

# 能量异构传感器网络中的分布式数据收集算法<sup>①</sup>

袁辉勇<sup>1</sup>, 羊四清<sup>1,2</sup>, 易叶青<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(湖南人文科技学院 计算机科学技术系, 娄底 417000)

<sup>2</sup>(湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410082)

**摘要:** 针对无线传感器网络分簇过程中簇头耗能过快问题, 提出了一种综合节点剩余能量和节点位置进簇头选取的分布式数据收集算法。在每轮的簇头选取中, 算法考虑了簇内节点的剩余能量和所有节点的平均剩余能量, 并依据节点的位置优化簇头的选择。算法在保证网络最优簇头个数的同时, 避免了能量较低的节点当选为簇头。仿真结果表明, 本算法与 LEACH 和 HEED 相比, 均衡了网络中节点的能量消耗, 有效延长了网络的生命周期。

**关键词:** 无线传感器网络; 能量异构; 剩余能量; 网络生命周期

## Distributed Data Gathering Algorithm for Energy Heterogeneous Sensor Networks

YUAN Hui-Yong<sup>1</sup>, YANG Si-Qing<sup>1,2</sup>, YI Ye-Qing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Computer Science, Hunan Institute of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China)

<sup>2</sup>(College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In clustering algorithm of wireless sensor networks, to solve the problem of excessive energy consumption in the cluster heads, an residual energy and node position synthesized distributed data gathering algorithm is proposed in this paper. In cluster heads election phase of every round, it considers the residual energy and the average energy of all the nodes in each cluster, an optimal cluster head is elected in each cluster according to node position. In algorithm running phase the optimum cluster heads of the network is guaranteed, in the mean time, it is avoided to select the node with low energy as cluster head. Simulation results show that in comparison with LEACH and HEED, the node energy consumption is balanced and the network lifetime is efficiently prolonged in our algorithm.

**Key words:** wireless sensor network; energy heterogeneous; residual energy; network lifetime

## 1 引言

无线传感器网络是由大量的廉价微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成的一个自组织的网络系统。该网络系统中节点众多, 每个节点采用能量有限的电池供电, 能量不能补充。因此, 降低无线传感器网络节点的能耗, 延长网络的生命周期是无线传感器网络研究的重要内容<sup>[1]</sup>。

能量异构无线传感器网络是节点能量在一定范围内随机分布的传感器网络。节点的初始能量不相同, 或者传感器网络在演化过程中能量消耗不均衡, 或者为了延长网络的生命周期, 在网络中添加新的传感器节点, 都会产生能量异构的传感器网络, 都会产生能

量异构的传感器网络。

数据收集是无线传感器网络的基本任务, 算法的核心是如何构造网络的传输结构。近年来, 人们已提出了诸多无线传感器网络数据收集算法<sup>[2-6]</sup>, LEACH<sup>[5]</sup>和 HEED<sup>[6]</sup>等是其中具有代表性的算法。

由于节点的失败或者能量耗尽, 无线传感器网络的拓扑结构经常发生改变, 因此重新执行分簇算法来选举簇头是不可避免的。另外, 簇头节点相对普通节点要承担更多的任务, 也消耗更多的能量, 所以在所有节点中轮换簇头角色以达到能耗均衡也是重新选择簇头的原因<sup>[5,6]</sup>。在以往的许多算法中, 重新选举簇头是一个全局性的动作, 即所有节点通过协作来推选出

① 基金项目: 湖南省教育厅科研项目(10A062); 湖南省自然科学基金(09JJ6097)

收稿时间: 2011-01-25; 收到修改稿时间: 2011-02-26

新的簇头，由此带来大量的消息传递和计算负载，降低了网络的生命周期。

本文针对传感器网络分簇过程中的簇头耗能过快问题，提出了一种综合节点剩余能量和节点位置进行簇头选取的分布式数据收集算法。在每轮的簇头选取中，算法考虑了簇内节点的剩余能量和所有节点的平均剩余能量，并依据节点的位置优化簇头的选择。算法在保证最优簇头个数的同时，避免了能量较低的节点当选为簇头。仿真结果表明，本文算法与 LEACH 和 HEED 相比，均衡了网络中节点的能量消耗，有效延长了网络的生命周期。

## 2 系统假设和网络模型

### 2.1 系统假设

本文假定  $N$  个传感器节点均匀分布在半径为  $R$  圆形区域中，Sink 节点位于正方形区域的正下方，Sink 与圆形区域中心的距离为  $D$ ，在网络布设完成后，节点和 Sink 不再移动。每个节点具有相似的通信能力，并具备数据融合的功能，能够根据发射接收信号的强弱计算它们之间的距离。节点在簇内采用相同的通信半径进行通信。

### 2.2 能耗模型

无线传感器网络的大部分能耗用于节点间的通信，本文对节点进行运算和存储的能耗忽略不计。根据无线通信理论，能量衰减模型随发送距离的远近分为自由空间模型和多路衰减模型，当发送距离小于阈值常量  $d_0$  时，发送数据的功耗和距离的平方成正比，当发送距离大于  $d_0$  时，功耗和距离的四次方成正比<sup>[5]</sup>。当距离为  $d$  时，节点发送  $l$  比特数据所消耗的能量为：

$$E_{tr}(l, d) = E_{elec}(l) + E_{amp}(l, d) \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_{elec}(l) + l \times \epsilon_{fr} \times d^2, & d \leq d_0 \\ E_{elec}(l) + l \times \epsilon_{mp} \times d^4, & d > d_0 \end{cases}$$

节点接收  $l$  比特数据所消耗的能量为：

$$E_{rx} = l \times E_{elec} \quad (2)$$

其中， $d_0$  的典型取值分别为  $87\text{ m}$ ， $E_{elec}$  为收发电路的基本功耗系数，其典型取值为  $50\text{ nJ/bit}$ ； $E_{amp}$  为放大电路的功耗系数，在自由空间模型和多路衰减模型模型中的典型取值分别为  $13\text{ pJ/bit/m}^2$  和  $0.0013\text{ pJ/bit/m}^4$ 。

本文假设 Sink 节点远离监测区域，所有节点与

Sink 之间的距离大于  $d_0$ 。

### 2.3 网络模型

本文将圆形监测区域按簇划分为六边形网格，每个网格为一个簇。簇成员节点采用单跳方式将探测的数据发送到簇头，簇头将数据转发到 Sink，网络模型如图 1 所示。

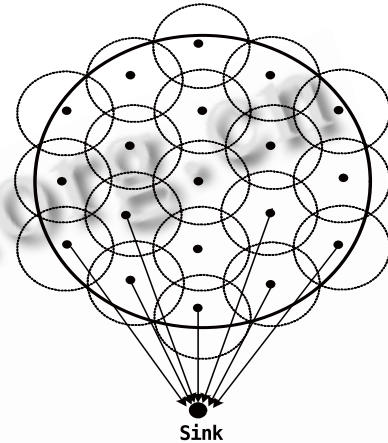


图 1 无线传感器网络模型

## 3 数据收集算法

### 3.1 最优分簇个数

在无线传感器网络中，每个节点完成一次探测数据的收集，簇头将数据发送到 Sink，称为无线传感器网络的一次数据收集。从开始感知数据到探测到的数据无法成功地传递到 Sink 为止，网络所成功完成数据收集的次数，称为该无线传感器网络寿命。

假设监测区域分成  $k$  个簇，每个簇的规模相同，每个簇的半径  $r = R/\sqrt{k}$ ，簇头位于簇的中心，每个数据包的长度为  $len$  比特，下面先计算在一次数据收集中网络的能耗。

六边形网格中的节点  $(x_i, y_i)$  到六边形中心距离平方的期望

$$E(d_i^2) = \iint_A (x^2 + y^2) dx dy = r^2 / 2 \quad (3)$$

$N - k$  个成员节点传输数据包到簇头的能耗为

$$E_{member} = len(N - k)(E_{elec} + \epsilon_{fr} \times r^2 / 2) \quad (4)$$

$k$  个簇头接收  $N - k$  个成员节点数据的能耗为

$$E_{chl} = (N - k) \times len \times E_{elec} \quad (5)$$

因为假设 Sink 远离监测区域，因此可以认为区域内所有簇头节点到 Sink 的距离近似等于  $D$ ，簇头传输

数据到 Sink 的能耗为

$$E_{ch2} = k \times len \times (E_{elec} + \epsilon mp \times D^4) \quad (6)$$

在一次数据收集中, 传感器节点的总能耗为

$$E_{total} = E_{member} + E_{ch1} + E_{ch2} \quad (7)$$

从节省网络能量的角度出发, 使得网络在一次数据收集中能耗最小的  $k$  值即为最优分簇个数。所以对 (7) 式中  $E_{total}$  的关于  $k$  求导数, 并令其等于 0, 得出最优分簇个数

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{N \times \epsilon fr}{2\sqrt{2}(\epsilon mp \times D^4 - E_{elec})}} \quad (8)$$

从而计算出最优簇半径  $r_{opt} = \frac{R}{\sqrt{k_{opt}}}$ 。

### 3.2 算法设计

在本文算法中, 每个节点需要保存一张表, 以存储其邻居节点的相关信息, 其中包括节点的 ID、节点间的距离和剩余能量。每轮开始时, 每个节点首先以半径  $r_{opt}$  广播节点的 ID 和剩余能量。收到广播消息的节点根据消息的信号强度来估算节点间的距离, 并更新其邻居信息表。每个节点根据邻居节点的剩余能量求出平均剩余能量  $E_{i-aver}$ 。

对于具有  $N$  节点、 $k_{opt}$  个簇的网络来说, 每个节点成为簇头节点的概率为  $k_{opt} / N$ 。考虑到分簇网络中能量消耗的特点, 节点成为簇头的概率应该与节点的剩余能量直接相关, 在选取簇头时应尽可能选取剩余能量较高的节点, 所以应该增大那些具有高剩余能量的节点担任簇头的概率, 从而达到均衡节点能量消耗、延迟网络生命周期的目的。

此外, 传输距离直接影响节点的能量消耗。显然, 由位于簇中心位置的节点担任簇头可以降低网络的总能耗。因此, 网络中的节点由下面式子计算出其成为簇头节点的概率  $\rho(i)$

$$\rho(i) = \frac{k_{opt}}{N} \times \frac{E_{i-res}}{E_{i-aver}} \times \frac{S}{\sum_{j \in NBR_i} d_{jtoi}^2} \quad (9)$$

其中,  $E_{i-res}$  为节点  $i$  的剩余能量,  $NBR_i$  为节点  $i$  的邻居节点集,  $d_{jtoi}$  为节点  $j$  与节点  $i$  集之间的距离, 由式 (10) 计算出每个簇中的成员节点到簇中心距离的平方和  $S$

$$S = \left( \frac{N}{k_{opt}} - 1 \right) r_{opt}^2 \quad (10)$$

当节点监测区域能量同构时, 应该选择通信能耗较小的节点担任簇头。由式 (9) 可知, 节点  $i$  的剩余能量  $E_{i-res}$  与监测区域的平均剩余能量  $E_{i-aver}$  的比值约等于 1。节点成为簇头的概率与它到邻居节点距离的平方和成反比, 因此, 位于簇中心位置的节点具有较高的概率当选簇头。

当节点监测区域能量异构时, 簇头的选择节点不仅需要考虑能耗, 更重要的是如何实现监测区域的能耗均衡。由式 (9) 可知, 节点成为簇头的概率  $\rho(i)$  与节点的剩余能量成正比, 因此, 具有较高剩余能量的节点更容易当选为簇头。

因此, (10) 式中的  $\rho(i)$  为簇头节点的选择提供了统一的衡量标准, 网络中的节点可以根据  $\rho(i)$  的值选择出具有较高剩余能量、较低通信能耗的节点作为簇头节点。

基于上述分析, 本文提出一种分布式分簇算法, 在每个传感器节点上并发执行。算法描述如下:

```
void clustering(i) //节点 i
{
    status=NO; //节点初始状态
    广播 ID 号和剩余能量;
    根据接收到的信号强度估算节点间的距离;
    更新邻居表;
    计算竞选簇头的概率  $\rho(i)$ ;
    与邻居节点交换  $\rho(i)$  信息;
    while (status==NO)
    {
        if (竞选簇头的概率在邻居节点中最高)
        {
            以概率  $\rho(i)$  当选簇头;
            广播已成为簇头信息;
            status=簇头;
            return; //算法终止
        }
    }
    if (收到邻居成为簇头的广播信息)
    {
        status=簇成员;
        return; //算法终止
    }
}
```

### 3.3 算法分析

定理 1. 算法的最差时间复杂度为  $O(N)$ 。

证明: 算法的最差情况是所有节点在某个节点的监测区域中, 即该节点监测区域中的节点总数等于传感器网络的节点总数, 因此算法中 if 判断的复杂度最

多为  $O(N)$ ，其它步骤需要的时间为  $O(1)$ 。显然，只要节点能可靠地收到其邻居节点的信息，算法中的 while 循环就能够在有限步内终止，因此，本算法的最差时间复杂度为  $O(N)$ 。

定理 2. 整个网络的信息交换次数为  $O(N)$ 。

证明：在成簇过程中，节点间的信息交换包括广播 ID 号和剩余能量、交换  $\rho(i)$  信息、广播已成为簇头 3 次，其中簇头节点信息交换的次数为 3，非簇头节点信息交换的次数为 2。因此，节点信息交换的次数为  $O(1)$ ，整个网络的信息交换次数为  $O(N)$ 。

#### 4 仿真实验

我们对本文算法与 LEACH、HEED 作了对比实验，实验中将 100 个节点均匀布置在半径为 100 m 的圆形监控区域内，Sink 与圆形区域中心的距离为 200 m。在簇的建立节点和稳定阶段，三种算法采用相同的时间设置，具体见文献[5]，并比较了三种算法在网络能耗、存活节点个数等方面的性能，下面的每个结果都是取 100 次实验的平均值。

图 2 是本文算法与 LEACH、HEED 在存活节点个数的比较结果。可以看出，在同一工作时间内本文算法比 LEACH 和 HEED 存活的节点个数多，能更有效地延长网络的生命周期。这是因为 LEACH 选举簇头的随机性导致某些节点过快地耗尽能量，而 HEED 并没有考虑簇头的能量消耗均衡，造成部分节点过早失效。

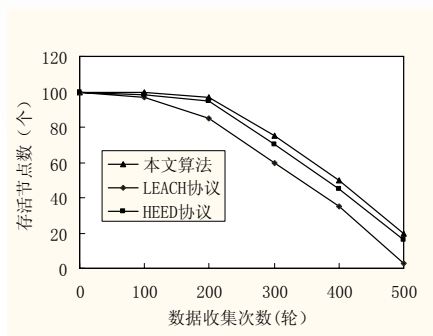


图 2 存活节点个数比较

图 3 是本文算法与 LEACH、HEED 在网络能耗的比较结果。从图 3 可以看出，在同一工作时间内本文算法的能量消耗明显低于 LEACH，也低于 HEED。这是因为在 LEACH 中，簇头的广播信息必须确保网络中的所有节点都能收到，节点需要用较大的通信半径

向簇头传输数据，这将消耗大量的能量。而本文算法使用半径  $r_{opt}$  进行广播，每个成员节点到簇头的距离均小于  $r_{opt}$ ，所以节点使用较小的通信半径  $r_{opt}$  与簇头进行通信以节省能量。因此，本文算法与 LEACH 相比，能更高效地使用网络中节点的能量。

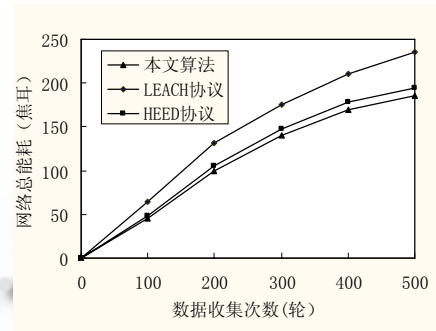


图 3 网络总能耗比较

#### 5 结语

本文针对圆形检测区域的传感器网络提出了一种综合节点剩余能量和节点位置进行簇头选取的分布式数据收集算法。算法的基本思想是根据能耗模型与网络模型计算网络的最优分簇个数和最优通信半径，综合考虑节点的剩余能量和节点的位置来选择簇头节点。仿真结果表明，与 LEACH 和 HEED 相比，本文算法平衡了网络中节点的能耗，优化了簇头的选择，延长了网络的生命周期。

#### 参考文献

- 崔莉, 鞠海玲, 苗勇. 无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- 梁俊斌, 王建新, 李陶深, 陈建二. 传感器网络中基于树的最大生命精确数据收集. 软件学报, 2010, 21(9): 2289-2303.
- 叶宁, 王汝传. 传感器网络中一种基于估计代价的数据聚合树生成算法. 电子学报, 2007, 35(5): 806-810.
- 郑国强, 李建东, 周志立. 多跳无线传感器网络的高能效数据收集协议. 软件学报, 2010, 21(9): 2320-2337.
- Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Proc. of the Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. San Francisco: IEEE Computer Society, 2000. 3005-3014.
- Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669.