

基于能量异构的 WSN 分布式路由算法

李东林, 韦素媛

(火箭军工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025)

摘 要: 分析无线传感器网络中的非均匀分簇算法, 针对多跳通信方式中存在汇聚节点附近簇首转发任务频繁、能量消耗过快以及频繁进行簇首轮换时能量消耗多的问题, 提出一种基于能量异构的 WSN 分布式路由算法(DRA-EH 算法). 该算法的节点能量采用 3 级能量架构, 根据节点初始能量的不同划分等级; 利用圆环模型进行区域划分, 定点部署特殊节点; 按照簇首分级策略, 将簇首分为一级和二级簇首两种类型, 采用固定选举簇首与随机选举簇首相结合的方式, 来弱化簇头选举中的随机成分, 以及节省频繁进行簇首竞选和轮换时的能量消耗; 在簇首间构造多跳路由树, 采用簇内单跳、树内簇首多跳的路由策略将信息最终传送到汇聚节点. 仿真实验表明, DRA-EH 算法在平衡网络能耗和延长网络生命周期方面优于 SEP 算法和 CRVB 算法.

关键词: 无线传感器网络; 能量异构; 簇首分级; 区域划分; 多跳路由

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2017)10—0036—06

A Distributed Routing Algorithm Based on Energy Heterogeneity for WSN

LI Dong-lin, WEI Su-yuan

(Information Engineering of Rocket Forces Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In this paper, a distributed WSN routing algorithm based on energy heterogeneity is proposed to solve the problem of frequent multi-hop forwarding, excessive energy consumption and frequent energy consumption in the cluster head rotation. The node energy of the algorithm adopts the three-level energy architecture, which is classified according to the initial energy of nodes. Using the ring model for regional division and primary nodes and secondary nodes are fixed. According to cluster head classification strategy, the cluster head is divided into the first and second cluster first two types. The combination of fixed cluster head election and random cluster head election is used to weaken the random component. The cluster head rotation order is fixed to save the energy consumption when the nodes frequently perform cluster head election. The multi-hop routing tree is constructed between the cluster heads, using single-hop in the cluster and using multi-hop between clusters. The simulation results show that WSN distributed routing algorithm based on energy heterogeneity is superior to SEP algorithm and CRVB algorithm in balancing network energy consumption and extending network life cycle.

Key words: wireless sensor networks; heterogeneous energy; cluster head classification; region-divided; multiple hops

1 引言

WSN 领域早期是对同构 WSN 进行研究, 而近年来, 更多采用异构传感器网络^[1], 异构传感器网络是指由多种类型不同或能力异构的传感器节点所构成的网络, 通过部署一些具有特殊功能的节点来完

成复杂繁重的任务, 从而减轻传感器节点的负担, 达到延长网络生命周期的目的. 因此, 相对于同构 WSN, 异构的 WSN 是一种更现实的网络模型.

分簇和多跳传输是 WSN 研究领域的热点^[2-3], 其中文献[4]在全网络中采用多跳路由的方式来降低远距离传输时的能量消耗, 寻找满足距离近、剩余

能量高的相邻节点作为父节点,来构造一棵以基站为根的近优最小生成树,因为没有采用分簇算法,所以也不存在簇首的选举和轮换,但是采用多跳路由算法会使得靠近汇聚节点的节点因担任过多的转发任务而消耗大量的能量,从而导致离基站近的节点比区域外围的节点更早死亡^[5-6].文献[7]利用网格区域划分模型进行簇的划分,在网格内自组织成簇,并构建簇内生成树进行多跳路由,从而减少簇内通信代价,但是其簇内会因为靠近簇首的转发节点因转发任务重导致能量消耗过快,造成簇内“能量空洞”问题.文献[8]提出的基于虚拟网格的分簇路由算法(CRVB算法),但存在靠近簇首的普通节点因频繁转发簇内其他节点的信息而能量消耗过快的问题,形成了簇内“能量空洞”问题.文献[9]提出基于区域划分的簇首选举算法解决了簇首分布随机性的问题,以及采用靠近基站的内圈簇首多余外圈簇首的方式来缓解因多跳转发能量消耗过快的“能量空洞”问题,但是其区域划分过于复杂不易实现,而且多跳传输中跳数转发次数过多容易造成数据的丢失以及安全性问题.

2 模型及假定

2.1 网络模型

为了便于仿真研究,假设传感器网络具有如下性质:

(1)汇聚节点位置固定在目标区域的几何中心,能量无限;

(2)节点部署后位置不再移动,且网络节点具有位置感知功能;

(3)节点拥有相同的数据处理和通信能力,可自由调整发射功率;

(4)节点能量采取能量异构的方式,分为一级节点、二级节点和普通节点,一级节点的能量是普通节点能量的 α 倍,二级节点的能量是普通节点的 β 倍,并且所有节点都能够知道自己的当前剩余能量.

(5)一级节点和二级节点只负责数据的接收、发送和数据的融合.

2.2 无线通信能耗模型

本文采用的是 SEP^[10]协议中的无线通信能耗模型,其数据进行传输的能耗主要是由无线收发器件和功率放大器运行时消耗的能量构成,如图1所示.

其中,功率放大器消耗的能耗和传输环境与传输距离相关,分为自由空间传输模式和多径传输

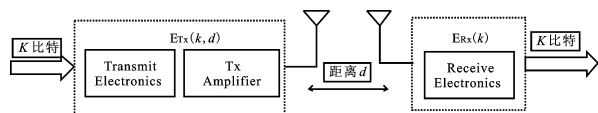


图1 能耗模型

模式.

发射机传输数据 k 比特的能耗计算如式(1):

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} k * E_{elec} + k * E_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ k * E_{elec} + k * E_{amp} * d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 代表数据比特数; E_{elec} 为收发电路的能耗; d 是发送节点到接收节点间的距离, d_0 是自由空间与多径模式下切换的阈值且 $d_0 = \sqrt{E_{fs}/E_{amp}}$; E_{fs} 和 E_{amp} 分别表示自由空间和多径模型的功率放大电路能耗系数.

接收机能耗如式(2):

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

2.3 问题分析

为便于计算,假设每个簇内的节点数都相等,数量均为 n ,且每个节点的功率发送都相等,不采取数据融合的方式.在本论文中,所有节点都部署的在半径为100米的圆形目标区域内,由于发送节点与接收节点的距离较近,节点间绝大部分距离都小于阈值 $d_0 = 87.7$ 米,因此本文的信息传输采用自由空间模型.

簇首 j 内的节点数为 n ,则簇内成员节点 i 向簇首 j 发送 k 比特信息需要消耗的能量为:

$$E_i = k * (E_{elec} + E_{fs} * d_{ij}^2) \quad (3)$$

式(3)中 d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离.

簇首 j 所消耗的能量包括接收自己簇内 n 个节点数据所耗的能量、发送这些数据所耗的能量、接收和转发来自其他 m 个簇首数据所耗的能量,其计算如下:

$$E_j = (m + 1) * n * \left[E_{Rr}(k) + E_{Tx}(k) + k * E_{fs} * d_{jx}^2 \right] \quad (4)$$

式(4)中 d_{jx} 为簇首节点 j 与另一簇首节点 x 或与汇聚节点之间的距离.

由式(3)、式(4)可知,在簇首多跳的算法中,簇内节点的消耗是远小于簇首节点的消耗,由于簇首的能耗不仅要包括处理簇内节点的数据所消耗的能量,还要包括接收、融合、转发其他簇首转发来数据的能量消耗.平衡簇内节点和簇首的能量消耗是至关重要的,这就关系到如何优化簇首选择和数据传输方式,才能达到降低节点能耗、有效平衡网络能耗

的目的.

3 DRA-EH 算法

3.1 区域划分及节点的部署

距离汇聚节点较近的簇首由于承担过重的簇间中继转发任务,会过早的耗尽能量造成能量空洞问题,从而引发网络的不连通.区域划分时采用靠近汇聚节点的内圈区域小于外圈区域的方法,以及运用特殊节点能量异构的方式来延长簇首的生存时间.现将目标区域以汇聚节点为中心划分成若干个层,下面说明以汇聚节点为中心的各圆半径之间的关系.

目标区域为半径为 50 米的圆形区域,按照圆环划分模型^[11-12],按照节点距离基站的远近来划分区域.以汇聚节点为圆心,圆半径从小到大分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 进行区域划分,小于半径 R_1 的圆形区域为 A 层,半径在 R_1 到 R_2 之间的圆环区域为 B 层,半径在 R_2 到 R_3 之间的圆环区域为 C 层,其中 $R_1 = 10$ 米, $R_2 = 15$ 米, $R_3 = 50$ 米.在目标区域部署一共 100 个节点,其中定点部署一级节点和二级节点,而普通节点则随机部署在目标区域内.

(1)在 B 层中,以角度为 120 度作为间隔,将 B 层划分为 3 个区域,在每个区域内的中心位置附近指定部署 2 个一级节点,共 6 个一级节点.

(2)在 C 层中,以角度为 60 度作为间隔,将 C 层划分为 6 个区域,在每个区域内的中心位置指定部署 2 个二级节点,共 12 个二级节点.

(3)在半径 R_3 的圆形目标区域内随机部署 80 个普通节点.

其节点部署如图 2 所示.这样的区域划分和部署方式,使得能量异构的特殊节点均匀的分布在目标区域,主要的是为后面进行簇的构建和多跳路由树的构建提供条件.

3.2 簇首的选举和轮换

在非均匀分簇算法中,簇首的选举和轮换方式对有效管理网络能耗是至关重要的.文献[3,7,13]均表明了非均匀分簇算法能够有效地均衡簇首能耗和缓解能量空洞问题.所以合理地进行区域划分直接影响簇首在整个区域中的分布.与传统 SEP^[4]分簇算法中的簇首随机分布方式不同,本文提出的基于区域划分的簇首选举算法,采用固定簇首轮换与随机簇首选举方式相结合的方法,采用簇首轮换休眠的机制,运用簇首连任机制.

(1)本文算法采用 SEP^[4]算法中“轮”的方式,运

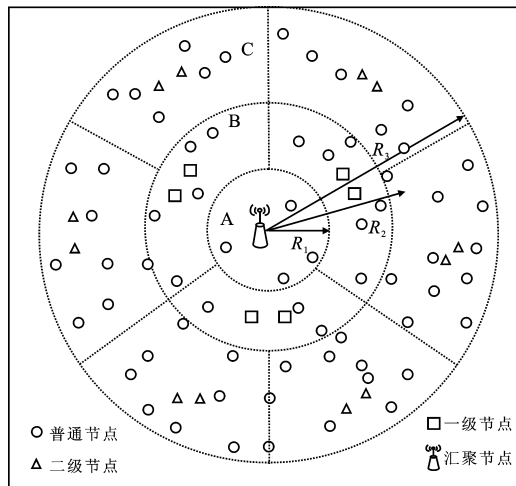


图 2 节点部署图

用簇首连任的机制.选择 2 轮进行一次簇首轮换,这样可以减少簇首的轮换次数,节省簇首频繁轮换时所消耗的能量.

(2)本文采用簇首轮换休眠的机制,因为当传感器节点没有传送或接收数据时,处于关闭状态比处于空闲状态可节省大量的能量^[14].

(3)在各层的各区域内,只选举一个簇首.并且规定 B 层区域内选举的簇首为一级簇首, C 层区域内选举的簇首为二级簇首.

(4)在各层的各区域中,当一级或二级这样的特殊节点存活的情况下,采用固定簇首选举和轮换方式,省去了簇首在全网络节点中进行选举的过程,节省了簇首选举过程中的能量消耗.当区域中没有存活的特殊节点时,采用随机选择簇首的方式,选举能量最多的普通节点作为簇首,然后进行簇间多跳传输.

其中固定的簇首选举和轮换方法,具体如下:

(1)在 B 层区域中,从东开始,沿着顺时针方向,将一级节点进行编号,编号为 1~6;然后根据编号进行分组,编号为奇数 1、3、5 的一级节点为第一组节点作为初始化的一级簇首进入工作状态,而编号为偶数的 2、4、6 的一级节点作为第二组节点进入休眠状态;工作状态的节点正常采集数据和数据传输,休眠状态的节点不工作,并等待唤醒以重新进入工作状态.经过 2 轮后,第二组节点进入工作状态成为一级簇首,而第一组节点进入休眠状态,如此反复进行.

(2)在 C 层区域中,从东开始,沿着顺时针方向,将二级节点进行编号,编号为 7~18;然后根据编号进行分组,编号为奇数 7、9、11、13、15、17 的二

级节点为第三组节点作为初始化的二级簇首进入工作状态,而编号为偶数的 8、10、12、14、16、18 的二级节点作为第四组节点进入休眠状态,并等待唤醒以重新进入工作状态. 经过 2 轮后,第四组节点进入工作状态成为二级簇首,而第三组节点进入休眠状态,如此反复进行.

3.3 簇的构建

在 LEACH、SEP 算法中都是依概率选择簇首,所以簇首的分布随机性很大,簇群的分布也不均匀,导致节点能耗不均衡,影响网络的寿命. 本文算法的关键之一在于将区域进行特定的划分,这样可以保证在目标区域内建立若干分布均匀的簇,并且规定每一个区域内只能选出一个簇首,这样避免同一区域内出现簇首过多的情况,这样同时也保证了簇首在整个目标区域内的分布较为均匀. 由于区域的合理划分,使得簇首节点广播信息时只需要覆盖本区域内的所有节点即可,适当的缩小广播范围有利于降低发射功率和减少簇首节点间广播信息时的相互干扰,这都对延长网络生存时间有着重要的意义.

(1)采用固定簇首选举轮换机制.

指定初始化的簇首节点后,成为簇首的节点向该区域中的非簇首节点广播包含自身 ID 号的数据包. 非簇首节点向其所在区域内的簇首发送入簇申请的数据包并加入该簇,并成为其簇内成员节点. 对于进入休眠的特殊节点,当经过 2 轮的工作运行后,由该区域内的簇首向该区域内的特殊节点发送唤醒信息,然后特殊节点进入工作状态成为簇首,并向原簇首信息发送自己成为簇首的信息,原簇首接收到信息后才进入休眠状态,若未收到新簇首发送的信息则继续担任簇首节点.

(2)采用随机簇首选举轮换机制.

当区域内的特殊节点死亡后,选举该区域内能量最多的普通节点作为簇首节点,而区域内其他节点则加入该簇.

至此,簇拓扑结构已经生成,如图 3 所示.

本文提出的 DRA-EH 算法不仅缓解了以往算法中簇头节点能量消耗过快、簇头位置不均匀、簇群大小不合理的现象,而且优化了簇首轮换机制,降低了网络节点进行簇首选举的频率,从而节省了频繁进行簇首选举和轮换时的能量消耗,以及降低了簇头选举的随机性和复杂度.

3.4 数据的传输

本文提出的采用的是簇内单跳、簇间多跳的传输方式. 当某一节点可能距离汇聚节点很远,直接向

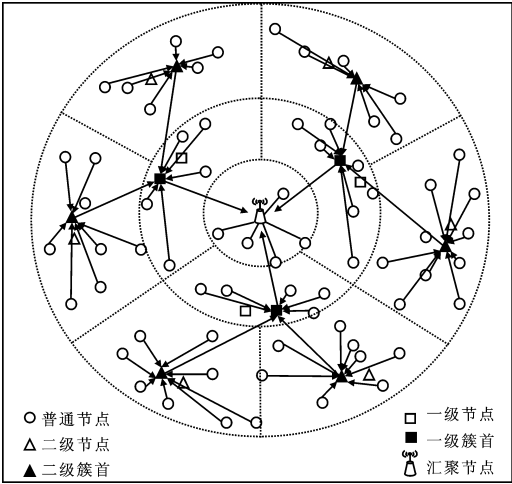


图 3 簇的构建图

汇聚节点传输数据会产生很大的能耗,而本文所采用 3 层通信架构,即簇内节点到簇首节点、簇首节点到簇首节点和簇首节点到汇聚节点的数据转发方式,可以有效的降低远距离传输时的节点能耗. 首先,普通节点将感知的数据发送给该区域内的簇首节点,然后该簇首节点对接收到的簇内节点数据进行融合后向靠近汇聚节点的簇首转发,最终数据会到达汇聚节点. 因此在数据转发时,如何选择下一跳簇首则是本文算法的关键之一,本文设计了下一跳簇首选择算法,既均衡了节点能耗,又减少了网络总能耗.

将汇聚节点作为根节点,一级簇首作为根节点的叶节点,二级簇首作为一级簇首的叶节点. 外圈的二级簇首向距离最近的一级簇首转发簇内接收的信息,一级簇首向汇聚节点转发所接收到的信息,如图 4 所示.

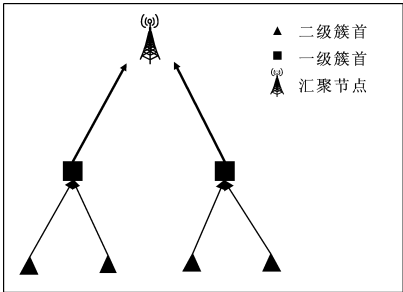


图 4 多跳路由树

本文中担任数据转发任务的簇首节点最初都是能力较强的异构节点,能够保证转发节点能耗过快的能耗需求;采用簇内单跳是因为划分区域内的节点距离都相对较近,并且单跳传输的算法简单并且容易实现;而簇间采用多跳的机制来进行数据

传输是因为存在外圈的节点距离汇聚节点较远的情况,通过多跳通信可以降低远距离传输时的能量消耗,并且其节点数据在本文中最多进行两次转发,是因为过多的多跳转发会引起数据丢失.

4 仿真与分析

4.1 仿真参数设置

实验仿真采用 Matlab 进行仿真,仿真场景为半径为 50 米的圆形目标区域,按本文的部署方式部署 100 个节点,汇聚节点的坐标为(50m,50m),具体参数如表 1 所示.

表 1 实验仿真参数

参数	值
覆盖范(圆半径)	50 m
汇聚节点位置	(50,50)
节点数 N	100
收发信息能耗 E_{elc}	50 nJ/bit
自由空间模型功放所需能量 E_{fs}	10 pJ/(bit · m ²)
多径衰减模型能效所需能量 E	0.013 pJ/(bit · m ²)
数据融合所需能量 E	5 nJ/(bit · singal)
数据包长度 k	4 000 bit
普通节点初始能量 E_0	0.5 J
特殊节点能量系数 α	2
特殊节点能量系数 β	2

4.2 仿真结果及分析

为了验证 DRA-EH 算法的有效性和性能优势,对 DRA-EH 算法、SEP 算法、CRVB 算法进行实验仿真,从节点的存活数及网络剩余能量这 2 个方面进行对比分析.

本文的核心思想是利用初始能量较高的异构节点作为簇首来延长网络的稳定性.如图 5 所示,本文 DRA-EH 算法的第一个死亡节点大概是在第 600 轮左右,而 SEP 算法和 CRDV 算法第一个死亡节点则分别在第 320 轮左右和第 380 轮左右;就网络所有节点死亡的时间而言,在 DRA-EH 算法中所有节点死亡的时间大概在 1 400 轮左右,而 SEP 算法和 CRDV 算法分别在 1 100 轮和 1 200 轮左右.显而易见,在保持网络的稳定性上,本文 DRA-EH 算法要比 SEP 算法和 CRVB 算法优越.

如图 6 所示,在整个网络有效生命期间内,本文 DRA-EH 算法与网络初始能量相同的 SEP 算法相比,其网络能量衰减缓慢,DRA-EH 算法的网络能量在大概 1 300 轮左右才耗尽,而 SEP 算法在不

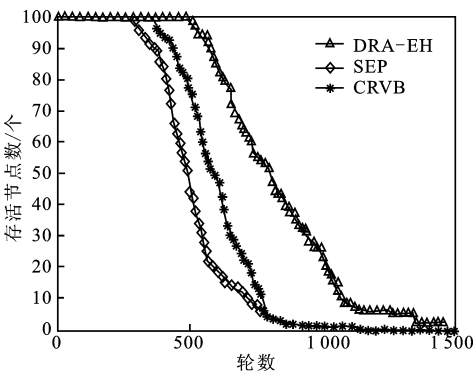


图 5 节点存活数

到 1 000 轮时该网络能量已经耗尽;与 CRVB 算法相比,本文的 DRA-EH 算法采用能量异构的节点增加初始网络能量,从网络能量耗尽时的轮数相比,CRVB 算法的网络能量也在不到 1 000 轮时就已经耗尽,说明了本文的 DRA-EH 算法在延长网络生存周期方面要优于 SEP 算法和 CRVB 算法.

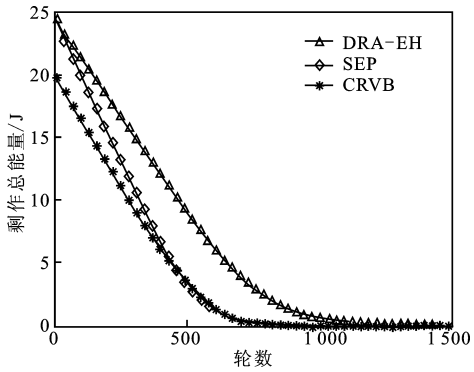


图 6 网络剩余能量图

5 结束语

针对现有分簇和多跳路由算法中存在的不足,提出一种基于能量异构的 WSN 分布式路由算法(DRA-EH). (1)通过部署能量异构的节点,来增加网络的初始能量,达到延长网络稳定的时间;(2)采用区域划分、簇首选择机制,使网络中的簇首分布和簇的大小更均匀;(3)通过固定簇首选举和随机簇首选举相结合的方式,以及采用簇首连任机制,节省了频繁进行簇首选举和轮换时的能量消耗;(4)采用簇内单跳、簇间多跳的方式构建路由树,降低了节点远距离传输时的能量消耗;

在 MATLAB 平台上与 SEP 和 CRVB 算法进行仿真对比,得出本文算法在保持网络稳定性和延长网络生命周期方面有良好的性能.

参考文献:

[1] 刘琳,于海斌. 异构无线传感器网络中簇首的优化部署策略[J]. 通信学报,2010,31(10):229-237.

[2] 李亚男,徐夫田,陈金鑫. 基于 LEACH 的 WSNs 分簇优化策略[J]. 传感技术学报,2014,27(5):670-674.

[3] 李建洲,王海涛,陶安. 一种能耗均衡的 WSN 分簇路由协议[J]. 传感技术学报,2013,26(3):396-401.

[4] 龚本灿,李腊元,蒋廷,等. 基于生成树的无线传感器网络分布式路由协议[J]. 微电子学与计算机,2008,25(11):77-80.

[5] 张明才,薛安荣,王伟. 基于最小生成树的非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用,2012,32(3):787-790.

[6] 陆晶,马悦,吴晓军. 一种基于最小生成树的非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用,2012,33(10):2293-2296.

[7] 朱敏,肖震,刘昊霖,等. WSN 中基于虚拟网格的分簇路由算法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):143-148.

[8] 刘琳,于海斌. 异构无线传感器网络中簇首的优化部署策略[J]. 通信学报,2010,31(10):229-237.

[9] 翟春杰,徐建闽,刘永桂. 基于分区的能耗均衡路由协议[J]. 传感技术学报,2016,29(1):80-86.

[10] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2nd International Workshops on Sensor and Actor Network Protocols and Applications. Boston, USA: IEEE, 2004: 223-233.

[11] 卢建刚,乐红兵. 基于区域划分的 WSN 非均匀分簇算法[J]. 计算机工程与设计,2011,32(8):2639-2642.

[12] 刘帅,李正炜,吴元昊,等. 基于能耗梯度的无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报,2016,29(8):1247-1252.

[13] 张明才,薛安荣,王伟. 基于最小生成树的非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用,2012,32(3):787-790.

[14] Akyildiz I. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks,2002,38(4):393-422.

作者简介:

李东林 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络. E-mail: 540412133@qq. com.

韦素媛 女,(1971-),副教授,硕士生导师. 研究方向为计算机网络.

(上接第 35 页)

[6] 管涛. 统计聚类模型研究综述[J]. 计算机科学,2012,39(7):18-24.

[7] 郝晓丽,张靖. 基于改进自适应聚类算法的 RBF 神经网络分类器设计与实现[J]. 计算机科学,2014,41(6):260-263.

[8] 周开乐,杨善林,丁帅,等. 聚类有效性研究综述[J]. 系统工程理论与实践,2014,34(9):2417-2431.

[9] 赵杰,杨柳. 聚类分析算法 dBscan 的改进与实现[J]. 微电子学与计算机,2009,26(11):190-192.

[10] 许虎,王治和. 一种改进的基于密度的聚类算法[J]. 微电子学与计算机,2012,29(2):44-53.

作者简介:

闫安 男,(1977-),博士,副教授. 研究方向为市场营销.

刘琪林(通讯作者) 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为数据挖掘. E-mail:1635813128@qq. com.