

一种基于前向感知因子的 WSN 能量均衡路由方法

张德干,赵晨鹏,李 光,明学超,郑 可

(1. 天津理工大学,天津市智能计算及软件新技术重点实验室,天津 300384;
2. 天津理工大学计算机视觉与系统省部共建教育部重点实验室,天津 300384)

摘 要: 无线传感网络由于受能量和通信能力的限制,为了保证感知数据的有效送达,路由方法(协议)的设计显得尤为关键.本文提出了一种基于前向感知因子的能量均衡路由协议 FAF-EBRP,它通过感知链路权重和前向区域内的能量密度来决定下一跳节点,并设计了相应的局部拓扑自发重构机制.通过实验对 FAF-EBRP 和 LEACH、EEUC 两个典型路由方法(协议)进行了比较,结果表明,FAF-EBRP 能使无线传感网络表现出更好的能量均衡性和更长的有效工作时间.

关键词: 无线传感网络;路由协议;前向感知因子;能量均衡

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)01-0113-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.01.018

A Kind of Routing Protocol Based on Forward-Aare Factor for Energy Balance

ZHANG De-gan, ZHAO Chen-peng, LI Guang, MING Xue-chao, ZHENG Ke

(1. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Computing & Novel software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
2. Key Laboratory of Computer Vision and System (TJUT), Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Due to the limited energy and communication ability of nodes in Wireless Sensor Network (WSN), it is especially important to design a good routing method (protocol) for WSN in order to make sensed data be transmitted to the receiver effectively. A kind of routing protocol based on Forward-Aware Factor for Energy Balance (FAF-EBRP) is proposed in this paper. In FAF-EBRP, the next-hop node is selected according to the awareness of link weight and forward energy density. Furthermore, a spontaneous reconstruction mechanism for local topology is designed additionally. Based on many experiments, FAF-EBRP is compared with classic LEACH and EEUC method. Experimental results show that FAF-EBRP outperforms LEACH and EEUC, which can balance the energy consumption, prolong the function lifetime of WSN.

Key words: wireless sensor networks; routing protocol; forward-aware Factor; energy balance

1 引言

无线传感网络^[1]是大量微传感器通过单跳和多跳通信方式,自组织形成的无线网络系统,每个传感器均具有自我控制、传感、处理计算、无线通信的能力及有限的能量,通过相互关联、合作,将目标区域内感知的信息数据发送给观察者处理.在传感器网络中每个传感器节点既是传感器又是路由器,其计算能力、存储能力、无线通信能力和电源供应都是有限的.因此在大型无线传感网络通信系统的研究中,网络拓扑的构造、路由算法和协议的设计是最为基础而关键的工作^[2].近年来,以能量均衡消耗、延长网络寿命、保持覆盖率和连通性等为

主要目标,多种机制被应用于无线传感网络的拓扑控制及路由设计中^[3].

本文研究的应用场景是用于静态数据收集和事件发现的大规模无线传感网络.以往路由研究中下一跳的选择主要是在全部邻接节点或圆形区域范围内进行能量分布的考量^[4],本文考虑到了能量布局的平衡性.对于无线传感网络中的数据传输机制进行详细分析,精确地量化了前向传输区域这一新概念,在该区域内定义了前向能量密度,它与链路权重共同构成了前向感知因子,提出了新的基于前向感知因子的能量均衡路由协议,从而提高了无线传感网络的数据传输的自组织性,并保证了能量的高效均衡利用,延长了网络的有效工作寿命.

2 相关路由方法

2.1 LEACH 协议

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 协议^[5], 是分层路由算法. 在 LEACH 协议中, 传感器节点被组织成簇的结构, 整个协议分为形成簇和稳定数据传输两个阶段. 簇结构中的簇首安排以 TDMA 的方式为簇内成员节点安排发送数据的次序. 阈值 $T(n)$ 计算方法见下式:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod 1/p)}, & n \in G \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中 P 是簇首占传感器节点总数的百分比, r 是当前的轮数, G 是当前轮中还未充当过簇首的节点的集合. LEACH 协议提出了成簇和簇首轮换的思想, 但 LEACH 中各簇的规模是随机的, 没有考虑“能量空洞”的问题, 邻近汇聚节点的节点能量消耗速度高于整网, 簇首的轮换未考虑到能量这一关键因素, 且簇首到汇聚节点之间无论远近直接采用单跳通信方式, 既增加了耗能也限制了网络的规模^[6].

2.2 EEUC 协议

EEUC (Energy Efficient Uneven Cluster) 协议^[7], 是一种不均匀成簇路由协议. 相比于 LEACH, 在选举簇首时 EEUC 不再采用无差异的竞争半径, 而是根据节点距离汇聚节点的远近设定不同的竞争半径 R_c :

$$R_c = \left(1 - c \frac{d_{\max} - d(s_i, DS)}{d_{\max} - d_{\min}} \right) R_c^0 \quad (2)$$

其中 d_{\max} 和 d_{\min} 分别是整网节点中到汇聚节点的最远距离和最近距离, $d(s_i, DS)$ 是传感器节点 s_i 到汇聚节点的直线距离, R_c^0 为节点竞争半径的最大值, c 的值根据竞争半径的取值范围在 0 至 1 之间选取^[8].

3 无线传感网络拓扑加权演化模型

BBV (Barrat-Barthélemy-Vespignani) 加权网络模型^[9-12]是加权网络理论研究中被广泛关注的一个模型, 其网络拓扑演化机制主要分为以下四个阶段: 网络的初始化、节点的更新、强度驱动的优先连接、节点强度及边权重的更新. 在 BBV 模型中, 新加入节点在全网中选择若干个已有节点并与之连接. 实际应用中由于传感器节点的通信距离受限, 无法实现与整个覆盖区域的任意节点相连接, 且需考虑能量优先的目标, 所以用局域世界理论进行模型的改进是必要的, 即只在新加入节点的特定通信距离覆盖的局部区域内进行新建连接的优化选择^[13,14].

4 基于前向感知因子的能量均衡路由协议 FAF-EBRP

本文对于无线传感网络中的数据传输机制进行详

细分析, 精确地量化了前向传输区域这一新概念, 在该区域内定义了前向能量密度, 它与链路权重共同构成了前向感知因子, 提出了新的基于前向感知因子的能量均衡路由协议, 从而提高了无线传感网络的数据传输的自组织性, 并保证了能量的高效均衡利用, 延长了网络的有效工作寿命.

4.1 模型的建立

定义 1 传感器节点 i 的前向传输区域 (Forward Transmission Area, FTA) 为 $FTA(i)$. 如图 1 所示, $\odot O_1$ 是以汇聚节点 Sink 为圆心, $d(i, \text{Sink})$ 为半径的圆形区域. $\odot O_2$ 是以 i 为圆心, d_{ip} 为半径的圆形区域, 则有:

$$FTA(i) = \odot O_1 \cap \odot O_2 \quad (3)$$

其中

$$d_{ip} = \max(d_{ij}), j \in N'(i)$$

$N(i)$ 是与传感器节点 i 之间有通信链路的节点的集合, $N'(i)$ 为前文 $N(i)$ 中与 i 之间有边存在的节点的集合 (如无特殊指出, 下文中邻居节点均指与节点之间有边存在的邻居节点).

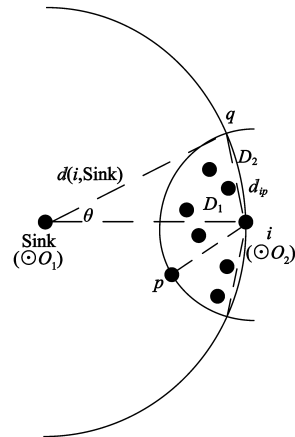


图1 前向传输区域示意图

本文的通信协议中, 根据汇聚节点的位置和最终数据流向, 采用前向传输区域取代以簇首为中心的整圆的局部路由和调度策略应用范围. 在图 1 的场景下, 过点 i 的 $\odot O_1$ 圆弧实际上排除了 i 向比自己距汇聚节点远的节点发送数据 (后向传输) 的可能, 这保证了不会有环路的出现; 过点 p 的 $\odot O_2$ 基于前一章中基于局域世界加权网络理论生成的拓扑, 包含了与点 i 直接相连的所有邻居节点. $FTA(i)$ 作为这同时满足这两个条件的区域, 在图 3 中表现为了两圆的重叠部分, 这个区域中包含了本文拓扑构造和路由策略设定下传感器节点 i 所有可能的下一条节点.

定理 1 前向传输区域 $FTA(i)$ 的面积 $S_{FTA}(i)$ 满足不等式:

$$\left(\frac{2}{3} \pi - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) [\max d_{ij}]^2 \leq S_{FTA}(i) < \frac{1}{2} \pi [\max(d_{ij})]^2 \quad (4)$$

证明 图 1 中, 设 $d(i, \text{Sink}) = d_1$, $d_{ip} = \max(d_{ij}) = d_2$, 扇形区域 D_1 的面积为 S_1 , 弓形区域 D_2 面积为 S_2 , 根据余弦定理可得:

$$\theta = \arccos\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2\right] \quad (5)$$

根据海伦定理可得:

$$S_{\Delta iq\text{Sink}} = \frac{1}{2} d_2 \sqrt{d_1^2 - \frac{1}{4} d_2^2} \quad (6)$$

$$\text{故 } S_1 = \frac{1}{4} d_2^2 (\pi - \theta) \quad (7)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} d_1^2 \theta - S_{\Delta iq\text{Sink}} \quad (8)$$

$$\text{所以 } S_{\text{FTA}}(i) = 2(S_1 + S_2) \quad (9)$$

即

$$S_{\text{FTA}}(i) = \frac{1}{2} \pi d_2^2 - d_2 \sqrt{d_1^2 - \frac{1}{4} d_2^2} + (d_1^2 - \frac{1}{2} d_2^2) \arccos\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2\right] \quad (10)$$

情形 1 如图 2 所示, 如果汇聚节点 Sink 在传感器 i 的邻接节点集合中, 无论 i 距离 Sink 远近, Sink 作为全网的最终信源, 都将是 i 邻居节点中距离 i 最远的一点, 此时 $d_1 = d_2$, 代入式 (10), 得到前向传输区域 $\text{FTA}(i)$ 的面积达到最小值为 $(2\pi/3 - \sqrt{3}/2) d_2^2$.

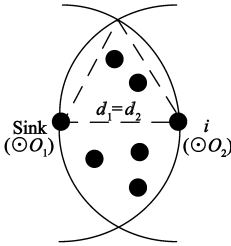


图 2 前向传输区域面积最小值示意图

情形 2 如图 3 所示, 传感器节点 i 距离汇聚节点距离 d_1 趋向于正无穷大时, 对式 (10) 求极限可得 $\text{FTA}(i)$ 的面积的最大值为 $\pi d_2^2/2$. 从另一个角度来看, 图中可以直观地观察到, 当 $\odot O_1$ 的半径无穷大时, 该圆经过 $\odot O_2$ 圆心的一段圆弧趋近于一条直线, 近似于将 $\odot O_2$ 平分, 故此时前向传输区域的面积可取极限为 $\odot O_2$ 面积的一半. 定理 1 得证.

引理 1 在本文的场景中, 前向传输区域 $\text{FTA}(i)$ 的面积 $S_{\text{FTA}}(i)$ 满足不等式:

$$0 < S_{\text{FTA}}(i) < \frac{1}{2} \pi d_0^2 \quad (11)$$

其中 d_0 为前文中设定的普通传感器节点的通信半径的上限.

证明 当传感器节点 i 无限接近汇聚节点 Sink 时, $\max(d_{ij})$ 即 d_2 近似等于 0, 故 $S_{\text{FTA}}(i)$ 最小值趋向于

0 而无法等于 0, 因为普通传感器节点的位置不能与汇聚节点的位置重合. 在距离 Sink 无限远的同时, 传感器节点 i 的通信半径取上限阈值 d_0 , 故 $S_{\text{FTA}}(i)$ 最大值趋向于 $\pi d_0^2/2$. 引理 1 得证.

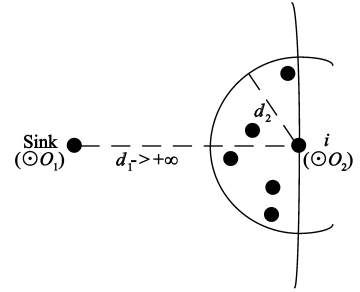


图 3 前向传输区域面积最大值示意图

定义 2 传感器节点的前向能量密度 (Forward Energy Density, FED) $\text{FED}(i)$ 为:

$$\text{FED}(i) = \frac{\sum_{j \in \text{FTA}(i)} E_j(t)}{S_{\text{FTA}}(i)} \quad (12)$$

其中 $E_j(t)$ 是 t 时刻传感器节点 j 具有的实时能量值, $\sum_{j \in \text{FTA}(i)} E_j(t)$ 表示在 i 的前向传输区域所有邻居节点的能量值总和.

引理 2 $t = 0$ 的网络初始时刻, 前向能量密度 $\text{FED}(i)$ 满足不等式:

$$\frac{2E_i(t=0)}{\pi d_0^2} < \text{FED}(i) < +\infty \quad (13)$$

其中 $E_i(t=0)$ 是 $t = 0$ 时刻所有传感器节点具有的共同能量初始值.

证明 图 3 的情况下, 如果传感器节点 i 的邻居节点只有一个, 且在距离 d_0 处, 则此时前向传输区域的范围由该邻居节点限定. 此时前向传输面积处于最大值, 而面积内的总能量处于最小值 (仅有一个节点的能量), 所以前向能量密度取最小值. 另一方面, 当传感器节点 i 无限接近汇聚节点时, $S_{\text{FTA}}(i)$ 趋近于 0, 所以此时前向能量密度取最大值, 且最大值趋向于正无穷. 引理 2 得证.

定义 3 从传感器节点 i 到节点 j 的通信链路的前向感知因子 (Forward-Aware Factor) $\text{FAF}(ij)$ 为:

$$\text{FAF}(ij) = \alpha \frac{\text{FED}(j)}{\sum_{j \in \text{FTA}(i)} \text{FED}(j)} + \beta \frac{w_{ij}}{\sum_{j \in \text{FTA}(i)} w_{ij}} \quad (14)$$

其中 $\sum_{j \in \text{FTA}(i)} \text{FED}(j)$ 是 i 的前向传输区域内所有邻居节点的前向能量密度之和, 边权重 w_{ij} 的定义为:

$$w_{ij}(t) = \frac{\zeta [E_i(t) E_j(t)]^\psi}{\{[d(i, j)]^2\}^\eta [T_{ij}(t)]^\xi} \quad (15)$$

其中 ζ, ψ, η, ξ 均为非负常数用作调和系数, $T_{ij}(t)$ 为 t

时刻时边(通信链路) e_{ij} 上可能承载的数据流量,设节点 i 为 i, j 两点中距离汇聚节点 Sink 较远的节点,则有:

$$T_{ij}(t) \sim f[d(i, \text{Sink}), t] \quad (16)$$

其中 $f[d(i, \text{Sink}), t]$ 是 $d(i, \text{Sink})$ 的减函数.

$\sum_{j \in \text{FTA}(i)} w_{ij}$ 是 i 的前向传输区域内所有链路的边权重之和, α, β 为正调和系数,且:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (17)$$

4.2 FAF-EBRP 协议的设计

FAF-EBRP (Forward-Aware Factor Based Energy-Balanced Routing Protocol) 协议,即基于前向感知因子的无线传感网络能量平衡路由协议,该协议的设计是在前文中得到的拓扑结构基础上展开的,应用场景是静态数据的采集或者事件的监测.式(14)中加法式第一项从下跳节点的转发区域角度出发,考虑下跳节点的前向能量密度在所有备选邻居节点中所占的比值.下一跳可选节点数量多或可选节点的能量状况好,都能使前向能量密度相对较大,因此节点的能量密度所占比值大说明其更有能力承担数据的转发.第二项从转发通信链路的质量角度出发,考虑转发链路权重在所有备选链路中所占的比值.这一项更直接地反映了与备选节点之间通信链路的转发能力,可以用来直接选择下一跳节点.由于式(15)中对于边权重的定义包含了两个节点的能量、链路长度和负载等参数,因此前向感知因子涵盖了“点线面”三大类信息,结合了现有链路的评价和前向传输环境的感知,这使得基于前向感知因子驱动的路由算法能够综合考虑多方面因素,得到更能平衡能量消耗的解决方案.

路由算法可分为以下步骤:

(1) 选取需要转发信息的传感器节点 i 前向传输区域 $\text{FTA}(i)$ 和下一跳候选节点的集合.首先根据以 d_0 为通信半径,确定与 i 之间有边存在的邻居节点集合 $N'(i)$,在其中选出距离汇聚节点比 i 近的节点,则这些节点组成了 i 的下一跳候选节点集合,同时由距 i 最远的节点可以确定 $\text{FTA}(i)$.

(2) 确定每个下一跳候选节点的前向传输区域面积 $\text{FTA}(j)$ 和区域面积 $S_{\text{FTA}}(j)$. $\text{FTA}(j)$ 的选取方法和 $\text{FTA}(i)$ 类似,在前向传输区域节点集合中选出距 j 最远的节点,将该最远距离和 j 距离汇聚节点的距离代入式(10),计算出前向传输区域面积 $S_{\text{FTA}}(j)$.

(3) 计算每个下一跳候选节点的前向能量密度 $\text{FED}(j)$.对 $\text{FTA}(j)$ 内节点的节点剩余能量求和值,根据式(13)计算出 $\text{FED}(j)$.

(4) 根据式(15)求得 i 与每一个候选下跳节点之间的边权重值.

(5) 将步骤(3)和(4)中的参量代入式(14),求出每

条候选转发链路的前向感知因子,根据式(18)选择下一跳路由由节点.

$$j = \max_j [\text{FAF}(ij)] \quad (18)$$

(6) 若以 d_0 为半径确定的集合 $N'(i)$ 中没有比 i 更靠近汇聚节点的传感器节点存在,则放弃建立 i 的前向传输区域,直接在 $N'(i)$ 中比较各节点的前向感知因子,根据式(16)选择下一跳路由由节点继续数据的传输.若 $N'(i)$ 无传感器节点存在,则 i 放弃自由空间模型的通信半径阈值 d_0 ,增强发射功率,使通信半径超出 d_0 ,直至联系到下一跳节点为止,若无法联系到任何节点,则抛弃该数据包.

(7) 当前向传输节点集合内包含汇聚节点时,直接将数据转发给汇聚节点,完成整个数据传输过程.

FAF-EBRP 协议的节点路由表的组织结构包括如下信息:

Neighbor_ID---各邻居节点的唯一标识.

Energy_ID---各邻居节点的剩余能量.

Distance_ID---距离各邻居节点的距离.

FDE_ID---各邻居节点的前向能量密度.

上述这些信息可以保证方便得到实现 FAF-EBRP 算法所需的各个参数.与邻居节点之间的各边权重可由通信发起节点根据两节点能量和相隔距离计算得出,而邻居节点各自的前向能量密度则自行计算得出,这样可以避免计算工作全部由发起节点承担的情况出现,也就是说在收到数据转发选拔请求时,每个传感器节点的存储器内不仅要有本节点的 ID、实时能量、到汇聚节点距离等信息,还应存有该时刻计算得出的前向能量密度值,并迅速反馈给选拔请求发起者.

4.3 基于 FAF-EBRP 协议和节点强度的局部拓扑重构机制

无线传感网络全局信息受限,且全局拓扑同时发生变化可能会影响信息的感知,同时能量不均衡区域引起的全局拓扑改变对于能量仍较均衡的区域是一种能量的无谓消耗,因此该拓扑重连机制只限于局部网络是必要的.以往的局部拓扑重构机制,不管是全局同步变化还是异步的簇内拓扑调整,或是人为规定拓扑需要重构的时间间隔,或是需要不断监测重要节点的能量是否达到设定的阈值,或是单纯与周围节点能量情况进行比较后触发重构机制.这些机制虽然考虑到了能量这一无线传感网络重要特性,但设置单一阈值的局限性和无条件侦听能量信息的耗能也是应该考虑在内的.本文从无线传感网络另一重要特性“数据为中心”出发,基于 FAF-EBRP 协议设计一种节点强度驱动的局部拓扑重构综合策略来弥补以上方法的不足.

该局部拓扑重构算法步骤如下:

(1) FAF-EBRP 协议中节点 i 每次完成数据的转发后,判断本次传输的下跳节点 j 的节点强度是否低于了前向传输区域内所有传感器节点强度的平均值,如果低于了该平均值,则在节点 i 的前向传输区域内启动节点强度驱动的链路重连机制。

(2) 启动拓扑重构机制之前,撤销节点 i 与 j 之间建立的边,同时将 j 从前向传输区域中候选重连接节点集合中排除形成新候选节点集合 $FTA'(i)$,并在 $FTA'(i)$ 内进行该边的重连,连接概率公式为:

$$\prod_{i \rightarrow j} = \frac{s_j}{\sum_{j \in FTA'(i)} s_j} \quad (19)$$

(3) 在步骤(2)中被排除在重连候选集合之外的节点在下次数据传输完成后的有可能进行的拓扑重构中可以继续成为候选节点,且原边的撤销并不影响该节点的重连优先连接计算中强度和的计算,也就是说虽然撤销了该边,但计算强度和时仍需计算该节点的实时强度值。

5 实验对比和量化分析

本文为比较 LEACH、EEUC 和 FAF-EBRP 三种路由协议,采用了如下两个对比参数:能量平衡因子(Energy-Balanced Factor, EBF),节点存活数目(Number of Last-Surviving Nodes, NLN)和网络有效工作时间(Function Lifetime, FL)。

能量平衡因子 EBF 为衡量路由协议的能量消耗平衡性。网络有效工作时间 FL 的定义与节点存活数目直接相关,不同的场景对于 FL 的要求和定义差异很大,某些场景要求没有任何节点死亡才能正常工作,而另一些要求一定比例的传感器节点存活,网络即可正常工作。在本文的实验中,对于 FL 的定义考虑两种情况,一是从网络开始工作到首个死亡节点出现之间间隔的时间,二是从网络开始工作到半数节点死亡之间间隔的时间。

为了方便直观地与 LEACH、EEUC 等簇首轮换协议进行对比,FAF-EBRP 协议也以“轮”(round)为时间刻度。图 4,图 5 分别给出了三种协议在 350 轮中 EBF 和 NLN 变化趋势的对比。

图 4 中可以看出,起始时刻各节点能量一致,标准差为零,EBF 曲线从原点开始生长。LEACH 协议由于能量消耗的均衡性差,EBF 增长很快,但由于节点能量的绝对值不断降低,标准差的增长速度逐渐放缓,到 135 轮附近到达顶点,此时距离理论最大值 1 还有一段距离,之后快速下降,所有节点能量全部消耗完毕后,EBF 重新归零。EEUC 协议由于不均匀成簇,能耗相对均匀,EBF 前期的增长速度明显低于 LEACH,中期维持了一

段时间的稳定,下降区间也较平缓,归零点在 LEACH 之后,综合表现优于 LEACH。FAF-EBRP 协议 EBF 最初有一小段时间的小幅上升,之后在 250 轮之前均稳定于 0.1 至 0.2 的区间,整个稳定的过程中有微小的波动,说明虽然数据的产生的随机性有可能引起能耗的不均衡,但 FAF-EBRP 路由算法能够发挥作用在较短时间内调整拓扑并优化路由,恢复能量分布的平衡性。250 轮之后由于能量绝对消耗造成拓扑的变化,部分节点开始采用超出 d_0 的通信半径,能耗不平衡性增加,但此时实际上整网能量基本已经均匀耗尽,在高点短暂维持后,EBF 缓慢归零。可以看出在 350 轮内的时间过程中,FAF-EBRP 协议 EBF 值变化平缓,长时间维持在较低的水平,展现出了比 LEACH 和 EEUC 两种成簇协议更好的能耗均衡性。

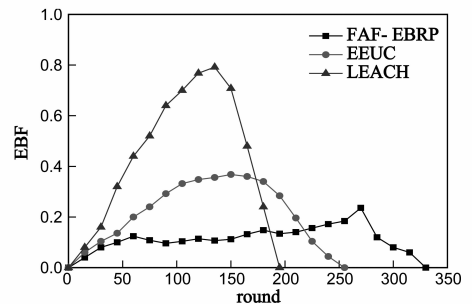


图4 三种协议 EBF 对比

图 5 给出的是三种协议下网络存活节点数随轮数增长的变化对比图。从首个死亡节点出现时间来看,LEACH 出现在 70 轮左右,EEUC 出现在 170 轮左右,而 FAF-EBRP 直到 300 轮左右才出现首个死亡节点。能量消耗越均匀,各传感器节点剩余能量基本保持一致,所以死亡时间越集中,反应在图 5 中,FAF-EBRP 协议节点数目减少的过程很迅速,EEUC 相对缓慢,而 LEACH 该过程开始的最早,持续的时间也最长。当 EEUC 最后一个节点死亡时,FAF-EBRP 仍然未出现死亡节点,可见不论 FL 如何定义,FAF-EBRP 都能保证网络的覆盖度和工作时间。同时 NLN 的归零时间与 EBF 基本保持一致,验证了实验的正确性。

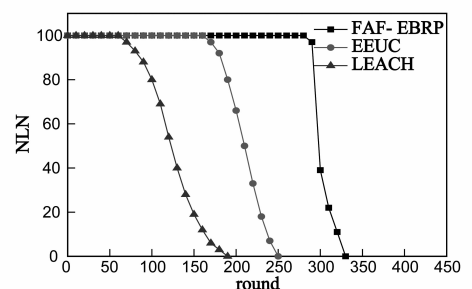


图5 三种协议 NLN 对比

6 结束语

本文主要设计了一种基于前向感知因子的能量平衡路由方法. 在建模过程中, 定义了前向传输区域和前向能量密度两个重要概念, 并给出了前向感知因子的计算方法, 路由算法的设计综合考虑了多种可能发生的情况. 对 FAF-EBRP、LEACH 和 EEUC 三种路由协议进行了仿真和对比, 对比结果表明 FAF-EBRP 有比后两者更好的能量均衡表现和更长的有效工作时间.

参考文献

- [1] Zhang D G. A new medium access control protocol based on perceived data reliability and spatial correlation in wireless sensor network[J]. Computers and Electrical Engineering, 2012, 38(3): 694 – 702.
- [2] 宋亚楠, 仲茜, 刘斌. 基于边际效用函数的网络资源调度[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 632 – 638.
SONG Ya-nan, ZHONG Qian, LIU Bin. Marginal Utility Function Based Networking Resource Scheduling[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(4): 632 – 638. (in Chinese)
- [3] Zhang D G, Zhang X D. Design and implementation of embedded un-interruptible power supply system (EUPSS) for web-based mobile application[J]. Enterprise Information Systems, 2012, 6(4): 473 – 489.
- [4] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660 – 670.
- [5] Zhang D G, Zhang X D. A New Service-Aware Computing Approach for Mobile Application with Uncertainty[J]. Applied Mathematics and Information Science, 2012, 6(1): 9 – 21.
- [6] Zhang D G, Qiao M. Efficiently matching frequent patterns based on bitmap inverted files built from closed itemsets[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2012, 21(3): 1250011.
- [7] Zhang D G. A New Approach and System for Attentive Mobile Learning Based on Seamless Migration[J]. Applied Intelligence, 2012, 36(1): 75 – 89.
- [8] Barabási A L. Scale-Free Networks: A Decade and Beyond[J]. Science, 2009, 325(5939): 412 – 413.
- [9] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. Modeling the Evolution of Weighted Networks[J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 1 – 13.
- [10] Zhang D G, Zhu Y N. A new method of constructing topology based on local-world weighted networks for WSN[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 1044 – 1055.
- [11] Li X, Chen G R. A local-world evolving network model[J].

Physica A, 2003, 328(1 – 2): 274 – 286.

- [12] Ruela A S, Cabral R S. Evolutionary design of wireless sensor networks based on complex networks[A]. Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks[C]. Melbourne, Victoria, Australia, 2009: 237 – 242.
- [13] Zhang D G, Kang X J. A new method of non-line wavelet shrinkage denoising based on spherical coordinates[J]. An International Interdisciplinary Journal of Information, 2012, 15(1): 141 – 148.
- [14] 钟远, 郝建国, 戴一奇. 一种不可信环境下的匿名位置辅助路由激励机制[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 475 – 480.
ZHONG Yuan, HAO Jian-guo, DAI Yi-qi. An Anonymous Incentive mechanism for location-aided routing in untrusted MANET scenarios[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 475 – 480. (in Chinese)

作者简介



张德干 男, 1970 年生于湖北黄冈英山县. 博士, 教授, 博导. 主要研究方向为移动计算、网络通信、智能控制等.

E-mail: zhangdegan@tsinghua.org.cn;
gandegande@126.com



赵晨鹏 男, 1989 年生于山东济南市. 北京科技大学学士, 天津理工大学硕士. 主要研究方向为移动计算、网络通信等.

E-mail: 1185638995@qq.com



李光(通信作者) 女, 1972 年生于黑龙江大庆市. 高级工程师. 主要研究方向为移动计算、网络通信等.

E-mail: gandegande@sohu.com