

# 无线传感器网络能量异构非均匀分簇路由协议

许毅<sup>1</sup>, 高玉<sup>1,2</sup>, 刘有源<sup>3</sup>

XU Yi<sup>1</sup>, GAO Yu<sup>1,2</sup>, LIU You-yuan<sup>3</sup>

1. 武汉理工大学 计算机科学与技术学院, 武汉 430063

2. 中国人民解放军 93534 部队

3. 武汉理工大学 物流工程学院, 武汉 430063

1. College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2. Unit 93534 of the Chinese People's Liberation Army, China

3. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

E-mail: xuyi@whut.edu.cn

XU Yi, GAO Yu, LIU You-yuan. Energy heterogeneous unequal clustering protocol for wireless sensor networks. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(16): 91-93.

**Abstract:** A cluster-based routing protocol for wireless sensor networks with multi-hop routing method transmits data to the base station, easily close to the base station nodes forwarding a large number of data are premature failure. In addition, clustering protocol usually assumes that the network node is the energy isomorphism, is can not effectively solve the energy problem of heterogeneous nodes. As a result, the article from the unequal clustering point of view, combined with local cluster head competition mechanism, presents an Energy-based Heterogeneous Clustering protocol (EHUC). The network simulation results show that the protocol can be effectively used in heterogeneous network and prolong the network life cycle.

**Key words:** wireless sensor networks; energy heterogeneous; unequal clustering

**摘要:** 基于分簇的无线传感器网络路由协议, 采用多跳路由方式传输数据至基站, 容易造成靠近基站的节点转发大量数据而过早失效。另外, 分簇协议通常假定网络节点是能量同构的, 不能有效解决节点能量异构的问题。因此, 从非均匀分簇的角度出发, 结合局部竞争簇首机制, 提出了一种基于能量异构的分簇协议 (EHUC)。仿真结果表明该协议能够有效应用于能量异构的无线传感器网络, 并延长网络的生命周期。

**关键词:** 无线传感器网络; 能量异构; 非均匀分簇

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.16.026 文章编号: 1002-8331(2010)16-0091-03 文献标识码: A 中图分类号: TP393

## 1 引言

无线传感器网络是一种新型的自组织网络, 不需要固定的网络支持, 具有快速展开、抗毁性强等特点, 可广泛应用于军事侦察、环境监测、医疗监护、农业养殖和其他商业领域, 以及空间探索和抗灾抢险等特殊领域。在影响无线传感器网络生命周期的众多因素中, 节点的能量最为重要, 这是由于传感器节点一般由电池供电, 能量有限且不可补充。因此能量有效性是无线传感器网络路由算法设计中优先考虑的要素。

分簇算法是无线传感器网络路由协议研究的主要方向之一, 与平面路由算法相比具有更好的能量有效性及可扩展性。LEACH<sup>[1]</sup>是人们最早提出的分簇算法。该算法在每轮数据收集周期开始时, 随机选出一小部分节点成为簇首。在数据传输阶段, 簇首将收到的成员节点采集的数据融合后, 以单跳通信的方式传输到基站。然而对于距基站远的簇首, 单跳通信会使其

消耗过多能量用于远距离传输数据, 能量有效性不高。研究表明在簇首与基站通信时采取多跳的方式更有助于节约能量<sup>[2]</sup>, 但是易使靠近基站的节点转发大量数据而过早死亡 (即网络“热点”问题)。Soro 等人研究了“热点”问题, 设计出一种非均匀的分簇模型 UCS<sup>[3]</sup>。文献[4]针对“热点”问题提出一种非均匀分簇算法 EEUC, 算法依据节点距基站的远近构造大小不等的簇, 离基站越近, 簇成员越少, 从而节约簇内能量开销以供数据转发使用。然而 EEUC 算法以节点的剩余能量为依据竞争簇首, 只可用于能量异构程度不大的网络, 对于能量异构程度较高的网络则不适用。

因此文章提出一种路由协议 EHUC (Energy Heterogeneous-based Unequal Clustering), 在非均匀分簇的同时优化了成簇算法, 提高了对低能量节点的保护, 可有效应用于能量异构的网络, 降低网络能耗并延长网络的生命周期。

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60672137)。

作者简介: 许毅 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 计算机网络应用技术; 高玉 (1980-), 男, 硕士生, 主要研究方向: 无线传感器网络与路由协议; 刘有源 (1955-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 机电系统智能设计与计算机仿真、自动识别与无线数据采集。

收稿日期: 2008-12-24 修回日期: 2009-03-02

## 2 网络模型

网络由  $N$  个随机部署的传感器节点组成,具有如下性质:

(1)传感器网络为高密度静态网络,基站部署在方形观测区域  $A$  的外侧,传感器节点和基站部署后均不再发生位置移动,且基站唯一。

(2)节点具备数据融合功能,每个节点都有一个唯一的标识(ID)。

(3)节点能量异构且不能补充。

(4)若已知发射功率,节点可以根据接收信号的强度计算出发送方距自己的近似距离。

(5)节点可以根据它与接收方的距离自由调整发射功率。

(6)网络中节点通信基于 Heinzelman 等人提出的无线通信模型<sup>[9]</sup>。

该模型中,节点在距离  $d$  上传输  $l$  比特数据时,发射能耗为:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + \varepsilon_f d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + \varepsilon_{mp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $E_{elec}$  表示发射电路的能耗。若传输距离小于阈值  $d_0$ , 功率放大损耗采用自由空间模型; 当传输距离大于等于阈值  $d_0$  时, 采用多路径衰减模型。 $\varepsilon_f$ 、 $\varepsilon_{mp}$  分别为这两种模型中功率放大所需的能量。

节点接收  $l$  比特数据的能耗为:

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

将  $k$  个长度为  $l$  比特的数据包融合的能耗为:

$$E_F(l, k) = lkE_{DF} \quad (3)$$

其中,  $E_{DF}$  为融合单位比特数据所需的能量。

由于网络模型为高密度网络,假设邻近节点采集的数据冗余度较高,簇首可以将成员节点采集的数据融合成一个固定长度的数据包,然后再发送给基站。

## 3 EHUC 协议

EHUC 协议按轮运行,每轮分为成簇阶段和数据传输阶段。在成簇阶段首先将所有节点组织成簇,然后构造路由树,在数据传输阶段把网络采集的数据融合后传递到基站。为了降低控制开销,每轮要连续采集若干次数据后才转入下一轮。

### 3.1 成簇算法

EHUC 协议的成簇算法为分布式竞争算法,簇首的选择以节点及其邻居节点的剩余能量为主要依据。为计算邻居节点的平均能量,每个节点需保存一张邻居表以存储邻居节点的相关信息,如表 1 所示。

表 1 节点的邻居表内容

ID	state	剩余能量	距该节点距离
1	unclustered	1.2	11
2	head	1.9	22
3	clustered	0.8	21
...	...	...	...

算法开始时,基站先以给定的功率向全网发送广播信号  $BS\_ADV$ ,节点根据接收到的信号强度计算出它到基站的距离  $d_{i-Bs}$ ,由该距离值得到自己的竞争半径  $R_i$ ,计算如下:

$$R_i = \left( 1 - c \cdot \frac{d_{max} - d_{i-Bs}}{d_{max} - d_{min}} \right) R_c \quad (4)$$

其中,  $c$  为控制取值范围的参数,依网络规模在  $[0, 1]$  内取值,其值确定后固定不变。 $d_{max}$  和  $d_{min}$  代表节点到基站的距离的最大值和最小值,  $R_c$  代表节点的最大竞争半径。

每个节点将竞争半径内的区域作为自己的竞争区域,将竞争区域内的所有其他节点看做是自己的邻居。节点以半径  $R_i$  广播消息  $E\_MSG(ID, E_{residual})$ ,并根据邻居节点发送的  $E\_MSG$  消息更新邻居表,再由式(5)得到其开始簇首竞争的時刻  $t_c$ 。

$$t_c = \mu T \frac{\bar{E}}{E_{residual}} \quad (5)$$

其中,  $\mu$  为分布在  $[0.9, 1]$  的随机实数,  $T$  代表事先规定的簇首竞争持续时间,  $\bar{E}$  代表邻居节点的平均剩余能量,  $E_{residual}$  代表节点的剩余能量。

若节点在竞争时刻到来之前已经收到邻居节点的簇首申明消息  $HEAD\_MSG(ID)$ ,则退出竞争并加入以邻居节点为簇首的簇。否则,节点统计邻居节点中已加入簇的节点数并与阈值  $k(t)$  进行比较。当节点数小于阈值  $k(t)$  时,节点广播簇首申明消息宣布竞争成功。

阈值  $k(t)$  的计算公式如下:

$$k(t) = m(1 - e^{-\frac{2t}{3T}}) \quad (6)$$

其中,  $t$  代表当前时间,  $m$  代表全部邻居节点数。

簇首竞争结束后,邻居节点中有多个簇首的节点加入距自己最近的簇以减少通信干扰,未加入簇的节点发送消息  $J\_JOIN\_MSG(ID, JumpID)$  至剩余能量最大的邻居节点,通过该邻居节点成为其他簇的多跳成员。

EHUC 协议的成簇算法流程如下:

```

mystate ← unclustered
broadcast E_MSG(ID, E_residual)
receive E_MSG from s_j
if (d(s_i, s_j) < R_i)
Add s_j to neighborhood table NT[i]
update NT[i]
end if
if (Time > T)
if (mystate = clustered && number(NT[i].state = head) ≥ 2)
send JOIN_MSG(myID, headID) to the nearest cluster head
end if
if (mystate = unclustered)
send J_JOIN_MSG(myID, jumpID) to NT[i] which residual
energy is max
end if
else if (mystate = clustered)
if (a HEAD_MSG is overheard from a neighbor NT[i])
NT[i].state ← head
end if
else
while mystate = unclustered do
if (Time > t_c && k(Time) > number(NT[i].state = clustered))
mystate ← head
broadcast HEAD_MSG(myID)
else if (a HEAD_MSG is overheard from a neighbor NT[i])
NT[i].state ← head
mystate ← clustered

```

```

broadcast JOIN_MSG(myID,headID)
else if(a JOIN_MSG is overheard from a neighbor NT[i])
    NT[i].state←clustered
end if
end while
end if

```

### 3.2 路由树构造

由公式(1)可知,节点的传输能耗随传输距离的增加显著增大。为降低传输能耗,EHUC 协议不仅采用基于树结构的多跳路由方式,而且在选择路由候选节点时选择距离自己较近的节点。因此,在簇生成后,每个簇首向全网广播消息 RELAY\_MSG( $ID, E_{residual}, d_{i-BS}$ ),根据其他簇首发送的消息强度计算得到距其他簇首的距离,依据距离值选择路由候选节点。这里引入一个阈值  $D_{BS}$ ,若簇首节点  $s_i$  到基站的距离大于  $D_{BS}$ ,则路由候选节点集合为  $S_{CH}(i)=\{s_j | d_{j-BS} \leq d_{i-BS} \text{ 且 } d_{i-j} \leq kR_i\}$ ,其中  $k$  是使得  $s_j$  存在的最小整数;否则路由候选节点集合为  $S_{CH}(i)=\{s_j | d_{j-BS} \leq d_{i-BS} \text{ 且 } d_{i-j} \leq R_i\}$ ,当且仅当集合为空集(即没有可用于数据中继的路由候选节点)时, $s_i$  将数据直接传至基站。

为了均衡网络能耗,避免节点由于能量消耗过多导致提前死亡,簇首节点应当在路由候选节点中选择剩余能量较多的节点作为其中继节点。然而网络能耗还与中继节点的位置有关,仅考虑剩余能量选择中继节点往往会造成网络能耗增大,因此选择中继节点时还需考虑节点位置。

假设通信采用公式(1)中的自由空间模型,中继节点  $s_j$  直接与基站通信,则  $s_i$  通过  $s_j$  传输  $l$  比特数据至基站时,节点  $s_i$  和  $s_j$  的总能耗为:

$$E_{i-j} + E_{j-BS} = E_{Tx}(l, d_{i-j}) + E_{Rx}(l) + E_{Tx}(l, d_{j-BS}) = l(E_{elec} + \varepsilon_f d_{i-j}^2) + lE_{elec} + l(E_{elec} + \varepsilon_f d_{j-BS}^2) = 3lE_{elec} + l\varepsilon_f (d_{i-j}^2 + d_{j-BS}^2)$$

可以看出,  $d_{i-j}^2 + d_{j-BS}^2$  越小则传输总能耗越小。因此为减小网络能耗,EHUC 协议的路由树构造策略为:节点有多个路由候选节点时,从剩余能量最大的两个节点中选择  $d_{i-j}^2 + d_{j-BS}^2$  最小的节点作为中继节点。

### 3.3 复杂度分析

性质 1 整个网络的控制消息复杂度为  $O(N)$ 。

证明 协议开始时,每个节点广播一条 E\_MSG 消息。簇生成过程中,每个簇首广播一条 HEAD\_MSG 消息,每个单跳簇成员最多广播两条 JOIN\_MSG 消息,每个多跳簇成员广播一条 J\_JOIN\_MSG 消息。假设网络节点数为  $N$ ,生成簇首数为  $X$ ,单跳簇成员数为  $Y$ ,则多跳簇成员数为  $N-X-Y$ 。在路由树构造过程中,每个簇首广播一条 RELAY\_MSG 消息。因此网络中总的控制消息开销为:

$$N+X+2Y+N-X-Y+X=2N+X+Y$$

所以整个网络的控制消息复杂度为  $O(N)$ 。

性质 2 整个网络中,节点的存储开销为  $O(N)$ 。

证明 协议中节点存储开销在于每个节点保存所有邻居节点的信息以及簇首节点保存路由路径里中继簇首节点的信息。网络模型为高密度静态网络,节点随机分布在整个监测区域  $A$

内,由此可知节点  $s_i$  的邻居数量期望为  $N \frac{\pi R_i^2}{\|A\|}$ ,其中  $\|A\|$

为网络监测区域的面积。同样设协议生成  $X$  个簇,则每个簇首的邻居首数量期望最大为  $X \frac{\pi(kR_i)^2}{\|A\|}$ 。网络中任一节点的存储复杂度最大为:

$$N \frac{\pi R_i^2}{\|A\|} + X \frac{\pi(kR_i)^2}{\|A\|}$$

所以节点的存储开销为  $O(N)$ 。

## 4 仿真结果

用网络仿真工具 OPNET 对 LEACH<sup>[1]</sup>、EEUC<sup>[4]</sup>和 EHUC 进行仿真分析比较。假设采用理想的 MAC 协议,忽略无线链路中可能发生的丢包、碰撞错误,仿真实验参数如表 2 所示。实验结果中,图 1 为网络能耗随协议运行时间的变化情况,图 2 为存活节点数随协议运行时间的变化情况。

表 2 仿真参数

参数	取值	参数	取值
节点数	400	$d_0$	87 m
区域面积	200 m×200 m	$E_{DF}$	5 nJ/(bit·signal)
基站坐标	(100,250)	数据包大小	4 000 Byte
节点初始能量	0.5~2 J	广播包大小	25 Byte
$E_{elec}$	50 nJ/bit	包头大小	25 Byte
$\varepsilon_f$	10 pJ/(bit·m <sup>2</sup> )	采样周期	10 s
$\varepsilon_{sp}$	0.013 pJ/(bit·m <sup>4</sup> )		

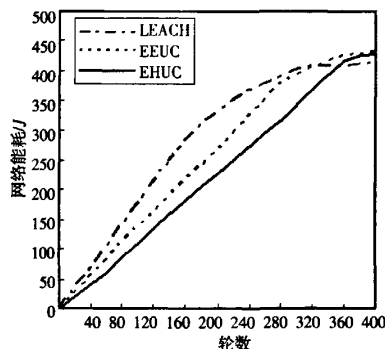


图 1 网络能耗

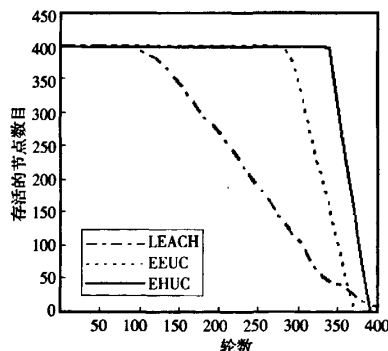


图 2 存活节点数量

由图 1 可以看出,EEUC 和 EHUC 的网络能耗都低于 LEACH,这是因为 LEACH 采用单跳通信方式,使得簇首与基站之间的远距离无线通信消耗了大量能量。EEUC 和 EHUC 都采用多跳通信来克服 LEACH 的不足,降低了网络能耗。EHUC

(下转 184 页)

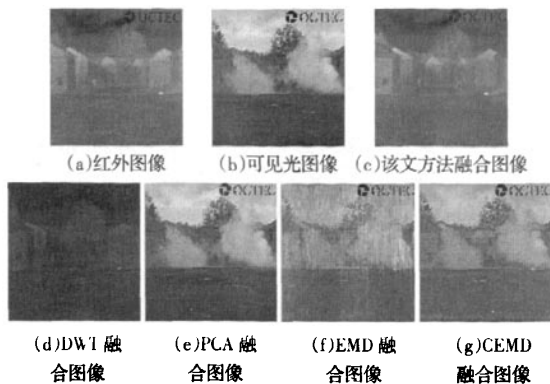


图1 源图像和各融合图像

用 BEMD 分解时,极值的选取是在 8-连接邻域范围内,这样不但很好地避免了边缘效应的出现,还很好地保留了图像的局部显著特征。用 BEMD 进行图像分解,是完全由图像本身的数据来驱动的,不像小波变换,是将数据投影在事先选定的基上,因此这种方法是完全适应性的,由于进行计算的都是图像的原始数据,融合图像的色彩信息丰富,具有与可见光图像相似的自然色彩。

## 5 结语

EMD 是一种完全由数据驱动的时频分析技术,进行二维扩展后用于图像融合,这是一种新的图像融合方法,融合后的图像保留了更多的红外图像的细节,且具有类似于可见光图像的自然色彩。但此方法运算量大,因此,以后的工作重点是解决其计算量大的问题。

(上接 93 页)

的网络能耗最低,说明 EHUC 的成簇算法能够更好地均衡节点之间的能量消耗,从而延长网络的寿命。

由图 2 可以看出,LEACH 的节点死亡时间远早于其他两种协议,这是由于 LEACH 依概率随机选择簇首,而完全没有考虑网络能量异构的情况。EHUC 的节点死亡时间最晚,这是因为 EHUC 同时考虑到节点自身以及邻居节点的剩余能量,提高了对低能量节点的保护,因此能够很好地处理能量异构情况。通常以网络首个节点死亡时间来评价协议性能,LEACH 的第一个节点死亡的时间为第 92 轮,EEUC 为第 282 轮,EHUC 为第 338 轮,可知 EHUC 的性能是 LEACH 的 3.67 倍,是 EEUC 的 1.2 倍。

## 5 结论

提出一种基于能量异构的非均匀分簇协议,综合考虑节点能量异构和网络“热点”问题,将非均匀分簇与分布式竞争相结合,先构造大小不等的簇来均衡簇首负载,再采用局部竞争提高节点能量效率,从而降低网络能耗。仿真表明 EHUC 协议能有效应用于能量异构的网络,并在网络的能耗和生命周期方面均优于 LEACH 和 EEUC。

## 参考文献:

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc R Soc London A, 1998, 454: 903-995.
- [2] Hariharan H, Gribok A, Abidi M, et al. Image fusion and enhancement via empirical mode decomposition[J]. Journal of Pattern Recognition Research, 2006, 1(1): 16-32.
- [3] 王坚, 张继贤, 刘正军, 等. 基于经验模态分解的高分辨率影像融合[J]. 遥感学报, 2007, 11(1): 55-61.
- [4] Tanaka T, Mandic D P. Complex empirical mode decomposition[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(2): 101-104.
- [5] Bin Altaf U M, Gautama T, Tanaka T, et al. Rotation invariant complex empirical mode decomposition[C]//Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2007, 3: 1009-1012.
- [6] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P, et al. Bivariate empirical mode decomposition[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14: 936-939.
- [7] Nunes J C, Bouaoune Y, Delecche E, et al. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21: 1019-1026.
- [8] Looney D, Mandic D P. Fusion of visual and thermal images using complex extensions of EMD[C]//Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras, ICDSC 2008, 7-11 Sept, 2008: 1-8.
- [9] 徐冠雷, 王孝通, 徐晓刚, 等. 基于限邻域经验模式分解的多波段图像融合[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(3): 225-228.
- [10] 徐冠雷, 王孝通, 徐晓刚, 等. 基于限邻域 EMD 的图像增强[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1635-1639.

## 参考文献:

- [1] Heizelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proc of 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, 2000: 1-10.
- [2] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45-63.
- [3] Soro S, Heizelman W B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[C]//Proc of the 19th IEEE Int'l on Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society Press, 2005: 236-240.
- [4] 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.
- [5] Heizelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] Chan H, Perrig A. ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation[C]//LNCS 2920: Proc of the 1st European Workshop on Sensor Networks (EWSN). Berlin: Springer-Verlag, 2004: 154-171.
- [7] 刘明, 曹建衣, 陈贵海, 等. EADEEG: 能量感知的无线传感器网络数据收集协议[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1092-1109.