

能耗均衡和可靠的无线传感器网络分簇算法

乐俊, 张维明, 肖卫东, 汤大权, 唐九阳

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了解决热区问题和单点失效问题, 提出了一种新的无线传感器网络分簇算法。算法将网络划分为非均匀的栅格, 每个栅格的节点分别构成一个簇, 根据节点失效概率确定栅格簇首的数目, 并由栅格的多个簇首协作完成该栅格节点的数据收集。算法通过调整各个栅格中可参与簇首轮换的节点数目, 从长远均衡节点之间的能耗。通过建立包含多个簇首的簇, 算法降低了簇成员对单个簇首的依赖性。此外, 算法还采取了一些降低能耗的措施。实验结果表明, 该算法能够达到较高的能耗均衡程度和数据收集可靠性, 并可以延长网络的生命周期。

关键词: 无线传感器网络; 分簇; 能耗均衡; 可靠性; 数据收集

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0090-07

Energy dissipation balanced and reliable clustering algorithm for wireless sensor networks

YUE Jun, ZHANG Wei-ming, XIAO Wei-dong, TANG Da-quan, TANG Jiu-yang

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A novel clustering algorithm for wireless sensor networks was proposed to resolve the hot spot problem and the single failure problem. The algorithm divided the network into unequal grids, and the nodes in the same grid form a cluster. The number of cluster heads in each grid was determined according to the failure probability of nodes, and the data collection of nodes in a grid was implemented by multiple cluster heads of the grid cooperatively. By adjusting the number of nodes that could participate in cluster head rotation of each grid, the algorithm was able to balance the energy dissipation of nodes on a long view. The algorithm reduced the reliance of cluster members to single cluster head by forming cluster with multiple cluster heads. Furthermore, the algorithm adopted some measures to diminish energy consumption. Simulation results show that the algorithm has higher balanced extent of energy dissipation and reliability of data collection, and prolongs the lifetime of network.

Key words: wireless sensor networks; clustering; balanced energy dissipation; reliability; data collection

1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor networks)能够通过各种微型、廉价、具备有限处理和计算资源的传感器, 协作地监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息, 在进行适当的处理之后, 这些信

息通过无线方式经过多跳转发至用户终端, 从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通^[1,2]。

数据收集是 WSN 的一项基本工作。在实现数据收集的诸多方法之中, 分簇算法因为具有简单、灵活、易扩展和易于实现数据融合等特点, 成为

收稿日期: 2012-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903225); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114307110008)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60903225); The Universities Specialized Research Foundation for the Doctoral Program (20114307110008)

WSN 数据收集算法研究的重点。分簇算法将所有节点划分成若干个簇, 簇中的节点分为簇成员和簇首 2 类, 簇成员将数据发送至簇首, 簇首则将收集的数据进行融合处理后发送至基站^[3]。

在使用分簇算法进行数据收集的 WSN 中, 很容易出现热区问题和单点失效问题, 继而会缩短网络的生命周期和降低数据收集的可靠性。本文提出一种能耗均衡和可靠的分簇 (EDBRC, energy dissipation balanced and reliable clustering) 算法, 期望在提高节点能耗均衡程度和数据收集可靠性的同时, 延长网络的生命周期。

2 基础模型

算法的网络模型假定部署区域是一个长为 L 、宽为 W 的矩形区域, 基站位于部署区域之外的某个位置, N 个同构节点随机均匀地分布在部署区域内, 基站和节点的位置固定且位置可知, 每个节点都有唯一的整型 ID, 节点能够根据通信距离调整发射功率, 簇首采用单跳的方式向基站发送数据。

算法的能耗模型与同类算法相同, 统计节点发送、接收和融合数据的能耗。节点发送和接收长度为 l 比特数据的能耗计算公式分别为

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

其中, d 是数据发送距离, E_{elec} 是无线收发电路发送或接收单位长度数据的电路能耗, d_0 是传输模型阈值, 数据发送距离小于 d_0 时, 采用自由空间模型, 否则, 采用多路径衰减模型, ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 是自由空间模型和多路径衰减模型的放大器能耗。用 E_{DA} 表示融合单位长度数据的能耗, 则节点融合 p 个长度均为 l 比特数据的能耗为

$$E_A(p, l) = plE_{DA} \quad (3)$$

3 问题说明

在使用分簇算法进行数据收集时, 簇首既要接收和融合本簇所有节点的数据, 又要将数据发送至基站, 而簇成员只需要向簇首发送数据, 所以, 簇首消耗的能量通常比簇成员多。此外, 对于不同的簇首, 簇成员数目及与基站的距离都可能不同, 它们在接收、融合和发送数据时所消耗的能量也存在差异。节点之间能耗不均衡的现象会导致网络中某

些节点的能耗进度较快, 文献[4]称之为热区问题。热区问题会使某些节点过早失效, 网络因此而出现感知空洞, 从而缩短网络的生命周期。

另外, 受成本等因素的限制, 单个传感器的可靠性原本就不高, 再加上 WSN 往往被部署在灾区、森林等地域中, 网络的运行环境比较恶劣, 所以, 节点很容易由于各种原因而失效。在使用分簇算法实现数据收集时, 簇首是联系基站和簇成员的纽带, 如果某个簇首失效, 则相关簇成员的数据就可能无法收集, 从而出现单点失效问题, 影响数据收集的可靠性。

4 相关工作

LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)^[5,6]是较早的 WSN 分簇算法。它将操作分割为轮, 每轮首先随机选择簇首, 然后建立簇, 最后进行数据的收集。该算法既没有考虑簇首之间的能耗不均衡问题, 也无法很好地解决单点失效问题。

为了均衡节点之间的能耗, 学术界先后提出了均匀分簇算法和非均匀分簇算法 2 种解决方案。

均匀分簇算法每轮构建大小接近的簇, 这样, 每个簇首接收和融合数据所消耗的能量就比较接近。实现均匀分簇的方法主要包括优化分簇和固定分簇 2 种。HEED(hybrid energy-efficient distributed clustering)^[7]是前者的代表, 它参考节点与邻居节点的邻近性或节点的度构建均匀的簇。文献[8]提出的算法是后者的代表, 它将网络划分为大小相等的区域, 由每个区域内的节点分别构成一个簇, 每轮只从簇中重新选择簇首而不改变簇的组成。

文献[4]首次提出使用非均匀分簇的方法解决热区问题。该类算法综合考虑簇首接收、融合和发送数据的能耗, 根据簇首与基站的距离确定簇首所在簇的大小。对于采取簇首单跳方式的 WSN, 距离基站较远的簇首, 使其所在的簇较小, 这样, 该簇首在接收和融合数据时能够消耗较少的能量, 从而为发送数据预留更多的能量。非均匀分簇算法的代表是 EECS(energy efficient clustering scheme)^[9,10]和 DEEUC(distributed energy-efficient unequal clustering)^[11]算法。EECS 算法首先随机地选择一些节点作为候选簇首, 然后, 每个候选簇首以相同的半径广播竞争消息并依据剩余能量竞争簇首, 最后, 每个普通节点根据自己与簇首之间的距离以及

簇首与基站之间的距离选择合适的簇首加入簇。DEEUC 算法在随机选择候选簇首时引入平衡能量因子, 然后采用与 EECS 算法类似的簇首竞争方法从候选簇首中选择簇首, 所不同的是, 候选簇首发送竞争消息的半径需要根据其与基站之间的距离确定, 最后, 普通节点选择使能量消耗率函数最小的簇首加入簇。

非均匀分簇算法能够在更大程度上均衡能耗, 是解决热区问题的较好方案, 但是现有的非均匀分簇算法还存在一定的不足。首先, 它们需要先选择候选簇首, 再由候选簇首竞争产生簇首, 增加了能量开销。其次, 它们没有在簇首轮换策略中考虑簇首的分布, 每轮簇首的数目以及簇首在网络中的分布都是随机的, 影响了均衡能耗的效果。

在数据收集可靠性方面, 减少簇成员对单个簇首的依赖是解决单点失效问题的有效手段。具有代表性的研究成果主要包括 REED(robust energy efficient distributed clustering)^[12,13]、O-LEACH(overlapping LEACH)^[14] 和 DED(distributed, energy-efficient, and dual-homed clustering)^[15] 算法。

REED 算法将网络虚拟成多层覆盖网, 每层覆盖网都包括所有节点, 每轮分别在各层覆盖网中进行簇首的选择和簇的构建, 并使各层覆盖网的簇首都不相同。O-LEACH 算法是 LEACH 算法的改进版本, 每个普通节点先选择接收信号强度最大的簇首作为主簇首, 再以主簇首接收信号强度的 $X\%$ 为标准, 选择接受信号强度大于该标准的簇首, 最后同时加入所有已选簇首的簇。DED 算法则是在分簇完成之后, 由每个簇成员从邻近节点中选择一个节点作为备份, 该备份节点可以是其他簇的簇首也可以是簇成员。

上述 3 种算法分别代表了现有解决方案的几种思路, 却也存在一定的缺陷。REED 和 O-LEACH 算法都采取多簇首策略, 不同之处在于, 前者增加了簇首数目, 而后者没有。多簇首策略使簇成员同时隶属于多个簇首, 在某个簇首失效时, 簇成员可以将数据发送至其他簇首, 可以提高数据收集的可靠性。但是, REED 算法需要在每一层覆盖网中都进行分簇, 增加了能量开销, 而 O-LEACH 算法不能预先确定每个簇成员的簇首数目, 使得该算法在提高数据收集可靠性方面存在不确定性。DED 算法采取备份策略, 如果簇成员的簇首失效, 它可以将数据发送至备份节点, 但是, 如果备份节

点也是簇成员, 则它的数据在到达簇首前需要被转发的次数就会增加, 数据成功到达簇首的概率就会随之降低。

5 算法设计

EDBRC 算法首先采用非均匀固定分簇策略, 将网络划分为若干个矩形栅格, 并使距离基站越远的栅格也越大, 再由各个栅格的节点分别构成一个簇。然后采用多簇首策略, 根据节点失效概率确定栅格预期簇首的数目, 再参考节点的剩余能量选择栅格的簇首, 并确定栅格簇首的优先级顺序。最后在数据收集时采用多簇首接收单簇首转发策略, 每个簇成员通过组播的方式向所属栅格的所有簇首发送数据, 簇首也向所属栅格的其他簇首发送数据, 簇首对收集的数据进行融合处理后, 与所属栅格的其他簇首协作地向基站发送数据, 并保证每个栅格至多只有一个簇首向基站发送数据。

EDBRC 算法每轮包括一个设置阶段和一个稳定阶段, 并在首轮开始之前设有一个初始化阶段。

5.1 初始化阶段

初始化阶段首先确定预期簇首数目和划分栅格, 然后由基站广播相关信息, 最后由各个节点确定自己所属的栅格。

算法假设节点的失效是完全随机的, 每轮中每个节点的失效概率都相同, 失效概率可以根据具体的应用情况, 通过先验知识获得。设节点失效概率为 P , 每个栅格预期簇首数目为 K , 则每个栅格正常工作的簇首数目的期望值为 $(1-P)K$, 为了提高数据收集的可靠性, 应当使该期望值不小于 1, 因此, K 的取值范围为

$$K \geq 1/(1-P) \quad (4)$$

不失一般性地, 假设在二维坐标系中, 部署区域的横边与横坐标轴平行, 基站位于部署区域沿纵坐标轴的上方, 坐标为 (BS_x, BS_y) , 将矩形的横边作为长边、纵边作为宽边, 将部署区域的左下角顶点作为部署区域的起始点, 并设其坐标为 (O_x, O_y) 。

在划分栅格时, 首先, 沿横坐标轴方向将部署区域划分为 S 个“泳道”, 长度均为 M 。各个“泳道”的 ID 为一组从 1 到 S 的连续整数, 从左到右依次递增。接着, 沿纵坐标轴方向分别将每个“泳道”划分为若干个栅格, 并为每个栅格分配一个级

别。每个“泳道”中栅格的级别都是一组从 1 开始的连续整数, 由下到上依次递增, 第 1 级为最高级。栅格的 ID 用二元组 (i, j) 表示, 其中, i 是栅格所在“泳道”的 ID, j 是栅格的级别。

每个栅格的长度与“泳道”的长度相等, 每个“泳道”中栅格的个数和各个栅格的宽度同“泳道”与基站的距离以及栅格的级别相关。对于不同的“泳道”, 距离基站越远, “泳道”内的栅格就越少, 对于同一个“泳道”中的不同栅格, 栅格的级别越高, 栅格的宽度就越大, 这样, 就能够根据栅格与基站的距离设置栅格的大小, 使得栅格距离基站越远, 栅格就越大, 栅格的节点也越多。定义一个包含 S 个元素的数组 A , 其第 k 个元素 a_k 表示“泳道” k 中栅格的个数。再定义 S 个数组, 分别代表各个“泳道”中所有栅格的宽度, 第 v 个数组 H_v 代表“泳道” v 中所有栅格的宽度, H_v 的第 w 个元素 h_{vw} 是栅格 (v, w) 的宽度, 该栅格的覆盖范围为

$$Ox + (v-1)M < x \leq Ox + vM \quad (5)$$

$$Oy + \sum_{k=1}^{k \leq w-1} h_{vk} < y \leq Oy + \sum_{k=1}^{k \leq w} h_{vk} \quad (6)$$

为了提高数据收集可靠性, 应尽量使每个栅格预期分布的节点数目多于预期簇首数目, 也就是说, 对于栅格 (v, w) , 其长度 M 和宽度 h_{vw} 应尽量满足如下条件

$$\frac{Mh_{vw}}{LW} N \geq K \quad (7)$$

在完成上述 2 项工作之后, 由基站向所有节点广播 $BS_MSG(K, (Ox, Oy), (BSx, BSy), M, A, H_1, \dots, H_S)$ 消息。最后, 每个节点根据该消息中的信息和自己的位置坐标 (x, y) 计算所属栅格 ID (v, w) , 计算方法如图 1 所示。

```

输入:  $x, y, Ox, Oy, M, A, H_1, \dots, H_S$ ;
输出:  $v, w$ ;
过程:
 $v \leftarrow \lceil (x - Ox) / M \rceil$ 
 $u \leftarrow y - Oy$ 
 $n \leftarrow 1$ 
While  $n \leq av$ 
    if  $u \leq \sum_{k=1}^{k \leq n} h_{vk}$ 
         $w \leftarrow n$ 
        Break
    End if
     $n \leftarrow n + 1$ 
End while

```

图 1 节点计算所属栅格 ID 的方法

5.2 设置阶段

初始化阶段完成之后, 网络便可以开始按轮运行, 每轮首先进入设置阶段。首轮和非首轮(首轮之外的其他轮)的设置阶段有所不同。

在首轮中, 首先, 每个节点通过组播的方式向本栅格的其他节点发送节点信息消息, 消息中包括节点 ID、位置坐标、所属栅格 ID 和剩余能量等信息。为了节约能量, 每个节点的消息只需要覆盖所属栅格即可。为此, 节点计算自己与所属栅格 4 个顶点距离的最大值 Dt , 并以此为标准确定消息的传输距离。位置坐标为 (x, y) 、所属栅格 ID 为 (v, w) 的节点计算 Dt 的方法如图 2 所示。

```

输入:  $x, y, v, w, Ox, Oy, M, H_v$ ;
输出:  $Dt$ ;
过程:
 $(Ax, Ay) \leftarrow ((v-1)M + Ox, \sum_{k=1}^{k \leq w-1} h_{vk} + Oy)$ 
 $(Bx, By) \leftarrow (vM + Ox, \sum_{k=1}^{k \leq w-1} h_{vk} + Oy)$ 
 $(Cx, Cy) \leftarrow (vM + Ox, \sum_{k=1}^{k \leq w-1} h_{vk} + Oy)$ 
 $(Dx, Dy) \leftarrow ((v-1)M + Ox, \sum_{k=1}^{k \leq w} h_{vk} + Oy)$ 
 $DA \leftarrow \sqrt{(x - Ax)^2 + (y - Ay)^2}$ 
 $DB \leftarrow \sqrt{(x - Bx)^2 + (y - By)^2}$ 
 $DC \leftarrow \sqrt{(x - Cx)^2 + (y - Cy)^2}$ 
 $DD \leftarrow \sqrt{(x - Dx)^2 + (y - Dy)^2}$ 
 $Dt \leftarrow \text{MAX}(DA, DB, DC, DD)$ 

```

图 2 节点计算 Dt 的方法

节点接收消息中栅格 ID 和所属栅格 ID 相同的消息。这样, 节点就能够收集所属栅格其他节点的信息, 然后就可以据此选择所属栅格的簇首。

在选择簇首时, 首先, 节点根据所属栅格的节点信息, 按照剩余能量从大到小对节点进行排序, 如果出现多个节点剩余能量相同的情况, 则按照节点 ID 从大到小确定它们的顺序。然后, 节点选择排序靠前的 K 个节点作为栅格的簇首, 如果不足 K 个节点, 则将全部节点都作为簇首。接着, 节点检查自己是否包括在这些簇首之中, 如果是, 则节点将自己设置为簇首, 否则, 节点就将自己设置为簇成员。最后, 每个簇首根据排序位置确定自己的优先级, 排序越靠前, 簇首的优先级就越高。

簇首选择完成之后, 各簇首按照与 LEACH 算法相同的方式为本栅格所有节点分配通信时隙。各个栅格的簇首按照优先级顺序, 通过组播的方式向本栅格的其他节点发送通信时隙消息。如果簇首已经收到本栅格优先级较高簇首发送的通信时隙消息, 则该簇首放弃发送通信时隙消息, 从而避免重复发送。同样地, 簇首的通信时隙消息也只需要覆盖所属栅格即可。各个节点接收通信时隙消息并保存相关信息。

为了完成非首轮设置阶段的工作, 在每一轮稳定阶段最后一次数据收集时, 需要每个节点将自己的剩余能量等信息通过捎带的方式附加在数据消息中发送至簇首, 簇首也采用相同的方式将所收集的节点信息发送至基站。在非首轮的设置阶段, 首先由基站向所有节点广播其在上一轮最后一次数据收集时所收集的各个栅格的节点信息。节点从消息中获取和保存本栅格的节点信息后, 需要检查自己的信息是否包含在其中, 如果没有, 则节点采取与首轮设置阶段相同的方法向所属栅格的其他节点发送自己的节点信息。这样, 每个节点就能够收集到所属栅格其他节点的信息, 然后, 按照与首轮设置阶段相同的方法选择簇首、确定簇首的优先级、分配通信时隙和发送通信时隙消息。

5.3 稳定阶段

每轮的稳定阶段执行数据收集任务, 并可以根据需求进行多次数据收集。首先, 簇成员在自己的通信时隙内通过组播的方式向所属栅格的所有簇首发送数据消息, 簇首则在自己的通信时隙内向所属栅格的其他所有簇首发送数据消息。然后, 簇首将接收的数据和自己的数据进行融合处理。最后, 各个栅格的簇首按照优先级顺序向基站发送数据消息, 在该过程中, 栅格的每个簇首都处于监听状态, 在经过特定的时间之后, 如果簇首没有监听到

优先级较高簇首向基站发送消息, 则该簇首向基站发送消息, 否则, 该簇首放弃发送操作。

如果进行到本轮最后一次数据收集, 每个节点将自己的剩余能量等信息通过捎带的方式附加在数据消息中发送至簇首, 簇首也通过捎带的方式将收集的节点信息附加在数据消息中发送至基站。

6 算法分析

在能耗均衡方面, EDBRC 算法与现有的非均匀分簇算法的思路有所不同。它采用非均匀固定分簇策略, 使得距离基站越远的栅格也越大, 单单就某一轮来看, 距离基站越远, 栅格的节点就越多, 簇就越大, 簇首接收、融合和发送数据的能耗都会越大, 算法加剧了簇首之间的能耗不均衡。但是, 距离基站越远的栅格中可参与簇首轮换的节点也越多, 将有更多的节点分担簇首的能量负载, 从长远来看, 算法可以均衡节点之间的能耗。如果栅格大小设置得当, 算法可以达到较高的能耗均衡程度。

在数据收集可靠性方面, EDBRC 算法采用多簇首策略, 在节点失效的情况下, 每个栅格都会选出多个簇首, 每个簇成员同时隶属于多个簇首, 每个簇首也隶属于栅格的其他簇首。只要某个栅格有正常工作的簇首, 该栅格所有正常工作节点的数据就都可以成功收集, 有助于提高数据收集的可靠性。

在能量使用效率方面, 首先, 算法采用固定分簇方法, 降低了分簇过程中的能耗。其次, 算法使距离基站较远的区域内分布较少的簇首, 减少了需要远距离发送数据的簇首。再次, 算法采用捎带的方式将选择簇首所需的节点信息附加在数据消息中传输, 并由基站广播节点信息, 降低了选择簇首所需的能耗。此外, 各个栅格的簇首根据优先级向栅格的节点发送通信时隙消息和向基站发送数据消息, 避免了重复发送。最后, 算法将消息的发送距离和接收节点都限定在适当的范围之内, 也能够降低能量开销。

7 仿真实验

文献[11]已经通过实验证明 DEEUC 算法具有比 EECS 算法更高的能耗均衡性, 而文献[15]的实验结果表明 DED 算法的数据收集可靠性要低于 REED 算法, 因此, 本文选择 DEEUC、REED 和 O-LEACH 算法作为 EDBRC 算法的对比算法, 在 MATLAB 平台上进行仿真实验。

由于 DEEUC 算法的网络模型设定网络部署区域是正方形，而且其参数的设置都以此为前提，所以，仿真实验将网络部署区域设置为一个边长为 200m 的正方形。EDBRC 算法的网络划分参数设置为： $S=4$ 、 $M=50m$ 、 $A=\{3,4,4,3\}$ 、 $H_1=H_4=\{100m,70m,30m\}$ 、 $H_2=H_3=\{80m,60m,40m,20m\}$ 。每个节点的初始能量为 0.5J，控制消息和数据消息的长度分别为 800bit 和 1 600bit，网络在每轮的稳定阶段进行一次数据收集。其他实验参数如表 1 所示。

在不考虑节点失效的情况下，将 EDBRC 算法与 DEEUC 算法进行对比，以评估算法的能耗均衡性能。实验中，DEEUC 算法的预期簇首数目与 EDBRC 算法的栅格数目相等，并调节 DEEUC 算法的参数设置使其达到较好的性能。实验结果显示，DEEUC 算法的第一个节点死亡轮数(FND)和最后一个节点死亡轮数(LND)分别为 494 和 679，而 EDBRC 算法的分别为 956 和 1 223，EDBRC 算法比 DEEUC 算法分别延长了 93.52%和 80.12%。

表 1 其他仿真实验参数的设置

参数	取值
网络部署区域起始点坐标	(0,0)
基站位置坐标	(100m,250m)
节点数目	400
传输模型阈值	86.2m
无线收发电路能耗	50nJ/bit
自由空间模型放大器能耗	10pJ/bit·m ⁻²
多路径衰减模型放大器能耗	0.001 3pJ/bit·m ⁻⁴
融合单位长度数据能耗	5nJ/bit

从第一个节点死亡到最后一个节点死亡的时间间隔在网络延续时间中所占的比例越小，网络的能耗就越均衡。因此，本文给出一个能耗均衡程度指标—BEED，其计算公式为

$$BEED = (LND - FND) / LND \quad (8)$$

BEED 的值越小，算法的能耗均衡程度就越高。按照式(8)，DEEUC 和 EDBRC 算法的 BEED 分别为 0.272 和 0.218，从而说明，EDBRC 算法可以达到比 DEEUC 算法更高的能耗均衡程度。

在考虑节点失效的情况下，将 EDBRC 算法与 REED、O-LEACH 算法进行对比，以评估算法的数据收集可靠性。实验中，将 EDBRC 算法的栅格预

期簇首数目 K 设置为 $\lceil 1/(1-P) \rceil$ ，REED 算法每层覆盖网每轮预期选择簇首数目和 O-LEACH 算法每轮预期选择簇首数目都与 EDBRC 算法的栅格数目相等，REED 算法的覆盖网为 K 层，O-LEACH 算法的参数 X 设置为 50。

将那些自身没有失效，但是因为其他节点失效而无法对其数据进行收集的节点称为连带失效节点。在节点失效概率相等的情况下，连带失效节点越少，就说明算法的数据收集可靠性越高。统计不同节点失效概率下，各个算法在出现死亡节点之前每轮连带失效节点的平均数，如图 3 所示。可以看出，EDBRC 算法的连带失效节点平均数与 REED 算法相互接近，并在大多数情况下都少于 O-LEACH 算法。从而表明，在数据收集可靠性方面，EDBRC 算法的性能与 REED 算法不相上下，并在总体上优于 O-LEACH 算法。

另外，在节点失效概率取值不同的情况下，REED、O-LEACH 和 EDBRC 算法出现第一个死亡节点的轮数分别如图 4 所示。很显然，相较于 REED 和 O-LEACH 算法，EDBRC 算法显著延长了网络的生命周期。

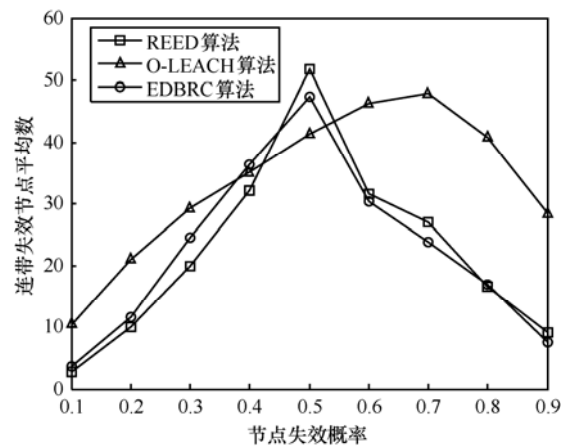


图 3 各算法的连带失效节点平均数

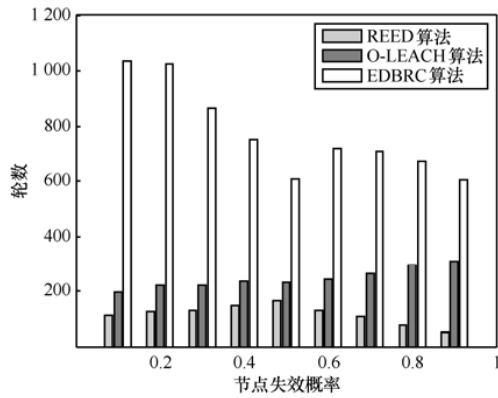


图 4 各算法出现第一个死亡节点的轮数

8 结束语

本文为了解决使用分簇算法实现 WSN 数据收集时所面临的热区问题和单点失效问题，提出了 EDBRC 算法，仿真实验结果表明，EDBRC 算法的能耗均衡程度比 DEEUC 算法更高，其数据收集可靠性与 REED 算法相近并优于 O-LEACH 算法，另外，相较于这 3 种算法，EDBRC 算法可以显著延长网络的生命周期。下一步将通过定量分析的方法确定栅格划分的标准，以优化算法的性能。

参考文献:

[1] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 41(1):163-174.
 CUI L, JU H L, MIAO Y. Overview of wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 41(1): 163-174.

[2] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12):2292-2330.

[3] ABBASI A A, YOUNIS M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(14-15): 2826-2841.

[4] SORO S, HEINZELMAN W R. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[A]. Proceedings of Parallel and Distributed Processing Symposium[C]. Denver, USA, 2005. 1-8.

[5] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. Proceedings of International Conference on System Sciences[C]. Hawaii, USA, 2000. 3005-3014.

[6] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670.

[7] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4):366-379.

[8] AI-KARAKI J, UL-MUSTAFA R, KAMAL A. Data aggregation in wireless sensor networks-exact and approximate algorithms[A]. Proceedings of Workshop on High Performance Switching and Routing [C]. Phoenix, USA, 2004. 241-245.

[9] YE M, LI C F, CHEN G H. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2006, 3(2): 99-119.

[10] 陈贵海, 李成法, 叶懋. EECS: 一种无线传感器网络中节能的聚类方案[J]. 计算机科学与探索, 2007, 1(2):170-179.
 CHEN G H, LI C F, YE M. EECS: an energy-efficient clustering scheme in wireless sensor networks[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2007, 1(2):170-179.

[11] 尚凤军, ABOLHASAN M, WYSOCKI T. 无线传感器网络的分布式能量有效非均匀成簇算法[J]. 通信学报, 2009, 30(10):34-43.
 SHANG F J, ABOLHASAN M, WYSOCKI T. Distributed energy efficient unequal clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2009, 30(10):34-43.

[12] YOUNIS O, FAHMY S, SANTI P. Robust communications for sensor networks in hostile environments[A]. Proceedings of International Workshop on Quality of Service[C]. Montreal, Canada, 2004.10-19.

[13] YOUNIS O, FAHMY S, SANTI P. An architecture for robust sensor network communications[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2005, 1(3/4):305-327.

[14] SUHARJONO A, WIRAWAN, HENDRANTORO G. Dynamic overlapping clustering algorithm for wireless sensor networks[A]. Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Informatics[C]. Bandung, Indonesia, 2011.1-6.

[15] MOHAMMAD M H, JASON P J. Survivable self-organization for prolonged lifetime in wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2011, 2011(2011):1-11.

作者简介:



乐俊 (1984-), 男, 湖北广水人, 国防科技大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



张维明 (1962-), 男, 安徽合肥人, 博士, 国防科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、信息系统与智能决策技术等。



肖卫东 (1968-), 男, 湖南长沙人, 博士, 国防科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、指挥信息系统等。



汤大权 (1971-), 男, 天津人, 博士, 国防科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、信息资源管理等。



唐九阳 (1978-), 男, 湖南邵东人, 博士, 国防科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、P2P 网络等。