

无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题

吴小兵 陈贵海

(南京大学软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

摘 要 节点非均匀分布策略能缓解无线传感器网络中的能量空洞问题. 文中从理论上探讨这种策略, 证明在节点非均匀分布的圆形网络中, 如果节点持续向 Sink 节点发送数据, 能量空洞现象将无法避免, 而当节点数目满足一定关系时, 网络中能够实现次优能耗均衡. 文中提出一种节点非均匀分布策略及相应的路由算法用于实现这种次优能耗均衡. 模拟结果显示网络生存周期终止时, 处于网络内部的节点几乎达到了能耗均衡.

关键词 无线传感器网络; 能量空洞; 节点非均匀分布

中图法分类号 TP393

The Energy Hole Problem of Nonuniform Node Distribution in Wireless Sensor Networks

WU Xiao-Bing CHEN Gui-Hai

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract The nonuniform node distribution strategy can be used to mitigate the energy hole problem in wireless sensor networks. In this paper, the authors investigate the theoretical aspects of the nonuniform node distribution strategy in multi-hop wireless sensor networks, and prove that in a circular sensor network with nonuniform node distribution and constant data reporting, the unbalanced energy depletion among the nodes in the whole network is unavoidable. In spite of this fact, suboptimal energy efficiency among the inner parts of the network is possible if the number of nodes in the network is quantified and meets some conditions. The authors propose a novel nonuniform node distribution strategy based on their analysis and a routing algorithm coupling with the proposed node distribution strategy for achieving the suboptimal energy efficiency. Simulation results show that when the network lifetime ends, the inner coronas nearly attain balanced energy depletion.

Keywords wireless sensor networks; energy hole; nonuniform node distribution

1 引 言

MEMS 技术的快速发展使大批量生产和制造微小而经济的传感器成为可能. 传感器可以用于探测周围环境的温度、湿度等信息. 无线传感器网络通

常由多个传感器节点和一个信息收集节点(Sink)组成, 布置在森林、农田、民用建筑等环境中收集人们感兴趣的信息^[1].

无线传感器网络中能耗效率非常重要. 传感器节点间往往采用多跳方式进行通信, 一些节点既产生数据也转发数据^[1]. 同时, 数据流遵循多对一的

收稿日期: 2006-12-26; 最终修改稿收到日期: 2007-09-30. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB303000)、国家自然科学基金(60573131, 60673154, 60721002)和江苏省自然科学基金(BK2005208, BG2007039)资助. 吴小兵, 男, 1979 年生, 博士研究生, 研究方向为无线传感器网络. E-mail: wuxb@dislab.nju.edu.cn. 陈贵海, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为并行与分布式计算.

模式,离 Sink 较近的节点需要承担更多的通信负载,因此这些节点容易过早耗尽自身的能量,导致在 Sink 周围出现能量空洞(energy hole). 能量空洞的出现使网络采集的数据不能进一步传送给 Sink 节点,此时网络的生存周期结束,网络中遗留大量未被充分利用的能量资源. 文献[2]中模拟实验表明如果采用节点均匀分布策略,网络中可能有高达 90% 的能量被浪费. 我们把部分节点因为过早耗尽自身能量导致网络原有覆盖区域缺失或者数据无法送达 Sink 节点的现象称作“能量空洞”现象.

本文从理论上探讨采用节点非均匀分布策略的无线传感器网络中能量空洞能否避免的问题. Li 和 Mohapatra^[3]首先提出了一个用于分析无线传感器网络中的能量空洞的模型. 作者假设网络中节点均匀分布,分析了层次结构、数据压缩等手段对避免能量空洞的有效性. Lian 等人在文献[4]中讨论了为节点装备不同的初始能量储备的方法提高网络数据容量的方法. 作者假定在一个矩形的网络中节点均匀分布. 这里网络的数据容量是指 Sink 节点收到的数据的总和. 文献[3-4]都没有回答能量空洞能否避免的问题.

Olariu 和 Stojmenovic^[5]第一次证明了在特定条件下,无线传感器网络中的能量空洞不可避免. 他们同样假设网络中节点均匀分布,传感器节点持续向 Sink 节点汇报数据. Lian^[2]等人还提出采用节点非均匀分布策略提高数据容量的思想,但仍然没有涉及节点非均匀分布策略下的能量空洞问题. 文献[6]简要讨论了使用节点非均匀分布策略的能量空洞问题. 作者假设网络中的每个节点数据采集率可调,给出了避免能量空洞的条件.

在文献[7]的工作基础上,本文从理论上进一步探讨无线传感器网络中采用节点非均匀分布策略的能量空洞问题. 不同于文献[6]的是:本文假设网络中的每个节点数据采集率恒定,同时考虑数据发送和接收过程中的能量消耗,得出了不同的结论并给出了能够实现次优能耗效率的条件和具体的路由算法. 本文证明了如果在一个圆形的无线传感器网络中节点非均匀分布并持续向 Sink 节点发送数据,节点间的能耗不均衡现象将无法避免,即能量空洞不可避免. 但是如果将网络分为多个同心等宽的圆环,网络中节点数目除最外圆环外,由外环至内环以等比 q 递增,且最外圆环中节点数目是其相邻内环节点数目的 $1/(q-1)$,网络能获得次优的能耗效率. 基于这种分析,本文提出了一个新的节点非均匀分

布策略并设计了相应的路由算法用于获得次优的能耗效率. 模拟结果显示当网络的生存周期终止时,网络内环中的节点间几乎达到了能耗均衡.

2 相关工作

针对无线传感器网络中的能量空洞问题已经有一些应对机制提出. 下面介绍一些相关工作,其中一部分已经在上一节中提到.

Li 和 Mahapatra^[3]首先提出一个数学模型用于分析无线传感器网络中的能量空洞问题. 文中假定一个圆形的网络中节点均匀分布. 该模型从网络流量的角度出发,分析和比较几种针对能量空洞问题的常见方法的有效性. 文中指出在一个节点均匀分布的无线传感器网络中,采用层次结构和数据压缩机制对于缓解能量空洞问题是有效的,增加数据采集率使能量空洞问题更加严重,而在网络中增加节点的作用不明显. 文中没有讨论无线传感器网络中能量空洞能否避免的问题.

文献[4]中作者假定在一个矩形网络中节点均匀分布. 为了提高网络的数据容量,文中提出一种节点初始能量非均匀分布的方法,使距离 Sink 较近的节点有较多的初始能量储备. 作者同时提出一种基于移动 Sink 的路由算法.

Olariu 和 Stojmenovic^[5]给出了第一个关于能否避免能量空洞问题的理论结果. 和文献[3]一样,作者假定一个圆形网络中的节点均匀分布,节点持续向 Sink 汇报收集到的数据. 文中使用的能量消耗模型是 $E = d^\alpha + c$, α 是能量衰减系数, d 是数据发送方和接收方的距离, c 是一个正值常数. 作者进一步假设网络中节点的发射半径可调,证明如果网络中被划分的圆环等宽,在路由上的能耗能够降到最低,但是此时网络中可能会出现能量空洞. 作者证明当 $\alpha > 2$ 时通过调整圆环的宽度可以避免能量空洞出现,而 $\alpha = 2$ 时,网络中则无法避免能量空洞形成.

在多跳的网络中,能量空洞往往会在离 Sink 近的区域形成. 一般认为在离 Sink 较远的地方放置更多的传感器节点是一种能够缓解能量空洞问题的措施,这就是所谓的节点非均匀分布策略. Lian^[2]等人探讨了这种策略对于提高数据容量的有效性;同时他们提出一种路由算法,该算法使部分节点轮流休眠用于节省能量消耗.

Olariu 和 Stojmenovic^[6]讨论了在网络中采用节点非均匀分布策略避免能量空洞的问题,不同于

文献[3,5]的是,作者假定网络中节点具有不同的数据率.文中仅考虑节点在发送数据过程中消耗的能量.作者认为如果网络中第 i 个圆环中节点密度和 $(k+1-i)$ 成正比,网络中能够避免能量空洞问题, k 是将圆形网络划分为等宽圆环的最佳数目.在这种方法中,离 Sink 近的节点只能有较低的数据率.

Perillo^[8]等人总结了无线传感器网络中出现能量空洞的两种情况.在第一种情况下,网络中所有的传感器节点直接将监测到的数据发送给 Sink,这样离 Sink 较远的节点更容易耗尽自身的能量.在另外一种情况下,网络中的节点通过多跳方式将监测到的数据传递给 Sink,这样离 Sink 近的节点较快耗尽自身的能量.当某些节点最先耗尽自身的能量时,在它们监测的区域就形成能量空洞.作者假定节点的通信半径可变,将网络生存周期的最大化问题归结为一个线性规划问题.

文献[9-13]等探讨了在无线传感器网络中通过分簇机制建立网络层次结构的方法. LEACH^[9]使用簇头节点轮换的方法来选择簇头节点,避免簇头过早耗尽自身的能量.和 LEACH 不同, HEED^[10]在选择簇头节点时考虑了节点的剩余能量和簇内通信代价. UCS^[11], EECS^[12]和 EEUC^[13]考虑到网络中部分簇头节点可能会承担较多的网络流量或者在单位时间内有较多的能耗,提出了形成不同大小的簇,这样簇头节点有较多的剩余能量用于转发来自其他节点的数据.

其他的一些相关工作试图引入动态性来缓解无线传感器网络中能耗不均衡的问题. Wang^[14]等人使用一个移动中继节点来延长网络的生存周期.作者发现移动中继仅需要在离 Sink 节点两跳范围内移动,网络的生存周期就可以提高近四倍.文中还提出了两种节点移动和路由算法. Luo 和 Hubaux^[15]采用移动 Sink 的方法来解决网络中节点能耗不均衡的问题.由于采用了移动的 Sink,它周围的节点随着时间不断变化,这样可以避免在 Sink 节点周围形成能量空洞.作者证明在一个圆形的传感器网络中,将 Sink 节点放置在圆心位置最能节省能量,如果采用移动 Sink 的方式, Sink 沿网络的边缘移动是最符合节能要求的.

3 网络模型及假设

与文献[14]类似,本文假设网络中所有的节点

分布在一个半径为 R 的圆形区域中.网络中唯一的 Sink 放置于圆心处,如图 1 所示.我们还假设所有的节点都是同质的,并且都有一个 ID 号,每个节点的通信半径固定为 1 个单位.网络被划分为 $R(R>1)$ 个相邻的环状区域,每个圆环的宽度是 1 个单位.从内向外,用 C_i 表示第 i 个圆环,这样 C_i 区域中的节点到 Sink 的距离在 $(i-1)$ 和 i 之间.

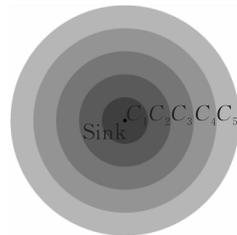


图 1 圆形网络区域

另外,假设网络中的每个节点在单位时间内产生和发送 L 比特数据,处于圆环 $\{C_i | i \neq R\}$ 中的节点需要向 Sink 转发自身和处于圆环 $\{C_j | (i+1) \leq j \leq R\}$ 中节点产生的数据.特别地,圆环 C_R 中的节点不需要为其他圆环中的节点转发数据.另外假设在任何一个转发节点都没有数据聚集(data aggregation)过程.本文使用的能量消耗模型是:每个节点的初始能量是 $\epsilon > 0$. Sink 没有能量限制.一个节点发送一比特数据消耗的能量是 e_1 ,接受一比特数据消耗的能量是 e_2 ,这里 $e_1 > e_2 > 0$.后面我们可以看到本文的结论也适用于 $e_2 > e_1$ 的情形.

4 对节点非均匀分布策略的理论分析

本节我们从能量的角度对在无线传感器网络中采用节点非均匀分布的策略进行理论分析.首先对组成网络的圆环进行能耗分析,然后证明在全网中最高效地实现能耗均衡不可能,即能量空洞不可避免.最后证明在除最外圆环外的内部圆环区域中实现能耗均衡是可能的.

4.1 能耗分析

用 N_i 表示圆环 C_i 中传感器节点的数目; E_i 表示圆环中所有节点在单位时间内的能耗;假设圆环中节点数据能够经过一跳传递给相邻的圆环,最终以经过 i 跳后到达 Sink 节点.我们用下面的方式来计算每个圆环中所有节点消耗的能量.

根据以上假设和网络模型,圆环 C_R 中在单位时间内所有节点消耗的能量为

$$E_R = N_R L e_1.$$

其他圆环中的节点既要发送自身产生的数据,又要转发来自外部圆环的数据,所以

$$E_i = L \left[\sum_{k=i+1}^R N_k (e_1 + e_2) + N_i e_1 \right], 1 \leq i \leq R-1.$$

这样每个圆环中所有节点在单位时间内消耗的能量是

$$E_i = \begin{cases} N_R L e_1, & i=R \\ L \left[\sum_{k=i+1}^R N_k (e_1 + e_2) + N_i e_1 \right], & 1 \leq i \leq R-1 \end{cases} \quad (1)$$

4.2 网络能耗均衡的不可能性

理想情况下,网络中的每个节点同时耗尽自身的能量时,能耗效率得到了最优化.此时,网络的生存时间是

$$\frac{N_1 \epsilon}{E_1} = \frac{N_2 \epsilon}{E_2} = \dots = \frac{N_{R-1} \epsilon}{E_{R-1}} = \frac{N_R \epsilon}{E_R} \quad (2)$$

定理 1. 最优化能耗效率不可达,即式(2)不可能成立.

证明. 仅需要证明在圆环 C_R 和 C_{R-1} 之间不可能实现能耗均衡即可.采用反证法证明.

假设

$$\frac{N_{R-1} \epsilon}{E_{R-1}} = \frac{N_R \epsilon}{E_R} \quad (3)$$

成立.将式(1)代入式(3)后,经过简单的变换后我们得到

$$N_{R-1} \epsilon N_R L e_1 = N_R \epsilon L [N_R (e_1 + e_2) + N_{R-1} e_1] \quad (4)$$

化简式(4)后得到

$$N_R (e_1 + e_2) = 0 \quad (5)$$

显然式(5)不可能成立.

证毕.

定理 1 表明在一个圆形网络中如果节点持续向 Sink 节点汇报数据,节点通信半径固定,即使使用节点非均匀分布策略也无法避免能量空洞的形成.这是由无线传感器网络内在的“多对一”的通信模式决定的.

4.3 次优网络能耗均衡

尽管在全网范围内实现节点间的能耗均衡不可能,但是如果能够实现次优的能耗均衡也是非常有用的.我们定义次优的能耗均衡是网络中除了最外圆环中的节点外,其他圆环中的节点能够实现能耗均衡.

定理 2. 实现次优的能耗均衡在理论上是可能的,此时系统中除圆环 C_R 中的节点外,其他节点能达到最佳的能耗效率.

证明. 我们采用演绎方法证明下面的公式

成立.

$$\frac{N_i \epsilon}{E_i} = \frac{N_{i+1} \epsilon}{E_{i+1}}, 1 \leq i \leq R-2 \quad (6)$$

假设式(6)成立,则

$$N_i E_{i+1} = N_{i+1} E_i \quad (7)$$

根据式(1),化简后得到

$$\frac{N_i}{N_{i+1}} = \frac{\sum_{k=i+1}^R N_k}{\sum_{k=i+2}^R N_k} > 1 \quad (8)$$

因此只要满足式(8),则式(6)成立.

证毕.

推论 1. 如果在网络中可能实现次优的能耗均衡,则网络中节点的数目从圆环 C_{R-1} 到最内圆环 C_1 以等比递增.

证明. 令 $N = \sum_{i=1}^R N_i$ 表示网络中所有的节点数;根据等比定理式(8)可以写为

$$\begin{aligned} \frac{N_i}{N_{i+1}} &= \frac{N - \sum_{k=1}^i N_k}{N - \sum_{k=1}^{i+1} N_k} = \frac{N - \sum_{k=1}^{i-1} N_k}{N - \sum_{k=1}^i N_k} \\ &= \frac{N_{i-1}}{N_i} > 1, 2 \leq i \leq R-2 \end{aligned} \quad (9)$$

证毕.

定理 3. 如果网络中节点的数目从圆环 C_{R-1} 到最内圆环 C_1 以等比 $q (q > 1)$ 递增,且圆环 C_R 和圆环 C_{R-1} 中的节点数目之比为 $1/(q-1)$,则在网络中能够实现次优的能耗均衡.

证明. 在定理 2 的证明中,我们知道只要满足式(8),则式(6)成立.因为网络中节点的数目从圆环 C_{R-1} 到最内圆环 C_1 以等比 $q (q > 1)$ 递增,所以由等比数列求和公式:

$$\sum_{k=j}^{R-1} N_k = \frac{N_{R-1} (q^{R-j} - 1)}{q - 1}, q > 1, 1 \leq j \leq R-1.$$

而由命题条件, $N_{R-1} = (q-1)N_R$, 所以

$$\sum_{k=j}^{R-1} N_k = N_R (q^{R-j} - 1).$$

因此,

$$\sum_{k=j}^R N_k = N_R q^{R-j} \quad (10)$$

式(8)的右边 $\frac{\sum_{k=i+1}^R N_k}{\sum_{k=i+2}^R N_k} = \frac{N_R q^{R-(i+1)}}{N_R q^{R-(i+2)}} = q = \frac{N_i}{N_{i+1}}$ 等于

左边,即式(8)成立.

证毕.

5 节点非均匀分布策略下的路由

本文提出的节点非均匀分布策略与文献[2]中的策略类似. 基本思想是在离 Sink 较近的圆环中布置较多的节点. 不同之处在于: 基于前面的理论分析, 我们能够定量规划网络中每个圆环中节点的数目. 假设圆环 C_i 中节点的密度是 ρ_i , 则从最外面的圆环 C_R 到最里面的圆环 C_1 , 节点密度逐渐下降. 因此

$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \dots > \rho_R \quad (11)$$

在图 1 中颜色较深的圆环表示该区域的节点密度较高.

在前面分析结果的基础上, 我们假定从圆环 C_{R-1} 到圆环 C_1 中的节点数目以等比系数 q ($q > 1$) 递增, 而圆环 C_R 和 C_{R-1} 中的节点数目之比为 $1/(q-1)$, 即

$$\begin{cases} \frac{N_i}{N_{i+1}} = q \\ \frac{N_{R-1}}{N_R} = q-1 \end{cases}, \quad q > 1, 1 \leq i \leq R-2 \quad (12)$$

我们假设网络中的节点通过适当的布置, 使得圆环 C_R 的每个节点能够和圆环 C_{R-1} 中的 $(q-1)$ 个节点直接通信, 其他圆环中的每个节点能够和相邻的内环中的 q 个节点直接通信, 且它们间的距离是 1 个单位长度; 这样建立到达 Sink 的路径跳数最小.

令 S_i 代表圆环 C_i 的面积, 则圆环 C_i 中的节点密度为

$$\rho_i = \frac{N_i}{S_i} = \frac{N_i}{\pi(2i-1)} \quad (13)$$

再根据式(12), 可以得出两个相邻圆环 C_{i+1} 和 C_i 之间的节点密度之比为

$$\begin{cases} \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = \frac{2i-1}{q(2i+1)} \\ \frac{\rho_R}{\rho_{R-1}} = \frac{2R-3}{(q-1)(2R-1)} \end{cases}, \quad q > 1, 1 \leq i \leq R-2 \quad (14)$$

这表明相邻圆环间节点密度之比仅和等比系数以及节点处在哪个圆环相关.

下面我们给出基于上述节点非均匀分布策略的分布式能耗均衡路由算法. 算法的伪代码见算法 1. 因为我们采用了上述的节点非均匀分布策略, 最外环中的任意一个节点可以和圆环 C_{R-1} 中的 $(q-1)$ 个节点直接通信, 其他圆环中的任意一个节点可以和相邻的内圆环中的 q 个节点直接通信. 算法的基本思想是外层圆环将自身采集的数据逐层发送至

Sink 节点, 外层节点选择其相邻内环中的对应节点作为待选中继节点. 假设网络中有一个初始化过程, 使节点能够发现它的上游节点和下游的 q 个待选中继节点并且记录下相应的 ID 标识(对于最外层的节点只需要发现它的 $(q-1)$ 个待选中继节点). 为了在待选中继节点中平衡能量消耗, 节点每次发送数据时总是选择这些待选中继节点中剩余能量最多的一个. 如果存在多个含有最多能量的节点, 随机选择它们其中的一个. 在进行这种选择的过程中, 节点必须和待选中继节点交换相关信息. 选择完成以后, 源节点就将自己收集到的数据和来自上游的数据发送给选中的中继节点. 不转发上游数据的节点将自己的数据直接发送给一个选中的中继节点. 被选中的中继节点将重复上述过程直到数据到达 C_1 中的节点, 最后数据被发送给 Sink 节点.

算法 1. 基于节点非均匀分布策略的分布式能耗均衡路由.

1. 当从节点 i 收到能量查询消息 $ENERGY_QUERY_MSG$
如果 $THIS.parent.equal(i)$ 为真, 则
 $Send(i, ENERGY_ACK_MSG)$
 //向父节点报告自身剩余能量信息;
 否则 $DiscardMsg$.
2. 当从节点 i 收到能量查询回复消息 $ENERGY_ACK_MSG$
如果 $THIS.child.equal(i)$ 为真, 则
 $UpdateEnergyInfo(THIS)$
 //更新待选中继节点剩余能量信息;
 否则 $DiscardMsg$.
3. 当从节点 i 收到一个数据转发消息 $DATA_FORWARD_MSG$
 ① $k = SelectNextRelay(THIS)$
 //从待选中继节点中选择具有最大剩余能量的一个;
 ② 如果 $THIS.parent.equal(i)$ 为真, 则
 $Send(k, DATA_FORWARD_MSG(data))$
 //发送数据给中继节点 k ;
 否则 $DiscardMsg$.
 ③ $Send(k, DATA_FORWARD_MSG(THIS.data))$
 //发送自身收集的数据给中继节点 k .
4. 没有收到消息时
 ① $k = SelectNextRelay(THIS)$
 //从待选中继节点中选择最大剩余能量的一个;
 ② $Send(k, DATA_FORWARD_MSG(THIS.data))$
 //发送自身收集的数据给中继节点 k .

6 模拟分析

我们对本文提出的节点非均匀分布策略和相应

的路由算法进行了模拟,并比较了该策略和其他两种节点分布策略在网络生存周期、网络能量剩余率和数据送达率三方面的性能.我们采用在第3节中给出的能量消耗模型,忽略了MAC层和物理层的相关因素.表1中是模拟实验使用的基本参数.

表1 模拟参数

| 参数 | 值 |
|----------------------|----------------|
| 节点初始能量(ϵ) | 100 单位 |
| 发送一比特数据消耗能量(e_1) | $0.75/10^4$ 单位 |
| 接收一比特数据消耗能量(e_2) | $0.5/10^4$ 单位 |
| 单位数据长度(L) | 1000 比特 |
| 网络半径(R) | 2~6 |
| 最外环节点数(N_R) | 4 |
| 相邻内外环节点数目比(q) | 2~3 |

6.1 节点的剩余能量

首先在半径为4的网络中布置了32个节点,最外圆环 C_4 中有4个节点, $C_3 \sim C_1$ 3个圆环中的节点数目以等比系数2增长.图2中给出了当网络生存周期结束时,网络中每个节点的剩余能量值.其中,ID号在1和4之间的对应圆环 C_4 中的节点,ID号在5和8之间的对应圆环 C_3 中的节点,依此类推.网络的生存周期被定义为从最开始持续到网络中第一次出现有节点耗尽能量为止.当网络中的节点不能继续接收或者发送数据时,我们就认为该节点已经耗尽了能量.从图2中我们可以看出,当网络的生存周期结束时,最外圆环 C_4 中节点的剩余能量最多,远大于其他圆环中节点的剩余能量,且其他圆环中节点的剩余能量值都小于0.5,说明这些节点几乎同时耗尽了能量,这和本文的分析一致.然后,我们在同样的网络区域布置了108个节点,最外圆环 C_4 中的节点数目是4, $C_3 \sim C_1$ 3个圆环中的节点数目以等比系数3增长.图3中给出网络的生存周期结束时各个节点的能量剩余.同样可以看到除最外圆环有较多能量剩余外,其他圆环中的节点几乎耗尽了能量.这和本文的分析也十分吻合.同时,可以看到外部圆环中的节点都仅有少于0.5个单位的能量剩余,说明了本文提出的基于节点非均匀分布策略的路由算法有非常高的能耗效率.

另外,对比图2和图3中最外圆环中的能量剩余值可以发现 $q=3$ 时能量剩余较少,可以解释如下:理论上当网络的生存周期结束时,内部圆环中的节点同时耗尽了自身的能量,仅有最外圆环中的节点有能量剩余,因此最外圆环中的剩余能量可以计算如下:

$$E_{\text{residual}} = N_R \epsilon - \frac{N_{R-1} \epsilon}{E_{R-1}} \times E_R.$$

根据式(1)和式(12)得

$$E_{\text{residual}} = \frac{N_R \epsilon (e_1 + e_2)}{q e_1 + e_2} \quad (15)$$

由式(15)可以看出在其他参数固定的情况下,最外圆环中的剩余能量值仅与最外圆环中的节点数目和 q 值有关. q 值较大时,剩余能量值较小,和模拟结果一致.

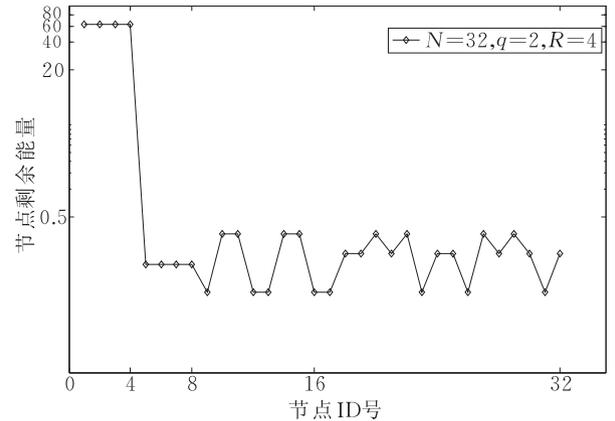


图2 网络生存周期结束时每个节点的剩余能量, $q=2$

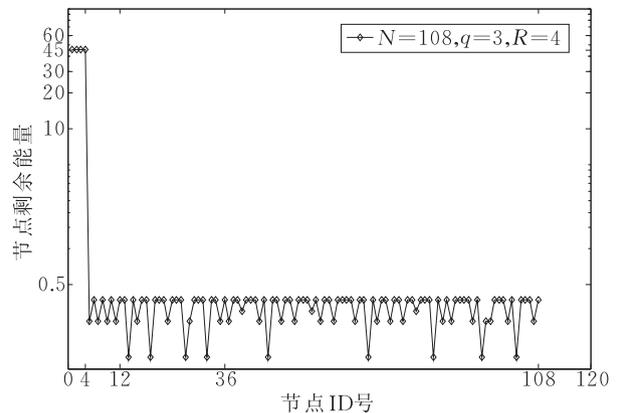


图3 网络生存周期结束时每个节点的剩余能量, $q=3$

6.2 和其他节点分布策略的比较

文献[2]提出的节点非均匀分布策略中假定部分节点不采集数据,仅转发数据.对于外环中采集数据的节点,在内部各个圆环中总是放置相同数目的节点专门用于转发数据.例如,如果最外圆环 C_R 中有4个节点,则在内部 $(R-1)$ 个圆环中各放置4个节点用于转发数据.可以认为采用这种策略的网络退化成一个单跳网络.因此,我们不比较本文提出的节点分布策略和文献[2]提出的策略.

我们通过模拟实验比较了本文提出的节点非均匀分布策略和节点随机非均匀分布策略、节点均匀分布策略在网络生存周期、网络能量剩余率和数据送达率方面的性能.本文中所指的节点随机非均匀分布策略是指基于本文的分析,限定网络中各圆

环中的节点数目;除最外圆环外,节点数目以等比 $q(q>1)$ 增长;最外圆环和次外圆环中节点数目之比为 $1/(q-1)$.但每个圆环中的节点随机出现在圆环内的任何位置.节点均匀分布策略是指网络中的节点随机出现在网络中的任何位置,网络中任意圆环中节点的数目不限定.在使用节点非均匀分布和节点随机非均匀分布策略的模拟实验中,我们在最外圆环布置了4个节点,内部圆环以等比 $q=2$ 增长.我们模拟了网络半径从2到6的情形.所有数据都是算法在运行 10^5 次后的取平均值得到的结果.

为了便于比较分析,我们在节点随机非均匀分布策略和节点均匀分布策略中实现了类似于本文提出的路由算法.算法中仍然有一个初始化过程用于节点找到它的下游中继候选节点.节点总是选择它的下游节点中有最多能量剩余的作为数据转发中继.

图4中是网络在3种不同节点分布策略下的生存周期.可以看到网络半径为2时,在网络生存周期方面,采用均匀分布策略和随机非均匀分布策略的网络优于采用非均匀分布策略的网络.同时注意到此时采用均匀分布策略的网络的数据送达率小于50%,采用随机非均匀分布策略的网络的数据送达率接近50%,见图6.数据送达率是指Sink节点收到的数据占有所有节点产生数据的比率.这说明采用这两种节点分布策略时,有接近或者超过一半的数据没有送达Sink节点,即圆环 C_1 中的大部分节点没有转发外围节点的数据,所以网络的生存周期超过采用非均匀分布策略时的网络生存周期.当网络半径大于2时,采用非均匀分布策略时的网络生存周期都超过采用均匀分布策略和随机非均匀分布策略时的网络生存周期,并且随着 R 的增长网络生存周期变化不明显,说明了本文提出的非均匀分布策略有较好的扩展性.

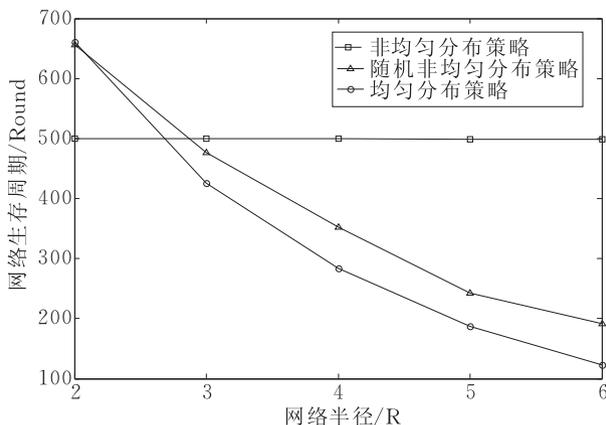


图4 不同节点分布策略的网络生存周期

图5中是网络在3种不同节点分布策略下的网络能量剩余率.在本文的讨论中,网络能量剩余率是指在网络的生存周期结束时,网络中剩余的能量总和与网络中所有节点的初始能量总和之间的比值.从图5中我们可以看到,随着网络半径的增大,采用非均匀分布策略的网络的能量剩余率呈递减趋势,使用均匀分布和随机非均匀分布策略的网络的能量剩余率呈递增趋势.采用节点非均匀分布策略的网络的能量剩余率要远低于采用其他两种节点分布策略时的网络的能量剩余率.另外,采用随机非均匀分布策略比采用均匀分布策略也有更高的能耗效率,也印证了非均匀分布策略相对于均匀分布策略的有效性.

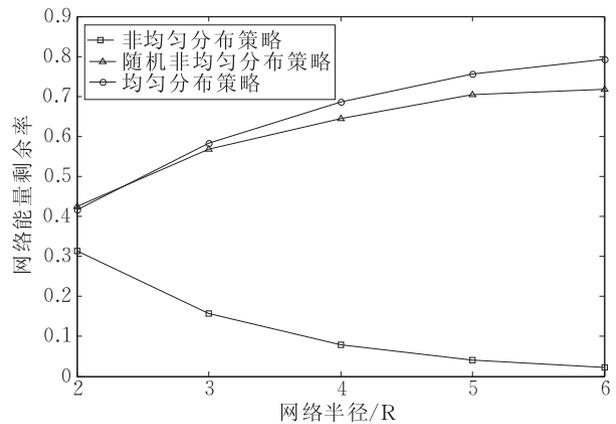


图5 不同节点分布策略的网络能量剩余率

在图6中,我们给出了这3种不同节点分布策略在数据送达率方面的性能比较.从图中可以看出,采用非均匀分布策略的网络在数据送达率方面表现最好,当网络半径增大时,数据送达率也增加,说明了该策略有较好的扩展性.采用随机非均匀分布策略的网络的数据送达率也呈上升趋势,从侧面再次说明了非均匀分布策略的有效性.

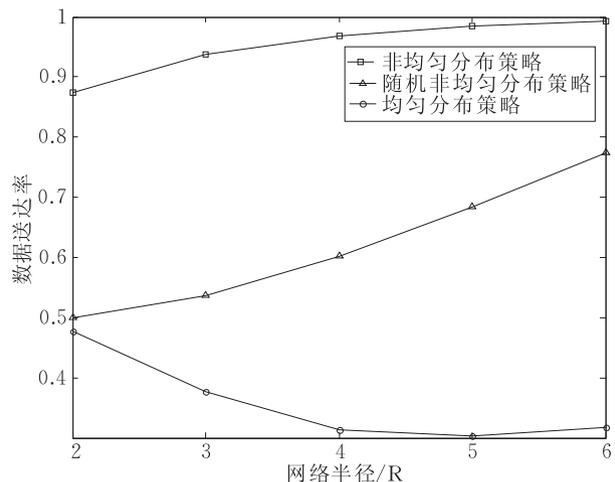


图6 不同节点分布策略的数据送达率

7 结束语

本文从理论上分析了针对无线传感器网络中的能量空洞现象而采取的节点非均匀分布策略. 分析表明无线传感器网络中, 如果节点持续向 Sink 发送数据, 即使采用节点非均匀分布策略也无法避免能量空洞的出现, 这是由网络本身的多对一的数据通信模式决定的. 能量空洞的出现会严重影响网络的能耗效率. 尽管如此, 我们证明网络中的节点满足一定的关系时, 可以在网络中实现次优的能耗效率. 本文提出一种新的节点非均匀分布策略并设计了相应的路由算法用于实现这种次优的能耗效率. 该策略量化了网络中相邻圆环间的节点数目关系, 在此基础上可以算出相邻圆环中的节点密度关系. 模拟分析显示使用本文提出的节点非均匀分布策略及相应路由算法的网络达到了次优的能耗效率, 网络中仅有非常少的能量被浪费.

节点非均匀分布策略是实现次优的能耗效率的基础. 需要指出的是这种高效率同时伴随着一些网络开销. 首先, 网络中节点数由外环到内环以等比增长, 导致网络中的节点总数呈指数级增长. 因此, 只有当传感器节点能够以低成本大规模生产时, 这种节点非均匀策略才有可能. 一个可能的替代方法是使用较少的节点, 每个节点有不同的初始能量储备^[4]. 另外, 本文假设了一个理想的 MAC 层来处理节点间的信道问题. 同时, 在实际部署过程中我们还需要非常成熟的传感器节点制造技术和精确部署技术来保证这种非均匀分布策略能够实施. 随着技术的进步, 有可能对无线传感器网络进行自动化部署, 这种自动化部署能够保证本文提出的非均匀分布的部署方案. 即使在自动化部署不可行的情况下, 也可以采用随机非均匀分布部署的方式. 6.2 节的实验结果也表明采用随机非均匀分布部署的方式能大幅提升整个网络的性能.

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114
- [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): 121-145
- [3] Li J, Mohapatra P. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks//*Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*. Dallas, TX, 2005: 2721-2725
- [4] Lian J, Chen L, Naik K, Otzu T, Agnew G. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks//Phoha S, La Porta T F, Griffin C eds. *IEEE Monograph on Sensor Network Operations*. IEEE Press, 2004: 91-183
- [5] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting//*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. Barcelona, Spain, 2006: 1-12
- [6] Olariu S, Stojmenovic I. Data-centric protocols for wireless sensor networks//Stojmenovic I. *Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures*. Wiley, 2005: 417-456
- [7] Wu X B, Chen G H, Das S K. On the energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks//*Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)*. Vancouver, Canada, 2006: 180-187
- [8] Perillo M, Cheng Z, Heinzelman W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks//*Proceedings of the IEEE GLOBECOM Workshops on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Dallas, TX, 2004: 74-79
- [9] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670
- [10] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 660-669
- [11] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering//*Proceedings of the 5th International Workshop on Algorithm for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks*. Denver, CO, 2005
- [12] Ye M, Li C F, Chen G H, Wu J. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. *International Journal of Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 2007, 3(2): 99-119
- [13] Li C F, Ye M, Chen G H, Wu J. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks//*Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)*. Washington DC, 2005
- [14] Wang W, Srinivasan V, Chua K. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks//*Proceedings of the ACM MobiCom*. Cologne, Germany, 2005: 270-283
- [15] Luo J, Hubaux J P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks//*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. Seattle, WA, 2005: 819-830



WU Xiao-Bing, born in 1979, Ph. D. candidate. His research interests focus on energy-efficient design in wireless sensor networks.

CHEN Gui-Hai, born in 1963, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include interconnection networks, high performance computer architecture, graph theory, P2P computing and wireless sensor networks.

Background

In a multi-hop wireless sensor network, a subset of nodes behaves as both data originator and router. Data collected by nodes will be sent to the sink hop by hop. As a result, nodes nearer the sink always run out of energy and die earlier, leading to an energy hole in the network. No more data can be delivered to the sink and quite a lot of energy is wasted when the energy hole appears. The nonuniform node distribution strategy, i. e., adding more nodes to the traffic-intensive areas, is an intuitive way to tackle this problem. But whether this kind of strategy can thoroughly avoid the energy hole problem is not fully explored. The authors try to answer this question in this paper. The authors prove that although the energy hole can not be avoided in a network with nonuniform node distribution and constant data reporting,

suboptimal energy efficiency is still possible. The authors propose a new nonuniform node distribution strategy and devise corresponding routing algorithm to attain the suboptimal energy efficiency.

This work is supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China under grant No. 2006CB303000, the National Natural Science Foundation of China under grants Nos. 60573131, 60673154 and 60721002, and Natural Science Foundation of Jiangsu Province under grants No. BK2005208 and No. BG2007039. The group has published highly selective research papers in the fields of wireless sensor networks, wireless mesh networks, and P2P systems.