

分层传感器网络的最大化寿命模型与求解

袁辉勇¹, 李素君¹, 羊四清^{1,2}, 戴经国¹

(1. 湖南人文科技学院 计算机科学技术系, 湖南 娄底 417000; 2. 湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410082)

(hnydyh@126.com)

摘要:针对矩形传感器网络,给出了满足连通覆盖约束条件的分层传感器网络最大化寿命模型,提出一种非均匀的节点布置算法,通过分析节点的能耗来计算层的宽度,并定量规划了每层中节点的数目。仿真实验表明,基于分层的非均匀节点布置算法能有效延长网络的寿命。

关键词:传感器网络;模型;网格;寿命

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Maximized lifetime model and its solution of layer-based sensor networks

YUAN Hui-yong¹, LI Su-jun¹, YANG Si-qing^{1,2}, DAI Jing-guo¹

(1. Department of Computer Science and Technology, Hunan Institute of Humanities, Science and Technology, Loudi Hunan 417000, China;

2. College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: On the basis of rectangular deployment field, the authors proposed a layer-based model to maximize the lifetime of sensor networks which met the connectivity coverage constraints, and a non-uniform node deployment algorithm for sensor networks. The width of the layer was decided by node energy consumption. Also, the number of nodes in every layer was determined. Simulation results show that layer-based non-uniform node deployment algorithm can effectively extend the lifetime of the sensor networks.

Key words: sensor network; model; grid; lifetime

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由布置在监测区域内大量的微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的、分布式自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者。WSN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,以及空间探索和灾难抢险等特殊领域^[1-2]。

传感器节点一般由电池提供能量,而且不能补充能量。节点之间一般采用多跳方式进行通信,一些节点既产生数据也转发数据,数据流遵循多对一模式。距离 Sink 越近的节点需要承担越多的数据转发任务,这些节点很容易耗尽自身的能量而过早失效。此时,尽管网络中还有大量未被充分利用的能量资源,但由于 Sink 附近出现的“能量空洞”问题,导致网络寿命提早结束。

许多文献讨论了传感器节点的能耗和网络寿命问题。文献[3]分析了传感器节点采用相同通信半径时网络的能耗情况,提出一种功率控制策略来平衡各节点的能耗,但该策略会导致整个网络的能耗增大,不能有效延长网络寿命。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。文献[5]研究了圆盘型传感器网络的最大寿命问题。文献[6]假定节点均匀布置

在一个矩形区域的网络中,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。

本文研究了 N 个传感器节点布置在长为 L 、宽为 W 的矩形监测区域时网络的最大寿命问题,给出了满足连通覆盖约束条件的最大化寿命模型。将监测区域剖分成层,计算出了每层的宽度,将每层划分成网格,每个网格为一个簇,得出了布置在不同网格中的节点数目。模拟结果显示,基于分层的非均匀节点布置算法能有效延长网络寿命。

1 系统假设和能耗模型

1.1 系统假设

本文假定 N 个传感器节点非均匀布置在长为 L 、宽为 W 的矩形区域中, Sink 位于矩形区域的正下方, Sink 与区域边界的距离为 H , 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,采用相同的通信半径 r 进行通信,节点的初始能量为 E_{ini} 。

将矩形监控区域划分为 m 层,每层分成 n 个正方形网格,网格的边长为 a , 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,簇头通过多跳方式将数据发送到 Sink,网络模型如图 1 所示。

1.2 能耗模型

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

收稿日期:2008-12-02;修回日期:2009-02-13。 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(07JJ3119);湖南省“十一五”重点建设学科资助项目;湖南省教育厅科学研究资助项目(06C436)。

作者简介:袁辉勇(1967-),男,湖南双峰人,副教授,硕士,主要研究方向:传感器网络; 李素君(1977-),女,湖南邵阳人,讲师,硕士,主要研究方向:传感器网络; 羊四清(1966-),男,湖南邵东人,副教授,博士研究生,主要研究方向:传感器网络、数据挖掘; 戴经国(1962-),男,湖南双峰人,教授,主要研究方向:网络安全。

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^[7]。当距离为 d 时,节点发送 k 字节数据所消耗的能量为:

$$E_r(k, d) = E_{\text{elec}}(k) + E_{\text{amp}}(k, d) = \begin{cases} E_{\text{elec}}(k) + k \times \varepsilon_f r \times d^2, & d \leq d_0 \\ E_{\text{elec}}(k) + k \times \varepsilon_{\text{mp}} \times d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

节点接收 k 字节数据所消耗的能量为:

$$E_{rx} = kE_{\text{elec}} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 为收发电路的基本功耗系数,其典型取值为 50 nJ/b; 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/(b · m²) 和 0.0013 pJ/(b · m⁴)。

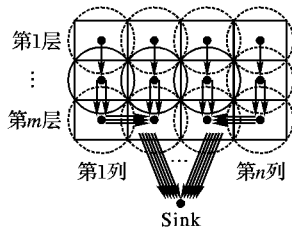


图1 传感器网络模型

2 最大化网络寿命模型

在传感器网络中,每个节点完成一次探测数据的收集,簇头通过多跳方式将数据发送到 Sink,称为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,称为该传感器网络寿命。

假设第 i 层网格内节点的寿命为 T_i ,节点在一次数据采集过程中平均消耗的能量为 E_{i_aver} 。因此网络的最大化寿命模型为:

$$\text{Max}(\text{Min}(T_i))$$

$$\text{s. t. } T_{ij} = E_{\text{init}}/E_{i_aver}$$

为实现网络寿命的最大化,希望各个网格内节点的能耗最小,并且能够同时“死亡”。因此,最大化寿命模型可以转化为:

$$\text{Min}(E_{i_aver})$$

$$\text{s. t. } E_{i_aver} = E_{j_aver}; 1 \leq i, j \leq m$$

3 模型求解

3.1 层的宽度

假设节点探测到的数据包的长度为 len 字节,两个节点间的距离为 dist ,两个节点间的数据传输经过 x 跳来实现。显然,当每跳的距离相等时总的能耗最小,故每跳的距离为 dist/x 。传输路径上的节点在 x 次发送和 x 次接收的总能耗为:

$$E_{\text{multi}} = x \times \text{len}(E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}}(\text{dist}/x)^2) + x \times \text{len} \times E_{\text{elec}} = 2x\text{len}E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}}\text{dist}^2/x \quad (3)$$

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

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

此时,节点的通信距离(通信半径)为:

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

在密集型传感器网络中,簇成员节点发送到簇头的的数据

量相对于簇头到 Sink 的数据量要大得多,故将成员节点与簇头的通信距离设置为 r ,即图 1 中的虚线圆圈的半径为 r 。将簇头间的通信距离设置为每层网格的宽度 a ,并将每层分成 $n = L/a$ 网格,层的宽度为:

$$a = \sqrt{2}r = 2 \sqrt{E_{\text{elec}}/E_{\text{amp}}} \quad (6)$$

3.2 “活跃”节点个数

为了对网络区域实现有效覆盖,由文献[8]可知,当节点随机均匀布置于监测区域 A 时,所需要的最少节点个数满足: $N\pi r^2/A_{\text{area}} = 2\pi/\sqrt{27}$ 。因此,为了对长为 L 、宽为 W 的矩形监控区域实现有效覆盖,并使传输路径上的总能耗最小时,网络中的“活跃”节点个数至少为:

$$n_{\text{active_all}} = 2LW/(\sqrt{27}r^2) \quad (7)$$

所以,每层网格中的“活跃”节点个数至少为:

$$n_{\text{active}} = 2La/(\sqrt{27}r^2) \quad (8)$$

3.3 节点布置方案

为有效均衡不同层次网格内节点的能耗,本文采用非均匀的节点布置方案,在离 Sink 较近的区域布置较多的传感器节点,以实现非均匀的能量分布。使用类似文献[9]中的密度控制算法,调度冗余节点并控制“活跃”节点的个数,避免出现“能量空洞”现象。

为了叙述方便,假设布置在第 i 层内的节点个数为 N_i 。最外层(第 1 层)网格中节点的能耗只用于自身数据的发送,相对其他层来说,节点的能耗最小,节点的密度也最小,故布置的节点个数为:

$$N_1 = n_{\text{active}} = 2La/(\sqrt{27}r^2) \quad (9)$$

在一次数据收集中,第 1 层节点将数据发送到簇头的能耗为 $N_1 \times \text{len}(E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} \times r^2)$,而簇头节点将聚合后的数据包发送到第 2 层中的簇头所消耗的能量为 $n \times \text{len}(E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}} \times a^2)$,节点的总能耗为:

$$E_1 = \text{len}(N_1 + n)E_{\text{elec}} + \text{len}(N_1 + 2n)E_{\text{amp}}r^2 \quad (10)$$

下面计算布置在第 i 层的节点个数。

第 i 层中的节点不仅需要发送自身的数据,还要负责外层节点数据的转发任务。在一次数据收集中,第 i 层内的节点要接收外围 $n(i-1)$ 个数据包,发送 $n \times i$ 个数据包,节点的总能耗为:

$$E_i = \text{len}(N_1 + n(2i-1))E_{\text{elec}} + \text{len}(N_1 + 2ni)E_{\text{amp}}r^2 \quad (11)$$

因此,为了使第 1 层节点和第 i 层节点的平均能耗相等,在第 i 层中应布置的节点数为:

$$N_i = \frac{E_i}{E_1} \times N_1 \quad (12)$$

下面计算离 Sink 最近的第 m 层中的节点总数。

第 m 层中两端的节点将数据传输到中间区域,中间区域内的节点负责将数据包发送到 Sink。在一次数据收集中,要接收外围 $n(m-1)$ 个数据包,发送 $n \times m$ 个数据包。节点的总能耗为:

$$E_m = \text{len}(N_1 + n(2m-1))E_{\text{elec}} + \text{len}(N_1 + nm)E_{\text{amp}}(H + a/2)^4 \quad (13)$$

因此,在第 m 层中布置的节点总数为:

$$N_m = (E_m/E_1) \times N_1 \quad (14)$$

在布置第 m 层时,根据式(12)计算 N_m' ,先将 N_m' 个节点均匀布置,再将剩下的 $N_m - N_m'$ 个节点布置到距 Sink 较近的中间区域的网格,以实现第 m 层内节点能耗的均衡。

为了对矩形监控区域实现有效覆盖,达到能耗均衡,并使传输路径上的总能耗最小,在整个监控区域中布置的节点总数至少为:

$$N = N_1 + \sum_{i=2}^{m-1} N_i + N_m \quad (15)$$

在实际布置时,如果节点总数大于 N ,可根据式(9)、式(12)和式(14)按比例布置。

4 理论分析和仿真实验

4.1 理论分析

采用本文的非均匀布置方案时,各层区域的能量消耗速度与该区域内的节点数目之比保持一致,因此各层网格内的节点几乎同时消耗完自身的能量。网络的寿命等于第1层网格中节点的寿命,故网络寿命为:

$$T^* = \frac{E_{\text{init}}}{\text{len}(N_1 + n)E_{\text{elec}} + \text{len}(N_1 + 2n)E_{\text{amp}}r^2} \quad (16)$$

下面分析理想均匀布置节点时的网络寿命。

假设也采用密度控制算法,控制网络中的“活跃”节点个数为 $n_{\text{active_all}}$ 。由于第 m 层节点需要转发的数据最多,能量消耗最快,网络的寿命等于第 m 层网格中节点的寿命,根据式(13)可得,网络的寿命为:

$$T = \frac{E_{\text{init}} \times N / n_{\text{active_all}}}{\text{len}(N_1 + n(2m - 1))E_{\text{elec}} + \text{len}(N_1 + nm)E_{\text{amp}}H^4} \quad (17)$$

与 LEACH 协议一样,通常 $H > r$ 。例如,当 $L = 100 \text{ m}$, $W = 100 \text{ m}$, $H = 100 \text{ m}$, $r = 30 \text{ m}$ 时,由式(16)和(17)可得 $T^* \approx 1.21T$;而当 $L = 100 \text{ m}$, $W = 100 \text{ m}$, $H = 350 \text{ m}$, $r = 30 \text{ m}$ 时,可得 $T^* \approx 3.68T$ 。由此可见,随着基站与监控区域之间距离的增大,相对于理想均匀布置来说,非均匀布置方案可以有效延长网络的寿命。

4.2 仿真实验

实验中将 100 节点布置在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的矩形监控区域内, Sink 位于矩形区域的正下方,将 Sink 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,将本文算法与理想均匀布置、随机均匀布置作了对比实验。利用 Matlab 的 Rand 函数来实现节点的随机均匀布置,比较了三种不同方案在节点死亡、网络寿命等方面的性能,下面的每个实验结果都是取 100 次实验的平均值。

图 2 显示了网络寿命与 Sink 距离远近的关系。随着 Sink 与区域边界距离的增大,三种方案的网络寿命都下降。但是本文的非均匀布置算法的下降速度比两种均匀布置方案都要慢。这是因为随着 Sink 距离的增大,非均匀布置算法在离 Sink 较近的区域布置了更多的节点,因而受 Sink 与边界距离的影响相对较小。

图 3 显示了数据收集次数和节点死亡个数之间的关系。三种方案都将 Sink 与监控区域边界的距离设置为 100 m。可以看出,两种均匀布置方案与本文的非均匀布置相比,节点的死亡时间都要早,并且非均匀布置时节点的死亡时间集中在最后十几轮中,说明本文的非均匀布置算法能够较好地均衡不同位置节点的能耗。

5 结语

网络寿命问题是传感器网络中的核心问题,建立求解传感器网络寿命最大化模型具有重要的理论价值和实际意义。本文研究了矩形传感器网络的寿命问题,给出了网络的最大

化寿命模型,通过对节点能耗的分析,根据节点与 Sink 的远近将网络分层,得出了每层的宽度,并定量规划了每层中节点的数目。

应该指出,实际的传感器网络是非常复杂的,本文的研究背景是一个特定的矩形监控区域,并且 Sink 位于矩形区域的正下方。如何建立更具普适性的求解传感器网络寿命最大化模型,是要进一步研究的课题。

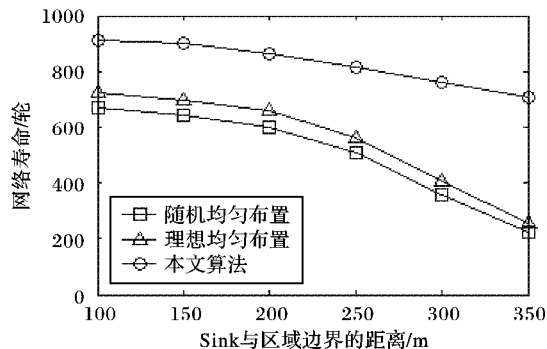


图2 Sink 距离与网络寿命

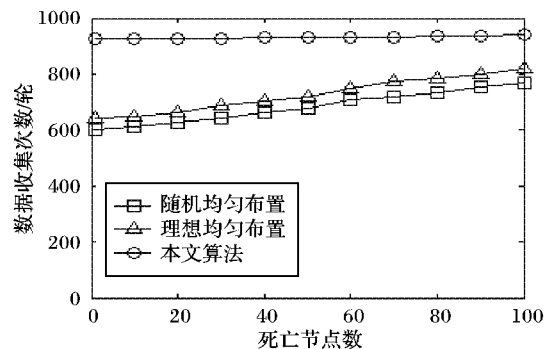


图3 节点死亡时间对比

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282 - 1291.
- [2] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163 - 174.
- [3] PERILLO M, CHENG Z, HEINZELMAN W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks [C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference Workshops. Washington, DC: IEEE Press, 2004: 74 - 79.
- [4] 李成法, 陈贵海. 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): 88 - 91.
- [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.
- [6] LIAN J, CHEN L, NAIK K, et al. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks [C]// IEEE Monograph on Sensor Network Operations. Washington, DC: IEEE Press, 2004.
- [7] HEINZELMAN W R. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [8] SLIJEPEVIC S, POTKONJAK M. Power efficient organization of wireless sensor networks [C]// IEEE International Conference on Communications: ICC. Washington, DC: IEEE Press, 2001, 2: 472 - 476.
- [9] YE FAN, ZHONG G, LU SONG-WU, et al. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks [C]// Proceedings of 10th IEEE International Conference on Network Protocols. Washington, DC: IEEE Press, 2003: 200 - 201.