

# 无线传感器网络中基于节点密度的簇算法

乔俊峰<sup>1</sup> 刘三阳<sup>1</sup> 曹祥宇<sup>2</sup>

(西安电子科技大学理学院 西安 710071)<sup>1</sup> (第二炮兵工程学院 302 室 西安 710025)<sup>2</sup>

**摘 要** 能量有效的路由协议对于无线传感器网络至关重要,它能够延长整个网络的生存时间。首先简要介绍了无线传感器网络中的路由算法,分析了 Leach 算法的优缺点。在 Leach 的基础上,结合节点密度,提出了一种基于节点密度的簇算法。算法在选举簇头的过程中,能够根据节点密度均衡划分各个簇的规模,从而平衡各簇的网络负载,降低网络中能量分布的不均。仿真表明,与 Leach 相比,该算法延长了网络生存时间,降低了能耗。

**关键词** 无线传感器网络,分簇路由协议,Leach 算法,网络生存时间

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Density-based Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks

QIAO Jun-feng<sup>1</sup> LIU San-yang<sup>1</sup> CAO Xiang-yu<sup>2</sup>

(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)<sup>1</sup>

(Staff Room 302, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Wireless sensor networks require energy-efficient routing protocols to prolong the system lifetime. Routing algorithms are firstly introduced for WSN, and then the Leach algorithm is researched. Based on Leach, a density-based clustering protocol was proposed. While selecting cluster heads, the protocol can set the scale of each cluster based on the density of nodes, with the network load and energy distribution balanced. Simulations show that our proposed protocol is more effective in prolonging the network lifetime and reducing the energy dissipation compared with Leach.

**Keywords** Wireless sensor network, Clustering routing protocol, Leach, Network lifetime

## 1 引言

传感器技术、微机电系统、现代网络和无线通信等技术的进步,推动了无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的产生和发展。无线传感器网络涉及众多学科,成为目前 IT 领域的研究热点之一。无线传感器网络最终将成为现实世界和数字世界的接口,具有十分广阔的应用前景,因此被称为全球未来三大高科技产业之一。

无线传感器网络通信协议主要包括物理层、数据链路层、网络层和传输层。其中网络层协议负责路由发现和维护,是无线传感器网络的重要因素,一个网络设计成功与否,路由协议非常关键。由于传感器节点的电源能量、计算和存储能力都十分有限,要求路由协议应具有能量有效性、局部性、可扩展性等特点。本文简要介绍了传感器网络中的路由协议,重点分析了 Leach(Low-energy adaptive clustering hierarchy)的优缺点,提出了一种基于节点密度的簇算法(Density-based Clustering Protocol, DBCP)。该算法能够依据节点密度平衡各个簇的规模,从而延长了网络生存时间,降低了能耗。

## 2 路由算法简介

### 2.1 分簇算法

按照最终形成的拓扑结构,传感器网络的路由协议分为平面型和层次型两种。平面路由协议主要有 Flooding, SPIN, SAR, 定向扩散等<sup>[1,2]</sup>。这类协议可扩充性差,维护动态变化的路由需要大量控制信息。层次路由协议又称为分簇协议,主要有 Leach, Teen, Heed, Pegagis 等<sup>[2-6]</sup>。这类算法将整个网络划分为相连的区域,每个区域中有一个节点为簇头节点,其余节点为簇内节点。簇内节点将数据发送给簇头,由簇头节点将簇内数据融合后再转发给基站(Base Station, BS)。其拓扑结构如图 1 所示。簇内和簇头间可以单跳或多跳的方式通信。簇头节点的通信模块始终打开,并负责协调簇内节点的通信状态。层次型路由协议具有很多优点:由簇头节点负责数据融合任务,减少了数据通信量;分簇式的拓扑结构有利于分布式算法的应用,适合大规模部署的网络;大部分簇内节点在相当长的时间内关闭通信模块,因此可以显著延长整个网络的生存时间。

到稿日期:2009-01-20 返修日期:2009-03-24 本文受国家自然科学基金(No. 60674108, 60703118),陕西省自然科学基金(No. 2007A01), ISN 国家重点实验室专项基金资助。

乔俊峰(1979-),女,博士研究生,讲师,研究方向为最优化计算方法及其在通信网络及无线传感器网络中的应用, E-mail: jfjiao@mail.xidian.edu.cn; 刘三阳(1959-),男,博士生导师,研究方向为最优化理论与方法、网络算法及其应用等; 曹祥宇(1978-),男,博士研究生,讲师,研究方向为系统性能优化、检测技术与故障诊断。

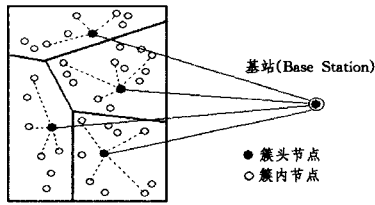


图1 分簇算法的拓扑结构

## 2.2 Leach 算法

Leach 算法是一种典型的分簇算法,大部分分簇算法都是在它的基础上发展而来的<sup>[7-9]</sup>。它的执行过程是周期性的,每轮循环分为簇的建立阶段和稳定的数据通信阶段。在簇的建立阶段,随机产生簇头并形成簇;在数据通信阶段,簇内节点将感知到的数据直接传输给簇头,簇头进行数据融合并把结果发送给基站。簇头由于需要完成数据融合、与基站通信等工作,因此能耗较大。Leach 算法采用周期性地选举簇头,可使因能量耗尽而失效的节点呈随机分布状态。

Leach 算法选举簇头的过程如下:节点产生一个 0~1 之间的随机数,如果这个数小于阈值  $T(n)$ ,则该节点成为簇头节点。 $T(n)$ 可表示为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times [r \bmod (1/P)]}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P$ 是簇头在所有节点中所占的百分比, $r$ 是当前的轮数, $G$ 是在最后的  $1/P$  轮中未当选过簇头的节点集合。

节点当选簇头后,以相同的功率向其他节点广播自己是新簇头这一消息。非簇头节点根据自己接收到的信号的强度来选择加入哪个簇(一般依据与簇头之间的距离),并告知该簇头。当簇头接收到所有的加入信息后,就产生一个 TDMA 定时消息。为了避免附近簇的信号干扰,簇头可以决定本簇中所有节点所用的 CDMA 编码。这个 CDMA 编码与 TDMA 定时一起发送给簇内所有节点。簇内节点收到这个消息后,就会在各自的时隙内发送数据,否则节点关闭无线通信设备以减少能耗。经过一段时间的数据传输,簇头节点收齐簇内节点发送的数据并进行融合后,将结果直接发送给基站。

由 Leach 算法的执行过程可以看出,它随机轮转地选举簇头并形成相应的簇,这样对于大多数节点只需要进行短距离的传输,只有少数的簇头节点与基站之间进行长距离通信。簇头的随机轮转使得能量消耗较为均衡地分布在各个节点,从而避免了个别节点持续充当簇头而过早死亡。而且,由于先在簇内进行数据融合,因此减少了传输给基站的数据量并提高了数据的精度。

但经过深入研究,我们发现 Leach 算法也存在着不足之处。首先,簇头并非均匀分布在网络中,其分布具有随机性。其次,由于节点根据收到信息的强弱决定加入哪一个簇,排除中间有障碍物等特殊情况,因此节点一般就近加入距其最近的簇头。另一方面,实际网络中节点密度往往不均匀,这样在节点较为密集的区域,簇内节点较多,簇的规模较大,而作为簇头的节点要负担的节点数多,传输任务也较为繁重,势必会因能量过早耗尽而失效。在节点较为稀疏的区域,情况则相反。为说明这一情况,采用图 2 的网络拓扑,在执行 Leach 算法的过程中随机抽取某轮的分簇情况,如图 3 所示。在图 3 中,整个网络覆盖区域被划分成 5 个簇。可以明显看出经

Leach 选举出的簇头的分布并不均匀。在簇 1 和簇 2 覆盖区域,由于节点较为密集,因而簇的规模较大。而在簇 3 和簇 4 覆盖区域,节点较为稀疏,簇的规模较小。我们当然希望在节点密度较大的区域增加簇头,以减少形成簇的规模,提高网络负载平衡程度。此外,从能量分布的角度考虑,节点密度不均使得网络中不同区域的能量资源分布差别很大。簇头由于承担远距离传输的任务而能耗大,因此在节点密度大的区域,从而也就是能量资源较为充足的区域增加簇头个数,可以将能量消耗集中在节点密度较大的区域,从而降低了网络中能量分布的不均,通过改善整个网络的能耗平衡延长了网络寿命。因此,有必要结合节点密度来选举簇头。

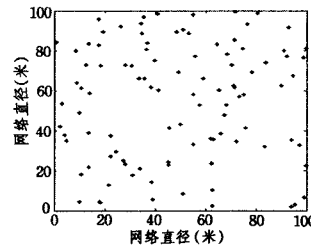


图2 网络拓扑图

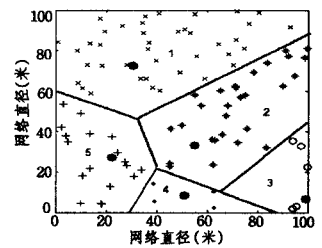


图3 随机抽取的 Leach 算法的分簇图

## 3 基于节点密度的簇算法

### 3.1 网络模型

(1)网络假设:①基站固定且远离感知区域,假定其能量供应充足,不考虑基站的能量消耗;②所有节点同构、初始能量相同,能量有限且不可更新;③节点一旦布置好就不可移动;④节点以固定的速率感知环境且一直有数据要发送;⑤节点可感知其剩余能量;⑥节点可根据需要改变其发射功率。

(2)传输模型:节点将  $k$  bit 数据传输至距离  $d$  的耗能为<sup>[10]</sup>

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} E_{dec} \cdot k + \epsilon_{fs} \cdot k \cdot d^2, & d < d_0 \\ E_{dec} \cdot k + \epsilon_{mp} \cdot k \cdot d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $E_{dec}$ 为发送/接收单位 bit 数据的能耗,根据发送节点和接收节点之间的距离,功率放大消耗分别采用自由空间模型和多路径衰减模型; $\epsilon_{fs}$ ,  $\epsilon_{mp}$  分别为两种信道模型下功率放大

所需能量; $d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}}$ 。

接收能耗为

$$E_{Rx}(k) = E_{dec} \cdot k \quad (3)$$

### 3.2 节点密度

Leach 协议是将单个节点的状态作为簇头选择时的度量标准,没有考虑周围节点的影响,这样会由于状况不准确而造成簇头节点分布不均匀。本文提出的基于节点密度的簇算法(DBCP)采用了描述周围环境的参数(节点密度),能更为准确地反映局部区域节点的分布。下面先定义节点密度。

$N$ :表示网络中的传感器节点集。

$Neighbor(n)$ :表示节点  $n$  的邻居集,即

$$Neighbor(n) = \{j | d_{nj} \leq R, j \in N\}$$

其中, $R$ 为节点  $n$  的通信半径,根据网络模型中的假设⑥,节点可通过改变发射功率来控制其通信半径,进而改变其邻居节点集。

定义节点  $n$  的密度:

$$Density(n) = \frac{Neighbor(n)_{alive}}{Network_{alive}} \quad (4)$$

其中,  $Neighbor(n)_{alive}$  和  $Network_{alive}$  分别表示节点  $n$  邻居集中以及整个网络中存活节点的数目, 即剩余能量大于 0 的节点数目。由定义可以看出, 随着网络不断运行, 节点  $n$  的密度也会动态地变化。

### 3.3 基于节点密度的簇算法

为了在节点密集区域增加簇头的个数, 只需要增大对应节点成为簇头的概率, 对于节点稀疏区域则减少其中节点成为簇头的概率即可。为此, 将簇头选举的阈值修改为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times [r \bmod (1/P)]} \left(1 + \frac{Neighbor(n)_{alive} - 1/P}{Network_{alive}}\right), & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

实际上,  $1/P$  表示的是按簇头比例  $P$  分簇后平均每个簇包含的节点数目, 即簇规模平均值。因此, 上式用节点  $n$  邻居集中存活的节点数减去  $1/P$ , 相当于一种“奖惩”机制。也就是说, 当节点周围存活的邻居节点数大于簇规模平均值时, 反映出该节点处于密集区域, 那么就增加其成为簇头的概率, 反之则减少其成为簇头的概率。上式由于包含了节点密度的表达式(4), 因此称为基于节点密度的簇算法。可见, 与节点密度相结合的簇头选举不再是单个节点的事情, 而是周围节点的联合考虑。

类似于 Leach, DBCP 仍然按轮运行, 每轮分为簇的建立阶段和数据通信阶段。主要有两点改进之处:

第一, 确定阈值  $T(n)$ 。主要包括 ①  $Neighbor(n)_{alive}$  的获取: 在每一轮的初始阶段, 节点运行邻居节点信息收集模块, 向通信半径  $R$  内的节点广播用于信息交互的消息, 用来探测邻居节点的存活状况, 同时将自身的存活报告给邻居节点。经过一段时间的信息交互后, 各节点都建立起一跳范围所有邻居节点的存活情况, 从而可得到  $Neighbor(n)_{alive}$ 。②  $Network_{alive}$  的获取: 在每一轮的数据通信阶段, 簇头向基站转发数据时, 将邻居节点集中存活节点的数目一起发送给基站。基站将整个网络中存活节点数汇总, 并将其在下一轮通知各节点, 新一轮开始时一并发送给各节点, 这样所有节点可获知整个网络存活节点的数目。

第二, 簇头选定之后, 每个簇头以相同的功率仅向其通信半径  $R$  内的邻居节点而非全网所有节点广播自己成为簇头的消息。

类似于 Leach, 算法本身复杂度较低, 具有易于实现的优势, 对底层协议支持和软件编程的要求不高, 适合在节点计算和存储能力有限的无线传感器网络中应用。

## 4 仿真实验与结果分析

仿真采用的传感区域, 其范围为  $100\text{m} \times 100\text{m}$ , 随机分布在其中的节点数为 100 个, 基站位置固定在坐标 (50, 250) 处。所有节点的初始能量为 1J, 通信半径  $R$  为 50m。能量消耗包括用于发送、接收、数据融合所消耗的能量, 监测等耗能忽略不计。簇内节点要发送的数据包大小为 2000bit, 用于簇头通知、簇内节点回复加入簇头、收集邻居节点信息的数据包大小为 100bit。传输模型中  $E_{dec} = 50\text{nJ/bit}$ ,  $\epsilon_{mp} = 10\text{pJ/}$

$(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$ ,  $\epsilon_{fs} = 0.0013\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$ 。

为了评价算法对网络性能的影响, 仿真试验中测定了以下 4 个指标。①簇规模: 每个簇包含的节点数, 用来评价各个簇节点数目的平衡程度; ②网络寿命: 当网络中存活节点数只剩下初始节点数的 20% 时网络持续的轮数, 反映算法对延长网络寿命的作用; ③平均能耗: 网络运行中所有节点的平均能量消耗, 反映算法对节约网络能耗的作用; ④存活节点数: 网络运行中存活的节点数目。

图 4 为簇头比例  $P$  取不同值时两种算法对网络寿命的影响。为使阈值  $T(n)$  中的  $1/P$  取整数, 仿真中  $P$  分别取 0.04, 0.05 和 0.1。在 3 种情况下, DBCP 较 Leach 对网络寿命都有所提高, 而且在  $P=0.05$  时二者的网络寿命达到最高。可见对于该仿真网络的有关参数, 簇头比例取  $P=0.05$  时较为合适, 接下来的仿真中取  $P=0.05$ 。此外, 当  $P=0.1$  时二者之间的差距较前两种情况有所减小。究其原因, 当簇头比例增大时, 簇的平均规模将减小, 这样各个簇的规模差距不大, 从而节点密度对簇头选择的影响也将有所减弱。

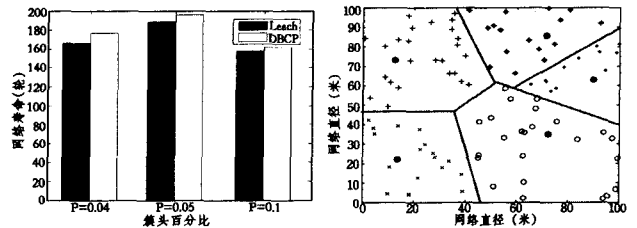


图 4 不同簇头百分比下的网络寿命对比

图 5 随机抽取的 DBCP 算法的分簇图

为了比较 DBCP 算法在平衡各个簇规模方面的作用, 仍然采用图 2 中的网络拓扑图, 随机抽取了算法运行过程中的分簇, 如图 5 所示。可以看出通过结合节点密度来选择簇头, 增加了节点密集处簇头的数量, 从而减少了其簇的规模, 在全网中平衡了各个簇的大小。此外, 在网络运行的过程中, 统计各个簇所负担的节点数, 直至网络寿命结束, 各范围内的簇规模百分比如图 6 所示。可以看出, Leach 簇内包含的节点数集中在 0~25, 而 DBCP 簇节点数在 16~25 的范围内则比较集中, 与簇平均值更为接近, 从而也进一步说明 DBCP 通过结合节点密度选举簇头可以有效平衡各个簇的规模。

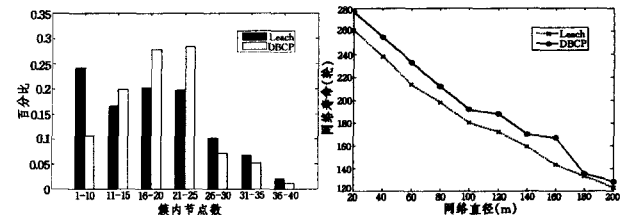


图 6 簇内节点数百分比分布

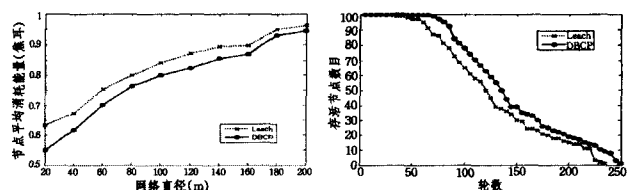


图 7 不同网络直径下的网络寿命对比

图 8 不同网络直径下的节点平均能耗对比 (round=120)

图 9 网络运行中存活节点数对比

图7、图8分别是在不同网络直径下的网络寿命、节点平均能耗对比。为保证网络覆盖度和连通度,仿真中节点的通信半径 $R$ 应随着网络直径的增加做相应增加。随着网络直径的增加,簇内通信距离增大,因而簇内消耗的能量增加。从图中可以看出,相应的网络寿命减少,而平均能耗增大。图9所示为网络运行中的存活节点数对比。可以看出,与Leach相比,DBCP第一个死亡的节点以及最后死亡节点的轮数都有所推迟。第100轮时,DBCP和Leach存活的节点数分别为78和65,DBCP对网络性能的改善较为显著。

**结束语** 本文主要研究了无线传感器网络中的分簇路由协议。针对Leach分簇规模不均匀的不足,结合节点密度改进了簇头的选择阈值,增加了节点密集区域簇头的数量,从而减少了其中簇的规模,达到了平衡全网簇规模的目的。仿真表明,基于节点密度的簇算法可以有效延长网络寿命并减少能耗。文中采用的分簇模型为簇内单跳通信、簇头与基站直接通行的模式。对于感知区域范围较大或是基站较远的情形,可采用簇头间单跳与多跳相结合的方式。对于网络性能的影响需要做进一步的研究。另外,不同的无线传输模型将会影响到协议的评价,这也是一个值得考虑的问题。

### 参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Su W, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114
- [2] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 114-124
- [3] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]// Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Hawaii International Conference on System Science[C]. 2000
- [4] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [5] Younis O, Fahmy S. Heed: a Hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [6] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]// International Proceedings of 15<sup>th</sup> Parallel and Distributed Processing Symposium. 2001
- [7] Kim Kyungmi, Kim Hyunsook, Han Ki-jun. Two types of a zone-based clustering method for wireless sensor networks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4481: 347-354
- [8] Wu Xiaochen, Wang Peng, et al. Data-aware clustering hierarchy for wireless sensor networks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5012: 795-802
- [9] Tsai Yuh-Ren. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1240-1245
- [10] Heinzelman W R. Application-specific protocol architectures for wireless networks[D]. Massachusetts institute of technology, 2005

## 欢迎投稿

# 欢迎订阅 2010 年《计算机科学》

2010年即将到来,《计算机科学》也将迎来创刊三十七周年,感谢一直以来关心、支持、帮助我们的广大作者、读者和编委,您的支持是我们不断提高办刊质量的重要保障!在新的一年里,我们将更加努力地为作者服务、为读者服务,请继续关注《计算机科学》!欢迎访问《计算机科学》新版网站 [www.jsjcx.com](http://www.jsjcx.com),欢迎踊跃投稿!随着编辑部来稿量日益增加,为更好把握稿件质量,特向计算机专业领域诚征审稿专家,愿您的专业学识和学术精神与我们共同构筑一个良好的学术氛围,期待您的自荐!

《计算机科学》编辑部