

# 放置中继节点解决无线传感器网络能量空洞问题

傅菊平<sup>1,2</sup>, 王东方<sup>1,2</sup>, 齐小刚<sup>1,2</sup>

(1.西安电子科技大学 数学科学系, 陕西 西安 710071;

2.西安电子科技大学 综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 在无线传感器网络中, 传感器节点往往采用多跳的方式进行数据传输, 造成了基站 sink 周围节点能量消耗过快, 易形成能量空洞问题。针对这个问题, 提出了一种改变中继节点能量的能耗均衡策略, 即将中继节点的能量加大为原传感器节点能量的数倍, 同时减少中继节点的数量。理论分析和仿真结果表明, 这种方法有效地解决了能量空洞问题。考虑到成本和数据冗余问题, 在中继节点数为理想数目的 3/5 时, 网络能耗没有太大的提高, 即放置少量的中继节点也能达到能耗均衡的目的。

**关键词:** 无线传感器网络; 能量空洞; 中继节点; 能耗均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)02-0072-03

## Using relay-nodes to solve energy hole in wireless sensor networks

Fu Juping<sup>1,2</sup>, Wang Dongfang<sup>1,2</sup>, Qi Xiaogang<sup>1,2</sup>

(1.Department of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2.State Key Laboratory of Integrate Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In wireless sensor networks, sensor nodes use multipoint-to-point to transmit data. The closer to the sink, the quicker they will consume its battery, which forms the energy hole problem. To this problem, an energy consumption balance strategy, changing relay-node energy, is proposed, that is increasing energy of relay-nodes, and decreasing the number of relay-nodes. Theory analysis and simulation results indicate that this method can solve energy hole problem effectively. Moreover, for the cost of nodes and data redundancy, when the number of relay-nodes is decreased to 3/5 that of the ideal number, energy consumption is not extended more. That shows that decreasing the number of relay-nodes can also solves the problem.

**Key words:** wireless sensor networks; energy hole; relay-node; energy consumption balance

无线传感器网络 WSNs (Wireless Sensor Networks) 是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成, 通过无线通信方式组成的一个多跳的自组织的网络系统。其主要功能是对周边环境信息进行采集和管理, 并将感知到的数据发送到基站进行进一步的处理<sup>[1]</sup>。无线传感器网络节点体积小、价格低, 在工业、农业、交通、军事、安全、医疗、空间探测, 以及家庭和办公环境等众多领域广泛应用。

与传统的 Ad hoc 网络相比, 节点电源能量有限、通信能力有限以及计算和存储能量有限是无线传感器网络最大的特点, 也是制约路由协议的主要因素。因此, 无线传感器网络的能效利用非常重要, 传感器节点往往采用多跳的方式, 一些节点既能转发数据又能产生数

据<sup>[2]</sup>。而且, 离 sink 近的节点消耗更多的能量, 因此这些节点更容易过早的死亡。参考文献[3]中用理论和计算机模拟证明: 与 sink 距离越近, 节点消耗的能量越快。在参考文献[4]中, 将这种因部分节点过早耗尽自身能量导致网络原有覆盖区域缺失或者数据无法送达 sink 节点的现象称作“能量空洞”现象。因此, 如何解决能量空洞问题, 延长网络生命周期, 成为当前无线传感器网络研究中的一个热点问题。

### 1 研究现状

针对无线传感器网络能量空洞问题, 近年来提出了许多解决方案。参考文献[5]首先提出一个数学模型用于解决无线传感器网络中的能量空洞问题。文中假定一个圆形网络中节点均匀分布, 从网络流的角度出发, 分

## 网络与通信 Network and Communication

析了数据压缩和融合策略的优势。但是 sink 附近节点所承担的转发任务依然很重。在参考文献[4]中作者提出将节点放置于圆形区域中,并分成若干个半径递增的圆环,证明了如果网络中的节点数目从圆环  $C_{R-1}$  到最内圆环  $C_1$  以等比  $q(q>1)$  递增,且圆环  $C_R$  和圆环  $C_{R-1}$  中的节点数目比为  $1/(q-1)$ ,则在网络中能够实现次优的能耗均衡。这种策略量化了网络中相邻环间的节点数目,在此基础上可以算出圆环间的节点数目关系,模拟分析显示了使用这种节点非均匀分布策略达到了次优的能耗效率,网络中仅有非常小的能量被浪费。但是,非均匀分布策略只是在理论上有一定的可行性,可以想象,非均匀分布策略同时伴随着一些网络开销,在 sink 节点周围分布节点密度较大,只有当传感器节点能够低成本大规模生产时,这种策略才有可能实现。因此,这种策略并不能从根本上解决能量空洞问题。

参考文献[6]提出了采用放置中继节点方式解决能量空洞问题。文中提到的中继节点只具有接收数据和转发数据的功能,而不具有产生数据的能力,而且理论分析和仿真结果表明,这种方式延长了网络的生命周期。但是因为能量空洞问题导致 sink 周围节点能耗大,因此,在 sink 节点的周围要放置更多的节点才能使能耗均衡,但是理论值表明,当最内层放置的中继节点数几乎等于整个网络放置的传感器节点总数时,才能达到能耗均衡,这在实际应用中很难实现,而且会造成大量数据冗余和网络拥塞,导致不必要的浪费。

因此,本文提出改变中继节点的能量来解决能量空洞问题。假设中继节点能量为传感器节点能量的数倍,进而通过理论计算和仿真分析来确定中继节点的个数,从而达到网络能耗均衡的目的。

## 2 算法提出

### 2.1 符号说明

$R$ ——节点分布区域网络半径;  
 $e$ ——节点的初始能量;  
 $\lambda$ ——网络在单位区域内生成数据的速度;  
 $T$ ——发送单位数据消耗的能量;  
 $E$ ——接收单位数据消耗的能量;  
 $n$ ——网络中初始节点个数;  
 $k_i$ ——第  $i$  层圆环中加入的中继节点个数;  
 $r$ ——节点的发射半径,也为圆环的宽度,为  $R$  的整数分之一;

$R/r$ ——网络总层数。

### 2.2 网络模型

本文网络生命周期定义为网络中第一个节点死亡时间。节点放置于半径为  $R$  的圆形区域中,且 sink 节点位于圆心,如图 1 所示。将圆形区域划分为以半径  $r$  递增的圆环,同时按圆环面积来放置节点。由网络中总节点数为  $n$ 、网络区域总面积为  $\pi R^2$ 、得到单位面积内的

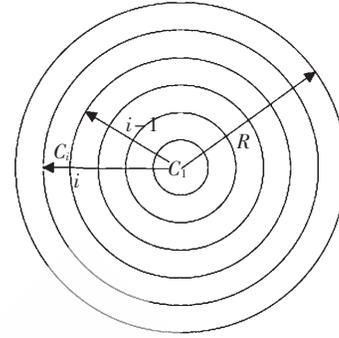


图 1 网络模型

节点数为  $\frac{n}{\pi R^2}$ , 从而可得第  $i$  层圆环放置的节点数为  $\frac{\pi (ri)^2 - \pi [r(i-1)]^2}{\pi R^2} \cdot n$ 。

### 2.3 理论分析

从网络模型的建立过程来看,可以知道最外层节点数为:

$$n_R = \frac{\pi R^2 - \pi (R-r)^2}{\pi R^2} \cdot n \quad (1)$$

因为最外层节点只发送数据,不用转发和接收数据,故最外层节点平均负载可求为( $s_R$  表示最外层面积):

$$m_{\frac{R}{r}} = \frac{s_R \cdot \lambda \cdot T}{n_R} = \frac{\pi [R^2 - (R-r)^2] \lambda T}{2Rr - r^2 \cdot n} = \frac{\pi \lambda T R^2}{n} \quad (2)$$

同理知道第  $i$  层节点数为:

$$n_i = \frac{\pi (ri)^2 - \pi [r(i-1)]^2}{\pi R^2} \cdot n, (0 < i < \frac{R}{r}) \quad (3)$$

由于该层节点既要接收其外层节点的数据包,也要转发本层及外层所有节点的数据包,故各个节点平均负载可求为:

$$\begin{aligned} m_i &= \frac{m_{接收} + m_{转发}}{n_i} = \frac{E(s_{\frac{R}{r}} + \dots + s_{i+1})\lambda + T(s_{\frac{R}{r}} + \dots + s_i)\lambda}{\frac{(2i-1)r^2}{R^2} \cdot n} \\ &= \frac{E\lambda [\pi R^2 - \pi (ir)^2] + T\lambda \{\pi R^2 - \pi [(i-1)r]^2\}}{\frac{(2i-1)r^2}{R^2} \cdot n} \\ &= \frac{E\lambda \pi [R^2 - (ir)^2] + T\lambda \pi [R^2 - [(i-1)r]^2]}{\frac{(2i-1)r^2}{R^2} \cdot n} \end{aligned} \quad (4)$$

由于第一层节点的平均负载最大,最外层负载最小,故在第一层中加入中继节点使最内层节点平均负载等于最外层负载。设最内层加入  $k_1$  个中继节点,则得到等式:

$$\frac{E\lambda \pi (R^2 - r^2) + T\lambda \pi R^2}{\frac{r^2}{R^2} n + k_1} = \frac{T\lambda \pi R^2}{n} \quad (5)$$

从而得到:

$$k_1 = \frac{(E+T) \cdot n \cdot (R^2 - r^2)}{TR^2} \quad (6)$$

同理,若第  $i$  层加入  $k_i$  个中继节点,则:

网络与通信 Network and Communication

$$\frac{E\lambda\pi[R^2-(ir)^2]+T\lambda\pi[R^2-[(i-1)r]^2]}{\frac{(2i-1)r^2}{R^2}n+k_i} = \frac{T\lambda\pi R^2}{n} \quad (7)$$

从而：

$$k_i = \frac{E \cdot n(R^2 - i^2r^2) + Tn\{R^2 - [(i-1)r]^2\} - Tn(2i-1)r^2}{TR^2} \quad (8)$$

由上述推导，得到了各个圆环所放置的中继节点数目。

3 仿真分析

3.1 仿真计算

在仿真过程中，用到参考文献[7]中的能量公式及表1中的数据。

表1 仿真数据一览表

R	50 m	e	2 J
n	100	r	10 m
e <sub>r</sub>	50×10 <sup>-9</sup> J/b	e <sub>t</sub>	50×10 <sup>-9</sup> J/b
e <sub>d</sub>	100×10 <sup>-12</sup> J/b	B	1×10 <sup>3</sup> b/s

节点接收数据消耗的能量： $E=e_r \cdot B$

节点发送数据消耗的能量： $T=(e_t+e_d d_{ij}^4)B$ ，其中  $d_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间的距离。

此时，将  $d_{ij}$  近似为  $r$ ，从 2.3 节中的公式推导可以算出，每个圆环内放置的节点数从最内层到次外层分别为 100、88、67、38，但是可以看出最内层放置的中继节点数是原来所放置传感器节点的总和，这在现实中是很难实现的。所以想到能否通过加大中继节点的能量来减少中继节点的个数，在下面的仿真过程中，将中继节点的能量加到原来的 2 倍、4 倍和 5 倍，而各个圆环内的中继节点数分别减少为原来的 1/2、1/4 和 1/5，即最内层节点数分别为 50、25 和 20，其他层节点数按上述比例放置。在整个过程中，采用随机产生一个源节点，并运用最短路径，以多跳的方式进行数据转发。

3.2 仿真结果

图 2 是在网络放置不同能量中继节点的情况下，随机产生 100 个拓扑结构后，在网络生命周期结束时，各个圆环内节点消耗的平均能量。从图中可以看出当加入中继节点后，尽管中继节点的能量改变不一样，中间各个圆环消耗的平均能量趋于平衡。而且三条线几乎重合，可以想到在总能量不变的情况下，能量均衡性是不变的。然而最外层和最内层节点的能量还是未能达到均衡。最内层节点能量未达到平衡是因为最内层放置的中继节点数太多，为原有传感器节点的 5~15 倍，因此这层的传感器节点大部分不会参与数据的转发，只是本身产生数据发送数据。而最外层节点只是本身产生数据，因此消耗能量较少。

从所放置中继节点的数量可以看出，虽然加大中继节点的能量以后数量有所减少，但是最内层中继节点数量较原传感器节点数量仍然很多，可能造成不必要的浪

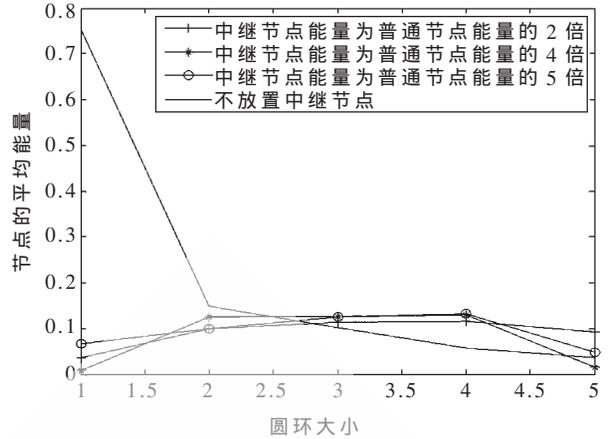


图 2 放置不同能量的中继节点时各个圆环内节点消耗的平均能量

费和数据冗余，所以想到能否减少中继节点的数量也能使能量消耗达到次优均衡。

从表 2 中可以看出，随着最内层中继节点数量的增加，方差也在不断地变化，而当节点数为计算出的理论值时（即比例为 1），方差最小，与理论上一致。但是，当中继节点能量加到原来的 2 倍、中继节点个数为 30，即为理论中继节点数的 3/5 时，方差次最小，那么可以认为在中继节点能量加大到原来的 2 倍时，最内层放置 30 个节点仍然可以达到预期的能量均衡的效果。而从 4 倍和 5 倍能量表中也观察到，最内层中继节点分别为 15 和 12 时，方差均值也是一个分界点，即方差明显减小，此中继节点数也为理论值的 3/5，比例与一倍时相同。所以考虑到成本和数据冗余问题，放置少量的中继节点就能达到能耗均衡的目的。

表 2 圆环平均能量方差 随最内层中继节点数的变化

中继节点 能量倍数	最内层节点数	最内层节点减小比例				
		1	4/5	3/5	2/5	1/5
2 倍	最内层节点数	50	40	30	20	10
	方差均值×10 <sup>3</sup>	54	71	63	70	91
4 倍	最内层节点数	25	20	15	10	5
	方差均值×10 <sup>3</sup>	56	74	77	87	117
5 倍	最内层节点数	20	16	12	8	4
	方差均值×10 <sup>3</sup>	65	90	93	107	120

本文针对能量空洞问题，提出了通过改变中继节点的能量减少各个圆环内中继节点的个数达到网络能耗均衡。理论分析和仿真结果表明，这种方法有效地解决了能量空洞问题。同时，考虑到成本和数据冗余问题，在中继节点数为理论中继节点数的 3/5 倍时，网络能耗没有太大变化，即放置少量的中继节点也能达到网络能耗均衡的目的。但是，在做仿真的过程中忽略了一些细节，没有考虑到协议等多方面的因素，这也是以后要研究和努力的方向。

参考文献

[1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.

[2] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.

[3] LUO J, HUBAUX J P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks[J]. Proc. INFOCOM, 2005: 819-830.

[4] 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.

[5] LI J, MOHAPATRA P. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks[C]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Dallas, TX,

2005: 2721-2725.

[6] YU Fengxin, GUVEN T, SHAYMAN M. Relay deployment and power control for life time elongation in sensor networks[C]. Proc. IEEE int'l Conf. Comm, 2006: 3461-3466.

[7] 掌明.基于最大生存周期的无线传感器网络能力模型研究[J].现代电子技术,2007,31(21):38-40.

(收稿日期:2010-08-20)

作者简介:

傅菊平,女,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络优化。

王东方,女,1984年生,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络路由算法。

齐小刚,男,1973年生,副教授,博士,硕士生导师,主要研究方向:图论与组合最优化、网络优化理论与方法以及路由与交换。

