

基于梯度的无线传感器网络能耗分析及能量空洞避免机制

刘 韬¹

摘 要 在基于“梯度汇聚”模型的无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 中, 因节点间能量消耗不平衡而引发的能量空洞一直是影响网络生存周期的重要原因. 本文分别分析了无通信干扰的自由空间环境和瑞利衰落环境下网络中节点的能量消耗, 提出了一种基于节点能量非均匀分布的能量空洞避免机制, 即根据节点的能耗水平为每个节点储备不同的初始能量. 并结合通信干扰、休眠机制等因素, 研究了基于“梯度汇聚”模型的无线传感器网络生存周期的上界和下界. 模拟结果表明, 该机制提高了能量的利用效率, 延长了网络的生存周期.

关键词 无线传感器网络, 能量空洞, 能量高效, 梯度模型

引用格式 刘韬. 基于梯度的无线传感器网络能耗分析及能量空洞避免机制. 自动化学报, 2012, 38(8): 1353–1361

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.01353

Energy Consumption Analysis and Energy Holes Avoidance for Gradient Based Routing in Wireless Sensor Networks

LIU Tao¹

Abstract In wireless sensor networks (WSNs) using gradient based routing, the uneven energy dissipation among nodes can lead to energy holes and significantly reduces the lifetime of network. In this paper, we analyze the energy consumption of nodes on gradient sinking model in both free space and Rayleigh fading environment, and propose a scheme to avoid energy holes with nonuniform energy distribution, that is, a node is equipped with initial energy according to its energy consumption. Then, we investigate the upper and lower bounds of network lifetime in a WSN using gradient based routing by taking into consideration various factors such as communication interference, sleeping mechanism, etc. Simulation results indicate that our scheme can increase energy efficiency and prolong network lifetime.

Key words Wireless sensor network (WSN), energy hole, energy efficiency, gradient model

Citation Liu Tao. Energy consumption analysis and energy holes avoidance for gradient based routing in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(8): 1353–1361

无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 是由大量传感器节点组成的一种特殊的 Ad-hoc 网络, 每个传感器节点的电池容量是有限的, 提高节点能量的利用效率一直是无线传感器网络研究的重要内容^[1].

无线传感器网络中, 大多数节点往往采用多跳路由的方式将采集到的数据传递给汇聚节点 (Sink)^[2]. 为了解决传统多跳路由协议的弊端, 学者们提出了许多有效的协议来延长网络的生命周期, 如: 康一梅等^[3] 提出 LPH (Low-power hierarchi-

cal), 利用动静态地址结合的方式提高网络层次及维护性, 同时通过优化拓扑的方式降低簇内通信能耗, 延长了网络寿命. 洪榛等^[4] 提出了一种基于 N 阶近邻理论的自适应分布式簇路由协议, 通过对节点分布离散度及曲率变化的分析自动确定最优簇数量, 进而延长了网络的寿命. 为了降低总能耗, 文献 [5] 提出了“梯度汇聚”的模型, 按照节点到 Sink 的距离将节点划分为不同的梯度集合, 每个节点必须按照梯度递减的多跳路由顺序向 Sink 传递数据. 文献 [6] 进一步提出将网络划分为以 Sink 为圆心的若干个相邻的环状区域, 位于同一环状区域的节点具有相同的梯度, 每个圆环的宽度为节点的最大传输半径, 节点只能将数据传递给相邻环中的节点. 这样, 离 Sink 较近的内部环中的节点需要承担更多的通信负载, 因而过快地耗尽自身的能量而死亡, 这导致在 Sink 周围出现能量空洞 (Energy hole)^[7]. 能量空洞的出现阻碍了其他节点的数据传递到 Sink, 造成网络死亡. 此时, 网络中非能量空洞处的节点却遗留下了大量的能量. 文献 [8] 表明在节点均匀分布的传

收稿日期 2011-10-12 录用日期 2012-02-20
Manuscript received October 12, 2011; accepted February 20, 2012

国家自然科学基金 (61102007), 中央高校基本科研业务费专项基金 (12NZYQN18) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61102007) and Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (12NZYQN18)

本文责任编辑 赵千川

Recommended by Associate Editor ZHAO Qian-Chuan

1. 西南民族大学计算机科学与技术学院 成都 610041

1. School of Computer Science and Technology, Southwest University for Nationality, Chengdu 610041

传感器网络中, 能量空洞的产生造成网络死亡时, 网络中有近 90% 的能量被浪费. 所以能量空洞现象降低了能量的利用效率, 极大影响了网络的生命周期.

为了避免能量空洞, 平衡节点的通信负担, 文献 [9] 提出节点的数据并不总是沿着 Sink 的方向传递, 在某些时间段内也可能沿着背离 Sink 的方向将数据传递给外环的节点, 再由外环节点将数据直接发给 Sink. 这种方案虽然能够平衡节点的通信负担, 但某些时间段内数据沿着背离 Sink 的方向传递, 造成能量的浪费. 并且要求节点具备将数据直接传递给 Sink 的能力, 这缩小了该方案的应用范围. 文献 [10] 则采用节点非均匀分布的策略来避免能量空洞, 提出当网络中的节点数目由外环至内环以等比 q 递增时, 网络能获得次优的能耗效率, 但同时作者也认为这种策略会导致网络中的节点总数呈指数级增长, 只有当节点能够以低成本大规模生产时, 这种策略才有可能. 文献 [11] 提出了非均匀分簇的策略来避免能量空洞, 采用不相等的簇半径来平衡簇头的能耗, 但这种策略增加了建立和维系簇的开销. 所以需要新的更好的方案来避免能量空洞的产生. 本文在网络中节点均匀分布和采用“梯度汇聚”模型的情况下, 分别计算了无通信干扰的自由空间环境和瑞利衰落环境下节点的能量消耗, 提出可以按照节点能耗水平给每个节点储备不同的初始能量, 目的是合理分配能量, 提高能量的利用效率, 避免能量空洞的产生, 延长网络的生命周期. 并结合通信干扰、休眠机制等因素, 研究了基于“梯度汇聚”模型的无线传感器网络生存周期的上界和下界.

1 网络模型与能量模型

与文献 [9] 类似, 本文假设网络中所有的节点均匀分布在一个半径为 L 的圆形区域中, Sink 位于圆心处, 节点密度为 p . 所有的节点具有相同的最大无线传输半径 R , 且每个节点拥有其邻居节点的位置信息. 网络被划分为 n ($n = L/R$) 个相邻的环状区域, 每个圆环的宽度为 R , 从圆心向外, 各圆环依次表示为 C_1, C_2, \dots, C_n , 如图 1 所示.

假设每个节点周期性的采集和发送数据, 在每个工作周期内产生和发送 l 比特数据, 处于圆环 C_i 中的节点只能等概率随机选择圆环 C_{i-1} 中的节点作为下一跳的数据转发节点 ($1 < i \leq n$). 特别地, 位于最内层环 C_1 中的节点直接将数据发送给 Sink. 所以, 处于圆环 C_i 中的节点的数据经过 i 跳后到达 Sink.

传感器节点的能耗可以分为两部分: 一是和通信无关的能耗, 包括传感器采集数据和处理数据的能耗; 二是无线数据通信的能耗. 相对于和通信无关的能耗, 无线数据通信的能耗要高得多. 传感器节

点在每个工作周期内有四种工作状态: 发送状态、接收状态、侦听(空闲)状态和休眠状态. 节点处于发送状态时, 能耗最大. 接收状态和侦听状态下, 节点的能耗接近, 且略小于发送状态的能耗. 休眠状态下, 节点的能耗极低. 如果不考虑通信干扰和信道衰落, 可以采用与文献 [12] 相同的无线通信能量消耗模型: 节点发射 1 比特的数据到距离为 x 的位置, 消耗的能量为 $\epsilon_{elec} + \epsilon_{amp} \times x^2$, 其中 ϵ_{elec} 表示发射电路损耗的能量, $\epsilon_{amp} \times x^2$ 表示功率放大损耗(这里采用自由空间模型). 而节点接收 1 比特的数据消耗的能量为 ϵ_{elec} .

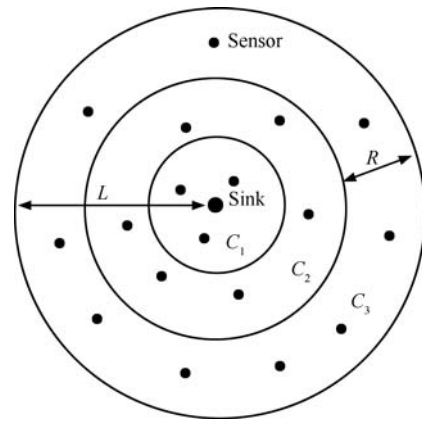


图 1 网络模型 ($n = 3$)

Fig. 1 Network model ($n = 3$)

2 “梯度汇聚”机制下的非均匀能量分布

2.1 “梯度汇聚”机制下的能耗分析

如图 2 所示, 节点 a 是环 C_i 的外边界节点 (Out-bound nodes), 而节点 b 属于 C_i 的内边界节点 (In-bound nodes), 位于它们转发源区域 (Source area) 内的节点才可能将其作为转发节点. 显然, 外边界节点 a 的转发源区域面积大于内边界节点 b , 直观判断节点 a 会比节点 b 承担更多的转发任务. 另外, 节点 a 和 b 将它们的数据发送给位于其转发可达区域 (Reachable area) 内的节点, 从图 2 还可以看出, 外边界节点 a 的平均传送距离应当大于内边界节点 b , 这两点都造成同一梯度外边界节点的能耗应当大于内边界节点.

正如文献 [13] 所指出, 在采用网络数据“梯度汇聚”的过程中, 网络数据流分布不仅存在全局不均衡性, 而且同一梯度的节点还存在内疏外密的反向不均衡现象, 能量消耗也随之存在不均衡现象. 以下将具体分析各节点的能耗.

2.2 发送数据的能耗

图 3 显示了位于环 C_i 的节点 u 在环 C_{i-1} 的转

发可达目的区域 (图 3 中条纹部分), 即位于该区域内的节点才有可能转发来自节点 u 的数据.

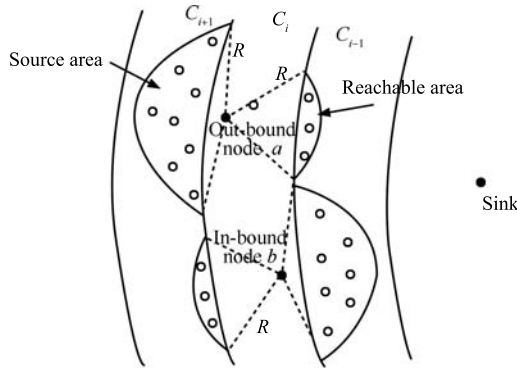


图 2 同一层次的内外界节点
Fig. 2 In/out-bound node in the same corona

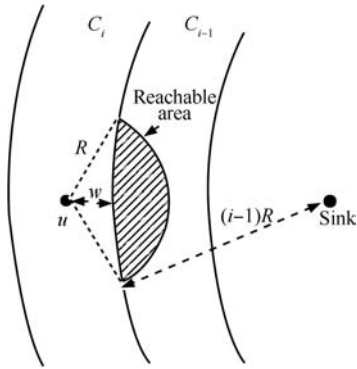


图 3 节点的转发可达目的区域
Fig. 3 Reachable area in C_{i-1}

为计算转发目的区域的面积, 假设以节点 u 为圆心、半径分别为 r 和 $r + dr$ 的两条弧和以 Sink 为圆心、 $(i-1)R$ 为半径的圆所围成的图形 (即图 4 中的条纹部分) 的面积为 $I(r)$. r 为该图形到节点 u 的距离, dr 表示 r 的无穷小的变化量, 点 A 和点 B 为该图形和以 Sink 为圆心, $(i-1)R$ 为半径的圆的两个交点, φ 表示弧 \widehat{APB} 的长度. 显然, $I(r) = \varphi dr$. φ 可以计算为

$$\varphi = \frac{2\theta}{2\pi} \times 2\pi r = 2\theta r \quad (1)$$

如图 4 所示, 为了计算角度 θ , 假设节点 u 位于直角坐标系的原点 $(0, 0)$, 且 u 到环 C_{i-1} 的外边界的距离为 w . Sink 和点 A 的坐标分别为 $((i-1)R + w, 0)$ 和 $(r \cos \theta, r \sin \theta)$. 显然, 点 A 和 Sink 的距离为 $(i-1)R$. 所以可得:

$$[(i-1)R + w - r \cos \theta]^2 + (r \sin \theta)^2 = [(i-1)R]^2 \quad (2)$$

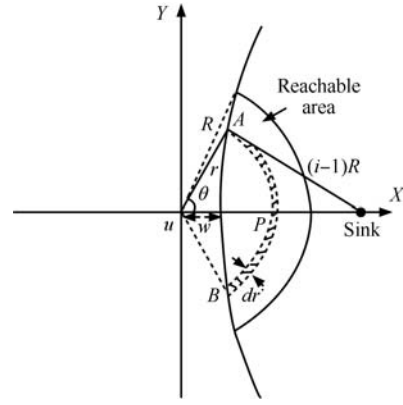


图 4 节点的转发目的区域的面积
Fig. 4 Size of the reachable area

转换式 (2), θ 可表示为

$$\theta = \arccos \left(\frac{r^2 + w^2 + 2(i-1)Rw}{2r[(i-1)R + w]} \right) \quad (3)$$

通过式 (1) 和式 (3), 有:

$$I(r) = 2\theta r dr = \arccos \left(\frac{r^2 + w^2 + 2(i-1)Rw}{2r[(i-1)R + w]} \right) \times 2r dr \quad (4)$$

假设节点 u 的转发可达目的区域的面积为 I_{total} , 使用式 (4) 和定积分, I_{total} 可计算为

$$I_{\text{total}} = \int_w^R \arccos \left(\frac{r^2 + w^2 + 2(i-1)Rw}{2r[(i-1)R + w]} \right) \times 2r dr \quad (5)$$

假设节点 u 所发送的数据总量为 s , 包括转发数据和自身感应的数据. 因为节点在区域内是均匀分布的, 且节点 u 是等概率随机发送数据包到目的区域内的节点, 所以位于图 4 中的条纹区域 (面积为 $I(r)$) 内的节点所接收到的来自节点 u 的数据总量为 $s \times I(r)/I_{\text{total}}$. 如果不考虑通信干扰, 节点 u 发送这些数据的能量消耗为 $s \times (\epsilon_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{amp}} r^2) \times I(r)/I_{\text{total}}$. 通过积分, 位于环 C_i 的节点 u 的发送数据的能耗 $E_t(i, w, s)$ 可计算为

1) 当 $1 < i \leq n$,

$$E_t(i, w, s) = \frac{s}{I_{\text{total}}} \times \int_w^R (\epsilon_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{amp}} r^2) \times I(r) = s \times \frac{\int_w^R \arccos \left(\frac{r^2 + w^2 + 2(i-1)Rw}{2r[(i-1)R + w]} \right) \times (\epsilon_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{amp}} r^2) r dr}{\int_w^R \arccos \left(\frac{r^2 + w^2 + 2(i-1)Rw}{2r[(i-1)R + w]} \right) \times r dr} \quad (6)$$

2) 当 $i = 1$, 节点 u 直接将数据发送给 Sink, w

则表示节点和 Sink 的距离, 能耗为

$$E_t(1, w, s) = s(\epsilon_{elec} + \epsilon_{amp}w^2) \quad (7)$$

2.3 接收数据量分析

为了分析每个节点工作周期内所接收的数据量, 图 5 中, 我们将圆环 C_i 分割为 m 个宽度相等的子环 $C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,m}$, 每个子环的宽度 $d = R/m$. 当 m 足够大时, 每个子环的宽度 d 很小, 可以认为位于子环 $C_{i,j}$ 的节点到圆环 C_{i-1} 的距离 w 相等, 且 $w = (j-1)d$.

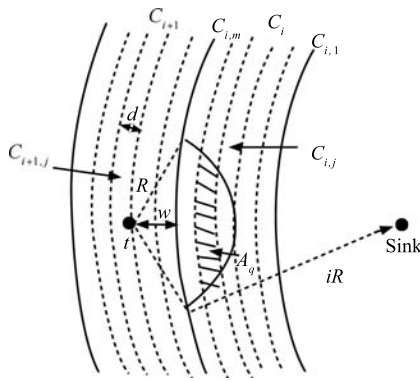


图 5 圆环 C_i 和 C_{i+1} 的子环

Fig. 5 The partition of coronas C_i and C_{i+1}

如图 5 所示, 一个节点 t 位于子环 $C_{i+1,j}$, 它以等概率随机发送数据到子环 $C_{i,j}, C_{i,j+1}, \dots, C_{i,m}$ 内的节点. 因为节点是均匀分布的, 所以位于子环 $C_{i,q}$ ($j \leq q \leq m$) 内的节点所接收到的发自节点 t 的数据量占节点 t 所发送数据总量的比率为

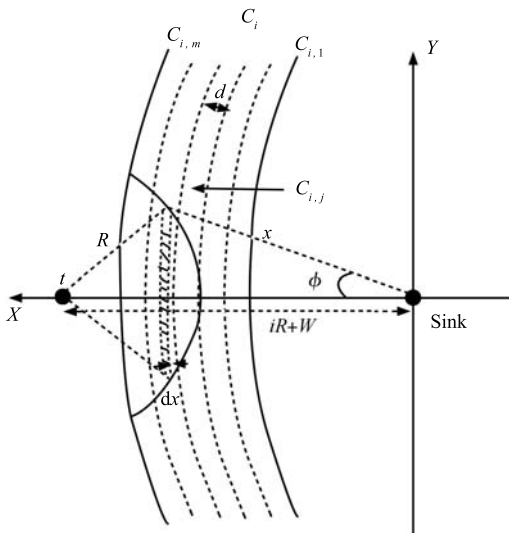


图 6 面积 $A(q)$ 的计算

Fig. 6 The computation of area size of $A(q)$

$$P_{C_{i+1,j} \text{ to } C_{i,q}} = \frac{A(q)}{I_{\text{total}}} \quad (8)$$

其中, $A(q)$ 是节点 t 的在子环 $C_{i,q}$ 内的可达区域 A_q (图 5 条纹部分) 的面积. 为计算 $A(q)$, 假设图 6 中的条纹部分为 A_q 的一小段弧形区域, 它到 Sink 的距离为 x , 宽度为 dx (dx 表示 x 的无穷小的变化量). 同理, 图 6 中条纹部分的面积可计算为

$$I = \arccos\left(\frac{x^2 + (iR+w)^2 - R^2}{2x(iR+w)}\right) \times 2xdx = \arccos\left(\frac{x^2 + [iR + (j-1)d]^2 - R^2}{2x[iR + (j-1)d]}\right) \times 2xdx, \quad iR - (m-q)d \leq x \leq iR - (m-q)d \quad (9)$$

其中, $w = (j-1)d$. 根据式 (9) 和积分, $A(q)$ 可计算为

$$A(q) = \int_{iR-(m-q+1)d}^{iR-(m-q)d} 2x \times \arccos\left(\frac{x^2 + [iR + (j-1)d]^2 - R^2}{2x[iR + (j-1)d]}\right) dx \quad (10)$$

通过式 (10), 式 (8) 可转换为

$$P_{C_{i+1,j} \text{ to } C_{i,q}} = \frac{\int_{iR-(m-q+1)d}^{iR-(m-q)d} \arccos\left(\frac{x^2 + [iR + (j-1)d]^2 - R^2}{2x[iR + (j-1)d]}\right) \times x dx}{\int_{iR-(m-j+1)d}^{iR} \arccos\left(\frac{x^2 + [iR + (j-1)d]^2 - R^2}{2x[iR + (j-1)d]}\right) \times x dx}, \quad 1 \leq i < n, 1 \leq j \leq m, j \leq q \leq m \quad (11)$$

最外层圆环的节点只发送数据, 而不接收数据. 其他环的节点既要发送自身采集的数据, 又要转发来自外层圆环的数据. 位于 $C_{i,j}$ ($1 \leq i < n$) 的节点所转发的数据来自于子环 $C_{i+1,1}, C_{i+1,2}, \dots, C_{i+1,j}$ 内的节点. 令 $r_{i,j}$ 表示位于子环 $C_{i,j}$ 内所有节点在单个工作周期内接收的数据总量, $r_{i,j}$ 可计算如下:

$$r_{i,j} = \begin{cases} 0, & i = n, 1 \leq j \leq m \\ \sum_{k=1}^j P_{C_{i+1,k} \text{ to } C_{i,j}} (r_{i+1,k} + N_{i+1,k}l), & 1 \leq i < n, 1 \leq j \leq m \end{cases} \quad (12)$$

其中, $N_{i+1,k}$ 是子环 $C_{i+1,k}$ 内的节点总数, 可计算如下:

$$N_{i+1,k} = \rho\pi [(iR + kd)^2 - (iR + (k-1)d)^2] \quad (13)$$

$S_{i,j}$ 表示子环 $C_{i,j}$ 内的所有节点在每个工作周期内需要处理的数据总量, 包括子环 $C_{i,j}$ 内的所有节点自身产生的数据 ($N_{i,j}l$), 以及它们接收到的数据 ($r_{i,j}$). 显然, $S_{i,j}$ 可表示为 $S_{i,j} = r_{i,j} + N_{i,j}l$.

图 7 表示数据在圆环中进行转发的迭代过程. 显然, 位于最外层圆环的节点没有接收到数据 ($r_{n,j} = 0$), 其他各子环的节点在每个工作时间内所接收到的数据量 $r_{i,j}$ 可以通过迭代过程来获得.

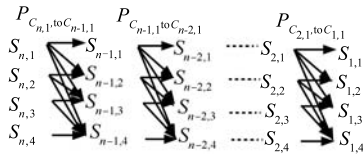


图 7 数据转发的迭代过程 ($m = 4$)

Fig. 7 Illustration of the iterative process ($m = 4$)

2.4 计算能量消耗和能量分布的算法

结合 $r_{i,j}$, 子环 $C_{i,j}$ 内的单个节点每个工作周期内的能耗可以计算为

$$e_{i,j} = e_{\text{snd}} + e_{\text{rcv}} + e_{\text{lst}} + e_{\text{slp}} + e_{\text{sen}} = \frac{r_{i,j}\epsilon_{\text{elec}} + E_t(i, (j-1)d, r_{i,j} + N_{i,j}l)}{N_{i,j}} + P_{\text{lst}}t_{\text{lst}} + P_{\text{slp}}t_{\text{slp}} + e_{\text{sen}}, \quad (14)$$

$$1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$$

式中, e_{snd} , e_{rcv} , e_{lst} , e_{slp} , e_{sen} 分别表示节点在每个工作周期内发送、接收、侦听、休眠、感知和计算处理的能耗. $E_t(i, (j-1)d, r_{i,j} + N_{i,j}l)$ 为子环 $C_{i,j}$ 内的所有节点在每个工作周期内发送数据的能耗, 通过式 (6) 和式 (7) 计算, t_{lst} , t_{slp} 分别为节点在一个工作周期内处于侦听和休眠状态下的时间. P_{lst} , P_{slp} 分别为节点处于侦听和休眠状态下单位时间内的能耗. 节点接收与发送的能耗可以通过节点接收与发送的数据量计算. 因为所有节点单个工作周期内采集和处理的数据量相同, 所以所有节点的 e_{sen} 相等. 如果按照式 (14) 计算的能耗给每个节点储备不同的初始能量, 可以避免能量的浪费, 提高能量的利用效率. 假设最外层子环的初始能量为 $\epsilon_{n,m}$, 则其他各子环的初始能量 $\epsilon_{i,j}$ 要满足

$$\frac{\epsilon_{i,j}}{e_{i,j}} = \frac{\epsilon_{n,m}}{e_{n,m}} \quad (15)$$

令 $\epsilon_{n,m} = \epsilon$, 则 $\epsilon_{i,j}$ 可表示为

$$\epsilon_{i,j} = \frac{e_{i,j}}{e_{n,m}}\epsilon \quad (16)$$

算法 1 通过迭代过程来计算不同子环的节点在每个工作周期内的能耗以及需要储备的初始能量.

算法 1.

- 1: for $i := n - 1$ downto 1 do
- 2: for $j := m$ downto 1 do
- 3: for $q := m$ downto j do
- 4: compute $P_{C_{i+1,j} \text{ to } C_{i,q}}$ by (11);
- 5: for $i := n$ downto 1 do
- 6: for $j := m$ downto 1 do
- 7: compute $N_{i,j}$ by (13);
- 8: for $i := n$ downto 1 do
- 9: for $j := m$ downto 1 do
- 10: compute $r_{i,j}$ by (12);
- 11: compute $e_{i,j}$ by (14);
- 12: compute $\epsilon_{i,j}$ by (16);

显然, 算法 1 的时间复杂度是 $O(nm^2)$.

3 瑞利衰落环境下的节点能耗分析

上述研究中采用的无线通信能量消耗模型没有考虑通信干扰, 这样的模型将环境条件理想化. 而在实际的环境中, 节点间的通信要受到路径损耗、信道衰落和干扰的影响, 无线通信能量消耗模型也要发生变化. 本节中, 我们采用无线瑞利衰落信道模型来描述存在大量障碍物和干扰的无线传播环境. 若发射节点与接收节点的距离为 x , 则在瑞利衰落环境下的信道增益可以表示为

$$h(x) = L(d_0) \left(\frac{x}{d_0} \right)^{-\eta} \xi \quad (17)$$

其中, d_0 是远场参考距离, η 是路径损耗指数 ($2 \leq \eta \leq 6$), ξ 是服从指数分布的瑞利衰落增益因子. $L(d_0) = \frac{G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 d_0^2}$ 是在通信距离为 d_0 时的路径损耗, G_t , G_r 分别为发射天线、接收天线的增益, λ 是载波波长.

发射节点发送 1 比特数据到距离为 x 的接收节点, 消耗的能量为 $\epsilon_{\text{elec}} + e_t$. 其中 ϵ_{elec} 表示发射 1 比特数据的电路损耗能量, e_t 表示发射 1 比特数据到距离 x 的节点时无线射频的能耗. 用 e_r 表示接收到 1 比特数据时接收节点接收到的信号能量, 根据式 (17), 可得:

$$e_r = e_t L(d_0) \left(\frac{x}{d_0} \right)^{-\eta} \xi \quad (18)$$

显然, 在瑞利衰落环境下, ξ 是随机的, 那么接收节点接收到的信号能量也是随机的. 我们使用 $\Pr\{e_r \geq \tau\}$ 表示节点接收到的信号能量 e_r 大于一个门限值 τ 的概率. 为了确保信号的正确接收, 要满足 $\Pr\{e_r \geq \tau\} \geq \delta_l$, δ_l 是保证可靠链接的因子. 结

合式 (18), 可得:

$$\Pr \left\{ e_t L(d_0) \left(\frac{x}{d_0} \right)^{-\eta} \xi \geq \tau \right\} \geq \delta_l \quad (19)$$

$$\Pr \left\{ \xi \geq \frac{\tau}{e_t L(d_0)} \left(\frac{x}{d_0} \right)^\eta \right\} \geq \delta_l$$

由于 ξ 是服从指数分布的, 所以

$$e^{-\frac{\tau x^\eta}{e_t L(d_0) d_0^\eta}} \geq \delta_l \quad (20)$$

根据式 (20), 为了保证信号的正确接收, e_t 要满足

$$e_t \geq \beta x^\eta \quad (21)$$

其中, $\beta = \frac{-\tau}{L(d_0) d_0^\eta \ln \delta_l}$. 相应地, 要保证 1 比特数据在接收端被正确接收, 发送节点消耗的能量至少应为 $\epsilon_{\text{elec}} + \beta x^\eta$. 那么, 位于环 C_i 的节点 u 的发送数据的能耗 $E_t(i, w, s)$ 重新计算为

1) 当 $1 < i \leq n$,

$$E'_t(i, w, s) = \frac{s}{I_{\text{total}}} \times \int_w^R (\epsilon_{\text{elec}} + \beta r^\eta) \times I(r) \quad (22)$$

2) 当 $i = 1$,

$$E'_t(1, w, s) = s(\epsilon_{\text{elec}} + \beta r^\eta) \quad (23)$$

把式 (22) 和式 (23) 代入式 (14) (替换式 (6) 和式 (7)), 再通过算法 1 可以获得在瑞利衰落环境下传感器网络中节点的非均匀能耗分布. 在瑞利衰落环境下, 为了保证通信的成功, 发射节点必须加大发射信号的功率, 这增加了节点的能耗.

4 节点能耗和网络寿命的上界和下界分析

在无线传感器网络中, 传感器节点的一个工作周期表示为 T , 要经历四种工作状态: 发送状态、接收状态、侦听 (空闲) 状态和休眠状态. 节点的能耗中除去节点处于发送和接收状态下的能耗, 节点处于空闲侦听状态的能耗占了绝大部分的比例, 所以节点的休眠机制和 MAC 协议采取了各种方法来降低节点一个工作周期内空闲侦听时间所占的比例. 如: S-MAC 协议通过采用周期性侦听/睡眠工作方式来减少空闲侦听; T-MAC 协议根据流量动态地调整活动时间, 用突发方式发送信息, 减少空闲侦听时间.

最理想的休眠机制是将节点一个工作周期内的侦听时间设为 0, 节点接收和发送完数据后, 马上进入极低能耗的休眠状态, 直至节点的下一个工作周期. 因为节点接收和发送数据所花费的时间很短, 所

以此时节点在一个工作周期内处于休眠状态的时间等于节点的工作周期 ($T = t_{\text{slp}}$), 在其他因素不变的情况下, 此时节点的能耗最低. 相反, 如果不采用任何休眠机制, 节点在一个工作周期内除了接收和发送数据, 一直处于侦听状态, 此时节点在一个工作周期内处于侦听状态的时间等于节点的工作周期 ($T = t_{\text{lst}}$), 在其他因素不变的情况下, 此时节点的能耗最高.

结合通信干扰、休眠机制等因素, 下面列举基于“梯度汇聚”机制的无线传感器网络的生存周期的上界 (最优情况) 和下界 (最差情况).

1) 上界: 传感器网络处于没有障碍物、没有干扰的无线传播环境, 此时节点的采用无线通信能量消耗模型为: 节点发射 1 比特的数据到距离为 x 的位置, 消耗的能量为 $\epsilon_{\text{elec}} + \epsilon_{\text{amp}} \times x^2$, 而节点接收 1 比特的数据消耗的能量为 ϵ_{elec} . 每个节点采用最理想的休眠机制, 即一个工作周期内节点的侦听时间为 0, 并且 $T = t_{\text{slp}}$. 每个节点的能耗最低, 子环 $C_{i,j}$ 内的单个节点每个工作周期内的能耗可以计算为

$$e_{i,j} = \frac{r_{i,j} \epsilon_{\text{elec}} + E_t(i, (j-1)d, r_{i,j} + N_{i,j}l)}{N_{i,j}} + P_{\text{slp}}T + e_{\text{sen}}, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (24)$$

其中, $r_{i,j}$ 由算法 1 计算, E_t 由式 (6) 和式 (7) 计算. 当节点初始储备能量不变时, 网络的生存周期最长.

2) 下界: 传感器网络处于存在大量障碍物和干扰的无线传播环境, 即瑞利衰落环境. 节点发射 1 比特的数据到距离为 x 的位置, 消耗的能量变为 $\epsilon_{\text{elec}} + \beta x^\eta$. 节点不采用任何休眠机制, 并且 $T = t_{\text{lst}}$. 此时, 每个节点的能耗最高, 子环 $C_{i,j}$ 内的单个节点每个工作周期内的能耗可以计算为

$$e_{i,j} = \frac{r_{i,j} \epsilon_{\text{elec}} + E'_t(i, (j-1)d, r_{i,j} + N_{i,j}l)}{N_{i,j}} + P_{\text{lst}}T + e_{\text{sen}}, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (25)$$

其中, E'_t 由式 (22) 和式 (23) 计算. 在节点初始储备能量不变时, 网络的生存周期最短.

5 算法仿真与性能分析

实验仿真工具采用 Matlab. 仿真实验中, 所有传感器节点均匀分布在一个半径为 40 m 圆形区域中. Sink 位于圆心, 节点的分布密度为 $1/\pi$, 每个工作周期 $T = 1$ s. 其他参数为: $R = 10$ m, $n = 4$, $m = 8$, $l = 512$ bits/s, $\epsilon_{\text{elec}} = 50$ nJ/bit, $\epsilon_{\text{amp}} = 100$ pJ/bit/m², $e_{\text{sen}} = 2000$ nJ, $P_{\text{lst}} = 4.5 \times 10^{-4}$ J/s, $P_{\text{slp}} = 9 \times 10^{-7}$ J/s, $G_t = G_r = 1$,

$\tau = 10^{-17}$ J, $\delta_l = 0.99$, $\eta = 2$, 载波频率为 2.4 GHz. 网络的生存周期被定义为从网络开始运行持续到网络中 10% 的节点耗尽能量为止.

5.1 最优情况下的节点非均匀能耗

首先假设无线传感器网络位于无干扰环境下, 且不考虑节点侦听, 即最优情况下. 图 8 反映了模拟实验进行了 600 s 时所有节点的能耗值. 从图 8 可以看出, 由于采用了“梯度汇聚”的数据汇聚机制, 不仅越靠近 Sink 的节点能耗越高, 而且同一梯度的节点的能耗还存在内低外高的反向不均衡现象, 即位于同一梯度(环)外边界节点的能耗高于内边界节点的能耗, 这和分析是一致的. 图 9 表示根据算法 1 计算得出各子环的节点在无干扰环境下单个工作周期内的能量消耗. 从图 9 可以看出, 在同一环中, 外层子环的节点的能耗高于内层子环节点的能耗, 并且越靠近 Sink 的环, 环内节点平均能耗越高, 这是因为内层环的节点不仅要发送自己的数据, 还需要转发外层环节点的数据. 比较图 8 和图 9, 可以看出二者基本一致.

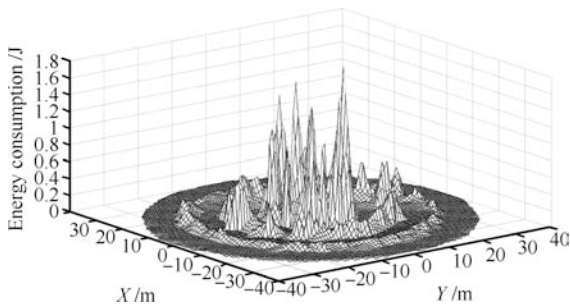


图 8 所有节点的能耗 ($t = 600$ s)

Fig. 8 Simulation results of energy consumption

($t = 600$ s)

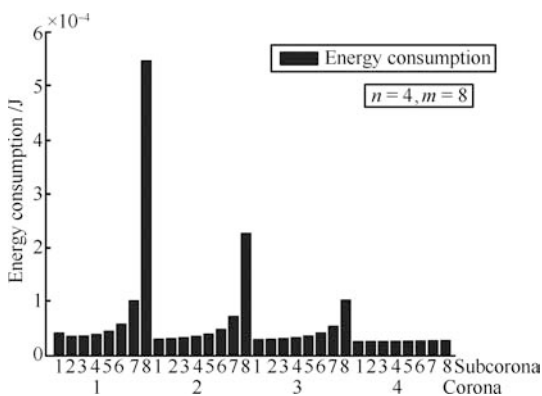


图 9 无干扰环境下各子环节点的单个工作周期内的能耗

Fig. 9 Energy consumption of node per unit time in each subcorona

5.2 最优和最差情况节点能耗与网络生存周期对比

图 8 和图 9 反映的是在通信干扰、休眠机制等

因素最优情况下, 采用“梯度汇聚”的路由机制时节点的能耗(上界). 根据第 4 节的分析, 同样可以得出最差情况下节点的能耗, 即在瑞利衰落环境下, 且不采用任何休眠机制时. 图 10 反映了当网络处于最差和最优情况下时, 相同位置处节点能耗的比值. 可以看出, 在不同的通信环境下, 节点能耗的差异比较大; 另外, 靠近 Sink 处节点的能耗差异相对较小, 这是因为靠近 Sink 处节点的平均传送距离减小, 受环境的影响较小.

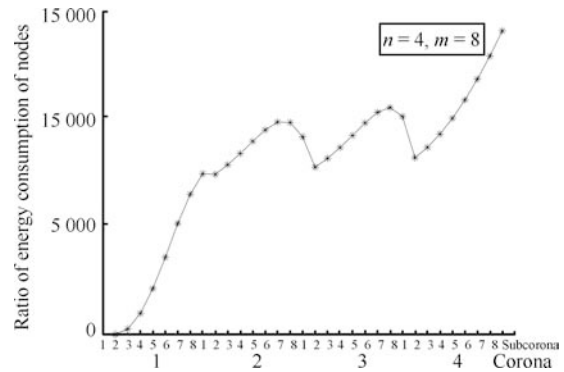


图 10 最差和最优情况下节点能耗的比值

Fig. 10 Ratio of upper bound to lower bound of energy consumption of nodes

图 11 显示了在不同的网络半径(以圆环层数 n 表示)下, 当网络分别处于最优和最差情况时网络生存周期的比值. 该实验中, 节点能量均匀分布. 同样可以看出, 网络的通信环境和休眠机制等因素对网络生存周期有较大影响.

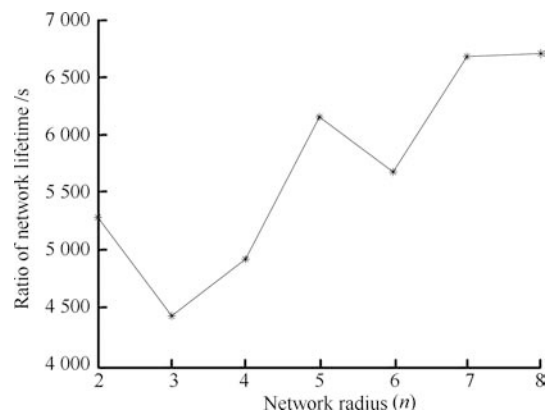


图 11 最差和最优情况下网络生存周期的比值

Fig. 11 Ratio of upper bound to lower bound of network lifetime

5.3 非均匀能量分布策略和节点能量均匀分布策略比较

我们把本文所提出的节点能量非均匀分布策略和另外两种节点能量均匀分布策略比较: 一种是节

点位置均匀分布策略,即节点的位置和能量都是均匀分布的,所有节点的能量总和与本文所提策略中节点能量总和相同;另一种是文献[8]提出的节点位置非均匀分布的策略,网络中节点数由外环到内环以等比增长($q=2$),每个节点的能量和节点均匀分布策略中的节点能量相同.在采用本文所提出的策略中,最外层子环的节点的初始能量为0.01 J,其余各子环需要储备的初始能量根据算法1计算.三种策略都用于无通信干扰的实验环境中.

图12表示三种策略下不同网络半径(n)时的网络生存周期.通过比较,可以看出本文所提出策略的网络生存周期最长,文献[8]提出的节点位置非均匀分布的策略次之,说明了本文所提出的节点能量非均匀分布策略较好地避免了能量空洞,延长了网络的生存周期.

图13反映了三种策略下不同网络半径时的网络能量剩余率.可以看出当网络生存周期结束时,采用节点能量均匀分布的两种策略的网络还有60%~80%的能量剩余,大量能量被浪费.其中,节点非均匀分布的策略的剩余能量少于节点均匀分布策略.而本文所提的节点能量非均匀分布策略的网络剩余能量大大少于这两种策略,且所需的节点数量也大大少于文献[8]提出的节点非均匀分布的策略,说明本文所提出的策略极大地提高了能量的利用效率,同时避免了网络成本的显著增加.

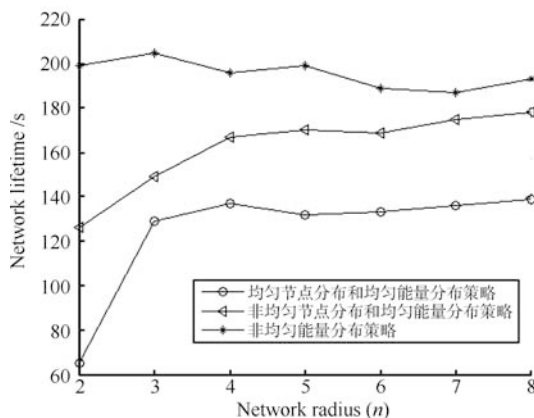


图12 不同策略的网络生存周期

Fig. 12 Network lifetime in different schemes

5.4 与其他路由协议比较

本文所采用的路由协议是一种基于梯度的数据汇聚的路由协议,与其他路由协议相比,这种路由的优点在于实现简单,不需要额外的开销.我们把本文所采用的路由协议与典型的路由协议—LEACH^[14]作比较. LEACH 协议是一种分层路由算法,簇内节点将感知到的数据发给簇头节点,簇头融合后直接发给 Sink. 与本文协议相比, LEACH 算法通过簇

头融合了簇内节点的数据,减少了网络的通信量.与本文所提协议的区别在于:1) LEACH 增加了成簇过程的开销,即周期性的建立簇的开销;2) LEACH 算法中,簇头节点将数据直接传送给 Sink,而本文协议中节点都是通过多跳方式把数据传递给 Sink 的,这有助于将数据通信的能耗压力分布在通信线路上的多个节点上,减少节点间能耗的失衡;3) 在一个工作周期内, LEACH 算法只有簇头一直工作,其余节点在向簇头发送了数据后,保持休眠状态,节约了能量;而本文协议中的节点在一个工作周期内还有部分时间处于侦听状态;4) LEACH 中,由于簇头节点的能耗较一般节点高,所以所有节点轮流担当簇头以平衡节点间的能耗,但在一轮工作周期中,簇头的位置可能会分布不均匀,容易造成局部网络负载过重.图14反映了采用本文协议和 LEACH 在不同网络半径 n 下的网络生存周期.采用 LEACH 协议的实验中,节点的位置和能量都是均匀分布的,且所有节点的能量总和与采用本文所提协议的网络中节点的能量总和相同. c 为簇头的融合系数,即簇头融合数据后的数据量与簇头接收到的数据总量的比值.从图14可以看出,本文所提的路由协议较 LEACH 协议有效地延长了网络的生存周期.同时, LEACH 协议中,若簇头的融合能力较强,也能减少簇头的通信量,降低能耗,延长网络的生存周期.

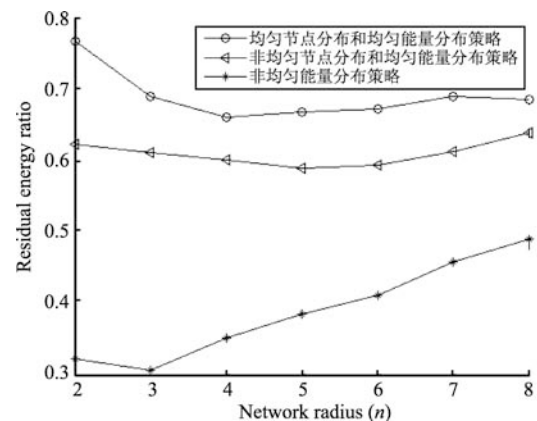


图13 不同策略的网络能量剩余率

Fig. 13 Residual energy ratio in different schemes

6 结束语

本文指出能量空洞现象是影响无线传感器网络生存周期的重要原因之一.在节点均匀分布和采用“梯度汇聚”模型的情况下,分别计算了无通信干扰的自由空间环境和瑞利衰落环境下节点的能量消耗,提出了一种基于节点能量非均匀分布的能量空洞避免机制.并研究了基于“梯度汇聚”模型的无线传感器网络生存周期的上界和下界.实验数据分析表明,本文所提策略提高了能量的利用效率,避免能量空

洞的产生, 从而延长了网络的生存周期.

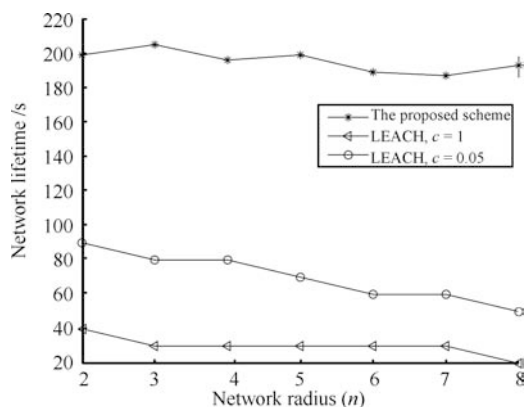
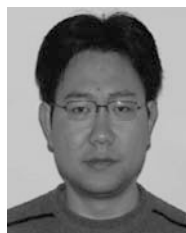


图 14 不同路由协议的网络生存周期

Fig. 14 Network lifetime in different routing schemes

References

- Sun Li-Min, Li Jian-Zhong, Chen Yu, Zhu Hong-Song. *Wireless Sensor Network*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
(孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, **38**(4): 393–422
- Kang Yi-Mei, Li Zhi-Jun, Hu Jiang, Dong Ji-Chang. A low-power hierarchical wireless sensor network topology control algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(4): 543–549
(康一梅, 李志军, 胡江, 董吉昌. 一种低能耗层次型无线传感器网络拓扑控制算法. 自动化学报, 2010, **36**(4): 543–549)
- Hong Zhen, Yu Li, Zhang Gui-Jun. An adaptive distributed clustering routing protocol for wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1197–1205
(洪榛, 俞立, 张贵军. 无线传感器网络自适应分布式聚簇路由协议. 自动化学报, 2011, **37**(10): 1197–1205)
- Han K H, Ko Y B, Kim J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks. *Vehicular Technology Conference*, 2004, **4**: 2979–2983
- Li J, Mohapatra P. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks. In: *Proceedings of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 05)*. Dallas, USA: IEEE, 2005. 2721–2725
- Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2007, **3**(3): 233–254
- Lian J, Naik K, Agnew G B. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2006, **2**(2): 121–145
- Bi Y Z, Li N, Sun L M. DAR: an energy-balanced data-gathering scheme for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2007, **30**(14–15): 2812–2825
- Wu Xiao-Bing, Chen Gui-Hai. The energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2008, **31**(2): 253–261
(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. 计算机学报, 2008, **31**(2): 253–261)
- Liu A F, Wu X Y, Chen Z G, Gui W H. Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010, **33**(3): 302–321
- Zheng J, Wang P, Li C. Distributed data aggregation using slepian-wolf coding in cluster-based wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, **59**(5): 2564–2574
- Zhu Hong-Song, Sun Li-Min, Xu Yong-Jun, Li Xiao-Wei. Mechanism and analysis on fine-grain gradient sinking model in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007, **18**(5): 1138–1151
(朱红松, 孙利民, 徐勇军, 李晓伟. 基于精细化梯度的无线传感器网络汇聚机制及分析. 软件学报, 2007, **18**(5): 1138–1151)
- Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, **1**(4): 660–670



刘 韬 西南民族大学计算机科学与技术学院讲师, 四川大学计算机学院博士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络, 嵌入式系统.

E-mail: taoking0962@sina.com

(LIU Tao Lecturer in the School of Computer Science and Technology, Southwest University for Nationality and Ph.D. candidate at the School of Computer Science, Sichuan University. His research interest covers wireless sensor network and embedded system.)