

改进的无线传感器网络簇首选择策略及其路由算法

姚光顺*, 温卫敏, 张永定, 董再秀, 赵亮

(滁州学院 计算机与信息工程学院, 安徽 滁州 239000)

(* 通信作者电子邮箱 yaogshun@126.com)

摘要:针对无线传感器网络中簇首能耗较大引起的能量黑洞问题,在不均匀分簇的基础上,从簇首选择和簇首更换两个方面提出相应的改进措施。在簇首选择时,将整个网络区域分为不均匀的簇,通过相关参数的设置,让每簇中能量最高的节点当选为簇首节点,网络运行时簇首维护本簇的能量信息表;在簇首更换时,采用局部更换测量,并由当前簇首在能量信息表中选择剩余能量最高的节点作为下一个簇首节点,从而改善了簇首能量效率和负载均衡。最后进行了仿真实验与对比,实验结果表明改进的路由协议能够有效提高网络性能,延长网络生命周期。

关键词:无线传感器网络;分簇路由;簇首;更换

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Routing algorithm for wireless sensor networks based on improved method of cluster heads selection

YAO Guangshun*, WEN Weiming, ZHANG Yongding, DONG Zaixiu, ZHAO Liang

(School of Computer and Information, Chuzhou University, Chuzhou Anhui 239000, China)

Abstract: In order to alleviate the energy hole in wireless sensor network caused by the energy overconsumption of cluster heads, an improved algorithm was put forward. And the algorithm makes improvement on the selection and replacement of cluster heads. During the cluster heads selection, the algorithm divided the network into unequal clusters and selected the nodes with the most residual energy as cluster heads. And the cluster heads recorded the change of nodes' energy. During the cluster heads replacement, the cluster heads adopted local replacement strategy and appointed the node with the most residual energy as the next cluster head. Therefore, the algorithm modified cluster heads' energy efficiency and balanced the energy consumption among cluster heads. Finally, a simulation experiment was carried out and the experimental results show that the improved algorithm can effectively improve network performance and prolong the network life cycle.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); clustering route; cluster head; replacing

0 引言

在无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)^[1-3]的诸多研究内容中,能量高效的路由技术是一个重要的研究热点。在分簇路由协议^[4-5]中,由于簇首除了承担本簇节点的数据收集与发送任务,还需要承担其他簇信息的中继任务,这必然导致簇首节点的能量消耗过快,而引起能量黑洞问题。目前,已有相关文献提出了相应的改进措施。

文献[6-9]针对簇首节点过早死亡引起的能量黑洞问题,从分簇结构上进行了改进。李成法等^[6]主要是根据候选簇首与Sink节点之间的距离,设置不同的候选簇首竞争半径,从而使得靠近Sink节点的簇较小,而远离Sink节点的簇较大。这样靠近Sink节点的簇中簇首用于本簇数据处理的能量较少,而为簇间数据的中继预留了能量。但其候选簇首的选择和低功耗自适应分层路由协议LEACH^[10]相同,由随机数决定,不能保证候选簇首的能量最优。吴小兵等^[7]考虑节点的不均匀分布来解决能量黑洞问题。曾志文等^[8]和Song等^[9]从簇能量消耗角度出发,给出了节点能耗计算公

式,并提出了调整节点发射功率,从而得到不同的簇,簇的分布和李成法的相同,且簇的划分过程过于复杂。

文献[11-16]针对簇首节点过早死亡引起的能量黑洞问题,从簇首选择与更换上进行改进。目前簇首的选择一般考虑以下几个方面的因素:1)节点的剩余能量^[11-13];2)簇首的位置分布^[12,14]和“临时簇”;3)簇内通信代价^[13]和簇首的冗余^[15-16]。LEACH协议^[10]完全由随机数选择簇首,使得簇首的选择并不合理;DCHS算法^[11](Deterministic Cluster-head Selection)在LEACH的随机数的基础上考虑了剩余能量因素;LEACH-C协议^[12](LEACH-Centralized)考虑了节点的地理位置和剩余能量信息,由Sink节点决定是否当选为簇首;HEED协议^[13](Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering)和文献[14]不仅考虑了节点的剩余能量,而且考虑了簇内通信代价,从而选择剩余能量多且簇内通信代价下的节点作为簇首。但这些算法在每轮循环时,均需要进行簇首的选择,增加了簇建立阶段的开销,且一般考虑的是节点的剩余能量与平均能量的关系,并不能保证下次当选的簇首的剩余能量最优。冯冬芹等^[15]、Yang等^[16]提出了冗余簇首的机制,以延长

收稿日期:2012-10-25;**修回日期:**2012-11-29。 **基金项目:**安徽省高等学校自然科学基金资助项目(KJ2013Z249);安徽省高等学校优秀青年人才基金资助项目(2009SQZR146);滁州学院科研项目(2011kj006B,2011kj007B,2011kj011B)。

作者简介:姚光顺(1982-),男,安徽肥东人,讲师,硕士研究生,CCF会员,主要研究方向:无线传感器网络的能量效率;温卫敏(1981-),女,安徽阜阳人,助理实验师,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络数据融合;张永定(1983-),男,甘肃陇西人,助教,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络路由协议;董再秀(1981-),女,安徽明光人,讲师,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络路由协议与能量效率;赵亮(1983-),男,安徽滁州人,助教,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络。

每轮运行的时间,从而减少簇首选择的次数来延长网络运行时间,但其簇首和冗余簇首的选择是同时的,在导致冗余簇首启用时,其能量可能已不适合承担簇首的任务。

本文在此基础上,针对 WSN 分簇协议中的簇首能耗过大引起的能量黑洞问题,从簇首选择和簇首更换两方面入手提出相应的改进措施。在簇首选择时,将整个网络区域分为不均匀的簇,并让每簇中能量最高的节点当选为簇首节点,同时簇首记录整个簇节点的能量变化情况;在簇首更换时,采用局部更换的策略,并同样选择剩余能量最高的节点作为下一个簇首节点,从而提高整个网络性能。

1 网络及能量模型

1.1 网络模型

对传感器网络模型做如下假设:

- 1) 网络节点数为 N , 每个传感器节点有唯一的身份标识 i , 节点周期性采集数据;
- 2) 传感器网络节点部署后不再移动, Sink 节点位于传感器节点部署区域之外,但 Sink 节点的信号不能覆盖整个传感器网络部署区域, Sink 节点发送的信号需要中继节点的中继,节点与 Sink 节点之间的距离最大值为 L ;
- 3) 节点的发射功率可控;
- 4) 所有传感器节点的初始能量相同,以 E_{orig} 表示,剩余能量以 E_{new} 表示。

1.2 能量模型

能耗模型采用文献[15]中的能耗模型,即发送数据和接受数据的无线通信模型分别为:

$$E_{\text{tr}} = \begin{cases} k \times E_{\text{elec}} + k \times \varepsilon_{\text{fs}} \times d^2, & d < d_0 \\ k \times E_{\text{elec}} + k \times \varepsilon_{\text{mf}} \times d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{\text{rs}} = k \times E_{\text{elec}} \quad (2)$$

其中: k 为发送的数据包的长度, E_{elec} 表示运行发送电路或接受电路时每 bit 数据所消耗的能量, ε_{fs} 和 ε_{mf} 是在射频放大器上每 bit 数据消耗的能量, d 为发送节点与接收节点之间的距离, $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{\text{fs}}/\varepsilon_{\text{mf}}}$ 为成员节点采集数据所消耗的能量及簇首节点融合数据所消耗的能量忽略不计。若用 d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的距离,如果节点 i 和节点 j 分别为成员节点和簇首节点,则发送一次信息的能量消耗分别为:

$$E_{\text{nor_Spent}} = k \times \begin{cases} E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} \times d_{ij}^2, & d_{ij} < d_0 \\ E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{mf}} \times d_{ij}^4, & d_{ij} \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{\text{CH_Spent1}} = k \times E_{\text{elec}} \quad (4)$$

若节点 i 和节点 j 分别均为簇首节点,且节点 i 承担其他簇的数据中继任务,即节点 i 将其收到的其他簇数据转发给节点 j ,那么节点 i 中继一次数据的能量消耗为:

$$E_{\text{CH_Spent2}} = E_{\text{rs}} + E_{\text{tr}} = k \times E_{\text{elec}} + k \times \begin{cases} E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} \times d_{ij}^2, & d_{ij} < d_0 \\ E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{mf}} \times d_{ij}^4, & d_{ij} \geq d_0 \end{cases} \quad (5)$$

2 基于最优簇首的分簇理由算法

2.1 基本思想

类似于 LEACH,本文算法采用“轮”机制运行,每轮分为簇建立阶段和稳定运行阶段,其中稳定运行阶段又分为数据传输阶段和簇首更换阶段。在簇建立阶段,主要完成簇的划分和簇首的选择。采用类似于文献[5]的方法,将整个传感器部署区域进行不均匀划分;之后由 Sink 节点发出簇首选择

信号,采用时序方式,让剩余能量高的节点当选为簇首节点,并建立整簇的能量信息表;在稳定运行阶段,首先采用多跳路由以完成数据传输,且针对节点的每一次操作,更新其剩余能量且簇首节点维护的节点能量表也做相应的更新;当簇首能量低于某一阈值时,进行簇首更换,由簇首节点指定剩余能量最高的成员节点当选为簇首,并相应地完成簇间路由的调整。

2.2 具体描述

2.2.1 几个概念

为了便于描述,对本文所涉及的几个概念描述如下:

1) 网络梯度。根据节点与 Sink 节点之间的距离,将节点划分为不同的层次,称为网络梯度。同一网络梯度内的节点的梯度值相同,记为 $\text{Gra}(i) = m$ 。其中: $1 \leq m \leq M$, M 为网络最大梯度值; $1 \leq i \leq N$, 为节点标识。

2) 梯度宽度。同一梯度值的节点区域宽度,记为 Wide_m , 且 $\text{Wide}_m = \frac{L}{M} \times (1 - \alpha \frac{M-m}{M-1})$, 其中 $0 \leq \alpha \leq 1$, 为宽度调节参数。在 α 确定的情况下, m 越小, 则该梯度的宽度越小; 在 m 确定的情况下, α 越小, 则该梯度的宽度越大。

3) 剩余能量级。节点剩余能量与初始能量的比 $E_{\text{ratio}}(i) = E_{\text{new}}(i)/E_{\text{orig}}(i)$, $E_{\text{ratio}}(i)$ 越大, 则其剩余能量越多。

4) 簇首竞争等待时间。节点 i 自收到 Sink 节点的簇首竞争通知信息后到本节点发出簇首节点竞争信息的等待时间, 记为 $T_{i_CompCH} = \beta/E_{\text{ratio}}$, 其中 $0 < \beta \leq 1$, 为调节参数。 T_{i_CompCH} 越小, 则其剩余能量越多。

2.2.2 簇建立阶段

在 WSN 分簇路由协议中,簇首是最为重要的节点。它不仅要收集、融合和发送本簇的数据,而且还要完成其他簇数据的中继任务,因此簇首节点的负担较重,尤其是靠近 Sink 节点的簇首。文献[6-7]通过理论分析和实践证明非均匀簇可以有效缓解能量空洞问题。本文在文献[6-7]基础上,形成本文的簇建立阶段的算法,具体见算法1。

算法1 簇划分及簇首选择算法。

- 1) 设节点 i ($1 \leq i \leq N$) 的网络梯度值 $\text{Gra}(i) = 0$, 已当选的簇首总数(含工作簇首与备用簇首) $k_i = 0$; 节点类型 $\text{Kind}_i = \text{normal}$;
- 2) Sink 节点发出 $\text{Partion_Cluster}()$ 信号;
- 3) 节点 i 接受 $\text{Partion_Cluster}()$ 信号后根据其接受信号强度值 RSSI_i 计算其与 Sink 节点之间的距离 l_i , 并根据 l_i 调整其信号发射功率;
- 4) 节点 i 根据梯度宽度的定义及 l_i 值, 得到网络梯度值 $\text{Gra}(i)$ 并更新;
- 5) 节点 i 根据根据其自身的剩余能量级, 计算出其本身的簇首竞争等待时间 T_{i_CompCH} ;
- 6) Sink 节点发出 $\text{CH_Select}()$ 信号, 以同步各节点时钟;
- 7) 节点 i 接受到 $\text{CH_Select}()$ 信号后, 启动自身的时钟模块, 计时 t_i , 并监听其他节点信号;
- 8) 对于节点 i 有:
- 9) If ($t_i < T_{i_CompCH}$)
- 10) If 收到节点 j 的簇首竞争信号 $\text{CH_Compete}(j, \text{Gra}(j), E_{\text{ratio}}(j))$;
- 11) If ($\text{Gra}(i) == \text{Gra}(j)$)
- 12) 保存节点 j 的 ID, 并根据 RSSI_j 值计算其与节点 j 之间的距离 L_j ;
- 13) End if

- 14) Else
- 15) 继续计时并监听
- 16) Endif
- 17) Endif
- 18) If($t_i == T_{i_CompCH}$)
- 19) 发出本节点的簇首竞争获胜信息 $CH_Compete(i, Gra(i), E_{ratio}(i))$;
- 20) 更新节点类型 $Kind_i = CH$;
- 21) End if

下面是对算法1的具体解释。整个网络的节点操作由 Sink 节点指挥。第1)行为网络节点初始化操作,主要是设置网络梯度值 $Gra(i)$ 和节点类型 $Kind_i$ 。第2)~4)行,各节点接收 Sink 节点发出的簇划分信号 $Partion_Cluster()$ 信号,并根据 $RSSI_i$ 值及网络梯度宽度的定义计算节点的 $Gra(i)$,并对其发射功率进行调整以节省能量。第5)行为各节点根据自身的剩余能量计算其簇首竞争等待时间 T_{i_CompCH} ,节点剩余能量越多的节点,其竞争等待的时间越短,从而在时间上为后面的簇首的选择提供了优先,便于选择剩余能量最大的节点当选为簇首。第9)~17)行为节点的簇首竞争等待时间 T_{i_CompCH} 没有到达处理的情况,如果节点在此过程中收到簇首竞争信号,则首先判断收到的信号是否来自与本梯度内,以保证簇首和簇成员节点来自与同一网络梯度,得到正确的簇划分;然后对接受的同一梯度的节点发出的簇首竞争信号进行处理,主要包括簇首节点基本信息的存储以及计算节点 i 与节点 j 之间的距离 L ;如果没有收到簇首竞争信息,则节点继续计时并监听网络中的其他信号。第18)~21)行为节点 i 没有收到其他节点的簇首竞争信息,且本节点的簇首竞争等待时间 T_{i_CompCH} 到达的处理过程,主要为发出簇首竞争获胜信号和节点类型的修改。

算法1将网络划分为大小不等的簇,且靠近 Sink 节点的簇较小,从而使得这些簇的簇首节点有更多的能量用于数据中继,与文献[6-7]的思想一致。另外,算法1在时序上让剩余能量较大的节点较早的发出簇首竞争信号,有效避免了其他算法中平均能量的计算,且能够保证簇首节点的能量最优。

2.2.3 稳定运行阶段

在 LEACH 协议中,为了能保证通信的效率及能量效率,要求稳定运行阶段时间要比簇建立阶段持续的时间要长。一些改进的协议^[15-16]中采用冗余簇首的方式来延长稳定运行阶段的时间,但簇首和冗余簇首的选择都是在簇建立阶段完成的,而没有考虑备用簇首的能量在运行阶段也会减少,从而引起备用簇首的启用时,它的剩余能量不能保证其担任簇首的工作。

本文稳定运行阶段路由在簇建立阶段的基础上,仍然采用多簇首更换的方式,但在每次簇首选择时只选择一个簇首,该簇首维护一张本簇成员的能量信息表。簇首工作时,根据其收到信号的信息,按照一定的规律动态修改该能量信息表,当簇首能量低于某一阈值时,由簇首从能量信息表中选择剩余能量最多的节点承担簇首的任务,并转交能量信息表,以此来保证簇首选择的合理性。本文路由的稳定运行阶段又分为数据传输阶段和簇首更换阶段。

在数据传输阶段,发送数据流程如图1所示,发送的信息包含要发送的数据、发送节点的 ID、发送节点的类型 $Kind_i$ 、梯度值 $Gra(i)$ 以及要发送对象的 ID,并相应的更新本节点的剩余能量级。若发送节点为普通节点,则发送的信息为 $Data(data, i, Kind_i, Gra(i), ID_{CH})$;若发送节点为簇首节点,则发送信息为 $Data(data, i, Kind_i, Gra(i), ID_{next_CH})$ 。簇首节点收到数据的处理流程如图2所示,由于成员节点只会在属于自己的时间片唤醒,所以收到信息的只能为簇首节点。如果簇首收到的是本簇成员节点的信息,则对收到的信号进行处理,更新自身的剩余能量,同时按照收到的信号强度,对应的修改能量信息表中的信息;如果收到的是前一簇簇首发送的信息,除了中继信息外,还相应地修改本地剩余能量级。

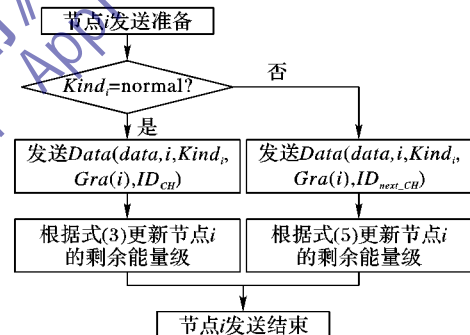


图1 节点数据传输阶段流程

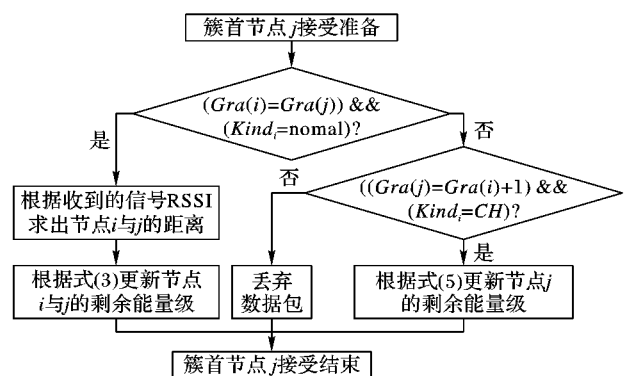


图2 节点收到数据处理流程

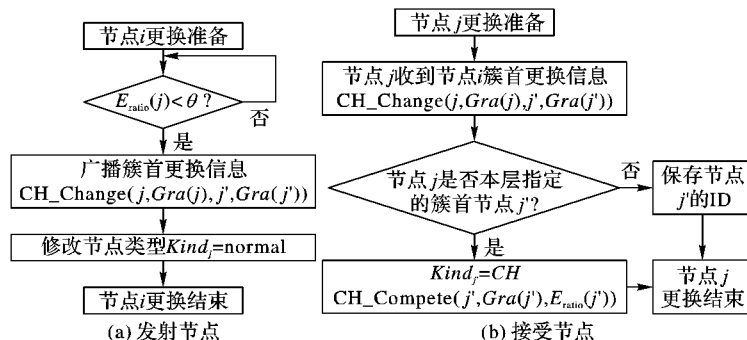


图3 簇首节点更换流程

在簇首更换阶段,当簇首能量低于某一阈值时,簇首更换的处理过程,主要包括:下一个簇首的选择、广播簇首更换信息 $CH_Change()$ 以及当前簇首类型的修改,如图 3(a) 所示;当节点收到 $CH_Change()$ 信号的处理过程如图 3(b) 所示,根据接受节点是否为下一簇首,分为两种情况处理。如果不是下一簇首,则保持下一簇首的 ID;如果为下一簇首,则修改接受节点的节点类型并广播 $CH_Compete()$ 信号。

3 实验仿真

利用 Matlab 作为仿真平台对算法的性能进行了评价,算法考虑节点发送数据和接收数据所消耗的能量,忽略节点融合数据所消耗的能量及可能发生的数据包丢失。首先,通过仿真探讨了本文算法中所涉及的一些参数(最大网络梯度值 M 和梯度宽度调节参数 α) 对网络性能的影响。然后比较了各种算法的网络生命周期。最后分析了算法的能量效率,分别编写了 LEACH、EEUC、文献[15]算法和本文算法(记作 BEN)等算法的 Matlab 程序,主要在簇首消耗能量和、簇首耗能方差和簇首平均剩余能量比等几个方面在相同条件下进行了比较。仿真所用参数如表 1 所示,其中,节点融合数据所消耗的能量忽略不计。在本实验中相关参数分别取 $M = 4, \alpha = 0.5$ 。

表 1 仿真实验参数

参数	取值
网络分布范围	(0,0)到(200,200)
Sink 节点位置	(250,250)
节点数	100
各节点初始能量	2 J
数据包长度	400 B
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/(bit · m ²)
ϵ_{mf}	0.0013 pJ/(bit · m ⁴)

3.1 网络存活周期对比

首先比较了 4 种算法的网络存活周期,其结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出本文算法要在网络存活周期上要优于 LEACH、文献[15]算法和 EEUC 算法。另外,还可以看出,本文算法与 EEUC 算法相比较,节点死亡所用时间(即全部节点死亡的时间与第一个死亡节点时间的差值)较短,这体现了网络节点的负载均衡要优于 LEACH 算法和文献[15]算法。

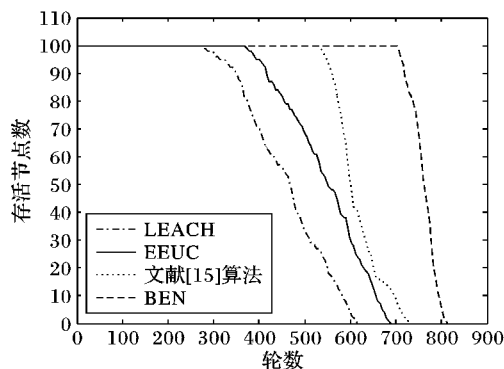


图 4 网络存活周期

3.2 簇首能量效率对比

在分簇路由中,簇首的性能对整个网络的性能有直接的影响,为了说明簇首的能量效率,将本文算法与 LEACH、EEUC 和文献[15]算法进行了比较。首先,为了研究网络的负载均衡情况,在 4 种协议中随机抽取 10 轮,对比其簇首能

耗方差,其结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出:本文算法和 EEUC 基本相同,且较为稳定,说明其较好地均衡了簇首的负载;LEACH 和文献[15]算法的方差较大,且有明显的波动,说明其均没有采取负载均衡策略。

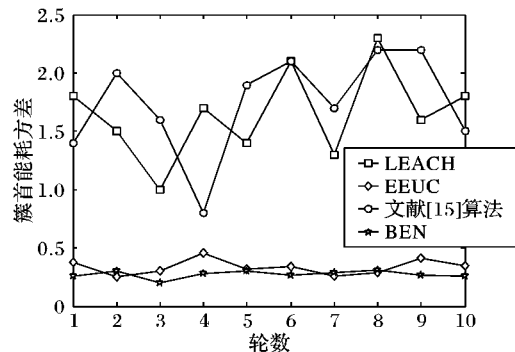


图 5 簇首消耗能量方差

然后,为了研究簇首的选择是否合适,对 4 种协议运行 100 轮后每隔 10 轮,对比其当选簇首的平均剩余能量比,其结果如图 6 所示。因为只有选择剩余能量较高的节点为簇首,尤其是节点剩余能量较少的情况下,才能有效延长网络生命周期。从图 6 中可以看出,本文算法所选择的簇首节点相比 LEACH、EEUC 和文献[15]算法,其簇首平均剩余能量较高,且波动较小,这不仅表明了本文算法中簇首节点的能耗较小,而且说明了本文算法能够始终选出剩余能量高的节点为簇首,从而有效提高网络性能。

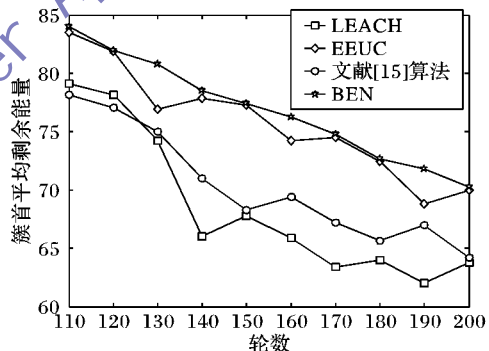


图 6 簇首平均剩余能量

4 结语

本文针对分簇路由算法中的簇首能耗较大引起的能量黑洞问题,在簇首选择与更换两个方面提出了相应的改进措施,其核心思想是在不均匀分簇的基础上,选择节点剩余能量最多的为簇首节点;在稳定运行阶段,由簇首维护整簇的能量信息表,使得簇首更换时,能量最高的节点能够当选为簇首节点。实验结果表明,本文算法能够有效改进网络性能,延长网络生命周期。

簇首间的距离对分簇网络的性能也有着较大的影响,本文下一步的工作将在本文基础上,进一步分析簇首距离对网络性能的影响。另外,机器人技术的发展使得传统上静止的传感器节点具备了移动的能力,移动传感器网络中的簇首优化选择和路由改进等也是本文下一步的工作。

参考文献:

- [1] AKYLDIZ I F, SU W, SANDARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey of routing protocols for wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325-349.

(下转第 915 页)

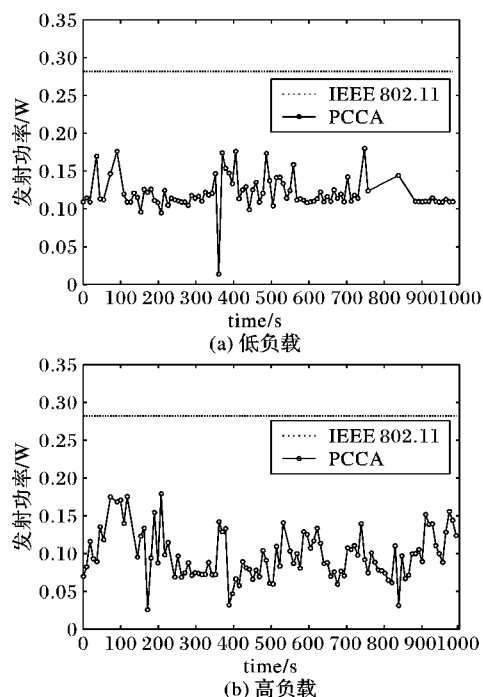


图5 两种协议数据发射功率对比

参考文献:

- [1] CHEN Y, ZHANG S Q, XU S G. Fundamental trade-offs on green wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49 (6): 30-37.
- [2] JUNG E S, VAIDYA N H. A power MAC control protocol for Ad Hoc networks [C]// MobiCom'02: Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2002: 36-47.
- [3] 李方敏, 刘新华, 徐文君. 无线传感器网络的链路稳定成簇与功率控制算法 [J]. 计算机学报, 2008, 31(6): 968-978.
- [4] 胡天喜, 唐孝遵, 焦秉立. 无线 Mesh 网中的 Quorum 节能机制 [J]. 中兴通讯技术, 2008, 4(2): 34-38.
- [5] BOGGIA G, CAMARDA P, FIUME O. CF-MAC and H-MAC protocols for energy saving in wireless Ad Hoc networks [C]// Vehicular Technology Conference 2005. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005, 4: 2560-2564.
- [6] CRUZ R L, SANTHANAM A V. Optimal routing link scheduling and power control in multi-hop wireless networks [C]// Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 702-711.
- [7] LIU J Y, ZHONG L. Micro power management of active 802.11 interfaces [C]// Proceeding of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2008: 146-159.
- [8] YANG S, CIUBOTARU B, MUNTEAN G M. A slow-start exponential and linear algorithm for energy saving in wireless networks [C]// 2011 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. [S. l.]: IEEE, 2011: 1-5.
- [9] CAI L X, LIU Y K, LUAN T H. Adaptive resource management in sustainable energy powered wireless mesh networks [C]// GLOBECOM'11: Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [10] GLADISCH A, DAHER B, LEHSTEN P. Context-aware energy management for energy-self-sufficient network nodes in wireless mesh networks [C]// Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 1-8.
- [11] 朱容波, 高波. Ad Hoc 网络中联合功率节省与功率控制的 MAC 协议 [J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(3): 564-573.
- [12] ZHU T, TOWSLEY D. E²R: Energy efficient routing for multi-hop green wireless networks [C]// IEEE INFOCOM 2011 Workshop on Computer Communications and Networking. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 265-270.
- [13] The network simulator: NS-2 [EB/OL]. [2009-06-17]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [3] AL-KARAKI J N, KAMAL A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6): 6-28.
- [4] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议 [J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588-1600.
- [5] ABBASI A A, YOUNIS M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2007, 30 (14): 2826-2841.
- [6] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议 [J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.
- [7] 吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题 [J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-260.
- [8] 曾志文, 陈志刚, 刘安丰. 无线传感器网络中基于可调发射功率的能量空洞避免 [J]. 计算机学报, 2010, 33(1): 12-22.
- [9] SONG C, LIU M, CAO J N. Maximizing network lifetime based on transmission range adjustment in wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2009, 32(11): 1316-1325.
- [10] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [11] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMAN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selections [C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks. Stockholm: IEEE Communications Society, 2002: 368-372.
- [12] HEINZELMAN W. Application-specific protocol architectures for wireless networks [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [13] YOUNIS O, FAHMY S. Heed: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad-Hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669.
- [14] 陈静, 张晓敏. 无线传感器网络簇头优化分簇算法及其性能仿真 [J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 2787-2788, 2792.
- [15] 冯冬芹, 李光辉, 全剑敏, 等. 基于簇头冗余的无线传感器网络可靠性研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(5): 849-854.
- [16] YANG M, WANG J P, GAO Z G, et al. Coordinated robust routing by dual cluster heads in layered wireless sensor networks [C]// Proceedings of 8th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 454-461.
- [17] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

(上接第 911 页)