

基于簇首成链的低能耗层次路由协议

王梦莹¹ 王鑫^{1,2} 蒋华¹

(桂林电子科技大学计算机科学与工程学院 桂林 541004)¹

(桂林电子科技大学海洋信息工程学院 桂林 541004)²

摘要 在 LEACH 协议中,活动节点的数量和簇首间通信距离是影响网络生命周期的两个重要因素。在 LEACH 协议的基础上设计了一种基于簇首成链的低能耗层次路由协议,该协议将网络分层成簇,簇首节点将簇内距离相近、收集信息相似的节点划分为“相似”群,群内节点按序号每次只有一个节点发送数据到簇首,减少了簇内活动节点的数量,降低了簇首负载;同时簇首间引入了链式通信。理论证明和仿真结果都表明,该算法能够均衡网络能耗,延长网络生命周期。

关键词 LEACH,分簇,相似节点,能耗

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.11.030

Cluster-chain Based Low-energy Consumption Hierarchical Routing Protocol

WANG Meng-ying¹ WANG Xin^{1,2} JIANG Hua¹

(School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)¹

(School of Marine Information Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)²

Abstract The number of active node and the communication distance between cluster heads are two important factors influencing the network life cycle in the LEACH protocol. The paper designed a cluster-chain based low-energy consumption hierarchical routing protocol on the basis of LEACH protocol. The protocol layers the network into clusters, cluster head nodes divide the near nodes within the cluster which collects similar information into “similar” group, and in “similar” group only one node sends data to the cluster head according to the serial number every time, reducing the number of active nodes within the cluster and the load of cluster head. And the chain communication is introduced between cluster heads. Finally, it shows that the algorithm can balance the network energy consumption and prolong the network life cycle through the theoretical proof and simulation results.

Keywords LEACH, Cluster, Similar nodes, Energy consumption

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)由大量廉价的具有感知能力、通信能力和数据处理能力的微型传感器节点组成,具有广阔的应用前景^[1]。但是无线传感器网络相比传统网络具有鲜明的特点,尤其是无线传感器网络节点由电池供电,并且通常人员不能到达部署的环境,使得节点能量资源有限成为无线传感器网络发展的瓶颈。由于节点的能量消耗与网络的路由算法息息相关^[2],因此有效利用节点能量延长网络的生命周期是路由协议设计中的重要目标^[3,4]。

针对无线传感器网络的特点,国内外的学者提出了各种路由算法以提高节点的能量利用率。根据无线传感器网络的拓扑结构,网络中路由分为平面路由和分簇路由两种。分簇路由在减少网络能量消耗、延长网络生命周期方面有明显的优势,所以基于分簇路由的协议研究是近来学者研究的热点。

1 相关工作

LEACH^[5]是典型的分簇路由协议,协议循环选举簇首节

点,由簇首收集簇内数据直接传输给基站,从而均衡网络中各节点的能量消耗。与一般的路由协议相比,LEACH 可以将网络的生命期延长 15%。但是 LEACH 协议在选举簇首以及簇首间通信方面仍然存在缺点,因此很多基于 LEACH 的改进协议被提出。文献[6,7]主要是解决 LEACH 协议中簇首随机选择导致分簇不均匀的问题,通过采用竞争机制优化簇首选择。文献[7]侧重改进簇首间通信,通过多跳路径降低簇首直接与基站通信的能耗。文献[8]提出一种 EECPL 路由协议,由簇首形成环型簇,簇内节点从相邻的前一个节点接收数据并将数据转发给下一个节点,簇内选出传送者将数据直接送到基站。以上的改进协议多是基于簇首选择、簇间通信的优化,虽然能在一定程度上平衡网络能耗负载,但是都没有考虑网络中的信息重复、节点冗余等问题。文献[9]通过控制网络内冗余节点休眠,距离簇首节点较远的节点通过中转节点转发数据,以减少网络中的冗余节点个数,降低簇首的数据通信量,但是该协议并未考虑簇首间的通信。文献[10]结合最小跳数路由协议提出一种节点休眠算法,将网络中的节

到稿日期:2014-07-28 返修日期:2014-11-28 本文受国家自然科学基金重点项目(61262074)资助。

王梦莹(1990—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:751276778@qq.com;王鑫(1976—),男,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为网络与信息安全;蒋华(1963—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为数据库系统、信息安全。

点分为两种,分别采用不同的休眠/唤醒策略来降低能耗,但是休眠/唤醒策略又增加了额外的能量消耗开支。文献[11]提出了一种冗余节点休眠和分阶段的覆盖控制算法,该算法虽然能保证网络的覆盖率,但是要考虑到多个节点的协作。

本文在 LEACH 的基础上设计了一种基于簇首成链的低能耗层次路由协议。该协议将网络分层成簇,簇首根据簇内节点间的距离、收集的信息形成“相似”群,每次通信中群内只有一个节点处于活动状态,其余节点处于休眠状态,这样有助于减少簇首节点负载,同时减少普通节点的能耗。簇首间采用贪婪算法^[4]成链,减少簇首间数据传输的能量消耗。

2 LEACH 协议能耗分析

无线网络通信是无线传感器网络的主要能耗,LEACH 中定义的能量模型^[12]为:

$$E_{TX} = ke + kd^r \quad (1)$$

式(1)为发射 k bit 数据耗损的能量,由发射电路耗损和功率放大耗损两部分构成。 e 代表功率放大耗损,根据传输者和接收者之间的距离分别采用自由空间模型和多路径衰减模型。 e 为发射电路的耗损能量, r 取值为 2 或 4。

式(2)为接收 k bit 数据的能量耗损,仅由电路耗损引起。

$$E_{RX} = k * e \quad (2)$$

在 LEACH 协议中,主要的通信能耗包括簇内节点传输数据到簇首节点以及簇首节点收集簇内节点的数据并将数据转发到基站这两部分。假设在 LEACH 协议中有 N 个簇首节点,每个簇内有 M_i 个成员节点,假设每轮每个普通节点产生 k bit 的数据。为了简化计算,通信都采用自由空间模型。

网络中所有的簇内节点消耗能量主要是传输数据的部分,所以整个网络中所有簇内节点的能耗为:

$$E_{total(M)} = \sum_{i=1}^N M_i k (e + \sum_{j=1}^{M_i} \epsilon d_{toch}^2) \quad (3)$$

某个簇首节点 N_i 的能耗主要有两部分,即收集簇首所在簇内节点的数据所耗能量,为 $M_i k e$; 以及传输数据消耗的能量。则该簇首节点消耗的能量 E 为:

$$E = M_i k e + M_i E_{TX} = M_i k e + M_i k (e + \epsilon d_{toBS}^2) = k(2e + \epsilon d_{toBS}^2) \quad (4)$$

由式(4)可以推出所有簇首节点的能耗:

$$E_{total(N)} = \sum_{i=1}^N M_i k (2e + \epsilon d_{toBS}^2) \quad (5)$$

所以整个网络的能量消耗 E_{com} 为:

$$\begin{aligned} E_{com} &= E_{total(N)} + E_{total(M)} \\ &= \sum_{i=1}^N M_i k (2e + \epsilon d_{toBS}^2) + \sum_{i=1}^N M_i k (e + \sum_{j=1}^{M_i} \epsilon d_{toch}^2) \\ &= \sum_{i=1}^N M_i k (3e + \epsilon d_{toBS}^2 + \sum_{j=1}^{M_i} \epsilon d_{toch}^2) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(4)可以看出簇首节点的能耗包括:接收簇内节点信息和与基站通信。由式(6)得知整个网络的能耗取决于簇内成员个数 M 、簇内节点到簇首的距离 d_{toch} 、簇首节点到基站的距离 d_{toBS} 。由于网络中节点的部署是随机的,因此节点到簇首的距离不受人为控制,而且节点是通过收到信号的强度加入簇的,加入的通常是距离最近的簇,所以节点到簇首的距离无需再改进。因此本文从另外两个方面改进协议:在簇内引入“相似”群机制,使得每次通信时每一个群内只有一个活动节点,明显地减少了网络中活动节点的个数,降低了簇首负载;同时在簇首间通信中引入链式多跳通信,簇首间结合分层形成多条并行传输的链,有效地缩短了簇首间的通信距离,从

理论上讲,改进协议能够降低网络能耗,延长网络生命周期。

3 改进协议描述

改进协议是在 LEACH 协议的基础上,在簇内引入“相似”群机制,簇间通信采用链式多跳通信。同时为了避免频繁选举簇首节点,协议不再以“轮”为单位轮换簇首,而是以簇首的剩余能量为依据,当簇首节点的剩余能量小于簇内节点的平均能量时,簇首在簇内选择剩余能量最大的节点作为下一个簇首,并将簇内“相似”群划分的信息发送给下一个簇首节点,该簇首自己形成一个只包含自己的“相似”群。以下是改进协议的具体算法描述。

3.1 网络分层与成簇

假设网络中所有节点是同质的,即节点的计算能力、通信能力、初始能量都一样,节点通过 GPS 装置可以得到自身的位置坐标,能通过计算得出自己当前的剩余能量,并且每个节点拥有唯一的 ID,随机分布在一个正方形区域内。基站处在网络区域外某一固定位置,基站的能量无限且物理安全。网络初始时由基站向全网的节点发送分层消息,消息包含划分间隔距离 d ,所有的节点在接收到基站发送的消息之后根据接收到信号的强弱计算自己离基站的距离 D ,通过分层公式计算所处的层次。一段时间后每个节点都有自己的层号,这样网络被分成多个层次,离基站最近的为第 0 层,依次向外为第 1, 2, ... 层。层次的计算方法如下:

$$\text{节点层次} = \left\lceil \frac{(D - d_0)}{d} \right\rceil \quad (7)$$

其中, d_0 是基站距离节点分布区域最近边缘线的距离。

在完成网络分层之后,所有层进入簇首选择阶段。文中采用 LEACH 的分簇思想。不同于 LEACH 协议的是,节点在选择加入哪个簇时并不是仅考虑收到广播信号的强弱,而是首先判断发送广播信号的簇首节点是否与自己在同一个层次,然后再选择信号强度最大的簇加入。

3.2 簇内划分“相似”群

无线传感器网络节点的部署通常非常密集,节点之间覆盖的区域很可能是重复的,所以节点采集的数据也可能是重复的,重复的数据传送不仅消耗收集信息节点的能量,同时也增加了路径上的负载,缩短了网络的生命周期。所以避免重复的信息传送不仅能减少不必要的能量消耗,还能降低簇首融合数据的能耗。这里将距离相近、感知信息差度小的节点定义为“相似”节点,并将相似节点划分为“相似”群。

在成簇之后,基站向全网发送判断“相似”节点的信息包距离差阈值 D_1 和信息差度阈值 D_2 。簇首节点收到此信息包则用来判断“相似”节点;普通节点收到该信息包则直接忽略。为了标示相似节点编号以及序号,每个节点设置一个标示位 $U(i, j)$, i 表示“相似”群编号, j 表示同一个“相似”群中的序号。所有节点标示位的初始值为 $U(0, 0)$ 。

具体的“相似”群算法描述如下: 1) 簇内节点将自己的 ID、坐标以及初次感应的数据发送给簇首节点;簇首节点根据簇内节点坐标计算每个节点到簇首的距离,并按照距离从大到小的顺序保存到排序表 list 中,同时 list 表还应该包含节点 ID、节点的标示位、节点坐标以及节点收集的数据。2) 簇首对 list 表进行遍历,第 n 次遍历的节点被划分为群 n 。首先选择距离簇首最远且标示位为 $U(0, 0)$ 的节点,它的标示位置为 $U(n, 1)$,并记该节点为“根”节点。3) 簇首依次遍历 list 表中

标示位为 $U(0,0)$ 的节点,判断被遍历节点是否满足以下条件:被遍历的节点与“根”节点的距离在阈值 D_1 内且该节点收集的信息与“根”节点收集的信息差度在阈值 D_2 内。若同时满足,则被遍历的节点被赋予与“根”节点相同的群编号,同时将代表群中序号的 j 依次设置为 $2,3,4,\dots$ 。若上述两个条件有一个条件不满足,则簇首在此次遍历中忽略该节点。
4)簇首节点依次遍历表中剩余节点信息,直至本次遍历结束。
5)若表中没有标志位为 $U(0,0)$ 的节点,则算法结束;否则转至第 2)步。

“相似”群划分完之后,簇首节点为每个群分配传输数据的时间间隙,每次通信时每个群内节点只有到自己的次序时才收集数据并等到在属于本身所在群的时间槽内向簇首传输数据。每一个“相似”群内的节点依次按照序号进行通信,例如:在第一次通信,群 1 内的节点由序号为 1 的节点传输数据,下一次通信由序号为 2 的节点传输数据,循环往复。

3.3 簇首成链

LEACH 协议中所有簇首与基站一跳通信,导致离基站较远的簇首消耗过多的能量而过早死亡,文中改进的协议结合分层,采用簇首成链的多跳方法减少簇首间的通信能耗。由离基站最远层的簇首采用贪婪算法形成多条并行通信、不相交的链。外层的簇首节点向内层寻找离自己最近的簇首为父节点作为下一跳,直到第 0 层,最后第 0 层的簇首节点将数据直接转发给基站。内层的簇首节点若已经是某个外层簇首节点的父节点,又收到其他簇首节点的请求时则忽略不计,从而保证了多条链没有交叉,防止数据冲突。如图 1 所示,第 3 层的簇首节点 m 向第 2 层寻找离自己最近的簇首节点。若找到的簇首节点没有其他的子节点, m 就将找到的节点作为下一跳,这个节点称为 m 的父节点。同样地,第 2 层的这个簇首节点向第 1 层寻找父节点,依次类推,直到第 0 层的某个簇首将收集到的数据传输给基站。这样网络形成了多条不相交并行通信的链,链式通信减少了簇首通信的能耗,并且多条链的并行通信在一定程度上降低了数据延迟。

簇间路由建立后形成的网络结构模型如图 1 所示。

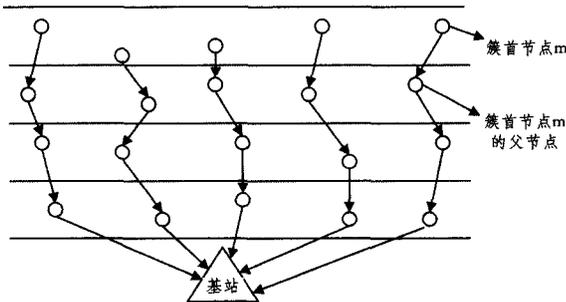


图 1 网络结构模型示意图

簇间路由形成之后,网络进入数据传输阶段,首先簇内节点按照划分的群号以及群内序号,依次将数据发送至簇首节点,簇首节点接收到最后一个群发送的数据后,表明整个簇内的数据收集完成。簇首节点将接收到的数据进行融合,之后按照簇间路由将数据发送给自己的父节点,父节点接收到数据后,将接收的数据与本簇内收集到的数据进行融合,再转发给链上下一跳簇首节点,直到数据发送至基站。在数据转发过程中,每个簇首节点在转发数据前都要进行数据融合,减少冗余数据。

4 改进算法能耗分析

改进协议同时采用了两种改进方法来降低网络能耗。在簇内由簇首将节点距离相近、感应数据信息差别度小的节点划分为“相似”群,每次通信时群内节点只有一个处于活动状态,其他节点进入休眠,这样就明显减少了整个网络中活动节点的数目。同时在簇首间结合分层形成链式多跳通信,避免簇首节点直接与基站通信,降低了簇首传输数据的能耗。

下面通过理论证明改进的协议相比 LEACH 协议节省的能量。假设簇首节点 C_i 所在簇内活动节点个数为 N (所有节点个数为 $N_0, N_0 > N$),其选择比自己靠近基站层次内的簇首节点 C_j 为父节点转发数据,簇 C_j 中活动节点个数为 M (所有节点个数为 $M_0, M_0 > M$)。

在 LEACH 协议中簇首节点直接与基站通信,所以 C_i 和 C_j 两个簇直接将数据传输到基站。每个簇消耗的能量分为簇内节点传输耗能和簇首传输数据耗能。

采用文中改进的协议时, C_i 将数据传输给 C_j , C_j 将数据直接传输到基站。 C_i 和 C_j 两个簇将数据传输至基站所消耗的能量包括 3 部分: C_i 到 C_j 到基站路径上的耗能、簇 C_i 和簇 C_j 内节点传输数据至簇首的耗能。

在采用改进算法时,簇内活动节点个数少于簇内原有节点个数。所以改进的协议在簇内节点传输数据至簇首时节省的能量为

$$E_{save(1)} = \sum_{i=1}^{N_0-N} K(e + \epsilon d_{ic_i}^2) + \sum_{i=1}^{M_0-M} K(e + \epsilon d_{ic_j}^2) \quad (8)$$

接下来对比两个协议传输路径上的通信能耗。首先计算 LEACH 算法路径上的耗能,其由簇首 C_i 到基站、簇首 C_j 到基站两部分组成:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{C_i} + E_{C_j} \\ &= N_0 k e + N_0 k \epsilon * E_{TX} + M_0 k e + M_0 k \epsilon * E_{TX} \\ &= 2N_0 k e + N_0 k \epsilon d_{C_i \rightarrow BS}^2 + 2M_0 k e + M_0 k \epsilon d_{C_j \rightarrow BS}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

由于簇首 C_i 到基站的距离等于 C_i 到 C_j 的距离与 C_j 到基站的距离和,也就是 $d_{C_i \rightarrow BS} = d_{C_i \rightarrow C_j} + d_{C_j \rightarrow BS}$,代入式(9),得到

$$\begin{aligned} E_1 &= 2N_0 k e + N_0 k \epsilon d_{C_i \rightarrow BS}^2 + 2M_0 k e + M_0 k \epsilon d_{C_j \rightarrow BS}^2 \\ &= (2N_0 + 2M_0) k e + k \epsilon (N_0 d_{C_i \rightarrow C_j}^2 + N_0 d_{C_j \rightarrow BS}^2 + \\ &\quad M_0 d_{C_j \rightarrow BS}^2 + 2N_0 d_{C_i \rightarrow C_j} d_{C_j \rightarrow BS}) \end{aligned} \quad (10)$$

改进协议路径上的耗能为簇首 C_i 到簇首 C_j 、簇首 C_j 到基站的两端距离和:

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{C_i} + E_{C_j} \\ &= N k e + N k \epsilon * E_{TX} + M k e + (M + N) k \epsilon * E_{TX} \\ &= N k \epsilon (2e + \epsilon d_{C_i \rightarrow C_j}^2) + (M + N) k \epsilon (2e + \epsilon d_{C_j \rightarrow BS}^2) \\ &= (4N + 2M) k e + N k \epsilon d_{C_i \rightarrow C_j}^2 + (N + M) k \epsilon d_{C_j \rightarrow BS}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

用式(10)减去式(11)就可以算出路径上的能耗差

$$\begin{aligned} E_{save(2)} &: \\ E_{save(2)} &= E_1 - E_2 \\ &= 2k(N_0 \epsilon d_{C_i \rightarrow C_j} d_{C_j \rightarrow BS} - N e) + (N_0 - N) k \epsilon d_{C_i \rightarrow C_j}^2 + \\ &\quad [(N_0 + M_0) - (N + M)] * k(2e + \epsilon d_{C_j \rightarrow BS}^2) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, N_0 大于 N , M_0 大于 M , $\epsilon d_{C_i \rightarrow C_j} d_{C_j \rightarrow BS}$ 远大于 e ,所以采用改进算法的协议在路径上也是节省能量的,总共节省的能量为:

$$E_{save(1)} + E_{save(2)} \quad (13)$$

综上所述,改进协议通过引入“相似”节点群以及簇首间

链式通信能够减少簇内活动节点数量,降低簇首节点负载与通信能耗,从而延长网络周期。

5 仿真实验

为了证明改进协议在能耗上的优越性,采用 MATLAB 平台进行实验仿真,并分别从网络生存周期、簇首节点平均能耗两方面对比 LEACH 协议和提出的改进协议。在实验中为了方便,没有设置信息差度阈值 D_2 ,“相似”群的划分仅由距离阈值 D_1 决定。网络的设置描述如下:在区域为 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的空间内,200 个传感器节点随机分布,基站节点位于区域外固定位置(250,100)。假设每个节点的初始能量为 0.5J,节点数据包长度为 4000bit,发射电路的耗损能量 e 为 50nJ/bit, ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 分别表示两种信道模型下功率放大所需能量,分别为 10pJ/bit/m^2 、 0.0013pJ/bit/m^4 ,距离阈值 D_1 取值为 10m。

图 2 是文中改进协议与 LEACH 协议网络中每轮(实验中取随机 20 轮)簇首平均消耗能量的对比情况。从图中看出与 LEACH 协议相比,改进协议的簇首平均能耗较低。这主要是因为改进协议在簇内引入“相似”群机制,簇首将簇内节点划分为“相似”群,群内节点按序号每次只有一个节点发送数据到簇首,有效降低簇首负载。改进的协议在簇首间采用链式传输数据,降低簇首通信能耗。所以改进协议明显降低了每轮中簇首的平均能耗。而 LEACH 协议的簇首平均能耗很高,主要是因为簇首采用单跳与基站通信,距离基站远的簇首能耗过大,并且在整个网络中所有的节点都处于活动状态,也增加了簇首的能耗。所以整个网络中 LEACH 协议的簇首节点平均能耗远高于改进协议的平均能耗。

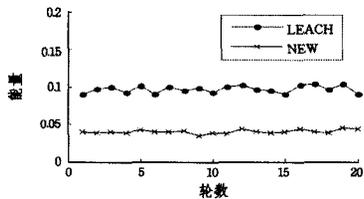


图 2 簇首平均能耗

图 3、图 4 分别是新协议与 LEACH 协议网络剩余平均能量与剩余节点的个数对比,这两个指标代表着网络生命周期。从这两个图中可以看出改进的协议能有效延长网络生命周期,改进协议结合分层在簇首间采用贪婪算法成链,使得簇首通信由单跳变为多跳。链式通信的最大优点就在于降低了通信能耗,簇内节点形成“相似”群,群内节点每次只有一个节点处于活动状态,其他节点进入休眠,避免了冗余节点重复发送数据而消耗能量,同时也降低了簇首的负载。虽然改进的协议与 LEACH 协议相比在形成“相似”节点群以及簇首成链时增加了一些额外开销,但是相对于通信能耗并不会太大的影响,主要是在无线传感器网络中节点之间的通信耗能要比节点计算和处理信息所消耗的能量大得多(通常 1bit 的信息传输 100m 所需要的能量大约相当于执行 1000 条计算指令所消耗的能量)^[13]。而在 LEACH 协议中簇首与基站直接通信且网络中全部节点处于活动状态,这是网络能耗最大的两个部分,LEACH 协议频繁选举簇首同样缩短了网络生命。因此改进协议通过减少网络中活动节点数量来降低网络节点平均能耗,减少簇首负载;同时采用链式多跳来降低簇间通信能耗,有效地延长了网络生命周期。

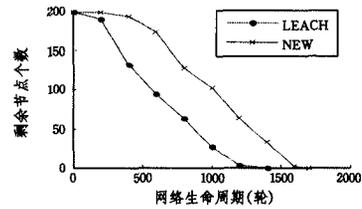


图 3 剩余节点个数

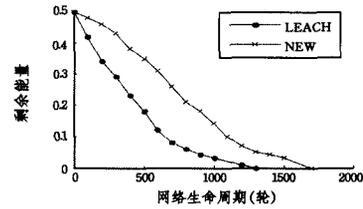


图 4 网络剩余平均能量对比

结束语 论文通过 LEACH 协议分析证明了影响网络生命周期的两大因素:网络中活动节点数量以及簇首的通信距离。同时从这两方面改进 LEACH 协议,在此基础上设计了一种基于簇首成链的低能耗层次路由协议,协议在网络中分层成簇,簇首按照预定的阈值根据距离、信息差别度将簇内节点划分为“相似”群,每次通信时群内节点按序号只有一个节点处于活动状态,避免了不必要的能耗,也降低了簇首负载,同时在簇首间结合分层形成并行通信的多条链,减少了簇首间的通信能耗。理论证明和实验结果都表明,改进的协议能够延长网络生命周期。该协议进行相似节点判断的依据是节点收集的信息,所以改进的协议适用于其节点收集的信息是数据型的网络。

参考文献

- [1] Sen J. A Survey on Wireless Sensor Network Security[J]. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), 2009, 1(2): 55-78
- [2] 陈宁宁,俞立,洪榛,等. 无线传感网高斯分簇路由算法的研究及实现[J]. 传感技术学报, 2011, 24(9): 1347-1352
Chen Ning-ning, Yu Li, Hong Zhen, et al. Gauss Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(9): 1347-1352
- [3] Almazaydeh L, Abdelfattah E, Al-Bzoor M, et al. Performance evaluation of routing protocols in wireless sensor networks[J]. International Journal of Computer Science and Information Technology, 2010, 2(2): 64-73
- [4] Waware S, Sarwade D N, Gangurde P. A Review of Power Efficient Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2012, 2(2): 1096-1102
- [5] Singh S K, Singh M P, Singh D K. Routing protocols in wireless sensor networks-A survey[J]. International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES), 2010, 1(2): 63-83
- [6] 蒋畅江,石为人,唐贤伦,等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222-1232
Jiang Chang-jiang, Shi Wei-ren, Tang Xian-lun, et al. Energy-Balanced Unequal Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1222-1232
- [7] 卢强,何熊熊,冯远静,等. 基于竞争机制的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2): 245-250

Lu Qiang, He Xiong-xiong, Feng Yuan-jing, et al. Clustering Routing Protocol Based on Competition Mechanism for Wireless Sensor Network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(2): 245-250

- [8] Bajaber F, Awan I. Energy efficient clustering protocol to enhance lifetime of wireless sensor network[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2010, 1(4): 239-248
- [9] 周冬鑫, 金文光, 容志能. 基于分层的无线传感网络多跳分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(1): 73-78
- Zhou Dong-xin, Jin Wen-guang, Rong Zhi-neng. Layer Based Multi-hop Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(1): 73-78
- [10] 任智, 王青明, 郭晓金. 无线传感器网络中基于最小跳数路由的节点休眠算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 194-197, 201
- Ren Zhi, Wang Qing-ming, Guo Xiao-jin. Node Sleeping Algorithm for Wireless Sensor Networks based on Minimal hop Rou-

ting Protocol[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(1): 194-197, 201

- [11] 蒋鹏, 陈峰. 基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的传感器网络三维覆盖控制方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 2807-2812
- Jiang Peng, Chen Feng. 3D Coverage Scheme Based on Hibernation of Redundant Nodes and Phased Waking-up Strategy for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(12): 2807-2812
- [12] 李涵, 吴秋新, 王小妮. 基于分簇的无线传感器网络多跳路由算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 252-254
- Li Han, Wu Qiu-xin, Wang Xiao-ni. Multi-hop Routing Algorithm Based on Clustering in WSN[J]. Computer Science, 2014, 41(6): 252-254
- [13] Oliveira L B, Ferreira A, Vilaça M A, et al. SecLEACH—On the security of clustered sensor networks[J]. Signal Processing, 2007, 87(12): 2882-2895

(上接第 133 页)

$v_{6(n+1)-5} = 3(n+1)^2 - 2(n+1)$, $v_{6n+2} = v_{6(n+1)-4} = 3(n+1)^2 - (n+1)$, $v_{6n+3} = v_{6(n+1)-3} = 3(n+1)^2$, $v_{6n+4} = v_{6(n+1)-2} = 3(n+1)^2 + (n+1)$; 代入可得 $S_{9n+6} = \frac{9n^3 + 36n^2 + 47n + 20}{2}$ 。而向量类所对应的函数值有 4 个, 所以, $3n+2$ 元的对称四值函数共有 $4^{S_{9n+6}}$ 个。

当 n 为奇数时, 有以下结论成立。

定理 6 当 n 为奇数时, $3n+2$ 元的对称四值函数共有 $4^{S_{9n+6}}$ 个, 其中 $S_{9n+6} = \frac{9n^3 + 36n^2 + 47n + 20}{2}$ 。

注 5: 定理 5 与定理 6 论证的不同之处同理类似于注 3。

4 对称逻辑公式在逻辑度量空间中的分布

定理 7 n 元对称逻辑公式占全体 n 元逻辑公式的比例随着 n 的增大而趋向于 0。

证明: 由定理 1—定理 6 可知不同的 n 元对称逻辑公式至多有 $4^{S_{9n}}$ 个, 以定理 1 为例, $S_{9n} = \frac{9n^3 + 18n^2 + 11n + 2}{2}$, 而全体 n 元四值 R_0 函数至少有 4^{4^n} 个, 显然 $4^{S_{9n}}$ 与 4^{4^n} 之比随着 n 的增大趋向于 0。

同理, 定理 2—定理 6 也满足: n 元对称逻辑公式占全体 n 元逻辑公式的比例随着 n 的增大而趋向于 0。

结束语 本文将对称函数的概念引入到逻辑系统 L_4^* , 运用 Matlab 研究了对称逻辑公式的计数问题, 得出了 $3n$ 元、 $3n+1$ 元、 $3n+2$ 元对称逻辑公式的个数; 证明了 n 元对称逻辑公式占全体 n 元逻辑公式的比例随着 n 的增大而趋向于 0。关于 L_4^* 中对称逻辑公式的真度之集在 $[0, 1]$ 中的稠密性及相关性质, 将四值 R_0 函数推广至更一般的 n 值 R_0 函数, 是否可以继续使用 Matlab 来实现其计数问题, 笔者将在另文中讨论。

参考文献

- [1] 王国俊. 数理逻辑引论与归结原理(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- Wang Guo-jun. Introduction to Mathematical Logic and Resolution Principle (2nd Edition) [M]. Beijing: Science in China

Press, 2006

- [2] 王国俊, 傅丽, 宋建社. 二值命题逻辑中命题的真度理论[J]. 中国科学(A 辑), 2001, 31(11): 998-1008
- Wang Guo-jun, Fu Li, Song Jian-she. Theory of truth degrees of propositions in two-valued propositional logic[J]. Science in China (ser. A), 2001, 31(11): 998-1008
- [3] Wang Guo-jun, Leung Y. Integrated semantics and logic metric spaces [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 136(1): 71-91
- [4] Ying Ming-sheng. A logic for approximate reasoning [J]. Journal of Symbolic Logic, 1994, 59: 830-837
- [5] Pei Dao-wu, Wang G J. The extensions L_n^* of formal systems L_n^* and their completeness [J]. Information Sciences, 2003, 152: 155-166
- [6] 王国俊, 惠小静. 概率逻辑学基本定理的推广[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1333-1340
- Wang Guo-jun, Hui Xiao-jing. Generalization of fundamental theorem of probability logic and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1333-1340
- [7] 惠小静, 王国俊. 经典推理模式的随机化研究及其应用[J]. 中国科学(E 辑) 2007, 37(6): 801-812
- Hui Xiao-jing, Wang Guo-jun. Randomization of classical inference patterns and its application[J]. Science in China (ser. E), 2007, 37(6): 801-810
- [8] 胡明娣, 王国俊. 对称逻辑公式在经典逻辑度量空间中的分布[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 419-423
- Hu Ming-di, Wang Guo-jun. Distribution of the symmetrical logic formulas in the classical logic metric space[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(2): 419-423
- [9] 王庆平, 王国俊. 对称逻辑公式在 L_3^* 逻辑度量空间中的分布[J]. 计算机学报, 2011, 34(1): 105-114
- Wang Qing-ping, Wang Guo-jun. Distribution of the symmetrical logic formulas in the L_3^* -logic metric space[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(1): 105-114
- [10] 王庆平. L_3^* 中逻辑公式的范式表示及对称逻辑公式的构造方法[J]. 计算机学报, 2013, 36(4): 851-861
- Wang Qing-ping. The normal form of logic formulae and construction method of symmetrical logic formulae in L_3^* [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(4): 851-861