

## A Weighted Multiple Coverage Node Scheduling Scheme Based on Differential Evolution Algorithm for Heterogeneous Sensor Networks\*

LI Ming<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Electronic Commerce & Supply Chain System Chongqing of Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;  
2. Detection and Control of Integrated Systems Engineering Laboratory, Chongqing 400067;  
3. College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** An optimal heterogeneous sensor node scheduling scheme based on weighted multiple coverage algorithm is proposed to solve the problems of different point coverage requirements in the area coverage. The algorithm uses the efficient coverage and working number of sensors as objective functions in the context of different qualities of coverage for different points of interest (POI) while satisfying the area coverage and sensor energy. Using of improved differential evolution algorithm to exchange the sensor status in the network, the proposed node scheduling scheme can enhance the network coverage performance and reduce the energy consumption. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach. While satisfying special POI coverage requirement, it can also provide the maximum coverage for the area. Comparing with random scheduling algorithm, the proposed approach has higher coverage rate and energy efficiency.

**Key words:** wireless sensor networks; heterogeneous networks; node scheduling; weighted multiple coverage; differential evolution algorithm

EEACC: 6150P      doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.06.021

## 基于差分算法的异构无线传感器网络多重覆盖节点调度方案\*

李明<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 重庆工商大学电子商务及供应链系统重庆市重点实验室, 重庆 400067;  
2. 重庆市检测控制集成系统工程实验室, 重庆 400067; 3. 重庆工商大学计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

**摘要:** 针对部署区域中存在多个不同覆盖质量需求的目标, 本文提出一种基于多重覆盖算法的异构节点调度机制。该算法在满足区域覆盖要求和重点区域监测目标多重覆盖的要求, 及节点能量的约束条件下, 以网络的有效覆盖率最大和工作节点数目最少为目标, 借助改进的差分算法来对节点状态进行优化达到提高网络覆盖性能和降低网络能耗的目的。仿真结果显示, 本文的算法在满足热点目标监测要求的前提下, 最大限度地兼顾网络的区域覆盖质量, 减少了网络的能耗; 较之随机调度算法, 本文算法在覆盖率和网络能耗方面优于后者。

**关键词:** 无线传感器网络; 异构网络; 节点调度; 多重覆盖; 差分算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)06-0826-05

由于受节点自身能量的制约, 如何有效地利用节点能源使得网络工作时间尽可能地延长, 成为了无线传感器网络设计的重中之重<sup>[1]</sup>。节点调度是一种基于应用需求来优化无线传感器网络能耗效率的有效方法。通过在空间上和时间上对节点状态进行控制, 可以减少网络数据流的来源和数量, 从数据

感知和无线通信两个方面减少电量的消耗, 提高网络的能耗效率。文献[2]提出了一种在保证覆盖条件下基于协作的休眠调度算法来达到能量有效性的目的。文献[3]引入节点的虚拟坐标的概念, 提出了一种分布式的, 与节点位置无关的节点调度方案, 解决了目标区域的充分覆盖问题。文献[4]提出了

**项目来源:** 重庆市科委攻关计划项目 (CSTC, CSTC, 2010AA2036); 重庆市教委项目 (KJ100709); 电子商务及供应链系统重庆市重点实验室专项基金项目 (2012ECSC0212)

**收稿日期:** 2011-12-07      **修改日期:** 2012-04-11

一种基于数据挖掘中关联规则和传感器网络能量高效性原则的面向多目标关联点覆盖的节点优化调度算法。文献[5]提出了一种基于分簇的能量感知的节点调度策略。文献[6]提出了一种能量触发的覆盖高效的节点调度策略。文献[7]提出一种以选择性休眠为核心的节点调度机制。

以上对节点调度问题的研究都是针对同构节点进行的,即参与调度的节点的寿命、能量、感知半径等参数都相同,同时假定区域中监测事件的发生的概率服从均匀或泊松分布,这些假设有悖于监测事件的发生,常常呈现“热点”效应的趋势<sup>[8-9]</sup>,并且同构节点构成的网络扩展性差,不利于网络维护<sup>[10]</sup>。尽管文献[11]通过将区域覆盖度转化为特殊点的覆盖度计算,提出了一种保障 $K$ -覆盖为目标的异构节点调度策略,但文章仅假设节点感知半径不同而目标发生的概率的相同,不符合实际应用需求。文献[12]提出一种改进的DLM算法延长网络寿命,但忽视了监测目标出现的非均匀性。针对这些问题,本文提出了一种基于多重覆盖的异构无线传感器网络节点调度机制。该算法在考虑到节点寿命、能量、感知半径异构的条件下,以目标非均匀分布为前提,满足多个目标不同覆盖质量需求且兼顾区域覆盖的要求,通过改进的差分算法对节点工作状态的优化达到节点能量高效使用和提高目标监测质量的目的。

## 1 异构传感器网络中调度问题基本描述

假定 $N$ 种类型的节点部署在二维平面内,其感知半径( $r_s(s_i^k)$ )、通信半径( $r_c(s_i^k)$ )和位置( $x(s_i^k)$ ,  $y(s_i^k)$ )已知,部署完成后所有节点构成一个连通的网络。由于布尔感知模型无法反映监测环境中由于噪声造成的不确定性,引入文献[13]概率传感器监测模型,以反映实际的监测情况。用 $P(s_i^k, p_j)$ 表示节点 $s_i^k$ 对目标栅格点 $p_j$ 的(其坐标为( $x(p_j)$ ,  $y(p_j)$ ))监测质量,则概率监测数学模型如式(1)所示:

$$P(s_i^k, p_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } d(s_i^k, p_j) \leq r_s(s_i^k) - r_c(s_i^k) \\ e^{\alpha_2 - \alpha_1 \lambda_1^{\beta_1} / \lambda_2^{\beta_2}} & \text{if } r_s(s_i^k) - r_c(s_i^k) < d(s_i^k, p_j) < r_s(s_i^k) + r_c(s_i^k) \\ 0 & \text{if } r_s(s_i^k) + r_c(s_i^k) \leq d(s_i^k, p_j) \end{cases} \quad (1)$$

$d(s_i^k, p_j) = ((x(s_i^k) - x(p_j))^2 + (y(s_i^k) - y(p_j))^2)^{0.5}$   
式(1)中, $d(s_i^k, p_j)$ 是节点 $s_i^k$ 与目标栅格点 $p_j$ 之间的欧式距离; $r_c(s_i^k)$  ( $0 < r_s(s_i^k) < r_c(s_i^k)$ )是传感器节点测量可靠性参数; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 是与节点特性有关的测量参数; $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 为传感器节点的输入参数,其取

值为:

$$\lambda_1 = r_c(s_i^k) - r_s(s_i^k) + d(s_i^k, p_j) \quad (2)$$

$$\lambda_2 = r_c(s_i^k) + r_s(s_i^k) - d(s_i^k, p_j) \quad (3)$$

以上这些参数均用于计算目标被监测到的概率。

为提高监测质量,采用文献[14-15]节点协同监测方法减少监测盲区;引入文献[9,15]目标有效测量的条件和有效覆盖率的概念;同时本文采用离散的栅格近似连续的部署区域思想,减少计算复杂度。栅格划分的粒度由应用需求确定。文献[16]证明,当栅格面积为部署区域面积的4%~0.25%时,计算值与精确值之间的绝对偏差约为0.5%~0.1%。

**定义1(覆盖度)** 覆盖度是指在部署区域中,能覆盖点 $P$ 的无线传感器节点的个数。

**定义2(覆盖率)** 覆盖率是指部署区域中,覆盖度大于或等于指定阈值 $K$ 的面积与部署区域面积的比值。

**定义3( $K$ 覆盖的网络)**  $K$ 覆盖的网络是指在部署节点的区域中,每个点都至少被 $K$ 个传感器节点所覆盖。

由于目标的分布常常呈现“热点”的趋势,如图1所示,为提高目标监测的质量,对热点区域进行多重覆盖( $K \geq 2$ ),同时为保证区域的覆盖率,对非热点区域进行1覆盖( $K = 1$ ),这也是本文中多重覆盖的内涵。

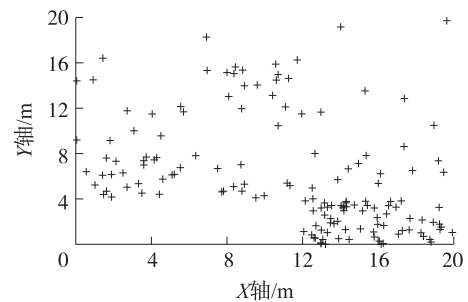


图1 系统中目标分布示意图

考虑如下情景:在如图2所示的基于分簇的异构传感器网络中,节点对事件进行监测,并周期性地上传至簇首节点。每个簇首节点都有足够的能量将消息发送给Sink节点。本文中我们忽略簇首的影响和簇首能量的消耗,仅考虑传感器节点的能量消耗和覆盖质量。我们假定在每个节点在活动

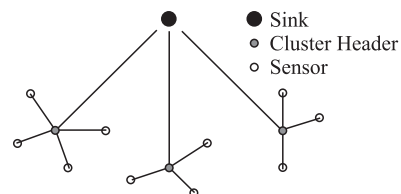


图2 网络拓扑结构

(工作)状态消耗相同的能量(包括感知和通信阶段)。本文优化的目标不是特定时间片里节点覆盖的最大化,而是在给定的时间间隔里(包含多个时间片)整个网络覆盖性能的最大化。

本文要解决的节点调度(热点区域  $K=2$ , 非热点区域  $K=1$ )问题可描述为:在监测目标非均匀分布的条件下,在包含有  $N$  个栅格的区域里部署  $w$  个传感器节点,其中对目标出现频繁区域(热点区域)部署较多节点提高网络的容错性和监测质量,对其他区域部署较少节点(仅保持覆盖),从而实现区域目标的多重覆盖。在时间片里,节点通过工作状态的切换来节省能耗。每个时间片的长度为  $t_{im}$  分钟。在给定的时间  $T$ , 区域覆盖度  $K_i$  和节点寿命的条件下,最大化区域的有效覆盖率(其中热点区域要求覆盖度为2,非热点区域要求覆盖度为1),同时最小化活动节点所占的比例。其数学描述为:

$$\begin{aligned} \max y &= (-f_1, f_2) \\ f_1 &= \min\left(\frac{1}{w} \sum_{i=1}^T \text{ActiveSensor}_i(x)\right) \\ f_2 &= \max\left(\sum_{j=1}^T \text{Coverage}_j(x)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\text{ActiveSensor}_i(x)$  是用来统计时间片  $i$  内工作节点的数目,即统计图3中“1”出现的个数;  $\text{Coverage}_j(z)$  是用于计算网络覆盖率的函数,计算方法详见文献[9, 14]。  $\text{ActiveSensor}_i(x)$ 、 $\text{Coverage}_j(z)$  表达式如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \text{ActiveSensor}(x) &= \begin{cases} 1 & x \text{ 为工作状态} \\ 0 & x \text{ 为其他状态} \end{cases} \\ \text{Coverage}_j(x) &= \frac{N_{\text{有效覆盖的栅格}}}{N_{\text{栅格总数}}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中有效覆盖的栅格是指符合定义2的栅格的数量。

针对本文的多目标优化问题,下面采用差分进化算法加以解决。

## 2 解决本文节点调度问题的方法

### 2.1 差分进化 DE(Differential Evolution)算法

DE算法也称为微分进化算法,是一种基于群体进化的算法,具有记忆个体最优解和种群内信息共享的特点,算法通过种群内个体间的合作与竞争来实现对优化问题的求解。本文运用差分算法解决节点多重覆盖的调度问题,实质上是解决式(4)中以工作节点数最少( $f_1$  最小)和有效覆盖率最大( $f_2$  最大)为目标的多目标优化问题。通过运用差分算法对节点状态(工作、休眠)进行选择优化,进而完成节点的调度

优化,从而提高网络服务质量。本文的差分进化算法采用文献[9, 14-15]的参数设置,并根据节点调度问题的特点进行改进。改进之处在于:

#### (1) 变异操作

本文中由于采用混合二进制编码方法<sup>[17]</sup>,提高二进制DE算法的全局收敛性和稳定性(其收敛性和稳定性证明详见文献[17]),编码示意图如图3所示。

$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
$s_1$			$s_2$			$s_3$			$s_4$		

图3 粒子编码示意图

其中  $s_i = \begin{cases} 0 & \text{休眠状态} \\ 1 & \text{工作状态} \end{cases}$

节点的状态满足

$$\sum_{i=1}^L e^{s_i} \leq E \quad (6)$$

其中的不等式是节点的能量约束,  $L$  是时间片的个数,值为  $\lfloor T/t_{im} \rfloor$ 。

#### (2) 选择操作

对于本文优化问题,可以抽象为以异构传感节点位置构成的非整数向量为输入参数,通过节点工作状态的切换使得在给定的时间、节点能量和区域覆盖度  $K_i$  条件下,以网络覆盖率和节点工作数目为目标的多目标优化问题。假设网络由  $w$  个节点构成,则算法的搜索空间维数为  $n=2w$ ,位置向量  $X_i = (x_{i1}^1, x_{i1}^2, x_{i2}^1, x_{i2}^2, \dots, x_{iw}^1, x_{iw}^2)$  中各元素依次表示异构节点1到  $w$  的横坐标和纵坐标。对应本文的多目标优化问题,算法采用随机加权线性累加函数将多个目标整合为一个综合目标来对微粒进行评价。在多目标优化求解过程中,希望从多个方向搜索,获取尽可能多的非劣解,随机线性加权策略<sup>[18]</sup>展示良好的有效性。因此,权值按如下方式确定

$$w_i = \text{random}_i / \sum_{j=1}^2 \text{random}_j \quad (7)$$

其中  $\text{random}_i$  为0到1之间均匀分布的一个随机数。向量的适应度的数学形式为:

$$\max(y) = -w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \quad (8)$$

### 2.2 基于多重覆盖的异构节点调度优化步骤

DE算法的求解步骤详见文献[9, 14-15]相关内容,多重覆盖的异构节点调度优化的步骤为:

- 1 The number of sensor is  $N$
- 2 The network lifetime requirement is  $T$
- 3 Procedure Sensor
- 4 Each sensor report its location to Sink
- 5 End procedure

- 6 Procedure Sink
- 7 if The number of received location = N then
- 8 Run DE
- 9 if Optimal solution is found then
- 10 Distribute the optimal schedule
- 11 end if
- 12 end if
- 13 end procedure

## 2 仿真分析

### 2.1 仿真参数设置

为了验证算法的有效性,在 Matlab 中对算法进行仿真。假设在 20 m×20 m 区域内随机大规模投放 3 种类型的传感器节点,传感器节点的参数如表 1 所示。监测目标出现的概率服从有边界的帕累托分布<sup>[8]</sup>,密度函数为:

$$F(k) = \frac{((1-(a/k)^\alpha))}{(1-(a/b)^\alpha)} \quad (9)$$

其中,  $a < k < b, 0 < \alpha < 2$ <sup>[8]</sup>。在部署区域内根据式(9)所示的 Pareto 分布产生一定数量的目标,其中包含目标数量多、密度大的部分区域称为“热点区域”。如图 1 所示,本文目标分布示意图,具体参数设置为:目标总数为 150,其余参数  $\alpha = 1.1, a = 3, b = 100$ <sup>[19]</sup>。

本文中其他参数的取值为:每个时间片的长度为 5 min,  $c_{th} = 0.7$ ,对目标出现概率大于 0.95 的区域进行 2-覆盖 ( $K_i = 2$ ),其余的区域(大于 0.7 小于 0.95 的监测区域)进行 1-覆盖 ( $K_i = 1$ ),部署的节点数目为 240(各种类型的节点数目比为 1:1:1),此处节点数多于目标数是为了保证节点有一定的冗余度和节点多重覆盖的要求。工作节点和有效覆盖率的计算方式详见式(4)下面的文字说明以及式(5)。

表 1 传感器节点参数

类型	感知半径/m	$r_c$ /m	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$E$ /min
1	4	2	1	0	1	0.5	25
2	6	3	1	0.5	1	0.5	50
3	9	4.5	1	1	1	0.5	100

### 2.2 仿真结果及分析

图 4 和图 5 分别是网络寿命和工作节点数目的示意图和网络寿命与覆盖率的示意图。从图 4 中可

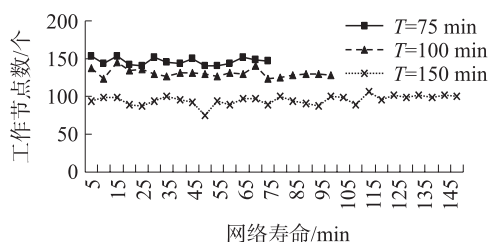


图 4 网络寿命与工作节点关系图

以看出,算法通过减少每个时间片里节点的数量,使得网络寿命得以延长;图 5 中可以看出,用本文提出的算法,在每个时间片里网络的覆盖率达到 97.5% 以上,接近完全覆盖。结合图 4 和图 5,我们可以得出,在多数情况下,网络的寿命越长,所需的节点的数目越多。算法在覆盖率局部存在一定的震荡,震荡的范围为  $[0, 0.01]$ 。

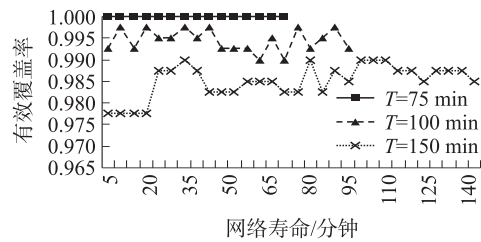
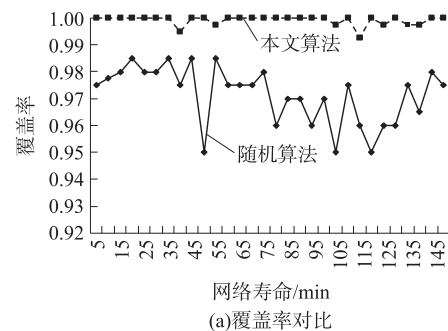
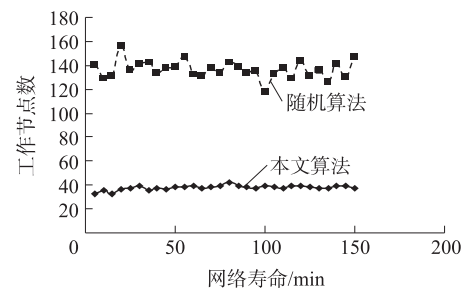


图 5 网络寿命与覆盖率的示意图

将本文算法与随机调度算法<sup>[20]</sup>进行比较。随机调度算法的基本思想是:首先设置分组数  $K$ ,然后随机赋予每个传感器节点 1 到  $K$  的某个值  $i (K, i \in N^*)$ ,并将自身分配到第  $i$  组。分组算法完成之后,按顺序依次调度每一组的传感器节点对目标区域进行监测。图 6 为本文算法与随机调度算法比较的情况,其中 6(a)是比较两种算法的覆盖率,从图中可以看出,本文算法在覆盖率上优于随机算法,覆盖率在 99.9% 之上,接近完全覆盖,同时算法的收敛性优于后者;6(b)为两者工作节点数的比较,可以看出,本文算法在相同网络寿命下,所需的节点数较少,减少了网络的能耗。



(a)覆盖率对比



(b)活动节点个数对比

图 6 网络覆盖率与活动节点个数

## 3 结论

本文提出了一种基于多重覆盖的异构网络调度

算法,该算法以目标的非均匀分布为前提,根据目标出现的概率不同,对目标进行多重覆盖,既提高了目标监测的质量,又提高了网络的性能。同时,还应看到,本算法是建立在假设网络的连通性满足要求的基础上的,今后的工作将就同时满足覆盖性和连通性的节点调度问题作进一步的深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, et al. Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568.
- [2] 杨白薇,于宏毅,李宏. 基于协作的无线传感器网络休眠调度算法[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(3): 677-680.
- [3] 李小龙,林亚平,易叶青,等. 传感器网络中基于虚拟坐标的节点调度方案[J]. *软件学报*, 2008, 19(8): 2089-2101.
- [4] 孙喜策,曹峰,王智. 一种面向多目标关联覆盖的无线传感器网络节点优化调度算法[J]. *信息与控制*, 2009, 38(1): 29-36.
- [5] Dasgupta Sudakshina1, Bhattacharya Indrajit, Bose Gaurav. Energy-Aware Cluster Based Node Scheduling Algorithm in Wireless Sensor Network for Preserving Maximum Network Life Time [C]// *Proceedings of International Conference on Methods and Models in Computer Science (ICM2CS09)*, Dec. 14-15, Delhi, India, 2009: 1-7.
- [6] Wei Qu, Jinkuan Wang, Zhigang Liu. An Energy-Efficiency Coverage-Preserving Node Scheduling Scheme in Wireless Sensor Networks [C]// *IEEE 1st International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology, (CNMT 2009)*, Wuhan, China, November 18-20, 2009: 1-4.
- [7] 于磊磊,李永在,黄玉,等. 基于最小代价场的 WSN 路由算法的研究与改进[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(9): 1342-1346.
- [8] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of 'Small-World' Networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [9] 李明,石为人. 基于差分算法的异构移动节点分布优化策略[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4): 37-40.
- [10] Gupta P, Kumar P R. The Capacity of Wireless Networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404.
- [11] 王换招,董贝,罗韩梅,等. 基于k-覆盖保证的异构传感器网络节点调度策略[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(8): 940-944, 1005.
- [12] 崔彦新,刘三阳,冯海林. 无线传感器网络中一种延长寿命的覆盖算法[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(12): 1772-1777.
- [13] Li S, Xu C, Pan W, et al. Sensor Deployment Optimization for Detecting Maneuvering Targets [A]. *7th International Conference on Information Fusion [C]*// June 28-July 1, Stockholm, Sweden, 2004: 1629-1635.
- [14] 李明,石为人. 基于差分进化的多目标异构传感器网络节点部署机制[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(8): 1896-1903.
- [15] 李明,石为人. 虚拟力导向差分算法的异构移动传感网络覆盖策略制[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(5): 1043-1050.
- [16] Wang X, Wang S, Ma J. Dynamic Deployment Optimization in Wireless Sensor Networks [J]. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2006, 344: 182-187.
- [17] 贺毅朝,王熙照,寇应展. 一种具有混合编码的二进制差分演化算法[J]. *计算机研究与发展*, 2007, 44(9): 1476-1484.
- [18] Ishibuchi H, Murata T. A. Multi-Objective Genetic Local Search Algorithm and Its Application to Flowshop Scheduling[J]. *IEEE Trans. Syst. Man. Cy. B*. 1998, 28(3): 392-402.
- [19] Chansu Yu, Kang G Shin, Ben Lee. Power-Stepped Protocol: Enhancing Spatial Utilization in a Clustered Mobile Ad Hoc Network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in communication*, 2004, 22(7): 1322-1334.
- [20] Liu C, Wu K, King V. Randomized Coverage-Preserving Scheduling Schemes for Wireless Sensor Networks [C]// *Proc. of Fourth IFIP International Conference on Networking*. 2005: 956-967.



李明(1982-),男,山东济宁人,博士,讲师,研究方向为无线传感器网络和普适计算;2011年毕业于重庆大学自动化学院,获工学博士,sshjlm@163.com。