

# 实现能量均衡消耗的传感器网络节点摆放策略

樊勇, 张晓彤, 万亚东, 王沁

(北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 在传感器网络技术应用的民用领域中, 采集信息的传感器节点位置固定, 并且有些距离汇聚节点太远, 需要加入中继节点转发数据。一些中继节点由于承担了过多的数据量而过早耗尽能量, 影响了网络的生存周期。该文针对该种情况, 提出了一种实现各节点能量均衡消耗的中继节点多级摆放策略, 研究了如何通过调整中继节点的摆放位置和转发数据量, 使传感器节点和中继节点在每一轮的数据传输中消耗相同的能量。基于该策略, 还研究了中继节点数目与网络生存周期之间的关系, 为延长网络生命周期和减小中继节点数目的折中提供了一种参考。

**关键词:** 无线传感器网络; 能量均衡消耗; 多级摆放策略

## Nodes Placement Strategy for Even Energy Consumption in Wireless Sensor Networks

FAN Yong, ZHANG Xiao-tong, WAN Ya-dong, WANG Qin

(Information Technology School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083)

**【Abstract】**In some civilian applications of wireless sensor networks, the sensing nodes is so far away from base station that relaying nodes must be employed to forward data. Some relaying nodes use up their power early because they have heavier traffic load, which affects the network lifetime. This paper proposes the multi-phase placement strategy of relaying nodes, which implements an even energy consumption distribution among different nodes. Sensing nodes and relaying nodes consume the same power in every round of data transmission by adjusting location and data volume. Based on the strategy, this paper finds numerical relationship between the number of relaying nodes and network lifetime, offers a reference for the trade-off between increasing network lifetime and decreasing the number of relaying nodes.

**【Key words】**wireless sensor network; even energy consumption; multi-phase placement strategy

无线传感器网络技术在建筑物的自动控制、智能住宅以及工业监测<sup>[1,2]</sup>等领域的应用具有以下特征:(1)传感器节点的位置、数量以及汇聚节点的位置已知;(2)某些传感器节点所在位置限制它不能直接和汇聚节点通信,需要加入中继节点,而中继节点可以人为摆放。这就引发了如下问题:在保证网络生存周期的情况下,如何摆放这些中继节点才能使中继节点的数目尽可能少。

目前的解决方法主要有2种:(1)建立多条传输途径,分担数据流量,减小单个节点的数据承载量,进而达到延长整个网络生存周期的目的<sup>[3]</sup>;(2)调整节点间的距离,使承载数据量大的节点转发的距离小一些,减小其发射功率,降低能耗<sup>[4]</sup>。

本文结合文献[3,4]中的思想,提出一种实现能量均衡消耗的中继节点摆放策略,并给出了一种减少中继节点数目的方法。

### 1 约束条件及能量模型

#### 1.1 约束条件

本文所描述的策略遵循以下条件:(1)传感器节点和中继节点具有相同的初始能量 $E$ ;(2)每个传感器节点在每一轮数据采集过程中所产生的数据量 $k_{sensor}$ 是相同的,传感器节点只负责采集数据并发送数据,而不会转发其他传感器节点的数据。中继节点的作用在于转发传感器节点产生的数据而自

身不会产生数据;(3)传感器节点和中继节点的发射功率可调;(4)将任意一个节点能量耗尽时网络所运行的时间作为网络的生存周期。

#### 1.2 能耗模型定义

能耗模型采用First Order Radio模型<sup>[5]</sup>,如图1所示。在该模型中,无线电需要消耗 $E_{elec}$ 的能量来运行发送电路或接收电路,需消耗 $E_{amp}$ 的能量来运行发送放大器。

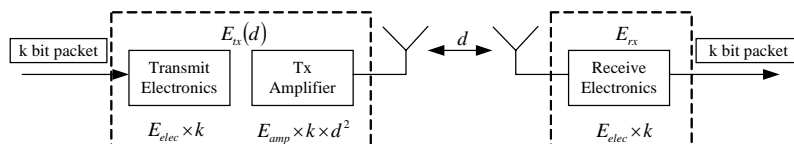


图1 First Order Radio模型

当传送数据量为 $k$ bit,传输距离为 $d$ 时,共消耗的能量为

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

为了接收该数据,消耗的能量为

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

**作者简介:**樊勇(1977-),男,博士研究生,主研方向:无线传感器网络,射频PCB设计,高速PCB设计;张晓彤,副教授;万亚东,博士研究生;王沁,教授、博士生导师

**收稿日期:**2006-09-19 **E-mail:** wsn\_ustb@163.com

## 2 问题的定义

将网络定义为一个连通图  $G=(V,A)$  ,  $V=\{v_0,v_1,\dots,v_n\}$  是网络中节点的集合,  $v_0$  代表汇聚节点。节点  $v_i$  的发射半径定义为  $r_i$  , 节点  $v_i$  到汇聚节点  $v_0$  的距离计为  $d_{i0}$ 、节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间的距离计为  $d_{ij}$ 。传感器节点发送一次数据或中继节点接收并发送一次数据计为一轮。

对于传感器节点  $v_i$  , 经过  $t$  轮数据采集并发送后, 消耗的能量为

$$E_{sensor} = \sum_{\tau=1}^t E_{tx}^i(\tau) \quad =1,2,\dots,t \quad (3)$$

这里忽略了传感器节点采集和处理信息所消耗的能量<sup>[6]</sup>。

对于中继节点  $v_j$  , 经过  $t$  轮之后消耗的能量为

$$E_{relay} = \sum_{\tau=1}^t (n_j(\tau) \times E_{tx}(\tau) + n_j(\tau) \times E_{rx}) \quad =1,2,\dots,t \quad (4)$$

其中,  $n_j$  表示发送数据到中继节点  $v_j$  的传感器节点的个数,  $E_{tx}$  表示发送一个传感器节点所产生的数据量所消耗的能量,  $E_{rx}$  表示接收一个传感器节点产生的数据量所消耗的能量。从式(1)~式(4)中不难看出, 要使  $E_{sensor} = E_{relay}$  , 必须调节传感器节点和转发节点承载的数据量以及发射距离。

## 3 摆放策略

首先要根据实际需求提出合理的网络生存周期, 然后在此基础上使用尽可能少的中继节点实现能量均衡的摆放策略。中继节点的摆放分为两个阶段, 第一阶段目的在于实现传感器节点与中继节点的通信; 第二阶段目的在于加入更多的中继节点, 实现网络的联通, 并进行节点的合并以减少节点的数目。

### 3.1 网络最长寿命的估算

中继节点接收一个传感器节点所产生的数据量并将其以最小的发射功率发送出去所消耗的能量是一轮数据采集过程中单个中继节点消耗的最少能量。假设每个传感器节点产生的数据量是  $k_{sensor}$  , 中继节点在最小发射功率下的发射半径是  $r_{min}$  , 每个节点的初始能量是  $E$ 。这样, 中继节点的最大生存周期  $L_{max}$  为

$$L_{max} = \frac{E}{E_{tx}(k_{sensor}, r_{min}) + E_{rx}(k_{sensor})} \quad (5)$$

将式(1)、式(2)代入(5)可得

$$L_{max} = \frac{E}{(E_{elec} \times k_{sensor} + E_{amp} \times k_{sensor} \times r_{min}^2) + (E_{elec} \times k_{sensor})} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 中继节点的转发数据量和发射半径影响了它的生命周期。

### 3.2 第一阶段中继节点的摆放

第一阶段节点的摆放分为以下 4 个步骤:

**步骤 1** 使  $U = V - \{v_0\}$ 。

**步骤 2** 提出对传感器网络生存时间的要求  $L$  ( $L < L_{max}$ )。

在这个要求下, 对于中继节点  $j$  在不同的发射半径下所能转发的数据量是不同的, 如式(7)所示:

$$E_{tx}(n \times k_{sensor}, r_j) + E_{rx}(n \times k_{sensor}) = \frac{E}{L} \quad (7)$$

当  $r_j = r_{min}$  时, 该中继节点所能转发的数据量是最大的, 由于每个传感器在每一轮的采集中产生的数据量是相同的, 因此该中继节点所能连接的传感器节点的数目  $n$  也是最多的, 计作  $n_{max}$ 。为了使传感器节点和中继节点在一轮的数据发送过程中所消耗的能量一样, 对于传感器节点  $v_i$  来讲, 应该满足式(8)所列的条件。

$$E_{tx}(k_{sensor}, r_i) = \frac{E}{L} \quad (8)$$

如果有传感器节点  $v_i$  距离汇聚节点的距离  $d_{i0} < r_i$  , 如图 2 中的  $v_1$  , 则可以直接与汇聚节点通信。否则, 进入步骤 3。

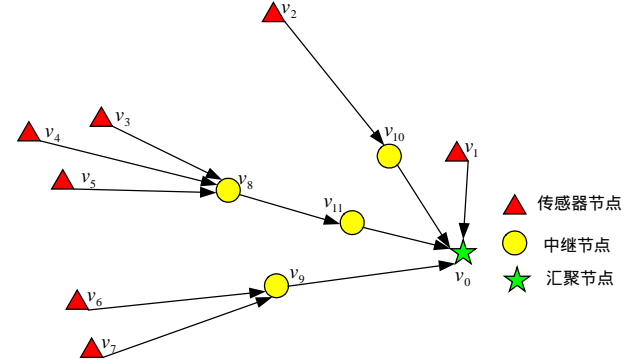


图 2 中继节点的摆放

**步骤 3** 第一阶段中继节点的摆放。

首先从  $U$  中选择距离汇聚节点最远的一个传感器节点, 如图 2 中的  $v_4$  , 然后将中继节点  $v_8$  放在  $v_4$  与  $v_0$  的连线位置上,  $v_8$  和  $v_4$  的距离是  $r_4$  ,  $E_{tx}(k_{sensor}, r_4) = \frac{E}{L}$ 。然后选择其它到  $v_8$  的距离小于或等于  $r_4$  的传感器节点作为  $v_8$  的孩子节点。如图 2 中的  $v_3$ 、 $v_5$  ,  $d_{38} \leq r_4$  ,  $d_{58} \leq r_4$ 。

如果与第一阶段中继节点  $v_j$  相连的传感器节点的数目  $n_j = n_{max}$  , 则该中继节点的发射半径是  $r_{min}$ 。如果  $n_j < n_{max}$  , 则由于中继节点转发数据量减少而节省的能量可以用于增加它的发射半径, 此时  $r_j > r_{min}$ 。

$$r_j = \sqrt{\frac{E/L - E_{elec} \times n_j \times k_{sensor}}{E_{amp} \times n_j \times k_{sensor}}} \quad (9)$$

从  $U$  中删除  $v_j$  以及与  $v_j$  直接通信的传感器节点, 如果  $r_j > d_{j0}$  , 则  $v_j$  可以直接与汇聚节点通信, 如图 2 中的  $v_9$ 。否则需要加入更多的中继节点, 如图 2 中  $v_{11}$  , 进入步骤 4。

**步骤 4** 第二阶段中继节点的摆放。

在第一阶段中继节点摆放的基础上, 新的中继节点应摆放在  $v_j$  和汇聚节点的沿线上, 所在的位置距离  $v_j$  是  $r_j$ 。如图 2 中的  $v_{11}$  ,  $d_{811} = r_8$ 。新加入的  $v_{11}$  接收并转发  $v_8$  的全部数据, 为保证能量的均衡消耗, 其发射半径也要与  $v_8$  一致。如果  $r_{11} < d_{110}$  , 则继续步骤 4 的过程加入更多的中继节点; 否则, 进入步骤 3, 直至所有的传感器节点实现与汇聚节点的通信。

### 3.3 冗余中继节点的删除

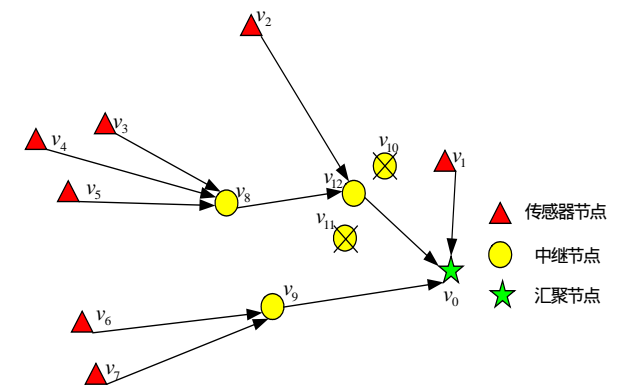


图 3 冗余中继节点的删除

通过步骤 1~步骤 4 的实施,实现了能量均衡分布的中继节点的摆放。在这个过程中,存在一些直接和汇聚节点通信的中继节点,它们距离汇聚节点很近,用小于预定的发射功率就可以实现通信。这就有可能将多个中继节点合并为一个中继节点,承担多个节点的数据量,还能保证预定的节点生存周期。图 3 说明了用一个中继节点代替原有两个节点的情况, $v_{12}$ 能够承载 $v_{10}$ 和 $v_{11}$ 的数据流量与汇聚节点通信,减少了中继节点的数目。

#### 4 网络的生存时间与中继节点数目的关系

基于上文提到的中继节点摆放策略,下面将通过量化分析手段描述网络寿命和中继节点数目之间的关系。表 1 给出了实验中所使用的参数,表 2 给出了 20 个传感器节点在  $200\text{m} \times 200\text{m}$  范围内的分布位置。

表 1 实验参数

传感器节点的数目	20
覆盖区域面积	$200\text{m} \times 200\text{m}$
节点的初始能量 $E/\text{J}$	0.5, 1.0, 1.2
基站的位置	(0,0)
消息的大小 $k_{\text{sensor}}/\text{bit}$	20, 50, 100
能量模型	First Order Radio 模型
中继节点最小发射半径 $r_{\text{min}}/\text{m}$	15, 20, 25, 30, 35, 40, 45
$E_{\text{amp}}(\text{pJ} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	100
$E_{\text{elec}}/(\text{nJ} \cdot \text{bit}^{-1})$	50

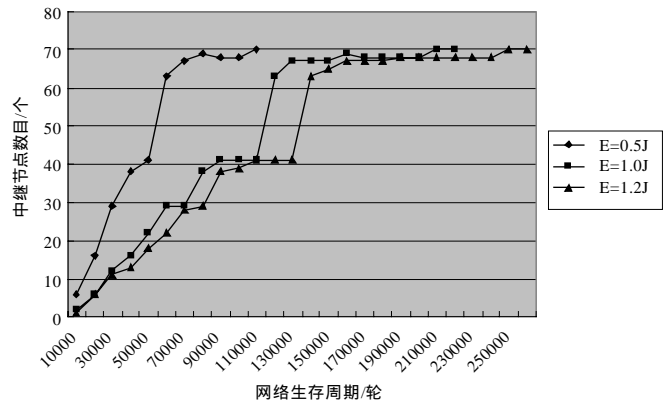
表 2 20 个传感器节点的分布位置

节点号	位置	节点号	位置
1	(150, 150)	11	(180, 170)
2	(150, 200)	12	(170, 160)
3	(200, 150)	13	(160, 150)
4	(200, 200)	14	(175, 168)
5	(160, 170)	15	(197, 185)
6	(170, 180)	16	(155, 170)
7	(180, 190)	17	(169, 183)
8	(190, 200)	18	(192, 181)
9	(150, 160)	19	(174, 185)
10	(190, 180)	20	(194, 188)

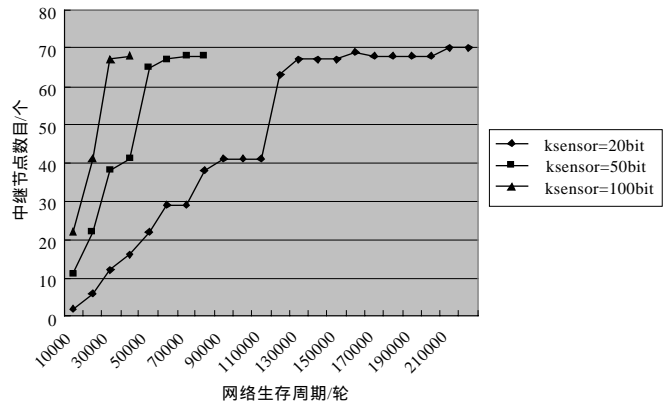
图 4(a)~图 4(c)是当  $E$ ,  $k_{\text{sensor}}$ ,  $r_{\text{min}}$  这 3 个参数发生变化时,中继节点的数目和网络生命周期的关系。在图 4(a)中,随着节点的初始能量  $E$  的增加,最长的网络生存周期也会增加。当实现相同的网络生存周期时,  $E$  越大,一级中继节点最多能连接的传感器节点数目越多,其他各级中继节点转发相同数量的数据的发射半径增加,因此,所需的中继节点数目会减少。

在图 4(b)中,随着消息  $k_{\text{sensor}}$  变大时,最长的网络生存周期会减少。当实现相同的网络生存周期时,  $k_{\text{sensor}}$  越大,一级中继节点最多能连接的传感器节点数目减少,所需的中继节点数目会增加。

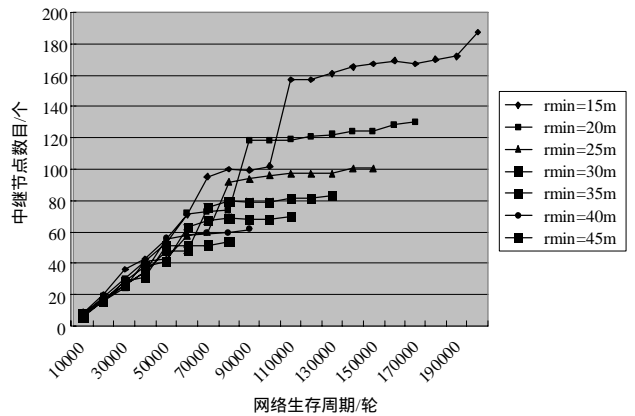
在图 4(c)中,当中继节点的最小发射半径  $r_{\text{min}}$  增大时,发送相同量的数据所消耗的能量增加,导致最长的网络生存周期减小。但是当  $r_{\text{min}}$  增大时,一级中继节点所能连接的传感器节点数目会增加,其他各级中继节点转发相同数量的数据的发射半径增加,所需的中继节点数目会减少。另外,在图 4(c)中可以看出,尽管网络生存周期的增加幅度不是很大,但所增加的中继节点的数目却比较多。因此,要折中考虑延长网络生命周期以及为此增加的中继节点的数目。



(a)  $k_{\text{sensor}}=20\text{bit}$ ,  $r_{\text{min}}=35\text{m}$



(b)  $E=1.0\text{J}$ ,  $r_{\text{min}}=35\text{m}$



(c)  $E=0.5\text{J}$ ,  $k_{\text{sensor}}=20\text{bit}$

图 4 中继节点的数目与网络生存周期的关系

#### 5 结论

本文针对传感器节点、汇聚节点位置固定并且传感器节点距离汇聚节点太远,需要通过中继节点与汇聚节点通信的情况,提出了一种实现各节点能量均衡消耗的中继节点多级摆放策略。通过该策略,给定网络生命周期的期望值,可以得到所需中继节点的数目,为网络的成本预算提供了一种参考。同时还研究了第一阶段中继节点最多连接传感器节点的数目、节点的初始能量、传感器节点产生的消息大小和中继节点最小发射半径这些参数对于网络的生命周期、中继节点数目的影响,网络设计者可以根据实际需求,选择不同的参数值。

(下转第 16 页)