

一种新的基于分簇的无线传感器网络多跳节能路由协议

刘铁流, 巫咏群

(南京工业大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 针对在 LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy) 协议中, 所有节点均通过一跳通信将数据传输到簇头节点使簇头能耗太大而过快衰竭死亡的问题, 提出了一种新的分簇的无线传感器网络多跳节能路由协议. 簇头之间采用多跳方式将数据传送到基站, 避免了单跳通信簇头节点能量消耗过大的问题. 利用 NS-2 (network simulator-version 2) 的仿真结果表明该算法优于 LEACH, 能有效地降低节点的能耗, 延长网络生命周期.

关键词: 无线传感器网络; 分簇; LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy); 多跳路由; 网络生命周期
中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-0411(2012)-01-0027-06

A New Energy-Saving Multi-Hop Routing Protocol Based on Clustering for Wireless Sensor Network

LIU Tieliu, WU Yongqun

(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: For the problem in the LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy) protocol that the cluster heads die early caused by too much energy consumption of the cluster heads as the result of the one-hop transmission way from nodes to the heads, a new energy-saving multi-hop routing protocol based on clustering is proposed. Cluster heads transmit data to the base station in the multi-hop way to avoid the problem that cluster heads consume excessive energy by one hop. Simulation results based on NS-2 (network simulator-version 2) show that the algorithm does better than LEACH, and can lower the energy consumption of the node effectively and prolong the network's lifetime.

Keywords: wireless sensor network; clustering; LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy); multi-hop route; network lifetime

1 引言 (Introduction)

随着低功耗无线电通信技术、嵌入式计算技术和微型传感器等技术的飞速发展和日益成熟, 大量低成本的微型传感器可以通过无线链路自组织成为无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN)^[1]. 它们被布置在一个特定的区域内, 形成一个无线网络, 其目的是协作地实时监测、感知和采集网络覆盖区域中的各种信息, 并发布给观察者^[2]. 无线传感器网络具有展开快速、抗毁性强等特点, 可广泛应用于军事、工业、交通、环保等领域, 引起了人们广泛关注^[3-4].

在 WSN 体系结构中, 网络层路由技术对无线传感器网络性能好坏有着重要的影响. 在 WSN 不断发展的基础上, 研究人员提出了很多路由协议. 从网络拓扑结构的角度的大体把它们分为 2 类: 平面路由协议和层次路由协议.

在平面路由协议中, 所有网络节点的地位是平等的, 节点具有相同的功能, 不存在等级和层次差异. 在此类协议中, 目的节点 (sink) 向被监测区域的源节点 (source) 发出查询命令; 被监测区域内的节点收到查询命令后, 向目的节点发送监测数据. 平面路由的优点是网络中所有节点地位均相等, 不易产生瓶颈效应, 算法简单, 易于实现, 因此具有较好的健壮性. 典型的平面路由算法有 Flooding^[5]、DD (directed diffusion)^[6]、SPIN (sensor protocol for information via negotiation)^[7]、Rumor Routing^[8]、SAR (sequential assignment routing)^[9]. 但平面路由对网络动态变化的反应速度较慢.

在分簇式路由协议中, 网络通常被划分为簇 (cluster). 每个簇由一个簇头 (cluster head) 和多个簇内成员 (cluster member) 组成, 低一级网络的簇头是高一级网络中的簇内成员, 由最高层的簇头与基站 (base station, BS) 通信. 分簇算法 LEACH^[10]

是 WSN 中最早提出的分簇路由协议. 它的成簇思想贯穿于其后发展出来的很多分簇路由协议中, 如 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)^[11]、HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering)^[12] 等.

本文在分析了经典的 LEACH 分簇路由协议和现有基于 LEACH 算法改进的分簇路由协议的优缺点的基础上, 设计了一种新的基于分簇的无线传感器网络多跳节能路由算法. 在 LEACH 协议中, 由于所有簇头均通过单跳路由直接与基站通信, 导致离基站较远的簇头能耗过大而较早死亡. 本文在簇头之间形成一个多跳的最优路径通向基站, 从而减少了节点的发送能量消耗. 通过 NS-2 仿真实验表明, 该算法能有效地均衡节点的能耗, 延长了传感器网络的寿命.

2 现有的分簇算法分析 (Analysis on existing clustering algorithms)

分簇算法是无线传感器网络中实行分层路由所采用的一种重要方法. 目前, 在无线自组网 (wireless ad hoc network) 中, 许多分簇算法已用于实施层次路由协议. 而在无线传感器网络中, 分簇算法仍处于研究阶段.

2.1 LEACH 协议

LEACH 算法是一种自适应分簇拓扑算法, 它的执行过程是周期性的, 每轮循环分为簇的建立阶段和稳定的数据通信阶段^[13]. 簇的建立过程又可以分成 4 个阶段: 簇头节点的选择、簇头节点的广播、簇的建立和调度机制的生成, 如图 1 所示.

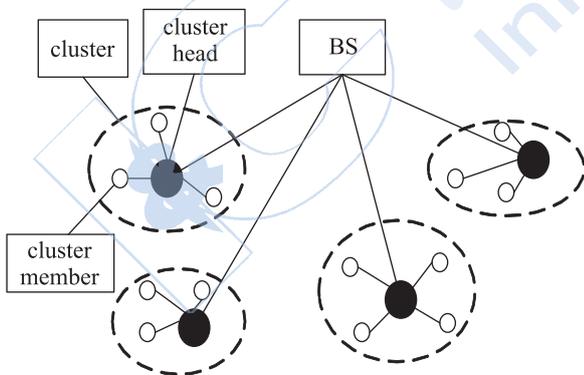


图 1 LEACH 路由协议拓扑结构

Fig.1 Topological structure of LEACH routing protocol

LEACH 算法首先要选举簇头, 由每轮中簇头的数量和节点是否已经担当过簇头来决定每个节点当选簇头的资格. 选举簇头的方法是: 传感器节点产生一个 $[0, 1]$ 之间的随机数, 如果这个随机数小于某个阈值 $T(n)$, 则发布自己是簇头的公告消息. 在每

轮循环中, 对于已经当选过簇头的节点, 把 $T(n)$ 设置为 0, 这样该节点就不会再次当选为簇头. 对于未当选过簇头的节点, 则将以 $T(n)$ 概率当选. 随着当选过簇头的节点数目增加, 剩余节点当选簇头的阈值 $T(n)$ 随之增大, 节点产生小于 $T(n)$ 的随机数的概率随之增大, 节点当选簇头的概率增大. 当只剩下一个节点未当选时, $T(n) = 1$, 表示这个节点一定当选. 阈值 $T(n)$ 可表示为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1} - p \times f_{\text{mod}}, & n \notin G \\ 0, & n \in G \end{cases}$$

其中, p 是簇头在所有节点中所占的百分比, r 是选举轮数, G 是第 r 轮之前尚未当过簇头的节点集合, n 表示某节点, f_{mod} 表示 r 对 $\frac{1}{p}$ 取余.

选举得到簇头后, 便开始了数据传输阶段. 在这个阶段, 节点持续采集所监测数据, 并在其相应通信时隙将数据传送给簇头节点. 在不发送数据时, 节点关闭以节约能量. 簇头节点接收完所有成员节点发送的数据后, 将多个数据融合处理成一个数据, 然后发送给基站. 持续工作一段时间以后, 整个网络进入下一轮工作周期, 重新选择簇头, 成簇, 数据传输.

LEACH 算法实现简单, 自适应性强. 同时, 周期性地选择让每个节点担当簇头, 平均了整个网络的能量消耗, 与平面路由相比延长了网络生存时间. 然而其中也存在很多问题: 首先, 它在选取簇头时并没有考虑节点的剩余能量. 由于每轮都是随机选取簇头, 有可能选取到的某个节点能量已经很低, 将其再作为簇头后会因能耗太大而过快衰竭死亡, 导致通信失效, 信息丢失. 其次, 簇头都是采用单跳方式传送数据, 与基站进行直接通信, 由于簇头节点的位置不均匀, 某些簇头不得不传输较远的距离与基站通信, 导致较大的能量损耗.

2.2 其它改进的 LEACH 算法

目前, 针对 LEACH 算法中的一些问题提出了很多改进的算法.

LEACH-C (LEACH-centralized) 和 LEACH-F (LEACH-fixed)^[10] 都是集中式的簇头产生算法, 由基站负责挑选簇头. LEACH-C 算法的主要思想是: 在每轮开始时, 各个节点把自身位置和当前能量报告给基站, 能量高于平均值的节点成为候选簇头; 然后, 采用模拟退火算法从候选节点中选出数量合适且位置最优的节点成为簇头; 最后, 基站把分簇结果广播给每个节点. LEACH-C 算法选出的每轮簇头数量稳定且分布均匀, 性能优于 LEACH 算法, 但

它需要网络的全局信息,可扩展性差. LEACH-F 算法簇的形成与 LEACH-C 相同,并且基站为每个簇生成一个簇头列表,指示簇内节点轮流当选簇头的顺序.最大的优点就是无须每轮循环都构造簇,减少了构造簇的开销.但是,LEACH-F 并不适合真实的网络应用,因为它不能动态处理节点的加入、退出和移动.同时,它还增加了簇间的信号干扰.

PEGASIS (power-efficient gathering in sensor information systems) 算法按照距离最短的原则,通过贪婪算法将所有的节点组织成链状,并随机选择一个节点作为簇头,链两端数据沿链传输到簇头,并在传输过程中进行融合,最后由簇头将数据发送给基站^[14].由于每个节点都以最小功率发送数据,它比 LEACH 和 LEACH-C 更能延长网络.但 PEGASIS 需要全局的地理位置信息,并且数据沿一条链传输,具有很大的时延.

3 改进算法 (An improved algorithm)

3.1 LEACH-MR 算法设计思想

LEACH 算法中簇头与基站通过单跳路由方式直接通信很容易造成距离基站远的簇头消耗过多能量,过快死亡,大大缩短了网络生存时间.因此本文提出一种改进的分簇多跳节能路由协议 (LEACH-MR),不仅考虑到候选节点的剩余能量,而且在簇头选择下一跳节点时,挑选最佳的多跳路径进行通信,更有利于节点节约能量,延长整个网络的生命周期.

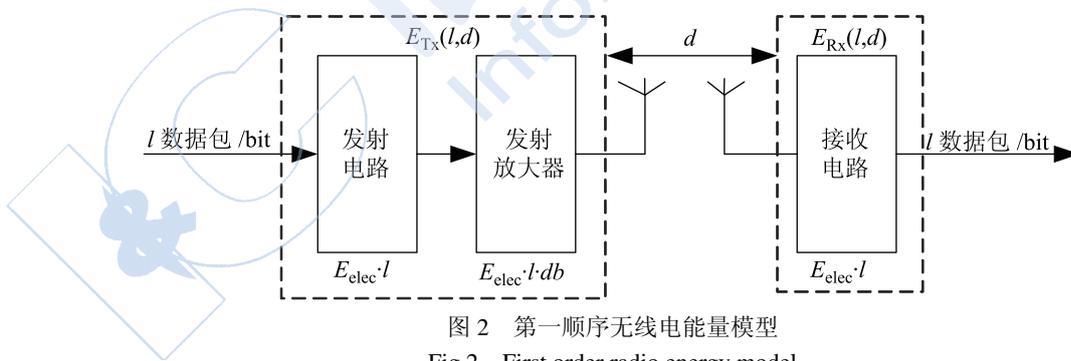


图2 第一顺序无线电能量模型

Fig.2 First order radio energy model

LEACH-MR 算法使用的能量模型是第一顺序无线电能量模型 (first order radio energy model),如图2所示.当发送节点和接收节点之间的距离 $d < d_0$ 时,采用自由空间模型,发射功率呈 d^2 衰减;当发送节点和接收节点之间的距离 $d \geq d_0$ 时,采用多路径衰减模型,发射功率呈 d^4 衰减.节点发射 l 数据(单位: bit)到距离为 d 的位置,消耗的能量由发射电路和功率放大耗损两部分组成,即

3.2 网络模型及通信模型

网络由 N 个传感器节点随机均匀分布在一个矩形区域 $M \times M$ 内,并且假设传感器网络具有如下性质:

(1) 传感器网络为高密度静态网络,基站部署在方形观测区域 A 的外侧,传感器节点和基站部署后均不再发生位置移动,且基站唯一.

(2) 所有的节点都是同构的,均具备数据聚合的能力.

(3) 每个传感器节点都有一个唯一的标识 (ID).

(4) 链路是对称的.若已知发送方的发射功率,接收方可以根据信号的强度计算二者间距离的近似值.

(5) 节点可以根据到信号接收方距离的远近调节发射功率以节省能量.

在无线传输中,发射功率随着传输距离的增大而呈指数衰减.文 [15] 提出了两种信道模型:自由空间 (free space) 模型和多路径衰减 (multi-path fading) 模型.根据发送节点和接收节点之间距离的不同,采用不同的信道传输模型.如果接收节点和发送节点之间的距离小于或等于某个临界值 d_0 ,则为自由空间模型;否则,为多路径衰减模型.这个临界值 d_0 的定义式为

$$d_0 = \frac{4\pi\sqrt{Lh_r h_t}}{\lambda}$$

其中, L 表示传输损耗, h_r 表示接收者天线的高度, h_t 表示发送者天线高度, λ 表示波长.

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

其中, E_{Tx} 为发送电路的耗损能量, E_{elec} 表示发射电路的能耗.若传输距离小于阈值 d_0 ,功率放大耗损采用自由空间模型;当传输距离大于等于阈值 d_0 时,采用多路径衰减模型,即发送数据的能耗与距离的4次方成正比. ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为这两种模型中功

率放大所需的能量。

节点接收 l 比特的数据消耗的能量为

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx} \cdot l$$

其中, E_{Rx} 为接收电路的耗损能量, 仅由电路耗损引起。

3.3 LEACH-MR 算法描述

LEACH-MR 协议算法采用了 LEACH 协议中轮的思想, 按周期执行, 每个轮也分成 2 个阶段: 簇的建立阶段和传输数据的稳定阶段。在簇的建立阶段, 先从所有节点选出数目较多的候选簇头, 再从这些候选簇头中根据剩余能量和簇头的广播半径来选择簇头节点, 由簇头节点给簇内成员分配 TDMA (time division multiple access) 时隙, 同时在簇头节点之间根据权值大小建立路由表。在数据传输阶段, 按分配好的 TDMA 时隙将数据传送到簇头节点, 簇头节点将数据简单融合后按照路由表传送到其下一跳路由簇头节点, 如此直至基站。为避免频繁建簇的能耗, 数据的传输阶段时间要较长一点。节点根据接收信号的强度计算出自己到基站的近似距离 D_{BS} 。获得这个距离不仅有助于节点向基站传输数据时选择合适的发送功率, 而且它还是簇头选择下一跳路由的必需信息之一。各簇头节点根据自身的剩余能量和离基站的距离等本地信息设定一个权值 W , 基站负责周期性地计算每轮结束后 (第 $r-1$ 轮) 的网络平均能量 \bar{E} 。

簇头节点竞争办法和 LEACH 算法是相同的, 节点竞争结束后, 未参与竞争的普通节点从睡眠状态唤醒, 竞选产生的簇头用相同的功率向外广播建簇信息 HEAD_MSG, 其内容包括簇头的 ID 号以及剩余能量等, 普通节点选择簇内通信代价最小也即接收信号强度最强的簇头作为自己的簇头加入该簇, 随即发送 JOIN_MSG 信息给簇头。这样, 整个簇的建立便顺利完成。

3.4 LEACH-MR 多跳路由算法设计

在簇头向外广播消息通知普通节点的同时, 与它邻近的邻居簇头也会收到消息, 其它簇头根据信号强度来计算与此簇头的距离 $d(S_i, S_j)$, 并将此簇头作为自己的邻居簇头临时储存。

如何从邻居簇头集合中选择最佳的下一跳路径是簇间路由设计的关键。用 $d(S_i, B)$ 代表 S_i 到 BS 的距离, $S_{i,Ere}$ 为 S_i 节点的剩余能量, 假如节点 i 选择节点 j 作为传输数据的中继节点, 则此链路的功耗为 $d^2(S_j, B) + d^2(S_i, S_j)$, 和簇头 S_i 直接将数据传给

基站的链路功耗代价 $d^2(S_i, B)$ 相比, 只有满足

$$d^2(S_j, B) + d^2(S_i, S_j) < d^2(S_i, B) \quad (1)$$

中继传输才能节省节点能量消耗。

在选择下一跳中继簇头传输数据至基站时, LEACH 算法只是随机地分配节点来充当簇头而未考虑其节点的剩余能量, 而 LEACH-MR 算法中考虑了节点的剩余能量要满足

$$S_{j,Ere} > \bar{E} \quad (2)$$

引入权值变量参数, 权值公式定义如下

$$W_j = \frac{S_{j,Ere}}{\bar{E}} + \frac{d^2(S_i, B)}{d^2(S_j, B) + d^2(S_i, S_j)}$$

其中 $d(S_i, S_j)$ 为第 i 簇头到第 j 簇头的距离, \bar{E} 为上一轮的平均能量, $S_{j,Ere}$ 是节点 j 的剩余能量。

由式 (1)、(2) 可以看出, 邻居簇头集合中选择最佳的下一跳路径的方法是: 簇头 S_i 计算路由邻居簇头集合的权值 W_j , 然后从权值 $W_j > 2$ 的邻居簇头中选择下一跳路由, 依照权值大小的顺序来选择该簇头的下一跳路由; 路由顺序排列在下一跳路由表中, 权值最大的簇头优先作为下一跳路由, 若发现权值相等的情况, 则根据节点的 ID 大小来选择父节点。这就形成了簇头节点间多跳通信的路径。簇头节点沿着路径将收集到的数据进行融合并传送给父节点, 一级一级传递, 直至数据传送到基站。其中, 路由表中只放 3 个路由项, 依照权值 W_j 的大小顺序存放。

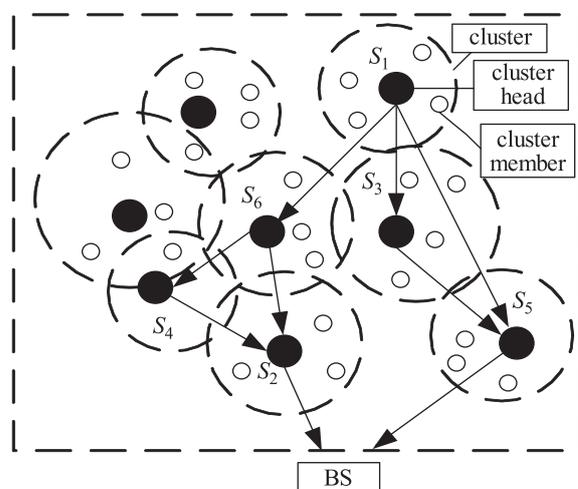


图3 簇头 1 的路由选择

Fig.3 Route selection of cluster-head 1

该簇头会选择 5 作为中继节点, 簇头 6 和 3 作为候选路由存放在路由表中。通过限定其路由候选节点的能量条件, 避免了使用剩余能量很小的节点

进行中继转发, 导致其能量消耗过快而死亡, 即避免“热点”的出现; 同时, 通过限定链路能量开销来优化网络能耗。

在实际过程中, 为避免“热点”问题, 在中继簇头中引入一个合理的能量变化阈值 ΔQ 。当超过这个阈值时, 该节点就向邻居簇头广播一条能量消息, 告知不再作为中继节点。邻居簇头收到消息后, 就会将此节点在自己的路由表中删除, 同时选择下一个路由项作为下一跳路由。例如, 在转发过程中, 中继簇头 5 能量变化高于 ΔQ 时, 就会广播一个能量变化消息, 邻居簇头 1 收到这个消息后, 就会在路由表中将节点 5 删除, 节点 1 就会选择顺序号为 2 的路由项即簇头 6 作为下一跳路由。如果路由表中的 3 个路由项的能量变化都超过这个阈值 ΔQ , 那么路由表即为空, 簇头 1 就不能利用中继节点转发, 而是自己直接与基站通信。

在路由选择结束后, 每个簇头节点就生成了一张下一跳路由表, 簇头节点之间组成了一棵以基站为根节点的树, 数据沿着基站的方向在树枝上传送。

4 仿真结果及性能分析 (Simulation results and performance analysis)

4.1 场景设置

本文在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的矩形区域内随机放置 100 个传感器节点作为仿真环境, 基站坐标为 (0, 200), 节点初始能量为 0.5J , 每次发送的数据包大小为 2000bit , 其它参数取发射电路消耗的能量 $E_{\text{elec}} = 50\text{nJ/bit}$, 功率放大器消耗的能量 $\epsilon_{\text{fs}} = 100\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^{-2})$, 簇头融合数据消耗的能量 $E_{\text{df}} = 50\text{pJ/bit}$, 信号放大器的放大倍数 $\epsilon_{\text{mp}} = 0.0013\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^{-4})$, 信号传输距离 $d_0 = 87\text{m}$ 。

4.2 结果与分析

利用 NS-2 仿真平台, 对 LEACH 和 LEACH-MR 算法进行了比较。

图 4 表明, LEACH-MR 算法簇头的能量消耗更均衡。因为 LEACH-MR 算法采用多跳路由将数据发送到基站, 与 LEACH 算法相比显著降低了簇头能量消耗。

由图 5 可知, LEACH-MR 网络生存时间要比 LEACH 算法的时间长, 同时曲线基本与水平轴平行。这是因为 LEACH-MR 算法使网络能耗均匀分配到每个节点上, 因此第一个和最后一个节点死亡的时间非常接近。

图 6 显示了网络寿命与基站距离之间的关系。

当基站远离被监测区域时, 对 LEACH-MR 网络寿命影响不大。这是因为簇头之间采用多跳路由方式与基站进行通信, 而在 LEACH 协议中, 所有簇头都是采用单跳方式直接与基站通信, 由于距离过大而导致节点能量过快损耗, 缩短了网络生命周期。

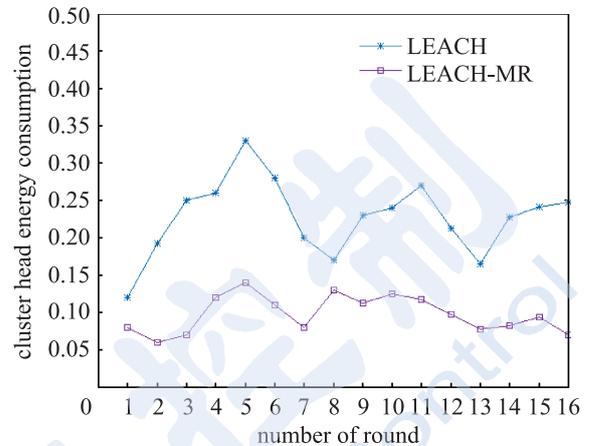


图 4 簇头的能量消耗

Fig.4 Energy consumption of cluster head

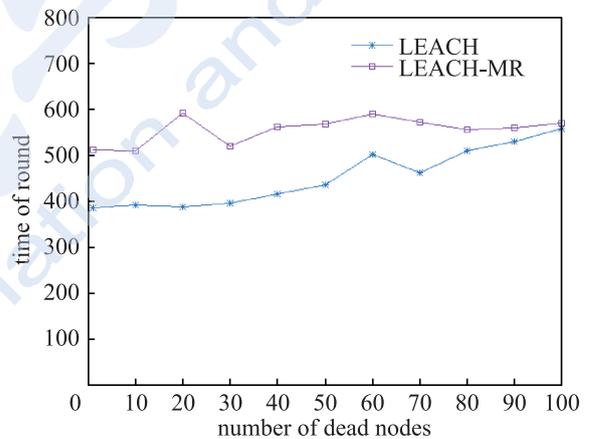


图 5 死亡节点数与时间关系

Fig.5 Relationship between number of dead nodes and time

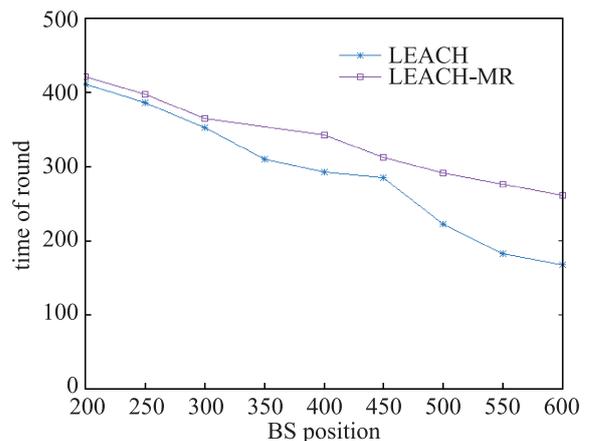


图 6 基站距离与网络寿命关系

Fig.6 Relationship between base station distance and network lifetime

5 结束语 (Conclusion)

本文研究了无线传感器网络数据在传输过程中选用多跳路由通信的能量消耗情况. 结果表明多跳路由比单跳路由更节省能量. 由于继承了 LEACH 按轮选举簇头的特点, 使得能量消耗均衡分布在各节点上, 而且对簇头节点采用了多跳路由算法, 弥补了 LEACH 算法单跳的不足, 从而使网络生命周期得到延长. 本文算法中没有提到最优簇头个数的选择, 以及靠近基站的簇头由于多跳通信带来的能耗负载过大而较快死亡的问题, 这 2 个方面对网络生命周期也会产生很大影响, 因此, 今后将会从这 2 个方面展开更深一步的研究.

参考文献 (References)

- [1] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2008, 10(8): 102-114.
- [2] Cullar D, Estrin D, Strvastaya M. Overview of sensor network[J]. Computer, 2004, 37(8): 41-49.
- [3] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述 [J]. 通信学报, 2004, 25(4): 114-124.
Ma Z C, Sun Y N, Mei T. Survey on wireless sensors network[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(4): 114-124.
- [4] 任丰源, 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.
- [5] Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks[J]. Networks, 1998, 18(4): 319-349.
- [6] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [7] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the ACM MobiCom'99. New York, NY, USA: ACM, 1999: 174-185.
- [8] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks[C]//Proceedings of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications. New York, NY, USA: ACM, 2002: 22-31.
- [9] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5):16-27.
- [10] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[D]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [11] Manjeshwar A, Grawal D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 2009-2015.
- [12] 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): 660-669.
- [13] 孙利民, 叶驰, 廖勇. 传感器网络的路由机制 [J]. 计算机科学, 2004, 31(1): 54-57.
Sun L M, Ye C, Liao Y. Routing mechanism in sensor networks[J]. Computer Science, 2004, 31(1): 54-57.
- [14] 龚本灿, 李腊元, 蒋廷耀, 等. 一种能量均衡的无线传感器网络分簇算法 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(11): 3424-3429.
Gong B C, Li L Y, Jiang T Y, et al. Energy-balanceable clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(11): 3424-3429.
- [15] Shepard T. A channel access scheme for large dense packet radio networks[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM 96'. New York, NY, USA: ACM, 1996: 219-230.

作者简介:

刘铁流 (1988-), 男, 硕士生. 研究领域为无线传感器网络, 信号与信息处理.

巫咏群 (1961-), 男, 副教授, 硕士生导师. 研究领域为无线传感器网络, 嵌入式系统开发等.