

无线传感器网络能量均衡的多 sink 分簇路由算法

李 芳^{1,2}, 丁永生^{1,2}, 郝矿荣^{1,2}, 姚光顺^{1,2}

LI Fang^{1,2}, DING Yongsheng^{1,2}, HAO Kuangrong^{1,2}, YAO Guangshun^{1,2}

1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620

2. 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 上海 201620

1.College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China

2.Engineering Research Center of Digitized Textile & Apparel Technology, Ministry of Education, Shanghai 201620, China

LI Fang, DING Yongsheng, HAO Kuangrong, et al. Energy balanced multi-sink clustering routing algorithm for wireless sensor network. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(3): 110-115.

Abstract: With the limited energy of sensor nodes and the unbalanced consumption of nodes' energy in Wireless Sensor Network (WSN), this paper proposes an Energy Balanced Multi-sink Clustering Routing algorithm (EBMCR). In the cluster head selection phase, the EBMCR algorithm considers the residual energy level of sensor nodes and the distance between sensor nodes and sink nodes to select the cluster head. In the inter-cluster communication process, the EBMCR algorithm adopts multi-hop transmission mode, calculating the energy consumption of the path, the minimum residual energy of the path and the hops from the sensor node to the sink node, to select the optimal path to the best sink nodes. Simulation results show that the EBMCR algorithm can balance the network energy effectively and prolong the network life.

Key words: wireless sensor network; multi-sink; energy balance; clustering routing; network life

摘 要: 针对无线传感器网络中传感器节点能量有限以及节点能耗不均衡的问题, 提出了一种基于能量均衡的多 sink 分簇路由算法 (EBMCR)。该算法在簇头选择阶段, 综合考虑了节点的剩余能量级和节点到 sink 的距离等因素选择簇头节点; 在簇间通信过程, 采用多跳传输的方式, 综合考虑了路径能量消耗、路径最小剩余能量和节点到 sink 的跳数等因素, 选择节点到多个 sink 的最优路径。仿真结果表明, 该算法能够有效地均衡网络能量, 延长网络生命周期。

关键词: 无线传感器网络; 多 sink; 能量均衡; 分簇路由; 网络生命周期

文献标志码: A **中图分类号:** TP393.02 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1504-0300

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN)^[1-2] 是由大量低成本、自组织、有一定计算能力和通信能力的传感器节点组成, 可实时监测、采集网络分布区域的对象信息。由于传感器节点能量有限且在应用过程中不易更换^[3], 因此在 WSN 的诸多研究内容中, 能量高效

的路由协议一直是一个重要的研究热点^[4]。

WSN 的路由协议按照网络拓扑结构主要分为平面路由和分簇路由, 有研究表明分簇路由协议相比平面路由协议, 有较高的能量效率^[5]。典型的分簇路由协议有 LEACH^[6]、TEEN^[7]、PEGASIS^[8] 等。这些路由协议均采用的是单 sink 网络架构, 然而在单 sink 的 WSN 中, 随着

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.61134009); 国家自然科学基金 (No.61473078); 教育部长江学者奖励计划; 上海领军人才专项资金; 上海市科学技术委员会重点基础研究项目 (No.13JC1407500); 上海市教育委员会科研创新项目 (No.14ZZ067)。

作者简介: 李芳 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究领域为无线传感器网络、物联网技术; 丁永生 (1967—), 通讯作者, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为智能系统、网络智能、物联网、智能机器人、数字化纺织等, E-mail: ysding@dhu.edu.cn; 郝矿荣 (1964—), 女, 博士后, 教授, 博士生导师, 研究领域为机器视觉、模式识别、智能机器人、智能控制、数字化纺织等; 姚光顺 (1982—), 男, 博士研究生, 研究领域为无线传感器网络、云计算。

收稿日期: 2015-04-30 **修回日期:** 2015-08-21 **文章编号:** 1002-8331(2017)03-0110-06

CNKI 网络优先出版: 2015-09-14, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20150914.1650.052.html>

网络规模的增大,在 sink 节点附近的传感器节点由于转发大量数据而使其消耗过快,导致相应的能量黑洞问题,从而缩短网络生命周期。另外,在单 sink 的 WSN 中,一旦该 sink 节点发生故障,整个网络将面临瘫痪的危险。此时,多 sink 网络架构可以有效地解决上述问题^[9]。

近年来,已有相关学者对多 sink 路由进行了相关研究。文献[10]提出的 MRMS 算法采用多 sink 网络架构,主要包括三个阶段:拓扑发现、分簇维持和路径重新选择,该算法利用多 sink 节点、分簇维持和路径重新选择机制来均衡网络的能量。文献[11]提出的 PBR 算法综合考虑了路径能量消耗和路径能量级别,大大延长了网络的生命周期,但该算法不够灵活,计算和通信代价都较大。文献[12]提出的 GLOBAL 算法综合考虑了累积路径负载和路径中超载节点的负载流量,来计算每个节点的梯度值,从而将数据包转发到负载最小的路径,以实现负载均衡。文献[13]提出的 EMCA 算法是基于多 sink 的分簇路由算法,在簇头选择阶段重点考虑了节点的剩余能量因素,在簇内选择多跳传输的方式来减少能量消耗,在簇间一跳传输过程中,选择最近的 sink 节点作为目的节点,但该算法中簇头与 sink 节点一跳通信,可能会导致距离 sink 远的节点能量消耗过快。文献[14]提出了一种基于等级表路由方法来解决多 sink Zigbee 无线传感器网络中的拥堵和交通流量均衡问题。网络中每个节点都有一个等级路由表来缓存路径成本和下一跳地址,其中路径成本包含负载水平信息,当一个节点需要传输数据到 sink 节点时,查找等级表中路径成本最小的路由路径,然后将数据包转发到该条路径对应的下一跳地址,但该网络采用网状拓扑结构,计算代价较大。文献[15]研究分层网络结构,采用混合整数线性规划模型来确定最佳的 sink、簇头节点的位置和数据转发的路径,综合考虑传感器节点的位置信息和节点的能量信息,避免能量高或者位置好的节点持续担任簇头。文献[16]提出了一种基于时间的简单弹性多跳路由协议(SRMR)。SRMR 综合考虑了节点到 sink 的跳数和节点到 sink 的预期传输时间来使网络效益最大化。文献[17]首先提出预期寿命指标显示每个节点的剩余时间,设计机制来检测节点的能源瓶颈和均衡负载流量,然后将这个度量标准应用于 RPL 路由协议中,以延长网络寿命;并提出了多路径方法,利用有向无环图的拓扑以一定概率提前分散负载流量,以提高网络的稳定性。

本文融合了 WSN 分簇路由和多 sink 网络架构的思想,提出一种基于能量均衡的多 sink 分簇路由算法(EBMCR)。在簇头选取时,选择剩余能量高的节点竞争簇头,并根据节点到 sink 的距离,构造大小不等的簇,使靠近 sink 节点的簇较小,从而使这些簇头有更多的能量用于数据转发;在簇间数据传输过程中,引入多跳传

输机制,综合考虑路径能量消耗、路径最小剩余能量和节点到多个 sink 的跳数等因素,对路由路径进行评估,选择一条可以将数据包传输到某个 sink 节点的最优路径。该算法可均衡网络能耗,提高网络性能,从而延长网络的生命周期。

2 多 sink 网络结构与能耗模型

多 sink 的 WSN 系统中包括管理节点、多个 sink 节点以及传感器节点,其网络结构如图 1 所示。传感器节点部署在待监测区域,主要负责数据采集和传输;多个 sink 节点负责收集传感器节点的信息,进行汇聚后传给管理节点;管理节点收集并处理数据,然后通过 Internet 将数据传送到用户终端。

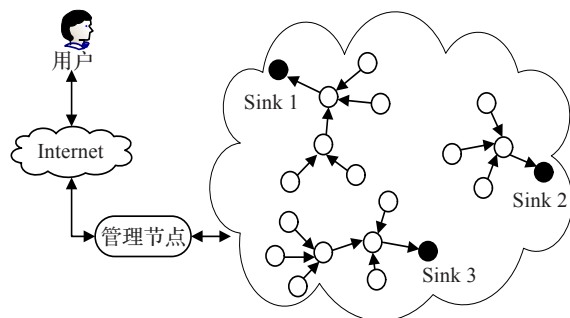


图1 多 sink 网络结构

2.1 无线传感器网络模型

假设传感器节点随机散布在一个正方形区域内,多个 sink 节点固定在监测区域边缘;传感器节点和 sink 节点都是静止不动的;所有传感器节点的能量是有限的, sink 节点的能量是无限的;所有传感器节点都是同构的,且具有位置感知能力;每个节点具有唯一的标识 ID。

用无向图 $G(V, E)$ 来表示传感器网络, V 表示所有节点, E 表示相邻节点路径, V_{sensor} 表示普通传感器节点, V_{sink} 表示 sink 节点。

$$V = V_{\text{sensor}} \cup V_{\text{sink}} \quad (1)$$

$$E = \{(i, j) | i, j \in V_{\text{sensor}}\} \cup \{(i, j) | i \in V_{\text{sensor}}, j \in V_{\text{sink}}\} \quad (2)$$

2.2 通信能耗模型

本文采用与文献[7]相同的无线通信能耗模型。在该模型中,无线通信模块发送数据的能量消耗主要在发送电路和功率放大电路,接收数据的能量消耗主要在接收电路。节点发送数据的能量消耗为:

$$E_{\text{Tx}}(i, j) = \begin{cases} lE_{\text{elect}} + l\xi_{\text{fs}}d_{i,j}^2, & d_{i,j} < d_{\text{thresh}} \\ lE_{\text{elect}} + l\xi_{\text{mp}}d_{i,j}^4, & d_{i,j} \geq d_{\text{thresh}} \end{cases} \quad (3)$$

其中, l 表示发送数据包的长度, E_{elect} 表示每比特数据在发送电路和接收电路消耗的能量, ξ_{fs} 和 ξ_{mp} 分别表示两种模型中功率放大电路能耗系数, $d_{i,j}$ 表示相邻节点 i 到 j 之间的距离, d_{thresh} 为距离阈值。

节点接收数据的能量消耗为:

$$E_{Rx} = lE_{elect} \quad (4)$$

簇头进行本地数据融合时的能量消耗为:

$$E_{Pr} = lE_{DA} \quad (5)$$

其中, E_{DA} 表示融合每比特数据的能量消耗^[18]。

3 EBMCR 算法

EBMCR 是在 LEACH 分簇路由协议的基础上, 融合了多 sink 架构的思想。在 LEACH 的基础上做如下改进:

(1) LEACH 采用的是单 sink 网络架构, EBMCR 采用多 sink 网络架构。

(2) 在簇的建立阶段, LEACH 算法中所有节点均可以平等地竞争簇头; EBMCR 算法中只有能量高于网络平均能量的节点才可以竞争簇头, 并综合考虑了节点的剩余能量级和节点到 sink 的距离等因素, 修正了 LEACH 的阈值选择函数。

(3) 在簇间数据传输过程中, 采用多跳传输方式。

(4) 针对由簇头组成的骨干网络, 综合考虑了路径能量消耗、路径最小剩余能量和节点到多个 sink 的跳数等因素, 对各条路由路径开销进行评估比较, 选出最佳的路由路径。

3.1 基本思想

EBMCR 算法采用“轮”的机制运行, 每轮中分为簇的建立、簇间路由和数据传输。在簇的建立阶段, 传感器节点自组织成簇, 每个簇中均有一个簇头节点, 成簇后, 簇节点只与本簇的簇头节点进行通信。在簇间路由阶段, 簇头节点启动路由发现过程, 组成骨干网络, 然后对网络中多条通向不同 sink 节点的路由路径的开销进行评估比较, 选中评估出的最佳路由路径。在数据传输阶段, 数据传输包括簇内数据传输和簇头与 sink 间的数据传输。每隔一个周期, 整个网络重新进入簇的建立阶段, 然后不断循环, 直到传感器节点能量耗尽。

3.2 簇的建立

首先, sink 节点将自身的位置信息发送给网络区域中的所有传感器节点并请求所有节点的剩余能量信息, 传感器节点接收到该消息后将自身的剩余能量信息发送给离自己最近的 sink 节点, sink 节点对全网的能量进行统计, 计算出网络平均能量。然后进入簇头选举阶段, 在簇头选举时, 类似于 LEACH 算法, 通过制定阈值权限 $T(n)$ 来进行控制信息的发送, 并不对采集的数据进行实际发送。簇头的选举机制是, 网络中所有剩余能量高于网络平均能量的节点随机产生一个 0~1 之间的随机数, 如果这个随机数小于阈值 $T(n)$, 则会被选作簇头。其中 $T(n)$ 的计算方式如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p[r \bmod (1/p)]} \left[g \frac{E}{E_0} + (1 - g) \frac{d_{avg}}{d_k} \right], & n \in C \\ 0, & n \notin C \end{cases} \quad (6)$$

其中, p 表示簇头节点数目占总节点数目的比率, r 表示当前的轮数, C 表示到 $1/p$ 轮中尚未成为簇头的节点集合。 g 表示节点的剩余能量级的控制系数, E 表示节点的剩余能量, E_0 表示节点的初始能量, 因此 E/E_0 表示节点的剩余能量级; $1 - g$ 表示距离因子的控制系数, d_{avg} 表示传感器节点到每个 sink 节点距离的平均值, d_k 表示传感器节点到最近 sink 节点的距离。可以看出, 剩余能量级大的节点当选为簇头的概率大。另外, 距离某个 sink 节点越近的节点当选为簇头的概率越大。这样, 靠近 sink 节点的簇的规模较小, 从而使这些簇头有更多的能量用于簇间多跳数据转发。

簇头选举之后, 进入成簇阶段。簇头节点向全网发送簇头广播信息, 普通节点根据收到的簇头广播信息的信号大小决定要加入哪个簇, 然后向对应的簇头发送入簇请求。簇建立完毕后, 簇头节点采用 TDMA 方法为簇中的每个节点分配向其传送数据的时间片。

3.3 簇间多跳路由

在簇间数据传输过程中, LEACH 协议中的簇头节点与 sink 是通过单跳路由的方式直接通信的, 很容易造成离基站较远的簇头节点因能量消耗过大而很快死亡^[19]。另外, 当节点间长距离通信时, 通过多跳传输数据的方式可以节省能量^[20]。因此, 本文中的 EBMCR 算法, 采用簇间多跳传输的方式。簇间多跳路由算法主要分为三个部分: 路由发现、路由选择和路由维护。

3.3.1 路由发现

首先, 簇头节点和 sink 节点发送 hello 消息进行邻居发现, 若发送节点为簇首节点, 则发送的 hello 消息包括消息类型 (*type*)、节点的 ID、节点位置 (*position*)、节点离多个 sink 的距离 (*sink_dis*)、节点的剩余能量 (*Renergy*) 等信息, 消息的格式为 `hello (type, ID, position, sink_dis, Renergy)`; 若发送节点为 sink 节点, 则发送的 hello 消息包括消息类型 (*type*)、节点的 ID、节点位置 (*position*) 等信息, 消息的格式为 `hello (type, ID, position)`。

然后, 簇头节点接收 hello 消息, 簇头节点接收 hello 消息的处理过程如下。

(1) 簇头节点 V_i 接收到邻居节点 V_j 的 hello 消息。

(2) 判断邻居节点 V_j 是否是 sink 节点, 若是, 则转到步骤(3); 若不是, 则转到步骤(4)。

(3) 将该 sink 节点作为下一跳节点和目的节点, 加入临时路由表, 回复 ACK 消息。

(4) 比较簇头 V_i 和 V_j 到 k 个 sink 的距离 $sink_dis$, 若存在 $sink_dis(k, j) < sink_dis(k, i)$ 则转入步骤(5); 否则, 转入步骤(6)。

(5) 将簇头节点 V_j 作为下一跳节点, 并保存 V_j 的消息, 回复 ACK 消息。

(6) 丢弃簇头节点 V_j 的消息。

重复此过程,直到所有的簇头节点都被发现。这样由源节点到不同 sink 节点的路由路径就建立起来了。

3.3.2 路由选择

假设一个簇头节点经过多跳将数据传输给 sink 节点 k , 则该路径上所经过节点的有序集合为:

$Path=(V_{CH_1}, V_{CH_2}, \dots, V_{sink_k})$ (7)

该路径上的路径能量消耗定义为:

$Cost_p=\sum(Cost_{i,j})$ (8)

其中, $Cost_{i,j}$ 表示两相邻簇头间发送和接收每比特数据的能量消耗, 可根据通信能耗模型的公式(4)和(5)求得, $Cost_p$ 表示该条路径上从源节点到 sink 节点的传输能量消耗总和。

该路径最小剩余能量定义为路径上剩余能量最小的节点剩余能量, 用 E_{rep} 来表示:

$E_{rep}=\min_{i \in p} E_i$ (9)

在选择 sink 节点和路由路径的时候, 可根据具体应用场景考虑多方面的因素。本文主要考虑的因素是路径能量消耗、路径最小剩余能量以及节点到 sink 的跳数。这样在簇头节点要发送信息时, 综合考虑发送的代价, 最终选出一条最佳的路由路径。为此, 定义如下路径综合消耗评价函数:

$f_p=(Cost_p)^\alpha \times (E_{rep})^\beta \times (Hopcount_p)^\gamma$ (10)

其中, $Cost_p$ 表示该条路径上的能量消耗, E_{rep} 表示该条路径上的最小剩余能量, $Hopcount_p$ 表示该条路径上源节点到 sink 的跳数。 α 表示能量消耗系数, 是一个正数; β 表示节点剩余能量系数, 是一个负数; γ 表示节点到 sink 的传输跳数系数, 是一个正数。

因此, 从源簇头节点 V_i 出发, 当有 n 条到达 k 个 sink 节点的路径时, 则到达 sink 节点的最优路径为路径综合消耗评价函数值 f_p 最小的那条路, 该条路对应的 sink 节点为最佳的 sink 节点。簇间多跳路由选择算法可表示为:

$\min_n(f_p(V_i, V_k))$ (11)

从式(10)和(11)可知, 路径中两相邻节点距离越近, 路径上的能量消耗越低, 因此路径综合消耗越小; 路径上节点的剩余能量越高, 路径综合消耗越小; 传输跳数越少, 路径综合消耗越小。因此, 该路由算法选出的是一条路径能量消耗低, 路径上的剩余能量高, 传输跳数少的路由路径, 它可以更好地均衡网络节点的能量, 进而延长网络的生命周期。

该路由选择算法的伪代码为:

- (1) Minfp = fp(V_i, V₁);
- (2) SinkNodeID = V₁;
- (3) for(every path p_k from V_i to sink V_k)
- (4) { if(fp(V_i, V_k) < Minfp)

- (5) { Minfp = fp(V_i, V_k);
- (6) SinkNodeID = V_k;
- (7) end }
- (8) end
- (9) return SinkNodeID;

簇头节点按上述簇间多跳路由选择算法, 选中评估出的最优路由路径, 该路径中的对应 sink 节点为目的节点, 将该路径存入路由表, 以该路径来传输数据。

3.3.3 路由维护

当簇头节点发现自身路由表为空时, 需要进行路由更新, 转入路由发现状态, 然后按簇间多跳路由选择算法, 评估最优路由路径。

3.4 稳定的数据传输阶段

当簇间多跳最优路径确定以后, 整个传感器网络进入稳定的数据传输阶段。为了保证通信的效率和能量效率, 稳定的数据传输阶段要比簇的建立和簇间多跳路由阶段的时间要长。数据传输主要分为簇内数据传输和簇间数据传输, 每一轮中的数据传输流程如图2所示。

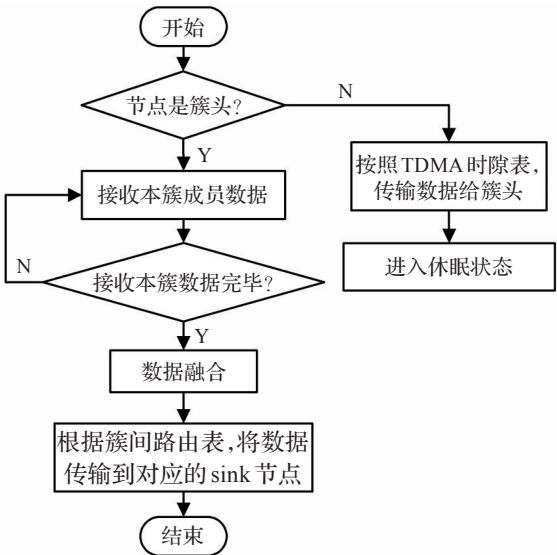


图2 每一轮中的数据传输流程

详细过程为: 簇成员节点根据簇头为它们制定好的 TDMA 时隙表, 在规定的时隙内将采集的数据发送给本簇簇头。在没有数据传输时, 各个簇成员节点将会关闭数据传送模块, 进入休眠状态, 达到节能的效果。簇头节点一直保持活跃状态, 将收集到的本簇成员的数据先进行数据融合, 然后按照簇间路由表, 将数据传送给相应的 sink 节点。

数据经过一段时间传输之后, 网络将进入下一轮, 重新建簇, 如此周期性地循环, 直到传感器节点的能量耗尽。

4 仿真实验

4.1 仿真环境及参数设置

为验证本文提出的路由算法, 利用 Matlab 仿真平台

对算法的性能进行了评估。假设在 200 m×200 m 的区域内,随机部署了 100 个传感器节点。实验将本文中的 EBMCR 多 sink 路由算法与 EMCA 多 sink 路由算法^[13]、PBR 多 sink 路由算法^[11]、LEACH^[7]算法进行了比较。实验参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验参数

参数	取值
网络分布范围/m	(0,0)到(200,200)
sink 节点位置/m	(0,0),(0,200),(200,200),(200,0)
节点数	100
各节点初始能量/J	0.5
数据包长度/bit	6 400
控制包长度/bit	200
$E_{\text{elect}}/(nJ \cdot \text{bit}^{-1})$	50
$\xi_{\text{ls}}/(\text{pJ} \cdot (\text{bit} \cdot \text{m}^2)^{-1})$	10
$\xi_{\text{mp}}/(\text{pJ} \cdot (\text{bit} \cdot \text{m}^4)^{-1})$	0.001 3
α	2
β	5
γ	2

4.2 实验结果与对比

将本文中的 EBMCR 算法与 EMCA 算法、PBR 算法、LEACH 算法的网络生命周期和网络剩余能量进行对比,结果如图 3 和图 4 所示。

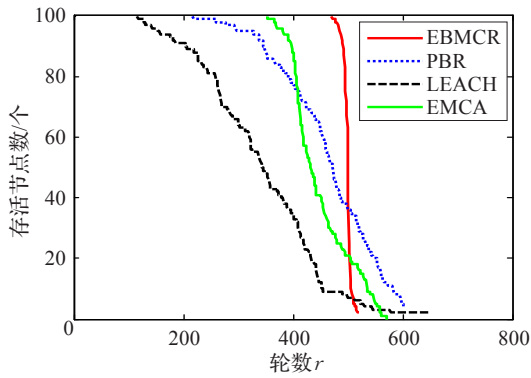


图 3 不同算法网络生命周期对比

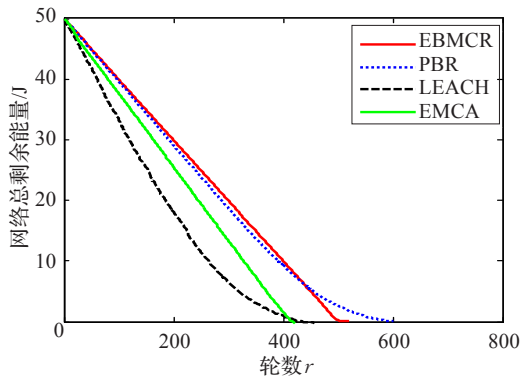


图 4 不同算法网络总剩余能量对比

由图 3 可知,EBMCR 算法的网络生命周期长于其他三种算法。LEACH、PBR、EMCA 和 EBMCR 算法的

第一个节点死亡时间分别是第 126 轮、218 轮、353 轮和 471 轮,网络中一半的节点死亡时间分别是 344 轮、479 轮、432 轮和 498 轮。由此可以看出,在网络生命周期上 EBMCR 明显优于 EMCA、PBR 和 LEACH。从图 3 中还可以看出 EBMCR 算法中,当第一个节点死亡以后,整个网络死亡速度很快。这是因为当第一个节点死亡的时候,所有节点均处于低能量状态,网络死亡速度很快,说明 EBMCR 算法可以更好地均衡节点的能耗。

由图 4 可以看出,EBMCR 算法和 PBR 算法的网络剩余能量高于 LEACH 和 EMCA 算法,这是因为 LEACH 和 EMCA 算法中,簇头节点与 sink 节点一跳通信,可能会导致距离 sink 远的节点能量消耗过快,因此导致整个网络能量消耗过快。另外由图 4 还可以看出,在网络节点数目死亡一半之前,EBMCR 算法在每轮中节点的剩余能量略大于 PBR 算法。这是因为 EBMCR 算法一方面减少了簇头竞争过程中产生的能耗,另一方面,在簇间多跳路径选择的过程中综合考虑了路径能量消耗、路径最小剩余能量和传感器节点到 sink 节点的跳数等因素,均衡了网络能耗。

将 EBMCR 算法在 sink 节点的数量分别为 1 和 4 时的网络生命周期和网络节点的剩余能量进行对比,如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可以看出,多 sink 下网络生命周期明显长于单 sink 下的网络生命周期,多 sink 下的每轮中节点的剩余能量大于单 sink 的能量。这是因为多 sink 可以减少传感器节点到达 sink 的跳数,从而减少了节点转发数据包的能量消耗,延长了网络的生命周期。

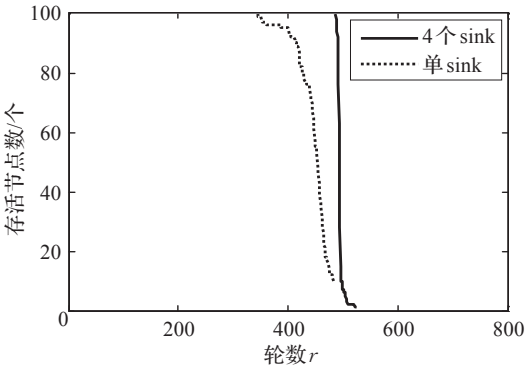


图 5 不同 sink 节点的网络生命周期对比

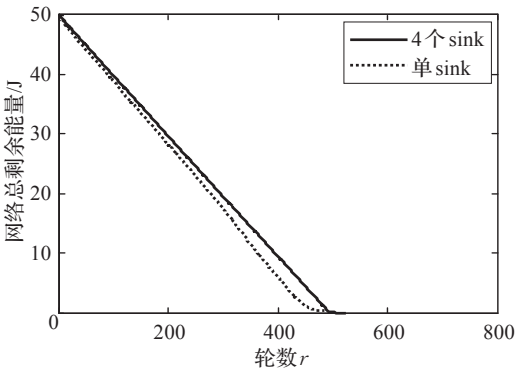


图 6 不同 sink 节点的网络总剩余能量对比

5 结束语

本文以WSN路由算法为研究点,针对传感器节点能量有限以及节点能耗不均衡的问题,提出了基于能量均衡的多sink分簇路由算法,分别在簇首选择方面和簇间多跳路由方面进行了改进。实验结果表明,该算法能够有效地均衡网络能耗,延长网络生命周期。

对多sink的WSN来说,sink节点的个数以及sink节点部署的位置对于网络的生命周期也有着较大的影响,本文目前只是假设部署4个sink节点在网络区域边界进行的仿真实验,下一步的工作将在此基础上进一步研究sink节点的个数以及部署的位置对网络生命周期的影响。

参考文献:

- [1] Akkaya K, Younis M. A survey of routing protocols for wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 325-349.
- [2] Borges L M, Velez F J, Lebres A S. Survey on the characterization and classification of wireless sensor networks applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4): 1860-1890.
- [3] Jeon J H, Byun H J, Lim J T. Joint contention and sleep control for lifetime maximization in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(2): 269-272.
- [4] 姚光顺, 温卫敏, 张永定, 等. 改进的无线传感器网络簇首选择策略及其路由算法[J]. *计算机应用*, 2013, 33(4): 908-911.
- [5] 王瑞锦, 秦志光, 王佳昊. 无线传感器网络分簇路由协议分析[J]. *电子科技大学学报*, 2013, 42(3): 400-405.
- [6] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//*Proc of Hawaii International Conference on System Sciences*. San Francisco: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [7] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]//*Proc of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*. New York: ACM Press, 2001: 304-309.
- [8] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems[C]//*Proc of IEEE Aerospace Conference*. San Francisco: IEEE Computer Society, 2002: 1-6.
- [9] 袁甜甜, 徐敬东, 张建忠. 基于模糊综合评判的多sink最优路由算法[J]. *计算机工程*, 2012, 38(7): 73-76.
- [10] Chen Y Q, Chan E, Han S. Energy efficient multi-path routing in large scale sensor networks with multiple sink nodes[C]//*Proc of the 6th International Workshop on Advanced Parallel Processing Techniques*. Berlin: Springer, 2005: 390-399.
- [11] Meng M, Wu X L, Xu H, et al. Energy efficient routing in multiple sink sensor networks[C]//*Computational Science and Its Applications*, 2007: 561-566.
- [12] Yoo H, Shim M, Kim D. A scalable multi-sink gradient-based routing protocol for traffic load balancing[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011(1): 1-16.
- [13] Xu Z Y, Yin Y, Wang J, et al. An energy-efficient clustering algorithm in wireless sensor networks with multiple sinks[J]. *Int J Control and Automation*, 2012, 5(4): 131-142.
- [14] Gu Q, Zuo H, Su R, et al. A rank table based routing method for multi-sink zigbee wireless sensor network[J]. *Journal of Communications*, 2013, 8(8): 853-859.
- [15] Lin H, Uster H. Exact and heuristic algorithms for data-gathering cluster-based wireless sensor network design problem[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2014, 22(3): 903-916.
- [16] Boler C, Yenduri S. Resilient multi sink networks using simplistic hop based routing[C]//*2014 11th International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG)*, 2014: 192-195.
- [17] Iova O, Theoleyre F, Noel T. Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 29: 45-62.
- [18] 吕红芳, 张浩. 链首节点轮换的无线传感器网络路由算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(7): 610-616.
- [19] 王林, 赵绍英. 无线传感器网络LEACH路由协议的研究与改进[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(2): 80-82.
- [20] 林元乖. 能量高效的无线传感器网络分簇路由算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(4): 1529-1532.