

## 无线传感器网络随机调度算法研究

李杰, 陈曦

(清华大学自动化系, 北京 100084)

(lijie08@mails.tsinghua.edu.cn)

**摘要:**无线传感器网络(WSN)具有节点能量有限、节点冗余度高等特点,这使得轮换成为解决网络覆盖问题的基本工作机制之一。基于轮换工作机制对随机调度模型下的网络特性进行了研究,分析了网络中有效节点总数与轮换周期数的关系,并提出了根据网络中有效节点总数来动态调节节点工作概率的算法。该算法能很好地解决网络因有效节点数目减少、工作概率固定所造成的网络运行后期网络性能无法满足网络需求的问题,保证每轮中的网络性能基本一致。仿真实验验证了所提算法的有效性及其分析的正确性。

**关键词:**无线传感器网络;随机调度模型;轮换工作机制;有效节点数目

**中图分类号:** TP393.01 **文献标志码:** A

## Research of stochastic scheduling algorithm for wireless sensor network

LI Jie, CHEN Xi

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The limited node energy, high node redundancy and other characteristics of Wireless Sensor Network (WSN) make working-in-round mechanism one of the basic policies in solving the network coverage problem. In this paper, the authors investigated the network characteristics of stochastic scheduling model, analyzed the relationship between the number of effective nodes and rotation cycles, and finally provided an adaptive algorithm to adjust the node work probability according to the effective node number in the network. The algorithm can solve the performance problem in the later periods of the network, which is caused by reduction of effective nodes and static work probability, and thus guaranteeing the network performance in each round. Simulation verifies the effectiveness and correctness of the novel algorithm.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); stochastic scheduling model; working-in-round mechanism; number of effective nodes

### 0 引言

无线传感器网络是以无线通信技术、传感器技术以及微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)为基础,并综合了嵌入式计算、数据融合、分布式信息处理等前沿科技成果而发展出的一种新型的网络和计算技术。

通过网络中节点间的相互协作,无线传感网络能够实时感知监控对象的状态信息,并对获得的信息进行处理,最终通过有效的传输方式将信息传送给信息处理中心。因此,传感器网络可以将客观世界中不断变化的信息持续高效地传递给人们,为人们提供各种形式的服务,包括:军事、商业、医疗、环境保护以及灾难拯救等方面<sup>[1-2]</sup>。

传感器网络中的节点通常采用电池供电,且在使用过程中不能实现对电池的再充电,一旦电池能量耗尽,该节点将失去作用。为实现对监测区域的有效和长期监控,一般会在目标区域中部署大量的传感器节点。如何利用节点的冗余特性,提高网络能量利用率就成为无线传感器网络中需要解决的问题。

覆盖问题为传感器网络研究的基本问题之一,其核心是在保证网络覆盖性能满足网络需求的前提下,优化节点调度策略,提高节点能量利用率,延长网络寿命。文献[3]通过分析网络中覆盖度与连通度的关系,提出一种基于交叉节点覆

盖判定的 Coverage Configuration Protocol (CCP) 算法,该算法的精髓是“节点唤醒的充分条件为在它的感应区域内存在一个没有被充分覆盖的交点”。文献[4]在 CCP 算法的基础上提出一种改进算法,该算法不仅减少了工作节点的冗余度,同时避免了监测区域中盲点的产生。然而,该算法和 CCP 算法类似,都需要比较精确的位置信息。为了避免位置信息的约束,文献[5]中提出了三种分别基于最近邻居、邻居数目和一定工作概率的与位置信息无关的覆盖算法。文献[6]提出了 Stand Guard Algorithm (StanGA),该算法与位置信息无关,并在保证网络覆盖性能的同时,综合考虑网络连通性和节点能耗的有效性。文献[7]中基于随机调度模型提出了根据邻居节点数目来动态调节节点工作概率的算法。

在目前已提出的覆盖算法中,以一定工作概率来随机控制节点工作状态的覆盖算法具有与位置信息无关、通信代价低、易于部署实现等特点,因而受到广泛关注。然而在网络部署后,随着时间的推移,网络中有效节点总数必因能量耗尽而减少,若在网络的整个生命周期内始终采用相同的工作概率,则在后期的轮换周期内,工作节点的数目将不能满足网络性能的需求<sup>[7]</sup>。因此,本文分析了网络中有效节点总数与网络周期数的关系,并据此计算节点在各周期内应采用的工作概率,以保证每个周期内工作节点的数目达到网络性能的需求。实验表明,该算法能够保证网络在运行过程中工作节点数目

收稿日期:2010-09-16;修回日期:2010-11-18。

作者简介:李杰(1987-),男,湖北襄樊人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络;陈曦(1965-),女,四川成都人,副研究员,博士,主要研究方向:无线传感器网络、随机控制与优化。

基本一致,网络性能基本不变,提高节点能量的利用率,延长网络寿命。

## 1 系统模型与问题陈述

### 1.1 基本假设和概念

在本文中,假设网络中传感器节点随机均匀地部署于目标区域  $A$  中,并且网络中节点数目足以满足网络的最低覆盖需求。

同时,网络采用轮换工作机制<sup>[8]</sup>,即:将网络中每个节点的工作过程分为周期长度为  $T$  的轮(round),每个轮换周期包括调度阶段和工作阶段。在每轮开始时,节点处于工作状态并进入调度阶段,在调度阶段内,节点首先生成一个随机数,并与已设定的节点工作概率相比:若该随机数大于节点的工作概率,则该节点将在调度阶段结束后转为休眠状态,直到该周期的工作阶段结束;反之,节点则将在该周期内保持运行状态一直为工作状态。

假设该网络具有以下性质:

1) 与节点的感知范围相比,目标区域  $A$  足够大,因此忽略边界效应的影响;

2) 所有节点都是同构的;

3) 节点的感知模型为布尔型,即网络中每个节点都具有一个固定的感知半径  $r$ ,节点的感知范围是以节点位置为圆心, $r$  为半径的圆,每个节点只能感知和发现其感知范围内的环境或者事件;

4) 节点能耗与时间成线性关系,同时考虑节点状态转换的能耗。

本文将采用的符号及其含义,如表1所示。

表1 符号说明

符号	含义
$N$	网络中节点的总数目
$E_o$	单个节点的总能量
$E'$	单个节点的剩余能量
$P_{off}$	休眠节点在单位时间内的平均能耗
$P_{on}$	工作节点在单位时间内的平均能耗
$e_s$	节点一次状态转换的能耗
$r$	节点感知半径
$T$	轮换周期的时间长度
$T_s$	调度阶段的时间长度
$T_w$	工作阶段的时间长度 $T_w = T - T_s$
$\rho_i$	节点在第 $i$ 个周期内的工作概率

在实际应用中,目标区域可能为各种形状。然而,为研究方便,本文假设目标区域为一方形区域,基于以上假设的研究结果能够简单地应用于其他形状的目标区域。

### 1.2 研究内容

在随机调度模型中,节点的工作概率决定了网络中工作节点的数目,文献[9]中分析了随机调度模型下,点覆盖与工作节点数目的关系;而文献[10]给出了对目标区域实现全覆盖所需工作节点数目的上下界。随机调度模型下的覆盖问题,主要通过控制网络中工作节点的数目来解决。

在网络运行过程中,部分节点因能量耗尽而失效,网络中有效节点数目减少,固定的工作概率将无法保证网络性能所需的工作节点数目。因此,分析每轮后网络中有效节点的数目,并据此调节节点下一轮的工作概率为本文的研究内容。

本文将首先分析随机调度模型下的节点能耗,并给出网

络寿命与网络参数的关系,接着描述网络中有效节点的数目与轮换周期数的关系,给出调节节点工作概率的策略,并通过实验仿真来分析算法的性能。

## 2 随机调度机制

### 2.1 能耗分析

在单位周期内,节点间的能耗差异取决于节点在工作阶段的状态,图1描述了节点在不同状态下的能耗曲线。

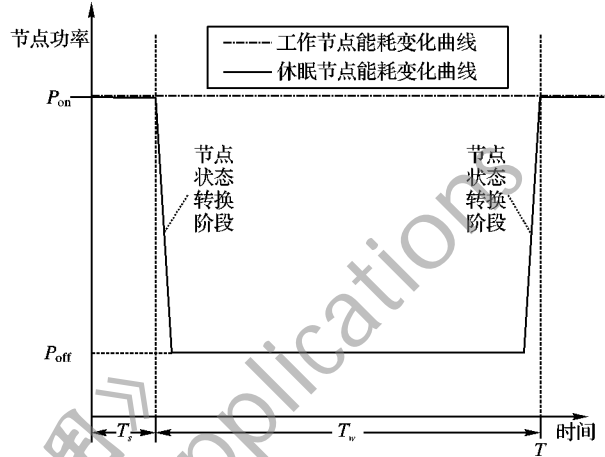


图1 节点状态转换图

由图1可以得到工作节点在单位周期内的总能耗  $E_w$  为:

$$E_w = P_{on}T_s + P_{on}T_w \quad (1)$$

由于节点状态转换的时间十分短,与工作阶段的时长相比可以忽略不计,因而休眠节点在单位周期内的总能耗  $E_s$  为:

$$E_s = P_{on}T_s + P_{off}T_w + 2e_s \quad (2)$$

由此可以得到,第  $i$  个周期内,节点单位时间的平均能耗  $\bar{P}_i$  为:

$$\bar{P}_i = \frac{(1 - \rho_i)E_s + \rho_iE_w}{T} \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)中可得:

$$\bar{P}_i = \frac{P_{on}T - (1 - \rho_i)(P_{on} - P_{off})T_w + 2(1 - \rho_i)e_s}{T} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,在第  $i$  个周期内工作概率  $\rho_i$  越低,轮换周期的时长  $T$  越长,节点在单位时间内的平均能耗  $\bar{P}_i$  越低,因而网络寿命也越长。

### 2.2 工作概率的动态调节

网络内工作节点的总数决定了网络性能,所以对网络性能的需求可以转换为对节点数目的需求。文献[9]中给出了随机调度模型下,网络的  $\alpha$  重点覆盖率  $P_\alpha$  与工作节点数目  $N_0$  的关系:

$$P_\alpha(N_0) = 1 - \sum_{i=0}^{\alpha-1} C_N^i \left(\frac{N_0\beta}{N}\right)^i \left(1 - \frac{N_0\beta}{N}\right)^{N-i} \quad (5)$$

其中  $\beta$  表示节点感知面积与目标区域面积的比值。

在网络部署前,首先根据覆盖性能的需求,由式(5)得到网络中需要的工作节点数目  $N_0$ ,再结合已知的节点总数就可以得到网络的初始工作概率  $\rho_1$ ,即节点在第一个轮换周期内应采用的工作概率。

然而在实际应用中,目标区域对于覆盖性能的需求可能不都为点覆盖。文献[10]中分析了工作节点数目与全覆盖性能的关系,同样可以作为参考。

假设为满足网络性能的需求,需要有  $N_0$  个工作节点,由

此可以得到网络的初始工作概率为:

$$\rho_1 = N_0/N \quad (6)$$

为计算节点在第二个轮换周期内的工作概率  $\rho_2$ , 首先需计算第二个轮换周期开始前, 网络中有效节点的总数  $N_2$ , 进而可以得到:

$$\rho_2 = N_0/N_2 \quad (7)$$

然而, 由于节点调度具有随机性, 网络中有效节点的总数无法准确获得, 因此可以用有效节点总数的期望  $E(N_2)$  替代, 式(7) 则可转化为:

$$\rho_2 = N_0/E(N_2) \quad (8)$$

一般地, 设  $p(k)$  为第  $k$  个轮换周期开始前节点为有效节点的概率,  $p(k)$  同时表示第  $k-1$  个轮换周期结束后节点为有效节点的概率。由于网络中各节点按相同的概率独立决定自己的工作状态, 所以, 第二个轮换周期开始前有效节点数目的期望  $E(N_2)$  为:

$$E(N_2) = N \times p(2) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)中, 则可以得到节点在第二轮中应采用的工作概率:

$$\rho_2 = \frac{N_0}{N \times p(2)} \quad (10)$$

网络运行过程中, 节点的剩余能量是否大于 0 决定了该节点是否为有效节点。因此, 为计算  $p(2)$  只需分析节点在第一个周期内的能耗。由 2.1 节的分析可知, 节点在第  $i$  周期内的能耗只可能为  $E_s$  或  $E_w$ , 概率分别为  $1 - \rho_i$  和  $\rho_i$ 。

由于  $E_w > E_s$ , 在第一个轮换周期后节点的最小剩余能量为  $E_0 - E_w$ 。若  $E_0 - E_w > 0$ , 表示节点在第二个轮换周期开始前仍为有效节点, 即  $p(2) = 1$ ; 若  $E_0 - E_w \leq 0$ , 表示第一个轮换周期内处于工作状态的节点在该轮后将失效, 节点在第二个轮换周期前仍为有效节点的概率  $p(2) = 1 - \rho_1$ 。由此, 结合式(10) 可以得到节点在第二轮中应采用的工作概率  $\rho_2$ 。

若忽略节点发生故障的情形, 网络中存在有效节点的最大周期数  $L_{\max} = \lfloor E_0/E_s \rfloor$ ; 网络中出现失效节点的最小周期数  $L_{\min} = \lceil E_0/E_w \rceil$ 。当轮换周期数  $1 \leq k < L_{\min}$  时, 网络中不存在失效节点, 有效节点的总数不变; 当轮换周期数  $L_{\min} \leq k \leq L_{\max}$  时, 网络中部分节点失效, 有效节点总数减少; 当轮换周期数  $k > L_{\max}$  时, 网络中节点将全部失效。

现假设网络在前  $k$  ( $0 < k \leq L_{\max}$ ) 轮中采用的工作概率, 分别为  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k$ 。

网络在运行  $k$  轮后, 节点的最大能耗可能为  $kE_w$ , 若  $kE_w < E_0$  网络中节点的剩余能量大于零, 节点仍为有效节点, 故  $p(k) = 1$ ; 若  $kE_w \geq E_0$ , 且节点为有效节点, 则该节点在前  $k$  轮中只有部分轮换周期内为工作状态, 否则将因能量耗尽而失效, 因为节点能量  $E_0$  无法满足节点在  $k$  轮中工作所需。

设  $m_k$  为有效节点在前  $k$  轮中状态为工作状态的数目, 则  $\max(m_k)$  满足:

$$\max(m_k) = \{m \mid m \leq k, mE_w + (k-m)E_s \leq E_0, E_0 < (m+1)E_w + (k-m-1)E_s\} \quad (11)$$

设符号  $s_i$  代表节点在第  $i$  个轮换周期内的工作状态, 若节点处于工作状态, 则  $s_i = 1$ ; 相反,  $s_i = 0$ 。因而, 节点处于不同状态下的概率可表示为:

$$p(s_i) = \begin{cases} \rho_i, & s_i = 1 \\ 1 - \rho_i, & s_i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

基于以上假设和分析, 可以得到节点在  $k+1$  轮开始前为有效节点的概率  $p(k+1)$  为:

$$p(k+1) = \sum_{i=1}^k \prod_{s_i=\max(m_k)}^k p(s_i) \quad (13)$$

由此得到网络在第  $k+1$  轮开始前, 有效节点数目的期望  $E(N_{k+1})$  为:

$$E(N_{k+1}) = N \times p(k+1) \quad (14)$$

为了保证每个周期内工作节点的数目相当,  $k+1$  轮内的节点工作概率  $\rho_{k+1}$  应为:

$$\rho_{k+1} = N_0/E(N_{k+1}) \quad (15)$$

算法的具体实施过程如下:

1) 根据网络性能需求计算所需的工作节点数目, 如式(5), 再结合节点总数确定节点的初始工作概率;

2) 通过式(13)和(14) 计算出  $k$  轮后网络中有效节点总数的期望;

3) 由式(15) 计算出节点在  $k+1$  轮的工作概率;

4) 重复步骤 2) 和步骤 3), 计算出节点在每个轮换周期内应采用的工作概率。

该算法简单易行, 节点在调度过程中不需要信息交换, 减少在通信上的能量消耗, 提高了能量利用率, 同时也克服了因工作概率固定而不能始终满足网络需求的缺点。

### 3 仿真实验

基于上文提到的根据网络中有效节点数目来调节节点工作概率的策略, 本章将通过仿真实验对比分析, 采用该概率调节策略和维持工作概率不变时, 网络在每个轮换周期内有效节点数目、工作概率、工作节点的数目及网络覆盖性能的变化情况。表 2 列出了仿真实验中所采用的参数。

表 2 实验参数

参数名	参数值
网络中节点的总数目 $N$	1 000
覆盖区域面积 $A$	1
节点感知半径 $r$	0.18
单个节点的总能量 $E_0$	1 500
休眠节点在单位时间内的平均能耗 $P_{\text{off}}$	0.05
工作节点在单位时间内的平均能耗 $P_{\text{on}}$	0.001
节点一次状态转换的能耗 $e_s$	0.005
轮换周期的时间长度 $T$	5 000
调度阶段的时间长度 $T_s$	10
工作阶段的时间长度 $T_w$	4 990
网络性能所需的工作节点数 $N_0$	200

为了描述算法覆盖性能的好坏, 在仿真实验中, 本文将  $1 \times 1$  的方形覆盖区域划分成  $500 \times 500$  个相同大小的小方格, 每块方格的边长为 0.002。由于方格的边长远小于节点的感知半径  $r$ , 当方格的中心被网络  $\alpha$  重覆盖时可以近似认为该方格被网络  $\alpha$  重覆盖, 因此将  $\alpha$  重覆盖率定义为中心被  $\alpha$  重覆盖的方格数量和目标区域中所有方格数量 (250,000) 的比值。

表 2 中给出满足网络性能所需的工作节点数为 200, 由式(6) 可以得到节点的初始工作概率  $\rho_1 = 0.2$ , 进而结合式(14) 和式(15) 可以得到网络在每个轮换周期开始前有效节点数目的期望以及节点在每个轮换周期内应采用的工作概率, 如图 2 ~ 3 所示。

图 2 所示的为网络在每轮开始前有效节点总数的变化趋势, 并对根据式(14) 得到的有效节点数目的期望与一次仿真

实验中网络在各周期的有效节点总数进行了对比。从图中可以看出,随着周期数的增加,部分节点能量耗尽,网络中有效节点数目不断减少,且理论计算值与实际值基本吻合。因此为保证每轮中工作节点的数目基本一致,节点的工作概率应不断提高。

根据图2所示的有效节点数目,由式(15)可以得到节点在每个切换周期内应采用的工作概率,如图3所示。从图中可以看出,为避免因部分节点的失效而导致网络性能下降,节点的工作概率在不断提高。

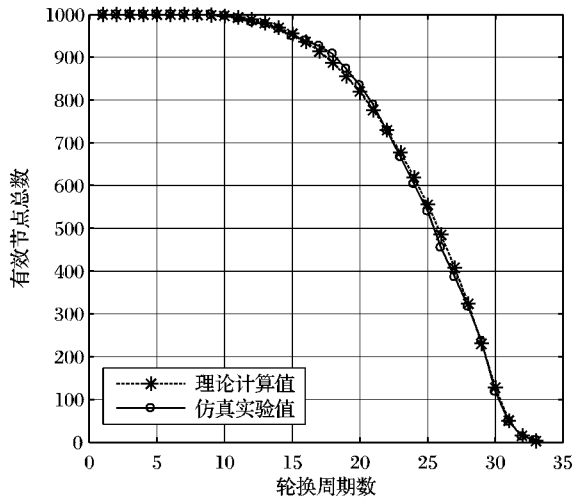


图2 网络中有效节点数目变化图

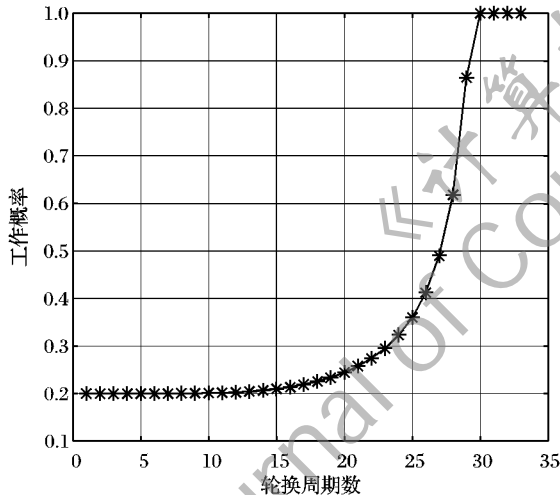


图3 节点工作概率变化图

图4所示的为工作概率固定不变与采用图3所示的概率调节策略时,重复实验100次,所得到的每个周期内工作节点数目的平均值。根据表2可知,为满足网络性能需求,节点的固定工作概率必须大于等于0.2,否则网络性能无法达到要求,实验中比较了工作概率固定为0.2与0.3时的网络性能。

由图4可以看出,当采用概率调节策略时,网络的前29个周期内的工作节点数目相差不大,围绕网络性能所需的节点数目上下波动,符合前期的理论分析,而从第30个周期开始,网络中工作节点数目急剧下降,这是由于网络中有效节点总数低于网络性能所需的节点数200,如图2所示。

当节点的工作概率保持不变时,网络中工作节点的数目随着周期数的增加而不断减少,由图4可以看出,从第18个周期开始工作概率为0.3的网络中工作节点数目低于网络性能所需的200,同时网络中工作节点的数目开始低于工作概率为0.2的网络,因此提高节点的工作概率不一定能够有效

延长网络的工作时间;当工作概率固定为0.2时,网络在第23个周期内的有效节点总数已低于150个,这将对网络性能产生极大的影响。

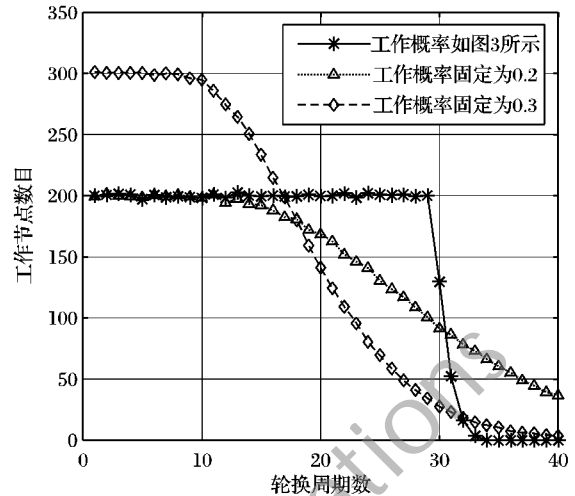


图4 工作节点数目变化图

图5和图6分别描述了采用图3所示的概率调节策略和维持工作概率始终为0.2和0.3时,网络在每个周期的1重全覆盖率和8重点覆盖率。1重全覆盖率表示网络在重复实验中满足1重全覆盖的数目与重复实验总数的比值;8重点覆盖率是表示网络在重复实验中满足8重覆盖的区域与目标区域的比值。由于目标区域是否被全覆盖,很大程度上取决于网络中工作节点的位置,又由于节点的工作状态具有随机性,从而导致图5中的网络全覆盖率呈现锯齿状。

由图5和图6中可以看出,从第20个周期开始,维持工作概率始终为0.2和0.3的网络性能下降很快,这是由于网络中各周期内工作节点数目不断减少,如图4所示。然而,采用图3所示的概率调节策略的网络,其覆盖性能基本保持一致,直至网络寿命结束。

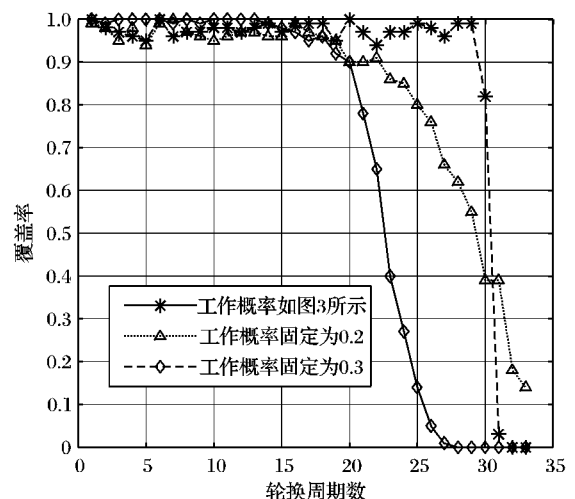


图5 全覆盖性能对比

从以上对比分析中可以看出,采用概率调节策略能够很好地解决网络在运行过程中,因节点能量耗尽失效所造成的网络中工作节点数目减少的问题,保持网络性能在各个周期内基本一致,实验结果符合前面的理论分析,证明算法是有效的。

#### 4 结语

针对无线传感器网络的随机调度模型中节点以固定的概

(下转第605页)

虑分配,设计出一种基于需求的图着色论频谱分配算法。算法在增加系统信道效益,提高频谱利用率的同时,使未满足的用户需求最小化,从而更好地满足认知网络中多个用户的频谱需求。仿真结果证明,在相同环境下,提出的算法不但使次用户可以获得更大的系统平均信道效益,而且显著改善了次用户信道需求的满足情况,减少了未满足的用户需求,提高了频谱利用率,使得频谱的分配更为合理,系统性能得到了优化。

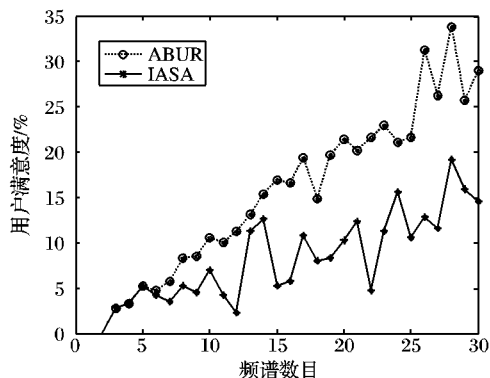


图3 满足的用户需求与频谱数目关系

#### 参考文献:

- [1] HAYKIN S, REED J H, LI G Y. Scanning the issue [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(4): 608–611.
- [2] ZHANG XIN-CHUN, HE SHI-BIAO, SUN JIANG. A game algorithm of dynamic spectrum allocation based on spectrum difference [C]// WOCC 2010: Proceedings of the 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 1–4.
- [3] CHANG H-B, CHEN K-C, PRASAD N R, *et al.* Auction based spectrum management of cognitive radio networks [C]// Proceedings of the 69th Vehicular Technology Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1–5.
- [4] PANG J-S, SCUTARI G, PALOMAR D P, *et al.* Design of cognitive radio systems under temperature-interference constraints: A variational inequality approach [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3251–3271.
- [5] ZHANG JIAN-WU, ZHAO QI, ZOU JING-YUAN. Advanced graph-coloring spectrum allocation algorithm for cognitive radio [C]// WiCOM 2009: Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1–4.
- [6] ZHENG HAI-TAO, PENG CHUN-YI. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access [C]// ICC 2005: 2005 IEEE International Conference on Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 3132–3136.
- [7] LIAO CHU-LIN, CHEN JIE, TANG YOU-XI. Parallel spectrum allocation algorithm for cognitive radios [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(7): 1608–1611.
- [8] WANG JIAO, HUANG YU-QING, JIANG HONG. Improved algorithm of spectrum allocation based on graph coloring model in cognitive radio [C]// CMC 2009: 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 353–357.
- [9] 陈勃, 李少谦, 廖楚林. 认知无线网络中基于需求的频谱资源分配算法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28(9): 2188–2191.
- [10] 谢显中, 杨黎丽, 郑轶. 一种基于历史信息的感知无线动态频谱分配算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2009, 21(5): 573–577.

(上接第597页)

率工作无法始终满足网络性能需求的情形,本文研究了随机调度机制下节点的能耗以及网络中各参数对网络寿命的影响,并通过分析提出了一种根据网络中有效节点数目来调节节点工作概率的策略。仿真实验表明,该策略使每轮内的工作节点数目基本一致,始终满足网络的初始性能需求,尽可能地延长了网络寿命。

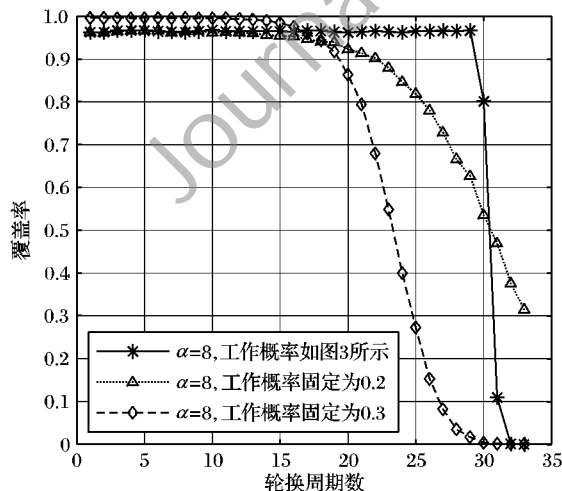


图6 点覆盖性能对比图( $\alpha=8$ )

#### 参考文献:

- [1] 夏俐, 陈曦, 赵千川, 等. 无线传感器网络及其应用简介[J]. 自动化博览, 2004, 21(1): 34–37.
- [2] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393–422.
- [3] WANG X R, XING G L, ZHANG Y F, *et al.* Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2003: 28–39.
- [4] LIU Y H, PU J H, ZHANG S, *et al.* A localized coverage preserving protocol for wireless sensor networks [J]. Sensors, 2009, 9(1): 281–302.
- [5] TIAN D, GEORGANAS N D. Location and calculation-free node-scheduling schemes in large wireless sensor network [J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 65–85.
- [6] BAI H X, CHEN X, LI B, *et al.* A location-free algorithm of energy-efficient connected coverage for high density wireless sensor networks [J]. Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 2007, 17(1): 1–21.
- [7] 何朝笋, 石高涛, 廖明宏. 传感器网络随机睡眠节点调度算法研究及实现[J]. 计算机工程, 2007, 33(8): 115–117.
- [8] KUMAR S, LAI T H, BALOGH J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network [C]// Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2004: 144–158.
- [9] CHEN X, HO Y C, BAI H X. Complete coverage and point coverage in randomly distributed sensor networks [J]. Automatica, 2009, 45(6): 1549–1553.
- [10] WAN P J, YI C W. Coverage by randomly deployed wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2658–2669.