



无线 mesh 网络中能量空洞规避策略研究^{*}

陆春龙^{1,2}, 曹玉春¹, 乐光学²

(1. 常州大学石油工程学院 常州 213016; 2. 嘉兴学院数理与信息工程学院 嘉兴 314000)

摘要: 为了避免无线 mesh 网络中的能量空洞问题, 提出了簇头节点非均匀分布策略, 构建了能耗效率优化均衡路由算法。当无线 mesh 网络中簇头节点的分布满足一定关系时, 该网络能实现最优化能耗效率均衡。从理论上证明了能耗效率优化模型的收敛性, 推导出了优化能耗效率均衡约束条件, 构建了能量空洞系统规避模型, 为无线 mesh 网络的长久可靠运行提供理论依据。仿真实验结果表明, 该策略模型能有效缓解无线 mesh 网络中存在的能量空洞问题, 延长该网络的生存周期和降低网络剩余能量率。

关键词: 无线 mesh 网络; 能量空洞; 非均匀分布; 能量模型

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.11.006

Research on Avoidance of Energy Hole Scheme in the Wireless Mesh Network

Lu Chunlong^{1,2}, Cao Yuchun¹, Yue Guangxue²

(1. Petroleum Engineering College, Changzhou University, Changzhou 213016, China;

2. College of Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314000, China)

Abstract: In order to avoid the energy hole problem in wireless mesh network, the non-uniform distribution strategy about the cluster nodes was put forward, the energy efficiency optimization equilibrium routing algorithm was designed. When the distribution of cluster nodes in the wireless mesh network met the certain relations, the network could optimize the energy consumption efficiency equilibrium. In order to provide the theory basis for reliable operation in wireless mesh network for a long time, the convergence of efficiency optimization model was theoretically proved, the constraint condition of optimizing the energy consumption efficiency equilibrium was derived, and the energy hole system avoidance model was built. The simulation results show that using this strategy can effectively relieve the energy hole problem in wireless mesh network, prolong the network life cycle and cut down the network residual energy rate.

Key words: wireless mesh network, energy hole, non-uniform distribution, energy model

1 引言

无线 mesh 网络(wireless mesh network, WMN)由 mesh 网关、mesh 路由器和 mesh 终端 3 部分构成, 具有支持移

动自组、覆盖范围广、网络容量大、数据传输速率快等特点^[1], 已成为一种重要的无线网络和有线网络有效融合的技术^[2]。

无线 mesh 网络根据节点功能的不同, 可分为 3 种结构,

^{*} 浙江省自然科学基金资助项目(No.LY12F02019), 浙江省公益技术应用研究基金资助项目(No.2011C23130), 浙江省嘉兴市科技计划基金资助项目(No.2012AY1027)



即骨干 mesh 网络、客户端 mesh 网络和混合 mesh 网络^[34],如图 1 所示。

在无线 mesh 网络中,数据流采用多对一的模式,部分节点具有产生数据和转发数据的功能,并且节点间采用多跳的通信方式^[5]。因此无线 mesh 网络通信负载不均衡,尤其在汇聚(sink)节点附近的节点需要承担更多的通信负载,消耗的能量也比其他区域的多,长此以往如果没有采取相应的补救措施就会出现一种称为能量空洞 (energy hole)^[6]的现象。此现象表现为在 sink 节点附近的节点会过早消耗完自身的能量而死亡,继而形成空洞,在空洞附近的节点就需要承担已死亡节点原本需转发的数据,这样空洞附近的节点能耗相比先前状态明显增多而出现漏洞效应^[6],导致空洞快速扩大,使 sink 节点不能继续接收到网络采集的数据,从而使无线 mesh 网络失效(过早死亡或陷于瘫痪)。此时无线 mesh 网络的生存周期结束,但大量未被充分利用的能量资源还残留在该网络中。相关研究表明,在能量空洞的影响下,当无线 mesh 网络失效后,大于 70%的能量还留在该网络中,甚至对于中等规模以上的无线 mesh 网络残留的能量高达 90%^[7]。因此,在无线 mesh 网络中如何充分利用网络能量、避免能量空洞、延长网络生存周期具有

重要的应用价值^[8]。

在无线 mesh 网络中,节点可分为簇头节点和普通节点。簇头节点不感知监测环境,只汇集与转发数据;普通节点感知并收集数据。针对无线 mesh 网络中的能源空洞现象,设无线 mesh 网络是一个圆形网络,sink 节点在圆形网络的圆心处。该网络由多个等宽(宽度为 1 个单位)同心的圆环组成,在能量消耗方面只考虑数据发送和接收过程中的能量消耗。簇头节点分布在各个圆环处且分布不均,并以恒定的数据采集率持续向 sink 节点发送数据。文中证明了在簇头节点非均匀分布策略下满足一定关系时,无线 mesh 网络能实现最优化能耗效率均衡。

基于这种分析,提出了簇头节点非均匀分布策略,设计了路由算法实现最优化能耗效率均衡。以网络生存周期和网络剩余能量率为角度进行模拟实验,模拟结果显示无线 mesh 网络簇头节点达到了最优化能耗效率均衡。

2 相关研究

2004 年,Lian 等人在参考文献[9]中对提高网络数据容量进行了深入的研究,提出了在节点均匀分布的矩形网络中为节点装备不同初始能量储备的方法,同时提出

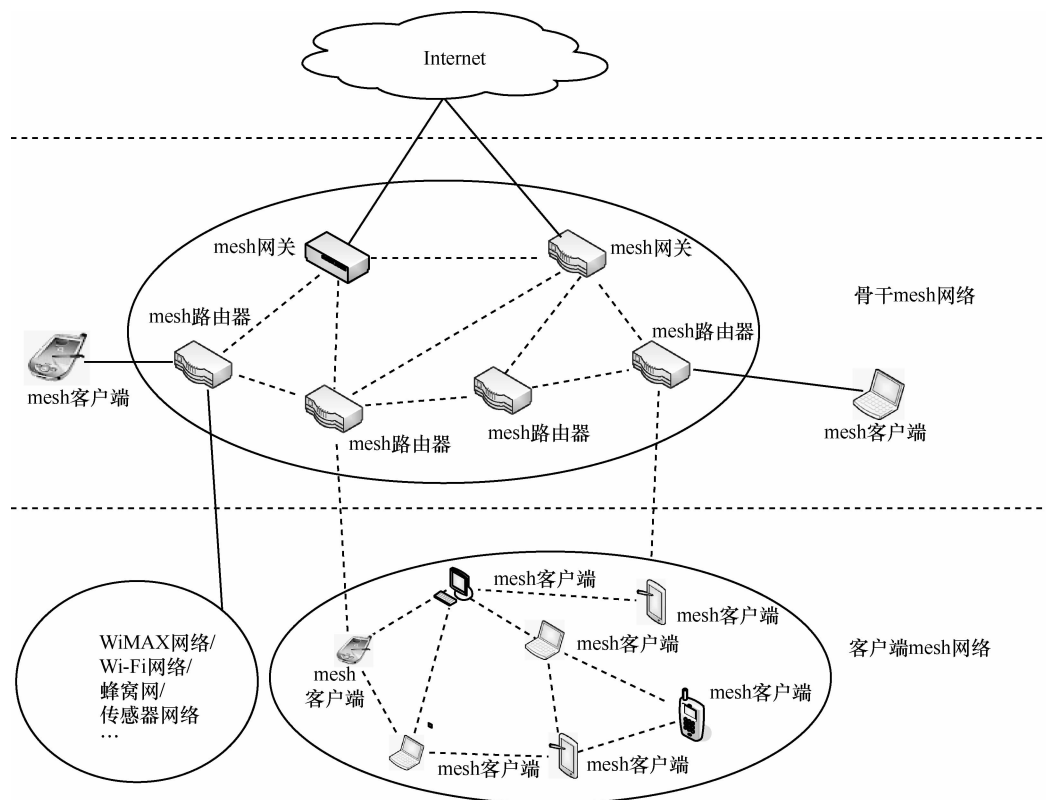


图 1 无线 mesh 网络

了移动 sink 节点的路由算法,但参考文献中未提及能否避免能量空洞问题。

2004年,Perillo等人在参考文献[10]中对无线传感器网络出现能量空洞现象进行了研究,分别指出在网络中所有节点直接将监测数据发送给 sink 节点的前提下,离 sink 节点较远的节点最容易耗尽自身的能量;在网络中的节点通过多跳方式将监测的数据传递给 sink 节点的前提下,离 sink 节点较近的节点最容易耗尽自身的能量。

2005年,Li和Mahapatra在参考文献[11]中构建了第一个用于分析无线传感器网络中的能量空洞问题的数学模型。文中假设在无线传感器网络中的节点均匀分布,采用层次结构和数据压缩机制能缓解能量空洞,但增加数据采集率却使能量空洞问题更加严重,而增加节点对缓解能量空洞作用不明显。但参考文献并未提及能量空洞问题能否避免。

2005年,Olariu和Stojmenovic在参考文献[12]中对避免能量空洞问题策略进行了研究,讨论了在网络中采用节点非均匀分布策略避免能量空洞问题,假设网络中节点的能量消耗仅考虑发送数据过程中的能耗,其他能耗不考虑并且节点具有不同的数据率。在这样的网络中当第 i 个圆环节点密度和 $(k+1-i)$ 成正比(其中, k 是圆形网络划分为等宽圆环的最佳数目)时,该网络能够避免能量空洞问题。

2006年,Lian等人在参考文献[13]中对提高数据容量再次进行了研究,提出了节点非均匀分布策略,同时提出路由算法,使部分节点轮流休息以节省能量消耗,但参考文献未涉及节点非均匀分布策略下的能量空洞问题。

2006年,Olariu和Stojmenovic在参考文献[14]中对能量空洞能否避免问题进行了深入的研究,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问题不可避免。假设圆形网络中的节点均匀分布且发射半径可调,持续向 sink 节点汇报数据。当选用的能量消耗模型为 $E=d^a+c$ (其中, $a \geq 2$ 是能量衰减系数, d 是数据发送方和接收方的距离, c 是与技术相关正值常数)时,进一步证明了如果网络中被划分的圆环等宽(其中,环宽大小等于 $\left(\frac{2c}{a-2}\right)^{\frac{1}{a}}$ 和最大传输半径两者的最小值),那么路由能耗能够降到最低,但此时网络中可能会出现能量空洞,当 $a > 2$ 时通过调整圆环的宽度可以避免能量空洞问题出现,当 $a=2$ 时,能量空洞无法避免。

2008年,吴小兵和陈贵海在参考文献[15]中对节点非

均匀分布策略缓解无线传感器网络中的能量空洞问题进行研究,证明了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。

2009年,宋超等在参考文献[16]中对“能量空洞”现象进行了研究,提出了基于改进的分级环模型,总结出调节各环内节点的数据传输距离是实现网络节能的有效方法,证明了搜索各区域最优的传输距离是多目标优化问题,即NP难问题,从而提出了基于蚁群优化的分布式算法,通过搜索各环适合的传输距离延长网络的生存周期。

2010年,刘安丰等人在参考文献[17]中对避免能量空洞问题策略进行了研究,分析了分簇网络的能量空洞避免问题,提出了不等簇半径轮换算法,提高了网络生存周期。

2010年,曾志文等人在参考文献[18]中对无线传感器网络数据转发的规律进行了研究,得到了网络中不同区域数据转发量与发射半径 r 之间的关系,从而推导出网络不同区域间的能量消耗情况、不同区域节点的寿命及其引起的数据传送时延。

2012年,刘安丰等人在参考文献[8]中对异构分簇无线传感器网络进行了研究,提出了不等簇半径轮换工作的能量空洞避免策略。参考文献中将能量空洞避免问题转化为在保证网络寿命满足应用需求约束前提下如何部署使节点最小的优化问题,详细给出了不等簇半径的取值与优化方法。

3 能量空洞系统模型

3.1 基本假设

设所有簇头节点分布在半径为 R 的圆形区域, sink 节点唯一且被放置于圆心处,每个圆环的宽度为1个单位,从内向外, C_i 表示第 i 个圆环,区域 C_i 中的簇头节点到 sink 节点的距离在 $(i-1)$ 和 i 之间,如图2所示。每个簇头节点在单位时间内产生和发送 L bit 数据,处于圆环 C_i (除最外环)中的簇头节点需要向 sink 节点转发自身和处于 C_i 外圆环中节点产生的数据。任何一个转发节点都没有数据聚集过程^[15]。圆环中簇头节点数据能够经过一跳传递给相邻的圆环,最终经过 i 跳后到达 sink 节点,也可以在同一个环内(在某个时刻同环的某个簇头节点转发数据要消耗大量能量,此时该簇头节点可以把部分需转发的数据提前转发给同环其他簇头节点)相互传递。

3.2 能量消耗模型

采用典型的能量消耗模型^[19],发送 L bit 数据的能量消

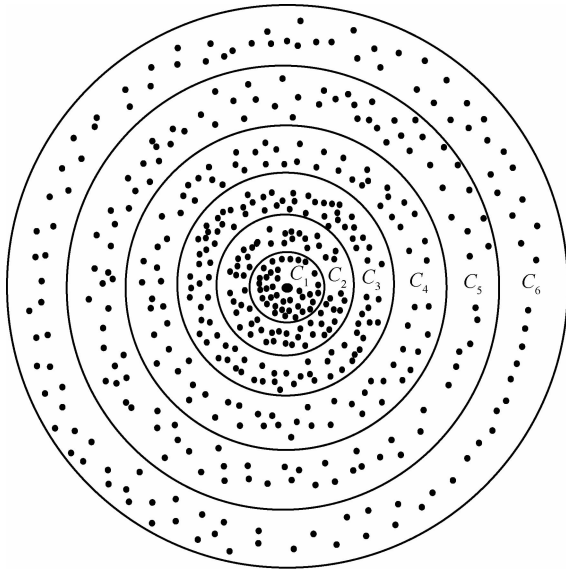


图2 圆形网络

耗见式(1),接收 L bit 数据的能量消耗见式(2),若传输距离小于阈值 d_0 ,则功率放大损耗采用自由空间模型;若传输距离不小于阈值 d_0 ,则功率放大损耗采用多路径衰减模型。

$$\begin{cases} E_{\text{tra}} = LE_{\text{elec}} + L\epsilon_{\text{fs}}d^2, d < d_0 \\ E_{\text{tra}} = LE_{\text{elec}} + L\epsilon_{\text{amp}}d^4, d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{\text{rec}} = LE_{\text{elec}} \quad (2)$$

其中, E_{tra} 表示簇头节点发送数据消耗的能量; E_{rec} 为簇头节点接收数据消耗的能量; E_{elec} 表示发射电路损耗的能量; ϵ_{fs} 、 ϵ_{amp} 分别表示这两种模型中功率放大所需的能量。

每个簇头节点消耗的能量为:

$$E = (\alpha E_{\text{tra}} + \beta E_{\text{rec}}) \times \gamma \quad (3)$$

其中, E 表示每个簇头节点消耗的总能量; α 、 β 分别表示 E_{tra} 、 E_{rec} 的系数, γ 表示扩散系数。

3.3 模型分析求解

设圆环中簇头节点数据能够经过一跳传递给相邻的圆环,最终经过 i 跳后到达 sink 节点。用 N_i 表示在无线 mesh 网的圆环 C_i 中簇头节点的数目; E_i 表示圆环 C_i 中所有簇头节点在单位时间内的能量消耗; δ_i 表示处于 C_i 圆环中的簇头节点的初始能量。

基于以上假设和能量消耗模型,取 $\gamma = d = 1$, $d_0 > 1$,则在单位时间内圆环中所有簇头节点 E_{tra} 相等, E_{rec} 相等。

在单位时间内圆环 C_R 中所有簇头节点消耗的能量为 $E_R = N_R E_{\text{tra}}$ (取 $\alpha = N_R, \beta = 0$)。

其他圆环中的簇头节点消耗的能量包括两部分:一部分能耗是发送自身产生数据所消耗的能量,另一部分能耗是转发来自外部圆环数据所消耗的能量,因此 $E_i = \sum N_k (E_{\text{tra}} + E_{\text{rec}}) + N_i E_{\text{tra}}, 1 \leq i \leq R-1$, 取 $\alpha = \frac{R}{k=i+1} N_k + N_i, \beta = \frac{R}{k=i+1} N_k$ 。

因此在单位时间内每个圆环中所有簇头节点消耗的能量 E_i 为:

$$E_i = \begin{cases} N_R E_{\text{tra}}, & i = R \\ \sum_{k=i+1}^R N_k (E_{\text{tra}} + E_{\text{rec}}) + N_i E_{\text{tra}}, & 1 \leq i \leq R-1 \end{cases} \quad (4)$$

理想情况下,网络中每个簇头节点同时耗尽自身的能量时,能耗效率得到了最优化。此时,网络生存时间 τ 可描述为:

$$\tau = \frac{N_1 \delta_1}{E_1} = \frac{N_2 \delta_2}{E_2} = \dots = \frac{N_{R-1} \delta_{R-1}}{E_{R-1}} = \frac{N_R \delta_R}{E_R} \quad (5)$$

假设 $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_{R-1} = \delta \neq \delta_R$, 则式(5)变为:

$$\frac{N_1 \delta}{E_1} = \frac{N_2 \delta}{E_2} = \frac{N_3 \delta}{E_3} = \dots = \frac{N_{R-1} \delta}{E_{R-1}} = \frac{N_R \delta_R}{E_R} \quad (6)$$

假设 $\frac{N_{R-1} \delta}{E_{R-1}} = \frac{(\delta - \delta_R) E_{\text{tra}}}{\delta_R (E_{\text{tra}} + E_{\text{rec}})}$ 成立,则把式(4)代入式(6)进行简单变换后得到 $N_{R-1} (\delta - \delta_R) E_{\text{tra}} = \delta_R N_R (E_{\text{tra}} + E_{\text{rec}})$, 转化得到:

$$\frac{N_R}{N_{R-1}} = \frac{(\delta - \delta_R) E_{\text{tra}}}{\delta_R (E_{\text{tra}} + E_{\text{rec}})} \quad (7)$$

显然当 $\delta > \delta_R$ 时,式(7)成立,即 $\frac{N_{R-1} \delta}{E_{R-1}} = \frac{N_R \delta_R}{E_R}$; 当 $\delta \leq \delta_R$

时,式(7)不成立,即 $\frac{N_{R-1} \delta}{E_{R-1}} \neq \frac{N_R \delta_R}{E_R}$ 。

若 $\frac{(\delta - \delta_R) E_{\text{tra}}}{\delta_R (E_{\text{tra}} + E_{\text{rec}})} = \frac{1}{\mu}$, 则 $\frac{N_R}{N_{R-1}} = \frac{1}{\mu}$ 。

假设:

$$\frac{N_{i-1} \delta}{E_{i-1}} = \frac{N_i \delta}{E_i}, 2 \leq i \leq R-1 \quad (8)$$

则 $E_{i-1} N_i = E_i N_{i-1}$ 。根据式(4)化简得到:

$$\frac{N_{i-1}}{N_i} = \frac{\sum_{k=i}^R N_k}{\sum_{k=i+1}^R N_k} > 1 \quad (9)$$

只要满足式(9),式(8)即成立。

综上所述:当同时满足式(7)和式(9)时,式(6)成立,即最优化能耗效率可达。

令 $N = \sum_{i=1}^R N_i$ 表示无线 mesh 网络中所有的簇头节点数

目,则根据式(9)可写成:

$$\frac{N_{i-1}}{N_i} = \frac{N - \sum_{k=1}^{i-1} N_k}{N - \sum_{k=1}^i N_k} = \frac{N - \sum_{k=1}^{i-1} N_k}{N - \sum_{k=1}^{i+1} N_k} = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (10)$$

$$= q > 1, 2 \leq i \leq R-2$$

即若网络中可实现最优化能耗效率,则网络中簇头节点数目从圆环 C_{R-1} 到最内圆环 C_1 以等比递增且 $\delta > \delta_R$ 。

定理 1 如果无线 mesh 网络中簇头节点的数目从圆环 C_{R-1} 到最内圆环 C_1 以等比 $q (q > 1)$ 递增,处于圆环 C_i 中的簇头节点的初始能量为 δ_i , 满足 $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_{R-1} = \delta \neq \delta_R$ 且 $\delta > \delta_R$; 圆环 C_R 和圆环 C_{R-1} 中的簇头节点数目之比为 $\frac{1}{\mu}$ 且 $\mu = q-1$,

$\frac{(\delta - \delta_R)E_{tra}}{\delta_R(E_{tra} + E_{rec})} = \frac{1}{\mu}$, 则在无线 mesh 网络中能够实现最优化能耗效率均衡。

证明 等比数列求和公式:

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

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

因此:

$$\sum_{k=j}^R N_k = N_R(q^{R-j}) \quad (11)$$

$$\text{式(10)的右边 } \frac{N_i}{N_{i-1}} = \frac{\sum_{k=j}^R N_k}{\sum_{k=i+1}^R N_k} = \frac{N_R q^{R-j}}{N_R q^{R-i-1}} = q = \frac{N_{i-1}}{N_i} \text{ 等于左}$$

边,即式(11)成立,即证。

3.4 算法描述

在无线 mesh 网络中,簇头节点分布是非均匀的,离 sink 节点越近的圆环布置越多的簇头节点。文中簇头节点数目规划是定量的。设圆环 C_i 中簇头节点的密度是 ρ_i , 则从最外面的圆环 C_R 到最里面圆环 C_1 的簇头节点逐渐增加,即:

$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \dots > \rho_{R-1} > \rho_R \quad (12)$$

根据定理 1, 要在无线 mesh 网络中实现最优化能耗效率均衡,就必须满足在圆环 C_i 中簇头节点数目的如下关系:

$$\begin{cases} \frac{N_i}{N_{i+1}} = q, q > 1 \text{ 且 } 2 \leq i \leq R-2 \\ \frac{N_R}{N_{R-1}} = \mu, \mu = q-1 \text{ 且 } \frac{(\delta - \delta_R)E_{tra}}{\delta_R(E_{tra} + E_{rec})} = \frac{1}{\mu} \\ \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_{R-1} = \delta \neq \delta_R, \delta > \delta_R \end{cases} \quad (13)$$

通过适当方法布置,在通信距离为 1 个单位长度时, C_R 中的每个簇头节点能够与 C_{R-1} 中 μ 个簇头节点直接通信,其他圆环中的每个簇头节点能够与相邻内环中 q 个簇头节点直接通信。

令 S_i 表示圆环 C_i 中的面积,则 $S_i = \pi i^2 - \pi(i-1)^2 = \pi(2i-1)$, 那么 C_i 中的簇头节点密度为:

$$\rho_i = \frac{N_i}{S_i} = \frac{N_i}{\pi(2i-1)} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = \frac{2i-1}{q(2i+1)}, q > 1 \text{ 且 } 2 \leq i \leq R-2 \\ \frac{\rho_R}{\rho_{R-1}} = \frac{2R-3}{\mu(2R-1)}, \mu = q-1 \text{ 且 } \frac{(\delta - \delta_R)E_{tra}}{\delta_R(E_{tra} + E_{rec})} = \frac{1}{\mu} \\ \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_{R-1} = \delta \neq \delta_R, \delta > \delta_R \end{cases} \quad (15)$$

式(15)表明相邻圆环间簇头节点密度之比仅和初始能量、发送和接收能量以及簇头节点处在哪个圆环相关。

相邻圆环簇头节点通信机制: 最外层的任何一个簇头节点能够与 C_{R-1} 中的 μ 个簇头节点直接通信,其他圆环中的每个簇头节点能够与相邻的内环中 q 个簇头节点直接通信。圆环 $\{C_i | i \neq R\}$ (上游) 某个簇头节点能够发现圆环 C_{i-1} (下游) 中 q 个待选中继簇头节点并标记相应的 ID (其中, C_R 中的某个簇头节点能够发现圆环 C_{R-1} 中 μ 个待选中继簇头节点)。

选择中继簇头节点规则: 在待选中继簇头节点中选择剩余能量最多的一个; 若待选中继簇头节点剩余能量最多的有好几个,则选择编号靠前的那个。

最优化能耗效率均衡路由算法基本思路: 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对应簇头节点作为待选中继簇头节点。选择完后,最外层簇头节点将收集到的数据发送给 C_{R-1} 中选中的中继节点; 其他圆环簇头节点将收集到的数据和来自上游的数据发送给选中的中继节点。被选中的中继簇头节点重复上述过程直到数据到达 C_i 圆环中的簇头节点,最后数据被发送给 sink 节点。

算法 1 最优化能耗效率均衡路由

步骤 1: $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_{R-1} = \delta \neq \delta_R, \delta > \delta_R$, 设置处于圆环 C_i 中簇头节点的初始能量为 δ_i 。

步骤 2: 设置参数 $L, E_{elec}, \varepsilon_{fs}, \varepsilon_{amp}, d, d_0$ 。

步骤 3: $\begin{cases} E_{tra} = LE_{elec} + L\varepsilon_{fs}d^2, d < d_0 \\ E_{tra} = LE_{elec} + L\varepsilon_{amp}d^4, d \geq d_0 \end{cases}$ 和 $E_{tra} = LE_{elec}$ 的关系式,

计算 E_{tra} 和 E_{rec} 。



步骤 4: $\mu = \frac{\delta_R(E_{in} + E_{rec})}{(\delta - \delta_R)E_{in}}$ 关系式, 计算 μ 。

步骤 5: $q = \mu + 1$ 关系式, 计算 q 。

步骤 6: 布置好圆环簇头节点。

步骤 7: 根据选择中继簇头节点规则选择好圆环中继簇头节点。

步骤 8: 根据中继簇头节点链路, 依次发送数据给中继簇头节点。若中继簇头节点在 C_R 圆环中, 则中继簇头节点只需发送收集到的数据, 否则中继簇头节点发送上游发送的数据和自身收集的数据。

步骤 9: 更新中继簇头节点剩余能量信息。

步骤 10: 重复步骤 7~步骤 9, 直至簇头节点剩余能量为 0。

4 仿真实验

采用 OMNET++ 网络仿真平台进行仿真实验验证, 对在无线 mesh 网络中的簇头节点非均匀分布策略以及最优能耗效率均衡路由进行模拟, 并比较该策略与簇头节点随机非均匀分布策略、簇头节点均匀分布策略在网络生存周期和网络剩余能量率方面的性能。表 1 是模拟实验的基本参数。

表 1 模拟实验基本参数

参数	数值
节点初始能量 δ (J)	0.5~0.8
节点初始能量 δ_R (J)	0.1~0.4
单位时间内产生和发送数据量 L (bit)	1 000
发射电路损耗的能量 E_{elec} (nJ/bit)	50
采用自由空间模型功率放大所需能量 e_s (nJ/(bit·m ²))	10
采用多路径衰减模型功率放大所需能量(nJ/(bit·m ⁴))	0.001 3
传输距离 d (m)	1
传输距离阈值 d_0 (m)	87

本文所描述的策略就是簇头节点非均匀分布策略, 通过簇头节点的适当布置, 运用最优化能耗效率均衡路由算法实现; 簇头节点随机非均匀分布策略指每个圆环内簇头节点随机布置, 而同时运用最优化能耗效率均衡路由算法; 簇头节点均匀分布策略指簇头节点总数目不限定, 但每个圆环内的簇头节点数目都相同且随机布置。在仿真模拟实验中, 这 3 个算法均是以网络半径在 1~6 且所有数据

均在路由算法运行 10^4 次取平均值所得。

4.1 网络剩余能量率

网络剩余能量率是指在网络生存周期结束时, 网络中剩余能量总和与网络中所有节点的初始能量总和之间的比值。本文通过仿真实验模拟簇头节点非均匀分布、簇头节点随机非均匀分布和簇头节点均匀分布的网络剩余能量率(网络半径)。

当 $q=2$ 时, 簇头节点非均匀分布和簇头节点随机非均匀分布的网络剩余能量率如图 3 所示。当 $q=2$ 时, 簇头节点非均匀分布和簇头节点均匀分布的网络剩余能量率如图 4 所示。

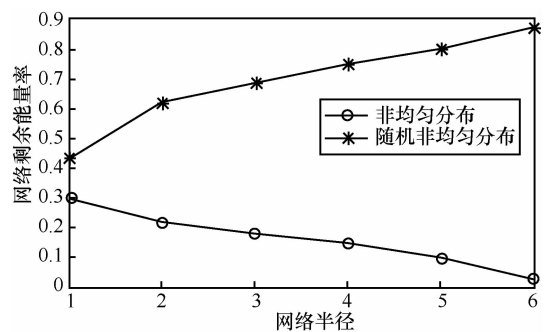


图 3 当 $q=2$ 时非均匀和随机非均匀分布的网络剩余能量率

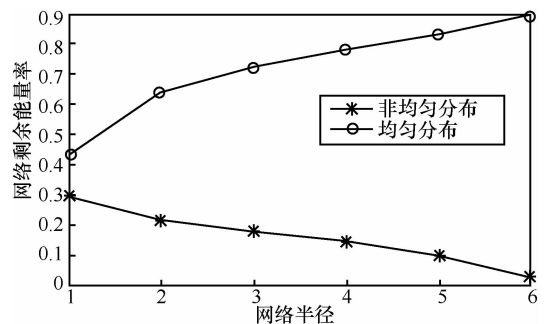


图 4 当 $q=2$ 时非均匀和均匀分布的网络剩余能量率

从图 3 可以看出, 在网络剩余能量率方面, 总体上簇头节点非均匀分布策略比簇头节点随机非均匀分布策略低; 随着网络半径的变大, 簇头节点非均匀分布策略的网络剩余能量率呈下降趋势, 而簇头节点随机非均匀分布的网络剩余能量率呈上升趋势。从图 4 可以看出, 在网络剩余能量率方面, 总体上簇头节点非均匀分布策略比簇头节点均匀分布策略低; 随着网络半径的变大, 簇头节点非均匀分布策略的网络剩余能量率呈下降趋势, 而簇头节点均匀分布的网络剩余能量率呈上升趋势。

当 $q=2$ 时, 以上 3 种策略对网络剩余能量率进行综合

考虑分析,如图 5 所示。从图 5 可以看出,采用节点非均匀分布的网络剩余能量率是最低的,并随着网络半径的变大呈下降的趋势,而节点随机非均匀分布比节点均匀分布的网络剩余能量率低,说明该算法有较好的有效性和扩展性。

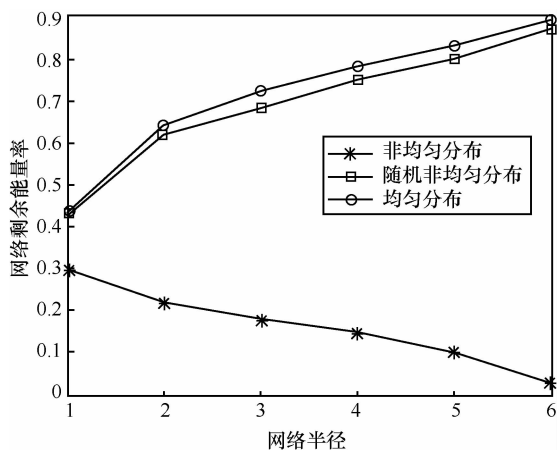


图 5 当 $q=2$ 时不同策略分布下的网络剩余能量率

当 q 分别为 2、5、7 时,3 种策略的网络剩余能量率如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着 q 值变大,网络剩余能量率变小。当 q 值不同时,3 种策略的趋势与 $q=2$ 时的趋势相同。

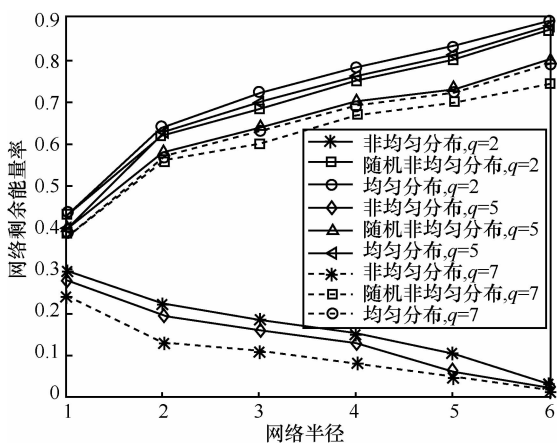


图 6 当 q 不同时不同策略分布下的网络剩余能量率

最外环剩余能量 E_{ns} 可表示为:

$$E_{ns} = N_R \delta_R - \tau E_R = N_R \delta_R - \frac{N_{R-1} \delta_{R-1}}{E_{R-1}} E_R \quad (16)$$

根据式(4)和式(13)可得:

$$\begin{aligned} E_{res} &= N_R \delta_R - \frac{N_{R-1} \delta_{R-1} N_R E_{tra}}{(N_R + N_{R-1}) E_{tra} + N_{R-1} E_{rec}} \\ &= N_R \delta_R - \frac{N_R \delta E_{tra}}{\left(\frac{1}{q-1} + 1\right) E_{tra} + E_{rec}} \end{aligned} \quad (17)$$

从式(17)可以看出,当 q 值较大时,剩余能量值比较小,可见理论分析与模拟结果一致。

4.2 网络生存周期

网络生存周期是指从最开始持续到网络中第一次出现有节点耗尽可能量为止。通过仿真实验模拟簇头节点非均匀分布、簇头节点随机非均匀分布和簇头节点均匀分布的网络生存周期。

簇头节点非均匀分布和簇头节点随机非均匀分布的网络生存周期性能如图 7 所示。簇头节点非均匀分布和簇头节点均匀分布的网络生存周期性能,如图 8 所示。

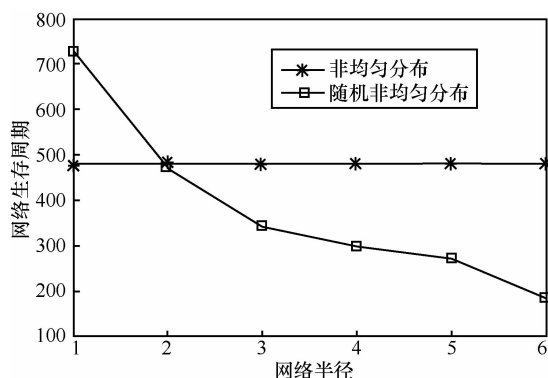


图 7 当 $q=2$ 时非均匀和随机非均匀分布的网络生存周期

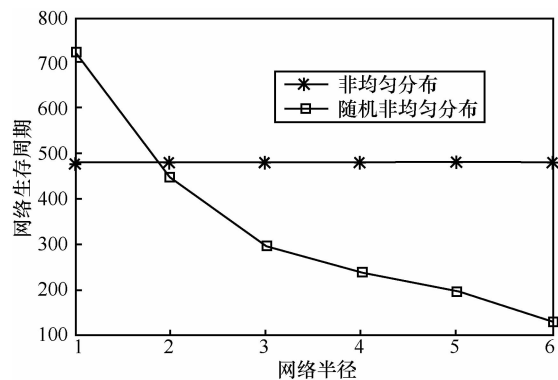


图 8 当 $q=2$ 时非均匀和均匀分布的网络生存周期

从图 7 可以看出,在网络半径小于 2 的情形下,总体上簇头节点非均匀分布策略比簇头节点随机非均匀分布策略的网络生存周期短;在网络半径大于 2 的情形下,总体上簇头节点非均匀分布策略比簇头节点随机非均匀分布策略的网络生存周期长;随着网络半径的变大,簇头节点非均匀分布策略的网络生存周期呈不变趋势,而簇头节点随机非均匀分布的网络生存周期呈下降趋势。从图 8 可以看出,在网络半径小于 2 的情形下,总体上簇头节点非均匀分布策略比簇头节点均匀分布策略的网络生存周期



短;在网络半径大于2的情形下,总体上簇头节点非均匀分布策略比簇头节点均匀分布策略的网络生存周期长;随着网络半径的变大,簇头节点非均匀分布策略的网络生存周期呈不变趋势,而簇头节点均匀分布的网络生存周期呈下降趋势。

以上3种策略在网络生存周期方面综合考虑分析,如图9所示。从图9可以看出,总体上采用簇头节点非均匀分布比簇头节点随机均匀分布的网络生存周期更长,并随着网络半径的变大,网络生存周期变化不明显,而簇头节点随机非均匀分布比簇头节点均匀分布的网络生存周期长,说明该算法有较好的有效性和扩展性。

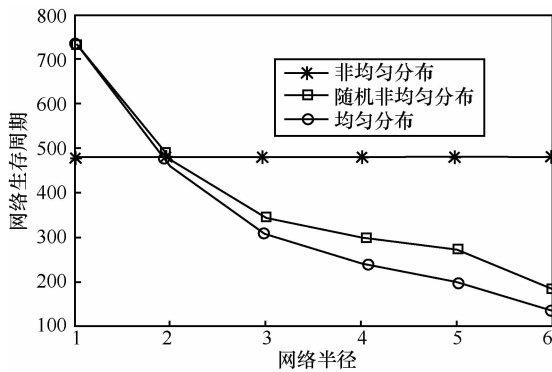


图9 当 $q=2$ 时不同策略分布下的网络生存周期

当 q 分别为2、5、7时,3种策略在网络生存周期的性能,如图10所示。从图10可以看出,随着 q 值的变大,网络生存周期变长。当 q 值不同时,3种策略的趋势与 $q=2$ 时的趋势相同。

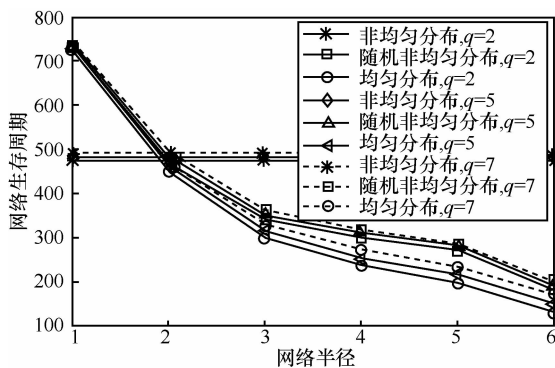


图10 当 q 值不同时不同策略分布下的网络生存周期

网络生存周期可表示为:

$$\tau = \frac{N_{R-1} \delta_{R-1}}{E_{R-1}} = \frac{N_{R-1} \delta_{R-1}}{N_R (E_{tra} + E_{rec}) + N_{R-1} E_{tra}}$$

$$= \frac{\delta}{(\frac{1}{q-1} + 1) E_{tra} + E_{rec}} \quad (18)$$

从式(18)可以看出,当 q 值较大时,网络生存周期比较长。该理论分析与模拟结果一致。

5 结束语

针对无线 mesh 网络中的能源空洞现象,采取簇头节点非均匀分布策略。无线 mesh 网络中出现能量空洞会严重影响该网络的能耗效率,但当网络中的簇头节点分布满足一定关系时,该网络能实现最优化能耗效率均衡,即有效避免能量空洞问题。提出了簇头节点非均匀分布策略,设计了路由算法以实现最优化能耗效率均衡。该网络相邻圆环中簇头节点数目关系被量化了,同时在此基础上算出了相邻圆环簇头节点密度关系。通过仿真实验分析,采用该策略能有效提高网络的生存周期和网络剩余能量率。

簇头节点非均匀分布策略导致网络中的节点总数呈指数级增长。因此在实际部署过程中,只有节点能够低成本大规模生产,并有成熟的节点制造技术和精确部署技术,才能保证簇头节点非均匀分布策略的实施。

参考文献

- 1 Akyildiz I F, Wang X, Wang W. Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks*, 2005, 47(5): 445~487
- 2 Sesay S, Yang Z, He J. A survey on mobile Ad Hoc wireless network. *Information Technology Journal*, 2004, 3(2): 168~175
- 3 冯小龙. 矿井无线 mesh 网络关键技术及应用. 中国矿业大学博士学位论文, 2011
- 4 Akyildiz I F, Wang X D, Wang W L. Wireless mesh networks: a survey. *Elsevier Computer Networks*, 2005(45): 445~487
- 5 Akyildiz I F, Su W, Sankarabramanian Y, et al. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102~114
- 6 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
- 7 Song C, Liu M, Cao J N, et al. Maximizing network lifetime based on transmission range adjustment in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2009, 32(11): 1316~1325
- 8 Liu A F, Ren J, Xu J, et al. Analysis and avoidance of energy hole problem in heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2012, 23(9): 2438~2448
- 9 Lian J, Chen L, Naik K, et al. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks. *IEEE Monograph on Sensor Network Operations*, 2004(1): 91~183

- 10 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, USA, 2004: 74~79
- 11 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, USA, 2005: 2721~2725
- 12 Olariu S, Stojmenovic I. Data-centric protocols for wireless sensor networks. Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures. Wiley, 2005
- 13 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
- 14 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
- 15 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): 254~262
- 16 Song C, Liu M, Gong H G, *et al.* ACO-based algorithm for solving energy hole problems in wireless sensor networks. Journal of Software, 2009, 20(10): 2729~2743
- 17 刘安丰, 阳国军, 陈志刚. 基于不等簇半径轮换工作的传感器网络能量空洞避免研究. 通信学报, 2010, 31(1): 1~8
- 18 Zeng Z W, Chen Z G, Liu A F. Energy hole avoidance for WSN based on adjust transmission power. Chinese Journal Computer, 2010, 33(1): 12~22
- 19 Liu A F, Wu X Y, Chen Z G, *et al.* Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks. Computer Communications, 2010, 33(3): 302~32

[作者简介]



陆春龙, 男, 常州大学硕士研究生, 主要研究方向为系统综合节能理论及应用研究。



曹玉春, 男, 博士, 常州大学副教授, 主要研究方向为能源环境领域的多相流、燃烧和数值计算。



乐光学, 男, 博士, 嘉兴学院教授, 主要研究方向为计算机网络与分布式计算、无线网络技术。

(收稿日期: 2013-09-10)

(上接第 28 页)

signatures from bilinear maps. Proceedings of the 22nd International Conference on Theory and Applications of Cryptographic Techniques (Eurocrypt 2003), Warsaw, Poland, 2003: 416~432

- 15 Madden S, Franklin M J, Hellerstein J M. TAG: a tiny aggregation service for Ad Hoc sensor networks. Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, New York, USA, 2002: 131~146

[作者简介]



石鲁生, 男, 宿迁学院副教授, 主要研究方向为信息安全、无线传感器网络。



朱慧博, 女, 宿迁学院副教授, 主要研究方向为无线传感器、高频功率电子变换技术。



陈林, 男, 宿迁学院副教授, 主要研究方向为 Web 服务和语义 Web 服务。

(收稿日期: 2013-06-22)