

# 基于最小跳数的 WSN 非均匀分布的路由算法\*

杨云<sup>1,2</sup>, 陈拥军<sup>1</sup>, 张敬<sup>1</sup>, 石婷婷<sup>1</sup>

(1. 扬州大学信息工程学院 计算机科学与工程系, 江苏扬州 225009; 2. 南京理工大学 计算机应用博士后流动站, 南京 210004)

**摘要:** 针对无线传感器网络节点能耗分布不均衡的问题, 采用非均匀分布策略部署节点, 提出一种新的路由算法。该算法通过在网络中建立最小跳数场和路径节点最小能量场, 使得信息包沿着能耗最优的路径向 sink 节点发送。通过仿真实验表明, 该算法在能量节省、能耗均衡和提高网络生存期方面具有明显的优势, 进而能够缓解能量空洞问题。

**关键词:** 无线传感器网络; 路由算法; 能量空洞; 节点非均匀分布; 最小跳数

**中图分类号:** TP309; TP301.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)09-3446-03

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.09.065

## Novel routing algorithm of nonuniform node distribution in WSN based on minimum hops

YANG Yun<sup>1,2</sup>, CHEN Yong-jun<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, SHI Ting-ting<sup>1</sup>

(1. Dept. of Compute Science, College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225009 China; 2 Postdoctoral Mobile on Computer Application, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210004, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of unbalanced load for nodes in WSN, based on the nonuniform node distribution method, this paper proposed a new algorithm. The new protocol set up minimum hops field and minimum path-nod energy field. Then, sent data by the path with the best energy consumption. According to the comparisons with the routing protocol based on the minimum cost by simulation, this algorithm has obvious advantages in saving total energy and balancing energy consumption.

**Key words:** wireless sensor networks(WSN); routing protocol; energy hole; nonuniform node distribution; minimum hops

无线传感器网络是一种能量有限的网络,且能量通常无法得到补充。因此,在无线传感器中,有效利用有限的能量资源是任何路由算法首要考虑的因素。无线传感器网络的路由算法是一个非常活跃的研究领域,基于最优路径的路由是其中比较重要的研究方向。目前国内外提出了多种基于最优路径的路由算法。这些路由算法中比较有代表性的是基于最小代价的路由算法<sup>[1]</sup>。该算法中每个节点只需维持自己到 sink 的最小代价,信息包就可以沿着最小代价路径向 sink 发送。其缺点是会在网络中引起很多冗余信息,且没有考虑网络的能量消耗。信息包遵循多对一的模式,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)<sup>[2]</sup>。针对该路由算法的不足和缺点,本文提出一种基于最小跳数的无线传感器网络节点非均匀分布的路由算法。该路由算法主要利用到 sink 节点的最小跳数和路径节点最小剩余能量作为路由选择度量来完成信息包的转发。仿真实验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。

### 1 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。下面介绍一些经典的解决方法。

Li 等人<sup>[3]</sup> 提出一个用于分析无线传感器网络中的能量空洞的模型。文中指出在无线传感器网络中,节点均匀分布、层次结构和数据压缩机制等手段对避免能量空洞是有效的,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。文献[3]并没有回答无线传感器网络中能量空洞能否避免问题。文献[4]分析了在多跳方式下,靠近基站的节点更容易耗尽能量而失效;而在单跳方式下,远离基站的节点因能耗较大而提早死亡,提出一种功率控制策略来均衡节点能耗。但该策略会导致整个网络的能耗增大,不能有效地延长网络的生命周期。

面路由协议<sup>[5~9]</sup> 是一种专门为了解决路由空洞问题而提出的 GF 路由协议, GPSR<sup>[5]</sup> 是其中的代表。为了解决路由空洞, GPSR 算法需要根据邻居信息计算出一个平面连接图,如 RNG 图或 GG 图等,当数据包到达路由空洞节点时,该节点根据右手法则选取平面上最靠近该节点与 sink 的连线的路径,然后通过这条路径把数据包转发出去,重复这种步骤直到数据包到达 sink 或可以重新运行 GF 算法的节点为止。这种算法虽然可以保证找到一条数据源节点与 sink 之间的路径,但是算法比较复杂,对节点的运算能力和存储能力要求比较高。

**收稿日期:** 2010-02-26; **修回日期:** 2010-03-28      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60803122); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2007074); 扬州大学研究生创新基金资助项目

**作者简介:** 杨云(1967-),男,江苏扬州人,教授,博士,主要研究方向为 TCP/IP 协议,分布式路由协议(yyang@yzu.edu.cn); 陈拥军(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络路由算法; 张敬(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络路由算法; 石婷婷(1985-),女,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络拓扑结构。

文献[10~14]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<sup>[10]</sup>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。与 LEACH 不同,HEED<sup>[11]</sup>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<sup>[12]</sup>、EECS<sup>[13]</sup>和 EEUC<sup>[14]</sup>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的思想。

文献[15]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。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。

## 2 节点非均匀分布策略下的路由

### 2.1 网络模型及假设

与文献[16]类似,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。笔者还假设所有的节点都有一个 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  $(i - 1)$  与  $i$  之间。

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  $C_R$  中的节点无须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过程。根据节点能量消耗和通信模型,即每个节点的初始能量是  $\varepsilon > 0$ ,sink 没有能量限制,节点发送和接收  $k$  比特数据的能耗分别为

$$E_{tx}(k, d) = k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^2 \quad (1)$$

$$E_{rx} = k \times E_{elec} \quad (2)$$

其中: $k$  为比特数; $d$  为通信距离; $E_{elec}$  为收发电路的功耗系数, $E_{amp}$  为功率放大电路的功耗系数。显然单个节点发送 1 bit 数据的能耗的能量大于接收 1 bit 数据的能耗的能量。

在无线传感器网络中一跳路径中的能量损耗情况,假设在源节点  $i$  产生  $A_i$  比特数据,距离下一跳节点  $j$  的距离  $d_{ij}$ ,由式(1)(2)得式(3)(4)。节点  $i$  向  $j$  发送  $A_i$  比特数据消耗的能量表示为

$$E_{rx}(i, j) = k \times (E_{elec} + E_{amp} \times d_{ij}^2) A_i \quad (3)$$

其中: $d_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$ 。

节点  $j$  接收节点  $i$  发来的  $A_i$  比特数据需要消耗的能量表示为

$$E_{tx}(j, i) = k \times E_{elec} \times A_i \quad (4)$$

### 2.2 路由策略

本文采用的节点非均匀分布策略与文献[15]中的策略类似,在离 sink 较近的圆环中布置较多的节点,规划网络中每个圆环中节点的数目,在全网范围内除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。本文采用最小跳数的路由算法,该算法在网络中建立最小跳数场和路径节点最小能量场,使得信息包沿着能耗最优的路径向 sink 节点发送,该路由算法在能量节省、能耗均衡和提高网络生存期方面具有明显的优势,从而将有效解决由于节点过早死亡的问题。

算法的基本思想是在网络中建立最小跳数 (minimum hop count, MHC) 场并沿着最小跳数场的方向收集保存路径节点剩余能量 (path-nodes residual energy, PRE) 信息,传感节点无须保存路由表,只需记忆其内环节点信息,就可以建立到 sink 节点的多条路径,信息包选择路径节点最小剩余能量最大的路径转发。基于最小跳数的路由可以保证任何节点的信息沿着最优路径向 sink 节点发送,使得整个信息传输过程消耗的总能量最小,路径节点最小剩余能量的引入可以使得网络中节点能耗更加均衡,从而最大化网络的生存期。

算法过程:外层圆环将自身采集的数据逐层发送至 sink 节点,首先搜索本节点的 next-hop 可用节点集,从中选择 PRE 最大的节点作为中继节点进行转发,下跳节点接收到该信息后作同样的处理,直至发送到 sink 节点为止。路由选择算法如下:

```

for each sensor node i do//对于任何一个传感器节点
begin
    int temp = infinity; //定义 temp 为无穷大
    int node; //定义节点变量
    if ( packet generate or packet in ) then
    //如果有信息产生或者有信息到来
        for ( k = 0 ; k < avanodelist.count ; k + + ) {
            //检查节点的 next - hop 可用节点集
            if ( temp > = avanodelist[ k ]. MPE ) then
                //选择 next-hop 可用节点集中路径 MPE 最大的节点
                temp = avanodelist[ k ]. MPE;
                node = k;
            }
        }
    send ( packet , node ); // 向选定节点发送信息包
end
    
```

### 2.3 算法分析

减少网络中的冗余信息包是节省传感器网络能量的一种很有效的方式。在基于最小代价的路由算法中,传感器节点需要向内环节点广播信息包,并由满足代价要求的节点向 sink 节点转发。这个过程中将不可避免地产生大量的冗余信息包。基于最小跳数的无线传感器节点非均匀分布的路由算法通过从 next-hop 可用节点集中选择一个内环节点进行信息包转发,成功克服了广播导致的信息包冗余,有效地避免了冗余信息处理带来的额外能量消耗。基于最小代价的信息包转发过程如图 2(a) 所示,本路由算法的信息包转发情况如图 2(b) 所示。可以看出,图 2(a) 中节点 1 到 2, 1 到 4, 1 到 5 和 5 到 6 传送给的信息包均是冗余信息包;而图 2(b) 没有冗余信息包的存在。

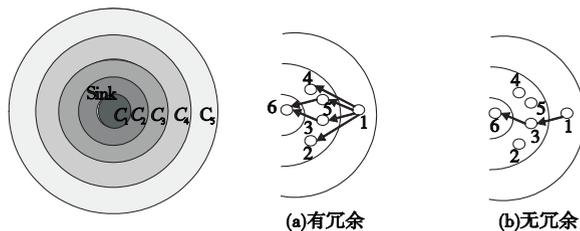


图 1 圆形网络区域

图 2 路由算法冗余比较

某些关键节点的失效对网络的生存期有很大的影响,节点能量的均衡消耗也是无线传感器网络路由算法设计必须考虑的问题。该路由算法采用综合衡量路径节点最小剩余能量的策略,有效地避免了低能量节点参与数据包的转发,从而很明显地提高了无线传感器网络的生存期。

### 2.4 节点能量保护

在无线传感器网络中,某些节点能量的过度消耗是影响网络生存期的关键因素,因此,对关键节点进行能量保护是延长

网络生存期的一种有效方法。在算法工作过程中,若某个节点的剩余能量小于某个值,它向外环节点发送 esc 消息,声明该节点将不再作为转发节点,外环节点接收到该 esc 消息后从自己的 *avanodelist* 中删除该节点。这样,那些经过该低能量节点的路径将会被删除,节点的处理负担将大大降低。这种能量保护策略可以有效地减少低能量节点的能量消耗,避免节点过早地失效,从而延长了网络的生存期。

### 3 仿真实验

通过仿真实验,本文对基于最小跳数路由算法的非均匀策略的性能进行了验证,并将其与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和网络能量剩余率方面的性能进行了对比分析。

仿真实验条件设置:网络中所有的节点非均匀分布在一个半径为  $R$  的圆形区域中,sink 节点位置固定在圆环中心,节点初始能量  $\epsilon = 100$  J,发送 1 bit 数据消耗能量  $e_{tx} = 0.75/104$  J/bit/m<sup>2</sup>,接收 1 bit 数据消耗能量  $e_{rx} = 0.5/104$  J/bit/m<sup>2</sup>;单位数据长度  $L = 1000$  bit,网络半径  $R = 3 \sim 8$  m,最外环节点数  $N_R = 4$ ,相邻内外环节点数目比  $q = 2 \sim 3$ 。

从图 3 可以看出,采用基于最小跳数路由算法的非均匀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。在采用均匀分布策略和随机非均匀分布策略时,不同规模的网络基站附近区域的节点数基本相同,但该区域内的节点要负责外围数据的转发,随着半径  $R$  的增大,需要转发的数据包增多、平均能耗增大,网络的生命周期减少。而采用基于最小跳数路由算法的非均匀策略时,基站附近区域内的节点个数随着半径  $R$  的增大,各圆环区域内节点的平均能耗基本相等,网络的生命周期只是略有下降。

图 4 中是网络在三种不同节点分布策略下的网络能量剩余率。可以看出,使用均匀分布和随机非均匀分布策略时,虽然系统中尚有足够的剩余能量,但因靠近基站的区域出现能量空洞问题,导致系统的生命周期提前结束;而采用改进后的策略在路由选择时充分考虑路径的剩余能量节点,可以有效避开剩余能量较小的路径,使得网络中的节点能耗均衡,只有当系统中剩余能量很少时,网络的生命周期才结束。

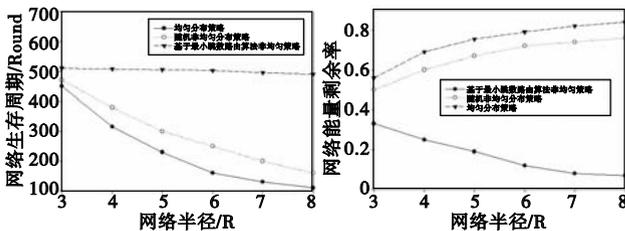


图3 不同节点分布策略的网络生存周期

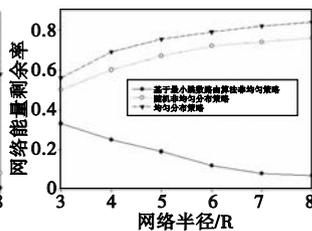


图4 不同节点分布策略的网络能量剩余率

### 4 结束语

本文针对无线传感器网络中的能量空洞现象而采取基于最小跳数的节点非均匀分布的路由算法。采用最小跳数路由算法,成功克服了广播导致的信息包冗余,使得传感器节点的信息包沿着总能量消耗最小且能量最均衡的方向向 sink 节点传送。仿真实验表明,该路由算法在能量总消耗和能耗均衡方面表现出了很好的性能,从而进一步优化网络的能耗性能。

### 参考文献:

- [1] YE Fan, CHEN A, LIU Song-wu, *et al.* A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks [C]// Proc of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2001: 304-309.
- [2] OLARIU S, STOJMENOVIC I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting [C] //Proc of IEEE INFOCOM. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1-12.
- [3] LI J, MOHAPATRA P. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks [C]//Proc of IEEE VTC, Fall, 2005: 2721-2725.
- [4] PERILLO M, CHENG Z, HEINZELMAN W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE GLOBECOM Workshops on Wireless Ad hoc and Sensor Networks. 2004: 74-79.
- [5] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//Proc of the 6th ACM Annual International Conference on Computing and Networking. Boston, MA: [s. n.], 2000: 243-254.
- [6] BOSE P, MORIN P, STOJMENOVIC I, *et al.* Routing with guaranteed delivery in Ad hoc wireless networks [C]//Proc of the 3rd Int workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobility. New York: ACM, 1999: 48-55.
- [7] DATTA S, STOJMENOVIC I, WU J. Internal node and shortcut based routing with guaranteed delivery in wireless networks [C]//Proc of IEEE International Conference on Distributed Computing and Systems Workshops. 2001: 169-178.
- [8] KUHN F, WATTENHOFER R, ZOLLINGER A. Worst-case optimal and average-case efficient geometric Ad hoc routing [C]//Proc of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2003: 267-278.
- [9] KUHN F, WATTENHOFER R, ZHANG Y, *et al.* Geometric Ad hoc routing: of theory and practice [C]//Proc of the 22nd ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. New York: ACM, 2003: 63-72.
- [10] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [11] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad hoc sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669.
- [12] SORO S, HEINZELMAN W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering [C]//Proc of the 5th International Workshop on Algorithm for Wireless, Mobile, Ad hoc and Sensor Networks. 2005: 8-17.
- [13] YE M, LI C F, CHEN G H, *et al.* An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks [J]. International Journal of Ad hoc & Sensor Wireless Networks, 2007, 3(2): 99-119.
- [14] LI C F, YE M, CHEN G H, *et al.* An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks [C]//Proc of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. Washington DC: [s. n.], 2005.
- [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 [J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-261.
- [16] WANG Wei, SRINIVASAN V, CHUA K. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks [C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2005: 270-283.