

负载相似节点分布解决传感器网络能量洞问题*

李巧勤¹⁺, 刘明¹, 杨梅², 陈贵海³

¹(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

²(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Nevada, Las Vegas 89154, USA)

³(计算机软件与新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210093)

Load-Similar Node Distribution for Solving Energy Hole Problem in Wireless Sensor Networks

LI Qiao-Qin¹⁺, LIU Ming¹, YANG Mei², CHEN Gui-Hai³

¹(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

²(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Nevada, Las Vegas 89154, USA)

³(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)

+ Corresponding author: E-mail: helenli803@163.com

Li QQ, Liu M, Yang M, Chen GH. Load-Similar node distribution for solving energy hole problem in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2011, 22(3):451-465. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3944.htm>

Abstract: In a multi-hop wireless sensor network (WSN), sensor nodes closer to the sink have to take a heavier traffic load, and thus, these sensor nodes tend to deplete their energy faster. This uneven energy depletion leads to what is called an energy hole around the sink. If this happens, no more data can be delivered to the sink, and a considerable amount of energy is wasted. This paper investigates the energy hole problem in WSNs. Based on the analysis of traffic load distribution in the continuous space of the network, a load-similar node distribution strategy is proposed to balance energy consumption and solve the energy hole problem. Sensor nodes are deployed according to the load distribution. Most nodes will be deployed in the range where the average load is higher. The impact of idle listening is also investigated. Simulation results demonstrate that the load-similar node distribution strategy prolongs a longer network lifetime than existing nonuniform node distribution and uniform node distribution strategies that do not take in consideration idle listening. When idle listening is considered, the energy consumed on idle listening plays an important part in the overall energy consumption and impacts the network lifetime. The load-similar node distribution improves the network lifetime, although the improvement is not as prominent as without considering idle listening. The analysis model and the proposed load-similar node distribution strategy have the potential to be applied to other multi-hop WSN structures.

Key words: wireless sensor network; energy hole problem; network lifetime; idle listening; load-similar node distribution

* 基金项目: 国家自然科学基金(60721002, 60825205, 61073152, 60703114, 60573131, 60673154); 国家重点基础研究发展计划(973)(2006CB303000); 江苏省高技术研究项目(BG2007039); 美国国家自然科学基金(ECCS-0702168)

收稿时间: 2009-07-03; 修改时间: 2010-03-04; 定稿时间: 2010-07-28

CNKI 网络优先出版: 2010-11-17 16:54, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.tp.20101117.1654.001.html>

摘要: 基于多跳路由的传感器网络,靠近 sink 的节点由于要转发更多的数据,其能量消耗较快.能量消耗的不平衡导致了 sink 周围产生能量洞(energy hole),造成能量浪费,远离 sink 的节点还有大量的能量,但产生的数据不能传送到 sink.研究了传感器网络的能量洞问题.在网络的连续空间状态下分析节点的负载分布特性,并研究空闲侦听(idle listening)对能量消耗的影响.基于分析结果,提出负载相似节点分布(load-similar node distribution)策略,即根据负载分布特性配置节点,负载重的区域配置较多的节点,以平衡各区域节点的能量消耗,解决能量洞问题.仿真结果显示,在不考虑空闲侦听能量消耗的情况下,与已有的一种非均匀节点分布和均匀节点分布相比,负载相似节点分布策略对网络寿命有显著改善;当考虑空闲侦听时,由于空闲侦听的能量消耗在总能量消耗中占较大比重,影响了网络寿命,但与其他两种节点分布策略相比,负载相似节点分布对网络寿命仍然有所改善.该分析模型和提出的负载相似节点分布策略可适用于其他多跳传感器网络.

关键词: 无线传感器网络;能量洞问题;网络寿命;空闲侦听;负载相似节点分布

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

近年来,随着微电子技术和无线通信技术的进步,低成本、低功耗和多功能的微型传感器得到快速发展.无线传感器网络通常由一定数量的传感器节点和一个或多个 sink 节点组成.传感器节点负责感应数据,sink 节点负责收集和处理数据.由于传感器节点的能量有限,并且通常难以补充,因此需要通过有效的能量利用来延长传感器网络的寿命.在大规模无线传感器网络中,通常采用分簇(cluster)结构^[1]和多跳(multi-hop)路由策略^[2]实现能量的有效利用.

多跳路由由传感器网络由于多对一(many-to-one)的通信模型,网络中通常存在能量消耗不均衡的现象^[3-8],靠近 sink 的节点由于要转发更多的数据而过早地耗尽能量,导致网络分离,其他节点的数据不能传送到 sink,限制了网络寿命.这种现象被称为传感器网络的能量洞问题(energy hole problem).文献[4]的实验数据表明,当靠近 sink 的传感器节点能量耗尽时,远离 sink 的传感器节点剩余能量还高达初始能量的 93%,这造成大量的能量被浪费.

针对传感器网络的能量洞问题,已有文献提出了不同的解决方法.文献[9,10]从理论上分析能量洞问题;文献[7,11]采用可调的传输距离,即不同区域的节点采用不同的传输距离;文献[5]采用能量有效的分簇机制,即非均匀分簇方法,靠近 sink 的簇较小.这样,靠近 sink 的簇头可以保留更多的能量转发来自其他簇的数据;而文献[6,12]采用非均匀节点分布策略,在通信负载重的区域配置更多的节点,以平衡各区域节点的能量消耗.这些方法大多采用基于环(corona)的网络模型,将网络划分为以 sink 为中心的同心圆环,网络寿命周期中各环的边界固定不变.

文献[13]提出了适用于大型传感器网络的 PMRC(progressive multi-hop rotational cluster)网络模型.在该模型中,网络被划分为以 sink 为中心的若干层,每一层又可分为若干簇(cluster),每个簇由位于同一层的节点和其内层(靠近 sink)的簇头节点组成.簇头节点将所有来自簇内成员的数据和来自外层簇头(远离 sink)的数据转发至其内层的簇头.由于靠近 sink 的节点要转发来自外层的所有数据,导致节点的能量消耗不平衡.文献[14]在 PMRC 网络模型基础上引入动态层的思想,即层边界在网络生命周期中动态变化,以缓解能量消耗不平衡的问题.然而,由于 PMRC 网络模型基于多对一的通信模型,即使采用动态层,其网络寿命仍然受限于网络初始拓扑中第 1 层的节点数.现有的针对无线传感器网络能量洞问题的解决方法通常采用固定边界的环/层,不适合层边界动态变化的网络模型.本文在连续空间对节点的负载分布进行分析,以反映层边界动态改变的特点,并分析空闲侦听对负载分布的影响.在此基础上提出负载相似节点分布策略,根据网络各区域负载分布特性确定节点分布,解决能量洞问题,平衡各区域的能量消耗,从而延长网络寿命.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节介绍本文采用的网络模型.第 3 节分析网络不同区域节点的负载分布特性,并基于分析结果提出负载相似节点分布策略.第 4 节通过仿真实验研究负载相似节点分布策略的性能,并与其他节点分布策略的性能进行比较.第 5 节总结全文.

1 相关工作

大型多跳传感器网络多对一(many-to-one)的通信模型导致能量洞问题.在文献[9]中,Li 和 Mohapatra 通过建立数学模型分析多跳传感器网络各区域节点能量消耗不平衡的问题.假定圆形网络区域内节点均匀分布,所有节点按固定速率产生并发送数据.将网络划分为以 sink 为中心的同心圆环(ring),节点产生的数据以多跳路由方式逐环传送到 sink 节点.靠近 sink 的节点比其他区域的节点要转发更多的数据,分析结果验证了内环节点能量消耗更快而生命期较短.这种能量消耗不均衡的现象被称为能量洞问题.利用分析模型,作者还对几种缓解能量洞问题的方法有效性进行研究,包括配置辅助、流量压缩和聚合,并通过仿真结果验证了这些策略对缓解能量洞问题有帮助.

Olariu 和 Stojmenovic^[10]首次从理论上分析如何避免多跳传感器网络的能量洞问题.与文献[9]的网络模型相似,网络节点均匀分布,分为等宽的同心环(corona),所有节点按相同速率向 sink 发送报告.每个环的节点只能向相邻内环的节点发送数据.能量模型为 $E=d^\alpha+c$,其中, d 为传输距离, α 为能量消耗系数, c 为正值常数.分析表明,为了减少从节点到 sink 的路径上消耗的总能量,所有环应该具有相同的宽度,但这又会导致不同环的节点能量消耗不均衡而产生能量洞的问题.当 $\alpha=2$ 时,能量洞问题不可避免;当 $\alpha=4$ 时,假设节点的传输半径可调,并且与节点所在环的宽度相等,则可以通过适当地选择各环的宽度来平衡各环节点的能量消耗.但是,由于节点最大传输距离 r_x 的限制,通常难以实现整个网络区域完全的能量平衡.

文献[11]基于改进的分级环模型,提出调节各环节点的传输范围解决多跳传感器网络的能量洞问题.将节点的最大传输范围划分为几个级别(level),同一环内所有节点具有相同的传输范围级别(称为环的传输范围),而不同的环可以具有不同的传输范围.作者指出,调节各环节点的数据传输距离是实现网络节能的最有效方法.首先证明了搜索各环的最优传输距离是一个多目标优化问题,并且是 NP 难问题;进一步提出集中式 CETT 算法和分布式 DETL 算法,分别针对不同节点分布策略产生优化的传输范围列表.

为了提高网络的数据容量,文献[6]提出非均匀节点分布策略,靠近 sink 的区域具有较高的节点密度;同时还提出相应的路由算法,节点交替处于活动和休眠状态,通过路由算法保证网络在任何时候有最小密度的均匀分布活动节点.文中只考虑发送数据消耗的能量.文献[15]也提出通过非均匀节点分布策略来平衡网络中能量消耗.假设基于环的网络模型, k 为最优环数,作者认为,如果第 i 环的节点密度正比于 $(k+1-i)$,则各环可以达到能量平衡.同样,这里也只考虑发送数据消耗的能量.

文献[12]从理论上研究非均匀节点分布的能量洞问题.作者同样假设基于环的网络模型,节点具有相同的数据采集率,能量模型同时考虑发送数据和接收数据消耗的能量.分析表明,在圆形多跳传感器网络中,如果节点按相同速率产生数据并逐环传送到 sink,即使采用非均匀节点分布,由于多对一的通信模型使得能量洞问题不可能完全避免.但是如果除最外环以外,从外环到内环,相邻环的节点数目按等比 $q(q>1)$ 递增,而且次外环与最外环的节点数比率为 $(q-1)$,则可以实现网络的次优能量平衡.即除最外环之外,其余环的能量消耗达到平衡.基于该分析结论,作者提出非均匀节点分布和相应的 q -Switch 路由策略,用于解决传感器网络的能量洞问题.其网络模型各环边界固定,网络维持到第 1 个节点死亡.

在前面提到的解决能量洞问题的方法中,都没有考虑节点空闲侦听的能量消耗.Ye 等人^[16]指出,在很多传感器网络应用中,节点空闲侦听消耗的能量在总能量消耗中占较大比例,这部分能量消耗不可忽略.为了减少节点空闲侦听的能量消耗,传感器网络协议设计中通常采用 duty cycle,即节点交替处于活动和休眠状态.Medidi 和 Zhou^[17]提出通过给不同区域的节点分配不同的 duty cycle 来解决能量洞问题,并通过仿真结果验证这种方法比统一分配 duty cycle 对网络寿命有较大改善.同样地,文献[17]也采用边界固定的环模型.

本文研究基于层边界动态可变的 PMRC 网络模型中的能量洞问题,在负载分析的基础上提出负载相似节点分布策略.与以上文献中提出的方法相比,本文的方法主要有以下不同:1) 本文的方法考虑层边界动态可变的网络模型,即网络中层边界在网络生命周期中是动态变化的,而现有的解决方法采用固定的层边界;2) 本文基于的网络模型中,当某节点能量降低到门限值后会进行网络重建,而已有方法中均基于网络不可重建的假设,即当第 1 个节点耗尽能量后网络寿命结束;3) 本文的分析中考虑了网络构建的能量消耗以及空闲侦听的能量

消耗对负载的影响.

2 网络模型

2.1 PMRC模型

假设网络中所有传感器节点具有相同的初始能量,并且所有节点都是静止的.sink 位于网络区域的中心位置.节点的最大传输距离为 r ,距离 $\text{sink}>r$ 的节点产生的数据通过多跳路由方式转发到sink.网络被划分为多个相邻的层(layer).到 sink 的距离(跳数,hop)相同的节点属于同一层.每一层又可分为若干簇(cluster),每个簇由位于同一层的节点和一个位于相邻内层的簇头(cluster head)组成.这种基于层的结构被称为 PMRC(progressive multi-hop rotational cluster)^[13].图1显示了一个基于PMRC的网络,包含3层,其中阴影部分是位于第2层的一个簇,包含节点2~节点8,其簇头是位于第1层的节点1.

基于PMRC的网络生命周期分为若干轮(round),每一轮包含网络构建阶段和数据收集阶段,如图2所示.在网络构建阶段,需要进行多次迭代(iteration),每一次迭代完成一层的节点发现和簇的构建,整个网络的拓扑结构从内到外逐层构建.每次迭代由 sink 节点广播一个控制分组(CP)开始.第1次迭代,接收到CP后,距离 sink 为一跳的节点响应CP,将自己的层号设置为1,并选择 sink 节点为簇头.从第2次迭代开始,之后所有迭代的过程相同.对第 n 次迭代,位于 $(n-1)$ 层的节点接收到来自 sink 的CP后,如果节点的剩余能量高于预定的门限值(threshold),则发送广播分组(BP),包含其节点号、层号和剩余能量等信息.收到BP并且还未知层号的节点根据BP的信息设置自己的层号,依据簇头选择算法从所有BP的发送者中选择一个节点作为簇头,并发送簇头选择分组(HP).在本次迭代中被选作簇头的节点,通过广播一个簇控制分组(CCP),公告以自己为簇头的簇内所有成员.该过程重复直到网络中所有节点都被发现,即完成一轮的网络构建.

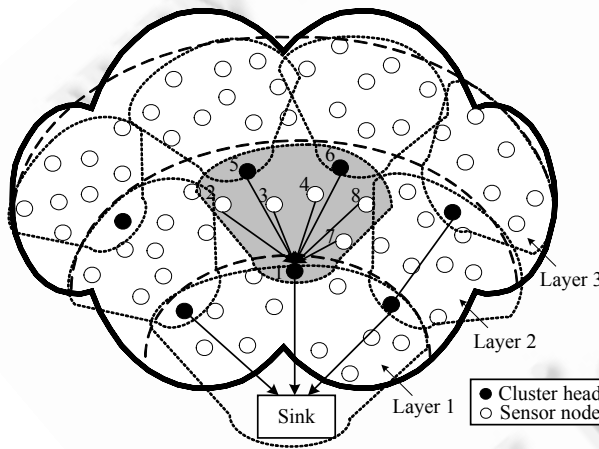


Fig.1 PMRC-Based structure

图1 PMRC 结构

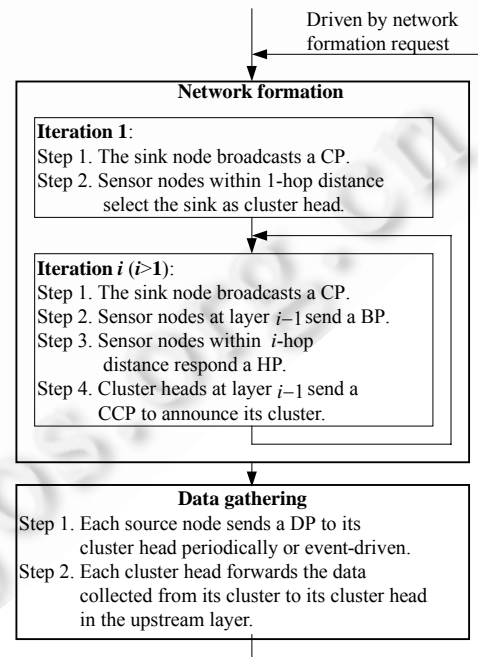


Fig.2 Network operation phases

图2 网络的阶段划分

数据收集阶段,每个节点周期性或基于事件驱动发送数据分组(DP)到其簇头,簇头将接收到的分组通过多跳路由方式转发到 sink 节点.当某个簇头的剩余能量降到预定的门限值时,广播一个 beacon 分组,声明自己的剩余能量不足以继续担任簇头.该簇头的成员接收到 beacon 分组后,发送一个网络重建请求,该请求将被转发至

sink 节点.一旦 sink 节点接收到网络重建请求,就发起新一轮网络构建过程.如果网络构建过程中有节点不能找到候选簇头,则认为网络分离,网络寿命结束.

2.2 动态层模型

基于 PMRC 结构的网络,靠近 sink 的簇头因为要转发更多的数据而能量消耗得更快,导致能量消耗不平衡.采用 OL(overlapping layers)策略^[18]能在一定程度上缓解各簇头能量消耗不平衡的问题,但是由于层边界和相邻层的重叠范围(overlapping range)都固定,网络寿命仍然受到限制.为了更进一步平衡各簇头的能量消耗,文献[14]引入动态层的思想,如下所述.

假设一个节点只有当剩余能量高于预定的门限值才具备作簇头的资格.当某个簇头的剩余能量降至门限值时,触发网络重建.在网络重建过程中(如图 2 所示),每个节点将接收来自其内层节点的 BP 并选出候选簇头,然后根据簇头节点的层编号设置自己的层编号.若重建过程中某个节点不能接收到任何节点的 BP,即节点找不到候选簇头,则网络寿命终止.若节点在网络重建前后的层编号不同,则这些层编号发生变化的节点引起层边界向 sink 方向移动及新簇大小的变化.因此在整个网络寿命期间,相邻层之间的边界会根据需要动态变化.

图 3 显示相邻层之间的边界动态变化的情况.网络的初始拓扑如图 3(a)所示,以第 2 层中包含成员节点 3~节点 6 的簇为例,该簇以节点 2 为簇头.当簇头节点 2 的剩余能量降至门限值之后,网络重建,如图 3(b)所示,节点 3 和节点 5 选择节点 1 作为新的簇头,节点 4 选择节点 9 为新的簇头.由于节点 6 超出第 1 层所有节点的传输范围,若层边界固定,则节点 6 找不到候选簇头,网络寿命终止.而采用动态层边界,节点 6 的候选簇头不再局限在第 1 层,因此选择第 2 层的节点 5 作为新的簇头,其新的层编号为 3,即节点 6 被“推”至第 3 层.这样,第 2 层和第 3 层之间的边界在这个区域朝着 sink 的方向移动.若网络重建后某节点到新簇头的距离小于到原簇头的距离(比如节点 6 到节点 5 的距离远小于到节点 2 的距离),还可以减少其数据发送的能量消耗.需要注意的是,原本属于第 1 层的节点(如图 3 中的节点 2)不会被“推”至第 2 层,因为它仍然能够一跳到达 sink 节点.

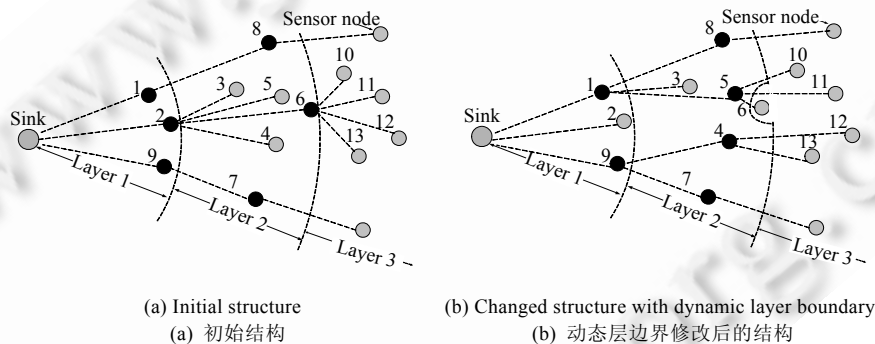


Fig.3 Illustration of dynamic layer boundary

图 3 动态层示意图

3 负载相似节点分布策略

3.1 能量模型

假设每个传感器节点具有相同的初始能量,而 sink 节点不受能量限制,每个节点都可能被选作簇头.在不考虑空闲侦听能量消耗的情况下,传感器节点的能量消耗主要包含 3 部分:

- 1) E_t , 传送本簇节点产生的数据以及转发来自外层的数据所消耗的能量;
- 2) E_r , 接收来自外层的数据所消耗的能量;
- 3) E_c , 网络构建过程中接收和发送控制分组所消耗能量.

若考虑空闲侦听,则节点的能量消耗还包含 E_l , 空闲侦听的能量消耗.

考虑自由空间(free space)信道模型^[1],则在距离为 r 的范围传送 l 位(bit)数据所消耗能量为

$$l(E_{elec} + \epsilon r^\alpha) \tag{1}$$

相应地,接收 l 位数据所消耗能量为 lE_{elec} .系统参数 E_{elec} , ϵ 和 α 的取值与文献[1]相同,即

$$E_{elec} = 50\text{nJ/bit}, \epsilon = 10\text{pJ/bit/m}^2, \alpha = 2.$$

3.2 负载分析

假设 $2R \times 2R$ 的正方形区域内均匀地分布密度为 ρ 的静态传感器节点, sink 节点位于区域的中心位置. 随机选择部分传感器节点负责感应数据, 这样的节点称为源节点(source nodes). 假设源节点占节点总数的比例为 μ , 每个源节点每隔单位时间产生并发送 λ 位数据. 图 4 显示了第 i 层在不同区域时的示意图, 阴影部分为第 i 层覆盖的区域, 假设其外边界到 sink 的距离为 d , 层宽等于传输范围 r .

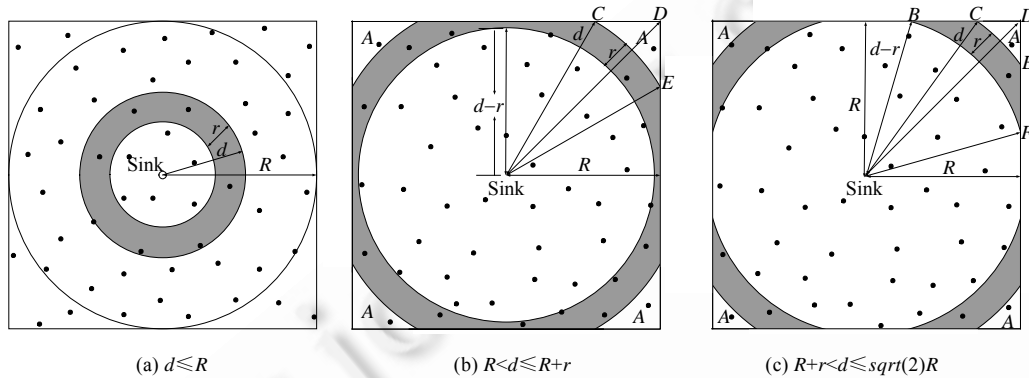


Fig.4 Illustration of layer i in different areas

图 4 第 i 层位于不同区域的示意图

首先,在不考虑空闲侦听能量消耗的情况下分析节点的负载分布特性.从第 2.1 节可知,网络构建阶段的能量消耗主要是接收控制分组,包括 CP,HP,BP 和 CCP.而发送这些控制分组所需能量很小,这里忽略不计.设网络的最大层数为 m ,每一轮的网络构建阶段,第 i 层节点所消耗的能量 E_{ci} 计算如下:

$$E_{c1} = (2 \times cs + hs \times hn) E_{elec} \tag{2-1}$$

$$E_{ci} = (cs \times cn + bs \times bn + hs \times hn + ccs \times ccn) E_{elec}, 1 < i < m \tag{2-2}$$

$$E_{cm} = (cs \times cn + bs \times bn + ccs \times ccn) E_{elec}, I = m \tag{2-3}$$

其中, cs, hs, bs 和 ccs 分别代表 CP,HP,BP 和 CCP 的分组长度(以 bit 为单位),而 cn, hn, bn 和 ccn 分别代表每一轮的网络构建过程中每个节点平均接收的 CP,HP,BP 和 CCP 分组数.假设初始拓扑中位于第 $i(i > 1)$ 层的节点在生命周期中平均被推至 $2i$ 层,则 cn 的平均值为 $(3i+2)/2$.

先推导 $r < d \leq R$ 范围内各层节点的平均负载,如图 4(a)所示.根据能量模型,单位时间内第 i 层的节点接收数据所消耗的能量 E_{ri} 和传送数据所消耗的能量 E_{ti} 分别计算如下:

$$E_{ri} = E_{elec} \lambda \rho \mu (4R^2 - \pi d^2), r < d \leq R \tag{3}$$

$$E_{ti} = (E_{elec} + \epsilon r^2) \lambda \rho \mu (4R^2 - \pi(d-r)^2), r < d \leq R \tag{4}$$

设 N_i 为第 i 层的节点数,可由公式 $\rho \pi (d^2 - (d-r)^2)$ 计算而得,则第 i 层中传感器节点单位时间内的平均负载计算如下

$$\begin{aligned}
L_i &= \frac{E_{ri} + E_{ti} + E_{ci}}{N_i} + \frac{E_{ci}}{T_r} \\
&= E_{elec} \frac{\lambda \rho \mu (4R^2 - \pi d^2)}{\rho \pi (d^2 - (d-r)^2)} + (E_{elec} + \varepsilon r^2) \frac{\lambda \rho \mu (4R^2 - \pi (d-r)^2)}{\rho \pi (d^2 - (d-r)^2)} + \\
&\quad \frac{(cs \times (3i+2)/2 + bs \times bn + hs \times hn + ccs \times ccn) E_{elec}}{T_r} \\
&= \frac{\mu \lambda (E_{elec} (8R^2 - \pi d^2 - \pi (d-r)^2) + \varepsilon r^2 (4R^2 - \pi (d-r)^2))}{\pi (d^2 - (d-r)^2)} + \\
&\quad \frac{(cs \times (3i+2)/2 + bs \times bn + hs \times hn + ccs \times ccn) E_{elec}}{T_r}
\end{aligned} \tag{5-1}$$

其中, T_r 为每一轮的平均寿命, $\frac{1}{T_r}$ 为单位时间内的网络构建次数.

当 $R < d \leq R+r$ 时,如图 4(b)所示,节点单位时间内的平均负载计算如下:

$$\begin{aligned}
L_i &= \frac{E_{ri} + E_{ti} + E_{ci}}{N_i} + \frac{E_{ci}}{T_r} \\
&= \frac{4A \lambda \mu E_{elec} + \lambda \mu (E_{elec} + \varepsilon r^2) (4A + S_1)}{S_1} + \frac{(cs \times (3i+2)/2 + bs \times bn + hs \times hn + ccs \times ccn) E_{elec}}{T_r}
\end{aligned} \tag{5-2}$$

其中, A 为图 4(b)的阴影部分之外的图形 CDE 的面积,可由公式 $(R - \sqrt{d^2 - R^2})R - \left(\frac{\pi}{4} - a \cos\left(\frac{R}{d}\right)\right)d^2$ 计算而得; S_1 为阴影部分的面积,由 $4\left(R^2 - \frac{\pi}{4}(d-r)^2 - A\right)$ 计算而得.

当 $R+r < d < \sqrt{2}R$ 时,如图 4(c)所示,节点单位时间内的平均负载计算如下:

$$L_i = \frac{E_{ri} + E_{ti} + E_{ci}}{N_i} + \frac{E_{ci}}{T_r} = \frac{\lambda \mu E_{elec} A + \lambda \mu (E_{elec} + \varepsilon r^2) A'}{A' - A} + \frac{(cs \times (3i+2)/2 + bs \times bn + hs \times hn + ccs \times ccn) E_{elec}}{T_r} \tag{5-3}$$

其中, A' 为图 4(c)中图形 BDF 的面积,可由 $(R - \sqrt{(d-r)^2 - R^2})R - \left(\frac{\pi}{4} - a \cos\left(\frac{R}{d-r}\right)\right)(d-r)^2$ 计算而得; A 为图形 CDE 的面积,其计算与公式(5-2)中 A 的计算相同.

当 $d = \sqrt{2}R$ 时,即最外层,节点单位时间内的平均负载为

$$L_i = \frac{E_{ti} + E_{ci}}{N_i} + \frac{E_{ci}}{T_r} = \mu \lambda (E_{elec} + \varepsilon r^2) + \frac{(cs \times (3i+2)/2 + bs \times bn + ccs \times ccn) E_{elec}}{T_r} \tag{5-4}$$

第 1 层的节点需要发送第 1 层节点产生的数据,同时要接收并转发来自第 1 层之外的所有数据.单位时间内,接收和发送数据消耗的能量分别计算如下:

$$E_{r1} = E_{elec} \lambda \rho (4R^2 - \pi r^2) \mu \tag{6}$$

$$E_{t1} = (E_{elec} + \varepsilon r^2) \lambda \rho \mu 4R^2 \tag{7}$$

由此可得:

$$L_1 = \frac{E_{r1} + E_{t1}}{N_1} + \frac{E_{c1}}{T_r} = \mu \lambda \left(\frac{E_{elec} (8R^2 - \pi r^2)}{\pi r^2} + \frac{4\varepsilon R^2}{\pi} \right) + \frac{(2 \times cs + hs \times hn) E_{elec}}{T_r} \tag{8}$$

当传输距离 $r=40\text{m}$ 、节点密度 $\rho=0.0064/\text{m}^2$ 时,节点平均负载随节点到 sink 的距离 d 的变化趋势如图 5 所示.其中, d 以传输范围 r 为单位, $\mu=20\%$, $\lambda=400\text{bps}$, 而 $cs(145\text{bits})$, $hs(169\text{bits})$, $bs(205\text{bits})$ 和 $ccs(259\text{bits})$ 的值与仿真实验的取值相同.其他参数的取值基于对均匀节点分布的仿真结果分析,其中 $hn=3.4$, $bn=6.79$, $ccn=3.4$, $T_r=200$.针对不同的 r 和 ρ ,这些参数的取值需要进行相应的调整.从图 5 可以看出,节点的平均负载随着节点到 sink 的距离 d 增加而减少.

与观察结果一致,由于第 1 层的节点要转发来自外层的所有数据,因此负载最重.当靠近 sink 的节点耗尽能

量后,在 sink 周围将形成一个环状的“洞”,位于“洞”外区域的节点与 sink 分离,限制了网络寿命.因此,网络寿命取决于第 1 层的节点能量总和.

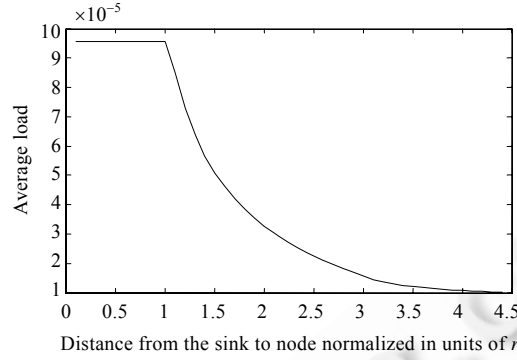


Fig.5 Average load vs. d (without idle listening)

图 5 节点平均负载随 d 的变化趋势(不考虑空闲侦听)

3.3 空闲侦听对负载分布的影响

为了研究节点在空闲(idle)侦听状态的能量消耗对负载分布的影响,下面分析在考虑空闲侦听的情况下节点的负载分布特性.在这种情况下,网络构建时接收和发送控制分组消耗的能量 E_c 远小于空闲侦听消耗的能量 E_{lr} ,因此,这里忽略 E_c .单位时间内节点空闲侦听消耗的能量用 e_{idle} 表示,根据文献[17],该参数取值为 $e_{idle} = 0.88mJ/s$.

为了减少节点空闲侦听消耗的能量,传感器节点可以处于两种状态:active 和 sleep.在 active 状态,接收器打开;而在 sleep 状态,接收器关闭.根据网络的构建过程,可以知道各层节点处于 active 状态的时间.设最大层数为 m ,每一轮的网络构建阶段,第 i 层节点因空闲侦听消耗的能量 E_{lr} 计算如下:

$$E_{lr1} = (T_b + T_s)e_{idle} \quad (9-1)$$

$$E_{lr i} = \frac{((3i-2)T_b + 4T_s)e_{idle}}{2}, \quad 1 < i < m \quad (9-2)$$

$$E_{lr i} = \frac{(3i \times T_b + 2T_s)e_{idle}}{2}, \quad i = m \quad (9-3)$$

其中, T_b 代表每一次 iteration 接收和处理来自 sink 的 CP 所需时间, T_s 代表构建一层需要的时间, i 代表节点的初始层号.采用动态层模型,假设初始拓扑位于第 $i(i>1)$ 层的节点在整个生命周期中平均被“推”至 $2i$ 层,则公式(9)表示节点在整个生命周期中每一轮网络构建由于空闲侦听消耗的平均能量.

每一轮的数据收集阶段,所有簇头交替处于 active 和 sleep 状态.单位时间内,传感器节点处于 active 状态的时间所占比率称为 duty cycle(用符号 γ 表示).为便于控制,并折中考虑能量有效和网络性能,本文假设所有簇头的 duty cycle 都为固定值,设为 $\gamma=10\%$.为减少能耗,其他传感器节点的接收器关闭.假设簇头数占节点总数的比例为 δ ,则数据收集阶段由于空闲侦听消耗的能量 E_{ld} 取决于 γ, e_{idle} 和 δ ,即 $E_{ld} = \gamma\delta e_{idle}$.

考虑空闲侦听的能量消耗,当 $i>1$ 时,各层的节点平均负载计算如下:

$$L'_i = \frac{((3i-2)T_b + 4T_s)e_{idle} + \delta\gamma e_{idle} + \frac{\mu\lambda(E_{elec}(8R^2 - \pi d^2 - \pi(d-r)^2) + \epsilon r^2(4R^2 - \pi(d-r)^2))}{\pi(d^2 - (d-r)^2)}}{2T_r}, \quad r < d \leq R \quad (10-1)$$

$$L'_i = \frac{((3i-2)T_b + 4T_s)e_{idle} + \delta\gamma e_{idle} + \frac{4A\mu\lambda E_{elec} + \mu\lambda(E_{elec} + \epsilon r^2)(4A + S_1)}{S_1}}{2T_r}, \quad R < d \leq R+r \quad (10-2)$$

$$L'_i = \frac{((3i-2)T_b + 4T_s)e_{idle} + \delta\gamma e_{idle} + \frac{\mu\lambda E_{elec} A + \mu\lambda(E_{elec} + \epsilon r^2)A'}{A' - A}}{2T_r}, \quad R+r < d < \sqrt{2}R \quad (10-3)$$

$$L'_i = \frac{(3i \times T_b + 2T_s)e_{idle} + \mu\lambda(E_{elec} + \varepsilon r^2)}{2T_r}, d = \sqrt{2}R \quad (10-4)$$

其中, A, A' 和 S_1 的计算与公式(5)相同. 当 $i=1$, 即第 1 层的节点平均负载计算如下:

$$L'_1 = \frac{(T_b + T_s)e_{idle}}{T_r} + \delta\gamma e_{idle} + \mu\lambda \left(\frac{E_{elec}(8R^2 - \pi r^2)}{\pi r^2} + \frac{4R^2\varepsilon}{\pi} \right) \quad (11)$$

考虑空闲侦听的能量消耗, 当传输范围 $r=40\text{m}$, $\rho=0.0064/\text{m}^2$ 时, 节点平均负载随节点到 sink 的距离 d 的变化趋势如图 6 所示. 其中, d 以 r 为单位, $T_b=0.4$, $T_s=2$, $\mu=20\%$, $\lambda=400\text{bps}$. 参数 δ 和 T_r 的值通过分析均匀节点分布且考虑空闲侦听能量消耗的仿真结果而得, $\delta=0.25\%$, $T_r=130$. 对 r 和 ρ 的不同取值, δ 和 T_r 的取值也需要相应调整. 如图 6 所示, 在 $d<3.5$ 的范围, 节点的平均负载随 d 的增加而减少; 当 $d>3.5$ 时, 负载随 d 的增加而缓慢增加. 一方面, 内层的节点需要消耗更多的能量转发数据; 另一方面, 基于 PMRC 结构的网络从内到外逐层构建的方式决定了外层节点因为空闲侦听消耗的能量高于内层节点. 基于这两个方面的因素, 靠近 sink 的节点能量消耗速率高于远离 sink 的节点. 与图 5 相比, 在考虑空闲侦听的情况下, 随着 d 的增加, 节点的平均负载减少的速度要慢得多.

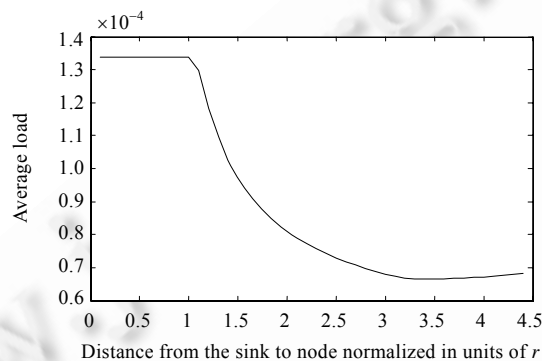


Fig.6 Average load vs. d (with idle listening)

图 6 节点平均负载随 d 的变化趋势(考虑空闲侦听)

3.4 负载相似节点分布策略

基于前面的分析, 随着节点到 sink 的距离减少而节点负载增加. 为了解决能量洞问题, 本文提出一种负载相似节点分布策略. 该策略的基本思想是, 根据负载分布特性来进行节点分布, 即负载重的区域配置较多的节点, 使得传感器网络中位于不同区域的节点平均负载趋于平衡, 以平衡节点的能量消耗.

负载相似节点分布策略的节点配置方法描述如下: 随机产生一个节点位置, 若位于第 1 层, 则在该位置配置节点; 否则计算该位置处的负载, 并与随机产生的一个负载值进行比较, 根据二者之间的大小确定是否在该位置配置节点. 具体步骤描述如下:

Step 0. 计算第 1 层外边界处的节点负载 L_1 ;

Step 1. 在网络范围内随机产生以 sink 为极点的极坐标位置 $p(\xi, \theta)$. 若位置 p 到 sink 的距离 ξ 小于传输范围 r , 则在位置 p 配置节点, 并完成该节点的配置, 回到 Step 1 开始下一个节点的配置; 否则, 继续执行后续步骤;

Step 2. 在 $0 \sim L_1$ 之间随机产生一个负载值 L' ;

Step 3. 计算位置 p 的节点负载值 L_p . 若 $L_p > L'$, 则在位置 p 配置节点; 否则, 回到 Step 1 重复上述过程, 直到完成网络中所有节点的配置.

设节点总数为 N , 网络覆盖边长为 $2R$ 的正方形区域, 节点传输半径用 r 表示, 图 7 表示节点配置过程的伪代码实现. 图 8 显示当 $N=400$, $R=125\text{m}$, $r=40\text{m}$, sink 位于图中心点时, 通过 Matlab 产生的不同节点分布策略的节点配置实例图. 其中, 图 8(a) 为负载相似节点分布的节点配置实例, 图 8(b) 为均匀分布的一个实例图. 从图 8(a) 可以

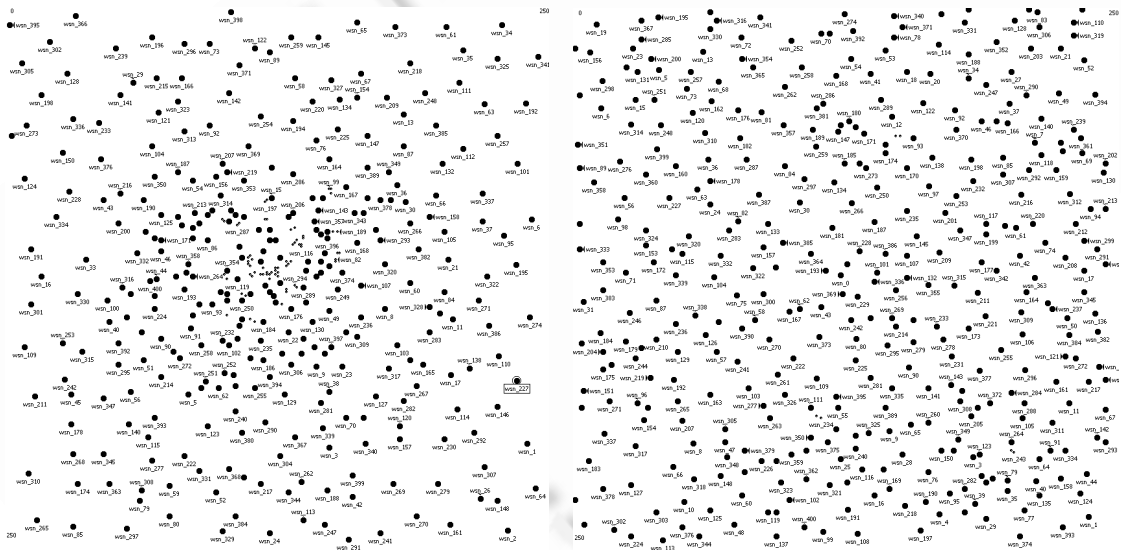
看出,靠近 sink 的区域具有较大的节点密度.

```

PROCEDURE Node_distribution(N,R,r)
Predefine:
    number of sensor nodes: N
    half width of the area: R
    transmission range: r
BEGIN
    i=0 //Variable
    compute L1 //Step 0, average load of nodes at the border of layer 1
    while i≤N
        //Step 1, generate polar coordinates, centered at sink
        randomly generate a point p(ξ,θ)
        if ξ<r //Point p locates at layer 1
            deploy a node at point p
            i=i+1
        else
            generate a random value L'∈[0,L1] //Step 2, value between 0 and L1
            compute Lp //Step 3, average load of nodes at point p
            if Lp>L'
                deldeploy a node at point p
                i=i+1
            end if
        end if
    end while
END
    
```

Fig.7 Pseudocode of load-similar node deployment

图 7 负载相似节点配置的伪代码实现



(a) Load-Similar node distribution
(a) 负载节点相似分布

(b) Uniform node distribution
(b) 均匀节点分布

Fig.8 A case of node distribution (N=400,R=125m,r=40m,sink is located at the area center)

图 8 节点分布实例(N=400,R=125m,r=40m,sink 位于图中心点)

负载相似节点分布的网络构建和路由以 PMRC 结构为基础,每一轮完成网络构建后,不用再专门配置转发节点.另外,采用分簇结构,每个节点只需简单地将数据发送到簇头,这与文献[12]中的 q-Switch 路由显著不同.在 q-Switch 路由中,每个节点发送数据之前,需要从 q 或 q-1 个备选的转发节点中选择剩余能量最大的那个作为转

发节点,这需要每个节点每次在发送数据之前查询其所有备选转发节点的剩余能量,这将导致额外的能量消耗.

4 仿真实验

为了验证负载相似节点分布策略的性能,应用 OPNET 进行了仿真实验,并与其他节点分布策略进行比较.

针对 3 种节点分布策略进行仿真实验:(1) 本文提出的负载相似节点分布(load-similar node distribution),根据第 3 节提出的方法配置节点;(2) 非均匀随机节点分布(nonuniform random node distribution)^[12],初始拓扑的相邻内外环节点数按等比 $q=2$ 递增,每个圆环内的节点随机地出现在环内任意位置.为便于描述,本文将非均匀随机节点分布策略简称为非均匀节点分布(nonuniform node distribution)策略;(3) 均匀节点分布(uniform node distribution),所有节点随机地出现在网络中任意位置.上述 3 种分布的各节点位置按相应规则通过 Matlab 产生.

为便于比较,对非均匀节点分布和均匀节点分布策略根据相应规则完成节点配置后,也采用动态层模型实现网络拓扑构建和路由.每次仿真选择节点总数的 20%作为源节点产生并发送数据,所有源节点在整个网络区域中均匀分布.对于每种节点分布策略,分别选择 5 组不同的源节点进行仿真实验并对仿真结果取平均值.

4.1 仿真参数

所有仿真实验中,传感器网络覆盖区域为 $250\text{m}\times 250\text{m}$ 的正方形,sink 节点位于网络区域的中心位置.表 1 列出仿真实验中用到的主要参数.

Table 1 Simulation parameters

表 1 实验参数

Parameter		Value
Energy model	α	2
	ε	10pJ/bit/m ²
	E_{elec}	50nJ/bit
	e_{idle}	0.88mJ/s
Number of nodes		400
Radio transmission range		{40, 60, 80, 100} m
Initial energy per node		1 J
Packet generation rate		1 pkt/s
Packet length		50 Bytes
Simulation time		Until network partition

4.2 实验结果

首先采用第 3.2 节的能量模型,即不考虑空闲侦听的能量消耗,对 3 种节点分布策略进行仿真.其中,负载相似节点分布根据第 3.2 节的负载分析结果配置节点.

图 9 显示传输范围 $r=40\text{m}$ 的情况下,网络寿命结束时,负载相似节点分布与均匀节点分布各层的节点平均剩余能量.采用动态层模型,相邻层的边界在网络寿命周期中动态变化,各节点在每一轮中所属的层也可能不同.这里统计的各层节点剩余能量,每个节点所属的层是指节点在网络初始拓扑(第 1 轮)所在的层.最靠近 sink 的为第 1 层,编号从内向外顺序递增,层编号越大距离 sink 越远.

从图 9 可以看出,负载相似节点分布策略对各层节点能量消耗不平衡的问题有明显改善.均匀节点分布从内层到外层,剩余能量呈递增的趋势,这与分析结果一致.负载相似节点分布各层的能量消耗相对平衡.第 1 层的剩余能量略高于其他层,这是因为基于动态层模型,随着网络构建次数的增加,网络中生成的总层数在逐渐增加,除第 1 层之外,其他层的边界在动态变化.第 1 层的节点平均负载基本保持不变,而其他层随着层的内边界朝着 sink 方向移动,其节点的平均负载在增大,导致剩余能量较低.

不同节点分布策略的网络寿命如图 10 所示.网络寿命指从第一次网络构建开始,直到网络分离或所有源节点耗尽能量.随着传输范围 r 的增加,每一层的范围增加,候选簇头个数也相应增加.这样可以进行更多次网络构建,从而延长网络寿命.传输范围 r 相同的情况下,负载相似节点分布比其他两种节点分布的网络寿命有较大改善.尤其是 $r<80\text{m}$ 的范围,其网络寿命的延长最为显著,最好的情况比非均匀节点分布延长 199%($r=40\text{m}$),比均匀

节点分布延长 181%($r=60m$).这验证了负载相似节点分布比其他两种节点分布更适用于动态层模型.与均匀节点分布相比,除 $r=40m$ 之外,非均匀节点分布的网络寿命也有较大改善. $r=40m$ 时,非均匀节点分布的网络寿命由于矩形边缘区域的节点密度较低而限制了网络寿命.当 $r>80m$ 时,由于所有源节点耗尽能量而限制了网络寿命,3 种节点分布的网络寿命没有明显的区别.尽管如此,负载相似节点分布仍然有最长的网络寿命,非均匀节点分布次之.

网络寿命结束时,不同节点分布策略的平均剩余能量如图 11 所示.结合图 10 的网络寿命进行比较,负载相似节点分布对能量利用率有较大改善.传输范围较大时,由于源节点耗尽能量而限制了网络寿命,负载相似节点分布和非均匀节点分布的剩余能量高于均匀节点分布.如果有更多的源节点产生和发送数据,这两种分布将会更充分利用能量,进一步延长网络寿命.

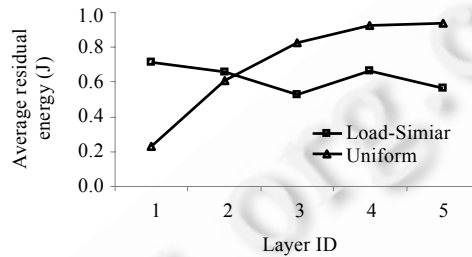


Fig.9 Average residual energy of each layer when network lifetime ends ($r=40m$)

图 9 网络寿命结束时每层的平均剩余能量($r=40m$)

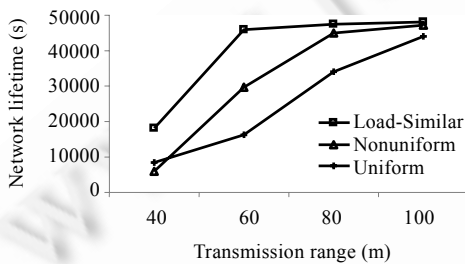


Fig.10 Network lifetime

图 10 网络寿命

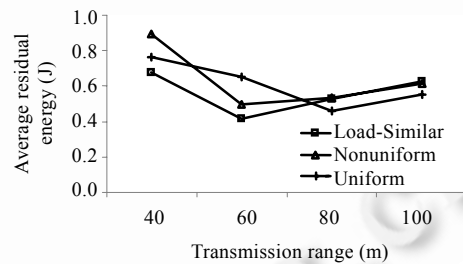


Fig.11 Average residual energy

图 11 平均剩余能量

图 12 显示不同节点分布策略的第 1 个节点死亡时间(time to first node death),该参数反映最坏情况的网络寿命,这里只考虑由于能量耗尽引起的节点死亡.通常,第 1 个节点死亡发生在第 1 层,受网络初始拓扑的影响较大.一方面,随着传输范围 r 的增大,第 1 层之外的节点数减少,因此第 1 层节点接收数据消耗的能量减少;另一方面,随着 r 的增大,第 1 层节点发送数据到 sink 消耗的能量增大.基于这两方面因素,第 1 个节点死亡时间随着 r 的增加先减小后增加.除 $r=100m$ 外,负载相似节点分布对第 1 个节点死亡时间有所改善.

图 13 显示不同分布策略的数据递交率(data delivery ratio)随传输范围的变化趋势.3 种策略的数据递交率都随着传输范围的增大而有所改善.数据丢失主要发生在网络重构过程中,若网络重构之前,一个节点的缓存中有等待发送的数据,而网络重构之后该节点的簇头发生变化,则该节点在缓存中等待发送的这些数据发送到新的簇头时会被丢弃,因为在网络重构前这些数据的地址是节点原来的簇头.随着传输范围的增大,从源节点到 sink 所经过的跳数减少,数据丢失的可能性减小,因而数据递交率提高.在相同传输范围下,负载相似节点分布的数据递交率略低于非均匀分布,但比均匀分布仍然有较大改善,尤其是传输范围较小时改善就更为明显.

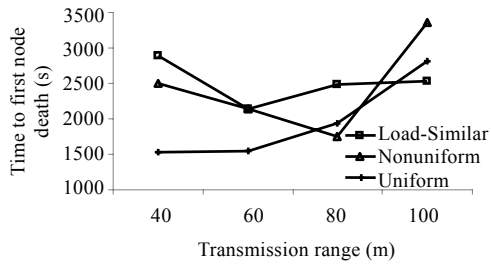


Fig. 12 Time to first node death

图 12 第 1 个节点死亡时间

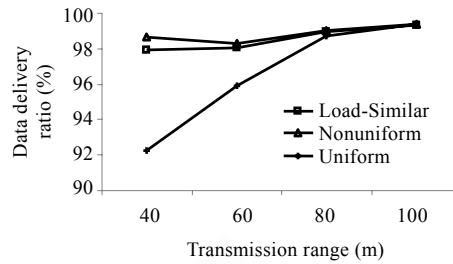


Fig. 13 Data delivery ratio

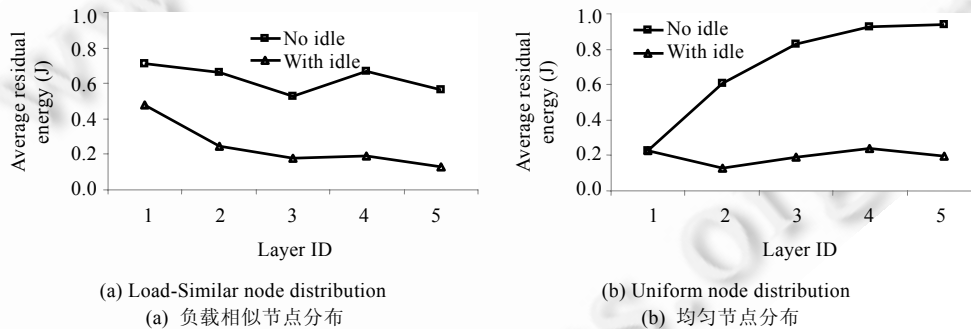
图 13 数据递交率

4.3 空闲侦听的影响

为了验证空闲侦听对能量消耗的影响,采用第 3.3 节的能量模型,即同时考虑空闲侦听的能量消耗,其他条件相同,分别对 3 种节点分布策略进行仿真.负载相似节点分布根据第 3.3 节的分析进行节点配置,其他两种节点分布保持不变.

图 14 显示传输范围 $r=40\text{m}$ 、网络寿命结束时,负载相似节点分布和均匀节点分布策略在不同能量模型下各层的平均剩余能量.节点的总能量消耗与节点到 sink 的距离有关.一方面,距离 sink 越近的节点转发的数据越多,接收和发送数据所消耗的能量也越多;另一方面,PMRC 结构从内到外逐层构建的方式决定了外层的节点在网络构建过程中空闲侦听消耗的能量更多.

由于空闲侦听消耗了部分能量,各层的平均剩余能量较小.负载相似节点分布针对不同的能量模型有不同的节点配置,除第 1 层外,两种能量模型下的剩余能量都相对平衡,如图 14(a)所示.对于均匀节点分布,如图 14(b)所示,随着节点到 sink 距离的增大,两种能量模型下剩余能量的差值也增大.这验证了 PMRC 结构在多对一的通信模型下,内层节点受转发数据的流量影响更大,而外层节点受空闲侦听的影响较大.

Fig. 14 Average residual energy of each layer under different energy model ($r=40\text{m}$)图 14 不同能量模型下的各层平均剩余能量($r=40\text{m}$)

考虑空闲侦听的能量消耗,各种节点分布策略的网络寿命如图 15 所示,从中可以看出空闲侦听的重要影响.在节点初始能量相同的情况下,空闲侦听需要消耗部分能量,用于接收和发送数据的能量减少,影响了网络寿命.由于空闲侦听消耗的能量在总能量消耗中占较大比例,不同节点分布因接收和发送数据消耗能量的差别没能很好地体现.即使这样,负载相似节点分布仍然对网络寿命有所改善,在所有传输范围都比其他两种节点分布策略的网络寿命有所延长.

图 16 显示 3 种节点分布策略的数据递交率随传输范围的变化趋势.与图 13 相比,在能量模型中考虑节点空闲侦听能量消耗的情况下,数据递交率大幅度下降;而且传输范围越小,数据递交率受影响的程度就越大.这

是因为节点交替处于 active 与 sleep 状态,节点传输数据时需要等待其簇头处于 active 状态,其发送的数据才能被簇头接收,否则引起数据丢失.另一方面,由于发送节点要等待簇头处于 active 状态才发送数据,节点缓存中的队列增长速度较快,因网络重建造成数据丢失的可能性也加大.在传输范围相同的情况下,与另两种节点分布策略相比,负载相似节点分布在多数情况下仍然对数据递交率有所改善.

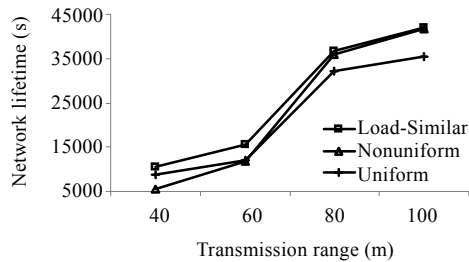


Fig.15 Network lifetime with idle listening
图 15 考虑空闲侦听情况下的网络寿命

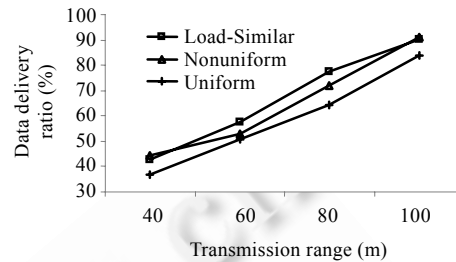


Fig.16 Data delivery ratio with idle listening
图 16 考虑空闲侦听时的数据递交率

5 总结

本文研究传感器网络的能量洞问题.对网络的通信负载分析表明,节点的平均负载随节点到 sink 距离的减小而增加,靠近 sink 的节点能量消耗较快.同时还分析了空闲侦听对能量消耗的影响.基于分析结果,提出负载相似节点分布策略,缓解传感器网络的能量洞问题.仿真结果表明,与已有的一种非均匀节点分布和均匀节点分布策略相比,负载相似节点分布对网络寿命有改善,尤其是不考虑空闲侦听的能量消耗时,其改善更为显著.

文中验证了负载相似节点分布最适合于动态层模型,本文的分析模型和节点分布策略可以适用于其他的多跳传感器网络.在今后的工作中,将采取有效措施减少空闲侦听的能量消耗.

References:

- [1] Heinzalmen W, Chandrakasan A, Balakrishman H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2002,1(4):660-670. [doi: 10.1109/TWC.2002.804190]
- [2] Ding J, Sivalingam K, Kashyaoa R, Chuan LJ. A multi-layered architecture and protocols for large-scale wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC)*. 2003. 1443-1447.
- [3] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation. *Ad Hoc Networks*, 2004,2:45-63.
- [4] Wadaa A, Olariu S, Wilson L, Eltoweissy M, Jones K. Training a wireless sensor network. *Mobile Networks and Applications*, 2005,10:151-168.
- [5] Chen G, Li C, Ye M, Wu J. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2007,15(2): 193-207.
- [6] Lian J, Naik K, Agnew G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2006,2(2):121-145.
- [7] Perillo M, Cheng Z, Henzelman W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks. In: Orantara S, ed. *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM)*. 2004. 74-79.
- [8] Perillo M, Cheng Z, Henzelman W. An analysis of strategies for mitigating the sensor network hot spot problem. In: Kalis A, ed. *Proc. of the Conf. on Mobile and Ubiquitous System: Network and Service (MobiQuitous)*. 2005. 474-478.
- [9] Li J, Monhapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2007,3(8):233-254.

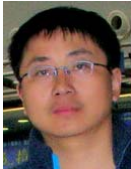
- [10] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoid energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In: Domingo-Pascual J, ed. Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Communication Society, 2006. 1–12.
- [11] Song C, Liu M, Cao J, Zheng Y, Gong H, Chen G. Maximizing network lifetime based on transmission range adjustment in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2009,32(11):1316–1325.
- [12] Wu X, Chen G, Das SK. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with non-uniform node distribution. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed System*, 2008,19(5):710–720.
- [13] Yang M, Wang S, Abdelal A, Jiang Y, Kim Y. An improved multi-layered architecture and its rotational scheme for large-scale wireless sensor networks. In: Jiang Y, ed. Proc. of the IEEE Consumer Communications & Network Conf. (CCNC). 2007. 855–859. [doi: 10.1109/CCNC.2007.173]
- [14] Li Q, Yang M, Wang H, Jiang Y, Zeng J. Minimum overlapping layers and its variant for prolonging network lifetime in PMRC-based wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Consumer Communications & Network Conf. (CCNC). 2009. 1–5. [doi: 10.1109/CCNC.2009.4784916]
- [15] Olariu S, Stojmenovic I. Data-Centric protocols for wireless sensor networks. In: *Handbook of Sensor Networks: Algorithm and Architectures*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 417–456.
- [16] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networks*, 2004,12(3):493–506. [doi: 10.1109/TNET.2004.828953]
- [17] Medidi M, Zhou Y. Extending lifetime with differential duty cycles in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2007. 1033–1037. [doi: 10.1109/GLOCOM.2007.199]
- [18] Wang H, Yang M, Jiang Y, Wang S, Gewali L. Overlapped layers for prolonging network lifetime in multi-hop wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Information Technology: New Generations (ITNG). 2008. 755–760. [doi: 10.1109/ITING.2008.170]



李巧勤(1972—),女,重庆人,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络。



杨梅(1975—),女,博士,副教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,移动自组织网络。



刘明(1973—),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究领域为移动计算,传感器网络技术。



陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为分布式与并行计算。