

无线传感器网络分簇算法综述

徐晶晶¹ 张欣慧¹ 许必宵² 孙知信¹

(南京邮电大学物联网学院 南京 210003)¹ (南京邮电大学理学院 南京 210003)²

摘要 分簇算法是无线传感器网络领域中一种典型的算法,并在其中扮演着重要的角色。从能量均衡和网络生命周期的角度出发,根据是否仅由一个中心控制节点负责整个网络的簇划分,将分簇算法分为3类,系统地叙述了目前经典的分簇算法以及近年来最新的研究成果,并分析了这些算法的特点和适用情况。最后结合该领域当前研究现状,提出了WSN研究中需要关注的问题,展望了这一研究方向在未来的发展趋势和前景。

关键词 无线传感器网络,分簇算法,能量均衡,网络生命周期

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.003

Survey of Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks

XU Jing-jing¹ ZHANG Xin-hui¹ XU Bi-xiao² SUN Zhi-xin¹

(College of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)¹

(College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)²

Abstract Clustering algorithms are very important in the area of wireless sensor network. On the viewpoint of energy balance and network lifetime, according to whether or not an only central control node is responsible for the whole network, clustering algorithms can be divided into three categories. Some typical clustering algorithms and the latest achievements of recent years were briefly reviewed, and their characteristics and application scope were analyzed. At last, according to the existed study on WSN, some problems worthy of note were mentioned in this paper. Besides, the developing trend and prospects of WSN were predicted.

Keywords Wireless sensor network, Clustering algorithms, Energy balance, Network lifetime

1 引言

无线传感器网络,是由放置在检测区内的大量低成本并拥有传感、计算、数据处理和通信能力的微型传感器节点组成的网络,即通常所说的WSN,其主要是为了对覆盖区域中的目标对象进行感知、收集和和处理,并且把消息发送给监测者。无线传感器网络是一种全分布式的系统,一般没有中心节点,所有的传感器节点都会以随机投放的方式部署在目标区域。在人员无法到达(如污染严重或者敌对区域)、电源供给和布线困难以及某些特殊场景(如自然灾害发生时,固定的通信方式不能使用)等区域,无线传感器网络都可以得到应用。目前,在环境、医疗、家庭、军事和其他工用、商用领域,无线传感器网络已经被普遍运用,在反恐、救灾和空间探索等特殊领域也有很大的发展前景。由于传感器节点的能量非常有限,而且通常情况下能量不能及时得到补充,能量效率在无线传感器网络中非常重要,它影响了整个网络的寿命。

如果每一个传感器节点都在网络中进行通信和数据传

输,那么就会发生严重的数据拥塞和碰撞,从而很快耗尽传感器网络中的能量。为了提高能量利用效率和减少传输延迟,节点被合并成许多集群,称为簇,这种结合传感器节点的方法称为分簇。在无线传感器网络的分层路由的实施过程中,分簇算法是非常关键的方法。在分组无线网中,分簇的思想首次被提出,它主要用来层次划分网络中的节点,使部分相邻的节点形成一个簇,每个簇内选举一个簇头(CH),负责收集汇总簇中其他节点的数据,并将其传送到基站(BS)或汇聚节点(sink),其余节点称为成员节点(CM),如图1所示。

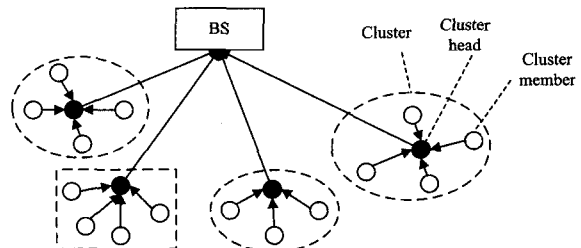


图1 分簇路由协议拓扑结构

到稿日期:2015-12-24 返修日期:2016-05-16 本文受国家自然科学基金(60973140,61170276,61373135),江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA520003),江苏省经信委(2015年)项目资助。

徐晶晶(1993-),女,主要研究方向为无线传感器网络分簇,E-mail:b12070603@njupt.edu.cn;张欣慧(1994-),女,主要研究方向为无线传感器网络三维定位;许必宵(1993-),男,主要研究方向为无线传感器网络定位技术;孙知信(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络与安全、多媒体通信、移动互联网,E-mail:sunzx@njupt.edu.cn。

上层骨干网由簇头连接而成,它负责转发数据从而实现簇间通信。到目前为止,为了实施层次路由协议,在无线自组网中已经提出如最低移动性算法、基于节点 ID 的链路分簇算法(LCA)^[1]等许多分簇算法。在无线传感器网络中,分簇算法设计的目标是保持网络负载均衡,最大化地延长网络生命周期。

簇头为大量节点提供可扩展性并降低能量消耗,簇头的选择在设计分簇算法中是一个重要的问题。簇头选择算法通常会基于以下几个原则:节点和邻居节点的剩余能量;簇头与基站之间的跳数和距离;簇内和簇间的通信代价;簇头的分布密度。近年大量优秀的分簇算法中的大多数算法考虑了以下几个技术:簇头节点有较大的剩余能量;簇头节点周期性地旋转以使能量达到平衡;簇头选择是基于剩余能量和与基站的通信距离。因此,可以通过优化簇头选择的算法来进一步提升网络运行速度,节约单个节点的能量,延长网络寿命。

本文将分簇算法分为 3 类:集中式分簇算法、分布式分簇算法和混合式分簇算法,分别从这 3 类梳理无线传感器网络中分簇算法的相关研究,分析和比较了它们的优点和不足,并且在此基础上给出了进一步深入研究的方向。

2 分布式分簇算法

在分布式分簇算法中,一般根据一定的概率或者相邻节点之间动态交换的信息来决定该传感器节点是否成为簇头。分布式分簇算法可用于地理位置未知的传感器中,即这些传感器不知道自己的网络位置,所有的路由方法必须依据它们的内部信息。

麻省理工学院(MIT)的 Heinzelman 等人提出的 LEACH^[2]是分布式分簇算法中最经典的算法,它是一种低功耗自适应分簇算法。LEACH 是周期性执行的,其工作过程如图 2 所示。

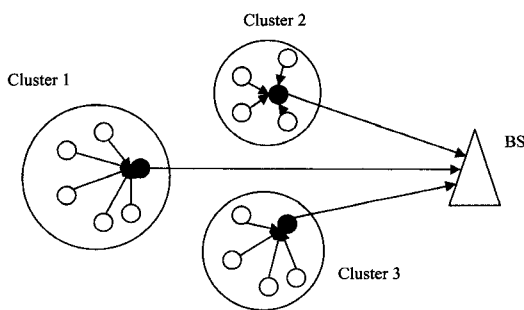


图 2 LEACH 中每个簇与基站通信的方式

首先是簇的建立阶段,每个节点通过比较相应的随机数和给定的阈值来决定自己是否成为簇头;接着,每个节点都会收到簇头的广播消息,并且根据该信号的强弱决定加入哪个簇。在数据传输阶段,簇内的所有节点按照时分复用(TDMA)时隙向簇头发送数据。簇头聚集收到的消息,并将其发送到基站。经过一段时间后,网络会再次进入启动阶段,进行下一轮的簇头选择并重新进行建立簇的过程。为了降低网络的能量消耗,达到延长网络寿命的目的,在选择簇头节点时,可以通过使用等概率的随机循环的方法来平均整个网络的能量负载并将其分配到网络中的每个传感器节点。实验结果显

示,LEACH 算法比一般的平面多跳路由协议和静态分层算法的网络生存时间更长,可以延长 15%^[3]。但是,LEACH 没有考虑到以下问题:1)数据传送阶段没有得到改进;2)随机选择簇头的方法不能使簇头在整个网络中分布均匀;3)对于离汇聚节点较远的簇头节点,可能会因为过早用尽自身的能量导致网络分割。

TEEN^[4]是一种除了在数据传送阶段使用的方法外其他与 LEACH 相似的分簇算法。为了降低发送数据的频率,在该算法中设置了硬、软阈值,通过合理调节这两个阈值的大小,可以平衡精度要求与系统能耗。通过这种方法能够减少网络通信量,并且能很好地监测热点地区和发生突发事件的地区。但是 TEEN 有以下两点不足:1)节点会因为不能达到阈值而不传送数据;2)如果达到阈值,节点会在第一时间传送数据,这样容易导致信号受到干扰,而假如节点采用 TDMA 的方式传送,就会发生数据延迟。在该算法中软、硬阈值的设置使得在减少数据传输量的同时,也阻挡了部分数据的上传,因此在需要周期性上报数据的应用中使用该算法是不恰当的。SEP^[5]是将 LEACH 算法中的概率值和节点能量结合起来的算法,能量越高的节点被选为簇头的概率越大。DEEC^[6]是一种基于 SEP 的改进算法,该算法综合考虑了节点的初始能量和剩余能量,从而可以使整个网络的能量消耗更加均衡。

PEGASIS^[7]算法是根据 LEACH 的缺陷而提出的,它主要采用了贪婪算法。该算法解决了 LEACH 簇头节点选择频繁带来的问题,而且簇头本身具有链式数据聚合的特点,这样可以有效减少数据通信量并降低传输频率。为了节省能量消耗,每个节点会优先选择低功率与相对距离较近的邻居节点进行通信。这种多跳的通信方式可以有效延长网络生命周期,但是会导致簇头成为路由唯一的决定因素,如果簇头失效,路由也会随之失败。每个节点都必须能够与 sink 点进行通信;在形成链的过程中,节点需要知道其他节点的位置信息,这会造成很大的开销。在链过长的情况下,就不适用于需要实时信息的应用,因为这会增加数据传输时延。针对 PEGASIS 里出现的能量漏洞,文献[8]提出了 CSS 算法。

LSCP^[9]是针对某种应用场景提出来的,在这种场景中目标会发出一些信号,并且随着距离的增加,信号强度会衰减,这样会使目标周围形成一个信号强度的“磁场”,传感器会采集这些信号并且实现目标探测与追踪。通过传感器节点分簇确定目标的位置和数量。LSCP 提出了 DAM(Distributed Aggregate Management)的分簇算法,该算法最后会形成一棵树,这棵树的根是与目标距离最小的簇头节点,即能够感知到目标的最大信号强度的节点。信号强度随着与根节点距离的增大而衰减,从而实现剩余节点从根节点到叶子节点的有序分布。

为了提高分簇算法的效率,后续提出的很多基于优化的分簇算法都是对节点的通信开销、邻居节点数、成员节点到簇头节点的距离等分配一定的权重,综合考虑这些因素来选取簇头。HEED^[10]算法主要依据主、次参数来周期性地选择簇头,主参数根据剩余能量来随机选择初始的簇头集合,次参数

根据簇内通信开销判断落在多个簇内的节点最终属于哪个簇,而且实现簇头节点间的负载均衡。HEED的改进之处在于:在选择簇头的过程中,引入了主从关系、多个约束条件和节点剩余能量。HEED的分簇速度比LEACH更快,能产生分布更加均匀的簇头、更合理的网络拓扑。CEFL^[11]中的簇头选择使用了Mamdani模糊逻辑方法,该算法综合考虑了节点向心性、节点密集度和节点能量。与LEACH相比,这种将决策理论引入到簇头选取中的分簇算法可以延长网络生存时间,但是复杂度也更高,因此适用于中等规模的网络。GCHE-FL^[12]算法采用两次模糊逻辑选择簇头,以确定传感器成为网关和簇头的概率。第一次是网关选择,综合考虑了它们与基站的接近度以及节点能量这两个因素。第二次是簇头选择,使用了两个模糊参数,分别是每个节点剩余能量和簇内平均能量的比值、一个节点和簇内其他节点的距离之和。该算法利用地方决策来选择簇头和网关,从而正确分配能量以及保证最大网络生存时间。

文献[13]提出的ACE也是一种自适应分布式算法,并且具有良好的反馈机制。该算法能够对报文丢失或者节点失效作出迅速反应,成簇的方法可以大大降低相互间的重叠率,从而有效减少簇间通信的干扰,同时其具有良好的健壮性,而且网络规模的大小不会影响成簇的收敛速度。DAEA^[14]提出的三层簇头数据融合结构是能量与延迟之间的折衷,它首先根据地理位置信息划分成等大、相邻又不重叠的正方形区域。该算法为每个簇选择簇头作为局部汇聚点LA,并从LA中选择上层簇头作为主汇聚点MA,以更好地汇总数据和节省能耗。由节点之前已被选为簇头的次数和节点能量来决定LA,为了延长网络生存时间,MA是从LA的集合中选取的最优值,主要的任务就是向基站转发数据,该算法一般用于中小型网络。HGMR^[15]是基于位置信息的并且采用多播方式的分簇算法,它涵盖了分层会合点多播协议和地理多播路由的思想。为了处理网络中存在的多sink点及sink点移动的问题,文献[16]提出了TTDD算法,它主要被运用于某种特殊场合在这种场合中sink节点不断移动而其他节点固定。

无线传感器网络集通信技术、计算技术和传感技术于一体,其中传感器节点能量有限,因此能量效率在无线传感器网络的设计中显得尤为重要,它已经成为研究工作者关注的主要方向。为了提高无线传感器网络中的能量利用率,文献[17]提出CHEP算法,它通过能量预测的方式来选取簇头节点。该算法将所得的剩余能量预测参数作为考虑因素引入阈值的计算中,使能耗较慢并且剩余能量较高的节点能够被优先选为簇头节点,这样可以使网络负载更加均衡,从而延长网络寿命。根据无线传感器网络中节点能量受限的特性,文献[18]提出了RCDA算法,它是一种响应式分布分簇算法,簇头选举仅依据局部拓扑信息而不需要提前知道所有节点的位置信息,而且利用了代价函数对簇进行划分,该算法适用于需要周期性地获取信息的无线传感器网络。

随着时间推进,分簇算法在近几年也获得了空前的发展,不断有一些更优秀的分簇算法产生。文献[19]所提算法就是众多优秀的分簇算法中比较突出的一个。它首先基于分簇的

无线传感器网络数据汇聚传送协议CDAT,然后采取一种能够使能耗均衡的分簇方法以及更加优秀的数据预测传送机制。通过这一系列的措施,这种方法有效地延长了网络的生命周期。通过严谨的理论分析并辅以充分的实验,我们可以得到以下结果:在服务质量得到保障的前提下,CDAT通过均衡能耗、减少数据传送次数让网络生命期得到了有效的延长,从而优于LEACH,PEGASIS等协议。文献[20]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。该协议是基于时间的,它的广播时间由候选簇头的剩余能量和其邻居节点的剩余能量所决定。需要注意的是,通过控制不同位置的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。这样操作以后,就可以让网络中不同位置的节点之间的簇内和簇间通信能耗得以互相补偿。在进行众多仿真实验以后可知,DEBUC能够有效地利用单个节点能量,让网络能耗得以均衡,从而使网络生命周期得以延长。

文献[21]提出一种新的基于预测能源消耗效率(PECE)的分簇路由算法,它由两个阶段组成:簇的形成阶段和数据的稳定传输阶段。在簇的形成阶段,设计了一种基于节点度、节点间相对距离和节点剩余能量的节能分簇算法。选择簇头时充分考虑节点度和节点间的平均距离,因此簇间通信代价很小。在数据的稳定传输阶段,利用蜂群优化算法(BCO),设计了用于数据传输的预测能源消耗效率的方法。在考虑预测能量消耗、跳数和传播延迟的基础上,利用两种类型的蜜蜂代理从源节点到汇聚节点对各个路由路径进行预测,通过优化设计的算法可以提高分簇质量,从而提高整体的网络性能,降低和平衡整个网络的能量消耗,延长网络的生存时间。

通常情况下,无线传感器网络有很少甚至根本没有基础设施,而且经常由若干个传感器节点来监控一个区域,以获得有关环境的数据。传统技术(如MTE)的效率较低,LEACH中簇头在整个网络所有节点间随机轮转,VAP-E^[22]是基于虚拟区域异构无线传感器网络的划分,DNR^[23]介绍了一种分布式系统级诊断算法,允许一个分区的任意拓扑网络的每个节点确定网络的哪些部分可达和不可达。ANPC-PSO^[24]很好地解决了这个问题,它是一个通过自适应划分网络域以及考虑网络状态信息来选择簇头节点的协议,利用粒子群优化算法^[25](PSO)可以得到多模态最优值。该算法在自适应划分网络和生产簇头节点时综合考虑了传感器网络的状态信息(如剩余能量、节点位置、邻居节点和基站)。绩效评价结果表明,该协议可以通过网络中的分布式能量耗散来提高系统的寿命和数据分发。

文献[26]提出一种在容迟网络环境下基于动态半马尔可夫路径搜索模型的分簇路由方法CRSMP,该方法既考虑了节点拥有的社会属性所导致的分簇问题,又考虑了节点间未来一段时间内的最大相遇概率以及对应的相遇时间,结合分簇结果和相遇情况生成动态路由表,完成一种单副本的路由方法。EDDEEC^[27]由异构网络模型、能量消耗模型和基于分簇的路由机制组成。基于分簇的路由机制用一种高效动态的方式改变了簇头选择的概率,实现了网络负载均衡。文献

[28]提出一种自适应分簇算法,基于平面路由体系结构,进而提出一种基于分簇机制的方案。分簇后,数据传输在一定程度上被限制,以达到更高的工作效率。最后,根据算法的能量平衡原理构建多跳路由路径。实验表明,该算法能够很好地节省能量,从而延长网络生命周期。

此外, DB-MCR^[29], CRT2FLACO^[30], GreenOCR^[31], BCA^[32], EE-LEACH^[33], LEAUCH^[34], CC-HEED^[35], EEM-DC^[36], GAECH^[37], Synchronous Firefly Algorithm^[38] 和 Two-tier Particle Swarm Optimization Protocol^[39]等算法也都是针对平衡能量负载、延长网络生命周期而提出的。

总体而言,分布式分簇算法有较好的扩展性和较快的收敛速度,同时能量也具有高效性,但是其健壮性较差;具有较强的自组织能力,能够适应灵活多变的环境,但实现的分簇质量不高。这类算法简单、高效、灵活,因此更适用于大规模 WSN。

3 集中式分簇算法

在集中式分簇算法中,仅由基站负责整个网络的簇划分。中心控制节点(基站)通常有持续的电源供应、较高的存储与计算能力,并能获得网络的全局信息(如每个节点的位置以及剩余能量等),再通过一些算法确定网络的簇头,最后将选出的簇头向全网广播,因此可以采用复杂的算法获得优化的分簇结果。集中式分簇算法可以用于地理位置已知的传感器,传感器知道自己的网络位置,所有的路由方法都由中心控制节点决定。

在集中式分簇算法中, LEACH-C^[40]是一个经典的算法,其成簇过程如图3所示。基站会采集它所处的整个网络中的所有节点,然后经过一系列的运算后得到能量的平均值,进而筛选出高于平均能量的节点。通过一些算法从集合中选取一定数量的节点成为簇头,该算法的优点包括:簇头的选择以及优化。LEACH-F^[41]采用模拟退火算法来建立簇的过程,与此同时,基站为每个簇生成一个簇头列表,代表簇内被选为簇头的节点序列。簇的结构具有固定性,这主要表现在其结构一旦形成就不会再改变。与 LEACH 和 LEACH-C 相比, LEACH-F 的缺点也是很明显的:它并不适合真实的网络应用,因为实际的网络应用中存在各种各样的动态变化,而它不能很好地处理这种变化,如节点在处理时的失败与移动等。

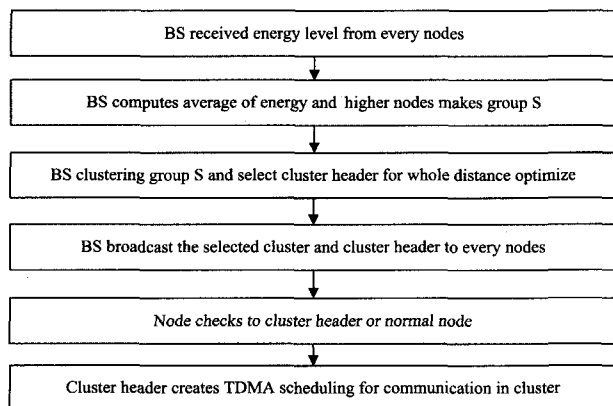


图3 LEACH-C的成簇过程

与 LEACH-C 基本一样的还有 BCDP^[42]。它在 LEACH-C 的基础上做了一定的优化,如使用迭代法来选取簇头,整个过程一直二分,直到产生规定数目的子簇。但它的一个很明显的缺点就是可能会导致簇头的能量分布不均匀。后来的 PLEACH^[43]算法较为有效地解决了这个问题。基于 AHP 的分簇算法^[44]和基于模糊逻辑的分簇算法^[45]都在簇头选择中引入了决策理论。这两种算法在簇头选择阶段比上述几种算法更优,但是复杂度也更高。

重新分簇会导致很多能量损耗,而其中很大的一部分其实是可以节省下来的。出于节约能量的目的,一种名为 HY-ENAS 的算法在文献[46]中被提出,它产生簇头的过程与上文提到的 LEACH-C 算法大体上是一致的。不同的是, HY-ENAS 中簇的结构具有较好的稳定性,它并不需要每一次循环都进行调整,该过程节省了很多能量。在一些情况下,簇是不需要重组的,其中的判定标准就是簇的相似度,在判断时使用了机器学习的思想。该算法的具体思想如下:首先产生适当数目的簇,然后生成一个名为 blacklist 的列表。blacklist 在这个算法中扮演着核心的角色。这个 blacklist 会把每一次循环中平均能量大于整个网络耗费的平均能量阈值的 2 倍的簇归结为一个坏簇,并且记录下详细的信息。与此同时,它会采用 k-NN 算法来决定是否重新选择簇头。在使用 k-NN 算法的同时,它使用松弛算法来进行优化,节省了能量开销。

以上提出的 LEACH, LEACH-C, LEACH-F 和 HEED 等算法中,一般不突出如何处理无线传感器网络中能量负载均衡的问题,因此文献[47]提出 DCS 算法,它可以有效地延长网络寿命,使第一个和最后一个节点的死亡时间很容易实现最小化。该算法重点讲述了在由固定节点组成的随机部署的无线传感网络中最优簇数的形成问题,其新颖之处在于介绍了一种新的集中式双相控协议,首先获得能量平衡的簇,然后使每个固定簇内传感器节点的剩余能量信息作为其数据包的一部分传输给簇头节点(以均匀量化的能量等级形式)。这种共享的量化能量信息可以达到接近最佳的能量负载平衡,形成一个长期的系统。

通过上面的分析可以看出:在集中式分簇算法中,簇头在生成过程中所产生的费用会比较大,而且它的生成方式已经限制了它在未来可能会存在的各种各样需要修改的情况。在上面所列举的众多算法中, LEACH-C 等集中式分簇算法的健壮性相对来说更出众,但同时也存在一些缺点。在这个过程中,基站扮演了一个很重要的角色:选择出一个簇头。其在具有较强的健壮性的背后,缺点也很明显:高网络流量、高信号延迟和时间延迟。经过以上分析,以 LEACH-C 为代表的集中式算法比较适合规模比较小的网络。

4 混合式分簇算法

将混合式分簇算法分为两类,其中一类是采用集中式和分布式相结合的方式。例如 LEACH-KED^[48]是在 LEACH 的基础上提出的,其基于无线传感器网络中的能量和距离,结合了集中式分簇算法 LEACH-C 以及分布式分簇算法 K-means 的一些较好的思想,在簇头选择上采用了基于权重的

方法,综合考虑了候选簇头节点的位置信息、剩余能量与基站间的距离,从而能够在最后选取最佳的节点作为簇头。

另外一类是在集中式或者分布式分簇算法的基础上添加了其他的元素,以减少能量消耗。其中以文献[49]为代表的、动态的且具有明显的能量结构层次的分簇算法中比较经典的是 DEEH 算法。相比较于其他算法,它采用了一些较为先进的设计理论,如机制设计理论,很好地解决了大型 WSN 中的自私节点的问题;而且,它也不需要了解网络中传感器节点所存储的本地信息,因而在应用到大型的 WSN 时,它具有明显的优势。

HRP-DCM^[50]根据 TDMA 和 CDMA 的时间表,有额外权限的协调节点或者簇头节点与基站之间进行通信,从而实现动态分类节点分簇。与 LEACH-M^[51]不同,该算法基于一个阈值对网络进行动态分簇,这与属于最小簇的节点数量相关联。假设网络中节点随机分布,其以单跳形式与基站之间进行通信。对于一个给定的圆,基站使用相同的过程选择新的簇头节点,所有节点整合了优化能量消耗的睡眠和唤醒模式。在每个簇中,根据能量标准,通过与之前的簇头相关的计算来选择新的簇头节点。一旦属于最小簇的节点被选为簇头,那么最后一个簇头节点就会通知基站不能有其他节点被选为新的簇头节点。因此,基站就会在形成簇的初始阶段动态地重新组织网络。簇头节点会根据一个随机概率被选出,所有成员节点会通知给定簇的成员。在这个循环过程中,每个簇头节点根据剩余能量选择新的簇头,直到成员节点不能被选为簇头节点。在这之后,基站被告知该簇不能为下一轮循环选择一个簇头,因为簇中所有节点都已被选择过。因此,基站为了形成新簇计算一个新的概率。

ECHSA^[52]在簇头选择阶段选择靠近中心的节点作为候选簇头节点。另外,一个在邻居节点中具有最大剩余能量和更好连通性的节点被选为簇头。而且为了在聚集过程中减少能量消耗,在每个簇头节点处设置一个过滤器,这个过滤器能过滤掉不想要的传感器读数的传输,从而减少了数据传输,加强了能量保护。在这个方案中,通过逐步增加簇的半径来产生平衡簇,簇头选择过程是有限的,仅限于有最大剩余能量和最多邻居节点数的靠近簇中心的节点。为了减少传输的数量,使用了一个过滤器来消除冗余和避免不必要的传输。BACR^[53]是一种新型的基于 WSN 中 LEACH 的分层路由协议,通过能量参与选举和退出通告来控制簇头节点的数量,使之在小范围内变化,并均匀地找到簇头节点,从而延长网络寿命。同时,这个算法也采用了集群连任技术,减少了在簇建立阶段所消耗的能量,延长了网络寿命。

研究者也提出了解决无线传感器网络在大规模案例中的可扩展性问题的方案。在文献[54]提出的算法中,传感器节点将能量存储在节点密度场(NDF),增加了无线传感器网络的寿命。对于数据管理,高效节能路由执行基于树的中继路由算法,将重要数据从传感器节点传输到汇聚节点。该算法通过六边形的边缘来进行路由,并且为路由提供最短路径的最小生成树来控制无线传感器网络中的传输功率。有效的多跳六边形分簇可以提高无线传感器网络的能量效率,延长网

络寿命,更加适用于大型网络。

分布式和集中式的分簇算法各有优势和劣势,因此将其进行融合,这样就能得到后来常见的混合式分簇算法,它在一定程度上促进了对无线传感器网络的研究。

5 分析与展望

本文综述了目前无线传感器网络中主要的分簇算法,将它们分为集中式分簇算法、分布式分簇算法和混合式分簇算法,针对每一类进行了相应的算法分析。

虽然分簇算法近几年来已经取得了长足的进步,但是还是有一些方面亟待完善。

(1)分簇算法的安全性与可靠性。在目前信息网络越来越复杂的环境下,任何算法在应用于真实的情况之前,其安全性都会扮演着一个很重要的角色,尤其是在大数据的应用环境中,分簇算法应该具有较强的自我修复能力。

(2)健壮性与连通性。在真实的环境下,经常会出现一些节点因为各种原因而与网络失去联系的情况。分簇算法应该能够处理各种突发情况,如节点因天气原因而失效等。

(3)维度单一。基于三维的分簇算法的理论研究较为贫乏,而且绝大部分科研人员对分簇算法的研究都是在理想状态下进行的,因此分簇算法的发展还有一段很长的路要走。

(4)混合式分簇算法的发展。现有的众多分簇算法中,很大一部分只有在某一种特定的情况下才能拥有比较好的表现,综合性能良好的分簇算法比较少。因此,综合集中式分簇算法和分布式分簇算法的优点,设计出适合大规模传感器网络的混合式分簇算法是值得关注的方向。

结束语 在大数据和云计算的时代背景之下,无线传感器网络在应用领域的发展给人们带来了机遇,同时也给技术提出了严峻的挑战。通过对无线传感器网络中分簇算法的分析与归纳可以发现,混合式分簇算法在无线传感器网络中具有巨大的潜力,虽然目前这方面的研究成果很少,但从总体上看,混合式分簇算法必然会成为今后 WSN 研究工作的关注点。与此同时,传感器硬件的发展对分簇算法的设计也具有重要意义,在一定程度上可以促进无线传感器网络的发展。比如在一般情况下,传感器的能量无法再续,但是硬件技术的进步可能会使传感器能量得到补充。

参考文献

- [1] YU J Y, CHONG P H J. A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2005, 7(1): 32-48.
- [2] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000. IEEE, 2000.
- [3] NAYEBI A, SARBAZ-AZAD H. Performance modeling of the LEACH protocol for mobile wireless sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2011, 71(6): 812-821.

- [4] MANJESHWAR A. TEEN; a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]// Proc Ipdps Workshops. 2001; 2009-2015.
- [5] SMARAGDAKIS G, MATTA I, BESTAVROS A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]// Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004). 2004; 1-11.
- [6] QING L, ZHU Q, WANG M. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2006, 29(12): 2230-2237.
- [7] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems[C]// Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE, 2002; 1125-1130
- [8] JUNG S M, HAN Y J, CHUNG T M. The concentric clustering scheme for efficient energy consumption in the PEGASIS[C]// The 9th International Conference on Advanced Communication Technology. IEEE, 2007; 260-265.
- [9] FANG Q, ZHAO F, GUIBAS L. Lightweight sensing and communication protocols for target enumeration and aggregation [C]// Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing. ACM, 2003; 165-176.
- [10] 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); 366-379.
- [11] GUPTA I, RIORDAN D, SAMPALLI S. Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference, 2005. IEEE, 2005; 255-260.
- [12] ALLA B. Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic in heterogeneous wireless sensor networks[C]// 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems. 2012; 761-766.
- [13] CHAN H, PERRING A. ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation[M]// Wireless Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2004; 154-171.
- [14] AL-KARAKI J N, UL-MUSTAFA R, KAMEL A E. Data aggregation in wireless sensor networks-exact and approximate algorithms[C]// Workshop on High Performance Switching and Routing, 2004 (HPSR). IEEE, 2004; 241-245.
- [15] KOUTSONIKOLAS D, DAS S M, HU Y C, et al. Hierarchical geographic multicast routing for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2010, 16(2); 449-466.
- [16] LUO H, YE F, CHENG J, et al. TTDD: Two-tier data dissemination in large-scale wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2005, 11(1-2); 161-175.
- [17] LIN K, ZHAO H, YIN Z Y, et al. A clustering algorithm based on energy prediction in wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 4(4); 824-828. (in Chinese)
林恺, 赵海, 尹震宇, 等. 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法[J]. 电子学报, 2008, 4(4); 824-828.
- [18] HU J, SHEN L F, SONG T C, et al. A new clustering algorithm in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(7); 20-26. (in Chinese)
胡静, 沈连丰, 宋铁成, 等. 新的无线传感器网络分簇算法[J]. 通信学报, 2008, 29(7); 20-26.
- [19] YANG J, ZHANG D Y, ZHANG Y Y, et al. A cluster based data aggregation and transmission protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2010, 5(5); 1127-1137. (in Chinese)
杨军, 张德运, 张云翼, 等. 基于分簇的无线传感器网络数据汇聚传送协议[J]. 软件学报, 2010, 5(5); 1127-1137.
- [20] JIANG C J, SHI W R, TANG X L, et al. Non uniform clustering routing protocol with energy balanced for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2012, 34(5); 1222-1232. (in Chinese)
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, 34(5); 1222-1232.
- [21] ZHANG D, WANG X, SONG X, et al. A new clustering routing method based on PECE for WSN [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, 2015(1): 1-13.
- [22] WANG R, LIU G, ZHENG C. A clustering algorithm based on virtual area partition for heterogeneous wireless sensor networks[C]// International Conference on Mechatronics and Automation, 2007 (ICMA 2007). IEEE, 2007; 372-376.
- [23] DUARTE JR E P, WEBER A, FONSECA K V O. Distributed diagnosis of dynamic events in partitionable arbitrary topology networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(8); 1415-1426.
- [24] MA D, MA J, XU P, et al. An adaptive node partition clustering protocol using particle swarm optimization [C] // 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). IEEE, 2013; 250-253.
- [25] DEL VALLE Y, VENAYAGAMOORTHY G K, MOHAGHEGH S, et al. Particle swarm optimization; basic concepts, variants and applications in power systems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(2); 171-195.
- [26] WANG E, YANG Y J, LI L. A DTN clustering routing method based on dynamic semi Markov path searching model[J]. Chinese Journal of Computer, 2015, 38(3); 483-499. (in Chinese)
王恩, 杨永健, 李莅. 基于动态半马尔可夫路径搜索模型的 DTN 分簇路由方法[J]. 计算机学报, 2015, 38(3); 483-499.
- [27] JAVAID N, RASHEED M B, IMRAN M, et al. An Energy Efficient Distributed Clustering Algorithm for Heterogeneous WSNs[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, 2015(1); 1-11
- [28] WEI X, LU J, ZHUANG Y, et al. Adaptive clustering routing optimization for wireless sensor networks[C]// 2013 9th International Conference on Natural Computation (ICNC). 2013; 1011-1015.
- [29] TYAGI S, TANWAR S, KUMAR N, et al. Cognitive radio-based clustering for opportunistic shared spectrum access to enhance lifetime of wireless sensor network[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2015, 22(c); 90-112.

- [30] XIE W X, ZHANG Q Y, SUN Z M, et al. A Clustering Routing Protocol for WSN Based on Type-2 Fuzzy Logic and Ant Colony Optimization[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 84(2):1165-1196.
- [31] LIU J, LI J, NIU X, et al. GreenOCR: An Energy-Efficient Optimal Clustering Routing Protocol[J]. *Computer Journal*, 2015, 58(6):1344.
- [32] SHIN H, MOH S, CHUNG I, et al. Equal-size clustering for irregularly deployed wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 82(2):995-1012.
- [33] ARUMUGAM G S, PONNUCHAMY T. EE-LEACH: development of energy-efficient LEACH Protocol for data gathering in WSN[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015, 2015(1):1-9.
- [34] PEI E, HAN H, SUN Z, et al. LEAUCH: low-energy adaptive uneven clustering hierarchy for cognitive radio sensor network [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015, 2015(1):1-8.
- [35] XIAO G, SUN N, LV L, et al. An HEED-Based Study of Cell-Clustered Algorithm in Wireless Sensor Network for Energy Efficiency[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 81(1):373-386.
- [36] MEHMOOD A, KHAN S, SHAMS B, et al. Energy-efficient multi-level and distance-aware clustering mechanism for WSNs [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2015, 28(5):972-989.
- [37] BARANIDHARAN B, SANTHI B. GAECH: Genetic Algorithm Based Energy Efficient Clustering Hierarchy in Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015(4):715740.
- [38] BASKARAN M, SADAGOPAN C. Synchronous Firefly Algorithm for Cluster Head Selection in WSN [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2015(1):780879.
- [39] ELHABYAN R S Y, YAGOUB M C E. Two-tier particle swarm optimization protocol for clustering and routing in wireless sensor network [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 52:116-128.
- [40] HEINZELMAN W B. Application-specific protocol architectures for wireless networks[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [41] MURUGANATHAN S D, MA D C F, BHASIN R, et al. A centralized energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks[J]. *Communications Magazine*, IEEE, 2005, 43(3):S8-13.
- [42] GOU H, YOO Y, ZENG H. A partition-based LEACH algorithm for wireless sensor networks[C]//Ninth IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2009(CIT'09). IEEE, 2009:40-45.
- [43] YIN Y, SHI J, LI Y, et al. Cluster head selection using analytical hierarchy process for wireless sensor networks[C]//2006 IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, 2006:1-5.
- [44] GUPTA I, RIORDAN D, SAMPALLI S. Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference, 2005. IEEE, 2005:255-260.
- [45] TILLAPART P, THUMTHAWATWORN T, PAKDEEPINIT P, et al. Method for cluster heads selection in wireless sensor networks[C]//2004 IEEE Aerospace Conference. 2004:3615-3623.
- [46] ALI S A, SEVGI C. Energy load balancing for fixed clustering in wireless sensor networks[C]//2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). IEEE, 2012:1-5.
- [47] YUNJIE J, MING L, SONG Z, et al. A clustering routing algorithm based on energy and distance in WSN[C]//2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM). IEEE, 2012:9-12.
- [48] PARK G Y, KIM H, JEONG H W, et al. A novel cluster head selection method based on K-means algorithm for energy efficient wireless sensor network [C] // 2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA). IEEE, 2013:910-915.
- [49] LIU Z X, ZHENG Q C, XUE L, et al. A clustering algorithm together with energy and node degree for sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(supp):250-256. (in Chinese) 刘志新, 郑庆超, 薛亮, 等. 一种综合能量和节点度的传感器网络分簇算法[J]. *软件学报*, 2009, 20(supp):250-256.
- [50] AOUDIA H, TOUATI Y, ALI-CHERIF A. Energy-efficient routing protocol based on dynamic clustering mechanism for WSN applications[C]//Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access. ACM, 2013:89-92.
- [51] AOUDIA H, TOUATI Y, ALI-CHERIF A, et al. Hierarchical routing approach-based energy optimization in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access. ACM, 2012:131-134.
- [52] VARALAKSHMI P, NANDAKUMAR R, UMADEVI M. An Efficient Cluster Head Selection and Aggregation for Wireless Sensor Networks[C]//2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). IEEE, 2014:1318-1321.
- [53] LIANGY, ZHANGAL, LIYZ. An Energy-Effective Routing Protocol Efficiently Constructs Cluster Topology for WSN[C]//2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). IEEE, 2013:1097-1100.
- [54] KUMAR R, HOSSAIN A, HUDROM R. Energy optimization of wireless sensor network with node density in multi hop hexagonal clustering for large structure [C] // 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). IEEE, 2015.