

能量捕获网络中提高复合事件捕捉率策略^{*}

田贤忠, 刘高, 郭敏, 何佳存, 祝驿楠

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

通讯作者: 田贤忠, E-mail: txz@zjut.edu.cn



摘要: 研究可充电传感器网络(rechargeable sensor, 简称RS)捕捉事件问题. 针对原子事件信息单一的缺点, 考虑由多个原子事件组成的复合事件的捕捉问题. 提出一种新颖的复合事件捕捉策略. 首先通过建立数学模型, 将最优复合事件的捕捉率归结成一个优化问题, 并从整体上分析了影响复合事件捕捉率的主要因素; 然后将多节点协作问题等价成任务分配问题进行分析, 先从整体上提出一种基于贪婪算法的总任务分配算法(TTAA), 再根据各个RS的具体情况, 提出一种子任务分配算法(CTAA); 最后进行了仿真实验, 实验结果表明, 通过所提策略能够达到较高的复合事件捕捉率.

关键词: 事件捕捉; 可充电传感器; 原子事件; 复合事件; 任务分配

中文引用格式: 田贤忠, 刘高, 郭敏, 何佳存, 祝驿楠. 能量捕获网络中提高复合事件捕捉率策略. 软件学报, 2017, 28(Suppl. (1)): 20-29. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17003.htm>

英文引用格式: Tian XZ, Liu G, Guo M, He JC, Zhu YN. Strategy to improve composite event capture ratio in energy harvesting networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(Suppl. (1)): 20-29 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17003.htm>

Strategy to Improve Composite Event Capture Ratio in Energy Harvesting Networks

TIAN Xian-Zhong, LIU Gao, GUO Min, HE Jia-Cun, ZHU Yi-Nan

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

Abstract: This paper considers using Rechargeable Sensor nodes (RS) to capture important events. For the defect of simple atomic event information, it considers the composite events composed of multiple atomic events. The paper proposes a novel composite event capture strategy. Firstly, it turns the composite event capture rate into an optimization problem through establishing a mathematical model, and analyzes the main factors affecting composite event capture rate on the whole. Then, it translates the multi-node cooperative problem into a task allocation problem. A total tasks assignment allocation algorithm based on greedy algorithm (TTAA) is put forward, and according to the specific circumstances of each RS (CTAA), a child task allocation algorithm is proposed. Finally, the paper has carried out the simulation experiment, the experimental results show that the proposed strategy can achieve higher rate for the composite event.

Key words: event capture; rechargeable sensor node; atomic event; composite event; task allocation

通过部署无线传感器节点来监测某些特定区域的事件发生情况是无线传感器网络中一个重要的应用. 例如森林火灾监控、气候监测和桥梁结构健康监控等. 传统的传感器节点受限于节点电池容量, 无法满足一些需要长期监测的应用场景的需求. 一个可行的方法是部署可充电的传感器节点, 这类节点可以通过捕获环境或者专用能量源的能量来满足自身的工作能量消耗^[1,2]. 但目前而言, 可充电传感器节点的能量捕获效率都是比较弱的. 正常工作状态下, 节点的能量捕获速率一般要小于能量的消耗速率. 例如, 一般对射频能的捕获功率仅仅在微瓦级别, 而即使是超低功耗的传感器功率也一般在毫瓦级别. 在监测事件过程中, 节点无法始终保证自身处于

* 基金项目: 国家自然科学基金(61672465, 61772472); 浙江省自然科学基金(LY15F020027, LY17F020020)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61672465, 61772472); Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (LY15F020027, LY17F020020)

收稿时间: 2017-05-15; 采用时间: 2017-09-23

感知状态,从而导致事件信息丢失.特别是在一些紧急事件的监测场景中,频繁的事件信息丢失是无法容忍的.因此,如何根据节点的能量捕获和能量消耗情况来对事件发生进行可靠的捕捉是亟待解决的问题.

针对于这一问题,已经有一些研究成果.但其中大部分研究都是基于原子事件考虑的.在推断原子事件是否发生时,一般采取的方式是简单判断某个特定传感数据是否超过了阈值.因此只需要考虑同构节点捕捉事件的问题.例如文献[3,4]就从原子事件发生的随机特征出发,考虑通过合适的占空比策略,动态调节节点的能量消耗来最大化事件捕捉率.然而,在实际应用中往往存在一些复合事件,这类事件的发生不能由单一传感数据直接反映.例如在监测爆炸事件的发生时,通常需要同时监测温度、光照和烟雾等传感数据.只有当某些传感数据同时超过阈值时才能准确推断复合事件是否发生.本文考虑通过部署多个RS来捕捉目标区域复合事件的问题,并假设每个RS可以配置多种类型的传感器.这种可充电传感器节点在实际应用中也是有现实模型的.例如由英特尔西雅图研究院推出的(wireless identification and sensing platform,简称 WISP)节点^[5,11]可以通过捕获射频能来满足自身的工作能耗需求,该节点内置多种类型的传感器,如加速度传感器、温度传感器和光照传感器,并且还可以根据实际需求配置其他类型的低功耗传感器.

本文第1节进行了相关工作比较.第2节介绍模型和基础工作.第3节首先推导出优化目标,并提出了相应的优化算法.第4节介绍了仿真实验并对其结果进行了分析.第5节是总结.

1 相关工作

过去几年,针对于利用RS来对特定区域进行监测的问题已经有大量文献提取了很多优化方案.从RS数量和监测点数量关系上看,可以大致分为一对一监测模型、多对一监测模型和多对多监测模型.在一对一监测模型中,Ren等人在文献[4]中针对于事件的更新过程提出一种动态控制方法.他们还在文献[5]中考虑了不同的能量捕获模型.Zhu等人在文献[6]中从实际角度出发,考虑到真实充电节点的容量限制和工作状态切换时的能量开销,得出每次让节点充满电时开始工作并直到无法继续工作时结束能达到最大的捕获率.在多对一监测模型中,在文献[7]中,Kar等人策略是每次让 m 个节点同时工作.他们提出一个优化方程,并证明了通过这种策略可以达到理论最优值的75%.在文献[8]中,Jaggi等人设定的事件捕获场景是假设单个节点的充电过程为泊松过程,事件的发生在时间上存在关联性.他们提出一种基于关联的阈值策略并衍生出一种基于能量均衡的阈值策略.在多对多监测模型中,在文献[9]中,Chen等人提出一个范式来求解各个节点的最优工作调度方案,他们首先证明该优化问题是一个NP完全问题,并证明目标函数是一个单调子模.最后提出一个近似最优算法,该算法能达到最优解的1/2.文献[10]在解决多事件监测问题时,通过权值累加的方法将多目标问题转化成常规线性规划问题来进行求解.

以上研究虽然考虑了各种事件监测场景,但是所考虑的事件都是单一因素的原子事件,对于复合事件的监测问题研究还比较少.文献[12,13]虽然考虑了对复合事件的监测问题,但是他们考虑的是如何部署节点的问题,并且没有指出影响复合事件捕捉率的关键因素.本文考虑多个RS协作捕捉目标点复合事件的问题,分析了影响复合事件捕捉率的一些关键因素,并通过控制各个RS的工作状态来最优化复合事件的捕捉率.虽然从数量关系上看,本文研究的监测模型为多对一模型.但由于本文考虑的是复合事件,一个复合事件的发生会伴随多种原子事件的发生.因此,本文考虑的监测模型实际上是多对多模型.此外,为不失一般性,本文假设复合事件和各种原子事件的发生均服从泊松分布.

2 系统模型

在详细介绍算法之前,本节将先介绍监测系统中用到的事件模型,网络模型以及能量模型.

2.1 事件模型

一般来讲,从类型上划分,可以将事件分为原子事件和复合事件^[12].原子事件的发生能通过特定的传感数据直接反应,例如加速度数据的突变可以直接反应运动事件的发生.复合事件的发生则需要由多方面的传感数据间接反应,例如在捕捉暴风雨事件时,需要同时有风力超标、空气湿度超标和土壤湿度超标等多方面传感数据

作为依据.本文主要考虑复合事件的捕获问题,事件模型与文献[12,14]类似.对一个复合事件的捕捉问题,实质是同时对多种原子事件进行捕捉的问题.我们从原子事件出发,首先分析对一种原子事件进行捕捉的问题.

考虑到原子事件发生的瞬时性和传感器的物理特性,为了保证对某一原子事件捕捉的可靠性,可能需要同时开启多个传感器来监测该原子事件.设 m_j 表示同时开启的传感器个数, p_j 表示原子事件 $e_j(j=1,2,\dots,k)$ 发生后,一个传感器能够捕捉到 e_j 发生的概率.那么,原子事件 e_j 发生后能被捕获到的概率 $P(m_j)$ 可以用式(1)表示:

$$P(m_j) = 1 - (1 - p_j)^{m_j} \tag{1}$$

与原子事件捕捉问题不同,捕捉复合事件的发生,要根据其伴随的原子事件的发生情况进行推断.假设某种复合事件发生后伴随着 k 种原子事件同时发生.那么由原子事件 e_1, e_2, \dots, e_k 的发生情况成功推测复合事件 $E(e_1, e_2, \dots, e_k)$ 发生的概率可以表示为

$$\pi = \omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \dots + \omega_k X_k \tag{2}$$

其中 π 表示成功推测复合事件发生的概率, $\omega_i (i=1,2,\dots,k)$ 表示第 i 种原子事件发生后推断复合事件发生的权重, X_i 取值 0 或 1, 0 表示第 i 种原子事件未发生, 1 则表示发生, 且 $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$. 考虑到实际情况, 需要保证推断复合事件发生的准确性. 例如, 当只捕捉到一个原子事件发生时, 虽然可以推测复合事件发生, 但是并不可靠. 因此我们对式(2) π 进行约束, 设 $\pi > \epsilon$. ϵ 为预测复合事件发生的可信度, 它的取值可以根据人为经验进行设定, 一般称为可信度. 当预测值 π 高于阈值 ϵ 时, 说明可以推测复合事件发生的概率非常大了, 需要做出相应处理. 需要特别说明的是, 这种预测方法在实际生活中也是常见的, 例如天气预报、森林火灾监测等. 既然是预测, 那一定存在预测错误的可能. 本文也考虑到了这种错误预测的情况, 在后续计算复合事件捕捉率时(见公式(7))会进行说明.

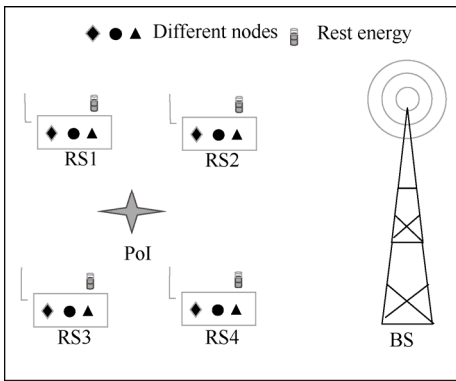


Fig.1 Monitor network model
图1 监测网络模型

2.2 网络模型

如图 1 所示,在一个目标区域内部署了 N 个 RS 共同捕捉目标点的事件发生.该事件为复合事件,包含 k 个原子事件,复合事件发生时一定会导致这 k 种原子事件同时发生.每个 RS 上装配有 k 个不同类型的传感器分别用来捕捉这 k 种原子事件.每个 RS 都能直接与附近的一个基站(base station,简称 BS)通信,用来传递能量信息、事件消息和控制命令等.

2.3 能量模型

对单个 RS 来说,其能量模型可通过图 2 表示.设在 t 时段内,RS 从环境中能够捕获的能量为 h ,其中 h 为不小于 0 的常数.根据 RS 的工作状态,可以将 RS 的耗能情况分为 3 种:第 1 种是当 RS 关闭所有传感器时,这时的能耗主要来自保持 RS 自身不复位和必要的计算耗能.为方便描述,我们称为 state1 态,其耗能 δ 表示,为常量.第 2 种是节点开启传感器工作的情况(state2 态),此时 RS 的能耗除了情况一所述以外,还有开启传感器的耗能,用 $\delta + \delta_0$ 表示.其中 δ_0 表示 RS 的传感器耗能.需要注意的是, δ_0 与开启的传感器数量和种类有关.假设第 j 种传感器的耗能速率是 $r_j (j=1,2,\dots,k)$,节点打开传感器的情况用 $O=[a_1, a_2, \dots, a_k]$ 表示,其中 $a_i (i=1,2,\dots,k)$ 取值 0 或 1,分别表示 RS 的第 i 种传感器关闭或打开的状态.那么此时 RS 由传感器产生的能耗可表示为

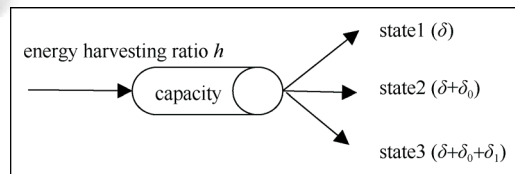


Fig.2 Energy model of each node
图2 节点的能量模型

$$\delta_0 = \sum_{i=1}^k r_i a_{i,t} \quad (3)$$

第3种是节点捕获到原子事件后向基站上传采集数据的情况(state3态).此时节点的能耗除情况2所述外,还包括通信耗能,用 $\delta + \delta_0 + \delta_1$ 表示.其中 δ_1 表示RS与基站之间的通信耗能.因此,对于每个RS而言,在时间维度上其能量关系可以由式(4)表示:

$$B \geq E_{i,t} = E_{i,t-1} + h - \sum_{j=1}^k (r_j + c_{j,t} \sigma) a_{i,j,t} - \delta \geq 0, t=1,2,3,\dots \quad (4)$$

其中, $E_{i,t}$ 表示节点 $i(i=1,2,3,\dots,N)$ 在第 t 个时隙的剩余能量. σ 为常数,表示传递一个消息帧给BS所需的能量, $c_{j,t}$ 取值0或1,0表示在第 t 个时隙内未捕捉到第 j 种原子事件,1则表示捕捉到第 j 种原子事件. r_j 表示第 j 种传感器在一个时隙内的能耗(传感器的功率), $a_{i,j,t}$ 取值0或1,0表示第 i 个节点在 t 时隙未开启第 j 种传感器,1则表示开启. B 表示RS的电池容量.

3 优化目标

首先分析在本文设定的监测模型下,复合事件发生后能被捕捉到的概率.联立式(1)、式(2),可以得到,复合事件发生后被捕捉到的概率(复合事件发生后所有原子事件一定发生,即 $X_1=X_2=\dots=X_k=1$),如式(5)所示:

$$U(M) = \sum_{j=1}^k \omega_j (1 - (1 - p_j)^{m_j}) \quad (5)$$

其中, $M=\{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ 表示在当前时隙整个监测网络中每种传感器打开的数量.容易看出,复合事件捕捉率 $U(M)$ 由各类传感器的开启数量决定.并且,每种传感器开启的数量越多,复合事件的捕捉率越高.注意到, $P(m_j) = 1 - (1 - p_j)^{m_j}$ 是一个单调增的凸函数.因此,随着 m_j 的增加, $P(m_j)$ 的增加趋势会逐渐减弱.对于某种传感器而言,随着开启数量的增加,其捕捉概率的提高趋势会随之减弱.由于RS的工作状态受能量限制,一般无法使得所有的传感器始终处于开启状态.那么,在这种能量受限的情况下,如何均衡每个时隙的捕获率与能量消耗是一个需要考虑的问题.

这里,我们引入变量 γ 来反应时隙的捕获率与能量消耗之间关系,后称能效.

$$\gamma = \frac{\sum_{j=1}^k \omega_j (1 - u_j^{m_j})}{n\delta + \sum_{j=1}^k \{r_j m_j + \delta N(m_j)\}} \quad (6)$$

其中, $m_j=1,2,\dots,N$ 表示开启第 j 种传感器的个数, r_j 表示第 j 种传感器的耗能速率(一个时隙的能耗), σ 表示向BS传递一个消息包的通信耗能, $N(m_j)$ 表示在一个时隙内同时开启 m 个第 j 类传感器所能捕捉到的原子事件的次数, δ 为RS自身固定消耗, $\mu_j=1-p_j$.容易得到:

性质 1. 在开启的传感器数量达到一定值后,能效将不增反减.

证明:

$$\begin{aligned} \gamma(m_x) &= \frac{\sum_{j=1}^k \omega_j (1 - u_j^{m_j})}{n\delta + \sum_{j=1}^k \{r_j m_j + \delta N(m_j)\}} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^{x-1} \omega_j (1 - u_j^{m_j}) + \sum_{j=x+1}^k \omega_j (1 - u_j^{m_j}) + \omega_x (1 - u_x^{m_x})}{n\delta + \sum_{j=1}^{x-1} \{r_j m_j + \delta N(m_j)\} + \sum_{j=x+1}^k \{r_j m_j + \delta N(m_j)\} + \delta N(m_x) + r_x m_x} \end{aligned}$$

$$\text{记 } A = \sum_{j=1}^{x-1} \omega_j (1 - u_j^{m_j}) + \sum_{j=x+1}^k \omega_j (1 - u_j^{m_j}), (x=1,2,\dots,k)$$

$$B = n\delta + \sum_{j=1}^{x-1} \{r_j m_j + \delta N(m_j)\} + \sum_{j=x+1}^k \{r_j m_j + \delta N(m_j)\} + \delta N(m_x)$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \gamma(m_x + 1) - \gamma(m_x) &\leq \frac{A + \omega_x (1 - \mu_x^{m_x+1})}{B + r_x (m_x + 1)} - \frac{A + \omega_x (1 - \mu_x^{m_x})}{B + r_x m_x} \\ &= [B + r_x (m_x + 1)][B + r_x (m_x + 1)]^{-1} H(m_x) \end{aligned}$$

$$\text{其中, } H(m_x) = [A + \omega_x (1 - \mu_x^{m_x+1})][B + r_x (m_x + 1)] - [A + \omega_x (1 - \mu_x^{m_x})][B + r_x (m_x + 1)]$$

$$\begin{aligned}
&= \omega_x \mu_x^{m_x} (B - \mu_x B + r_x m_x - r_x \mu_x m_x + r_x) - A r_x - r_x \omega_x \\
&< \omega_x \mu_x^{m_x} (1 - \mu_x) (B + r_x m_x) - A r_x
\end{aligned}$$

其中, A, B, u_j, r_x 均为常数, 且 $0 < \mu_j < 1, 0 < A < 1, 0 < r_x, 0 < B$ 易知 $\omega_x \mu_x^{m_x} (1 - \mu_x) (B + r_x m_x) - A r_x$ 是一个关于 m_x 的单调减函数, 因此当 m_x 增大到一定值时, $H(m_x) < 0$, 即能效不增反减. \square

通过上述对复合事件捕捉性质的分析, 下面分析本文需要解决的优化问题, 即最优化总的时间 T 上复合事件总的捕捉率. 在本文中, 对目标点的复合事件捕捉是由多个独立的 RS 协作进行的, 因此总的捕捉率与对这些 RS 采取的工作调度方案有关. 令 θ 表示在总的时间 T 上所采取的工作调度方案, M_t 表示在第 t 个时隙各类传感器的开启数量. 则总的复合事件捕捉率可以表示为

$$\bar{U}(\theta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=1}^T x_t U(M_t)}{\sum_{t=1}^T x_t} \quad (7)$$

其中, x_t 取值 0 或 1, 0 表示在时隙 t 内复合事件未发生, 1 则表示发生. (需要注意的是, 公式分母部分也乘 x_t , 其目的是为了排除误报的情况. 所谓误报是指在某一时刻 t 内, 复合事件并未发生 (即 $x_t = 0$ 时), 但 $U(M_t)$ 却超过了阈值 ε , BS 错误地报告了复合事件发生的情况. 这种情况在实际监测场景中也是可能发生的. 例如当阈值 ε 取值较小时, 可能因为环境中的其他因素干扰, 导致某些原子事件发生而被相应的传感器捕捉到, 并使得 $U(M_t) > \varepsilon$, 而此时监测的复合事件并未发生, 进而导致误报发生. 在计算实际捕捉率时, 误报的次数应该排除掉.) 这样, 我们需要解决的问题是找到合适的 $\hat{\theta}$ 使得 $\hat{\theta} = \arg \max \bar{U}(\theta)$. 继续对 $\bar{U}(\theta)$ 进行分析, 根据泊松分布的特征, 可以得到:

性质 2. 给定一个总的 RS 活动策略 θ , 复合事件总的捕捉率为

$$\bar{U}(\theta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=1}^T U(M_t)}{T} \quad (8)$$

证明:

$$\begin{aligned}
\bar{U}(\theta) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=1}^T x_t U(M_t)}{\sum_{t=1}^T x_t} \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sum_{t=1}^T x_t U(M_t)}{k} \frac{(\lambda T)^k e^{-\lambda T}}{k!} \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k \sum_{t=1}^T U(M_t)}{k T} \frac{(\lambda T)^k e^{-\lambda T}}{k!} \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=1}^T U(M_t)}{T} \quad \square
\end{aligned}$$

容易看出, 最大化 $\bar{U}(\theta)$ 等价于最大化平均的 $U(M)$. 这个优化目标与两方面因素相关, 一方面是要尽可能地使得每个时隙的 $U(M)$ 较大, 另一方面是尽可能地使得传感器工作持续时间越长. 这两个因素直接与每个 RS 的剩余能量相关, 剩余能量越多, 能够开启的传感器数量也越多, 持续时间也相对越长. 但是, 在能量一定的情况下, 传感器开启的数量越多, 意味着持续时间越短. 那么, 究竟是应该开启多的传感器来增大单位时隙的捕捉概率, 还是应该开启少的传感器来延长持续时间是一个需要进行权衡问题. 通过性质 1 可知, 随着开启的传感器数量增加到一定值时, 能效会随之降低. 这说明, 在能量捕获率较低的情况下, 相比提高每个时隙的捕捉率, 使得 RS 能持续感知更长时间更有利于总的捕捉率提升. 即需要找到一种能效高的任务分配方案. 下面本文试图寻找一种满足阈值条件下 ($\rho > \varepsilon$), 最优化总能效的任务分配算法 TTAA. 详见算法 1 描述.

算法 1. Total task allocation algorithm based on greedy algorithm (TTAA).

输入: 可信度 ε 、各种传感器功率 r_j 、初始 $M = \{0, 0, \dots, 0\}$, 各类原子事件发生概率 q_j , 预测权重 ω_j , 以及传递消息帧能耗 σ .

输出: 满足阈值条件 ε 下, 各种传感器需要打开的数量 $\theta^* = M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$.

1. while $U(M) < \varepsilon$
2. for $j=1$ to k do
3. $++m_j$
4. 计算 greedy 值

$$V_j = \frac{\sum_{j=1}^k \omega_j (1 - u_j^{m_j})}{n\delta + \sum_{j=1}^k r_j m_j + \sigma q_j m_j}$$
5. $--m_j$
6. $j = \text{argmax}\{V_j\}$;
7. $++m_j$
8. return M

算法 TTAA 的主要步骤是在未满足阈值条件前,依次尝试开启各种传感器,并计算总能效,且每次选择能得到总能效最大的开启方案,直到满足阈值条件.注意到,在算法 TTAA 中计算总能效时,对公式(6)做了变形处理.这样做的目的是在算法进行过程中,我们无法事先得知每种原子事件会被捕获多少次,因此采用了期望值进行计算.

通过算法 TTAA,从整体上找到了监测网络中每个时隙需要开启的传感器类型及对应的数量.而在监测网络的实际运作时, θ^* 必须具体分配给一个或多个 RS 进行协作完成.这就要求每个 RS 都维护一个状态表来实时追踪其他 RS 的工作状态和能量情况,会带来巨大的能耗开销.考虑到每个 RS 是以单跳的方式直接将传感数据上传给同一个基站 BS 进行处理的,可以依赖 BS 对各个节点进行统一管理.基站是有源的,不需要考虑能量不足问题,它负责收集各个 RS 的上传数据,并进行统一决策.本文考虑通过基站来对所有 RS 进行统一工作调度.由于在某个时隙 BS 是否能执行 θ^* 取决于各个 RS 的能量情况,并且每个节点的电池容量是有限的,其剩余能量会随着分配到的任务不同而产生差异.因此,不均衡的任务分配会导致某些 RS 因任务过重而经常性停止工作,或是某些 RS 因任务过轻出现充电溢出而浪费能量.综合以上考虑,针对于具体的各个 RS,本文下面提出一种能量均衡的子任务分配方案,详见算法 CTAA 描述.

算法 2. Child task allocation strategy (CTAA).

输入:总任务 θ^* , 每种传感器耗能速率 r_m , 各个传感器节点的剩余能量 E_j , 任务持续时间 $t_{duration}$;

输出:任务分配方案 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$;

1. for i in W
2. $W[i] = [0, 0, \dots, 0]$
3. end
4. while !isEmpty(θ^*)
5. 选择 θ^* 中最耗能的任务

$$m = \text{argmax}\{\theta^*\}$$
6. 将没有开启第 m 类传感器的 RS 加入到 S_m
 - for x in W
 - if $x[m] == 0$
 - $S_m.add(x)$
7. end
8. 选择 S_m 中剩余能量最多的 RS

$$j = \text{argmax}\{S_m\}$$
9. if $E_j + ht_{duration} \geq ((r_m + \sigma q_m) * t_{duration})$
10. $W[j][m] = 1$
11. $E_j = E_j - r_m * t_{duration}$

```

12.    $\theta^*[m]$ --
13.   else break
14. end
15. 可以执行  $\theta^*$ 
    if isEmpty( $\theta^*$ ) return W
16. 不可以执行  $\theta^*$ 
    else return null

```

算法 CTAA 的主要步骤是在每个时隙,按照 θ^* 中不同传感器的耗能速率,将任务从大到小依次分配给剩余能量较大的 RS.若当前时隙的剩余能量不足以将任务分配完,则返回空,表示在当前时隙无法执行 θ^* ,需要等待 RS 进行能量补充后再进行决策.

通过算法 TTAA 和 CTAA,分别找到了针对监测网络整体的任务分配方案和针对每个 RS 具体的任务分配方案.除此之外,BS 通过 CTAA 算法进行任务分配时,要先获知每个 RS 的剩余能量然后向每个 RS 传递任务分配信息.因此还需要考虑基站与各个 RS 之间这部分数据交换产生的通信开销.显然,BS 的任务分配进行得越频繁,RS 的通信开销越大.而反之任务持续时间过大又会导致某些节点一直无法执行所分配的任务,造成能量浪费.因此,需要根据具体的通信开销值来选取合适的持续时间 $t_{duration}$.下面给出动态调整 $t_{duration}$ 的算法.

算法 3. Dynamic control duration strategy (DCDS).

输入:各个 RS 的剩余能量 E,总任务 θ^* ,通信开销 δ .

输出:持续时间 $t_{duration}$.

```

1.  $t_{duration}=1$ 
2. while  $e < \delta$ 
3.   计算溢出能量
 $e = \text{overflow}(E, \theta^*, t_{duration})$ 
4.    $t_{duration}++$ 
5. end
6. return  $t_{duration}$ 

```

算法 DCDS 的主要步骤是根据监测网络中每个 RS 的剩余能量,将进行一次通信消耗的能量 δ 和因过长的持续时间 $t_{duration}$ 而产生的溢出能量进行比较.如果溢出的能量足以满足一次通信开销,则不应该继续扩大 $t_{duration}$,并选取此时的 $t_{duration}$ 作为下一轮工作的持续时间.

4 实验结果与分析

为了验证算法的性能,本文进行了仿真实验.实验环境基于 MATLAB R2014b 平台,实验参数配置如下.

在一个目标点周围部署了多个 RS 来监测复合事件的发生.每个 RS 内置 5 种不同类型的传感器,每种类型的传感器可以分别监测目标点可能发生的 5 种原子事件.根据文献[15]的数据,RS 的能量捕获速率可以在 0.032mW~37mW 之间,本文取 $h=30$.借鉴文献[2],RS 在计算状态能耗速率为 10mW 左右,收发数据时大约为 40mW.因此,本文依次取 $\delta=10, \sigma=40$.对于超低功耗的传感器元件,其功耗一般在毫瓦级别,我们这里依次取 $r_1=121, r_2=83, r_3=56, r_4=48, r_5=24$.并假设 RS 电池容量 $B=3\ 000$.此外,取 $\lambda_0=0.004$.表示复合事件单位时间平均发生率.依次取 $\lambda_1=0.067, \lambda_2=0.042, \lambda_3=0.063, \lambda_4=0.125, \lambda_5=0.067$,分别代表 5 种原子事件单位时间平均发生率.总的监测周期长度 $T=10\ 000$.借鉴文献[12,14]数据,我们假设这 5 种原子事件发生后,单个 RS 中相应的传感器能够捕获到对应原子事件的概率依次是 0.8,0.76,0.8,0.875,0.9.每种原子事件的权值依次取 0.15,0.4,0.125,0.2,0.125.

下面通过本文策略的运行结果来分析算法性能.实验分 3 步进行,第 1 步是根据算法 TTAA 找到满足约束

条件下总任务分配方案.第2步是按照算法 CTAA 给每个 RS 指定任务.第3步是根据算法 DCDS 动态调整任务持续时间.

如图 3 所示,对比了 3 种方案情况下的复合事件捕捉率(此处考虑布置 8 个 RS 来共同监测复合事件的情况).第 1 种采用 OA 方案,在这种方案下,RS 间不进行协作,只要自身有能量就打开所有传感器直到其能量耗尽.第 2 种是采用 O1 方案,这种方案是让监测网络中每种传感器开启的个数始终为一个.第 3 种方案采用本文的 TTAA 算法计算每种传感器应该开启的个数.从实验结果可以看出,通过 O1 和 TTAA 方案,总的捕捉率都随着可信度的提高而随之降低.这是因为,可信度越高,需要开启的传感器数量越多,能效随之降低.在能量捕获速率较低的情况下,总的捕捉事件的时间随之减少,进而导致捕捉率降低.但并不是说明可信度越低越好,还需要根据实际情况考虑.因为当可信度过低时,BS 容易出现误判.从图 4 中可以很明显看到这种趋势.在可信度较低,例如 $\epsilon < 0.4$ 时,误判次数大约占到总捕捉次数的 50%以上,这在实际应用中是很难容忍的.从整体上看,采用 TTAA 算法进行任务分配得到的复合事件捕捉率,在不同的可信度下都优于 O1 和 OA 算法.

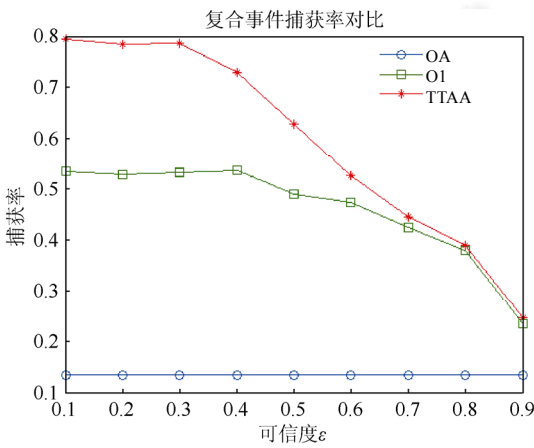


Fig.3 The relationship of composite event capture rate and the total task allocation policy

图 3 复合事件捕捉率与总任务分配策略关系

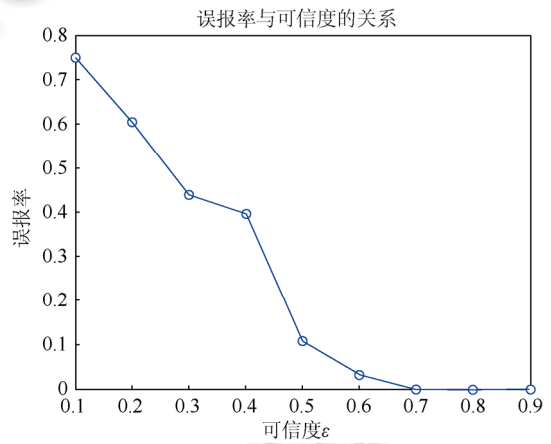


Fig.4 The relationship of the false alarm rate and the confidence level

图 4 误报率与可信度的关系

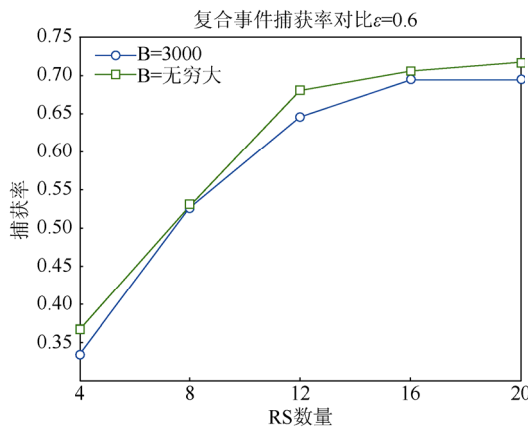


Fig.5 Composite event capture rate in limited battery capacity and unlimited situation

图 5 电池容量有限和无限情况下复合事件捕捉率

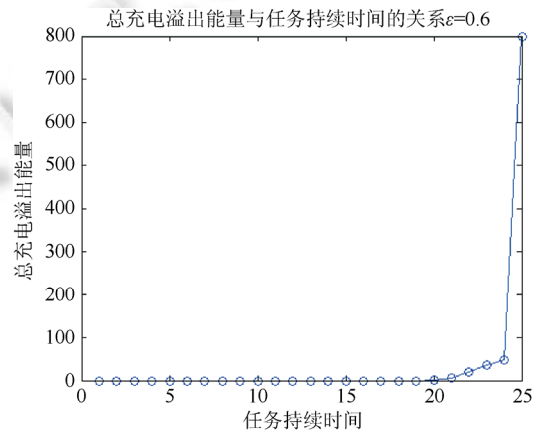


Fig.6 The relationship of total charge overflow energy and task duration

图 6 总充电溢出能量和任务持续时间关系

为了说明通过本文算法 CTAA 可以较好地避免因不合理的任务分配导致 RS 充电溢出的情况.将仿真实验分两种情况进行,第 1 种是 RS 电池容量有限的情况.第 2 种是 RS 电池容量无限的情况.假设 RS 具有无限容量的电池是为了计算 RS 无充电溢出时能达到的复合事件捕获率,以此作为参考来验证算法 CTAA 的性能.如图 5 所示,我们对比了部署不同数量的 RS 在可信度 $\varepsilon=0.6$ 时(由图 4 可知, $\varepsilon=0.6$ 时,误报次数已经接近 0,在实际应用中,这种误报率应该是可以容忍的.),两种情形下的复合事件总捕捉率.可以看出,通过算法 CTAA 对各个 RS 进行任务的均匀分配后,能够接近理想情况下无充电溢出时的复合事件捕捉率.从侧面验证了算法 CTAA 的性能.

接下来分析充电溢出能量与任务持续时间之间的关系.如图 6 所示,图中横坐标表示每个任务持续时间,纵坐标用总的充电溢出能量与 RS 电池容量的比值(即充电溢出的能量够一个 RS 充满多少次电)来反应能量的浪费情况.我们对比了 8 个 RS 在 10 000 个时隙中采用不同任务持续时间进行工作时产生的总充电溢出能量.可以

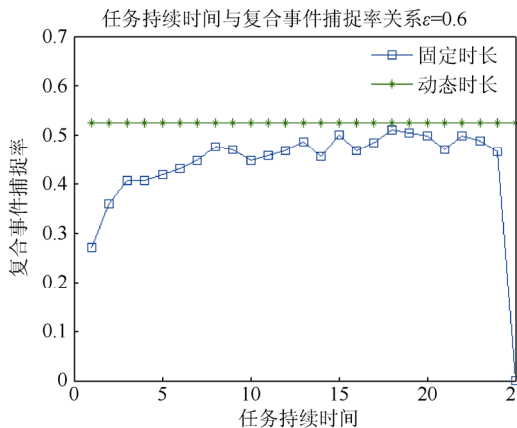


Fig.7 The relationship of task duration and composite event capture rate

图 7 任务持续时间与复合事件捕捉率的关系

发现,当任务持续时间达到 24 个时隙时.因充电溢出产生的能量浪费够让一个 RS 充满 48 次电.而一个 RS 在整个工作时间内所能捕获到的能量仅能充满 $30 \times 10\ 000 / 3\ 000 = 100$ 次电.虽然随着任务持续时间的增加,需要进行任务分配的总次数减少,节省了通信开销,但是充电溢出产生的能量浪费也是不能忽略的.

如图 7 所示,对比了两种不同的任务持续时间分配方案下对复合事件捕获率的影响.一种是采用固定的任务持续时间,另一种是采用本文提出的 DCDS 算法,根据充电溢出能量动态调整任务持续时间.从仿真实验结果上看,在固定时间分配方案下,从总体上看复合事件捕捉率是一种先上升后下降的趋势.这种现象是容易解释的.在持续时间比较短时,虽然充电溢出能量很少,但是任务分配很频繁,通信开销比较大.反之,在持续时间过长时,虽然减轻了通信开销,但是充电溢出能量又随之增加.可以看到,采用固定的任务持续时间分配方式,在各种不同的

持续时间下都很难超过动态分配方式,从侧面验证了算法 DCDS 的性能.

5 结束语

本文讨论了可充电无线传感器网络中复合事件捕捉问题.不同于一般的原子事件监测问题,复合事件的捕捉需要考虑多节点的协作问题.本文具体分析了影响复合事件捕捉率的一些关键因素,并提出一种多节点协作策略.从实验结果来看,所提出的方法是可行的和有效的.

References:

- [1] Wan ZG, Tan YK, Yuen C. Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Communication Technology. Ji'nan: IEEE, 2011. 362-367. [doi: 10.1109/ICCT.2011.6157897]
- [2] Shaikh FK, Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016,55:1041-1054.
- [3] Jaggi N, Madakasira S, Reddy Mereddy S, Pendse R. Adaptive algorithms for sensor activation in renewable energy based sensor systems. Ad Hoc Networks, 2009,11(4):1405-1420.
- [4] Ren Z, Cheng P, Chen J, Yau DKY, Sun YX. Dynamic activation policies for event capture with rechargeable sensors. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2014,25(12):3124-3134.
- [5] Sample AP, Smith JR. The wireless identification and sensing platform. Wirelessly Powered Sensor Networks and Computational RFID. New York: Springer-Verlag, 2013. 33-56.

- [6] Ren Z, Cheng P. Energy management for event capture in rechargeable sensor network with limited capacitor size. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2015,8(1):111–119.
- [7] Jaggi N, Kar K, Krishnamurthy A. Rechargeable sensor activation under temporally correlated events. In: *Proc. of the Int'l Symp. on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops*. IEEE Xplore, 2009. 1–10.
- [8] Jaggi N, Kar K. *Multi-Sensor activation for temporally correlated event monitoring with renewable energy sources*. Inderscience Publishers, 2011.
- [9] Dai H, Wu X, Xu L, Chen GH. Practical scheduling for stochastic event capture in wireless rechargeable sensor networks. In: *Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf*. IEEE, 2013. 986–991.
- [10] Ren Z, Xu W, Dai Y, Jiang LR. Multi-Event detection with rechargeable sensors. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2017,10(3):708–716.
- [11] Liu YH. Energy capture wireless sensor networks. *Chinese Computer Society Communication*, 2014,10(6):23–27 (in Chinese).
- [12] Dong X. Deployment cost optimal for composite event detection in heterogeneous wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Information Science and Control Engineering*. IEEE Computer Society, 2016. 1288–1292.
- [13] Gao J, Li J, Cai Z, Gao H. Composite event coverage in wireless sensor networks with heterogeneous sensors. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2015 Conf. on Computer Communications*. IEEE, 2015. 217–225.
- [14] Suescun CA, Cardei M. Event-Based clustering for composite event detection in wireless sensors networks. In: *Proc. of the Performance Computing and Communications Conf*. IEEE, 2017. 1–8.
- [15] Seah WKG, Zhi AE, Tan H. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP)-Survey and challenges. In: *Proc. of the Int'l Conf. on IEEE Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*. 2009. 1–5.

附中文参考文献:

- [11] 刘云浩. 能量捕获无线感知网络. *中国计算机学会通讯*, 2014,10(6):23–27.



田贤忠(1968—),男,浙江杭州人,博士,教授,主要研究领域为无线网络,网络编码,物联网.



何佳存(1992—),男,硕士,主要研究领域为可充电传感器网络,移动数据收集策略.



刘高(1990—),男,硕士,主要研究领域为可充电传感器网络,无源感知网络.



祝驿楠(1997—),男,本科生,主要研究领域为无线可充电传感器网络,无线自组织网络,物联网.



郭敏(1992—),男,硕士,主要研究领域为可充电传感器网络,无线协助中继网络.