

传感器网络中一种基于分层的功率控制算法^①

袁辉勇 (湖南人文科技学院 计算机科学技术系 湖南 娄底 417000)

易叶青 (湖南大学 计算机与通信学院 湖南 长沙 410082)

摘要: 无线传感器网络的能耗决定了网络的生存时间, 如何设计有效的算法来延长网络的生存时间是一个重要的研究课题。针对矩形传感器网络, 提出一种基于分层的功率控制算法, 通过分析节点的能耗来计算层的宽度和节点的通信半径, 以达到网络能耗的均衡分布。仿真实验表明, 算法能有效延长网络的生存时间。

关键词: 传感器网络; 功率控制; 算法; 能耗均衡; 生存时间

A Layer-Based Power Control Algorithm in Sensor Networks

YUAN Hui-Yong¹, YI Ye-Qing^{1,2}

(1. Department of Computer Science, Hunan Institute of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China; 2. College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The lifetime of a wireless sensor network (WSN) directly lies in the power consumption of the network. Thus one of the important problems is how to design an effective algorithm to prolong the lifetime of the sensor network as much as possible. In this paper, a layer-based power control algorithm is proposed for rectangular field sensor network. In this scheme, the width of the layers and communication radius can be computed according to nodes energy consumption. Hence, the energy consumption of the networks can be balanced effectively. Simulation results show that the algorithm could effectively extend the lifetime of the networks.

Keywords: sensor networks; power control; energy consumption balance; algorithm; networks lifetime

1 引言

无线传感器网络是由具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器节点组成, 可广泛地应用于国防军事、国家安全、环境监测、交通管理、医疗卫生、反恐抗灾等领域。由于节点的电源通常不可更换, 网络的能耗直接决定网络的生存时间, 因此如何充分发挥电源有效性、延长无线传感器网络生存时间是一个关键问题^[1]。

目前已提出了一些降低网络能耗、延长网络生存时间的方法。文献[2]提出一种非均匀的节点分布策

略, 在靠近基站的区域布置较多的节点。然而, 对于密集型的传感器网络, 非均匀的节点分布将导致网络流量增大。文献[3]假定节点均匀部署在一个矩形监测区域中, 为提高整个网络的数据容量, 提出一种非均匀分布节点初始能量的方法, 但该方法在实际应用中较难实现。文献[4]提出一种基于非均匀分簇的路由协议 EECS, 采用基于距离的权重函数来计算簇的规模, EECS 类似于 LEACH 协议, 其簇头节点采用单跳方式与基站通信。EECS 中用到了一些参数, 文中没有说明参数的选取方法, 算法的性能难以达到最优。

① 基金项目: 湖南省自然科学基金(09JJ6097); 湖南省教育厅科研项目(09C547); 湖南省重点学科建设项目

收稿时间: 2009-06-05

本文研究了节点随机均匀部署在矩形监测区域的最大化网络生存时间问题。在文献[4]不同簇规模思想的基础上,将矩形区域划分层,提出一种基于分层的功率控制算法,并计算出了每层的宽度和节点的通信半径。处于同一层中的节点采用相同的通信半径组织成簇。仿真实验表明,基于分层的功率控制算法能有效均衡节点能耗、延长网络的生存时间。

2 系统假设和问题陈述

2.1 系统假设

本文假定传感器节点随机均匀部署在长为 L 、宽为 W 的矩形区域中,基站位于矩形区域的正下方,基站与区域边界的距离为 H ,在网络布设完成后,节点和基站不再移动。每个节点具有相似的通信能力,节点的初始能量为 E_{init} 。

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[5],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。当距离为 d 时,节点发送 len 字节数据所消耗的能量为:

$$E_r(len, d) = E_{elec}(len) + E_{amp}(len, d) \begin{cases} E_{elec}(len) + len \times \epsilon_{fr} \times d^2, & d \leq d_0 \\ E_{elec}(len) + len \times \epsilon_{mp} \times d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

节点接收 len 字节数据所消耗的能量为:

$$E_{rx} = len \times E_{dec} \quad (2)$$

其中, E_{dec} 为收发电路的基本功耗系数,其典型取值为 50 nJ/bit ; E_{amp} 为放大电路的功耗系数,在两种模型中的典型取值分别为 13 pJ/bit/m^2 和 $0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$ 。

2.2 问题陈述

一般的分簇算法所生成的簇的规模基本相等。但由于处于不同监测位置的簇头节点所消耗的能量并不相同,从而出现簇头之间的能耗不均衡问题。当簇头采用多跳通信方式向基站传输数据时,靠近基站的簇头因传送数据较多而较早死亡;而簇头与基站采用单跳通信方式时,远离基站的簇头因传送数据能耗太高会很快死亡。

为了使网络能耗均匀分布,不仅要考虑簇头与成

员节点间的能耗均衡,更要考虑簇头间的能耗均衡问题,以进一步均衡所有传感器节点的能耗,达到延长整个网络的生存时间的目的。我们认为,通过调整监测区域中簇的规模和节点的通信半径(发射功率),可以有效均衡不同位置节点的能耗,从而延长整个网络的生存时间。

3 分簇算法

本节给出了基于分层的无线传感器网络模型,通过分析每层节点的能量消耗求解出每层的宽度和节点的通信半径,并给出了簇头选举算法。

3.1 网络模型

本文将无线传感器网络的矩形监控区域划分为 m 层,每层中的节点按照层的宽度组织成簇。簇成员节点采用单跳方式将探测的数据发送到簇头,簇头将融合后的数据通过单跳方式传输到基站,基于分层无线传感器网络模型如图 1 所示。

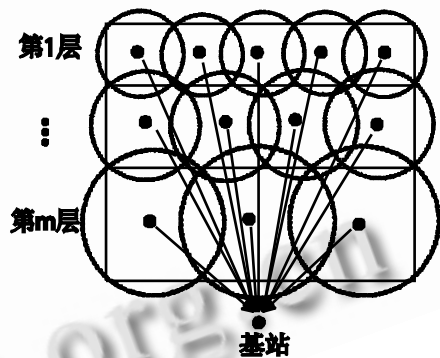


图 1 无线传感器网络模型

无线传感器网络中每个节点完成一次探测数据的收集,并将数据传输到基站,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基站为止,网络所成功完成数据收集的次数,称为该无线传感器网络生存时间。

延长无线传感器网络生存时间的方法都是在最小化节点能耗的同时,将系统的能耗均衡分布到每个节点上。通过调整节点的通信半径(发射功率)可以有效均衡处于不同位置的节点的能耗,从而延长整个网络的生存时间。

3.2 第 1 层的宽度

假设传感器节点探测到的数据包长度为 len 字节,某两个节点间的距离为 $dist$,它们之间的数据传输经

过 k 跳来实现。显然，当每跳的距离相等时，总能耗最小，故每跳的距离为 $dist/k$ 。传输路径上的节点在 k 次发送和 k 次接收数据的能耗为：

$$E_{miti} = k \times len \left(E_{elec} + E_{amp} \left(\frac{dist}{k} \right)^2 \right) + k \times len \times E_{elec} \quad (3)$$

$$= 2k \times len \times E_{elec} + E_{amp} \times len \frac{dist^2}{k}$$

为了使传输路径上的能耗最少，求 E_{miti} 的导数，并使结果等于 0，得：

$$k = dist \sqrt{E_{amp} / (2E_{elec})} \quad (4)$$

此时，节点的通信半径为：

$$R = \sqrt{2E_{elec} / E_{amp}} \quad (5)$$

由文献[4]可知，离基站越近，簇的通信半径越大。故设置离基站最近的第 1 层的簇内通信半径 $R_1 = R$ ，即图 1 中靠近基站的虚线圆圈的半径为 R 。因此，第 1 层的宽度为：

$$W_1 = \sqrt{2}R_1 = 2\sqrt{E_{elec} / E_{amp}} \quad (6)$$

该层中簇的数目约为：

$$C_1 = L / W_1 \quad (7)$$

3.3 第 1 层节点的能耗

监测区域每层中节点的能耗主要包括成员节点将数据发送到簇头、簇头接收成员节点的数据以及簇头将数据发送到基站三个方面。其中，成员节点将数据发送到簇头按自由空间模型计算能耗，簇头将数据发送到基站按多路衰减模型计算能耗。

由文献[6]可知，当节点的通信半径为 r 并随机均匀部署于监测区域 A 时，对区域 A 有效覆盖所需要的最少节点个数 N 应满足： $N\pi r^2 / A_{\text{area}} = 2\pi / \sqrt{27}$ 。因此，为了对长为 L 、宽为 W_1 的第 1 层实现有效覆盖，该层中节点的个数至少为：

$$N_1 = \frac{2LW_1}{\sqrt{27}R_1^2} \quad (8)$$

该层中 $N_1 - C_1$ 个成员节点将数据发送到相应簇头的能耗为：

$$E1_1 = (N_1 - C_1) \times len \times (E_{elec} + E_{amp} \times R^2) \quad (9)$$

簇头接收 $N_1 - C_1$ 个成员节点数据的能耗为：

$$E2_1 = (N_1 - C_1) \times len \times E_{elec} \quad (10)$$

设簇头的位置为 (x, y) ，簇头到基站距离为：

$$D = \sqrt{(x - L/2)^2 + (y + H)^2} \quad (11)$$

虽然在实际应用中，传感器节点在整个区域中不可能是均匀分布的。但根据前面节点随机均匀部署的假设，对于一个节点密集部署的传感器网络而言，第 1 层中的簇头到基站距离四次方的平均期望值为：

$$E[D^4] = \frac{1}{LW_1} \int_0^L \int_0^{W_1} D^4 dx dy \quad (12)$$

簇头将数据发送到基站的能耗为：

$$E3_1 = C_1 \times len \times (E_{elec} + E_{amp} \times E[D^4]) \quad (13)$$

故第 1 层中的节点的平均能耗为：

$$E_{aver_1} = \frac{E1_1 + E2_1 + E3_1}{N_1} \quad (14)$$

3.4 外层的宽度

设第 2 层中的节点的通信半径为 R_2 ，则该层的宽度 $W_2 = \sqrt{2}R_2$ 。

由文献[5]可知，为了实现对监测区域的有效覆盖，第 2 层中的节点数目至少为：

$$N_2 = \frac{2LW_2}{\sqrt{27}R_2^2} \quad (15)$$

该层中簇的数目约为：

$$C_2 = L / W_2 \quad (16)$$

该层中 $N_2 - C_2$ 个成员节点将数据发送到相应簇头的能耗为：

$$E1_2 = (N_2 - C_2) \times len \times (E_{elec} + E_{amp} \times R_2^2) \quad (17)$$

簇头接收 $N_2 - C_2$ 个成员节点数据的能耗为：

$$E2_2 = (N_2 - C_2) \times len \times E_{elec} \quad (18)$$

设簇头的位置为 (x, y) ，簇头到基站距离为：

$$D = \sqrt{(x - L/2)^2 + (y + H + W_1)^2} \quad (19)$$

第 2 层中簇头到基站距离四次方的平均期望值为：

$$E[D^4] = \frac{1}{LW_2} \int_0^L \int_0^{W_2} D^4 dx dy \quad (20)$$

该层中簇头将数据发送到基站的能耗为：

$$E_{3_2} = C_2 \times len \times (E_{dec} + E_{amp} \times E[D^4]) \quad (21)$$

故第 2 层中节点的平均能耗为：

$$E_{aver_2} = \frac{E_{1_2} + E_{2_2} + E_{3_2}}{N_2} \quad (22)$$

要使网络的生存时间最大化，应尽量平衡各层区域内节点的能耗，故令 $E_{aver_1} = E_{aver_2}$ ，由式(14)和式(22)可求解出第 2 层的簇内通信半径 R_2 ，由 R_2 计算出层的宽度 W_2 。

采用类似的方法，可依次计算出第 3 层至第 m 层节点的簇内通信半径和层的宽度。

3.5 簇头选举算法

本文采用类似于文献[7]中的密度控制算法，调度网络中的冗余节点并控制“活跃”节点的数目。网络部署完成后，基站根据 $P_i = N_i / C_i$ 计算各层中节点成为候选簇头的概率，再向网络中的节点发送包含 R_i 和 P_i 的控制信息，节点根据收到的控制信息来选举簇头。在后面的实验中，我们将节点成为候选簇头的概率设置为 $2P_i$ ，以便选出更适当的节点担任簇头。

在簇头选举阶段，第 i 层中的候选簇头使用通信半径 R_i 发出其成为候选簇头的广播消息，并且接收半径为 R_i 内的邻居节点发来的广播信息。各候选簇头节点根据接收到的信息来确定其是否成为簇头节点，如果所有邻居节点的剩余能量小于自身的剩余能量，宣布自己成为簇头，否则，剩余能量最多的邻居候选簇头成为它的簇头。

4 仿真实验

为了验证算法的有效性，将本文基于分层的功率

控制算法、EECS 协议和 LEACH 协议在网络的生存时间、节点的死亡时间等方面做了对比实验。

实验中将 100 个节点部署在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的矩形监控区域内，基站位于矩形区域的正下方，将基站与区域边界之间的距离设置了 6 个值，分别为 100 m 、 150 m 、 200 m 、 250 m 、 300 m 、 350 m 。节点的初始能量为 1 J 。下面的每个实验结果都是取 100 次实验的平均值。

三种算法的网络生存时间的比较结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，本文算法的网络生存时间比 LEACH 协议和 EECS 协议要长。

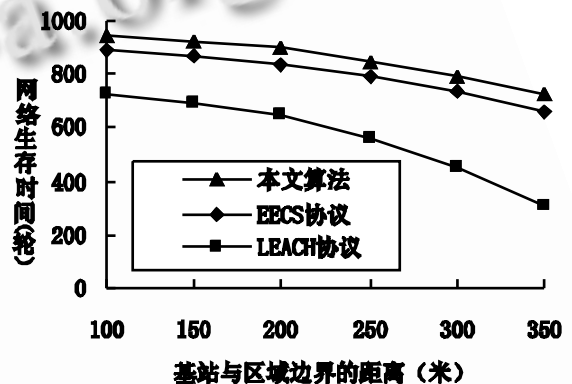


图 2 网络的生存时间对比

此外，随着基站与区域边界距离的增大，三种算法的网络生存时间都下降。但本文算法的下降速度比 LEACH 要慢。这是因为随着基站距离的增大，本文算法使得离基站较远的区域中节点的簇内通信半径较小，簇头在簇内的能耗相对较少，从而能够节省能量以实现簇头与基站节点之间的远距离通信。因此，本文基于分层的功率控制算法受基站与边界距离的影响相对较小。

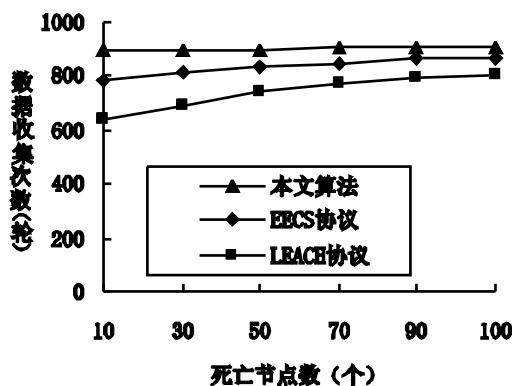


图 3 节点的死亡时间对比

图 3 是三种算法在节点死亡时间上的比较结果。实验中, 三种算法都将基站与监控区域边界之间的距离设置为 100 m 。

从图 3 可以看出, LEACH 协议、EECS 协议与本文算法相比, 节点的死亡时间要早些, 并且基于分层的功率控制算法的节点死亡时间集中在最后几十轮中, 说明本文的算法能够更好地平衡不同位置节点的能耗。

5 结 语

本文将矩形监测区域划分成层, 提出基于分层的功率控制算法, 并计算出了监测区域每层的宽度和簇内通信半径。实验结果表明, 本文算法与 LEACH 协议、EECS 协议相比, 能量消耗更均衡、网络的生存时间更长。

参 考 文 献

- 1 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163 - 174.
- 2 Lian J, Naik K, Agnew G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor

distribution. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2006, 2(2): 21 - 145.

- 3 Lian J, Chen L, Naik K. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks. IEEE Monograph on Sensor Network Operations, IEEE Press, 2004.
- 4 Ye M, Li CF, Chen GH, Wu J. EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. Proc. of the IEEE Int'l Performance Computing and Communications Conf New York: IEEE Press, 2005. 535 - 540.
- 5 Heinzelman W. Application-specific protocol architectures for wireless networks Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- 6 Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. IEEE Int'l Conf on Communications (ICC). 2001.
- 7 Ye F, Zhong G, Lu S. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. Proc. of ICDCS. 2003.