

基于分簇无线传感器网络的路由算法研究

郭书城¹, 卢昱², 许定根¹

(1. 装备指挥技术学院, 北京 101416; 2. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要: 无线传感器网络的分簇算法在很大程度上延长了网络的生命周期。但对于较大规模的网络, 簇首节点直接发送信息到汇聚节点, 造成簇首能耗过多。针对这个问题, 首先提出能距比的概念, 得出信息的发送距离与能量使用效率的关系。在此基础上, 提出了分簇网络中由簇首节点到汇聚节点的一种路由算法。其中, 每个节点保存本簇所有节点的位置和能量信息, 发信节点通过读取所保存的节点信息选择一个转发节点, 当本簇内找不到合适的转发节点时, 则向邻簇的节点发送询问信息, 由邻簇的节点提供下一跳转发节点。仿真分析表明, 所提出的算法明显降低了网络的能耗, 较好的解决了网络节点能耗均衡的问题。

关键词: 无线传感器网络; 路由算法; 分簇; 剩余能量

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)8A-0063-07

Research on a routing algorithm for clustered wireless sensor networks

GUO Shu-cheng¹, LU Yu², XU Ding-gen¹

(1. Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China; 2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In wireless sensor networks, clustering algorithm prolongs networks' lifetime drastically. For a large size of WSN, the cluster head will consume too much energy if it transmits message to the sink directly. At first the EDR(energy distance ratio) was proposed for the problem, which gave the relationship between transmitting distance and energy efficiency. Afterward, a routing algorithm for transmitting message from cluster head to the sink was brought forward. In the algorithm, every node saved the information about location and energy of other nodes in current cluster. A transmitter selected the relaying node from its memory. If there was no node to relay in this cluster, the transmitter would send asking information to neighbor cluster and one of nodes in neighbor cluster answered the transmitter who was the relaying node. At last, simulation exhibited the algorithm was able to reduce energy consumption of WSN and also do well for balancing energy for WSN.

Key words: wireless sensor networks; routing algorithm; clustering; remaining energy

1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor networks)是由部署在监测区域内大量低成本、低功耗、具备感知、数据处理、存储和无线通信能力的传感器节点通

过自组织方式形成的网络, 其目的是协作地采集、处理和传输网络区域内被感知对象的信息。无线传感器网络在环境监测、军事应用、道路交通、医疗卫生以及各种安全场合都具有非常广阔的应用前景。

无线传感器网络一般由汇聚节点和普通节点组

收稿日期: 2010-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672143)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60672143)

成。汇聚节点负责将收集到的监测区域内的信息发送到观察者,完成监测任务。普通节点负责收集部署区域内监测对象的信息,并将它以 ad hoc 方式发送到汇聚节点。网络实际是以汇聚节点为中心的,其他节点收集的数据,都要直接传送或经过转发传到汇聚节点^[1]。网络中的节点具有一次性电源,能量成为影响网络生命周期的关键因素,信息传输过程中节点的能耗成为衡量网络性能的重要指标。

与传统网络相比,无线传感器网络具有以下特点:①传感器节点的通信能力有限;②节点的能量及计算能力等资源非常有限;③网络规模大,拓扑结构复杂;④数据传输方向性强^[2]。

因此,传统网络的协议和算法并不适合于无线传感器网络,它需要针对其特性的新算法。由于无线传感节点能量的不可再生性,降低传感节点的能耗,均衡网络中节点的能耗,延长网络的生命周期,是无线传感器网络协议的重要研究内容^[3]。

无线传感器网络的研究起步于 20 世纪 90 年代末^[4]。从 21 世纪开始,传感器网络引起了学术界、军界和工业界的极大关注,美国和欧洲相继启动了许多关于无线传感器网络的研究计划。特别是美国通过国家自然基金委、国防部等多种渠道投入巨资支持传感器网络技术的研究。

在无线传感器网络的最初研究阶段,传感节点的计算能力、存储能力以及携带的能量都十分有限,每个节点只能获取局部网络的拓扑信息,其上运行的网络协议也不能太复杂。同时,由于能量的不可再生性,在研究使传感器网络有尽可能长的生存时间时,当初的研究人员是以有限的计算能力和有限的存储资源为前提,所设计的协议和算法具有很大的局限性。

随着近几年来计算机科学与技术的迅猛发展,CPU 的运算能力得到了大幅度提高,只有指甲大小的芯片已有数 GB 的存储空间,如今的无线传感器网络节点的计算能力、存储能力也随之得到了大幅度提高。虽然节点可携带的能量也有很大的提高,但由于节点能量的不可再生性,降低节点能耗、延长网络生存时间仍然是必需的。因此,在以节点较大的存储内容和运算能力为前提^[5, 6],开发新的协议和算法,换取网络更长的生命周期,将是一项非常有现实意义的研究。

Wendi Rabiner Heinzelman 等人在文献[7]中提出了 LEACH(low energy adaptive clustering hierarchy)算法。LEACH 将所有节点分为若干簇,每个簇选举一

个簇首,簇首接收本簇中节点发送的数据,实现数据融合功能,并向汇聚节点发送数据。LEACH 使用了分布式算法,使得任务被分散到每个传感器节点上,有效的减少了每个节点的负载,延长了传感节点的使用寿命。簇首进行数据融合后,还要将信息发送到汇聚节点,本文主要研究从簇首到汇聚节点的路由算法。

本文在总结前人已有算法的基础上,提出了能距比的概念,并把能距比的概念应用于路由算法当中,将它作为发信节点选择下一跳节点的一个重要依据。因此,本文的算法与已有算法相比较,具有其特色之处。另外,现在的传感节点的运算能力比以往有很大的提高,节点也有足够的空间存储较多的信息,本文是以此类传感节点为基础的,也是本文算法研究的特色所在。

2 节点能耗与能距比

文献[7]中提出 LEACH 算法的同时,也给出了节点收发信息的能耗模型。式(1)和式(2)分别是发送信息和接收信息的节点能耗模型。

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = E_{elec}k + \epsilon_{amp}kd^2 \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = E_{elec}k \quad (2)$$

利用文献[7]中给出的参数

$$E_{Tx-elec} = E_{Rx-elec} = E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$$

$$\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$$

则式(1)、式(2)变为

$$E_{Tx}(k, d) = 50 \times 10^{-9}k + 100 \times 10^{-12}kd^2 = 5 \times 10^{-8}k + 10^{-10}kd^2 \quad (3)$$

$$E_{Rx}(k) = 50 \times 10^{-9}k = 5 \times 10^{-8}k \quad (4)$$

则每个中间节点转发 1bit 信息所消耗的能量为

$$\begin{aligned} E &= E_{Tx}(1, d) + E_{Rx}(1, d) \\ &= 2E_{elec} + \epsilon_{amp}d^2 \\ &= 2 \times 50 \times 10^{-9} + 100 \times 10^{-12}d^2 \\ &= 10^{-7} + 10^{-10}d^2 \end{aligned} \quad (5)$$

为了研究节点能够以最小的能耗将信息发送到最远距离,定义了能距比(EDR, energy distance ratio)的概念,即节点发送信息所消耗的能量与发送距离的比值。与最小能距比(MEDR, minimum en-

ergy distance ratio) 相对应的信息发送的距离称为最佳发送距离。能距比越小, 说明信息发送的能量使用效率越高, 节能的效果越好。当发送距离是最佳发送距离时, 能量使用效率最高。

由式(5)得到能距比为

$$EDR(d) = \frac{E}{d} = \frac{10^{-7}}{d} + 10^{-10}d \quad (6)$$

由式(6)得到信息的发送距离与能距比的关系, 如图 1 所示。从图中可以看出, 随着 d 值的增加, 能距比迅速减小, 接着又缓慢的增加。经计算可知, 当能距比最小时, d 取最佳发送距离的值约为 32m。也就是说, 节点转发信息时, 将信息发送给距离它 32m 远的节点, 发送节点的能量使用效率最高。所以在无线传感器网络中, 每个转发节点都将信息发送到距离 32m 附近的下一跳节点, 信息发送的能量使用效率最高, 网络的节能效果也最好。

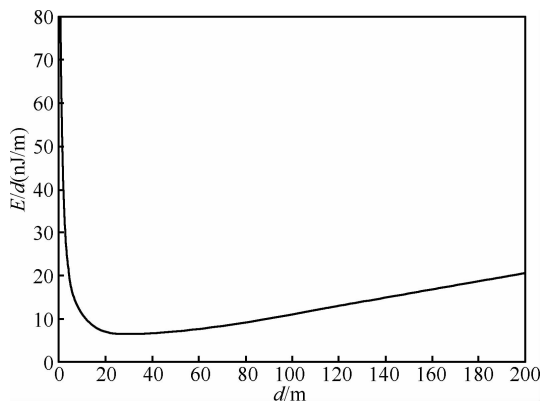


图 1 能距比与发送距离的关系图

3 基于 LEACH 分簇方法的路由算法

LEACH 算法提出了在进行簇首数据融合后, 由簇首节点直接将信息发送到汇聚节点。但是, 如果簇首节点距离汇聚节点过远, 将会消耗过多的能量。文献[8, 9]提出由其他簇的簇首转发信息, 但是, 每个簇的簇首本身任务最艰巨, 能量消耗也最快, 虽然在成簇初期阶段, 簇首的剩余能量可能是最大的, 但是它不可能一直是一个簇中剩余能量最大的节点, 此时再让它担负为其他簇首转发信息的任务, 无疑是雪上加霜。文献[7]中提到了 MTE 转发方法, 即由最近的节点转发。在这种方法中, 虽然每个转发节点的能耗都是最小的, 但由于转发节点的数量太多, 致使网络总能耗, 即各个转发节点的能耗之和不一定最小。也可以由上一节所提出的能距比的特性可知, 发信节点

所选择的转发节点的距离过大或过小, 都会使能距比过大因而能量使用效率过低, 因此信息发送的能耗就会过大。本文将具体阐述如何由簇内的节点进行转发。

如图 2 所示, 为均匀部署在 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 范围内的 100 个节点, 按 LEACH 分簇算法将其分为 5 个簇。其中空心圆为簇成员节点, 实心圆为簇首节点, 实心正方形为汇聚节点。本文中还对如下假设。

1) 假设每个节点都知道自己的地理位置和剩余能量, 也知道汇聚节点的地理位置。

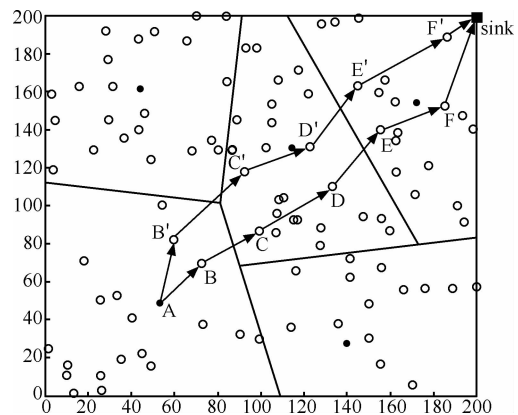


图 2 无线传感器网络节点部署图

2) 假设每个节点都有足够的空间用来存储本簇所有节点的地理位置和剩余能量信息。

3) 假设节点的发射功率是可控制的, 因而发射距离也是可调的。

根据以上假设, 提出算法步骤如下。

第 1 步: 以 LEACH 算法生成簇首节点后, 簇首节点向周围节点广播信息, 宣布自己成为簇首, 并广播自己的地理位置和能量信息, 周围节点以就近原则加入簇, 并告知该簇首“我已是你的成员节点, 我的地理位置是 $\times \times \times$, 我的剩余能量是 $\times \times \times$ ”。

第 2 步: 簇首节点向本簇所有成员节点广播簇内其他节点的地理位置和剩余能量信息。每个节点建立一个数据库, 用来存储本簇所有节点的地理位置和剩余能量信息并进行相应的编址^[10]。

第 3 步: 在以后运行过程中, 当节点能量下降到一个门限值时, 便向周围节点广播自己的能量信息, 周围节点收到这个信息后, 更新数据库的能量信息; 节点自身的能量信息, 也在下降到这个门限值时才更新数据库中的自身剩余能量值。这样做的目的, 是为了使每个节点的数据库所保存的能量信息具有一定的滞后性, 以保持信息发送的稳定性。本文取剩余能量为上次对外广播时的 80% 作为门限值。

第 4 步: 信息源节点, 即某一个要向汇聚节点发送信息的簇首节点, 选择下一跳转发节点。因为簇首节点的任务最重, 所以在转发数据包时应尽量减少簇首的负担, 要求簇首的下一跳节点距离不能太远, 此时不再兼顾能距比最小的指标。具体选择方法如下:

- 1) 簇首节点从自己的数据库中选出自己距离汇聚节点近的本簇成员节点;
- 2) 将 1) 中选出的节点按与簇首距离的由小到大的顺序, 分别记权值为 1, 2, 3, ...
- 3) 将 1) 中选出的节点再按剩余能量的由大到小的顺序, 分别记权值为 1, 2, 3, ...
- 4) 将各节点的由 2)、3) 得到的距离与能量的权值相加, 得到了各节点的权值和;
- 5) 选择权值和最小的节点, 即为簇首节点的转发节点。

如果本簇内没有满足条件的节点, 转到第 6 步。

第 5 步: 接收到簇首信息的节点继续选择下一跳节点。转发节点与信息源节点, 即簇首节点, 选择下一跳节点的方法不同, 除需要下一跳节点满足剩余能量^[11]的要求, 还要满足能距比小的原则, 具体选择方法如下:

- 1) 在转发节点与汇聚节点的方位线上, 以距离转发节点为最佳发送距离的点为圆心, 以最佳发送距离为半径作圆, 选择出位于圆内的本簇节点;
- 2) 将 1) 中选出的节点按与圆心距离的由小到大的顺序, 分别记权值为 1, 2, 3, ...
- 3) 将 1) 中选出的节点再按剩余能量的由大到小的顺序, 分别记权值为 1, 2, 3, ...
- 4) 将各节点的由 2)、3) 得到的距离与能量的权值相加, 得到了各节点的权值和;
- 5) 选择权值和最小的节点, 即为本转发节点的下一跳转发节点。

第 6 步: 当本簇内找不到转发节点时, 则在邻簇内选择转发节点。由于节点没有保存邻簇的各节点信息, 这时它需要向邻簇发送一个询问信息, 并声明自己的位置, 最先收到信息的节点按第 5 步的方法为它选择一个转发节点, 并把转发节点的位置信息告诉发出询问信息的那个节点。这样, 信息被传递到另一个簇内^[12]。

第 7 步: 继续按第 5 步、第 6 步的方法选择转发节点, 直至将信息发送到汇聚节点为止。

算法具体的流程图如图 3 所示。

例如, 在图 2 中, 簇首 A 有信息需要发送到汇

聚节点。簇首 A 首先在本簇内选择下了一跳节点 B, B 在选择下一跳节点时, 没有发现本簇内有合适的转发节点, 便向邻簇广播消息, 报告自己的位置并询问合适的下一跳节点。节点 C 最先收到来自节点 B 的询问信息, 认为自己是适合的转发节点, 于是告诉 B 通过自己转发, 并把自己的位置告诉 B (此时, C 收到来自 B 的询问信息后, 如是发现本簇内另一节点 H 才是 B 合适的转发节点, 则它要告诉 B: “H 是你的下一跳节点, H 的位置为 ×××”)。节点 C 根据自己数据库的信息, 认为节点 D 是合适的下一跳, 于是将信息传递给 D。D 收到信息后, 发现自己所在的簇内没有合适的下一跳节点, 于是继续向邻簇询问。节点 E 收到询问信息后, 告诉 D 向自己发送信息并告知自己的位置。E 再从自己的数据库中选择节点 F 作为自己的下一跳。最后, F 将信息发送给汇聚节点。

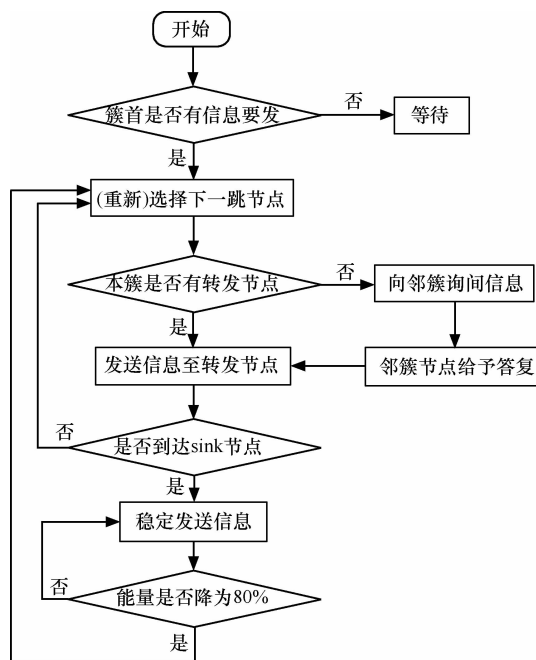


图 3 路由算法流程图

发送一段时间后, 当 A 检测到 B 的剩余能量为原来的 80% 时, 而 B' 的剩余能量比 B 大的多, 则停止向 B 发送信息, 选择 B' 作为下一跳节点, B' 再按照上述算法逐级选择下一跳节点, 选择的路径结果为: A→B'→C'→D'→E'→F'→Sink。

4 算法复杂度分析

在网络初始化时, 每个节点都保存了本簇内节点的地理位置和剩余能量信息, 并动态更新剩余能量信

息。因此，发信节点在选择下一跳转发节点时，获取节点信息无需节点间的通信，只需在自己的数据库中读取即可，因而在很大程度上节省了能量。

假设某一个簇内共有 n 个簇成员节点，为了求得此簇首节点距离汇聚节点近的成员节点，在第 4 步的 1) 中进行了 n 次比较，为不失一般性，假设有 $\frac{n}{2}$ 个节点比簇首距离汇聚节点近，则进行 $\left(\frac{n}{2}-1\right)$ 次距离比较和 $\left(\frac{n}{2}-1\right)$ 次剩余能量比较，再经 $\left(\frac{n}{2}-1\right)$ 次权值的比较，最终得到结果。由此可知，算法复杂度与 n 成线性关系，即 $T(n) = O(n)$ 。同理，簇成员节点选择下一跳节点的算法复杂度为 $T(n) = O(n)$ 。

以 n 为 20 为例，转发节点的选择算法即是 20 个数、10 个数的排序比较问题，因而算法比较简单。

5 仿真验证

初始状态时，每个节点的能量都是 1J。当簇首 A 接收信息并进行数据融合后，各相关节点的剩余能量如表 1 所示。由于在成簇阶段至簇首数据融合阶段，各节点的能耗不同，所以表 1 中各节点的剩余能量也不同。

表 1 成簇后各节点剩余能量 (单位: J)

A	B	C	D	E	F	Sink	B'	C'	D'	E'	F'
0.92	0.95	0.89	0.91	0.87	0.88	∞	0.93	0.90	0.92	0.86	0.86

如果簇首 A 直接将融合后的信息发送到汇聚节点，则 A 的能耗，也就是全网的能耗情况如图 4 所示。

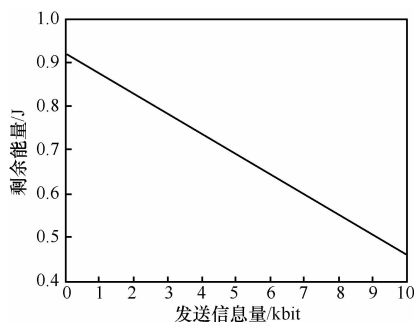


图 4 簇首 A 直接发送至汇聚节点的能耗

图 4 可以看出，节点 A 发送 2.4kbit 的信息时，能量下降为原来的 80%，发送 6.8kbit 的信息时，能量下降为原来的 60%，发送 9.1kbit 时，能量下降为

原来的一半。可见，这种情况下簇首 A 的能耗是相当大的。当簇首的剩余能量下降到一定程度时，就要重新进行簇首选举和分簇，在这个过程中，不但传感节点不能发送感知信息，而且需要的额外能量开销也是可观的。

表 2 列出了簇首 A 直接向汇聚节点分别发送 2kbit、4kbit、6kbit 及 8kbit 信息时，A 的剩余能量值以及网络总能耗，其中网络总能耗指的是网络用于发送信息的能耗，在这里也就等于簇首 A 用于发送信息的能耗。

表 2 簇首 A 直接发送时网络的能耗

发送信息量	A 剩余能量	网络总能耗
2kbit	0.827J	0.093J
4kbit	0.735J	0.185J
6kbit	0.642J	0.278J
8kbit	0.550J	0.370J

如果采用本文提出的算法，在这里称为 MEDR 转发方式，则 A 的剩余能量如图 5 所示。当簇首 A 发送了 10kbit 的信息时，A 的剩余能量还在 0.9J 以上，即剩余能量还在 90% 以上，这就意味着网络还有更长的稳定工作时间。而在图 4 中，如果预设重新选择簇首的时机为当前簇首剩余能量为初始能量的 80%，则 A 在发送 2.4kbit 的信息时，就要停止发送信息，开始进行簇首选择与成簇^[13]。频繁的簇首选择与成簇，使网络的工作效率大大降低，而且消耗过多的能量。

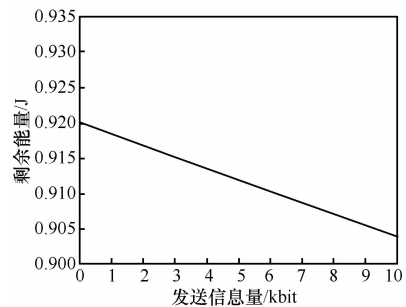


图 5 MEDR 转发方式下簇首 A 的能耗

如图 6 所示，给出了采用 MEDR 转发方式时，A~F 各节点分别发送/转发 2kbit、4kbit、6kbit、8kbit 信息时的剩余能量情况。图中可以看出，每发送 2kbit 信息时，每个节点的能耗都比较小，而且能量下降的幅度也比较相近，因而能耗是均衡的。

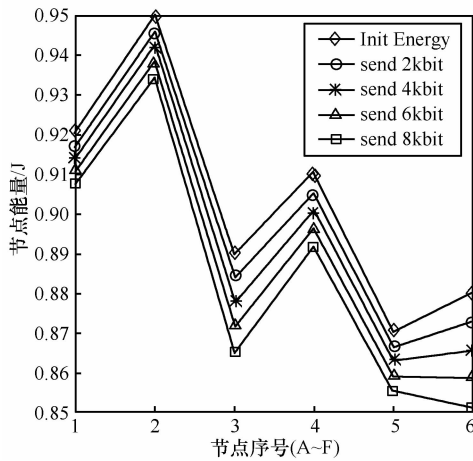


图 6 MEDR 转发方式下各节点能耗

下面将文献[7]所提到的 Direct 发送方式、MTE 转发方式和文献[8, 9]提到的簇首转发方式, 与本文提出的 MEDR 转发方式进行比较。Direct 发送方式下, 簇首 A 直接将信息发送给汇聚节点, 只有簇首 A 消耗能量。MTE 转发方式下, 发信节点选择最近的节点进行转发, 簇首 A 和其他转发节点都消耗能量。簇首转发方式下, 簇首 A 和其他参与转发的簇首节点消耗能量。

如图 7 所示, 给出了在 4 种方式下, 网络用于发送信息的总能耗。直接发送时, 网络总能耗即为簇首 A 直接发送信息到汇聚节点的能耗; 其他方式下, 网络总能耗即为簇首 A 与其他各转发节点的总能耗之和。

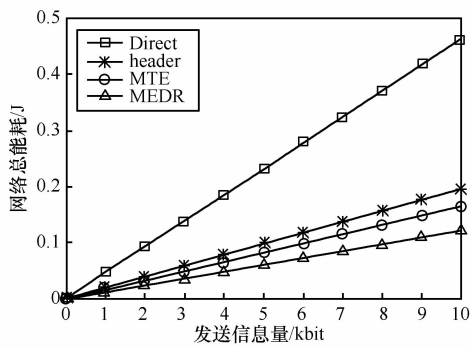


图 7 4 种方式下总能耗比较

图 7 可以看出, 直接发送方式下, 网络的总能耗是最大的; 簇首转发方式下, 由于转发簇首的距离过远, 所以网络总能耗也比较大; 而 MTE 转发方式下, 转发节点之间的距离又过小, 因而网络总能耗也比较大。而在本文提出的算法中, 将 MEDR 作为选择下一跳节点的重要依据, 所选节点距离适中, 因而网络的总能耗最小。

需要说明的是, 每个节点的剩余能量各不相同, 这是由于以下原因造成的。1) 网络在初始化时, 在选择簇首和成簇的过程中, 每个节点发布的信息量不同因而能耗是不同的; 2) 节点在感知周围环境的信息时, 由于不同环境所感知的信息量不同, 所以不同地点节点的能耗是不同的; 3) 节点向簇首发送信息时, 由于节点与簇首的距离各不相同, 因而发送信息所需能耗也不同。

但是, 节点在选择下一跳节点时, 已经充分认识到节点剩余能量是不相等的, 因而优先选择剩余能量大的节点作为下一跳节点, 力争在动态中寻求平衡。网络能耗的绝对平衡, 即每个节点在每个时刻剩余能量都相等, 这样的算法相当复杂, 而且算法本身也会消耗过多的能量, 还会严重影响网络的吞吐率, 从而失去了网络本身存在的意义。因此, 在动态中寻求平衡, 而不是绝对的平衡, 对无线传感器网络是一种很有意义的方法。

表 3 给出了在 MEDR 转发方式下, 簇首 A 分别经 B~F 节点转发 2kbit、4kbit、6kbit 和 8kbit 的一些具体值。与表 2 相对照, A 的剩余能量提高了很多, 网络的总能耗也大为降低, 说明本文提出的算法在节能性方面是良好的。

表 3 MEDR 转发方式下簇首 A 的能耗

发送信息量	A 剩余能量	网络总能耗
2kbit	0.917J	0.029J
4kbit	0.914J	0.057J
6kbit	0.910J	0.086J
8kbit	0.907J	0.115J

接下来, 网络开始一段时间的稳定工作。当节点 B 的剩余能量为最初的 80%, 即 0.76J, 此时各节点的剩余能量如表 4 所示。

表 4 稳定工作后各节点剩余能量 (单位: J)

A	B	C	D	E	F	Sink	B'	C'	D'	E'	F'
0.76	0.76	0.58	0.68	0.69	0.53	∞	0.91	0.88	0.91	0.84	0.84

但是, 在算法的第 3 步规定, 节点能量降为原来的 80% 才对外发布剩余能量信息, 由于此时节点 B'~F' 的能量没有下降到原来的 80%, 因而还没有对外发布剩余能量信息, 其他节点保存的 B'~F' 的剩余能量信息仍为表 1 所示的值。

这时, 簇首 A 的数据库中, 节点 B 的剩余能量为 0.76J, 节点 B' 的剩余能量仍为原来的 0.93J。A

将选择 B' 作为下一跳节点, 根据所提出的路由算法, 新的路径为 $A \rightarrow B' \rightarrow C' \rightarrow D' \rightarrow E' \rightarrow F' \rightarrow \text{Sink}$ 。

6 结束语

本文提出了分簇算法中一种簇首至汇聚节点的路由算法, 算法在降低网络节点能耗、均衡节点能耗方面具有明显的效果。1) 降低了簇首的能耗, 也减轻了其他簇首的负担, 使网络有更长的稳定工作时间, 减少了簇首选举与成簇的次数, 从而节省了能量开销, 也提高了网络使用效率和吞吐率。2) 节点选择下一跳节点时, 选择了剩余能量大而且位置适当的节点, 即所选的转发节点与信息发送节点之间的距离能使 EDR 最小, 既均衡了节点能量, 又提高了节点发送的能量使用效率。3) 节点的剩余能量在下降到 80% 时才对外发布自己的剩余能量信息, 这样不会因频繁的信息交互而造成额外的能量开销。4) 算法能使节点的剩余能量趋于一种动态的平衡。

在节点选择下一跳转发节点时, 在综合考虑方位、距离、剩余能量等三方面的参数时, 今后的工作将继续深入研究如何选择下一跳节点能使网络的能耗进一步降低, 并使网络节点的剩余能量更能趋于平衡。另外, 算法中规定剩余能量下降到原来的 80% 时, 才对外发布能量信息, 这个门限值没有经过深入的论证, 这也是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
REN F Y, HUANG H N, LIN C. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
LI J Z, LI J B, SHI S F. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1721.
- [3] OUADOUDI Z, YOUSSEF F, DRISS A. Lifetime optimization for wireless sensor networks[A]. 2009 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications[C]. Rabat, Morocco, 2009. 816-820.
- [4] 孙利民, 李建中, 陈渝等. 无线传感器网络[M]. 清华大学出版社, 2005.05.
SUN L M, LI J Z, CHEN Y, et al. Wireless Sensor Networks[M]. Tsinghua University Press, 2005.
- [5] VIDYASAGAR P, ATIF S, ELIZABETH C. Wireless sensor networks: a survey[A]. 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops[C]. Bradford, United Kingdom, 2009.636-641.
- [6] PYARI M P, VIKAS B, MULGREW B. Energy efficient layout for a wireless sensor network using multi-objective particle swarm optimization[A]. Advance Computing Conference, IACC 2009 IEEE International[C]. Patiala, India, 2009. 65-70.
- [7] WENDI R H, ANANTHA C, HARI B. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences[C]. Hawaii, USA, 2000. 1-10.
- [8] 熊科. 簇头非均匀分布的无线传感器网络分簇算法研究[D]. 中南大学, 2008.
XIONG K. Researching of Clustering Routing Algorithm of Uneven Distributed Cluster Heads in Wireless Sensor Networks[D]. Central South University, 2008.
- [9] 冯健胜. 基于 LEACH 和 WMC 的无线传感器网络路由协议的研究与优化[D]. 暨南大学, 2008.
FENG J S. Researching and Optimizing of Routing Protocols in Wireless Sensor Network Based on LEACH and WMC[D]. Jinan University, 2008.
- [10] 杜治高, 钱德沛, 刘轶. 无线传感器网络中的地址分配协议[J]. 软件学报, 2009.10, 20(10): 2787-2798.
DU Z G, QIAN D P, LIU Y. Addressing Protocols for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Software, 2009, 20(10): 2787-2798.
- [11] MURAD N M. Low energy clustering adaptation protocol for an adhoc wireless sensor network[A]. Proceedings of the 2009 Conference on Wireless Telecommunications Symposium[C]. Prague, Czech Republic, 2009. 136-142.
- [12] JAE D Y, KYUNG T K, BO Y J, et al. An energy efficient chain-based clustering routing protocol for wireless sensor networks[A]. 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops[C]. Bradford, United Kingdom, 2009. 383-388.
- [13] ASFANDYAR K, AZWEEN B A, ATIQU R. Data delivery optimization by efficient cluster head selection of wireless sensor network[A]. 2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications(CSPA)[C]. Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.186-190.

作者简介:



郭书城 (1978-), 男, 河北永清人, 装备指挥技术学院博士生, 主要研究方向为空间信息对抗、无线网络通信。

卢昱 (1960-), 男, 河南开封人, 博士, 军械工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为空间信息对抗、计算机网络安全。

许定根 (1981-), 男, 安徽六安人, 装备指挥技术学院博士生, 主要研究方向为空间通信与信息系统。