

非均匀分簇的无线传感器网络数据传送机制

杨军^{1,2}, 张德运¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 宁夏大学数学计算机学院, 750021, 银川)

摘要: 针对无线传感器网络多跳数据传送过程中遇到的问题, 提出一种非均匀分簇的数据传送机制(DTUC). 其核心思想是: 从概率的角度出发分层和分簇, 使得靠近汇聚节点(Sink)分层内的簇数量较多, 簇内节点数较少, 而在远离 Sink 节点分层内的簇数量较少, 簇内节点数较多, 从而保证内层簇头节点减少其簇内开销, 以节省更多的能量用于数据的簇间传送. 同时, 基于能耗均衡的思想对各层节点进行部署, 使得各层能耗大体相当. 仿真实验表明, DTUC 算法能有效地平衡网络节点能耗, 延长网络生命期, 比 EECS 和 LEACH 的网络生命期分别提高了 33% 和 54%.

关键词: 无线传感器网络; 非均匀分簇; 能耗均衡; 网络生命期

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)04-0014-04

A Data Transmission Mechanism for Wireless Sensor Networks Using Unequal Clustering

YANG Jun^{1,2}, ZHANG Deyun¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mathematics and Computer Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: A novel data transmission mechanism based on unequal clustering (DTUC) is presented to solve the “hot spot” problem of multihop data transmission in wireless sensor networks. In the DTUC, the entire network is divided into some layers and some clusters from the probability view point. The number of clusters in nodes closer to the sink node is greater than that in nodes far away from the sink node, while the number of nodes with clusters closer to the sink node is lower than that with clusters far away from the sink node. Thus the inner cluster heads can reduce the energy consumption within a cluster, and preserve more energy for inter-cluster data relaying. In addition, the distribution of nodes in every layer is deployed according to the energy consumption balance, such that the energy consumption in every layer is nearly equal. Simulation studies show that the DTUC significantly balances the nodes' energy consumption and prolongs the lifetime of networks. Compared with EECS and LEACH, the network lifetime of the DTUC is prolonged by 33% and 54%, respectively.

Keywords: wireless sensor network; unequal clustering; energy balance; network lifetime

无线传感器网络通常采用多跳方式进行数据传送, 感知数据流遵循“多对一”的通信模式, 即多个数据源传送给单个汇聚节点(Sink), 如 LEACH^[1]、HEED^[2]等. 这种模式使得离 Sink 较近的节点需要担负过多的转发任务, 因而过早地耗尽能量, 导致

“热点”问题出现^[3]. 文献[4]第一次讨论了避免“热点”的问题, 文献[5]从理论上探讨了采用非均匀分布策略的问题, 而 EECS^[6]协议通过考虑距离代价函数推出了大小簇的思想. 然而, 这些协议没有考虑多跳分簇的网络结构, 从而造成网络的管理成本过

大、可扩展性较差等问题。

本文从概率的角度出发进行网络分层和分簇,同时考虑了各层节点的能耗均衡问题,并在多跳分簇结构的基础上,提出了一种新的非均匀分簇的数据传送机制。

1 网络模型

假设无线传感器网络节点分布在一个半径为 L 的圆形区域,节点非均匀分布,惟一的 Sink 节点放置在圆心处,如图 1 所示。网络为静态网络,节点部署后不再移动,网络中的节点都是同质的,具有相同的初始能量,并且都有一个 ID 号。

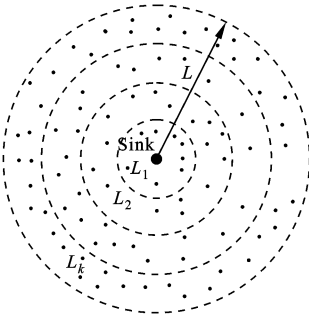


图1 圆盘形的网络区域

网络从内向外分为 k 层,分别为 $L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_k$,且所有的层宽度均为 r 。 L_1 层内的簇头节点和 Sink 节点直接通信,其他层的簇头节点通过多跳方式与 Sink 通信。假设网络中的一个节点在单位时间内产生的数据量为 h ,处于 $\{L_i | i \neq k\}$ 层中的簇头节点需要向 Sink 转发自身及其与所有高层 $\{L_j | (i+1) \leq j \leq k\}$ 簇头节点融合后的数据。又设数据层间传送和层内传送都采用自由空间模型,则发送数据和接收数据的无线通信模型分别为

$$E_{tx}(h, d) = he_1 + he_2 d^2 \quad (1)$$

$$E_{rx}(h, d) = he_1 \quad (2)$$

式中: e_1 为无线收发电路能耗; e_2 为自由空间模型放大器的能耗; e_3 为簇头融合单位数据的能耗; d 为数据传送的距离; h 为要发送或接收的单位数据位数。

2 协议设计

2.1 网络分层

在网络初始化阶段, Sink 节点向网络广播“HELLO”消息,通过接收信号强度指示(RSSI),每个节点可以计算其与 Sink 节点的距离,并且根据文献[7]中方法算出节点所在的分层号,然后再将自己

的分层号发送给 Sink 节点,由此 Sink 知道了网络层数,并向所有节点广播。

2.2 分簇算法

算法的主要思路是,根据各个层与 Sink 节点的距离来指定不同的竞争簇头概率,距离近的分层,竞争簇头概率较大,反之则概率较小。在同一个分层中,各个节点根据剩余能量的大小竞争簇头。

节点 i 竞争簇头的概率

$$p_i = p_{\min} + \frac{k-j}{k-1}(p_{\max} - p_{\min}) \quad (3)$$

式中: $p_{\max}$ 为第 1 层节点竞争簇头的概率; $p_{\min}$ 为第 k 层节点竞争簇头的概率; j 为该节点的分层号。一般地, $p_{\max}$ 较大更有利于平衡节点的能耗,若取 $p_{\max} = 1$,则第 1 层内的节点全部作为簇头。这样,上层簇头就有更多的中继节点将数据传送给 Sink 节点,从而尽可能减小“热点”问题。分簇算法如图 2 所示。

```

1.  compute  $p_i$ 
2.  if (Rand(0,1) <  $p_i$ )
3.      TentativeHead = TRUE;
4.  if (TentativeHead == TRUE)
5.      CompeteCH_msg(ID,  $E_{\text{current}}$ , layer_ID);
6.  Rec_msg(on receiving from node  $q$ );
7.  if ( $i.\text{layer\_ID} == q.\text{layer\_ID}$ )
8.      add node  $q$  to  $i.S_{CH}$ ;
9.  while (TentativeHead == TRUE) {
10.      for ( $q \in i.S_{CH}$ )
11.          if ( $i.E_{\text{current}} > q.E_{\text{current}}$ )
12.              FinalCH_msg(ID, layer_ID);
13. }
```

图2 分簇算法

簇头选定后,每个簇头给全网广播一个消息,非簇头节点对收到的多个簇头 RSSI 进行比较,加入接收信号最强的那个簇。

2.3 基于能耗均衡的数据传送

2.3.1 能耗均衡分析 根据上述的分层结构,防止“热点”问题的关键就是考虑各层能耗均衡问题。由于各层感知数据的差异性较大,因此在数据传送中不考虑簇间的数据融合,只考虑簇内的数据融合。假设 L_i 层中节点的个数和分布密度分别为 N_i 和 ρ_i ,由前面的假设和式(3)可知,最外层 L_k 中单个簇头节点在单位时间的能量消耗为

$$E_{ch_k} = (1/p_{\min} - 1)he_1 + (1/p_{\min})he_3 + (1/p_{\min})\alpha h(e_1 + e_2 r^2) \quad (4)$$

式中: $\alpha \in [0, 1]$ 为聚合因子^[8],用来描述一个簇内簇头压缩感知数据的效率。由式(4)可知, α 值越小,说明簇头压缩的效率越高,需要转发给下层簇头的数

据越少, L_k 层中所有节点在单位时间的能量消耗为

$$E_k = p_{\min} N_k E_{\text{ch}_k} + (1 - p_{\min}) N_k E_{\text{nonch}_k} = N_k h [(2(1 - p_{\min}) + \alpha) e_1 + (1 - p_{\min} + \alpha) r^2 e_2 + e_3] \quad (5)$$

又由以上假设可知, L_i 层中所有节点在单位时间的能量消耗为

$$E_i = N_i h [(2(1 - p_i) + \alpha) e_1 + (1 - p_i + \alpha) r^2 e_2 + e_3] + \sum_{t=i+1}^k \alpha h N_t (2e_1 + e_2 r^2) \quad (6)$$

若各层能耗均衡, 则要求

$$E_1 = E_2 = E_3 \cdots = E_k \quad (7)$$

$$\text{令} \quad E_k = E_{k-1} \quad (8)$$

成立, 则

$$\frac{N_{k-1}}{N_k} = \frac{[2(1 - p_{\min}) - \alpha] e_1 + (1 - p_{\min}) r^2 e_2 + e_3}{[2(1 - p_{k-1}) + \alpha] e_1 + (1 - p_{k-1} + \alpha) r^2 e_2 + e_3} \quad (9)$$

由式(9)可知

$$\frac{\rho_{k-1}}{\rho_k} = \frac{2k-1}{2k-3} \cdot \frac{[2(1 - p_{\min}) - \alpha] e_1 + (1 - p_{\min}) r^2 e_2 + e_3}{[2(1 - p_{k-1}) + \alpha] e_1 + (1 - p_{k-1} + \alpha) r^2 e_2 + e_3} \quad (10)$$

当 2 层的 L_k, L_{k-1} 中节点按式(10)分布时, 能耗达到均衡. 同理, 令

$$E_k = E_{k-2} \quad (11)$$

$$\frac{N_{k-1}}{N_k} = m \quad (12)$$

则

$$\frac{N_{k-2}}{N_k} = \frac{([2(1 - p_{\min}) - \alpha - 2\alpha m] e_1 + (1 - p_{\min} - \alpha m) r^2 e_2 + e_3) / ([2(1 - p_{k-2}) + \alpha] e_1 + (1 - p_{k-2} + \alpha) r^2 e_2 + e_3)}{[2(1 - p_{k-2}) + \alpha] e_1 + (1 - p_{k-2} + \alpha) r^2 e_2 + e_3} \quad (13)$$

$$\frac{\rho_{k-2}}{\rho_k} = \frac{2k-1}{2k-5} \cdot \frac{([2(1 - p_{\min}) - \alpha - 2\alpha m] e_1 + (1 - p_{\min} - \alpha m) r^2 e_2 + e_3) / ([2(1 - p_{k-2}) + \alpha] e_1 + (1 - p_{k-2} + \alpha) r^2 e_2 + e_3)}{[2(1 - p_{k-2}) + \alpha] e_1 + (1 - p_{k-2} + \alpha) r^2 e_2 + e_3} \quad (14)$$

反复计算, 就可以得到 $\rho_k, \rho_{k-1}, \cdots, \rho_i, \cdots, \rho_2, \rho_1$ 之间的比值. 当确定了 ρ_k , 也就确定了整个网络在能耗均衡条件下的节点分布. 换句话说, 只要按照这种节点部署, 整个网络就能保证能耗均衡, 从而有效地减轻“热点”问题对网络生命期的影响.

2.3.2 数据传送机制 网络的数据传送机制可以

在上述能耗均衡的基础上来构造. 首先, 节点按照上述的密度分布进行部署, 在网络初始时使用 2.2 节的分簇算法分簇. 当有感知事件发生时, 源节点将数据传送给自己的簇头, 然后由簇头聚合数据后再转发给内层簇头, 直至发送至 Sink 节点. 因此, 整个数据传送分为簇内传送和簇间传送, 簇内传送机制与 LEACH 协议类似, 而本文主要考虑簇间传送. 为了在待选的中继簇头间平衡能耗, 上层簇头节点将选择下层簇头中剩余能量最多的一个节点发送数据. 选择完成后, 外层簇头将数据发送给选中的下层簇头, 该算法如图 3 所示.

```
1. Rec_msg(CH_msg) from q;  
2. if (q.layer_ID==i.layer_ID+1)  
3.     add node q to i.Parent;  
4. else if (q.layer_ID==i.layer_ID-1)  
5.     add node q to i.Children;  
6. while (Data_arrival==TRUE){  
7.     if (Rec_msg(ForwardData_msg) from Parent){  
8.         u=MaxResEnergy(i.Children);  
9.         Send_Data(u,ForwardingData);  
10.    } else {  
11.        u=MaxResEnergy(i.Children);  
12.        Send_Data(u,i.Data);  
13.    }  
14. }
```

图 3 数据的簇间传送算法

3 模拟实验

本文定义网络生命期为网络初始运行到第 1 个节点死亡之间的时间长度, 实验采用 NS2 模拟器来验证 DTUC 算法, 网络的配置参数如表 1 所示.

表 1 网络的配置参数

参数名	参数值
R/m	200
Sink 节点位置	(0,0)
数据包大小/B	500
初始能量/J	2
节点数	500~2 000
k	7
$p_{\max}$	1
$p_{\min}$	0.05

3.1 分层数目 k 对于网络生命期的影响

合适的 k 值对于网络生命期的延长起重要作用. k 过小会造成层与层之间的距离过大, 簇头远距离的数据传送会消耗过多的能量; k 过大意味着层的高度变小, 从外层簇头传送给 Sink 节点所要经历的中继簇头过多, 这会导致能量消耗在数据传递的过程中. 由图 4 可知, 在上述网络参数的情况下, k 为 7 对于延长网络生命期是一个合适的取值.

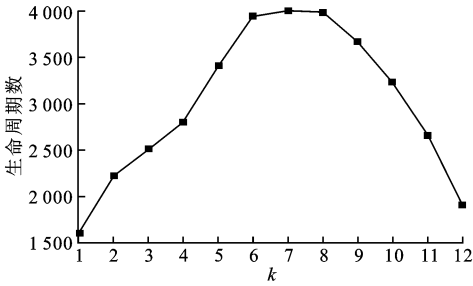


图 4 分层数目 k 对于网络生命期的影响

3.2 第 1 层节点数目和 α 对网络的影响

随着第 1 层节点数目的增加,网络转发数据的能力增强,网络的生命期延长. 其次,聚合因子对网络生命期的影响是显而易见的,随着 α 的减小,簇头压缩数据的效率不断提高,网络的生命期随之延长. 由图 5 可知,当 $\alpha=10\%$ 时,网络的生命期比 $\alpha=50\%$ 时提高了 1~2 倍.

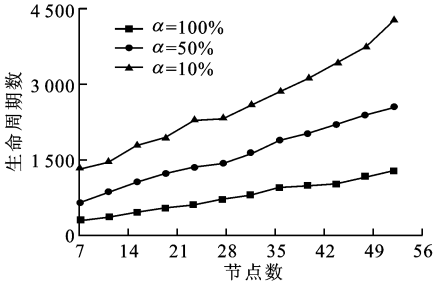


图 5 第 1 层节点个数对网络生命期的影响

3.3 能量消耗比较

本文主要考察 DTUC、LEACH、EECS 节点存活率的情况. 由图 6 可知,在 $\alpha=10\%$ 的情况下,DTUC 的生命期比 EECS 和 LEACH 分别提高了 33%和 54%. 这主要是由于均衡能耗的非均匀分簇机制,使得 DTUC 比 LEACH 和 EECS 的节点能耗均衡性更好,从而延长了网络的生命期.

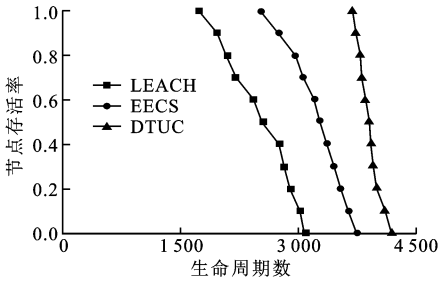


图 6 网络生命期与节点存活率的关系

4 结束语

本文从网络分层和分簇出发,在多跳分簇结构

的基础上,提出了一种新的非均匀分簇的数据传送机制. 通过改善“多对一”的通信方式和能耗均衡的节点分布,有效地减小了“热点”问题的影响,延长了网络的生命期,仿真实验结果也验证了上述结论.

参考文献:

[1] 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.

[2] 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): 366-379.

[3] PERILLO M, CHENG Z, HEINZELMAN W. An analysis of strategies for mitigating the sensor network hot spot problem[C]// Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005: 474-478.

[4] OLARIU S, STOJMENOVIC I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting[C]// INFOCOM 2006. New York, USA: IEEE Communications Society, 2006: 1-12.

[5] 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): 253-261.

WU Xiaobing, CHEN Guihai. The energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 32 (2): 253-261.

[6] YE Mao, LI Chengfa, CHEN Guihai, et al. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2007, 3 (2): 99-119.

[7] DE S, CARUSO A, CHAIRA T, et al. Bounds on hop distance in greedy routing approach in wireless ad hoc networks[J]. International Journal of Wireless and Mobile Computing, 2006, 1 (2): 131-140.

[8] YU Y, RRISHNAILACHARI B, PRASANNA V K. Energy-latency tradeoffs for data gathering in wireless sensor networks[C]// INFOCOM 2004. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 244-255.

(编辑 苗凌)