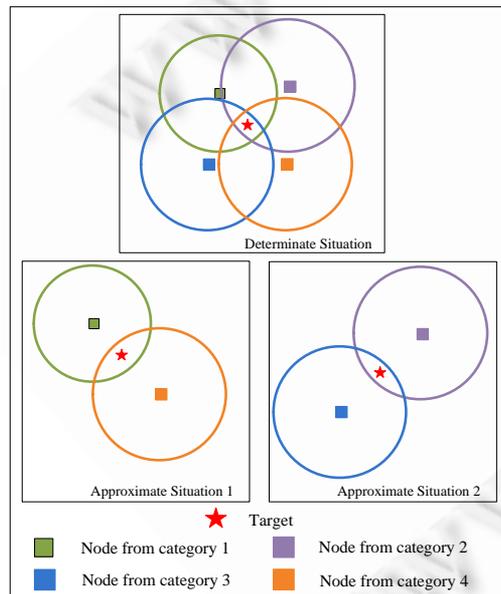


图 1 节点调度示例

本文第 1 节中简要阐述相关工作.第 2 节详细描述基于近似事件检测的节点调度问题的形式和定义.第 3 节分析基于近似事件检测的节点调度问题的复杂性.第 4 节给出求解该问题的近似算法并证明其近似比.第 5 节通过实验验证算法的有效性.第 6 节总结全文.

## 1 相关工作

事件检测是无线传感器网络中一种典型的应用,大量的文献研究了无线传感器网络中的事件检测问题.文献[6-8]研究了同构传感器网络中的事件检测问题,文献[9,10]提出了复合事件的检测方法,这些方法都集中于精确的事件检测.

能量管理一直是传感器网络的研究中至关重要的问题<sup>[11-16]</sup>.睡眠机制为减少网络的能量消耗,延长网络的生命周期提供了十分有效的方法.文献[17-19]提出的睡眠协议通过使用不同的策略最大化覆盖面积来延长网络的生命周期.文献[20-22]研究了目标检测中的调度问题.文献[20]将网络中的节点划分成不相交的子集,通过每个子集轮流工作来延长网络的生命周期,文中证明了该问题是 NP 完全问题.文献[21]通过对目标建立监测时间表来延长网络的生命周期.与文献[20]相似,文献[22]将网络中的节点划分成若干子集,但是不要求每个子集监测所有的目标.文献[23]提出了基于目标跟踪的调度策略.虽然有少量的文献研究针对事件检测的调度问题,但是方法在研究目标上与本文存在较大的差异.文献[24,25]提出了基于控制系统中状态估计的调度问题.文献[26]提出了复合事件的检测的调度问题,但是该方法没有考虑异构数据之间的相关性,也不支持近似的事件检测.本文提出异构传感器网络中基于近似事件的节点调度问题,在保证事件的近似检测特性的同时,最大化网络的生命周期.

## 2 问题定义

### 2.1 问题的形式化描述

假设网络中存在  $k$  类节点,系统检测的事件  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$  由  $k$  种基本事件组成,这  $k$  中基本事件由不同器件产生的多模态数据生成.当  $k$  种基本事件都发生时,并且满足预先给定的时空约束,可以认为事件  $E$  发生.但是,这些基本事件中有些事件不容易检测和处理;另外,节点的资源是有限的,检测所有的事件数据将耗费大量的资源,所以在有些应用中,可以根据用户的需要和系统的要求来近似的检测复合事件.我们使用事件的近似模式来描述近似检测所需的数据子集合.

**定义 1**(事件的近似模式). 对于事件  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ , 其近似模式  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$  为  $k$  维的 0-1 向量,其中,

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{事件 } e_i \text{ 需要被检测} \\ 0, & \text{事件 } e_i \text{ 不需要被检测} \end{cases}$$

例如对于给定的事件  $E_1=\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ , 它的近似模式  $A_1=\{0, 1, 0, 1\}$  表示这一近似模式要求至少要检测基本事件  $e_2$  和  $e_4$  才能确定事件  $E_1$  的发生.

对于给定的事件,它的近似模式可能会有多个,这些近似模式可以由专家根据背景信息给定,也可以根据历史数据通过机器学习等方法获得.

对于给定的事件  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ , 存在  $m$  个近似模式  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . 在对事件进行监测时,仅需要检测其中某一种近似模式指定的数据就能近似的检测出事件是否发生.因此,在目标检测系统中,可以使部分类型的节点处于睡眠状态,只需要保证检测目标的节点满足某一近似模式即可.例如上文中的近似模式  $A_1=\{0, 1, 0, 1\}$ , 只需要第 2 类和第 4 类节点处于工作状态,即使第 1 类和第 3 类节点处于睡眠状态,也能够检测到目标处是否发生事件  $E_1$ . 在目标监测系统中,可以使目标依次处于  $m$  个近似模式,既能保证目标事件的检测,又能延长网络的生命周期.

系统存在  $k$  类节点,每种节点的总能量分别为  $C_1, C_2, \dots, C_k$ . 我们定义  $c_1, c_2, \dots, c_k$  分别为每一类节点单位时间的能耗.  $t_1, t_2, \dots, t_m$  分别为目标处于  $m$  种近似模式的时间. 对于第  $i$  类节点,在第  $j$  个近似模式  $A_j=\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{kj}\}$  中的能量消耗为  $c_i a_{ij} t_j$ . 目标轮流处于  $m$  种近似模式,那么第  $i$  类节点总的能量消耗为  $c_i \sum_{j=1}^m a_{ij} t_j \leq C_i$ . 由于节点消耗的能量不能大于其总能量,有  $c_i \sum_{j=1}^m a_{ij} t_j \leq C_i$  成立.

我们定义近似事件检测的节点调度问题 NSAED(node scheduling problem for approximate event detection)

如下:给定事件模式 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ 和 $m$ 个近似模式 $A_1, A_2, \dots, A_m$ , $k$ 类节点的单位时间能耗 $c_1, c_2, \dots, c_k$ 和总能量 $C_1, C_2, \dots, C_k$ .计算目标处于每种近似模式的时间 $t_1, t_2, \dots, t_m$ ,在每类节点的能量限制 $c_i \sum_{j=1}^m a_{ij} t_j \leq C_i$ 满足的条件下,使得网络的生命周期 $T_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} t_j \leq C_i$ 取得最大值.

问题的形式化定义如下:

给定模式矩阵 $A_{k \times m} = [A_1^T, A_2^T, \dots, A_m^T] = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \dots & a_{km} \end{bmatrix}$ ,其中 $a_{ij}$ 表示第 $j$ 种近似模式下第 $i$ 类节点的状态(0为

睡眠状态,1为工作状态).单位时间能耗矩阵为 $I_{k \times k} = \begin{bmatrix} c_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & c_k \end{bmatrix}$ ,能量矩阵为 $c_{k \times 1} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_k \end{bmatrix}$ ,以及时间矩阵

$$T_{m \times 1} = \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix}.$$

近似事件检测的节点调度问题定义为

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } T_i = \sum_{j=1}^m t_j \\ & \text{Subject to C-IAT} \geq 0 \\ & t_i \in \{0, 1, 2, \dots\}. \end{aligned}$$

## 2.2 近似模式的计算

我们给出一种简单的方法计算近似模式.由于组成复合事件的数据具有较强的关联性,我们可以给每一种数据设定一个概率值,用来表示当该数据被监测时,复合事件发生的可能性.当多种数据同时被监测时,将每种数据的概率值相加即可获得这些数据对复合事件发生的支持度.例如对于事件 $E_1=\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ ,每种数据产生的基本事件的概率值分别为 $P(e_1)=0.15, P(e_2)=0.25, P(e_3)=0.4$ 和 $P(e_4)=0.3$ .对于给定的近似模式阈值0.7,可以生成2个近似模式: $A_1=\{1, 1, 1, 0\}$ (由于 $P(e_1)+P(e_2)+P(e_3) \geq 0.7$ )和 $A_2=\{0, 0, 1, 1\}$ (由于 $P(e_3)+P(e_4) \geq 0.7$ ).这些数据的概率值可以根据应用的背景信息设定,也可以通过对历史数据的分析和挖掘获得.

## 3 复杂性分析

本节我们分析近似事件检测的节点调度问题的NSAED的复杂性.

**定理 1.** 近似事件检测的节点调度问题NSAED是NP完全问题.

证明:首先,NSAED问题是NP问题,对于任意的猜测解,图灵机可以在多项式时间对结果进行验证.

我们使用 $(s, t)$ -路径限制网络流问题进行规约.文献[27]中证明了该问题是NP完全的. $(s, t)$ -路径限制网络流问题的形式化定义如下:给定有向图 $G=(V, A)$ 和每条边 $a$ 上的容量 $c(a) \in \mathbb{N}$ , $s$ 为源节点, $t$ 为目的节点, $P$ 为图 $G$ 中 $s$ 到 $t$ 的路径的集合,路径集合 $P_a \subset P$ 表示 $P$ 中所有包含边 $a$ 的路径的集合.给定整数 $R \in \mathbb{N}$ ,是否存在映射 $y: P \rightarrow \mathbb{N}$ ,使得对于流映射 $f: A \rightarrow \mathbb{N}$ ,且 $f(a) = \sum_{p \in P_a} y(p)$ ,满足以下条件:(1)对所有的 $a \in A, f(a) \leq c(a)$ ,成立;(2)对任意节点 $v \in V \setminus \{s, t\}$ ,流守恒;(3)由 $s$ 到 $t$ 的数据流至少为 $R$ .

我们将 $(s, t)$ -路径限制网络流问题规约到NSAED问题.对于有向图 $G=(V, A)$ ,令 $k=|A|$ ,每条边对应一类节点,并给图中每条边编号 $1, 2, \dots, k$ .路径集合 $P$ 中的每一条路径 $p_i$ 对应一个事件的近似模式 $A_i=\{a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ki}\}$ ,其中,

$$a_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{路径 } p_i \text{ 包含边 } j \\ 0, & \text{路径 } p_i \text{ 不包含边 } j \end{cases}. \text{对于边 } i \text{ 上的流量 } c(a), \text{令 } C_i/c_i = c(a). \text{对于 } (s, t)\text{-路径限制网络流问题所需求解的映射}$$

$y: P \rightarrow \mathbb{N}$ , 令  $t_i = y(p_i)$ , 则  $(s, t)$ -路径限制网络流问题的条件(1)对应 NSAED 问题的约束  $\sum_{j=1}^m a_{ij} t_j \leq C_i / c_i$ .  $(s, t)$ -路径限制网络流问题中所有经过集合  $P$  中的路径的流的总流量最多为  $\sum_{j=1}^m t_j$ . 不难看出, 当  $(s, t)$ -路径限制网络流问题中  $s$  到  $t$  的网络流取最大值时, NSAED 问题的生命周期  $\sum_{j=1}^m t_j$  也取得最大值. 上述规约可以在多项式时间完成.

综上近似事件检测的节点调度问题 NSAED 是 NP 完全问题.  $\square$

#### 4 求解算法

我们证明了近似事件检测的节点调度问题 NSAED 是 NP 完全的, 本节给出求解该问题的近似算法 NSAED-Greedy, 并证明算法的近似比. 算法 NSAED-Greedy 使用贪心策略, 具体描述如下.

**算法. NSAED-Greedy.**

输入:  $k$ : 节点的种类,

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ : 系统监测的事件,

$C_1, C_2, \dots, C_k$ : 每类节点的总能量,

$c_1, c_2, \dots, c_k$ : 每类节点单位时间能耗,

$A_1, A_2, \dots, A_m$ : 事件  $E$  的  $m$  个近似模式;

输出: 网络的生命周期  $T_l$ .

1. 初始化集合  $S = \emptyset$

2. 迭代:

2.1 对节点类别  $i$  从  $1 \sim k$  依次进行如下操作:

2.2 对于所有包含第  $i$  类节点的近似模式  $p_j (a_{ij}=1)$  且按照非增的顺序依次处理  $p_j$

2.3 贪心的设定近似模式  $p_j$  的时间, 并将此时处于饱和状态的节点类别加入集合  $S$  中

3. 设  $S$  中节点的顺序为  $s_1, s_2, \dots, s_l$

4. 反向删除: 对于  $j=l-1$ , 若  $S - \{s_j\}$  中每个近似模式仍然存在至少一个饱和节点, 则  $S = S - \{s_j\}$

5. 输出  $T_l = 1/2 \sum_{s_i \in S} C(s_i)$

算法 NSAED-Greedy 从空集合  $S$  出发, 通过迭代依次加入饱和节点来逼近可行解. 对于近似模式  $p_j$ , 若其时间  $t_j$  等于某类节点的最长工作时间, 即  $t_j = C_i / c_i$ , 则称节点  $i$  处于饱和状态. 在每一次迭代中, 贪心的设定近似模式  $p_j$  的时间, 即该近似模式不能在满足节点能量限制的前提下设定更长的时间, 然后将此时处于饱和状态的节点加入集合  $S$  中(步骤 2). 最后, 删除集合  $S$  中多余的节点(步骤 4). 根据得到的最终集合  $S$  计算输出的网络生命周期(步骤 5).

为了证明算法 NSAED-Greedy 的近似比, 我们使用 NSAED 问题的对偶问题. NSAED 的对偶问题形式化描述如下:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \sum_{i=1}^k x_i C_i / c_i \\ & \text{Subject to } A_r X \geq 1 \end{aligned}$$

其中  $c_{k \times 1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}$ .

**引理 1.** 算法 NSAED-Greedy 处理第  $i$  类节点时, 对于近似模式  $p_j$ , 在第  $1, 2, \dots, i$  类节点和第  $i+1, \dots, k$  类节点中分别至多只有一个节点处于饱和状态.

证明: 该引理在两部分节点集合中是等价的, 因此下面以第  $1, 2, \dots, i$  类节点为例进行证明. 我们使用反证法证明引理. 假设处理第  $i$  类节点时, 在第  $1, 2, \dots, i$  类节点中有两类节点处于饱和状态, 设为  $i_1$  和  $i_2$ , 且  $i_1 \leq i_2$ . 在反向删除过程中, 显然  $i_1$  和  $i_2$  都没有被删除. 当检测  $i_1$  时, 由于没有删除  $i_1$ , 则必然存在某一近似模式  $p_l$ ,  $i_1$  是  $p_l$  中唯一的

饱和节点,  $p_l$  包含节点  $i_1$ , 不包含节点  $i_2$ , 则在迭代过程中,  $p_l$  一定先于  $p_j$  被处理. 当迭代处理  $p_l$  时, 于此时  $i_1$  没有被加入集合  $S$  中, 那么必然存在节点  $i_3$  处于饱和状态, 并且  $i_3$  先于  $i_1$  被加入集合  $S$  中. 上文提到检测  $i_1$  时,  $i_1$  是  $p_l$  中唯一的饱和节点. 因此产生矛盾, 命题得证.  $\square$

**定理 2.** 算法 NSAED-Greedy 的近似比是 1/2.

证明: 首先证明算法产生 NSAED 问题的一个可行解. 在 NSAED-Greedy 的迭代过程中, 生成所有饱和节点的集合  $S$ , 在随后的逆向删除过程中, 算法删除集合  $S$  中所有重复和多余的节点, 即删除该节点之后, 所有近似模式都存在至少一个饱和节点. 近似模式中饱和节点的最大工作时间即为这个近似模式的运行时间. 由此, 算法 NSAED-Greedy 能够产生一个可行解.

由引理一可知, 算法 NSAED-Greedy 在迭代的过程中对每一个近似模式至多选择两个饱和节点, 这相当于将 NSAED 的对偶问题中的约束条件  $A^T X \geq 1$  放松成  $A^T X \geq 2$ , 根据优化问题的对偶原理<sup>[28]</sup>可知, 算法 NSAED-Greedy 的获得的可行解  $1/2OPT \leq T_l \leq OPT$ , 其中  $OPT$  是最优解. 算法 NSAED-Greedy 的近似比为 1/2.  $\square$

## 5 实验分析

实验算法采用 C++ 实现. 实验设备是运行 WinXP SP3, 具有 Intel Core 2 处理器 2.9Hz、2G 内存的 PC 机. 实验考察了节点的总能量、单位时间能耗、以及不同的近似模式对网络生命周期的影响, 最后考察了 NSAED-Greedy 算法的性能.

在实验中, 我们假设网络中存在 5 类节点, 每类节点对应的基本事件的置信度分别为 0.05、0.1、0.15、0.25 和 0.45. 针对不同的事件近似模式阈值, 可以计算出不同的近似模式集合, 进而计算出不同的调度方案.

图 2 描述了使用本文提出的 NSAED 调度策略与不使用睡眠调度策略的对比. 其中, 横坐标表示近似模式的阈值, 纵坐标表示网络的生命周期. 从图中可以看出, 随着近似模式的阈值提高, 网络的生命周期逐渐减少. 因为近似模式的阈值提高, 可用的近似模式随之减少, 对事件检测所需的数据逐渐增多, 允许睡眠的节点个数减少, 网络的生命周期也随之降低. 无睡眠调度策略中生命周期是固定值. 图 2 中可以看出, NSAED 调度策略能够有效地降低能量消耗, 提高网络的生命周期. 当对事件近似模式阈值要求为 0.8 时, 网络的生命周期能够延长 25% 左右, 当对事件近似模式阈值的要求降低为 0.5 时, 网络的生命周期能够延长 50% 左右.

图 3 描述了 NSAED-Greedy 算法计算的近似解与最优生命周期之间的关系. 随着近似模式阈值的提高, 无论是 NSAED-Greedy 算法输出的近似解还是最优的网络的生命周期都是逐渐减少的. 因为近似模式阈值提高意味着所需数据的增加和可用近似模式的减少, 网络中需要更多的节点处于工作状态. NSAED-Greedy 算法计算的近似解小于最优的生命周期, 但是总是保持在近似比 1/2 的范围内.

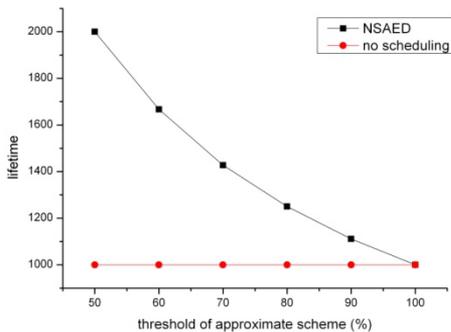


图 2 NSAED 调度与无睡眠模式的对比

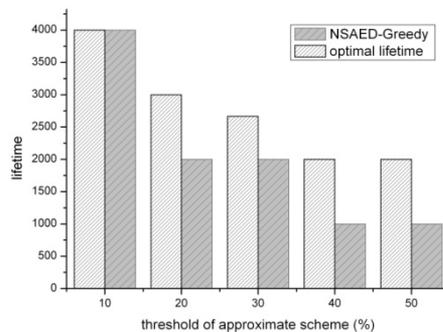


图 3 NSAED-Greedy 算法与最优解的对比

图 4 描述了节点单位时间能耗对生命周期的影响.我们研究在其他节点的能量保持不变时,增加某一类节点的单位时间能耗对整个网络的生命周期的影响.其中,横坐标表示第  $i$  类节点单位时间能耗增加的倍数,纵坐标表示网络的生命周期.从图中可以看出,当网络中某一节点的单位时间能耗增加,其他节点的能耗不变时,网络的生命周期随之降低.当节点  $i$  单位时间能耗增加时,由于总能量保持不变,包含第  $i$  类点的所有近似模式能够工作的时间都随之减少,总的生命周期随之降低.当第  $i$  类节点的单位时间能耗降低到一定程度时,该节点将变成瓶颈节点,严重影响网络的生命周期.

图 5 描述节点总能量对生命周期的影响.我们研究在其他节点的能量保持不变时,增加某一类节点的总能量对整个网络的生命周期的影响.其中横坐标表示第  $i$  类节点总能量增加的百分比,纵坐标表示网络的生命周期.从图中可以看出,增加第  $i$  类节点的总能量能够提高整个网络的生命周期,但是当总能量增加到一定的程度时,网络的生命周期不再继续延长.由于增加第  $i$  类节点的总能量,包含第  $i$  类点的所有近似模式能够工作的时间都随之增加,网络的生命周期也随之增加.但是,当第  $i$  类节点的总能量增加到一定程度时,将不会继续影响整个网络的生命周期,因为此时其他类别的节点的能量成为影响网络生命周期的瓶颈.因此,要显著提高整个网络的生命周期,应该尽可能的提高近似模式中所有节点的能量.

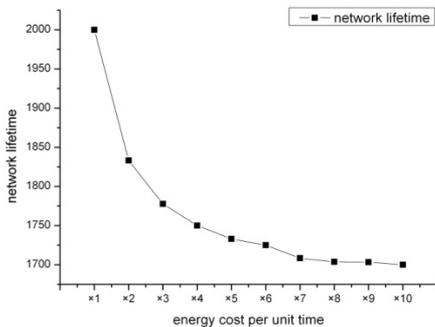


图 4 节点单位时间能耗对生命周期的影响

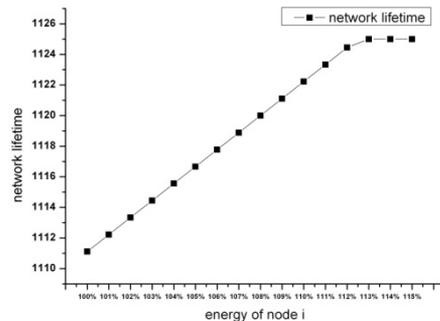


图 5 节点总能量对生命周期的影响

## 6 结论

为了降低节点的能量消耗和延长网络的生命周期,本文研究异构传感器网络中近似事件检测的节点调度问题.文章给出了近似事件检测的节点调度问题的定义,并分析了该问题的复杂性,证明了该问题是 NP 完全问题.文中给出了基于贪心策略的近似算法来求解最优的调度策略,并证明了该算法的近似比是  $1/2$ .实验结果验证了算法的有效性,并表明文中提出的方法能够有效的延长网络的生命周期.

### References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4):393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [2] Sitharama IS, Brooks RR. *Distributed Sensor Networks: Sensor Networking and Applications*. 2nd ed., CRC Press, 2012.
- [3] Li JZ, Gao H. Survey on sensor network research. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(1):1–15. (in Chinese with English abstract).
- [4] Alemdar H, Ersoy C. Wireless sensor networks for healthcare: A survey. *Computer Networks*, 2010,54(15):2688–2710. [doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.003]
- [5] Yarvis M, Kushalnagar N, Singh H, Rangarajan A, Liu Y, Singh S. Exploiting heterogeneity in sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2005)*. IEEE Press, 2005,2:878–890. [doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498318]
- [6] Abadi DJ, Madden S, Lindner W. Reed: Robust, efficient filtering and event detection in sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Very Large Data Bases (VLDB 2005)*. ACM, 2005. 769–780.
- [7] Cheng XZ, Huang X, Li DY, Wu WL, Du DZ. A polynomial-time approximation scheme for the minimum-connected dominating set in ad hoc wireless networks. *Networks*, 2003,42(4):202–208. [doi: 10.1002/net.10097]

- [8] Ding M, Chen DC, Xing K, Cheng XZ. Localized fault-tolerant event boundary detection in sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2005). IEEE, 2005. 902–913. [doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498320]
- [9] Vu CT, Beyah RA, Li YS. Composite event detection in wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Performance Computing and Communications Conference (IPCCC 2007). IEEE, 2007. 264–271. [doi: 10.1109/PCCC.2007.358903]
- [10] Amato G, Chessa S, Gennaro C, Vairo, C. Efficient detection of composite events in wireless sensor networks: Design and evaluation. In: Proc. of the IEEE Symp. on Computers and Communications (ISCC 2011). IEEE, 2011. 821–823. [doi:10.1109/ISCC.2011.5983943]
- [11] Cheng XZ, Thaeler A, Xue GL, Chen DC. TPS: A time-based positioning scheme for outdoor wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2004). IEEE, 2004. 2685–2696. [doi: 10.1109/INFCOM.2004.1354687]
- [12] Cheng, XZ, Du DZ, Wang LS, Xu BG. Relay sensor placement in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2008,14(3): 347–355. [doi: 10.1007/s11276-006-0724-8]
- [13] Boukerche A, Cheng XZ, Linus J. Energy-Aware data-centric routing in microsensor networks. In: Proc. of the 6th ACM Int'l Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. ACM, 2003. 42–49. [doi: 1145/940991.941000]
- [14] Cheng SY, Li JZ, Cai ZP.  $O(\epsilon)$ -Approximation to physical world by sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2013). IEEE, 2013. 3084–3092. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6567121]
- [15] Li JZ, Cheng SY, Gao H, Cai ZP. Approximate physical world reconstruction algorithms in sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2014. [doi: 10.1109/TPDS.2013.2297121]
- [16] Cai, ZP, Lin GH, Xue GL. Improved approximation algorithms for the capacitated multicast routing problem. Computing and Combinatorics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 136–145. [doi: 0.1007/11533719\_16]
- [17] Gui C, Mohapatra P. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks. In: Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2004). ACM, 2004. 129–143. [doi: 10.1145/1023720.1023734]
- [18] Cai YL, Li ML, Shu W, Wu MY. Acos: A precise energy-aware coverage control protocol for wireless sensor networks. Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 701–710. [doi: 10.1007/11599463\_68]
- [19] Zhang HH, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2005,1(1-2):89–124. [doi: 10.1201/9780203323687.ch28]
- [20] Cardei M, Thai MT, Li Y, Wu WL. Energy-Efficient target coverage in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2005). IEEE, 2005. 1976–1984. [doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498475]
- [21] Liu H, Wan PJ, Yi CW, Jia XH, Makki S, Niki P. Maximal lifetime scheduling in sensor surveillance networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2005). IEEE, 2005. 2482–2491. [doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498533]
- [22] Cheng MX, Ruan L, Wu WL. Achieving minimum coverage breach under bandwidth constraints in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2005). IEEE, 2005. 2638–2645. [doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498547]
- [23] Atia G, Fuemmeler J, Veeravalli V. Sensor scheduling for energy-efficient target tracking in sensor networks. IEEE Trans. on Signal Processing, 2011,59(10):4923–4937. [doi: 10.1109/ACSSC.2010.5757870]
- [24] Han D, Mo YL, Wu JF, Weerakkody S, Sinopoli B, Shi L. Stochastic event-triggered sensor schedule for remote state estimation. [http://arXiv:1402.0599v1 \[cs.IT\]](http://arXiv:1402.0599v1[cs.IT]) 4 Feb 2014.
- [25] Shi L, Johansson KH, Qiu L. Time and event-based sensor scheduling for networks with limited communication resources. World Congress of the Int'l Federation of Automatic Control (IFAC), 2011,18(1):13263–13268. [doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00958]
- [26] Ambrose AI. Scheduling for composite event detection in wireless sensor networks. [ProQuest of MasterThesis]. Florida Atlantic University, 2008.
- [27] Puhl C, Stiller S. Line planning, path constrained network flow and inapproximability. Networks Special Issue: Optimization in Scheduled Transportation Networks, 2011,57(1):106–113. [doi:10.1002/net.20386]
- [28] Vazirani VV. Approximation Algorithms. New York: Springer-Verlag, 2001.

#### 附中文参考文献:

- [3] 李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展.计算机研究与发展,2008,45(1):1–15.



高静(1985—),女,黑龙江哈尔滨人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,CPS.  
E-mail: gaojinghit@163.com



李建中(1950—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,信息物理融合系统,数据质量  
E-mail: lijzh@hit.edu.cn