

# 无线传感网中一种能量均衡的分簇路由算法

姜 参,王大伟

(渤海大学 管理学院,辽宁 锦州 121013)

**摘 要:**无线传感器网络的一个极富挑战性、极其关键的课题就是降低能源消耗以延长网络寿命。文中提出了一种能量均衡的分簇路由算法(CRA-EB)。算法分为三个阶段,即:簇头选择、聚的生成及数据传输。首先基于节点的剩余能量和邻居节点数目来选择簇头。然后每一个非簇头节点根据簇头代价值加入自身通信范围内的簇头。在数据传输阶段,CRA-EB首先在簇内使用单跳通信,然后在簇间使用多跳通信。对簇间通信,簇头以自身为起点对通往基站的各路径代价进行衡量,同时选择其他簇头作为中继节点在这些路径上转发数据。仿真实验结果表明,与LEACH和DEBR算法进行比较,CRA-EB算法在能耗和活跃节点数量方面的性能表现更加高效。

**关键词:**无线传感器网络;分簇;路由;数据传输;剩余能量;网络寿命

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)01-0113-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.01.029

## An Energy Balanced Clustering Routing Distributed Algorithm in Wireless Sensor Networks

JIANG Shen, WANG Da-wei

(School of Management, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

**Abstract:** One of the most challenging and critical problem in Wireless Sensor Networks (WSNs) is to reduce energy consumption to prolong network life. In this paper, propose an energy balanced clustering routing distributed algorithm. The algorithm comprises of three phases, namely cluster head selection, cluster setup and data routing. The CHs are selected in distributed manner based on residual energy and the neighbor cardinality. In the setup phase, each non-CH sensor node joins a CH within its communication range based on the cost value of the CHs. In data routing phase, CRA-EB first uses single hop communication within each cluster and then performs multi-hop communication between the clusters. For inter-cluster routing, a CH measures the cost of each path from itself towards base station while selecting other CH as a relay node for data forwarding on those paths. The simulation results show that, compared with the LEACH and DEBR algorithm, the CRA-EB algorithm is more effective in terms of energy consumption and the number of live sensor nodes.

**Key words:** wireless sensor networks; clustering; routing; data transmission; residual energy; lifetime of network

## 0 引 言

综合了无线通信技术、传感器技术、嵌入式计算技术和分布式信息处理技术的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN),是目前国际上前沿热点的研究领域<sup>[1]</sup>。一个无线传感器网络由随机或手动部署在覆盖区域的数百个微传感器节点组成。各传感器收集本地数据,处理数据,并把数据发给远程基站。基站与互联网连接,以便发布现象公告。传感器节点的电源有限且不可更换,因此在许多情况下,除非电源彻底耗尽,否则传感器节点无法更换。于是,如何降低传感器节点的能耗,以尽量延长网络寿命,是无线传感器领域

最关键的一项课题<sup>[2]</sup>。其中,高能效分簇和路由算法设计又是众多研究课题的重中之重。

在基于分簇的无线传感器网络<sup>[3-4]</sup>中,传感器节点被分为多个簇,每个簇有一个领导节点,称为簇头,如图1所示。簇头选择、簇的生成、路由选择必须要妥善进行,以平衡簇头能量消耗,延长网络寿命。文中提出了一种基于分簇的路由选择(CRA-EB)算法来解决这一问题。对所提算法进行仿真,并与LEACH<sup>[5]</sup>和DEBR<sup>[6]</sup>算法进行比较。结果表明,所提算法在能量消耗和活跃传感节点方面,性能优于以上两种算法。

收稿日期:2013-06-29

修回日期:2013-09-30

网络出版时间:2013-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273072)

作者简介:姜 参(1979-),男,硕士,讲师,研究方向为无线 Mesh 网、网络算法;王大伟,硕士,副教授,研究方向为网络与通信技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20131112.1627.007.html>

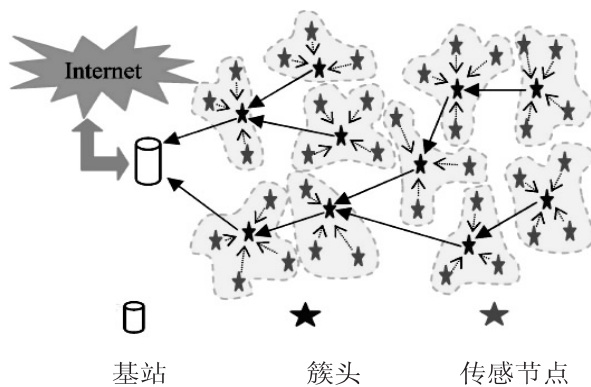


图 1 无线传感器网络模型

1 相关工作

基于分簇的路由问题是目前无线传感网中的研究热点<sup>[7-8]</sup>。其中,LEACH<sup>[5]</sup>就是一种常见的基于分簇的路由算法。然而,LEACH 算法的主要缺点就是,低能量传感节点有可能被选为簇头,并且簇头通过单跳通信将报文直接发往基站。因此,这一技术增加了簇头的能量消耗。包括 PEGASIS<sup>[9]</sup> 和 HEED<sup>[10]</sup> 在内的众多算法对 LEACH 算法进行了改进。与 LEACH 相比,PEGASIS 算法虽然延长了网络寿命,但数据延时太大,不适用于大规模网络。HEED 算法根据节点剩余能量和相邻节点距离或节点度来定期选择簇头。在 MRPUC<sup>[11]</sup> 算法中,作者提出了一种基于所有节点剩余能量和节点与基站距离的多跳路由和非均等分簇算法,以延长网络寿命。EEDUC<sup>[12]</sup> 是一种分布式分簇算法,对 EEUC<sup>[13]</sup> 改进后覆盖整个网络。EEDUC<sup>[12]</sup> 通过为各节点设置一个等待时间来形成分簇,等待时间是剩余能量和相邻节点数量的联合函数。对 MRPUC 和 EEDUC,如果用在大型网络,则各单个节点难以获得其他节点的全局信息。在文献[14]中,Li Qing 等为异构网络开发了称为 DEEC 的一种分布式高效分簇算法。然而,由于节点故障率较高,节点有时会重新部署,导致网络总能量确切信息难以获得。因此,DEEC 无法应用于恶劣环境中。DEBR<sup>[6]</sup> 是一种分布式能量平衡路由算法,该算法提出一个新的探索式指标来保证能量的充足性和高效性。该算法可能会选择与基站相反方向的节点作为下一跳节点,依此类推,导致数据传输时延较大。文献[15]也开发了其他分簇和路由算法。但是这些算法均没有将分簇和路由因素加在一起综合考虑。文中算法对这两因素做了综合考虑。此外,与文献[4,7-9]不同的是,文中方法不需节点装备 GPS 系统。

2 网络模型

文中假设的网络模型是各个传感器节点在覆盖区

域中随机部署。远离传感区域有一个基站或汇点。传感节点和基站在部署后,位置保持不动。所有节点为同构节点,即:节点数据处理、通信和广播功率级别等功能完全相同。初始时,所有节点能量相同。传感器节点可以通过功率控制,根据与接收器的距离来改变发射功率<sup>[5-6]</sup>。所有通信均为无线链路通信。只有两个节点均在对方范围内时,才在它们之间建立无线链路。同时假设无线链路为对称链路,于是,在已知发射功率的前提下,节点可以根据接收信号功率计算出离另一节点的距离<sup>[11]</sup>。相关术语和符号的含义如表 1 所示。

表 1 相关术语的含义

术语	含义
$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$	WSN 中的所有节点集合
$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots\}$	从普通节点中选出的簇头节点
$\text{Dist}(S_i, S_j)$	节点 $S_i$ 和节点 $S_j$ 间的距离
$\text{Com}(S_i)$	节点 $S_i$ 通信范围内的所有节点
$E_{\text{Residual}}(S_i)$	节点 $S_i$ 的剩余能量
$E_{\text{Transmit}}(S_i, S_r)$	节点 $S_i$ 向节点 $S_r$ 发送数据所需的能量
$\text{Neighbour}(S_i)$	节点 $S_i$ 通信范围内的所有邻居节点, 有 $\text{Neighbour}(S_i) = \{S_j \mid S_j \in \text{Com}(S_i) \wedge S_j \in \{S - S_i\}\}$

3 文中算法

整个算法分三个阶段:簇头选择;簇的形成;簇间的多跳通信。几轮过后就需要进行一次簇头选择和簇的生成。每轮又分为两个步骤:

(1)所有传感节点测量本地数据,并依托非持久载波侦听多路访问(CSMA) MAC 协议将数据传送给对应的簇头;

(2)所有簇头接收本地数据,并将本地数据融合,然后通过其他簇头以多跳通信形式将融合数据发往基站。

3.1 簇头的选择

为从普通传感节点中间选择合适的簇头,文中算法考虑本地网络结构及节点  $S_i (\forall i, 1 \leq i \leq n)$  的剩余能量,使用一个加权函数  $W(S_i)$ 。簇头比普通节点耗能多。因此,在构建加权函数时考虑了以下两个因素:

1)为了成为一个簇头,传感节点必须要有充足的剩余能量。因此,剩余能量越多,该节点成为簇头的概率越高。换句话说:

$$W(S_i) \propto E_{\text{Residual}}(S_i) \tag{1}$$

2)选为簇头的传感器节点必须要比普通节点执行更多轮任务,也就是说,被选节点的平均能量要比相邻节点高,即:

$$W(S_i) \propto \frac{E_{\text{Residual}}(S_i)}{\text{Neighbour}(S_i)} \quad (2)$$

综合考虑公式(1)和公式(2),有:

$$W(S_i) \propto E_{\text{Residual}}(S_i) \times \frac{E_{\text{Residual}}(S_i)}{\text{Neighbour}(S_i)}$$

$$\text{即有 } W(S_i) = K_1 \times E_{\text{Residual}}(S_i) \times \frac{E_{\text{Residual}}(S_i)}{\text{Neighbour}(S_i)}$$

其中,  $K_1$  是比例常数。不失一般性,假设  $K_1 = 1$ 。

因此

$$W(S_i) = E_{\text{Residual}}(S_i) \times \frac{E_{\text{Residual}}(S_i)}{\text{Neighbour}(S_i)} \quad (3)$$

节点的权重值如果比其他相邻节点高,则可以选择自己作为簇头。簇头选择的基本思路是:首先,各传感节点在其通信范围内使用 TDMA 调度表广播 HELLO 消息,因此不会有两则 HELLO 消息发生冲突。如果节点  $S_i$  收到节点  $S_j$  发来的 HELLO 消息,就会将  $S_j$  识别为自己的邻居。因此,各传感器节点计算接收到的 HELLO 消息数量来估算邻居数量。然后,所有节点根据式(3)计算自身权重值,并将权重值发给通信范围内的各个节点。如果  $S_i$  从邻居  $S_j$  处收到的权重值比自己大,则  $S_i$  放弃簇头选择竞争。如果某个节点收到的权重值都比自身小,该节点就将自己当作簇头,并使用非持久性 CSMA MAC 协议在通信范围内播放广告消息。

### 3.2 簇的生成

每个非簇头传感器根据其通信范围内的簇头代价选择簇头,选择过后,各非簇头节点通过非持久性 CSMA MAC 协议向所选簇头发送 JOIN\_REQ 消息。各分簇成员使用单跳方式与簇头通信。综上所述,节点  $S_i$  的簇头选择和簇的生成算法如下所示。

算法 1:成簇算法。

输入:剩余能量  $E_{\text{Residual}}(S_i)$

输出:  $S_i$  是簇头或分簇成员

Step1:  $S_i$  向通信范围内所有节点广播 HELLO 消息,并从通信范围内各节点接收 HELLO 消息。

Step2:  $S_i$  根据收到的 HELLO 消息数量来计算  $\text{Neighbour}(S_i)$ , 利用公式(3)计算  $W(S_i)$ 。

Step3:  $S_i$  发送  $W(S_i)$  广播消息,并接收  $W(S_j)$ ,  $\forall S_j \in \text{Neighbour}(S_i)$ 。

Step4: flag = 1。

Step5: While flag = 1 和  $S_i$  接收  $W(S_i)$  时, do

if  $W(S_j) > W(S_i)$ , 则  $S_i$  放弃簇头竞争;

flag = 0;

end if

end While

Step6: if flag = 1

则  $S_i$  宣布自己为簇头,并将该消息广播给所有相邻节点,  $S_i$  从相邻节点接收到它们的加入消息,最终形成簇 else

$S_i$  收到其他节点宣布成为簇头的广播消息

$S_i$  计算所有这些簇头的代价,加入代价最大的簇头

end if

Step7: 算法结束。

簇生成后,各簇头建立一个 TDMA 调度表,并将该表发送给成员节点。该表既可保证,节点与簇头通信期间,不会产生冲突,又可保证各非簇头节点在其他节点通信时隙关闭无线电组件,节约能源消耗。所有节点  $S_i$  ( $\forall i, 1 \leq i \leq n$ ) 同时运行该算法进行簇头选择。

### 3.3 基于簇的多跳路由

前节所述的簇形成完毕后,各传感节点测量本地数据,根据 TDMA 调度表将数据发给簇头。簇头收到各成员节点数据后,进行分布式数据融合,降低冗余和无关数据量。

簇头将融合后的数据直接发往基站,或通过其他簇头发往基站。簇头需要决定,周围簇头哪个最适宜作为基站通信中继节点,选择标准是保证传感网络能量平衡。

文中算法既考虑了节点可用能量,又考虑了数据通信所需能量。对两个因素综合考量后,得出能量平衡最优路径。

具体实现过程如下:

假设各簇头已知其通信范围内各簇头剩余能量及离基站的距离。为选出最优路径,文中方法计算出各路径的代价。路径代价的唯一作用就是表明该路径能够取得多大程度的网络能量平衡。假设簇头  $C_i$  通过中继节点  $C_r$  把融合数据发往基站,则路径总代价  $P\_Cost(C_i, C_r)$  为:

$$P\_Cost(C_i, C_r) = \frac{E_{\text{Residual}}(C_r)}{E_{\text{Transmit}}(C_r, \text{BS}) \times \{E_{\text{Transmit}}(C_r, \text{BS}) + E_R\}} \quad (4)$$

如果  $C_i$  直接把数据发往基站,则路径代价为:

$$P\_Cost(C_i, \text{BS}) = \frac{1}{E_{\text{Transmit}}(C_i, \text{BS})} \quad (5)$$

文中算法的基本思路是选择代价最大路径。若簇头把数据发往基站,则首先根据公式(4)、(5)的路径最大代价因素,从相邻节点中间选出一个候选节点。如果簇头自身为候选节点,则簇头自己把数据发往基站,否则,把数据转发给最佳候选节点。然后,所选最佳候选节点重复同样的路由选择过程,直到某个簇头选择自身作为候选节点把数据直接发往基站。簇头  $C_i$

的中继节点选择算法如下所示。

算法 2: 中继节点选择算法。

输入: 1)  $Neighbour(C_i)$  所有簇头剩余能量; 2)  $C_i$  与基站距离, 所有簇头与  $Neighbour(C_i)$  距离。

输出:  $C_i$  下一跳节点 (中继)。

Step1:  $Relay = BS$ ; /\* 初始化时, 中继节点就为基站 \*/

Step2:  $T = Neighbour(C_i)$

Step3: while ( $T \neq \Phi$ ) /\*  $\Phi = Null$  \*/

从  $T$  中选择一个  $C_r$ ;

if  $P\_Cost(C_i, C_r) > P\_Cost(C_i, Relay)$

then

$Relay = C_r$ ;

end if

$T = T - C_r$ ;

Step4: 算法结束。

4 仿真实验

为了测试文中算法的有效性, 对所提算法进行了全面仿真, 实验配置如下:

2012 版本 MATLAB, Intel Core 2 双核处理器, T9400 芯片组, 2.53 GHz CPU, 2 GB RAM, Windows Vista 平台。

各传感节点初始能量 2 J, 节点上各个单元的能耗情况如表 2 所示。能量为 0 后, 判定节点失活。文中仿真的能量模型和重要参数, 与文献[5]完全相同。为便于比较, 同时仿真 LEACH<sup>[5]</sup> 和 DEBR 算法<sup>[6]</sup>。

表 2 节点的能耗

参数	值
节点 $i$ 发送单位数据的能耗/(J/bit)	$50 \times 10^{-6}$
节点 $i$ 接收单位数据的能耗/(J/bit)	$50 \times 10^{-6}$
节点 $i$ 上微控制单元的能耗/(J/bit)	$5 \times 10^{-6}$
节点 $i$ 上中央处理器的计算能耗/(J/bit)	$50 \times 10^{-6}$
每个数据包的长度/bits	1 024
每个控制包的长度/bits	64

实验结果取 50 次仿真的平均值。

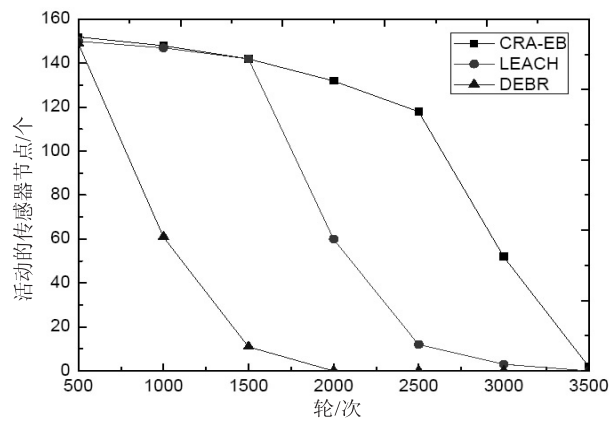
实验场景设为在 200 m×200 m 的区域内随机部署 150 个传感节点, 基站位置为 (175, 225)。图 2 给出了 150 个节点下不同算法的节点存活数目和能耗情况对比。

从图 2(a) 可以看出, DEBR 和 LEACH 算法在 1 600 轮和 2 700 轮后, 所有节点几乎全部死亡, 而 CRA-EB 算法则需要 3 300 轮。

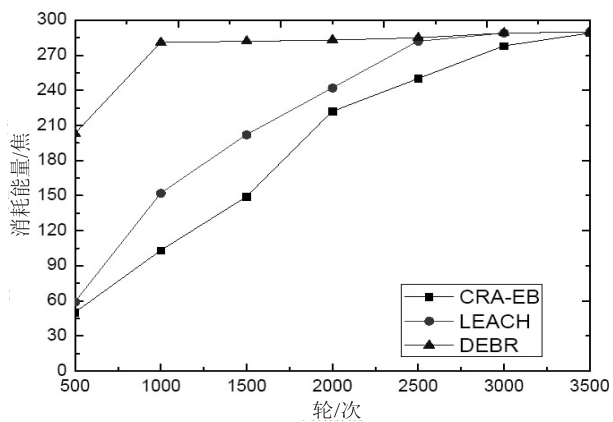
图 2(b) 可以看出, CRA-EB 的能耗远低于其他两种算法。

仔细分析其原因可知, 这主要是因为 CRA-EB 算

法基于剩余能量和相邻节点数量的加权函数来选择簇头, 并通过对各路径与基站的代价进行衡量来为簇头选择最佳的相邻中继节点, 从而节省了节点的能量, 使得更多的节点得以存活下来。



(a) 150 个节点下的活跃节点数目比较

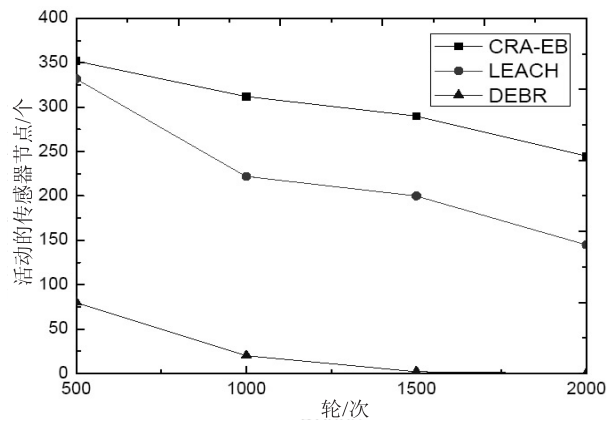


(b) 150 个节点下的能耗比较

图 2 LEACH, DEBR 和 CRA-EB 算法在活跃节点数目和能量消耗方面的性能比较 (共 150 个节点)

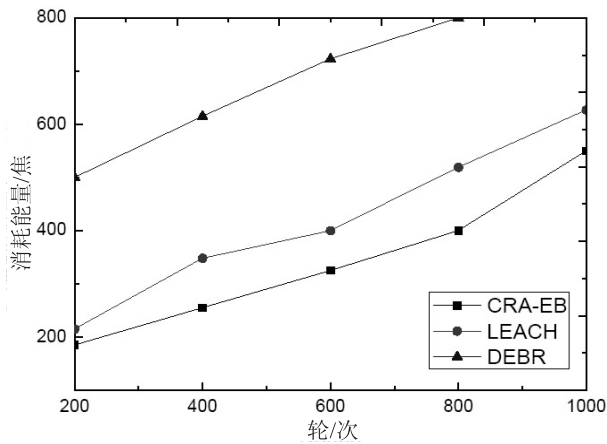
为了进一步体现文中方法的优越性, 文中在节点更为密集部署的传感器网络中进行实验: 设置 500 个传感节点随机部署在 300×300 m 的区域里, 基站位置为 (275, 325)。

从图 3 中可以看到, CRA-EB 算法的节点存活数



(a) 500 个节点下的活跃节点数目比较





(b) 500 个节点下的能耗比较

图 3 LEACH, DEBR 和 CRA-EB 算法在活跃节点数目和能量消耗方面的性能比较 (共 500 个节点)

量要远远高于 LEACH 和 DEBR,而消耗的能量要远远低于 LEACH 和 DEBR。

当节点数目为 1 000 时,相比于 LEACH 和 DEBR, CRA-EB 的节点存活数量和能耗分别节省了约 13% 和 33%。

这表明在大规模网络下,CRA-EB 的性能更为优越。

5 结束语

文中提出了一种基于代价的能量均衡聚类 and 路由选择技术。根据节点剩余能量和相邻节点数目,从普通节点中选择簇头。所有非簇头节点根据簇头代价从其通信范围内选择一个簇头。所有节点使用单跳方式与簇头通信,所有簇头使用多跳方式将汇总数据发往基站。

在路由选择时,也衡量了通往基站路径的代价,以选出最能平衡簇头能量的路径。

实验结果表明,文中算法在能量消耗和活跃节点数量方面,性能均优于 LEACH 和 DEBR 算法。

下一步研究工作的重点在于:

- 1) 基于压缩感知理论研究无线传感器网络中的异常事件检测问题;
- 2) 研究机会移动无线传感器网络中的数据可靠收集问题。

参考文献:

[1] 朱永利,于永华,李丽芬. 数据收集传感器网络的多模层次

网络构建[J]. 计算机工程,2011,37(2):111-113.

[2] 杨  靖,徐  迈,赵  伟,等. 传感器网络中一种能量高效的数据收集算法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(3): 650-653.

[3] Kuila P, Jana P K. Improved load balanced clustering algorithm for wireless sensor networks [M]//Advanced computing, networking and security. Berlin: Springer, 2012: 399-404.

[4] Gupta G, Younis M. Load-balanced clustering of wireless sensor networks[C]//Proc of ICC. [s. l. ]:[s. n. ],2003:1848-1852.

[5] 李  悦,孙力娟,王汝传,等. 一种改进的无线传感器网络 LEACH 算法[J]. 计算机研究与发展,2011,48(Sup):131-134.

[6] Ok C S, Lee S, Mitra P, et al. Distributed energy balanced routing for wireless sensor networks[J]. Computers & industrial engineering,2009,57(1):125-135.

[7] Abbasi A A, Younis M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks [J]. Computer communications, 2007,30(14):2826-2841.

[8] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. Ad hoc networks,2005,3(3):325-349.

[9] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS:Power-efficient gathering in sensor information systems[C]//Proc of IEEE aerospace conference. Montana:[s. n. ],2002:1125-1130.

[10] 李  晶,史杏荣. 无线传感器网络中改进的 HeeD 路由协议 [J]. 计算机工程与应用,2007,43(25):165-167.

[11] Gong B, Li L, Wang S, et al. Multihop routing protocol with unequal clustering for wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE computing, communication, control, and management. Guangzhou, China:[s. n. ],2008:552-556.

[12] Li C, Ye M, Chen G, et al. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE international conference on mobile Ad hoc and sensor systems conference. Macau, China:[s. n. ],2009:8-15.

[13] Qing L, Zhu Q, Wang M. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer communications,2009,29(12):2230-2237.

[14] 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.

[15] 李超良,胡春华. 无线传感器网络中面向动态多跳的非均匀分簇路由[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(7):2048-2053.

无线传感网中一种能量均衡的分簇路由算法

作者：[姜参](#)，[王大伟](#)，[JIANG Shen](#)，[WANG Da-wei](#)  
作者单位：[渤海大学 管理学院, 辽宁 锦州, 121013](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(1)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201401029.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201401029.aspx)