

能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议*

蒋畅江¹⁺, 石为人², 唐贤伦¹, 王平¹, 向敏¹

¹(工业物联网与网络化控制教育部重点实验室(重庆邮电大学), 重庆 400065)

²(重庆大学 自动化学院, 重庆 400030)

Energy-Balanced Unequal Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

JIANG Chang-Jiang¹⁺, SHI Wei-Ren², TANG Xian-Lun¹, WANG Ping¹, XIANG Min¹

¹(Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Ministry of Education (Chongqing University of Posts and Telecommunications), Chongqing 400065, China)

²(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

+ Corresponding author: E-mail: ccqj@qq.com

Jiang CJ, Shi WR, Tang XL, Wang P, Xiang M. Energy-Balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2012, 23(5): 1222-1232. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4061.htm>

Abstract: A distributed energy-balanced unequal clustering routing protocol (DEBUC) is proposed and evaluated in this paper, which adopts an unequal clustering mechanism in combination with an inter-cluster multihop routing. Through a time based competitive clustering algorithm, DEBUC partitions all nodes into clusters of unequal size, in which the clusters closer to the base station have smaller size. The cluster heads of these clusters can preserve some more energy for the inter-cluster relay traffic, and the “hot-spots” problem can be avoided. For inter-cluster communication, DEBUC adopts an energy-aware multihop routing system to reduce and balance the energy consumption of the cluster heads. Simulation results demonstrate that the protocol can efficiently decrease the dead speed of the nodes, balance the energy dissipation of all nodes, and prolong the network lifetime.

Key words: wireless sensor network; routing protocol; clustering

摘要: 提出了一种能量高效均衡、非均匀分簇和簇间多跳路由有机结合的无线传感器网络分布式分簇路由协议 DEBUC(distributed energy-balanced unequal clustering routing protocol)。该协议采用基于时间的簇头竞争算法,广播时间取决于候选簇头的剩余能量和其邻居节点的剩余能量。同时,通过控制不同位置候选簇头的竞争范围,使得距离基站较近的簇的几何尺寸较小。这样,网络中不同位置节点之间的簇内和簇间通信能耗得以互相补偿。DEBUC 采用簇间多跳路由,根据节点剩余能量、簇内通信代价和簇间通信代价,每个簇头在邻居簇头集合中运用贪婪算法选择其中继节点。仿真实验结果表明,DEBUC 能够有效地节约单个节点能量、均衡网络能耗、延长网络生存周期。

关键词: 无线传感器网络;路由协议;分簇

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* 基金项目: 国家自然科学基金(60905066); 国家教育部重大专项培育基金(708074); 重庆市科委自然科学基金(CSTC2011jjA40028); 重庆邮电大学博士启动基金(A2011-43)

收稿时间: 2011-03-13; 定稿时间: 2011-05-18

早期的无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)分簇路由协议通常采用均匀分簇的方法,将整个网络划分为大小均等的簇,每个簇的簇内成员节点数近似相等,簇半径也近似相等.LEACH^[1]协议是 WSNs 中典型的均匀分簇路由协议,采用随机分簇策略和周期性簇头轮换.由于簇的大小相等,每个簇内的成员数相等,因此从理论上讲,各个簇中的平均簇内通信能耗相等.LEACH 协议中,簇头与汇聚节点的通信(即数据报告)采用单跳方式,距离汇聚节点越远的簇头在数据报告时的发射功率越大,其数据报告能耗就越大.虽然 LEACH 协议通过簇头轮换的方式来维持节点的能量平衡,但这种平衡只是局部的,从全局的角度看,远离汇聚节点的簇头仍然具有更大的能耗.这些节点容易较早失效,从而造成传感器网络覆盖区域缩小,影响监测任务的执行.

数据报告采用多跳方式的簇网络中,距离汇聚节点越近的簇头承担的数据转发任务越重,其数据转发能量消耗越大.因此,网络中也存在簇间能量消耗不均衡的问题,距离汇聚节点越近的节点越容易过早地耗尽能量而失效.如果汇聚节点周围的节点成块失效,则离汇聚节点较远的传感器节点采集的数据将无法继续传输,网络中虽然仍有大量存活的节点,但网络的生命周期已提前结束.

由此可见,均匀分簇网络无论采用单跳或多跳的数据报告方式,均存在簇间能耗不均衡问题.针对这个问题,很多研究人员采用非均匀分簇策略来平衡簇头的能量消耗.EECS^[2]中,簇头到汇聚节点与 LEACH 一样采用单跳通信,但是普通节点在选择簇头时不仅要考虑自身离簇头的距离,而且要考虑簇头到汇聚节点的距离,从而构造出大小非均匀的簇.EECS 中,距离汇聚节点较远的簇具有较小的几何尺寸,使得这些簇头的簇内通信能耗较小,以平衡其较大的数据报告能耗.但 EECS 的能量平衡措施只能缓解簇头间的能量消耗不均衡现象,无法从整体上实现节点间的能量平衡.

UCS^[3]首次明确提出了非均匀分簇的思想来均衡簇头节点能耗,簇间采用多跳方式.簇头的能耗包括簇内通信和簇间通信能耗,簇内通信能耗和成员节点数量成比例关系,簇间通信能耗是转发数据量的函数.UCS 根据簇头的期望转发负荷来调整簇的大小(即簇内节点数量),使得所有簇头的能耗接近,网络能量消耗均衡.

EEUC^[4]是一个非均匀分簇和簇间多跳路由有机结合的路由协议.它利用非均匀的竞争半径,使得靠近基站的簇的成员数目相对较小,从而簇头能够节约能量以供簇间数据转发使用,达到均衡簇头能量消耗的目的.此外,在簇头选择其中继节点时,不仅考虑候选节点相对基站的位置,还考虑候选节点的剩余能量,以进一步均衡簇头能耗.实验结果表明,该路由协议有效地解决了多跳路由通信方式下簇头能量消耗不均衡的问题,优化了网络中各节点的能量消耗,显著地延长了网络的生存时间.ACOUC^[5]继承了 EEUC 的非均匀分簇结构,并且在此基础上采用基于定向扩散的蚁群优化算法(ARAWSN)进行优化.该算法采用首轮所有节点参与竞选、后续轮簇内调整的方法替代 EEUC 随机激活的周期性簇首选举策略,在簇首间通信中引入链路可靠性和实时性参数,利用 ARAWSN 在传输数据的同时对路由进行动态维护和性能优化.路径搜索采用蚁群算法进行,即搜索网络中所有的簇首和汇聚点,以寻找从各个簇首到汇聚点代价最小的多跳路由.

CEB-UC^[6]协议将传感器网络合理分区,使得在靠近汇聚节点分区内的簇数量较多,各簇内传感器节点数较少;在远离汇聚节点分区内的簇数量较少,各簇内的传感器节点数较多,从而保证承担数据中继转发任务的簇头节点能减少自身的簇内通信开销,节约的能量可供簇间数据转发使用,以平衡网络节点能耗.DTUC^[7]从概率的角度出发分层和分簇,使得靠近汇聚节点分层内的簇数量较多,簇内节点数较少,而在远离汇聚节点分层内的簇数量较少,簇内节点数较多,从而保证内层簇头节点减少其簇内开销,以节省更多的能量用于数据的簇间传送.同时,基于能耗均衡的思想对各层节点进行部署,使得各层能耗大体相当.文献[8]提出了一种基于参数优化的分簇算法,将网络所有节点分成大小不均匀的静态簇.根据与基站的距离不同,簇的规模相应调整,确保远离基站的簇信息能够准确到达基站;通过优化控制簇规模的相关参数,降低簇间通信能耗;簇内采用簇头连续担任本地控制中心,簇头连续工作的次数由其剩余能量和位置信息优化得到,减少簇头更换频率,有效降低簇内通信能耗,从而使网络寿命最大化的同时,不会降低网络的覆盖和连通性能.

针对 WSNs 的周期性数据收集应用,本文提出一种能量高效均衡的分布式非均匀分簇路由协议 DEBUC.该协议采用非均匀分簇和簇间多跳路由相结合的方式.DEBUC 采用基于时间的簇头竞争算法,广播时间取决于候选簇头的剩余能量和其邻居节点的剩余能量.同时,距离基站较近的候选簇头具有较小的竞争范围,使得距

离基站较近的簇具有较小的几何尺寸.这样,距离基站较近的簇头在簇内通信中消耗的能量较少,节省下来的能量用于簇间的数据转发任务,不同位置簇头节点的能耗得以平衡. DEBUC 采用簇间多跳路由,根据节点剩余能量、簇内通信代价和簇间通信代价,每个簇头在邻居簇头集合中运用贪婪算法选择中继节点.实验结果表明,与 LEACH 和 EEUC 协议相比,DEBUC 能够有效地节约单个节点能量、均衡网络能耗、延长网络生存周期.

1 相关模型及假定

1.1 网络模型及假定

本文假设 WSNs 具有如下性质,与文献[1]相似:

- (1) 节点具有唯一的 ID,均匀分布在监测区域.
- (2) 所有节点固定并且能量有限,基站位置固定,能量不受限.
- (3) 所有节点具有相似的能力(处理/通信),并且地位平等,都能充当簇头节点或普通节点.
- (4) 节点通信功率可调,即节点可以根据距离来调整发射功率的大小.
- (5) 节点不具有位置感知能力,没有安装具有 GPS 功能的天线.
- (6) 采用数据融合技术减少传输的数据量.
- (7) 链接是对称的.如果传输功率已知,则节点可以根据接收到的信号的强度来计算距离.
- (8) 每个节点周期执行数据采集任务,并始终有数据传送至基站.

网络的前 3 项属性是一般 WSNs 的典型设置.第 4 项属性主要是从节能的角度出发,根据传输距离的远近来调节射频收发器的发射功率,如 Berkeley Motes^[9]一共有 100 个发射功率等级.与采用固定发射功率相比,能够显著减少节点的能量损耗,从而延长 WSNs 的寿命.第 5 项属性表明,本协议不要求节点具有位置感知能力.第 6 项属性广泛地应用于簇网络中,采用一定的数据融合技术来减少传输的数据量,能够显著节约节点的能量.第 7 项属性表明,节点之间可以通过接收信号的强度来估算彼此之间的距离.第 8 项属性表明,本协议适用于周期数据收集的 WSNs.

1.2 数据收集方式

基于应用需求的不同,目前的 WSNs 中有两类数据收集^[10]:

(1) 时间驱动的数据收集——是指监控区域内的传感器节点定时地采集区域中的用户感兴趣数据,如压力、温度、湿度、气压等,并将这些信息发送给外界,也就是通常说的周期性数据收集.在这类问题中,时间被离散化为“轮”,每轮间隔根据信息的变化频率和监测需求决定.一轮数据收集就是指所有节点把这一轮时间段中采集的数据汇聚到基站.目前,大多数研究都是基于时间驱动的数据收集.

(2) 事件驱动的数据收集——是指监控区域内的传感器节点监视区域中的某些事件,如某目标的出现、移动,或者当某些信号强度超过警戒值.如果探测到这些事件发生,则将该事件的相关参数记录下来,如类型、发生地点、时间等,将这些信息传送到基站,最终报告给决策者.事件也可以是监控者发出的查询命令,节点收到后,汇报相关信息.这类数据收集的应用也比较多,实现相对比较容易.

本文协议适用于时间驱动的数据收集应用,即周期性数据收集.可以说事件驱动的数据收集是时间驱动的数据收集的子集,如果时间驱动的数据收集里加入数据感知门限和实时性控制,同样可以达到对事件的监视.因此,本协议稍加改动和调整,也适用于事件驱动的数据收集应用.

1.3 无线通信能耗模型

本文采用与文献[1]相同的无线通信能耗模型.在该模型中,无线通信模块发送数据的能量消耗主要在发送电路和功率放大电路,接收数据的能量消耗主要在接收电路.在保证合理信噪比条件下,节点发送数据能耗为

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

其中, k 为发送的二进制位数, d 为发送距离, E_{elec} (nJ/bit) 为射频能耗系数, E_{fs} (pJ/bit/m²) 和 E_{mp} (pJ/bit/m⁴) 为不同信道传播模型下的功率放大电路能耗系数.

节点接收数据能耗为

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

本文仿真中, 无线通信能耗模型参数设置为 $E_{elec} = 50$ nJ/bit, $E_{fs} = 10$ pJ/bit/m², $E_{mp} = 0.0013$ pJ/bit/m⁴, $d_{crossover} = 87$ m.

1.4 数据融合模型

分簇路由协议的基本思想之一是采用数据融合技术减少传输的数据量, 以节约网络能量. 由于簇间数据的差异性较大, 本文仿真中不考虑簇间的数据融合, 簇内的数据融合模型假设为: 簇头接收每个成员节点发送的 k bits 数据, 无论簇内节点数目多少, 均压缩为 k bits 数据. 数据融合的能耗设定为 $E_D = 5$ nJ/bit.

2 DEBUC 协议

网络初始化阶段, 基站广播“hello”消息(包含平均单跳距离)至所有节点. 根据接收到信号的强度, 每个节点计算与基站的大概距离. 这不仅有助于节点选择合适的功率与基站通信, 也有助于实现网络非均匀分簇.

由于簇头和普通节点的能耗一般不同, 簇头必须周期重选以平衡节点能耗. DEBUC 协议采用轮循环机制, 每一轮包括 3 个阶段: 簇的形成、簇间多跳路由建立和数据传输. 第 1 个阶段产生不同几何尺寸的簇, 然后根据网络分簇结果建立簇间多跳路由, 最后网络进入稳定阶段完成数据传输. 图 1 是 DEBUC 协议的基本原理图, 图中不同大小的圆圈代表簇, 簇头节点之间的连线代表簇间多跳传输路径.

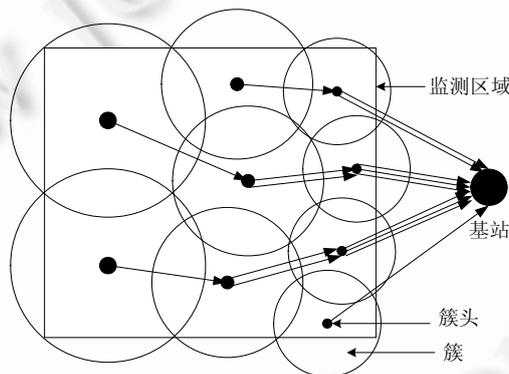


Fig.1 Schematic diagram of the DEBUC protocol

图 1 DEBUC 协议基本原理

2.1 簇的形成

DEBUC 采用分布式簇头竞争算法, 簇头的选举完全依据局部竞争. 参与簇头竞争的候选簇头节点保存一个邻居节点信息表, 见表 1, 并按一定规则竞争成为最终簇头. 候选簇头之间竞争的规则定义如下:

规则 1. 在竞选过程中, 若候选簇头 v_i 宣布其竞选获胜, 则在 v_i 的竞争半径内的所有候选簇头均不能成为最终簇头, 需要退出竞选过程.

候选簇头 v_i 的邻居节点集合包括与 v_i 具有规则 1 所约束的竞争关系的所有候选簇头节点, 其定义如下:

定义 1. 在 DEBUC 簇头竞选算法中, 候选簇头 v_i 的邻居节点集合 NT_i 为

$$NT_i = \{v_j | v_j \text{ 是候选簇头, 且 } d(v_i, v_j) < \max(v_i.R_{comp}, v_j.R_{comp})\} \quad (3)$$

由于在 WSNs 的实际应用中, 节点的密度一般较高(如 20 个节点/平方米)^[11], 因此没有必要每个节点都成为候选簇头. 设置一个门限值 T 以控制候选簇头节点的比例. 同时, 每个候选簇头节点设置一个竞争范围 R_{comp} , 它

是该节点与基站距离的函数,用于控制簇头在网络中的分布.为了使距离基站较近的簇具有较小的几何尺寸,在距离基站较近的区域应选举更多的簇头.因此,候选簇头节点的竞争半径应正比于它与基站的距离.亦即,随着候选簇头到基站距离的减小,其竞争半径应该随之减小.假设 R_{comp}^o 是预先定义的最大竞争半径,候选簇头节点 v_i 的 R_{comp} 为

$$v_i \cdot R_{comp} = \left(1 - c \frac{d_{max} - d(v_i, BS)}{d_{max} - d_{min}} \right) R_{comp}^o \quad (4)$$

其中, d_{max} 和 d_{min} 分别代表节点和基站的极大和极小距离, $d(v_i, BS)$ 代表 v_i 和基站的距离, c 是位于 0~1 之间的常数.根据公式(4)可知,候选簇头节点的竞争范围在 $(1-c)R_{comp}^o$ 到 R_{comp}^o 之间变化.

Table 1 List of the volunteer node neighbours' information

表 1 候选簇头邻居节点信息表

标识	意义
ID	邻居节点编号
R_{comp}	邻居节点竞争范围
RE	邻居节点剩余能量

簇头选举算法的伪代码如图 2 所示.在簇头选举算法中,控制信息的广播半径是 R_{comp}^o ,以保证候选簇头节点能接收其邻居节点的信息.首先,每个候选簇头节点广播包括自身 ID、竞争范围和剩余能量的 COMPETE_HEAD_MSG 消息,而普通节点则进入休眠状态直到簇头选举算法结束,如图中第 1 行~第 9 行所示.接收这些消息后,候选簇头节点更新其邻居节点信息表,如第 10 行~第 13 行所示.下一步是候选簇头节点竞争簇头阶段.其他一些算法(如 EEUC)中,剩余能量大于所有邻居节点的候选簇头节点竞选成功并广播消息通知其邻居节点,邻居节点收到该消息后放弃竞争并广播消息.在这种方式下,候选簇头节点竞争簇头时需要广播和接收大量消息,特别是当节点密度较大时. DEBUC 在簇头竞争阶段采用计时广播代替协商机制,如第 19 行~第 27 行所示.候选簇头节点 v_i 依据自身时间进度广播 FINAL_HEAD_MSG 消息,宣布自己成为簇头.

$$t_i = k \times T_{CH} \times \frac{\bar{E}_{NT_i}}{RE_i} \quad (5)$$

其中, k 是均匀分布在(0.9,1)之间的随机数,用于减小广播消息时间冲突的可能性; T_{CH} 是预先定义的簇头选择所需的时间; RE_i 是 v_i 的剩余能量; \bar{E}_{NT_i} 是 v_i 邻居节点的平均剩余能量.如果 $RE_i < \bar{E}_{NT_i}$, 则 v_i 放弃竞争簇头,如第 14 行~第 18 行所示.根据公式(5),广播时间 t 取决于节点的剩余能量和其邻居节点的平均剩余能量.如果节点在其所处区域具有较大的能量,则它成为簇头的等待时间较短,概率较大.

```

Cluster Heads Selection Algorithm
For every node in the network
1:  $\mu \leftarrow \text{RAND}(0,1)$ 
2: if  $\mu < T$  then
3:    $beVolunteerNode \leftarrow \text{TRUE}$ 
4: end if
5: if  $beVolunteerNode = \text{TRUE}$  then
6:    $CompeteHeadMsg(ID, R_{comp}, RE)$ 
7: else
8:   sleep
9: end if
For every volunteer node  $v_i$ 
10: on receiving a COMPETE_HEAD_MSG from volunteer node  $v_j$ 
11: if  $d(v_i, v_j) < v_j \cdot R_{comp}$  OR  $d(v_i, v_j) < v_i \cdot R_{comp}$  then
12:   add  $v_j$  to  $v_i$  neighbor set  $NT_i$ 
13: end if
For every volunteer node  $v_i$ 
14: if  $RE_i \geq \bar{E}_{NT_i}$ 
15:   compute  $t_i$  according to Eq.(5)
16: else
17:    $v_j$  give up the competition and become an ordinary node
18: end if
For every volunteer node  $v_i$ 
19: while (the timer  $T_{CH}$  is not expired)
20:   if ( $CurrentTime < t_i$ )
21:     if (heard FINAL_HEAD_MSG from a neighbor  $NT_i$ )
22:       give up the competition and stop the timer  $t_i$ 
23:     end if
24:   else if ( $CurrentTime = t_i$ )
25:      $FinalHeadMsg(ID)$ 
26:   end if
27: end while

```

Fig.2 Pseudo-Code of cluster heads selection algorithm

图 2 簇头选择算法伪代码

簇头选择完成后,普通节点退出休眠状态,簇头广播 CH_ADV_MSG 消息.普通节点根据接收消息的强度加入最近的簇头,并发送 JOIN_CLUSTER_MSG 消息通知簇头.网络非均匀分簇完成.图 3 是 DEBUC 非均匀分簇的一个例子,基站位于(200,275).从图中可以明显看出,越是靠近基站的簇,其几何尺寸越小.

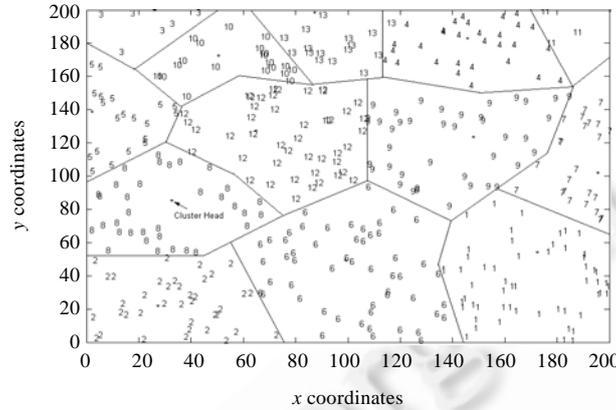


Fig.3 An example of unequal clustering of sensor nodes

图 3 传感器节点非均匀分簇例子

2.2 簇间多跳路由

DEBUC 采用簇内单跳和簇间多跳数据传输方式.每个簇头需要从邻居簇头中选择一个作为其中继节点,转发数据至基站.与 PEGASIS 等其他算法不同,DEBUC 协议的中继节点不融合其他簇头数据和自身数据.

DEBUC 协议簇间多跳路由建立采用分布式策略,设计目标是找到一条优化路径,以减小簇间数据传输的能耗和避免“热点”问题.首先,簇头 $s_i(i=1,2,\dots,K,K$ 为簇头数量)广播一条消息,广播功率覆盖 δ 倍簇头 s_i 竞争半径范围内的节点.这条消息包括簇头 ID、剩余能量、成员节点数和到基站距离.接收到消息后,如果邻居簇头到基站的距离较小,则簇头 s_i 计算和邻居簇头 $s_j(j=1,2,\dots,M,M$ 为簇头 s_i 的邻居簇头数量)的大概距离,并建立一个邻居簇头信息表,见表 2.

Table 2 List of neighbouring cluster heads' information

表 2 邻居簇头信息表

标识	意义
ID	邻居簇头 s_j 编号
RE	邻居簇头 s_j 剩余能量
d_{toBS}	邻居簇头 s_j 到基站距离
d_{toCH}	邻居簇头 s_j 到簇头 s_i 距离
N_{non-CH}	邻居簇头 s_j 的成员节点数

簇头 s_i 运用贪婪算法在其邻居簇头集合中(包括簇头 s_i 本身)选择其中继节点 RN_i ,中继节点 RN_i 在所有的候选节点中具有最小的代价函数.代价函数定义如下:

$$cost(i, j) = \begin{cases} \alpha \frac{\bar{E}_{neighbor}(s_i)}{E_{current}(s_j)} + \beta \frac{N_{non-CH}(s_j)}{N_{non-CH}(s_i)} + \gamma \frac{d_{s_i-s_j}^2 + d_{s_j-BS}^2}{d_{s_i-BS}^2}, & i \neq j \\ \alpha \frac{\bar{E}_{neighbor}(s_i)}{E_{current}(s_j)} + \beta \frac{N_{non-CH}(s_j)}{N_{non-CH}(s_i)} + \gamma, & i = j \ \& \ d_{s_i-BS} \leq d_0 \\ +\infty, & i = j \ \& \ d_{s_i-BS} > d_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\bar{E}_{neighbor}(s_i)$ 表示簇头 s_i 的邻居簇头剩余能量均值, $E_{current}(s_j)$ 表示簇头 s_j 的剩余能量; $N_{non-CH}(s_j)$ 表示簇头 s_j 的

成员节点数, $\bar{N}_{non-CH}(s_i)$ 表示簇头 s_i 的邻居簇头成员节点数量均值; $d_{s_i \rightarrow s_j}$ 表示簇头 s_i 到簇头 s_j 的距离, d_{s_j-BS} 表示簇头 s_j 到基站的距离, d_0 为簇头至基站距离临界值; α, β, γ 为加权系数, 且满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$. 因此, $cost(RN_i) = \min\{cost(i, j)\}$. 如果簇头 s_i 的中继节点是本身, 则直接发送数据至基站; 否则, 簇头 s_i 发送数据至中继节点 RN_i . 一旦每个簇头都找到中继节点, 则簇间多跳路由建立.

代价函数的设计主要基于以下考虑:

- (1) 代价函数中的第 1 项选择剩余能量较大的簇头作为中继节点. 中继节点完成数据转发的任务, 需要消耗更多的能量, 故能量因素是首先需要考虑的.
- (2) 第 2 项选择簇内成员节点较少的簇头作为中继节点. 成员节点较少的簇头在簇内通信中消耗的能量较少, 故有较多的能量保留下来用于簇间数据转发.
- (3) 第 3 项选择位置较好的簇头作为中继节点. 簇间多跳路由应尽量选择最短路径, 以使得数据传输能耗最小. 簇头 s_i 至基站的最短路径是连接它们之间的直线, 则中继节点的选择应尽量靠近这条直线.
- (4) 距离临界值 d_0 的设置是为了保证距离基站较远(与基站距离大于 d_0)的簇头 s_i 不会直接发送数据至基站.

3 协议分析及仿真

3.1 消息复杂度

性质 1. 网络分簇阶段, DEBUC 算法的消息复杂度为 $O(N)$. 其中, N 为网络节点数量.

证明: 网络分簇算法中, 有 $N \times T$ 个节点成为候选簇头而参与竞选, 共广播 $N \times T$ 条 COMPETE_HEAD_MSG 消息. 然后, 竞选成功的候选簇头广播一条 FINAL_HEAD_MSG 消息, 其邻居节点收到消息后直接退出竞选. 假设共选出 K 个簇头, 则它们广播 K 条 FINAL_HEAD_MSG 消息和 K 条 CH_ADV_MSG 消息, 而 $N-K$ 个簇成员广播 $N-K$ 条 JOIN_CLUSTER_MSG 消息. 因此, 该阶段网络中总的消息开销为

$$N \times T + K + K + N - K = (T+1)N + K \quad (7)$$

所以消息复杂度为 $O(N)$. □

性质 1 说明, DEBUC 算法的消息开销较小, 能量高效. HEED 的分簇算法也是消息驱动的, 其消息交换次数的上界为 $N_{iter} \times N$, N_{iter} 是消息迭代的次数. 因为 DEBUC 避免了消息迭代, 因此消息开销低于 HEED. EEUC 分簇算法的消息开销为 $(2T+1)N$, 因为采用了计时广播代替协商机制, DEBUC 算法消息开销比 EEUC 要小 $(T \times N - K)$.

3.2 性能评价指标

(1) 网络生命周期

对任意节点 i , 其生命周期 LT_i 满足下式:

$$E_o = \sum_{r=0}^{LT_i} \left\{ \sum_{j \in R_r^i} E_{Rx}^r(k_{ji}) + k_r E_D + \sum_{h \in T_r^i} E_{Tx}^r(k_{ih}, d_{ih}) \right\} \quad (8)$$

其中, E_o 为节点初始化能量, R_r^i 是 r 时刻(或 r 轮里)要发送 k_{ji} bit 数据给节点 i 的所有节点组成的集合, T_r^i 是 r 时刻(或 r 轮里)要接收节点 i 发送 k_{ih} bit 数据的所有节点组成的集合, d_{ih} 为节点 i 和节点 h 的距离, k_r bit 是 r 时刻(或 r 轮里)节点 i 需要融合的数据. 设 t 时刻(或 t 轮里)网络存活节点数为 $AN(t)$, 本文定义整个网络的生命周期为

$$LT-1 = \min\{LT_i; i \in N\} \quad (9)$$

$$LT-2 = \max\{t; AN(t) \leq 0.7N\} \quad (10)$$

可见, $LT-1$ 和 $LT-2$ 分别是首个节点死亡时间和 30% 节点死亡时间.

(2) 能耗均衡性

本文用某时刻整个无线传感器网络的能量均值和能量方差函数来衡量网络的能量均衡性. 将两者结合起来, $m_E(t)$ 越大且 $D_E(t)$ 越小, 则表明 t 时刻网络的能量均衡性越好.

网络的能量均值函数:

$$m_E(t) = \frac{\sum_{i=1}^N E_i(t)}{N} \tag{11}$$

能量方差函数:

$$D_E(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \{E_i(t) - m_E(t)\}^2}{N} \tag{12}$$

3.3 仿真方法及参数

为了验证 DEBUC 协议的性能,利用 MATLAB 在相同条件下仿真 LEACH,EEUC 和本协议,并对比多项性能.无线通信能耗模型和相关参数详见第 1 节,其他仿真参数见表 3.

Table 3 Network and parameters

表 3 网络环境与参数

Parameter	Value	Parameter	Value
Network coverage	(0,0)~(400,400)m	T	0.2
Base station location	(200,450)m	R_{comp}^o	90m
Node number	1 600	c	0.5
Initial energy	0.3J	α, β, γ	0.3, 0.3, 0.4
Data packet size	4 000 bits	δ	3
Data packet header	100 bits	d_0	246m

3.4 仿真结果分析

(1) 簇头的特征

如前所述,DEBUC 分簇算法选取的簇头数目由参数 R_{comp}^o 和 c 共同决定.图 4 显示了 c 取两个不同的值时,簇头的数目与 R_{comp}^o 之间的关系(随机选出 100 轮的平均值).由图 4 可知,竞争半径越小,算法生成的簇头的数目越大.在图中,当 $c=0.5$ 时对应的曲线高于当 $c=0$ 时对应的曲线.这是因为当 R_{comp}^o 固定时, c 的增大导致候选簇头的竞争半径变小,因此簇头的数目增大.

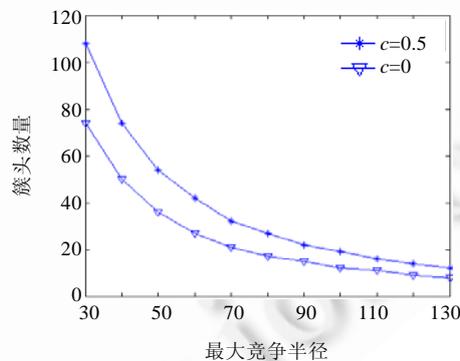


Fig.4 Number of cluster heads of DEBUC

图 4 DEBUC 生成的簇头的数量

下面说明 DEBUC 分簇算法的稳定性.在网络拓扑固定的情况下,一个稳定的分簇协议应该生成数量比较一致的簇头来优化网络的能量消耗.文献[12]推导了单跳网络中最优簇头数量的近似计算公式.从每种分簇协议的模拟过程中随机选出 100 轮,在没有任何节点死亡的情况下,统计所生成的簇头个数的分布情况,结果如图 5 所示.由图可见,每种协议生成的簇头的数量都有一个期望值,它是协议在此场景下最优的簇头数量.LEACH 的簇头数量的波动范围比较大,这是因为 LEACH 单纯性地采用随机数与阈值的机制产生簇头,因此簇头的数

量变化比较明显. DEBUC 的簇头数量集中于期望值, 这是因为它采用候选簇头在局部区域进行竞争的方法, 有效地控制了算法所生成的簇头的数量. 总的来说, DEBUC 通过简单的竞争算法生成了数量稳定的簇, 可靠性好.

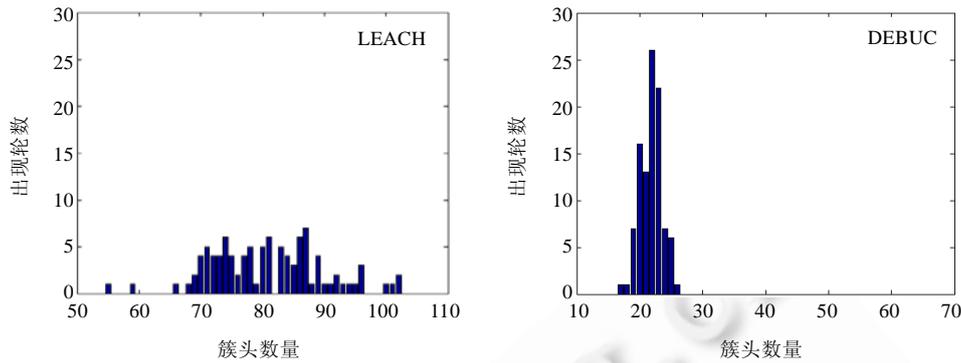


Fig.5 Distribution of the number of cluster heads produced by two protocols

图 5 两种协议生成的簇头数量分布

(2) 能量效率

DEBUC 的核心思想之一是利用非均匀分簇的思想来解决“热点”问题, 延长网络的存活时间. 下面首先通过网络生存周期来验证 3 种协议的能量效率. 图 6 显示了存活节点数随仿真时间的变化情况. 从图中可以看出, DEBUC 相对于 LEACH 和 EEUC 明显提高了网络生存周期(包括 $LT-1$ 和 $LT-2$), 数据对比见表 4. 由于采用了非均匀分簇和簇间多跳路由有机结合的方式, DEBUC 有效地平衡了靠近基站的簇和远离基站的簇之间的数据传输能耗. 同时, 对比 EEUC 协议, DEBUC 采用计时广播方式有效减小了簇头竞争阶段的通信能耗, 簇间优化路由由更有效地平衡了不同位置簇头节点的能耗.

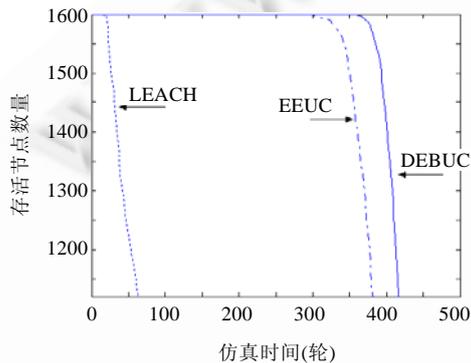


Fig.6 Number of alive nodes over time

图 6 存活节点数量的变化曲线

Table 4 Network lifetime comparison

表 4 网络生存周期对比

	$LT-1$	$LT-2$	$LT-1$ 延长(%)	$LT-2$ 延长(%)
LEACH	11	64	3 173	552
EEUC	298	382	20.8	9
DEBUC	360	417	—	—

图 7 对比了 3 种协议的网络总能耗随仿真周期的变化曲线, 较小的坡度显示较慢的能量消耗速度和较长的生存时间, DEBUC 协议的坡度明显小于 LEACH 和 EEUC; 并且 DEBUC 中 $LT-2$ 时网络能量已经很小(19.819J), 而 EEUC 此时网络能量为 23.948J, 说明 DEBUC 能够有效平衡节点间的能耗. 图 8 显示了 3 种协议在 $LT-2$ 时的死亡节点(以小圆圈代表)分布情况, DEBUC 协议的死亡节点分布较均匀, 而其他两种协议的死亡节点分布较集中, 网络出现“热点”问题.

图 9 和图 10 显示了 3 种协议在能量均衡方面的性能. 图 9 中, DEBUC 的网络节点能量均值一直都比 LEACH 或者 EEUC 的高, 表明 DEBUC 协议能够更有效地节约节点能量. 图 10 给出了 3 种协议能量方差随时间变化的比较, DEBUC 的网络节点能量方差一直很低, 变化不大, 表明 DEBUC 协议能够有效地均衡网络节点能量. 从图 9

和图 10 可以看出,DEBUC 协议的能量均衡性能最好.

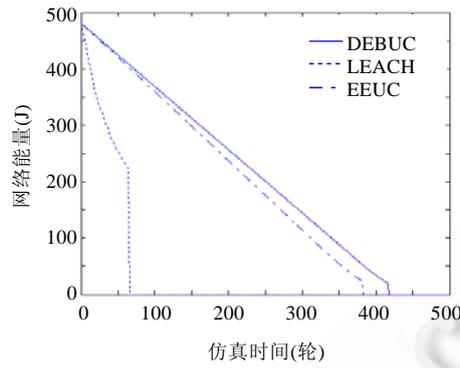


Fig.7 Network energy consumption over time

图 7 网络能耗的变化曲线

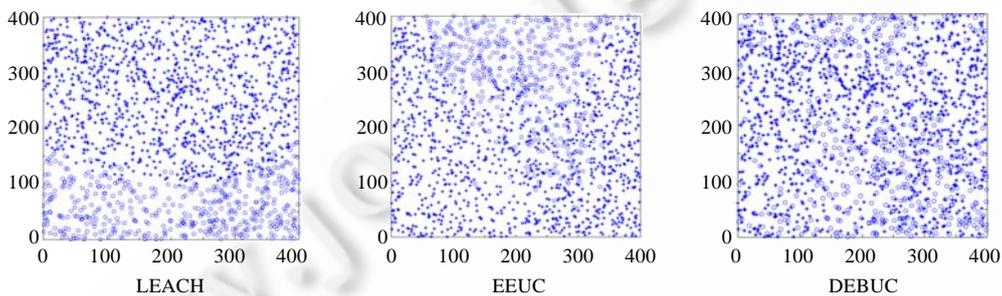


Fig.8 Distribution of dead nodes (LT-2)

图 8 死亡节点分布图(LT-2)

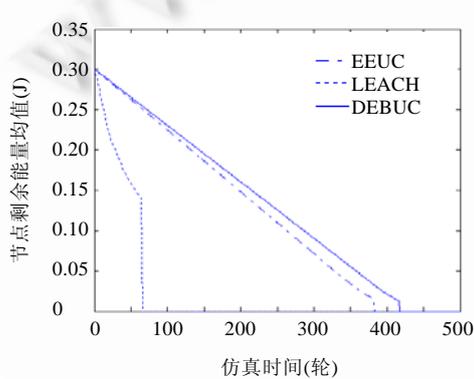


Fig.9 Average remaining energy of nodes over time

图 9 网络节点剩余能量均值的变化曲线

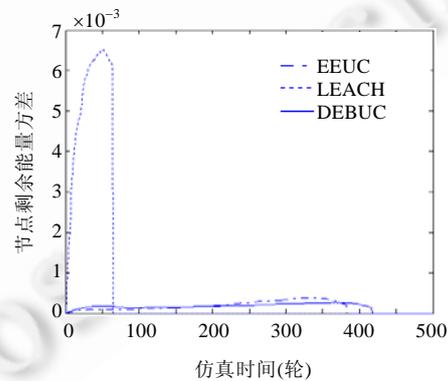


Fig.10 Remaining energy variance of nodes over time

图 10 网络节点剩余能量方差的变化曲线

4 总 结

基于较大规模 WSNs 应用,本文提出一种分布式分簇路由协议 DEBUC.该协议基于网络局部信息实现非均匀分簇和簇间多跳路由,并使两者有机结合.DEBUC 协议在簇头竞争阶段采用计时广播机制,有效降低了控制消息开销;簇间多跳路由建立引入代价函数,优化中继节点的选择.实验结果表明,DEBUC 能够有效地节约单个节点能量、均衡网络能耗、延长网络生存周期.

References:

- [1] Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the 33rd Hawaii Int'l Conf. on System Science (HICSS 2000). 2000. 3005–3014. [doi: 10.1109/HICSS.2000.926982]
- [2] Ye M, Li CF, Chen GH, Wu J. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Performance Computing and Communications Conf. 2005. 535–540. [doi: 10.1109/PCCC.2005.1460630]
- [3] Soro S, Heinzelman WB. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In: Proc. of the 19th IEEE Int'l Parallel and Distributed Processing Symp., 2005. Denver: IEEE Computer Society Press, 2005. 236–244. [doi: 10.1109/IPDPS.2005.365]
- [4] Li CF, Ye M, Chen GH, Wu J. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems. Washington, 2005. 597–604. [doi: 10.1109/MAHSS.2005.1542849]
- [5] Zhang RB, Cao JF. Uneven clustering routing algorithm for wireless sensor networks based on ant colony optimization. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44(6):33–38 (in Chinese with English abstract).
- [6] Wang Y, Zhang DY, Liang TT. Cell energy balanced uneven clustering hierarchy scheme for wireless sensor networks. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(4):389–394 (in Chinese with English abstract).
- [7] Yang J, Zhang DY. A data transmission mechanism for wireless sensor networks using unequal clustering. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009,43(4):14–17 (in Chinese with English abstract).
- [8] Xiang M, Shi WR, Jiang CJ, Zhang Y. Energy efficient clustering algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor networks. AEU-Int'l Journal of Electronic and Communication, 2010,64(4):289–298. [doi: 10.1016/j.aeue.2009.01.004]
- [9] Hill J, Szewczyk R, Woo A, Hollar S, Culler DE, Pister KSJ. System architecture directions for networked sensor. ACM SIGPLAN Notices, 2000,28(5):93–104.
- [10] Zheng J. Research on periodic data gathering in wireless sensor networks [Ph.D. Thesis]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [11] Shih E, Cho SH, Ickes N, Min R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Proc. of the ACM MobiCom 2001. Rome, 2001. 272–286. [doi: 10.1145/381677.381703]
- [12] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660–670. [doi: 10.1109/TWC.2002.804190]

附中文参考文献:

- [5] 张荣博,曹建福.利用蚁群优化的非均匀分簇无线传感器网络路由算法.西安交通大学学报,2010,44(6):33–38.
- [6] 王毅,张德运,梁涛涛.无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法.西安交通大学学报,2008,42(4):389–394.
- [7] 杨军,张德运.非均匀分簇的无线传感器网络数据传送机制.西安交通大学学报,2009,43(4):14–17.
- [10] 郑杰.无线传感器网络周期性数据收集研究[博士学位论文].合肥:中国科学技术大学,2010.



蒋畅江(1976—),男,四川安岳人,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络,智能算法.



王平(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,网络化控制.



石为人(1948—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为普适计算与无线传感器网络.



向敏(1974—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,网络化控制.



唐贤伦(1977—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,智能算法.