

一种能量高效和均衡的无线传感器网络分簇数据融合算法*

乐俊, 张维明, 肖卫东, 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:在无线传感器网络中,如果传感器节点之间的能耗不均衡,一些能耗进度较快的节点会过快失效,继而导致网络过早无法正常工作。为了解决分簇无线传感器网络在数据收集过程中所存在的节点之间能耗不均衡问题,提出了一种新的分簇数据融合算法。该算法将网络划分为大小不等的栅格,并根据剩余能量使簇首分别在每个栅格的节点中轮转。簇首消耗的能量越多,其所在的栅格也越大,栅格内有更多节点参与簇首的轮换以分担能量负载。通过该方式,算法能够提高节点的能耗均衡程度。另外,考虑到无线传感器网络的能量受限,算法还采取了一系列措施以节约能量。仿真实验结果表明,算法在能量使用效率、网络生命周期以及能耗均衡程度三个方面都具有较好的性能。

关键词:无线传感器网络;分簇;数据融合;能量高效;能耗均衡

中图分类号:TP393 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2012)06-0066-06

An energy efficient and balanced clustering data aggregation algorithm for wireless sensor networks

YUE Jun, ZHANG Weiming, XIAO Weidong, TANG Jiuyang

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

Abstract: In a wireless sensor network, some sensor nodes will consume their energy at a much higher rate and die much faster if the energy dissipation of nodes is unbalanced. Accordingly, the network will lose its ability prematurely. A novel clustering data aggregation algorithm is proposed to resolve the problem of unbalanced energy dissipation among nodes during data gathering in clustering wireless sensor networks. The algorithm divided the network into rectangular grids with unequal size and made cluster heads rotate among the nodes of each grid respectively in terms of residual energy. A grid whose cluster heads consumed more energy is bigger and has more nodes to take part in the cluster head rotation for sharing energy load. By this way, the algorithm is able to balance the energy dissipation of nodes. In addition, considering that wireless sensor networks are energy-restricted because the nodes are equipped with limited and non-rechargeable energy resources, the algorithm adopted a series of measures to save energy. The results of simulation show that the algorithm is able to achieve better performance in aspects of efficiency of energy usage, lifetime of network and balanced extent of energy dissipation.

Key words: wireless sensor networks; clustering; data aggregation; energy efficient; balanced energy dissipation

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)由许多传感器节点组成,能够实时监测、感知和采集部署区域内的各种环境或监测对象的信息,并将这些信息进行处理后发送给用户,使人们获取任何时间、任何地点和任何条件下详实可靠的物理世界的信息成为可能^[1-2]。

受体积和成本等因素的限制,WSN的节点通常只能配备能量有限的电源,而且往往部署在远程环境中,有些部署区域是人无法轻易接近的,甚至是危险的,使得为节点更换电源的可行性较低。所以,如何节约能量以延长网络的生命周期就成为WSN研究的重点和热点。

数据融合是WSN实现节能的一种有效技术途径,它在数据从节点向基站传输的过程中,由中间节点收集多个节点的数据,并对这些数据进行融合处理,去除冗余数据之后再转发出去^[3]。数据融合技术通过降低网络的数据传输量,能够达到节约能量的目的。分簇数据融合算法因为其所具有的简单、灵活、易扩展等特点而成为目前WSN数据融合研究的热点。

分簇数据融合算法将网络中的节点划分为若干个簇来构建分簇WSN。每个簇一般包括一个簇首和一些簇成员,由簇首负责收集本簇节点的数据,并在进行融合处理后发送至基站。分簇

* 收稿日期:2012-03-06

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)

作者简介:乐俊(1984—),男,湖北广水人,博士研究生,E-mail:yuejun923@126.com;

张维明(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:wzhang@nudt.edu.cn

WSN 的结构特点,决定了其在数据收集的过程会面临节点之间能耗不均衡的问题。在 WSN 中,如果节点之间的能耗不均衡,能耗进度较快的节点会较早失效,使网络出现感知空洞,从而影响网络的正常工作,既缩短了网络的生命周期,也降低了网络的能量使用效率。本文研究并提出一种能量高效和均衡的分簇数据融合算法(Energy Efficient and Balanced Clustering Data Aggregation algorithm, EEBCDA),针对节点同构并采用簇首直接向基站传输数据方式的 WSN,在实现分簇数据融合的同时,也能够均衡节点之间的能耗以提高能量使用效率和延长网络生命周期。

1 相关工作

分簇算法一般都按轮进行周期性运行,主要工作包括簇首的选择和簇的构建。LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[4]是一种经典的分簇算法。该算法每轮从网络中随机地选择一些新的节点担任簇首。在构建簇的时候,每个普通节点选择距离最近的簇首加入簇。该算法所采用的簇首轮换策略,将簇首的能量负载分配到每个节点,能够在一定程度上均衡能耗。

均匀分簇算法通过构建大小相近的簇以提高能耗均衡程度。HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed clustering)^[5]根据节点剩余能量选择簇首,然后参考节点与邻居节点的邻近性和节点的度构建大小相近的簇。文献[6]采用固定分簇的方法实现均匀分簇,将网络划分为若干个大小相等的区域,由各个区域内的节点分别构成一个簇。

非均匀分簇算法则通过构建大小不等的簇以达到均衡能耗的目的。针对同构和采用簇首直接向基站传输数据方式 WSN 的非均匀分簇算法主要有 EECS (Energy Efficient Clustering Scheme)^[7-8]和 DEEUC (Distributed Energy Efficient Unequal Clustering)^[9]。EECS 先随机选择候选簇首,然后,由每个候选簇首以相同的半径广播竞争消息。如果候选簇首收到剩余能量更多的候选簇首发送的竞争消息,则其放弃竞争并成为普通节点。竞争结束后,余下的候选簇首就成为簇首。最后,普通节点依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 则在随机选择候选簇首时,通过引入平衡能量因子以提高剩余能量较高节点成为候选簇首的概率,然后采用与 EECS 类似的簇首竞争方法从候选簇首中选择簇首,只是候选簇首发送竞争消息的半径由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。

2 问题分析

在簇首直接向基站传输数据的同构 WSN 中,出现能耗不均衡问题的原因主要有 3 个:(1)簇首与簇成员之间的能耗不均衡,因为,簇首既需要发送数据又需要接收数据,而簇成员只需要发送数据;(2)不同的簇首因为接收数据量的不同而消耗不等的能量;(3)不同的簇首因为数据发送距离的不同而消耗不等的能量。

采用簇首轮换策略,由所有节点共同分担簇首的能耗,可以解决第 1 个原因所造成的能耗不均衡。但是,簇首轮换策略必须考虑节点的剩余能量,否则,如果选择剩余能量较小的节点担任簇首,就会使这些节点加速失效。均匀分簇算法通过在每轮中构造大小接近的簇,能够平衡各个簇的簇成员数目,均衡了簇首接收数据的能耗,但是,该类算法并没有考虑簇首发送数据的能耗不均衡问题。

如果簇首直接向基站传输数据,则距离基站较远的区域内的簇首,会因为数据发送距离较大而消耗更多的能量,文献[10]将其称为“热区”问题,并首次提出使用非均匀分簇方法解决该问题。现有的非均匀分簇算法根据簇首与基站的距离确定簇首所在簇的大小。对于距离基站较远的簇首,降低其所在簇的簇成员数,使其在接收数据时消耗较少的能量,从而为向基站发送数据预留更多的能量。这些算法期望通过均衡每一轮中各个簇首之间的能耗,达到提高能耗均衡程度的目的,是较好的解决方案。但是,现有的非均匀分簇算法存在一定的不足。首先,这些算法在簇首选择的过程中没有考虑簇首的分布,导致每轮簇首的数目是随机的,单轮中的簇首在网络中的分布也是随机的,影响了均衡能耗的效果。另外,在这些算法中,为了构建非均匀的簇,普通节点不是始终选择距离最近的簇首,使得一些簇成员与自己簇首的距离比与其他簇首的距离更远,导致这些簇成员需要消耗更多的能量发送数据,降低了能量使用效率。

3 EEBCDA 算法设计

与现有的非均匀分簇算法不同,本文设计的 EEBCDA 算法,根据不同区域内簇首节点的能耗特点,调整参与簇首轮换的节点数目,达到从长远均衡网络能耗的目的。

EEBCDA 算法也按轮运行,每轮包括设置阶段和稳定阶段,并在首轮开始之前设有网络划分阶段。它先将网络划分为大小相等的矩形区域,

称为“泳道”，再进一步将每个“泳道”划分为大小不等的矩形区域，称为栅格，栅格距离基站越远，栅格就越大；每轮分别从每个栅格中选择一个剩余能量最大的节点担任簇首，接着由普通节点选择距离最近的簇首加入簇；最后进行数据收集。图 1 为 EEBCDA 算法的示意图，其中，纵向短线虚线表示“泳道”的划分，横向点划线表示栅格的划分，点虚线表示簇的划分。

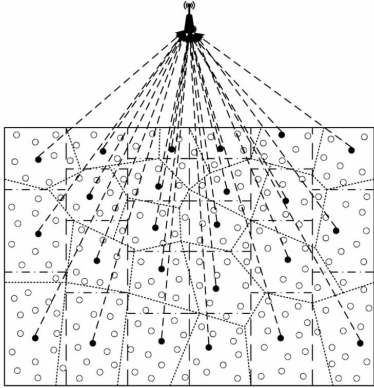


图 1 EEBCDA 算法的示意图

Fig. 1 Illustration of EEBCDA algorithm

3.1 网络模型

设 WSN 的部署区域在笛卡儿平面坐标系中是一个长和宽分别为 L 和 W 、起始点(部署区域左下角顶点)坐标为 (O_x, O_y) 的矩形区域。虽然有些文献,如文献[11],提出了节点非均匀部署的方案,但考虑到大多数应用中的节点都是随机均匀部署,算法设定节点的分布是随机均匀的,节点总数为 N 。模型还假设:(1)基站以及所有节点时间同步,在部署之后位置不变,基站位于部署区域之外,坐标为 (BS_x, BS_y) ;(2)所有节点同构,每个节点有一个唯一的整型 ID;(3)无线通信链路是对称的,每个节点可以根据通信距离调整发射功率;(4)基站和节点能够获知自己的位置坐标。

3.2 能耗模型

EEBCDA 采用同类算法常用的能耗模型,统计节点发送、接收和融合数据的能耗。

在发送数据时,如果发送距离小于阈值 d_0 ,采用自由空间模型,否则,采用多路径衰减模型。节点发送和接收 l bit 数据的能耗分别为

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

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

其中, d 是发送距离, 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, ε_{fs} 和 ε_{mp} 分别是自由空间模型和多路径衰减模型的放大器能耗参数。

和同类算法一样, EEBCDA 也假设邻近的节点所采集的数据具有较高的冗余度,簇首可以将收集到的所有 p 个长度均为 l bit 的数据融合为 1 个长度为 l bit 的数据,融合数据的能耗为

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

其中, E_{DA} 为融合单位长度数据的能耗。

3.3 网络划分阶段

不失一般性的,算法假设基站点于部署区域沿纵坐标轴的上方,并将矩形的横边作为长边、纵边作为宽边。

首先,沿横坐标轴方向将部署区域划分为 S 个“泳道”,每个“泳道”的长度相等,为 M 。“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。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(第 1 级是最高级),栅格的宽度就越大。这样,EEBCDA 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,栅格中的节点也越多。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。栅格的 ID 表示为二元组 (v, w) ,其中, v 是栅格所在“泳道”的 ID, w 是栅格的级别。另外,再定义 S 个数组,分别表示各个“泳道”中所有栅格的宽度,第 v 个数组 H_v 的第 w 个元素 h_{vw} 是栅格 (v, w) 的宽度。栅格 (v, w) 的覆盖范围为

$$O_x + (v - 1) \times M < x \leq O_x + v \times M \quad (4)$$

$$O_y + \sum_{k=1}^{k \leq w-1} h_{vk} < y \leq O_y + \sum_{k=1}^{k \leq w} h_{vk} \quad (5)$$

最后,由基站向所有节点广播 BS_MSG ((O_x, O_y) , (BS_x, BS_y) , L , W , M , S , A , H_1, \dots, H_S) 消息,节点根据该消息中的信息和自己的位置信息计算所属栅格 ID,计算方法的伪码如图 2 所示,其中, (x, y) 为节点的位置坐标, (v, w) 为节点所属栅格 ID, a_v 为数组 A 的第 v 个元素,也就是“泳道” v 中栅格的个数。

3.4 设置阶段

设置阶段首先进行簇首的选择。每轮分别从每个栅格中选择一个剩余能量最大的节点担任簇首,如果一个栅格中剩余能量最大的节点有多个,

```

1   $v \leftarrow \lceil (x - O_x) / M \rceil$ 
2   $u \leftarrow y - O_y$ 
3   $n \leftarrow 1$ 
4  While  $n \leq a_y$ 
5      If  $u \leq \sum_{k=1}^{k \leq n} h_{vk}$ 
6           $w \leftarrow n$ 
7          Break
8      End if
9       $n \leftarrow n + 1$ 
10 End while

```

图2 节点计算所属栅格ID的伪码

Fig.2 Pseudo-code for a node to calculate its grid ID

则根据节点ID按照某个确定的规则从中选择。

首轮簇首分别由各个栅格中的节点协作选出。首先,每个节点向本栅格其他节点发送 *NODE_MSG* 消息。该消息包含节点的ID、所属栅格的ID和剩余能量信息。各个节点接收消息中栅格ID和自己所属栅格ID相同的消息。这样,每个节点能获得所属栅格中所有节点的信息,就可以选出所属栅格的簇首。为了节约能量,每个节点的 *NODE_MSG* 消息只需要覆盖所属栅格即可。每个节点根据自己与所属栅格4个顶点之间距离的最大值确定消息发送距离。位置坐标为 (x, y) 、所属栅格ID为 (v, w) 的节点计算与所属栅格顶点最大距离 D_t 的伪码如图3所示。

```

1   $(A_x, A_y) \leftarrow ((v-1) \times M + O_x, \sum_{k=1}^{k \leq w-1} h_{vk} + O_y)$ 
2   $(B_x, B_y) \leftarrow (v \times M + O_x, \sum_{k=1}^{k \leq w-1} h_{vk} + O_y)$ 
3   $(C_x, C_y) \leftarrow (v \times M + O_x, \sum_{k=1}^{k \leq w} h_{vk} + O_y)$ 
4   $(D_x, D_y) \leftarrow ((v-1) \times M + O_x, \sum_{k=1}^{k \leq w} h_{vk} + O_y)$ 
5   $D_A \leftarrow \sqrt{(x - A_x)^2 + (y - A_y)^2}$ 
6   $D_B \leftarrow \sqrt{(x - B_x)^2 + (y - B_y)^2}$ 
7   $D_C \leftarrow \sqrt{(x - C_x)^2 + (y - C_y)^2}$ 
8   $D_D \leftarrow \sqrt{(x - D_x)^2 + (y - D_y)^2}$ 
9   $D_t \leftarrow \text{MAX}(D_A, D_B, D_C, D_D)$ 

```

图3 节点计算与所属栅格顶点最大距离的伪码

Fig.3 Pseudo-code for a node to calculate the maximal distance to the vertexes of its grid

非首轮的簇首由上一轮的簇首协作选出。在每轮最后一次数据收集,簇成员采用“捎带”的方式,将自己的剩余能量等信息与采集的数据一起发送至簇首,簇首记录本簇所有节点的信息。在非首轮设置阶段选择簇首时,各个上一轮簇首根据记录的节点信息,将节点按照所属栅格进行分类,并按照簇首选择方法,分别为各个栅格选择一

个候选簇首,然后向相关栅格的上一轮簇首发送 *LRCH_TCH_MSG* 消息,告知候选簇首信息,该消息的发送距离由发送消息的上一轮簇首根据其各个相关栅格顶点之间距离的最大值确定,使消息能够覆盖相关栅格。最后,各个上一轮簇首从所属栅格的所有候选簇首中选出簇首。如果选出的簇首与上一轮簇首不是同一个节点,则该上一轮簇首还需要向将要担任簇首的节点发送 *LRCH_INFRM_MSG* 消息以通知该节点。

簇首选择完成之后,各个担任簇首的节点广播 *CH_BRDCST_MSG* 消息,声明自己成为簇首并告知其他节点自己的信息。*CH_BRDCST_MSG* 消息的发送距离与节点发送 *NODE_MSG* 消息的距离相同,使消息覆盖所属栅格即可,从而既能够保证每个普通节点都能够接收到至少一条 *CH_BRDCST_MSG* 消息,又能够节约能量。然后,各个普通节点根据收到的簇首广播消息,选择一个最近的簇首,并发送 *JOIN_CLUSTER_MSG* 消息以加入该簇首所在的簇。最后,各个簇首按照时分复用的方式为本簇的簇成员分配数据通信时隙,并向簇成员发送时隙信息。

3.5 稳定阶段

每轮的稳定阶段中,网络可以进行多次数据收集。在每次数据收集时,每个簇成员在自己的时分复用时隙内,将采集的数据发送至簇首,然后由簇首将收集的数据进行融合处理并发送至基站。另外,在每轮最后一次数据收集时,所有簇成员将自己的剩余能量等信息附加在数据消息中,采用“捎带”的方式发送至簇首,簇首保存相关信息,以便在下一轮的设置阶段选择栅格的候选簇首。

4 EEBCDA 算法分析

从控制消息复杂度、能耗均衡程度和能量使用效率三个方面对 EEBCDA 算法进行简要分析。

在控制消息复杂度方面,EEBCDA 算法具有如下性质:

性质1 EEBCDA 的控制消息复杂度在整个网络内是 $O(N)$ 。

证明 由于首轮在整个网络生命周期中所占的比例很小,所以,只考虑非首轮的的控制消息复杂度。设 EEBCDA 将网络划分为 G 个栅格,则每轮网络中簇首的数目也为 G 。每轮中,每个上一轮簇首发送一条 *LRCH_TCH_MSG* 消息和一条 *LRCH_INFRM_MSG* 消息,共 $2G$ 条,每个簇首广播一条 *CH_BRDCST_MSG* 消息,共 G 条,每个普通节点发送一条 *JOIN_CLUSTER_MSG* 消息,共 N

-G 条,每轮控制消息的开销为 $2G + G + N - G = N + 2G$,所以,EEBCDA 的控制消息复杂度在整个网络内是 $O(N)$ 。

虽然 EECS 和 DEEUC 两种算法的控制消息复杂度也都为 $O(N)$,但是它们都需要先选择候选簇首,然后再由候选簇首竞争产生簇首,所以它们的控制消息量要比 EEBCDA 算法多。以 DEEUC 算法为例,其每轮的控制消息量为 $N + 2N \times Threshold + 1$,其中, $N \times Threshold$ 为每轮选择的候选簇首的数目。DEEUC 算法与 EEBCDA 算法的每轮控制消息量之差为 $(N + 2N \times Threshold + 1) - (N + 2G) = 2(N \times Threshold - G) + 1$ 。由于候选簇首的数目总是不小于簇首的数目,即 $N \times Threshold \geq G$ 总是成立,所以,上述差值总是不小于 1,也就表明 DEEUC 算法的控制消息量高于 EEBCDA 算法。

在能耗均衡程度方面,EEBCDA 每轮从每个栅格中选择一个剩余能量最大的节点担任簇首,所以,只要某个栅格中还有能量未耗尽的节点,该栅格就会选出一个簇首,从而既保证了每轮簇首数目分布的规律性,又保证了单轮中的簇首在网络中分布的规律性,还均衡了栅格内节点之间的能耗。另外,算法使得距离基站越远的栅格越大,换句话说,距离基站越远,分布的栅格就越少,而一个栅格只选出一个簇首,因此,距离基站越远,分布的簇首也越少,再加上普通节点选择距离最近的簇首加入簇,这样,距离基站越远,簇也越大,这与现有的非均匀分簇算法恰恰相反。只就某一轮来看,距离基站越远,簇就越大,簇首的接收数据量就越大,数据发送距离也越远,EEBCDA 加剧了簇首之间的能耗不均衡,但是,距离基站越远,栅格也越大,栅格中的节点就越多,可参与簇首轮换的节点也越多,将有更多的节点共同分担簇首的能耗负载,所以,从长远来看,EEBCDA 可以均衡网络中不同栅格内节点之间的能耗。而且,与现有非均匀分簇算法均衡能耗的效果具有随机性不同,EEBCDA 均衡能耗的效果可以通过设置网络中栅格的大小来调节,如果栅格大小设置适当,算法可以达到较高的能耗均衡程度。

在能量使用效率方面,首先,EEBCDA 算法能够降低距离基站较远区域内分布的簇首数目,减少了需要远距离发送数据的簇首。其次,除了首轮之外,每轮的簇首都由上一轮簇首协作选择,而且,选择簇首所需的节点信息采用“捎带”的方式与采集的数据一起传输,不需要另外单独传输。再次,节点发送消息的传输距离和接收节点被限

制在必需的范围之内,而且不需要通过通信交互确定消息发送距离。最后,每个普通节点选择最近的簇首加入簇,使得这些节点在数据收集的过程中,能够以最低的能耗完成数据传输。

5 仿真实验和结果分析

本文在 MATLAB 平台上进行 EEBCDA 和 DEEUC 的仿真实验,比较两种算法在网络生命周期、能量使用效率以及能耗均衡程度三个方面的性能。由于 DEEUC 的网络模型假设网络部署区域是正方形,而且其参数的设置都是以此假设为前提,所以,仿真实验的网络部署区域设置为一个边长为 200m 的正方形。EEBCDA 的网络划分参数设置为: $S = 4$ 、 $M = 50$ 、 $A = \{3, 4, 4, 3\}$ 、 $H_1 = H_4 = \{100, 70, 30\}$ 、 $H_2 = H_3 = \{80, 60, 40, 20\}$ 。简化起见,网络在每轮的稳定阶段都只进行 1 次数据收集。其他实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数名	参数值
部署区域起始点坐标 (m, m)	(0, 0)
基站位置 (m, m)	(100, 250)
节点总数	400
节点初始能量 (J)	0.5
消息长度 (bit)	800
d_0 (m)	87
E_{elec} (nJ/bit)	50
ϵ_{fs} (pJ/(bit · m ²))	10
ϵ_{mp} (pJ/(bit · m ⁴))	0.0013
E_{DA} (nJ/bit)	5

仿真实验中,两种算法的剩余能量总量和存活节点数目随轮数变化的情况分别如图 4 和图 5 所示,可以很清楚地看出,在轮数相同的轮中,EEBCDA 的剩余能量总量和存活节点数目都要高于 DEEUC,说明 EEBCDA 的能量使用效率更高,更加节约能量,网络延续时间也更长。

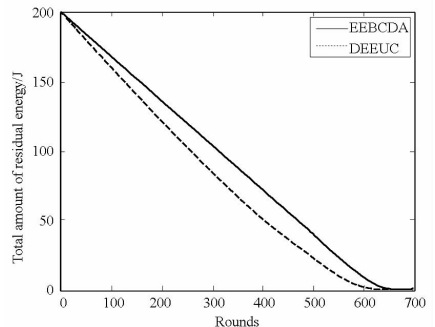


图 4 剩余能量总量随轮数变化示意图

Fig. 4 Total amount of residual energy over rounds

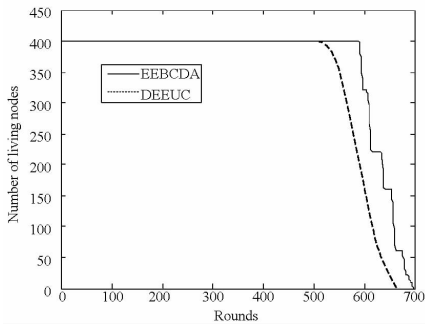


图5 存活节点数目随轮数变化示意图

Fig. 5 Number of living nodes over rounds

目前,并没有统一的WSN网络生命周期界定标准,文献[12]总结了三种常用的标准:第一个节点失效(*FND*)、半数节点失效(*HND*)和最后一个节点失效(*LND*)。按照这三种标准,在仿真实验中,DEEUC和EEBCDA的网络生命周期分别为500轮、593轮、666轮和591轮、638轮、698轮,相较于前者,后者分别延长了18.2%、7.6%和4.8%。可见,无论采用何种标准,与DEEUC相比,EEBCDA都延长了网络的生命周期。

一般来说,从第一个节点失效到最后一个节点失效的时间间隔,在网络延续时间中所占的比例越小,就说明网络的能耗越均衡。因此,为了定量评价能耗的均衡程度,本文给出一个能耗均衡程度指标,用*BEED*表示,其计算公式为

$$BEED = (LND - FND) / LND \quad (6)$$

算法的*BEED*越小,表明算法的能耗均衡程度越高。将上述仿真实验相关结果数据代入该公式,得到DEEUC和EEBCDA的*BEED*分别为0.249和0.153,说明EEBCDA的能耗相对于DEEUC更加均衡。此外,EEBCDA的*BEED*的绝对值较小,表明该算法能够达到较高的均衡程度。

6 结论

本文研究簇首直接向基站传输数据的同构分簇WSN中能耗不均衡的问题,说明了该问题产生的原因,分析了现有解决方案所存在的不足,提出了EEBCDA算法以更好地解决该问题。EEBCDA将网络划分为大小不等的矩形栅格,每轮从每个栅格中选择一个剩余能量最大的节点担任簇首,从而使每轮簇首的数目以及单轮中簇首在网络中的分布都具有规律性。另外,算法根据栅格与基站的距离确定栅格的大小,栅格距离基站越远,栅格就越大,这样,即使这些栅格中的簇首每轮消耗的能量较多,但是由于栅格中有更多的节点参与簇首的轮换来分担能耗负载,所以,从长远看,算

法能够很好地均衡网络的能耗。还有,为了提高能量使用效率,算法采取了一系列节约能量的措施。仿真实验结果显示,相较于现有性能较好的DEEUC算法,EEBCDA提高了能量使用效率和能耗的均衡程度,延长了网络生命周期。

参考文献 (References)

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] 李建中,高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15.
LI Jianzhong, GAO Hong. Survey on sensor network research [J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 1-15. (in Chinese)
- [3] Rajagopalan R, Varshney P. Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys, 2006, 8(4): 48-63.
- [4] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C] // Proceedings of the Conference on System Sciences, Hawaii: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [5] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.
- [6] Al-Karaki J, Ul-Mustafa R, Kamal A. Data aggregation in wireless sensor networks-exact and approximate algorithms [C] // Proceedings of the Workshop on High Performance Switching and Routing. Phoenix: IEEE Computer Society, 2004: 241-245.
- [7] Ye M, Li C F, Chen G H, et al. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks [J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2006, 3: 99-119.
- [8] 陈贵海,李成法,叶懋,等. 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 Guihai, LI Chengfa, YE Mao, et al. EECS: an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2007, 1(2): 170-179. (in Chinese)
- [9] 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分簇算法 [J]. 通信学报, 2009, 30(10): 34-43.
SHANG Fengjun, Abolhasan M, Wysocki T. Distributed energy efficient unequal clustering algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2009, 30(10): 34-43. (in Chinese)
- [10] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering [C] // Proceedings of the Parallel and Distributed Processing Symposium, New York: IEEE Computer Society, 2005: 1-8.
- [11] 温俊, 窦强, 蒋杰, 等. 无线传感器网络中保证覆盖的最少节点部署 [J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(3): 76-81.
WEN Jun, DOU Qiang, JIANG Jie, et al. Coverage-preserved minimum deployment in wireless sensor networks [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(3): 76-81. (in Chinese)
- [12] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection [C] // Proceedings of the Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, Stockholm: IEEE Computer Society, 2002: 368-372.