

一种基于分层无线传感器网络的路由算法

邹 瑜¹ 彭 舰^{1,2} 黎红友¹

(四川大学计算机学院 成都 610065)¹ (北京邮电大学网络与交换国家重点实验室 北京 100876)²

摘要 在多跳无线传感器网络中,靠近 sink 的节点由于需要转发来自外部的数据,其能量消耗速度快于离 sink 较远的节点,从而导致“能量空洞”的出现。采用分层的网络结构能够有效延迟能量空洞的出现。在分析现有路由算法的基础上,结合分层的思想,对现有算法的路由算法进行了改进,提出了分层网络中各层环内最佳簇头和成簇概率的计算方法。在路由发现阶段引入了簇头路由指标,用于控制路由簇头接纳的路由数量,从而平衡了环内各个路由簇头的能量消耗。仿真实验结果表明,新的路由算法在网络生存时间、能耗均匀程度方面均优于现有算法。

关键词 无线传感器网络,能量空洞,分层,非均匀成簇,簇头路由指数

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Routing Algorithm of Hierarchical Wireless Sensor Network

ZOU Yu¹ PENG Jian^{1,2} LI Hong-you¹

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)¹

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)²

Abstract Cluster-heads closer to the sink are burdened with heavy relay traffic and incline to die early, because the cluster-heads transmit their data to sink via multi-hop communication. And this phenomenon is known as “energy hole”. It was proved that the architecture of hierarchical network can effectively delay the energy hole problem. Based on the method of the main routing algorithms, the existing routing algorithms was improved in computing the number of optimal cluster-head and the probability of each node being cluster-head, in every annular network. Considering the thought of hierarchy, cluster-head routing quota (CRQ) algorithm was proposed, which can be used to control the accepting numbers of each router, in phrase of routing detecting. Thus, it meets the demand of evenly consuming the energy of each cluster-head located in the same ring. Simulation results demonstrate that the new algorithm is better than existing routing algorithm in the network lifetime and energy consumption.

Keywords Wireless sensor network, Energy hole, Hierarchy, Uneven clustering, Cluster-head routing quota

1 引言

近年来,传感器技术、嵌入式技术和低功耗无线通信技术的发展促进了无线传感器的发展^[1],通过这些廉价、低功耗传感器组成的无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Network)在国防军事、交通管理、环境监测和目标跟踪等方面发挥着越来越重要的作用。这些传感器节点只能携带有限的能量,且很多情况下节点的能量不能得到及时补充,一旦能量耗尽,网络将难以维持^[2-5]。因此,高效均匀地利用节点能量、延长网络存活时间成为无线传感器网络研究的重点。

WSN 通过一个或多个 sink 节点与外界联系,而传感器节点以多跳的方式将数据向靠近 sink 的方向逐跳传送给 sink。这就导致离 sink 越近的节点能量消耗越快,并先于外部节点死亡,即“能量空洞”(energy hole)的出现^[5]。文献[6]实验结果显示,当网络死亡时,网络节点剩余总能量超过初始

能量的 90%。

为了解决能量空洞问题,国内外学者进行了大量的研究。文献[5]从理论上分析了如何避免能量空洞问题,研究了在半径为 R 的网络模型中,将网络划分为若干个同心圆环时网络寿命和各环宽度的关系。文中使用了 $E = d^\alpha + c$ 的能量模型,其中, d, α, c 分别表示传输距离、能量消耗系数和一个正值常数。通过分析得到如下结论:当 $\alpha = 2$ 时,该网络模型将不可避免出现能量空洞现象;当 $\alpha = 4$ 时,为了避免该现象,减少数据从外层传向 sink 的能量消耗,所有环应该具有相同的宽度。并且结算得到了环的宽度为 $(\frac{2c}{\alpha-2})^{\frac{1}{\alpha}}$ 和节点最大传输半径的最小值。

国内研究者在文献[7]中提出了一种新的节点非均匀分布策略来解决能量空洞。研究发现,如果节点数目从圆环 C_{R-1} 到圆环 C_1 按等比 $q (q > 1)$ 递增,可以实现次优能量消

到稿日期:2011-12-22 返修日期:2012-03-29 本文受北京邮电大学网络与交换国家重点实验室开放项目(10ZB005),四川省科技支撑项目(2009GZ0153),四川省科技创新苗子工程项目(2011-025),四川省教育厅科研项目(10ZB005)资助。

邹 瑜(1985-),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:zouyu212@163.com;彭 舰(1970-),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为并行计算;黎红友(1982-),硕士,讲师,主要研究方向为分布式计算。

耗。且圆环 C_R 和圆环 C_{R-1} 的节点数目之比为 $1/(q-1)$ 。文中提出的路由策略是：每层环的节点可以和邻近内层环内的一定数目的节点直接通信。外层将自身采集的数据逐层发送至 sink 节点，外层节点选择内层剩余能量最多的一个作为路由中继节点。源节点将自身收集的数据和来自上游节点的数据发送给选中的中继节点，直到将数据发送给 sink 节点。

文献[8]中提出另一种非均匀成簇的策略 EEUC 来解决能量空洞问题，靠近 sink 的簇半径较小，远离 sink 的簇半径较大，使得离 sink 越近的簇头节点可以为簇间数据转发预留更多的能量。提出了与 sink 不同距离的节点的簇半径的计算方法，即 $R_c = (1 - c \frac{d_{\max} - d(s, Sink)}{d_{\max} - d_{\min}}) R_c^0$ ， c 是 $0 \sim 1$ 之间的取值控制参数， R_c^0 表示候选簇头的最大广播半径， d_{\max} 、 d_{\min} 分别表示网络节点与 sink 之间的最大和最小距离， $d(s, Sink)$ 表示节点 s 与 sink 之间的距离。文中提出的路由策略是：所有簇头保留比自己更靠近 sink 的簇头的路由簇首的集合，在从路由簇首集合选择簇首时提出了既考虑剩余能量，又考虑网络开销的方法，从网络开销最小的两个节点中，选择剩余能量最高的节点进行路由；并且提出当簇首与 sink 间距离小于阈值 TD_MAX 时，不需要申请路由，直接将数据发送给 sink。

上述算法在进行路由选择时，都以源节点为中心，虽然考虑了路由节点的剩余能量，但不能避免出现多个源节点同时选择某个剩余能量较大的路由节点，导致该节点消耗能量明显高于其它节点而使能量消耗不均的情况；而且簇头需要消耗额外的能量来建立和维持簇首集合。

本文在文献[8]的基础上改进了路由策略，引入了簇头路由指数(CRQ, Cluster-head Routing Quota)，用该指数限制簇头被选作路由由节点的次数，从而进一步平衡网络内节点的能量消耗，延迟网络的生存时间。仿真实验结果显示，改进后的算法能够获得比 LEACH^[9] 和 EEUC 更好的网络生存时间和更高的能量利用率。

2 网络模型

如图 1 所示，本文考虑 N 个传感器节点均匀分布在半径为 R 的圆形区域形成的网络，整个网络周期性地地进行数据收集工作。对该网络进行如下假设：

- (1) 汇聚点(sink)位于圆形网络中心，传感器节点有全网唯一标识(ID)。
- (2) 传感器网络部署之后，所有节点都不再移动。
- (3) 所有节点有相同的初始能量 E_0 ，能够获知自己当前能量 E_{remain} ，且节点能量不能得到补充。
- (4) 传感器发射功率可以调整，链路对称，若知道对方发射功率，传感器就可以根据接受信号强度 RSSI 计算出发送者与自己的距离^[8]。

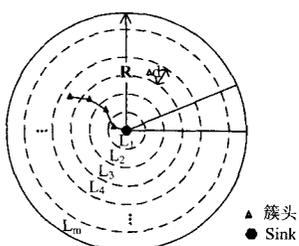


图 1 分层网络模型

网络工作过程分为初始化阶段和运行阶段。在节点部署完毕之后进入初始化阶段，sink 按照特定发射功率向整个网络广播，所有节点根据该广播计算出自己与 sink 之间的距离，进一步确定自己所在层数。运行阶段传感器节点的工作分为 3 个阶段，即成簇阶段、路由发现和收集阶段。

文献[10]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。如图 1 所示的网络模型中，依据节点与 sink 之间的距离，网络被分成 m 个宽度为 Δd 的同心环形区域。与 sink 最近的一层称为第 L_1 层，距离最远的一层为第 L_m 层。位于第 i 层的节点 s 与 sink 的距离为 d_s ，则有 $d_s \in ((i-1)\Delta d, i\Delta d]$ 。第 i 层内节点按照簇半径为 r_i 成簇，簇头收集本簇内节点产生的信息，汇聚之后发送给 L_{i-1} 层路由簇首。路由簇首是位于 $L_i (1 \leq i < m)$ 层的簇头，它的功能不仅是承担 i 层内簇头功能，还要路由 $i+1$ 到 m 层节点产生的信息。

3 最佳簇头数计算

在本网络模型中，每层环内的节点仅在环内成簇，不考虑跨层成簇问题。且在同一层圆环内各个簇的半径相同。

第 i 层圆环的面积为：

$$S_i = \pi(2i-1)\Delta d^2 \quad (1)$$

第 i 层圆环内各个簇的覆盖面积为：

$$\Delta S_i = \alpha \pi r_i^2 \quad (0 < \alpha \leq 1) \quad (2)$$

式中， r_i 表示第 i 层圆环内的簇半径， α 为每个簇的平均覆盖率，因为簇之间可能存在重叠区域，所以有 $0 < \alpha \leq 1$ 。

由式(1)、式(2)可得第 i 层圆环内的最佳簇头数为：

$$k_{i,opt} = \left\lceil \frac{S_i}{\Delta S_i} \right\rceil = \left\lceil \frac{2i-1}{\alpha} \left(\frac{\Delta d}{r_i} \right)^2 \right\rceil \quad (3)$$

在等概率率情况下，第 i 层圆环内节点成为簇头的概率为：

$$p_i = \frac{k_{i,opt}}{N} = \frac{1}{\Delta S} \frac{\pi R^2}{N} = \frac{1}{\alpha} \frac{R^2}{N} \frac{1}{r_i^2} \quad (4)$$

4 路由策略

不同的路由发现策略对分层 WSN 内层节点的能量消耗有不同的影响，例如，图 2(a) 中的路由策略显然不是最好的， L_1 层路由簇首 ch1 的负载明显高于 ch2， L_2 层路由簇首 ch3 的负载明显高于 ch4，这会导致 ch1, ch3 能量消耗过大，这种能量的不均匀消耗会使网络的过早死亡。图 2(b) 路由拓扑中每层内节点负载接近，所以该拓扑更佳。

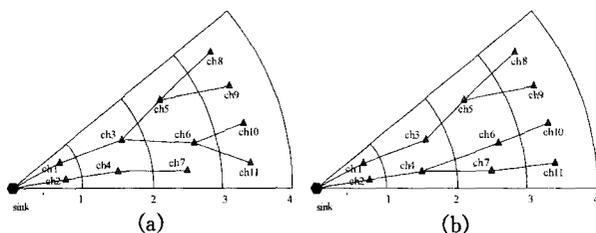


图 2 不同路由策略产生的不同路由拓扑

为了平衡同一层网络内各个节点的负载，必须使路由由簇头按照一定的算法接受路由申请。

4.1 簇头路由指数 CRQ

根据式(3)得第 i 层各个簇头需要路由的 $i+1$ 层簇头的个数为:

$$\bar{n}_i = \left\lceil \frac{k_{i+1, opt}}{k_{i, opt}} \right\rceil \approx \left\lceil \left(1 + \frac{1}{i-1}\right) \right\rceil \quad (5)$$

当网络规模确定之后,簇头路由指数 \bar{n}_i 只与节点所在层 i 相关,且可以得到 $1 \leq \bar{n}_i \leq 3$ 。

簇头路由指数是指路由簇头 CH_i ($1 \leq i < m$) 同意相邻层簇头 CH_{i+1} 路由由申请的概率。

$$Q(n) = \begin{cases} 1, & n \in G_{\min} \\ \lambda f(d_j) + (1-\lambda)g(E_{remain_i}, E_{remain_{i+1}}), & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

式中, G_{\min} 是 d_j 较小的 \bar{n}_i 个节点的集合。如果 G_{\min} 中有多个相同较小值 d_j , 则优先选择 CH_{i+1} 中剩余能量较低的节点。对于路由簇首, 当其接收到的路由申请不多于 \bar{n}_i 时, 全部同意路由, 否则将会对所有申请路由的外层簇头按照与自身距离排序, 选择较近的 \bar{n}_i 个簇头同意其路由由请求, 较远的外层簇头也不是完全拒绝提供路由, 而是根据其距离和剩余能量计算出为其提供路由的一个概率。 $f(d_j)$ 、 $g(E_{remain_i}, E_{remain_{i+1}})$ 分别表示与距离相关的函数和与能量相关的函数, λ 为调节因子, $0 \leq \lambda \leq 1$ 。同意路由概率与距离 d_j 成反比, 可以得到:

$$f(d_j) = 1 - \frac{\beta d_j}{\sum_{j=1}^H d_j} \quad (7)$$

式中, d_j 表示向 CH_i 申请路由的 CH_{i+1} 层各个簇头与 CH_i 之间的距离, H 表示向 CH_i 申请路由的簇头总数, β 为控制因子。

用 E_{remain_i} 、 $E_{remain_{i+1}}$ 分别表示第 i 层路由簇首和第 $i+1$ 层申请路由簇头的剩余能量, 显然, 第 i 层路由簇首的剩余能量越多, 或者第 $i+1$ 层申请路由簇头的剩余能量越少, 则同意路由由概率越大。则可以得到 $g(E_{remain_i}, E_{remain_{i+1}})$ 为:

$$g(E_{remain_i}, E_{remain_{i+1}}) = \begin{cases} \frac{E_{remain_i}}{E_{remain_{i+1}}}, & \text{if } E_{remain_i} < E_{remain_{i+1}} \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

4.2 基于簇头路由指数 CRQ 的路由策略

当所有层均已成簇完毕, 则网络进入路由发现阶段。首先从距离 sink 最远的层进行路由发现过程。步骤如下:

(1) 首先, 第 $i+1$ 层环内节点 CH_{i+1} 用适当信号强度在半径 $(\frac{\Delta d}{2} < d_B \leq 2\Delta d)$ 的范围内向 i 层广播 MSG_SEARCH, 以寻找下一跳节点, 其余层对该广播信息不予接收。

(2) CH_i 接收到的 MSG_SEARCH 消息个数为 n_{CH_i} , 并根据式(6)产生相应的路由指数添加到 MSG_ACCEPT。此外, MSG_ACCEPT 中包含 CH_i 测得的与请求路由节点的相对距离, 对接收到的消息依次广播回复 MSG_ACCEPT。

(3) 第 $i+1$ 层发出了路由申请的簇头接收到 MSG_ACCEPT 后产生一个 $0 \sim 1$ 之间的随机数。如果只接收到一条 MSG_ACCEPT, 则将该随机数与 MSG_ACCEPT 中的 $Q(n)$ 比较, 如果随机数较小则建立到下一跳的路由表, 并向路由簇

首发出确认消息。如果接收到多条 MSG_ACCEPT, 则将产生的随机数与 MSG_ACCEPT 中最大的 $Q(n)$ 比较。如果有相同的较大的 $Q(n)$, 则选择剩余能量较高的路由簇首。如果没有能加入任何路由簇头, 或者一定时间段之后没有接收到消息, 则广播半径加倍, 继续寻找下一跳节点。加倍后半径仍然需要满足 $(\frac{\Delta d}{2} < d_B \leq 2\Delta d)$ 。

(4) 如果 $d_B = 2\Delta d$, CH_{i+1} 中节点将 MSG_SEARCH 中的 last 标志位设为真。 CH_{i-1} 、 CH_i 各层路由簇首接收到该消息后, 路由指数设为 1, 发送给 CH_{i+1} 。 CH_{i+1} 根据剩余能量选择加入。如果 CH_{i+1} 的该广播无回复, 则 CH_{i+1} 将数据直接发送给临近已经建立了路由的本环内临近簇头。

(5) 在某个确定了已成功建立第 $i+1$ ($1 \leq i < m$) 层、第 i 层路由的时间内, 第 i 层内簇头开始运行步骤(1)到步骤(3), 并建立路由。

(6) 重复以上步骤直到第一层节点成簇完成, 之后整个网络进入信息收集阶段。

其中使用的控制消息定义如下:

1) 寻找路由消息(MSG_SEARCH)

```
struct MSG_SEARCH {
    unsigned int messageID; /* 消息 ID */
    int LM; /* 发送者所在层号 */
    int ID; /* 发送者 ID */
    float energy_remain; /* 发送者的剩余能量 */
    bool last; /* 标记是否是最后一次路由由申请, 当  $d_B = 2\Delta d$  时, last = TRUE */
}
```

2) 回复路由由申请消息(MSG_ACCEPT)

```
struct MSG_ACCEPT {
    unsigned int messageID; /* 消息 ID */
    int toID; /* 接收者 ID */
    int fromID; /* 发送者 ID */
    float p_accept; /* 标记该 toID 对 fromID 路由指数 */
    float distance; /* 发送者和接受者之间的近似距离 */
    float energy_remain; /* 发送者的剩余能量 */
}
```

5 仿真实验

一个典型的传感器节点包括 3 个基本的功能模块: 感知模块、处理模块和通信模块。由于感知模块和处理模块小, 其消耗的能量比通信模块少得多^[11], 因此本文忽略节点计算、存储等过程中的能量消耗, 使用简单能量消耗模型^[12]。

5.1 仿真环境

本文使用 C 语言编程实现对算法的模拟。为了评价和分析本文提出的基于 CRQ 的路由算法的性能, 在每层圆环中取相同的簇半径, 取控制因子 $\beta = 1$, $d_B = \frac{3}{2} \Delta d$ 。假设数据传输层有完美的策略, 没有信号碰撞和重传, 实验中使用的其他重要参数见表 1。就本文算法中涉及到的参数 λ 取值对算法性能的影响进行了实验对比; 并且与 LEACH 和 EEUC 在网络生存时间的网络能量利用率方面进行了比较。

表 1 仿真实验参数表

参数	值
R	250m
N	500
节点初始能量	0.5J
E _{elec}	50nJ/bit
ϵ_{fs}	10pJ/(bit·m ²)
ϵ_{mp}	0.0013pJ/(bit·m ⁴)
d ₀	87m
数据包大小	4000bits

5.2 实验结果及分析

首先,考虑了路由指数计算中 λ 不同取值对网络生存时间的影响。在此考察了网络中第一个死亡节点出现时网络经历的运行轮数。

从图3可以发现,在 $\lambda=0.5$ 附近网络生存时间取得最大值,表明申请路由节点和路由节点之间的距离、两者的能量比例对于CRQ的影响程度相当。 $\lambda=0$ 表示由能量因素单独影响CRQ的产生; $\lambda=1$ 表示由距离因素单独影响CRQ的产生。 $\lambda=0$ 时的网络生存时间低于 $\lambda=1$ 时的网络生存时间,表明如果单独由一种因素影响CRQ的产生,则采用距离因素比能量因素更优。但其中任何一个单独作用的效果都低于两者共同作用对网络生存时间的影响。在下文的实验中取最佳 $\lambda=0.5$ 。

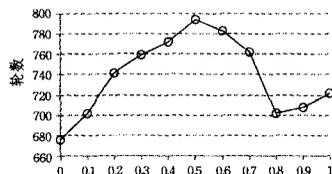


图3 不同 λ 对网络生存时间和能量利用率的影响

将本文提出的算法与LEACH、EEUC算法在相同环境下的生存时间作进一步考察比较。

图4描绘了网络中剩余节点的个数随着网络运行时间的延长的变化。LEACH算法中簇头是通过单跳方式将簇内数据发送给sink节点的,这会导致离sink较远的节点过早死亡。EEUC采用了分均匀成簇算法和多跳传输机制,明显地延长了网络中的第一个死亡节点出现时间。CRQ继承了EEUC的非均匀成簇的优点,同时在路由时采用了基于路由指标的成簇策略,使得能量消耗分布均匀,网络生存时间比EEUC更长。

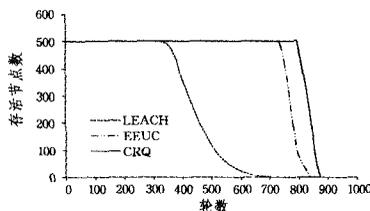


图4 网络生存时间对比

文中采用与文献[8]相同的方法,在网络运行过程中随机选取了10轮,根据簇头能量消耗情况得到了能量消耗的方差对比图,如图5所示。从中可以发现,EEUC和CRQ的方差优于LEACH的方差,CRQ的方差优于EEUC的方差,CRQ

产生的方差更稳定说明网络中簇头能量消耗更均匀。

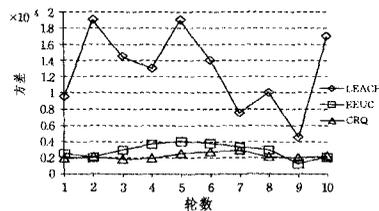


图5 簇头消耗的能量方差比较

结束语 本文对现有算法EEUC进行了改进,使得在路由时充分考虑到路由由节点负载和申请路由由节点的当前状态,减少了路由产生的能量开销。在路由中引入了路由指数来平衡各层环内路由节点的负载,路由指数的计算考虑了路由的距离和能量因素。改进后的算法进一步均衡了网络能量消耗,延迟了网络出现能量空洞的时间。仿真实验验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 刘明,曹建农,等. EADEEG: 能量感知的无线传感器网络数据收集协议[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1092-1109
- [2] 刘唐,彭帆,王建忠,等. 延迟容忍移动传感器网络中基于节点优先级的数据转发策略[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 140-143
- [3] 乔俊峰,刘三阳,曹祥宇. 无线传感器网络中基于节点密度的簇算法[J]. 计算机科学, 2009, 36(12): 46-49
- [4] 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [5] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting[C]//Domingo-Pascual J, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Communications Society, 2006: 1-12
- [6] Lian J, Naik K, Agnew G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution[J]. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2006, 2(2): 121-145
- [7] 吴小兵,成贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-260
- [8] 李成法,陈贵海,叶懋,等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36
- [9] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, HI, 2000: 1210
- [10] Li J, Mohapatra P. An analytical model for the energy hole problem in many to one sensor networks[C]// Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference. Dallas, TX, 2005: 2721-2725
- [11] 张志东,孙雨耕,等. 无线传感器网络能量模型[J]. 天津大学学报, 2007, 40(9): 1029-1034
- [12] Doshi S, Bhandare S, Brown T. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(3): 50-66