

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.1.13

## 功率自适应调节 WSN 故障容错算法

沈玮娜, 胡黄水\*, 王宏志, 王莹

(长春工业大学 计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 提出一种基于功率自适应调节的故障容错算法来容忍网络的能量耗尽和随机故障, 通过自动调节节点的发射功率来减小因节点间干扰而引起的通信链路故障。当节点的剩余能量低于阈值时, 选择其邻居节点中剩余能量最大的节点并以最小功率来提供其相应服务以避免因节点能量耗尽而引起的节点失效故障。仿真测试结果表明, 容错算法在收包率、故障恢复延时以及网络平均能耗方面具有较好的表现。

**关键词:** 无线传感器网络; 故障容忍; 功率自适应调节; 均衡能量消耗

**中图分类号:** TP 393.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2017)01-0066-07

## A fault tolerance algorithm based on adaptive power regulation for wireless sensor network

SHEN Weina, HU Huangshui\*, WANG Hongzhi, WANG Ying

(School of Computer Science & Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** A fault tolerance algorithm is proposed based on adaptive power regulation to tolerate the energy consumption and random false. The transmitting power is regulated to decrease the communication malfunction caused by interference among the nodes. When the rest power is less than the threshold, the node with maximum remain power is selected and offer the minimum power to ensure the services, and the node malfunction is avoided. Simulations show that the algorithm is with good performance in the aspect of packet delivery ratio, fault recovery delay and average energy consumption.

**Key words:** wireless sensor networks; fault tolerance; adaptive power regulation; balanced power consumption.

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 吉林省发改委经济结构调整引导资金专项项目(2014Y125); 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(吉教科合字[2015]第 100 号); 吉林省科技厅科技发展计划项目(20140204037GX)

作者简介: 沈玮娜(1993-), 女, 汉族, 江苏无锡人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事无线传感器网络方向研究, E-mail: SWN0715@163.com. \* 通讯作者: 胡黄水(1974-), 男, 汉族, 湖南隆回人, 长春工业大学副教授, 博士, 主要从事无线传感器网络及轨道车辆动力学方向研究, E-mail: huhs08@163.com.

## 0 引言

无线传感器网络是由大量具有计算、通信功能的传感器节点组成的自组织网络<sup>[1]</sup>。传感器节点能量有限,且通常部署在偏僻恶劣的环境中<sup>[2-4]</sup>,这些无人照看的节点很容易因能量耗尽和周围环境等因素出现故障<sup>[4-6]</sup>,从而可能使网络部分或全部失效,严重影响无线传感器网络的运行可靠性和生命周期<sup>[7-9]</sup>。因此,构建一个能有效容忍能量耗尽和随机故障的网络对无线传感器网络来说显得十分重要。

无线传感器网络的故障容错涉及到故障预防、检测、诊断和恢复等多方面内容<sup>[5-7]</sup>。

近年来,国内外学者对这一方面进行了许多研究并取得了丰富的研究成果<sup>[3]</sup>。这些成果主要包括改善或避免由于网络中的节点能量和/或通信干扰所引起的故障而导致的数据丢包率高、长延时、网络分割甚至崩溃等问题,使网络在出现故障时能继续正常运行,从而延长网络的生命周期。

文献[4]提出了一种基于粒子群优化方法的成簇机制,并保证簇头之间的二连通性,从而提高网络的容错性能。

文献[7]采用枚举法和贪婪算法实现对中继节点的容错性布局,提高网络的能耗性能。文献[8]中提出一种分布式无线传感器网络节点故障检测和隔离算法,通过正确识别正常节点来隔离故障节点,将传感器失效的节点逻辑上与网络隔离,并通过时间冗余来容忍瞬时故障。

文献[9]采用整数线性规划布局策略来放置中继节点,以提供传感器节点和中继节点的故障容忍,并限制中继节点的最大能量消耗来延长网络的生命周期。文献[10]提出一种多项式时间近似算法来找到当前网络的一个具有最小干扰的连通网络。

文献[11]采用着色方法来对降低干扰问题建模,为了减小节点间冲突和信号干扰,不同颜色的节点分配给不同的信道频率,采用高效的信道选择方法来降低干扰。文献[12]采用最优簇来减小无线传感器网络的通信干扰。文中对提出的算法和 LEACH 等 3 种方法进行了性能比较,结果表明,其减小了网络的能量消耗并提高了网络的容错性能。

文献[13]提出一种 AFTBI (Active node based Fault Tolerance using Battery power and

Interference model)容错方法,采用节点的功率和干扰组合模型,使用  $n_a = [\alpha b_p, \beta I]$  来确定节点的当前状态,其中系数  $\alpha + \beta = 1$ ,且  $0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1$ 。当  $\alpha > \beta$  时,节点状态主要受功率影响,采用能量耗尽时的切换机制来容忍故障;当  $\alpha < \beta$  时,节点状态则主要受通信干扰影响,采用功率调节的方法来容忍故障。仿真结果表明,与传统的故障容错方法相比,AFTBI 在包接收比、控制开销、存储器开销以及故障恢复延时方面具有更好的性能。

现在几乎所有的故障容错方法在执行无线传感器网络分析时仅考虑节点电源功率或是仅考虑了节点间的通信干扰,这使得网络整体容错性能并不十分理想<sup>[13]</sup>。AFTBI 虽然采用两者结合的模型来进行故障容错,但根据不同的系数采用不同的故障容错方法,系数的确定很难界定,且采用最大功率发送数据增加了网络能量消耗。同时,电源能量耗尽时的切换机制仅选择活动节点的邻居节点中剩余能量最大的节点替代该节点,可能影响网络的连通性以及数据收包率。节点干扰时的功率调节机制采用时分方式导致运算复杂度高且公共节点被分配多个不同时隙。因此,针对以上缺点,文中提出一种与 AFTBI 类似的自适应功率调节故障容错算法 (Fault Tolerance algorithm based on Adaptive Power Regulation, FTAPR),通过功率自动调节来容忍因节点间干扰而引起的通信故障。当某个节点需要发送数据时,节点进入活动状态并以所需最小功率向下一跳目标节点发送数据包,否则进入睡眠状态。而当节点的剩余能量低于阈值时,选择其邻居节点中剩余能量最大的节点提供其相应的服务,且该剩余能量最大的节点同为下一跳目标节点的邻居节点。

## 1 网络模型

设无线传感器网络由  $N$  个节点组成,每一个节点具有唯一的 ID 号,所有节点随机分布在边长为  $M$  的正方形区域,每个节点具有最大发射功率  $P_{\max}$ ,且支持全向发射。网络节点的能量有限且具有自身的位置信息,并能改变自身的传输功率。记任一节点的初始能量为  $E_s$ ,不能传输信号时的能量阈值为  $E_{th}$ ,则节点的剩余能量:

$$E_r = E_s - \sum E_d \quad (1)$$

式中:  $E_d$  ——节点发送或接收信号所消耗的能量。

通常采用一阶无线通信模型<sup>[13]</sup>,即:

$$E_d = \begin{cases} l \times E_{\text{elec}} + l \times \epsilon_{\text{amp}} \times d^2, & \text{发送信号} \\ l \times E_{\text{elec}}, & \text{接收信号} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $l$  ——需要发送或者接收的信息比特数;

$d$  ——发送节点和接收节点之间的距离;

$E_{\text{elec}}$  ——发送节点发送每比特或者接收节点接收每比特信息所消耗的能量;

$\epsilon_{\text{amp}}$  ——发送节点发送信息时单位距离的能耗放大倍数。

当网络中的某个节点具有  $k$  个邻居节点时,接收信息时的信噪比<sup>[12]</sup>为:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^k I_i} \quad (3)$$

式中:  $S$  ——该节点接收邻居节点所发送信号的功率;

$I$  ——该节点接收其它邻居节点干扰信号的功率之和。

式(3)表示节点受到除发送数据节点外其它邻居节点的所有干扰。

## 2 算法设计

FTAPR 的基本思想是当某个节点发送数据时,其邻居节点除下一跳目标节点之外都进入睡眠状态,并自动调节数据发送节点的发射功率,使数据通信的每一跳都消耗更低的能量。且当节点的剩余能量低于阈值时,节点选择邻居节点中剩余能量最大的节点来代替其提供所有的服务,且该节点同为下一跳目标节点的邻居节点,从而最大限度延长网络的生命周期。FTAPR 主要包括两个部分,即节点间通信所需最小功率的确定和容错机制。

### 2.1 节点间通信最小功率的确定

对于网络中由  $n$  个节点构成的节点集  $V$ ,每个节点的最大功率为  $p_{\max}$ ,最小功率为  $p_{\min}$ ,且每个节点具有  $m$  个功率级别,任一节点  $i$  的当前功率级用  $p_k^i (1 \leq k \leq m)$  表示,其邻居节点结合表示为  $N(i)$ 。定义节点  $i$  的邻居节点功率列表为  $\text{TpList}(i)$ ,其每一个元素包含两个元组,即  $c(i, v) = \{k_1, k_2\}$ ,其中  $v$  为  $i$  的邻居节点,  $k_1 =$

$P_k^i, k_2 = \text{ID}_v$ 。网络中的每个节点依次以功率  $p_k^i$  广播包含其当前发射功率以及节点 ID 的报文 BrMessage,其邻居节点接收到报文后以同样的发射功率发送仅包含节点 ID 的确认报文 OkMessage,节点根据接收的确认报文建立其邻居节点功率列表,确定过程的程序代码如下:

Collecting\_of\_Power\_Lists()

```

 $p_k^i = p_{\min}$ 
do m times
  for( $i \in V$ ) do
    send BrMessage
    while( receive OkMessage from  $v \in N(i)$ ) do
      insert a new  $C(i, v)$  into  $\text{TpList}(i)$ 
       $k_1 = P_m^i, k_2 = \text{ID}_v$ 
    end while
  end for
 $p_k^i = p_{k+1}^i$ 
end do

```

### 2.2 容错机制

FTAPR 通过使非活动节点进入睡眠状态来减小节点间的干扰,且当网络中某个节点的剩余能量低于阈值时切换到邻居节点中能量最大且为下一跳目标节点的邻居节点的节点,从而有效延长网络生命周期。

无功率调节节点间干扰示意图如图 1 所示。

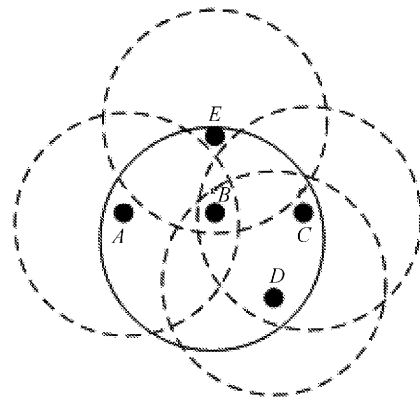


图 1 无功率调节节点间干扰示意图

当某个节点  $A$  向接收节点  $B$  发送数据时,此时  $B$  的邻居节点  $C, D, E$  (假设其发射功率与  $A$  相同)向其它节点发送数据,则它们之间发生相互干扰。当  $B$  受到多个邻居节点干扰时,  $B$  接收  $A$  的信号质量不可避免下降且不能正确接收  $A$  的数据。为了减小节点间相互信号干扰,根据节点是否为活动状态或睡眠状态动态调整其发射功率。功率调节后节点间干扰示意图如图 2 所示。

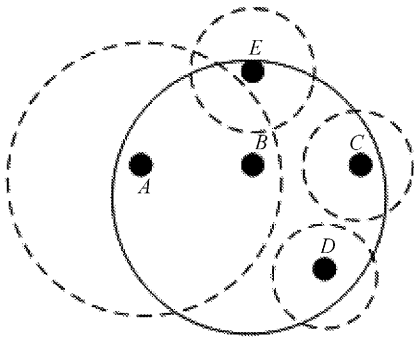


图 2 功率调节后节点间干扰示意图

从图中可见,通过对节点 B 的各邻居节点功率的调节可减小重叠干扰效果,即有:

$$\sum_{i=1}^k N_{i'} < \sum_{i=1}^k N_i$$

式中:  $N_{i'}$  —— 功率调节后的干扰。

由式(3)可知,功率调节提高了网络的信噪比。为了克服多个节点同时发送数据采用时分方法所带来的计算量大和实时性差等问题,采用主

从发送/应答的方法,即当节点发送数据的同时启动一个定时器  $T_m$ ,在  $T_m$  内收到应答报文,节点关闭定时器,并进入睡眠状态,否则重新发送数据并启动定时器,确认报文为简单的仅包含收发节点 ID 的报文。此外,节点发送和接收数据后通过式(1)计算其剩余能量。当剩余能量  $E_r$  小于等于阈值  $E_{th}$  时,该节点即为故障节点,故障节点收集其所有邻居节点的剩余能量状态,即以最大发射功率发送剩余能量请求包,各邻居发送包含剩余能量的应答包,请求/应答包都为简单的 HELLO 报文。然后,故障节点向下一跳节点请求其功率列表,并根据功率列表和接收到的邻居节点剩余能量找到剩余能量最大的共同邻居节点。最后,故障节点向该共同邻居节点发送相关参数包括故障节点 ID,上一跳节点 ID,下一跳节点 ID。上述过程中数据传输采用的发射功率从各节点的功率列表中获取。具体的容错机制流程如图 3 所示。

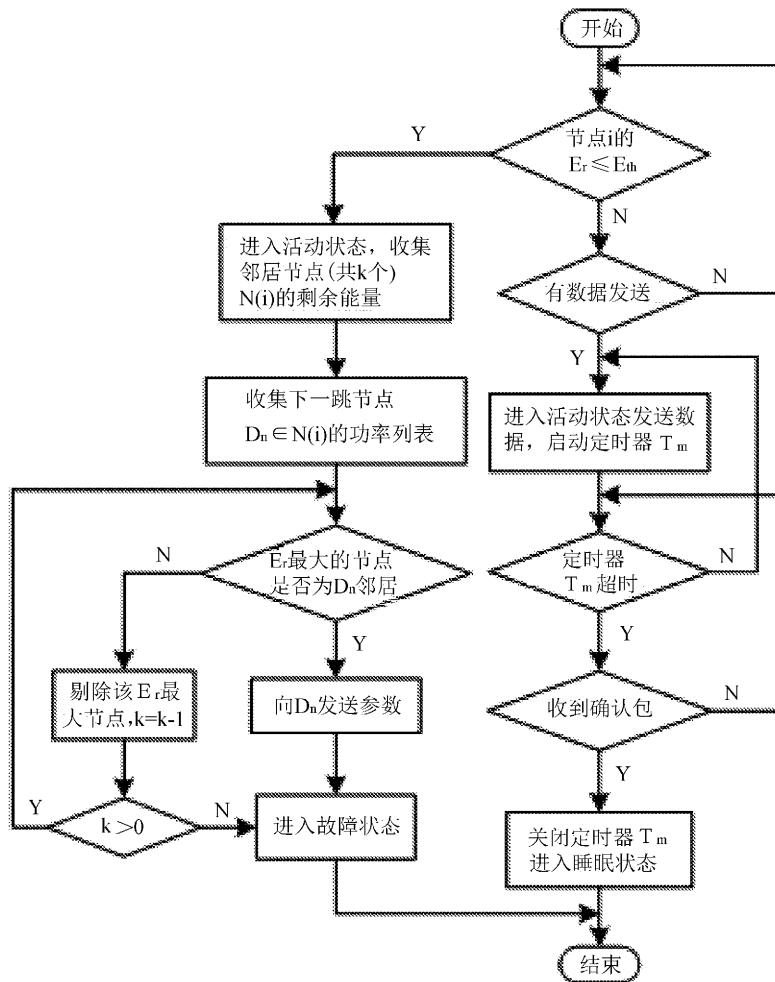


图 3 FTAPR 总体流程图

### 3 仿真分析

为了评价和分析 FTAPR 的性能和效果,在 OMNET++ 4.6 网络仿真平台上对其进行了一系列的仿真实验,分别对收包率、故障恢复延时、能量消耗进行测试,并与相似算法 AFTBI 进行对比分析。

在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的方形区域内随机分布若干个节点构成无线传感器网络,基站部署在网络的边界。其中

$$E_s = 4\text{ mJ}$$

$$E_{th} = 0.1\text{ mJ}$$

$$E_{elec} = 50 \times 10^{-6}\text{ J/bit}$$

$$\epsilon_{amp} = 10 \times 10^{-9}\text{ J}/(\text{bit} \times \text{m}^2)$$

#### 3.1 网络收包率分析

在不同网络规模条件下的多种情况对网络中的收包率进行测试。首先测试网络中各节点无故障(包括能量耗尽和链路干扰)时的收包率,然后分别测试在出现故障情况时采用 AFTBI 和 FTAPR 的收包率。

测试结果如图 4 所示。

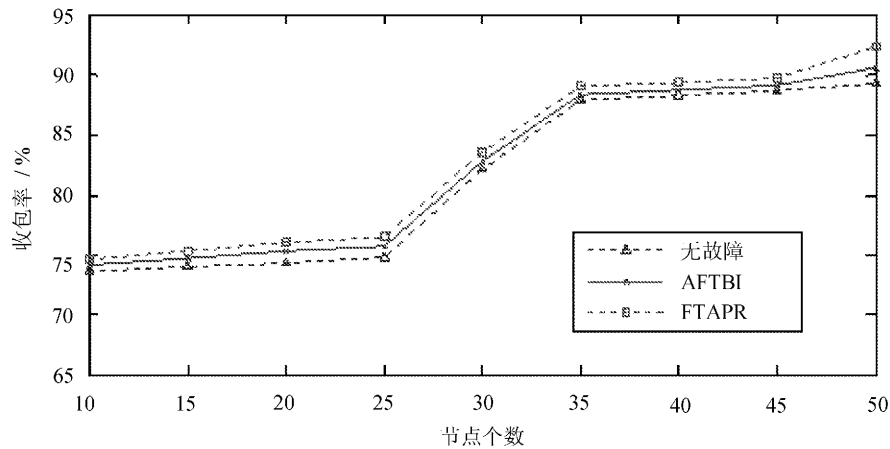


图 4 收包率对比

从图中可见,在网络未出现故障时节点具有较好的收包率。

AFTBI 由于通过增加网络活动节点以及降低通信干扰的方法使收包率大于或等于网络无故障时的收包率。而 FTAPR 相比 AFTBI 采用所需的最小发射功率进行通信,进一步降低了节点间的干扰,因此其具有比 AFTBI 更好的收包率。

从图中还可知,随着节点数的增加,收包率得到提高,这是因为随着节点数的增加,给定区域的连通性能更好。

#### 3.2 故障恢复延时分析

故障恢复延时包括能量耗尽节点切换时间和抑制邻居节点间干扰所用时间,在不同网络规模及不同故障率情况下,对故障延时进行测量,其结果如图 5 所示。

从图中可见,随着网络容量和故障节点数量

增大,故障恢复延时变大。且明显可见 FTAPR 具有比 AFTBI 更小的延时。

这是因为 AFTBI 采用时分顺序的数据传输方式,而 FTAPR 采用并行的询问/应答的数据传输方式。

#### 3.3 平均能耗分析

无线传感器网络容错算法的重要目标之一是尽可能地减小网络的能量损耗,从而延长网络的生命周期。接下来对 FTAPR 容错机制在不同网络容量和不同故障条件下对网络平均能量损耗进行了测试,结果如图 6 所示。

从图中可见,由于 FTAPR 无论在能量耗尽节点切换还是在邻居节点间干扰自适应功率调节机制中都采用节点间所需的最小功率进行通信,其比 AFTBI 具有更低的平均能量消耗。

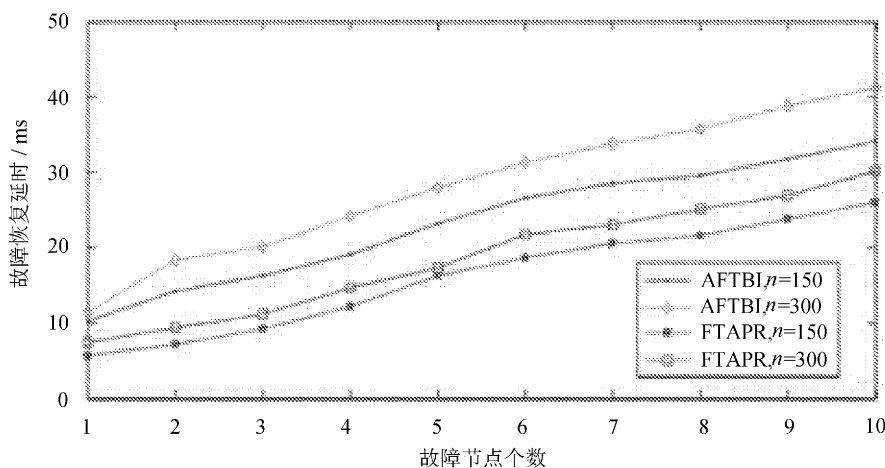


图5 故障恢复延时对比

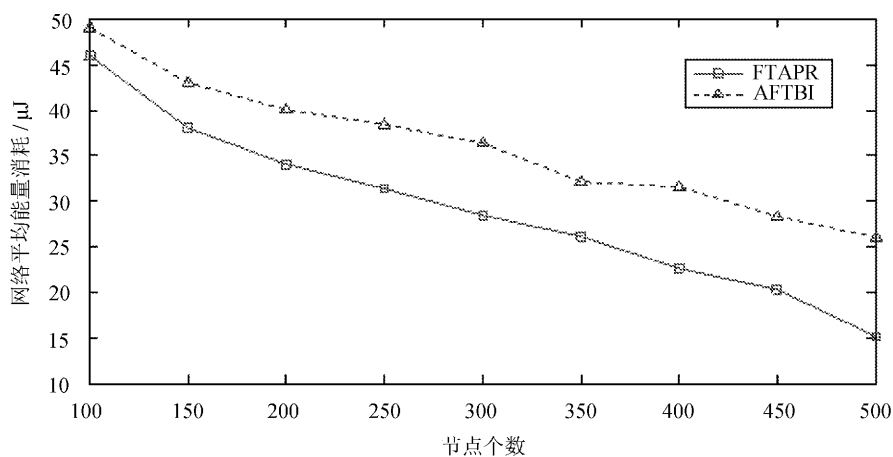


图6 网络平均能量消耗对比

#### 4 结 语

针对无线传感器网络常见的能量耗尽和通信干扰故障,提出一种新的基于功率自动调节的故障容错算法 FTAPR,一旦某节点的剩余能量小于阈值时,该节点选择其邻居节点中能量最大且同时为其下一跳邻居节点的节点来执行该节点的所有服务。算法采用自适应功率调节方法来降低邻居节点间的通信干扰,避免节点的通信链路故障。仿真结果从包接收率、故障恢复延时以及平均能量消耗等方面对所提容错机制进行了评价,结果表明,所提机制比相似的方法具有更好的性能。

#### 参考文献:

[1] 何大宇,韦铤,徐英鹏.Zigbee 无线传感器网络的医疗应用研究[J].长春工业大学学报:自然科学版,

2010,31(3):355-360.

- [2] Zhang Y Y, Shu L, Papk M S, et al. An intelligent and reliable data transmission protocol for highly destructible wireless sensor networks[J]. Journal of Internet Technology,2009,10(5):539-548.
- [3] 李洪兵.无线传感器网络故障容错机制与算法研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [4] 苏金树,郭文忠,余朝龙,等.负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法[J].计算机学报,2014,37(2):445-456.
- [5] Paradis L, Han Q. A survey of fault management in wireless sensor networks[J]. Journal of Network and Systems Management,2007,15(2):171-190.
- [6] 徐小龙,耿卫建,杨庚,等.高效容错的无线传感网事件及其边界检测算法[J].计算机研究与发展,2014,51(5):997-1008.
- [7] 王翥,王祁.多约束容错性 WSN 中继节点布局算法的研究[J].电子学报,2011,39(3):116-120.

- [8] Lee M H, Choi Y H. Fault detection of wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2008,31(14):3469-3475.
- [9] Bari A. Design of fault tolerant wireless sensor networks satisfying survivability and lifetime requirements[J]. Computer Communications,2012,35(3):320-333.
- [10] Aslanyan H, Rolim J. Interference minimization in wireless networks[C]// Proceedings of international conference on embedded and ubiquitous computing, Hong Kong:[s.n.],2010:444-449.
- [11] Hassan M A, Chickadel A. A review of interference reduction in wireless networks using graph coloring methods[J]. International Journal on Applications of Graph Theory in Wireless ad hoc Networks and Sensor Networks,2011,3(1):22-29.
- [12] Amini N, Vahdatpour A, Xu W, et al. Cluster size optimization in sensor networks with decentralized cluster-based protocols [J]. Computer Communications,2012,35(2):207-220.
- [13] Geeta D D, Nalini N, Rajashekhar C B. Fault tolerance in wireless sensor network using hand-off and dynamic power adjustment approach[J]. Journal of Network and Computer Applications,2013,36(4):1174-1185.