# 基于节点状态的多类型传感器调度算法

张景林, 方艺辉

(福建商业高等专科学校 信息管理工程系, 福州 350012)

摘 要: 针对无线传感器网络(WSN)中能量效率问题, 提出一种基于簇结构中节点健康状态的多类型传感器调度 算法, 该算法基于节点的健康状态、节点传输的信息质量, 根据簇中节点的健康状态进行自适应选取任务节点; 通过对传感器的合理调度,均衡了网络中能量消耗以及任务的分配,保证网络的顺利运行.实验仿真结果表明了 算法的有效性. CII

关键词: 多类型无线传感器网络; 节点状态; 数据融合; 调度算法; 能量优化

## Novel Multi-Type Sensor Scheduling Algorithm Based on Node-Status

ZHANG Jing-Lin, FANG Yi-Hui

(Information Management & Engineer Department, Fujian Commercial College, Fuzhou 350012, China)

Abstract: In regard to the energy efficiency in the Wireless Sensor Network (WSN), a kind of multi-type sensor scheduling algorithm on cluster structure is proposed in this paper. Both the health status of the nodes and the information quality of the nodes' transmission are considered in the algorithm. According to different health status of each node, the proposed algorithm adaptively selects task node. Reasonable sensors scheduling promotes the balance between energy consumption and task allocation, and ensures that the network runs smoothly. The simulated experiment result shows the good effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: multi-type wireless sensor network; node-status; data fusion; scheduling algorithm; energy optimization

# 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN) 是用众多传感器节点组成的基础设施,在传感器部署 的区域, 传感器承担感知周围数据, 监控环境变化的 任务<sup>[1]</sup>. 目前存在大量关于 WSN 的研究, 包括重要环 境的监控和报警,物流跟踪,家庭网络监控(检测和控 制能源消耗),军事监管(追踪军队、监控战场和军械 库),环境检测(火灾和洪水预防)等.

目前, WSN 的传感器调度策略受到越来越多的研 究者关注,已经成为科学界和工业界重点研究内容. 其中,优化网络总体能量消耗,保证节点传输的信息 质量以及均衡节点的能量消耗是 WSN 研究的关键目 标. 以下的研究主要从总能量消耗的角度来展开. 其 中, Tian等人<sup>[2]</sup>提出一种关于节点任务分配的传感器调 度算法,目的在于使得任务执行的能量消耗达到最少.

该方法的主要创新是引入了基于节点顺序调度的算法, 属于一次分配任务,根据来自节点的控制信息反馈定 期地更新自身相关程序. Lin 等人<sup>[3]</sup>也提出了有关传感 器节点调度的方法, 其在保障尽可能节约 WSN 总能 耗的前提下,有效追踪一定区域内的目标.该工作主 要基于以下假设: (a)WSN 必须完成跟踪任务, 其需要 跟踪的目标跨越整个 WSN; (b)控制物体准确运动轨迹 的动力学方程已知; (c)节点能量消耗的详细模型已知. 通过以上假设,该工作的调度问题表示为一个目标优 化问题,目的在于使节点调度的能量消耗最小,但前 提必须同时满足如下要求: (a)得到一个理想的检测概 率; (b)跟踪误差质量达到一个阈值内. 文献[3]中, Lin 等人使用多传感器调度方法, 意味着不止一个节点被 调度去跟踪目标. 另外, Mo 等人<sup>[4]</sup>设计了一种基于概 率的传感器调度算法. 该方法与文献[3]的假设一致,

① 收稿时间:2016-03-08;收到修改稿时间:2016-04-27 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005487]

采取一种互补的方法,来最小化估测误差,同时限制 了能量消耗的最大值. 该方法的优点就是没有频繁的 数据包交换,其信息交换的目的是为了协调工作.而 这种方法的不足之处在于调度算法只对总体能量消耗 进行限制,忽略了节点能量消耗不均引起的健康状态 参差不齐问题. 文献[5]提出了一个基于博弈论的无线 传感器网络节点调度算法(ENSG),同时考虑节点的负 载和剩余能量,通过引入马尔可夫链,对本地节点的 任务负载进行预测,从而达到减少能量消耗得目的. 但是随着时间推移,网络的负载逐渐增加,严重影响节 点的寿命. 文献[6]提出了一种自适应的传感器节点调 度算法,该方法中采用扩展的卡尔曼滤波方法对目标 进行追踪,把节点调度问题转变为线性二元混合整数 规划问题, 在同样的能量消耗下, 该方法能取得更好 的效果. 然而该方法忽略了网络时间性能, 节点调度 耗时长等问题. 文献[7]提出了一种基于链路质量和能 量感知的节点休眠调度算法. 该方法从链路质量和时 延方面考虑,对网络的总能消耗进行限制,但是该方 法并没有达到能量消耗最小的目的. 针对以上问题, 本文提出一种结合节点状态的多类型传感器调度算法. 通过合理的传感器调度算法,降低总体能量消耗,同 时均衡 WSN 网络的任务分配,确保节点的正常工作, 保证网络的顺利运行.

本文主要是基于行星探索(Space Wireless Sensor Networks for Planetary Exploration, SWIPE)研究项目背 景<sup>[8]</sup>的传感器调度算法研究, SWIPE 项目主要通过在 行星表面部署传感器节点,监测并收集相关数据,通 过分析得到的数据, 对载人飞行计划进行决策. 在实 现最终目的前需要解决许多相关问题:如何降低总体 部署成本(减少部署数量或部署廉价传感器节点);如 何在控制成本的前提下, 通过具有有限存储和计算能 力的传感器节点搜集全面的信息;如何在节点自主性 低、易失效、通信能力有限以及网络拓扑结构易改变 的环境下,保障通信和数据质量等.这些相关问题在 许多传感器应用中<sup>[9,10]</sup>都普遍存在. 高效的数据融合 方法<sup>[11]</sup>可以有效解决上述相关问题,通过传感器调度 算法选出节点子集来执行指定的全局监测任务, 在一 定程度上有效减少 WSN 的能量消耗, 通过合理分配 节点感知任务,减少节点能耗和降低带宽传输压力.

在本文提出的方法中,主要针对环境监测数据, 考虑对于理想误差质量的限制,对于检测概率不做考 虑;同时,根据节点反馈的当前信息,选择运行状况 较好的部分节点参与动态地调度,以提高数据融合质 量,降低节点和 WSN 总体能耗.

#### 2 无线传感器网络基础

在 SWIPE 中,关于传感器调度算法的设计的相关 参考文献主要是在基于簇的网络中.在WSN中,节点 被划分为多个簇,每个簇会选择出一个簇头节点 (Cluster Head, CH)<sup>[12]</sup>. 簇头节点形成一个覆盖集, 意 味着簇中的每个节点都属于该簇头. 连通支配集 (Connected Dominating Set, CDS)<sup>[13]</sup>的引入减少了网络 的复杂性. SWIPE的WSN 传感器调度方法的目的主要 是为了检测温度、辐射、灰尘沉积物,这些数据产生 变化, 然后被节点感知. 这些数据经过初步处理后被 传输至适当的 CH 节点, CH 节点执行信息的聚集与融 合, 然后转发到下一个 CH 节点或者基站节点(基站节 点负责信息的存储与处理工作). 图 1 描述了基于簇的 网络, 传感器节点随机部署, 其中 CDS 用红色线条表 示. 在 SWIPE 中, 节点健康状态是通过节点的电池水 平(batteryLevel)进行评估<sup>[9]</sup>.其中节点的健康状态可 以用0(不正常)或者1(正常)表示. 第i个节点的健康状 态信息表示为 HSi.

$$HS_{i} = \begin{cases} 0 & batteryLev \ el < C \\ 1 & batteryLev \ el \ge C \end{cases}$$
(1)

式中 C 表示节点电池水平健康状态的阈值. batteryLevel表示传感器的电池能量.

每个 CH 都管理着簇内节点. 多类型传感器网络的健康状况促使 WSN 的运行需要满足如下要求; (a) 减少 WSN 整个的能源消耗, 使 WSN 的生命周期最大化; (b) 均衡节点感知和传输任务的能量消耗, 避免选择不良状态的节点(如低电量的节点).



Software Technique • Algorithm 软件技术 • 算法 217

3 一种新的多类型传感器调度算法 图 2 表示为 WSN 中一个簇以及簇中的节点.



图 2 WSN 簇结构

为了达到理想的算法目的,并且同时考虑调度公 平性和数据融合质量要求,传感器调度算法应满足如 下三点要求:

a、健康状态的节点优先被调度.调度算法应该最 大化高健康状态节点的利用率,避免低健康状态的节 点进一步恶化.

b、在 CH 层面上达到最小化融合质量要求. 调度 算法应该在 CH 层面上选择有效的节点去实现理想的 数据融合.

c、被调度的节点是可以提供高质量数据的节点. 这些信息最小化调度节点的数量,保证在 CH 层面上 提高数据融合的质量.

文献[10, 11]的一般做法是在 CH 层面上, 用最大 可接受的协方差 σ\*来评估融合技术的优劣. 事实上, 融合技术通常使用估计值的协方差作为估计误差. 在 这种方式下, 协方差误差的值可通过马尔可夫<sup>[14]</sup>或卡 尔曼滤波<sup>[15]</sup>得到. 以马尔科夫作为例子, 在 CH 层面 上, 估计值 θ 和协方差 σ 表达式如下:

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i \neq i}^{Z_{i}}}{\sum_{i=1}^{L}}, \, \sigma = (\sum_{i \neq i}^{L})^{-1}$$
(2)

其中 z<sub>i</sub>表示来自簇中第 i 个节点的数据, ψ<sub>i</sub><sup>2</sup>表示来自 簇中 i 个节点的测量质量, 其以协方差误差来衡量. 基 于卡尔曼滤波, 经验型的误差协方差 P(k|k)将通过下 面这个经典的方差计算出来.

P(k|k) = (1 - Kg(k))[P(k-1|k-1)+Q(k)] (3) 其中 Kg(k)表示卡尔曼增益, Q(k)是描述输入数据特征的协方差.

调度节点提供数据的质量优劣可通过协方差来评估. 用误差协方差来评估簇节点向CH传输的数据质量.

### 3.1 单一传感器调度算

在传感器调度算法中, CH 得到上文提到的相关信

218 软件技术・算法 Software Technique • Algorithm

息,并根据这些信息决定团簇的哪些节点执行感知任务.选择目前高质量的健康状态良好的团簇节点,直到节点数量能够满足在 CH 层面上融合质量的要求,用L表示所需节点的数量.例如,如果CH节点通过马尔可夫滤波聚合来自簇中节点的信息,选择的簇中节点的最小数量能通过下面的不等式计算出来:

$$\sigma_{L} = \left(\sum_{i=1}^{L} \frac{1}{\psi_{i}^{2}}\right)^{-1} \le \frac{M}{L}$$
(4)

 $\sigma_L$ 是通过聚集来自L个节点输入信息的融合协方 差,M是描述节点信息的协方差的最大值 $_{M = \max_{i}} \{\psi_{i}^{2}\}$ , 节点的数量L应该少于或者等于簇中总节点数量.因 此,在CH层面上,对于滤波质量的要求是如果  $_{M/L \leq \sigma^{*}}$ ,则 $_{\sigma_L \leq \sigma^{*}}$ ,选择节点数量要大于或者等于  $_{L = [M/\sigma^{*}]}$ ,这里的运算符[.]表示向上取整.

一个简单、有效的单一传感器节点的调度方法主要在于根据节点的健康状态水平来进行节点的降序排序,然后选择前 L 个节点. 另外一种定义方法没有用 M 值,它根据当前节点正常状况进行节点排序,根据 迭代方程的协方差决定需要的节点数量. 例如,在马尔科夫滤波的情况下:

$$\sigma_{k} = \left(\sum_{i} \frac{1}{\psi_{i}^{2}}\right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{\psi_{i}^{2}} + \frac{1}{\psi_{i}^{2}}\right)^{-1} = \left(\sigma_{k-1}^{-1} + \frac{1}{\psi_{i}^{2}}\right)^{-1}$$
$$\left(k \in [1, N], \sigma_{1} = \frac{1}{w^{2}}\right)$$
(5)

 $\sigma_k$ 是表示调度的 k 个节点的误差协方差.因此, 被调度节点的数量 L 由 k 的最低值决定的,即.因此,  $\sigma_L \leq \sigma^*$ 在每个调度的周期,选择簇中合适的节点子集 来执行感知任务,在有效节省能耗的同时保证数据融 合质量的要求.选择的节点应具有较高的健康状态水 平,使得网络的生命周期得到最大化.



图 3 表示在节点仅配备一个传感器的时候,本文 传感器调度算法的主要流程.其中,τ值与调度时间有 关,表明网络调度时间有效期,当时间值超过τ时,一 个完整调度周期就结束了.算法流程的第一步就是收 集来自簇中节点的信息,进行调度的选择.主要交换的信息如下:

a、节点标识符 ID<sub>i</sub>.

b、节点的健康状态信息 HS<sub>i</sub>.

 $c, \psi_i^2$ 的值.

一旦簇头节点完成团簇中节点相关信息的接收, 簇头节点按如下调度步骤运行:

a、为满足 CH 层次融合质量要求,需要计算簇中参与融合的节点数量 L,其中  $L=|M/\sigma^*|$ .

b、簇中的不同的节点电池能量水平不一致,因此 具备有不一样的健康状态水平,簇中根据信息交换得 到簇中所有节点的健康状态信息 HSi,并按节点的健 康状态进行降序排列.

c、根据簇中节点的排列顺序,选定前 L 个节点.

d、选定调度有效期τ的值.

e、输出节点的调度信息.

调度算法的输出信息包括:

a、调度安排:在当前调度有效期内列出执行感知 任务的所有节点标识符 IDs.

b、调度有效期τ.

因此, 在收到来自CH输出信息的时候, 调度列表 中的节点开始(或者继续)执行感知任务, 其它节点都 保持不工作状态, 直到新的调度有效周期达到.

参数τ的选择将在下节具体讨论. 原则上, τ 值因 不同簇头而不同. 参数τ 的选择对于调度方法的性能 有重大影响, 特别在总能量的消耗和调度的公平性方 面. 事实上, 该值控制着信息反馈的频率, 尤其是传 输数据的能量消耗会因为节点之间的差异, 而存在巨 大差异. 主要因为(a)投射频率调整, 节点与 CH 的距 离不同, 传输数据的水平不同, (b)传输信息的大小也 因为节点的不同而不同. 因此, 参数τ 越大, 电池能量 的区别越大.

## 3.2 多传感调度算法

上面定义的单一传感器调度算法可以拓展到节点 带有 S 个不同类型传感器的情况.例如, SWIPE 节点 原型配备了热敏、辐射、照明、灰尘沉积传感器<sup>[2]</sup>.考 虑到本文算法每种传感器类型可以处理不同类型的传 感器数据,如来自不同供应商的热敏传感器,所以可 以用以下的方式进行描述.

 $L_s = [M_s / \sigma_s * S]$ 其中, s=1,...,S 表示传感器类型, LS, MS 和 $\sigma_s^*$ 表示的意思与单一传感器调度算法的符号一

致,即使对应不同规格的传感器,LS,MS 和 $\sigma_s^*$ 也可以 被计算出来.

多传感器调度方法的大体框架与单一传感器调度 算法一致,确保每个时刻簇团中至少 L\*=max<sub>s</sub>{L<sub>s</sub>}个 节点给簇头发送信息.对于每一种传感器类型 S,存 在 L\*>L<sub>s</sub>,各个传感器将关于融合质量要求的必要信 息和非必要信息一起发送到簇头.

在单一传感器调度算法中, CH 每时每刻都需执行 调度任务, 并根据簇中的节点的当前健康状态情况值 对其进行降序排序. 该优化方法的 CH 计算产生的激 活节点的数量更少, 用 L\*表示.

其中关于多传感器调度输出如下:

a、根据各个节点的健康状态情况值,对L\*调度节 点按相应排名进行排序.用 R<sub>i</sub>表示第 i 个节点的排名, Ri 是整数,其范围是 1≤R<sub>i</sub>≤L\*.因此 CH 将调度节点的 顺序以L\*个的(ID<sub>i</sub>,R<sub>i</sub>)对进行传输.

b、节点有效期τ.

c、调度节点的集合 {L<sub>1</sub>,L<sub>2</sub>,...,L<sub>8</sub>}.

在调度有效期内,只有当第 i 个传感器满足 R<sub>i</sub>≤L<sub>i</sub> 时,该节点才被激活.按这种方式,在簇中不会超过L<sub>i</sub> 个节点去激活第 i 种类型传感器,可以有效避免激活 额外 L\*-L<sub>i</sub> 个传感器,减少了能量的损耗.

#### 4 仿真实验和评估

本节主要通过仿真进行实验验证. 假设该调度算 法是在模拟月食之夜进行, 这段时间内并没有其它能 源对电池进行能源补充. 节点传输数据的周期为 600 秒; 信息大小和其它相关的模拟参数如表 1 所示, 信 息大小和数据传输的周期性来自于 SWIPE 项目的研 究, 其它参数来自文献[16]. WSN 中最大簇的性能将 作为模拟实验中需要监控的目标, 如被簇头 CH#16 领 导的团簇, 其包括的节点标示符为 {16,18,44,81,124, 385}. 在第一个模拟实验中, 取较大的调度有效期 τ, 其值是 48 小时. 实验结果主要从各个节点的能量消耗 方面进行评估.

首先介绍单传感器调度算法.在该实验中,假设 CH 处理信息的数据融合模型为马尔科夫滤波模型, 同时为了更好地表示节点的能量消耗,节点的健康状态 HS<sub>i</sub> 情况指的是节点的电池能量.特别是采用了以 下的能源消耗模型<sup>[13]</sup>:

Software Technique • Algorithm 软件技术 • 算法 219

$$E_{tx}(k,d) = E_{elec}k + \varepsilon_{amp}kd^{2}$$

$$E_{tx}(k,d) = E_{elec}k$$
(6)

其中 $E_{\alpha}(k,d)$ 是指传输 k 比特的数据到距离为 d 的地方 所消耗的能量, 而 $E_{rr}(k,d)$ 则是从距离为d的地方接受k 比特数据所消耗的能量. 另外,  $E_{elec}$  和 $\epsilon_{amp}$  是模型参数.

能量消耗随着传输数据量的增加呈线性增长,与 传输距离成二次方关系.因此,可以看出距离CH越远 的节点,其能量将越容易耗尽,所以在设计相应调度 策略时应注意避免该问题.

		表1 仿真模拟参数		
E <sub>elec</sub>	$\mathcal{E}_{amp}$	消息大小(比特)	$\psi_i^2$	$\sigma^{*}$
50	100	102(辐射)+128(光照)+22(热 量)+188(打包数据)=440	0.3	0.075
	年 (1) 実験研究 1 (1)	Note#18	C.	20
	图 4	1903 1539 2590 2 <b>承特点</b> 第一个调度节点的能量 NodeF385	303 203 呈消耗 D	a
	图 5	<b>墨</b> 后一个调度节点的能	量消耗	

图 4 和图 5 分别是调度簇的第一个节点和最后 个节点的能量消耗. 由于与CH的距离不同, 这两个节 点的能源消耗有很大的不同,虽然编号为18的节点被 激活了四次,但是其能量消耗与编号为 385 的节点相 当, 编号为 385 的节点才被激活了一次. 在本节实验 的过程中同时考虑控制信息交换产生的能量消耗.



图 6 节点能量消耗-调度算法工作(τ=48小时)





较高的 τ 值表明调度执行的频率较低, 其控制的 频率也相对低,因此依据与簇头节点的距离,调度节 点在感知任务中消耗不同的能量. 从图 6 可以看出在 调度执行过程中簇中的节点的能量消耗的区别.同时 也可以看到关于节点电池能量信息的反馈. 通过分布 式的感知任务, 避免了与簇头距离较远的节点过早消 耗能量.事实上,从中可以看出低能量消耗的节点经 常被挑选进行感知任务, 而高能量消耗的节点被选中 的次数很少, 比如图 5 中的节点. 以此表明本文算法 不同节点消耗模式,在目前的情况下,实现的是一个 非线性的消耗模型, 与距离是二次方关系. 图 7 表示 传感器调度算法并不执行的时候,节点的能量消耗: 一些节点具有更高的能量消耗,清楚地表明该传感器 调度算法可以降低网络能耗的作用.



图 8 节点的能量消耗-调度算法工作(τ=24 小时)



图 9 节点的能量消耗-调度算法工作(τ=6小时)



图 10 节点的能量消耗-调度算法工作(τ=1 小时)



图 11 节点的能量消耗-调度算法工作(τ=30 分钟)

在接下来实验中, τ值为 24 小时, 以 30 分钟逐渐 减少.由于节点的高周期律,可以清楚地看到节点的 能量消耗趋向一致.如图 8 和图 9 所示,在 6-12 小时 的有效调度周期内表现明显.这种现象在图 10 中也表 现的较为明显,即使由于较低的τ值导致控制信息的 频繁交换,会对 CH中的节点产生影响,导致消耗曲线 有分开倾向.在τ值处于相对低值的时候,能量消耗曲 线逐渐分离,如图 11 所示,这里主要是因为控制信息 的频繁交换.因此能量消耗的结果图与不执行调度算 法的能量消耗一样,但是能量依然保持明显的低消耗.



通过计算总的能源消耗和 τ 值的函数关系,可以 估算调度算法节省的能量消耗.如图 12 所示,当τ值 低时,能量消耗就高,其大部分的能量用来控制信息 的交换;同时,当τ值升高时,能源主要用于距离 CH 较远的调度节点消耗,可以看出能量消耗在 5 $\leq$ r $\leq$ 50 是 相对稳定的,当 τ $\geq$ 50 时,能量消耗开始增加.当没有 执行调度算法时,整个的能源消耗是 379.86J.从图 12 中可以看出,在τ值为 40 左右,总能量消耗开始下降, 其中在τ值为 47 是,整个的能量消耗达到最低值.除 此之外,需要考虑的另一个方面因素,是在上述模拟 中节点之间能量消耗分布的有效性. 图 13 中用方差描 述 τ 函数相关的节点能量消耗的分布. 通过之前的实 验可以看出, 不管 τ 的值是高还是低, 方差都是较高. 总之, 根据之前的模拟分析, 当τ选择偏向于低或者中 间值, 可设置 τ∈[5,20], 可以获得较少的总能量消耗 和较低的簇内能量消耗分布方差. 同时, 较低的τ值可 以增加电池消耗情况的信息反馈频率, 可以及时发现 并移除健康状态异常的节点, 增加系统的鲁棒性.

表2 本文算法与对比算法 ENSG 的总能量消耗对比

					and the second se		
采样点	0	500	1000	1500	2000	2500	3000
ENSG <sup>[5]</sup>	1	2	0		0	11	12
algorithm		3	0	/	8	11	13
proposed	0	2	4	5	6	9	10
algorithm							

表 2 是本文算法与对比算法 ENSG<sup>[5]</sup> 在不同采样 时刻的总能量消耗对比. 在本文的实验环境中,随着 节点之间通信的增加,两者的网络的总能量消耗也逐 渐增大. 网络初始阶段,节点的能量均处于初始状态, 节点的调度算法均并未发挥效果,但是随着采样点的 增加,节点之间的能量出现差异,此时,本文算法根 据节点的不同状态和类型,选取最佳的节点组合进行 任务执行,因此逐渐体现了本文算法在能量效率方面 的优越性.

## 5 结论

本文主要针对 WSN 中的传感器调度方法的研究. 通过合理的传感器调度执行感知任务,能够有效地降 低网络的能量消耗,均衡了网络的任务分配,并保证 节点的融合质量.根据簇中节点的不同的健康状态进 行自适应选取任务节点是本文的研究的关键内容.虽 然该算法能够有效提高簇中融合节点的信息质量,但 是未考虑到传感器的信息容错能力有限等不足,因此 在下一阶段的工作中,本文将结合容错的思想对算法 进行深入的研究.

#### 参考文献

- 1 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14 (7):1282-1291.
- 2 Tian Y, Ekici E, Özgüner F. Energy-constrained task mapping and scheduling in wireless sensor networks. Proc. of the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference. IEEE. 2005, 8. 215–218.

Software Technique • Algorithm 软件技术 • 算法 221

- 3 Lin J, Xiao W, Lewis FL, et al. Energy-efficient distributed adaptive multisensor scheduling for target tracking in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(6): 1886–1896.
- 4 Mo Y, Garone E, Casavola A, et al. Stochastic sensor scheduling for energy constrained estimation in multi-hop wireless sensor networks. IEEE Trans. on Automatic Control, 2011, 56(10): 2489–2495.
- 5 Lin K, Xu T, Hassan M M, et al. An energy-efficiency node scheduling game based on task prediction in WSNs. Mobile Networks & Applications, 2015, 20(5): 583–592.
- 6 Nayebi-Astaneh A, Pariz N, Naghibi-Sistani MB. Adaptive node scheduling under accuracy constraint forwireless sensor nodes with multiple bearings-only sensing units. IEEE Trans. on Aerospace & Electronic Systems, 2015, 51(2): 1547–1557.
- 7 陈良银,王金磊,张靖宇,等.低占空比 WSN 中一种节点休眠 调度算法.软件学报,2014,25(3):631-641.
- 8 Rodrigues P, Oliveira A, Alvarez F, et al. Space wireless sensor networks for planetary exploration: Node and network architectures. Proc. of the 2014 NASA/ESA Conference on

Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE. 2014. 180–187.

- 9 许建,杨庚,陈正宇,等.基于二次独立集的数据融合调度算 法.通信学报,2014,35(1):62-71.
- 10 王霓虹,刘晓锡.林区生态环境监测的无线传感器网络数 据融合技术研究.森林工程,2012,28(4):85-88.
- 11 崔莉,鞠海玲,苗勇,等.无线传感器网络研究进展.计算机研究与发展,2015,42(1):163-174.
- 12 彭爱平,郭晓松,蔡伟等.基于估计机制的分簇传感器网络数据融合算法.传感技术学报,2011,24(1):128-133.
- 13 凌飞,吴振华.能量均衡的最小连通支配集分布式算法.传 感技术学报,2013,25(9):1316-1321.
- 14 刘连宇,舒勤."当前"半马尔科夫模型及自适应跟踪算法. 计算机工程与应用,2013,49(1):128-130.
- 15 徐定杰,贺瑞,沈锋,等.基于新息协方差的自适应渐消卡尔 曼滤波器.系统工程与电子技术,2011,33(12):2696-2699.
- 16 Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energyefficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE. 2000. 3005–3014.

WWW.C-S-a.org.cn