

基于虚拟网络的无线传感器网络分簇路由算法

陈战胜^{1,2} 沈 鸿^{3,4}

(北京交通大学计算机与信息技术学院 北京 100044)¹ (北京联合大学应用科技学院 北京 100101)²

(中山大学数据科学与计算机学院 广州 510275)³

(澳大利亚阿德莱德大学计算机科学学院 阿德莱德 5005)⁴

摘 要 针对 WSNs 路由协议中链路通信负载不均引发的能量空洞问题,提出一种基于虚拟网络的动态聚簇策略 IDCS 和考虑数据转发延迟的最大化网络生命周期的动态负载均衡路由算法 DCDLB。IDCS 依据节点的通信半径将网络划分成若干虚拟网格,采用考虑节点能量和位置因素的分布式簇首选举策略,并引入基于簇首能量水平的动态簇首轮换机制。DCDLB 综合考虑簇首间能耗均衡和数据多跳转发延迟来构建路由,实现网络生命周期的最大化。实验结果表明,DCDLB 路由算法在延长网络生命周期和降低数据转发延迟方面优于 LEACH, HEED 和 CRVB 路由算法。

关键词 生命周期,虚拟网格,簇首选举,路由算法,延迟

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.007

Virtual Grid Based Clustering and Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks

CHEN Zhan-sheng^{1,2} SHEN Hong^{3,4}

(School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)¹

(School of Applied Science and Technology, Beijing Union University, Beijing 100101, China)²

(School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)³

(School of Computer Science, The University of Adelaide, Adelaide 5005, Australia)⁴

Abstract In order to solve the energy hole problem caused by the unevenness of the link communication load in WSNs routing protocol, a dynamic clustering algorithm based on virtual grid (IDCS) and a dynamic load balancing routing algorithm (DCDLB) for maximizing network life cycle considering data forwarding delay were presented. In IDCS algorithm, the area is divided into several virtual grids according to node communication radius, and the nodes in the same grid form a cluster. The cluster head is chosen by distributed cluster head selection strategy considering node's energy and location factors, and a dynamic cluster head rotation mechanism based on cluster head's energy level is introduced for balancing consumption. In DCDLB routing algorithm, the network lifetime is maximized by considering energy consumption balance among cluster heads and multihop data forwarding delay. The simulation results show that DCDLB routing algorithm is superior to LEACH, HEED and CRVB routing algorithms in terms of extending network lifetime and decreasing data forwarding delay.

Keywords Life cycle, Virtual grid, Clusterhead election, Routing algorithm, Delay

1 引言

传感器节点通常由电池供电,存在能量有限且难以补充的缺点。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)路由协议设计的首要目标就是均衡节点能量消耗,有效延长网络的生命周期。在森林火灾监测等实时监测场景中,数据采集时延也是 WSNs 路由协议设计中需要考虑的另一个重要指标^[1]。基于分簇思想和数据融合机制的层次型路由协议具有良好的拓扑自适应性和可扩展性,减少了网络的

数据传输量,能够保障网络的连通性;采用节点通信负载均衡策略,能有效节约节点能耗,显著延长网络的生命周期^[2]。

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)协议^[3]是 WSNs 分簇算法中最具代表意义的典型能量节约型分布式路由协议,但存在一些不足^[4]:1)节点等概率地随机出任簇首,未考虑节点的剩余能量;2)LEACH 簇首选取机制使得每轮簇首的数量不确定,并且簇首的地理位置分布不均匀;3)数据转发采用簇首到基站的单跳直接传输模式,容易产生能耗不均的现象。针对簇首选取不均的问题,HEED(Hybrid

收到日期:2017-10-08 返修日期:2018-01-22 本文受国家自然科学基金(61170232,61672088,61300175),澳大利亚研究理事科研项目(DP150104871),北京联合大学应用科技学院科研经费资助。

陈战胜(1979—),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、大数据分析,E-mail:11112085@bjtu.edu.cn;沈 鸿(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为并行与分布式处理、组合优化算法、网络路由、资源调度、大数据分析等,E-mail:shenh3@mail.sysu.edu.cn(通信作者)。

Energy-Efficient Distributed clustering) 协议^[5]采用考虑节点剩余能量和簇内通信代价的完全分布式簇首选取机制,使得簇首在有限次迭代中产生,具有网络拓扑结构合理、簇首分布均匀的优点,但簇首选举过程中控制消息迭代所产生的通信开销较大。基于地理位置的分簇算法因为路由处理高效、算法简单易实现、控制开销小等特点,受到了越来越多的关注^[6-10]。其中,GAF(Geographical Adaptive Fidelity)协议^[6]及其改进算法^[7-9]基于节点的地理位置,将监测区域划分为若干虚拟网格,按照算法各自的簇首选取机制定期在格内选取簇首,同一网格内只有簇首处于工作状态,其余节点进入休眠状态。GFTCRA(Grid Based Fault Tolerant Clustering and Routing Algorithms)分布式路由协议^[7]综合考虑了能量效率和能量均衡问题,并考虑了簇首失效时的容错性问题。GHND(Grid-based Hybrid Network Deployment)^[8]通过合并和分割技术对网格内的节点进行优化调整,使得簇内的节点数量最大程度上接近均衡,从而实现网络能量效率和负载均衡。GBRR(Grid-based Reliable Routing)路由协议^[9]基于传感器节点的通信能力,提供可靠路由并保证网络的通信质量,能够应对网络出现障碍和空洞的问题。CRVB算法^[10]将监测区域划分为若干虚拟网格,根据节点剩余能量启动计时器在网格内选取簇首,分布式地构建生成树进行路由,在延长网络寿命的同时能保证较低的通信时延。

EBDG(Energy-Balanced Data Gathering)协议^[10]将网络划分为若干日冕状单元格,采用离线集中式算法计算冕状单元格的佳数量,并能解决数据路由转发中能耗不均的问题,有效延长了 WSNs 的生命周期。AM-DisCNT(Angular Multi-hop distance-based Clustering Network Transmission)协议^[12]提出分环多跳分簇路由算法,AM-DisCNT 基于节点剩余能量进行簇首选举,考虑了网络数据采集量最大化的问题,并通过引入移动信息收集基站(Sink)来延长网络的生命周期。RCFR(Reliable Coalition Formation Routing)协议^[13]基于合作博弈模型,通过节点合作实现节点能耗均衡和路由能耗的最小化,有效提升了网络数据采集量,延长了网络的生命周期。

为了减少大规模 WSNs 周期性数据采集应用中网络频繁成簇所引发的网络能量消耗^[3-6],本文提出一种改进的动态聚簇策略(Improved Dynamic Clustering Scheme, IDCS)和考虑数据转发延迟的最大化网络生命周期的动态负载均衡路由协议(Delay-Constrained and Dynamic Load-Balance routing algorithm, DCDLB)。IDCS 依据节点的通信半径,将监测区域划分成若干虚拟网格,采用综合考虑节点剩余能量和位置因素的分布式簇首选举机制,并引入基于节点能量水平的簇首动态轮换机制来实现簇内能耗的均衡。DCDLB 在满足数据转发延迟的前提下,采用数据发送方和路由节点的合作博弈策略来确定数据转发的最佳路由,实现网络生命周期的最大化。实验结果验证了协议的有效性,与路由算法 LEACH, HEED 和 CVRB 相比,DCDLB 算法的能耗均衡性更佳,显著延长了网络的生命期。

2 网络模型和问题陈述

在野外环境监测等 LS-WSNs 应用环境中,大量节点通

过飞机抛洒、炮弹发射等形式进行部署。本文的研究对象是 N 个传感器节点随机部署在长为 L 、宽为 W 的二维平面监测区域内,节点通过 GPS 设备或定位算法获知自身的地理坐标,节点位置固定且初始能量可以不同。数据采集基站 Sink 根据具体应用的需求,可以部署在区域外部^[3]或区域内部^[11]。

部署网络节点后,网络节点初始化自组织形成网络,然后进入数据传输阶段。其中,初始化阶段的工作包括完成节点定位、成簇和路由构建。

2.1 虚拟单元格的形成

在分簇协议中,LEACH 协议^[3]的随机簇首选取机制使得每轮的簇首数量差异较大,不能确保区域的监测性能。HEED 协议^[5]采用平均最小连接度方法 AMRP 形成簇,簇的全局划分接近网格划分的效果,但其迭代簇首选举机制引发的通信开销较大。研究^[6]表明,簇首选举过程中控制消息的频繁交互产生的系统能耗不容忽视^[6]。

为保证网络的监测质量,最小化簇首选举中控制消息产生的系统能耗,本文采用 GAF 算法^[6]中的虚拟网格方法将监测区域划分为 n 个边长为 $l \times l$ 的虚拟网格,每个单元格用 (V_x, V_y) 唯一标识,如图 1 所示。传感器节点的坐标 (x_i, y_i) 与节点所属虚拟网格的关系如式(1)所示。其中, (V_x, V_y) 相同的节点属于同一个网格。

$$\begin{cases} V_x = \lfloor x_i / l \rfloor \\ V_y = \lfloor y_i / l \rfloor \end{cases} \quad (1)$$

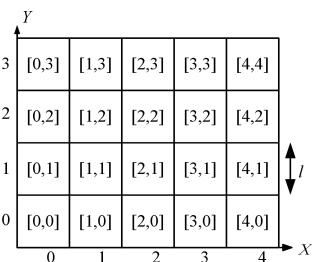


图 1 虚拟网格的划分

Fig. 1 Division of virtual grid

将网络划分为虚拟单元格后,同一个单元格内的所有节点构建成一个簇,节点依据动态聚簇策略 IDCS 选择簇首。然后,所有簇首采用动态负载均衡路由协议 DCDLB,通过邻居发现形成一个上层骨干网络。最后,簇首负责单元格内活跃节点信息的采集和数据融合,并按照构建的路由进行数据的多跳转发,直到数据发送到 Sink 为止。动态聚簇策略 IDCS 详见第 3 节,动态负载均衡路由协议 DCDLB 详见第 4 节。

2.2 通信模型及半径的设定

为了保证网络的连通性,GAF^[6]要求虚拟单元格能够与上下左右相邻的 4 个单元格彼此通信。为进一步增强网络的连通性,单元格须能与周围相邻的 8 个单元格彼此通信,如图 2 所示。彼此通信的含义是指网格中的任意节点担任簇首,其通信半径 R_i 都能保证覆盖到相邻网格的任意节点,从而保证网络的连通性。如图 2 所示,虚拟网格的边长 l 与簇首通信半径 R_i 的关系如式(2)所示。

$$2 \sqrt{l^2 + l^2} \leq R_i \Leftrightarrow l \leq \sqrt{\frac{R_i}{2}} \quad (2)$$

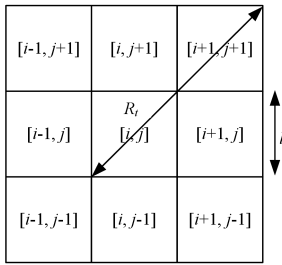


图2 节点的通信半径

Fig. 2 Communication radius of node

3 改进的动态聚簇策略 IDCS

单个传感器节点受能量限制,感知范围和数据采集精度非常有限,因此在网络部署过程中需要通过较高的覆盖密度来保证网络监测信息的准确性。但是,节点部署的随机性使得节点分布并不均匀,节点分布密度大的区域存在节点的感知范围相互重叠的问题,必然产生大量冗余数据,从而加大网络通信负载,缩短 WSNs 的生命周期。为了有效消除大量冗余数据,减轻网络通信负载, IDCS 算法提出在保证监测区域覆盖的前提下引入节点休眠机制来实现冗余数据的消除,提升网络能量的效率。

3.1 冗余节点的消除

由于节点在空闲状态消耗的能量是休眠状态消耗能量的几倍甚至几十倍^[6],因此引入节点休眠机制^[6]能够实现冗余节点的消除。在 IDCS 算法中,采用基于虚拟网格的冗余节点消除分布式算法 GDARE (Grid-based Distributed Algorithm for Redundant node Elimination) 将冗余节点的消除限制在虚拟网格内,网格分别独立执行 GDARE 算法,从而完成整个 WSNs 冗余节点的消除。

在 GDARE 算法中,首先依据传感器节点的感知半径 R_s 将虚拟网格划分为 m^2 个边长为 r 的正方形子网格。以任一簇为例,设定 m 的值为 3,簇划分示意如图 3 所示。然后,每个子网格内部的节点根据定义 1 竞争选举出激活节点。接下来,簇内的所有激活节点根据 IDCS 算法参与簇首竞选,从而确定虚拟网格的簇首。其中,子网格的数量 m^2 取决于虚拟网格的边长 l 和节点感知半径 R_s ,如式(3)所示,其中 $R = \sqrt{l^2 + l^2}$ 。

$$m = \begin{cases} R/R_s, & \text{if } R/R_s = 0 \\ \lfloor R/R_s \rfloor + 1, & \text{if } R/R_s \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

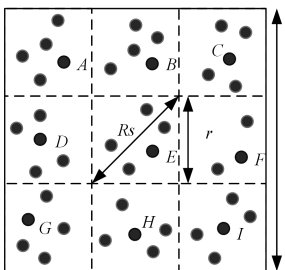


图3 簇内子网格的划分

Fig. 3 Sub-grid division in cluster

定义 1 激活节点是指处于活跃状态,参与数据采集和

数据传输的节点。与之相反,非激活节点是指进入休眠状态的节点。

GDARE 算法的优点是一个激活节点可以保证其所属于子网格的完全覆盖,在确保网络监测性能的同时让其他节点转入休眠状态,从而实现冗余节点的消除,达到节省网络能耗的目的。

3.2 簇首选举机制

网络划分为 n 个虚拟网格,即 n 个簇。在每一个簇中,怎样选取簇首节点显得至关重要。以图 3 为例,簇内激活节点 A-I 的位置各异。由于节点通信能耗与发送距离的幂次方成正比^[3],若激活节点 A-I 都符合出任簇首的能量要求,则选择节点 A 当选簇首时会使得节点 I 的能耗加快,选择节点 E 当选簇首时簇内激活节点的能耗相对均衡。为此,本文引入虚拟点的概念来简化簇首的选举过程。

定义 2 任意簇 (V_x, V_y) 的虚拟点为簇的中心位置,其坐标为 $((V_x + 0.5) \times l, (V_y + 0.5) \times l)$ 。

IDCS 簇首选举策略旨在保证簇内所有节点在时间段 $[T_{\text{start}}, T_{\text{end}}]$ 内失效,尽可能延长网络的生命周期,即使 T_{start} 尽可能大,而时间间隔 $T_{\text{duration}} = T_{\text{end}} - T_{\text{start}}$ 尽可能小。

令 p_i^r 为第 r 轮簇 g 内激活节点 i 的簇首竞争概率,则 IDCS 算法选取簇内 $\max\{p_i^r\}$ 的节点作为第 r 轮的簇首。激活节点的竞争概率 p_i^r 值的计算如下:

$$p_i^r = \alpha \times \frac{E_i^r}{E_g^r} + \beta \times \frac{d_{\text{max}} - d_{iv}}{d_{\text{total}}} \quad (4)$$

其中, $g (g=1, 2, 3, \dots, n)$ 表示簇的编号, $i (i=1, 2, \dots, m)$ 表示激活节点所属的子网格编号, E_i^r 表示激活节点 i 在第 r 轮的剩余能量, E_g^r 表示第 r 轮簇 g 内所有激活节点的总能量, d_{max} 表示簇 g 内所有激活节点与虚拟点间距离的最大值, d_{total} 为簇 g 内所有激活节点与虚拟点间距离的和, α 和 $\beta (\alpha + \beta = 1)$ 为自适应加权系数,分别对应激活节点的能量因素和距离因素。

IDCS 簇首选举策略的优点是使得剩余能量高且距离虚拟点近的节点有更大的机会当选为簇首。其中, $\alpha = \frac{1}{1 + \gamma}$, $\gamma = E_i^r / E_i^{\text{ini}}$ 表示节点剩余能量与节点初始能量的比值。当节点的能量差别不大时,距离虚拟点近的节点出任簇首的概率高;当节点的能量差异明显时,剩余能量高的节点出任簇首的概率高,从而有效均衡了簇内节点的能量消耗。

3.3 簇首重新选取策略

为了减少频繁成簇中控制消息带来的系统能耗^[6], IDCS 算法依据簇首的剩余能量水平来决定启动簇首重新选取的时机。每当一轮数据采集结束后,簇首主动与担任簇首之初簇内所有激活节点的平均能量进行比较,若簇首能量下降 $1/\lambda$,则宣布簇首重新选举消息 $MSG_ReSelect$;接着,激活节点分别与子网格内休眠节点的平均能量进行比较,若激活节点能量下降了 $1/\kappa$,则激活节点唤醒能量最大的节点担任子网格的激活节点,再自行切换到休眠状态;最后,簇内所有激活节点按照 IDCS 算法重新竞选出新的簇首。

4 路由算法 DCDLB

为了使得簇首构建的上层数据传输网络具有高可靠数据转发和能耗均衡的性能,提出了动态负载均衡路由算法 DL-

BRA(Dynamic Load-Balance Routing Algorithm)。然后,在 DLBRA 算法的基础上考虑数据转发延迟因素,提出一种延迟限定的最大化网络生命周期的动态负载均衡路由算法 DC-DLB(Delay-Constrained and Dynamic Load-Balance routing algorithm)。

4.1 动态负载均衡路由算法 DLBRA

在 DLBRA 算法中,簇首广播邻居簇首发现消息 $MSG_AdjCH_DISCOVERY$,邻居簇首接收到该消息后,判断自身能量是否满足路由转发条件。若满足,邻居簇首返回响应消息 MSG_AjdCH_OK ,这样簇首便可建立各自的邻居簇首列表。接着,簇首根据 Sink 的方位,确定邻居簇首的转发等级,分为 Class-1 和 Class-2 两个等级。接着,簇首采用贪婪思想从 Class-1 邻居簇首中选择距离最近的簇首作为下一跳路由转发节点,若 Class-1 为空,则从 Class-2 中选择;若邻居列表为空,则簇首采用直接单跳传送模式进行数据发送,直至数据传送到 Sink。

设定 Sink 位于图 3 的正上方,则根据图 2 所示的节点通信模型可知,簇首 E 的邻居簇首为 $\{A, B, C, D, F, G, H, I\}$ 。因为 Sink 位于簇的上方位置,所以邻居簇首进一步精简为 $\{A, B, C, D, F\}$ 。在 DLBRA 算法中,进一步将邻居簇首划分为第 1 等级转发集合 Class-1 $\{A, B, C\}$ 和第 2 等级转发集合 Class-2 $\{D, F\}$ 。其中,第 2 等级路由转发集合的目的是防止簇首所在区域以及簇首的第 1 等级路由转发的邻居簇首所在区域出现节点稀疏或能量匮乏的现象,从而提升网络传输的可靠性。文中将第 2 等级路由转发的方法称为簇首周边转发方法。

4.2 延迟限定的路由算法 DCDLB

针对一些对时间控制要求严格的应用场合,比如森林火灾报警,数据转发时延参数显得非常重要。为了保证数据转发的时延,在 DLBRA 算法中采用文献[16]的消息查询分组 MSG_Query 传来建立最小跳数梯度场。其中,最小梯度场的构建以 Sink 为圆心、节点通信半径 R_i 为半径进行 MSG_Query 的泛洪,初始时所有节点的最小跳 HC 的值均为 ∞ 。若节点收到消息 MSG_Query ,则其最小跳的值为 1;然后, HC 值为 1 的节点同样以 R_i 为通信半径转发广播消息 MSG_Query 并附带自身 HC 值,收到该消息的节点首先进行判断,若自身 HC 值小于消息中附带的 HC 值,则放弃该消息;若自身 HC 值大于该消息中附带的 HC 值,则更新自身最小跳值为 $HC+1$;依此逐跳下去,形成基于最小跳数的梯度场。最终的梯度场以 Sink 为圆心、通信半径 R_i 为半径差的一组同心圆近似表示,如图 4 所示。

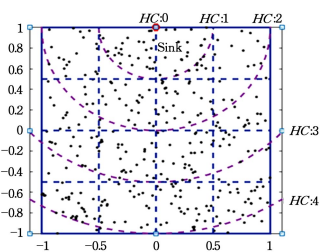


图 4 最小梯度场的建立

Fig. 4 Establishment of minimum gradient field

DLBRA 算法使得数据路由转发沿着梯度非递增的方向转发至 Sink。DCDLB 算法采用最小梯度场方法保证了沿着梯度递减的方向进行数据路由转发的有向性,既避免了路由回路的产生,又能够保证数据转发时延。

结合网络划分和最小跳数梯度场可知,簇首只有增大自身的路由转发通信半径,才能保证簇首的数据传输延迟。如图 5 所示,若采用 DLBRA 路由算法,簇 S_g 仅仅需要将数据转发至标“1”区域的簇首即可;若采用延迟限定的路由算法 DCDLB,则需要将簇 S_g 的数据发送到标“2”或标“3”区域的簇首,才能保证数据转发的最小跳数时延的要求。

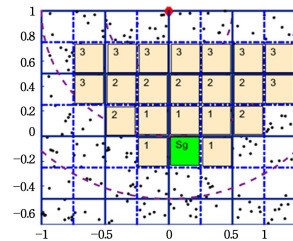


图 5 数据转发示例

Fig. 5 Example of data forwarding

4.2.1 邻居簇首的构建

为了均衡簇间数据传输的能量消耗问题^[12],DLBRA 和 DCDLB 路由算法基于博弈方法采用簇首节点共同协商的分布式策略构建数据转发路由。令 E_{th} 为节点能量阈值,若簇首节点的剩余能量小于 E_{th} ,则该簇首设置能量匮乏消息 $MSG_Deny=1$,标明簇首拒绝数据转发,同时该簇首的数据转发请求具有较高的应答优先权。

在路由构建过程中,第一步是簇首检查并设置能量匮乏消息 MSG_Deny 。第二步是网络内所有簇首分布式广播发现消息 $MSG_DISCOVERY$ 。其中, $MSG_DISCOVERY$ 消息中包含消息 MSG_Deny 、簇首能量 E_{th} 、簇编号等。第三步是簇首等待邻居簇首的响应消息 $MSG_RESPOND$,实现邻居簇首的构建。只有邻居簇首的消息 MSG_Deny 值为 0,并且其能量大于 $\delta \times E_{th}$ 时,邻居簇首才会响应。第四步是簇首从邻居簇首列表中确定下一跳路由转发节点。

4.2.2 邻居簇首的选择

在 DCDLB 路由构建中,当簇首的邻居簇首列表构建完毕后,簇首采用贪婪法,从邻居簇首列表中选择数据转发能量最小的簇首作为自身的下一跳路由转发节点。

4.2.3 数据转发时延的保证

在 DLBRA 算法中,将簇首的数据转发给相邻的簇首,能够保证数据转发的有向性和簇首之间的能耗均衡,但是不能保证数据转发的时延性。在 DCDLB 路由算法中,通过增大簇首的簇间转发通信半径,能够保证数据传输延时和簇首间能耗的均衡,并尽可能最大化网络的生命周期。

在 DCDLB 算法中,消息 MSG_Deny 的作用尤为关键。对于应答簇首而言,会优先考虑 MSG_Deny 值为 1 的簇首的转发请求;对于请求数据转发的簇首,则无需等待 MSG_Deny 值为 1 的簇首的应答。能量匮乏消息 MSG_Deny 的引入有效避免了网络中“能量空洞”^[2]的过早出现,簇首周边转发

方法的使用则提升了网络数据传输的高可靠性。

5 协议分析与仿真

5.1 成簇分析

性质 1 网络成簇阶段,DCDLB 算法的消息复杂度为 $O(1)$ 。

本文 DCDLB 算法基于虚拟网格成簇,将网络划分为 $\max\{V_x\} \times \max\{V_y\}$ 个簇, V_x 和 V_y 的值如式(1)所示。DCDLB 算法采用节点冗余消除,使每个簇内活跃节点的数量为 m^2 , m 的值与网络节点 n 的关系如式(3)所示。在每次簇首分布式选举过程中,每个簇内所有活跃节点至多广播 m^2 条消息。因此,在成簇阶段,网络中总的消息复杂度为 $\max\{V_x\} \times \max\{V_y\} \times m^2$, 与网络节点的数量 n 无关,所以 DCDLB 算法的成簇复杂度为 $O(1)$ 。

性质 1 表明,DCDLB 算法控制消息的开销较小,较为高效。

5.2 时延分析

本文算法中的时延指网络采集一轮数据所消耗的时间。针对一些对时间控制要求严格的应用场合,比如森林火灾报警,数据转发时延的分析显得非常重要。

令 $D(i, j)$ 为数据包在节点 i 和节点 j 之间的链路上传输所耗费的时间。根据端到端时延^[1, 17]的定义可知, $D(i, j)$ 由排队时延 d_Q 、传输时延 d_T 和传播时延 d_P 三部分构成。其中, d_Q 固定且值较小;数据传输时延 $d_T = K/\varphi$, 数据发送速率 φ 固定, WSNs 路由由协议中数据包长度 K 较大,所以 d_T 值较大;电磁波在空中以光速传播,因此 d_P 较小。因此,本文仿真实验中的数据转发时延为数据传输时延。由 d_T 可知,数据转发次数越多,数据传输时延 d_T 越大。基于 HP 路由协议^[14-15], 本文 DCDLB 路由由协议将数据转发时延问题转化为数据转发跳数限定的问题。

在 LEACH 协议中,设理想的最优簇首的概率为 p , 则网络中的簇首数量为 $n \times p$, 每个簇内的节点数量为 h_i 。基于分簇的路由协议可以保证各簇之间并发地进行簇首的选举,则 LEACH 协议需要 $\max\{h_i - 1\}$ 跳完成所有簇内数据的收集。在采用簇首直接传输的模式中,LEACH 协议需要 $n \times p$ 跳完成簇首与基站的通信。在节点等距均匀分布且簇首位置理想的情况下,簇内节点的平均数量为 $\frac{n}{n \times p}$, 则 LEACH 协议的

理想时延为 $\frac{n}{n \times p} - 1 + n \times p$ 跳。由于 WSNs 网络节点部署

具有随机性,LEACH 协议采用簇首随机选举策略,未考虑节点分布的疏密性,每一轮簇首的数量波动很大,且各个簇内节点的数量 h_i 的差别也很大,因此该协议的数据转发时延存在较大的波动幅度。HEED 协议减小了簇内节点数量的差异性,并保证了簇首之间距离的合理分布,使得簇内节点数量 h_i 的差别得以有效控制。与 LEACH 协议相比,HEED 的数据转发时延幅度明显减小。PEGASIS 协议采用链式拓扑结构,网络数据全部转发到基站共需要 $n-1$ 跳。CRVB 算法^[10] 采用虚拟网格划分法将网络划分成 k 个簇,同一网格内自组织

成簇,分布式构建生成树进行路由。CRVB 算法的簇首数据采用最强节点转发模式,簇间数据采集需要 $2k-1$ 跳。因此,CRVB 的数据转发延迟较稳定,与网络中节点的部署是否均匀密切相关。本文的 DCDLB 算法通过采用虚拟网格划分成簇的方式保证了簇首数量的稳定性,通过节点冗余消除法将簇细分为 m^2 个子网格,簇内采用二叉树思想进行数据采集,时延为 $\lceil \log_2(m^2 - 1) \rceil$, 簇间基于最小跳数思想进行转发,时延为 $2k - 1 + \lceil \log_2(V_x) \rceil$, 其中 k 为梯度的个数 $\frac{W}{d_0}$ 。因此,DCDLB 算法的数据转发时延为 $\lceil \log_2(m - 1) \rceil + \lceil \log_2(V_x) \rceil + 2 \frac{W}{d_0} - 1$, 在数据转发时延上优于其他算法。

5.3 实验参数及评价指标

为了验证本文算法的有效性和性能优势,将其与 DIRECT, LEACH, HEED, PEGASIS, CRVB 协议进行实验仿真,并对结果进行对比分析。仿真实验数据为随机选择 10 种监测场景,每种场景重复执行 20 次所获得的平均值。

仿真实验在 Matlab R2014b 中进行,监测区域内随机分布 300 个节点,具体参数如表 1 所列。

表 1 仿真实验参数表

Table 1 Experiment parameters

参数	参数值
网络区域	(0,0)~(100,100)
基站位置	(50,100)
节点初始能量 E^{init}/J	0.5
数据包的大小/bit	2000
控制包的大小/bit	100
节点通信半径 R_c/m	75
节点感知半径 R_s/m	12
数据融合参数 $E_{fusion}/(nJ/bit)$	5
能量模型参数 $\epsilon_{fs}/(pJ/bit/m^2)$	10
能量模型参数 $\epsilon_{mp}/(pJ/bit/m^4)$	0.0013
数据发送速率 φ/bps	40 ^[1]

5.4 簇首数量的分布特性

网络中每一轮数据采集过程呈现出来的监测性能与簇首数量的多少、簇首数量分布的均匀性密不可分。在网络首节点失效之前,不同路由算法的簇首数量分布如图 6 所示。

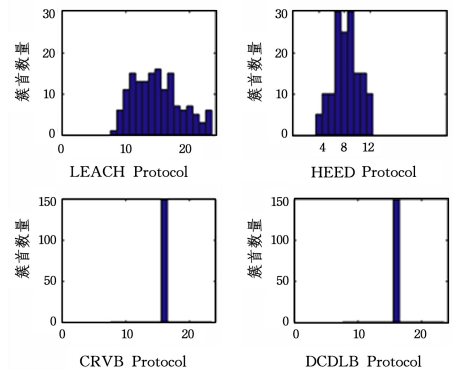


图 6 簇首数量分布

Fig. 6 Distribution of number of clusterhead

其中,LEACH 协议的簇首数量处于 6~24 区间,分布最广,波动范围最大。HEED 协议的簇首数量与簇首覆盖半径

紧密相关,簇首数量处于 4~12 区间,相对稳定。CRVB 算法和 DCDLB 算法都采用虚拟网格划分成簇的思想,簇首数量在首节点失效之前恒定不变,簇首数量为 16。

5.5 网络生命周期的对比

网络生命周期的优化是 WSNs 路由协议的重点研究目标。令 LT 为网络的生命周期,表示从网络建立开始到网络不能正常工作时所持续工作的运行时间。

在节点高密度部署的网络区域,部分节点的失效并不会影响网络的正常工作。研究表明,当 WSNs 监测区域出现“能量空洞”时,远离 Sink 节点的剩余能量高达初始能量的 90%。为了有效对比不同路由算法的性能,本文采用 LTF 和 LTP 两类指标来对比不同算法在网络生命周期方面的性能,仿真结果如图 7 和图 8 所示。

定义 3(网络生命周期 LTF(LifeTime First)) LTF 是指网络建立开始到网络中第 1 个节点死亡时,网络持续采集数据的轮数^[3]。

定义 4(网络生命周期 LTP(LifeTime Percent)) LTP 是指网络建立开始到网络中 $P\%$ 的节点死亡时,网络持续采集数据的轮数^[3]。

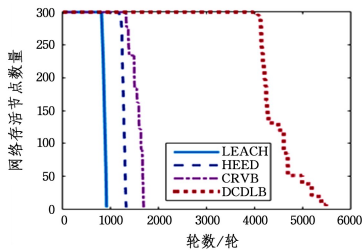


图 7 LTF 指标下的网络生命周期

Fig. 7 Lifetime of network under LTF indicator

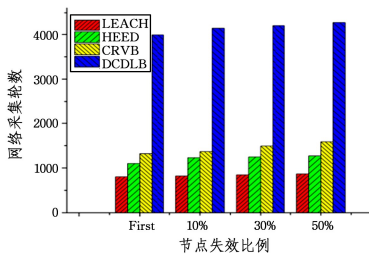


图 8 LTP 指标下的网络生命周期

Fig. 8 Lifetime of network under LTP indicator

从图 7 可以看出,相对于 LEACH 协议而言,HEED 协议和 CRVB 路由算法有效延长了网络的生命周期,本文的 DCDLB 路由算法则大幅延长了网络的生命周期。图 8 显示了在 LTF 和 LTP($p=10,30,50$)指标下 4 种协议的网络生命周期。由图 8 可知,LTF 指标下 LEACH,HEED,CRVB 和 DCDLB 协议的网络生命周期分别为 803 轮、1101 轮、1390 轮和 3990 轮。与 LEACH 协议的 803 轮相比,HEED 和 CRVB 的网络生命周期分别延长了 37.1% 和 62.3%。由此可见,CRVB 路由算法在保证网络监测性能的同时,显著延长了网络的生命期。与 CRVB 的 1390 轮相比,DCDLB 算法延长长达 202.5%,这主要归功于 DCDLB 算法采用简单高效的网格划分成簇法和簇内冗余节点消除法,不仅有效降低了控制消息

带来的大量能耗,而且大幅延长了网络的生命周期。与 LTF 相比,在 LTP ($p=10,30,50$) 指标下,DCDLB 路由算法的网络生命周期增幅分别为 148 轮、58 轮和 68 轮,进一步反映出 DCDLB 算法在考虑网络节点能耗均衡的同时,实现了 LTF 指标下网络生命期的最大化。

5.6 数据转发时延的对比

图 9 为数据转发时延的对比图。由图中可知,DCDLB 算法的数据转发时延为 14~20 跳,LEACH 协议的数据转发时延近似为 40~95 跳,HEED 协议的数据转发时延近似为 43~60 跳,CRVB 算法的数据转发时延近似为 37~45 跳,而 PEGASIS 算法的数据转发时延为 299 跳。通过对比可以看出,LEACH 协议的通信时延的波动范围较大,HEED 次之,CRVB 和 DCDLB 算法时延较小,PEGASIS 算法时延最大。仿真结果证明,DCDLB 算法具备低延迟的数据转发优势,适用于具有时延要求的实时场景。

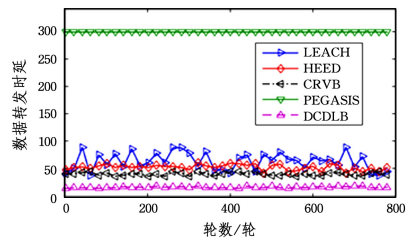


图 9 数据转发时延

Fig. 9 Data forwarding delay

结束语 文中提出一种基于虚拟网格的动态聚簇策略 IDCS 和考虑数据转发延迟的最大化网络生命周期的动态负载均衡路由算法 DCDLB,并在 MATLAB 平台上将其与 LEACH,HEED 和 CRVB 路由算法进行了仿真对比,证明了本文算法在延长网络生命周期和降低数据转发时延方面具有良好的性能。本文算法的改进之处如下:

- 1) IDCS 动态聚簇策略基于虚拟网格划分成簇方法,避免了频繁成簇带来的系统能耗,同时保证了较低的数据转发时延。
- 2) 基于虚拟网格的冗余节点消除分布式算法 GDARE,通过冗余节点消除和节点休眠机制,最大程度地降低了节点能耗并保证了网络监测的性能。
- 3) 簇首节点博弈合作思想和能量匮乏消息 MSG_Deny 的引入,有效均衡了簇首间的能耗。簇首并发多跳和数据沿梯度递减方向转发的策略,降低了数据转发时延,并且避免了能耗的不均衡。

后续将结合具体应用研究数据转发时延、网络能量消耗、网络节点能耗均衡 3 个目标的有效均衡。

参考文献

[1] HUYNH T T, DINH-DUC A V, TRAN C H. Delay-constrained energy-efficient cluster-based multi-hop routing in wireless sensor networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2016, 18(4): 580-588.

- work; security model, mechanism and research progress [J]. *Journal of Software*, 2016, 27(4): 969-992. (in Chinese)
- 王蒙蒙, 刘建伟, 陈杰, 等. 软件定义网络: 安全模型、机制及研究进展[J]. *软件学报*, 2016, 27(4): 969-992.
- [8] SILVA F, CASTILLO L, LEMA A, et al. Software defined eHealth networking towards a truly mobile and reliable system [C] // 2014 IEEE 16th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), Natal, 2014: 560-564.
- [9] LI S, HU D, FANG W, et al. Source routing with protocol-oblivious forwarding (POF) to enable efficient e-Health data transfers[C] // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, 2016: 1-6.
- [10] MOUSTAFA H, SHEN G, KAMATH S, et al. Remote monitoring and medical devices control in eHealth[C] // 2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), New York, NY, 2016: 1-8.
- [11] BOUSSADA R, ELHDHILI M E, SAIDANE L A. QoS enabled privacy preserving solution for eHealth systems[C] // International Conference on PERFORMANCE Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks. IEEE, 2017.
- [12] DIXIT A, FANG H, MUKHERJEE S, et al. ElasticCon: an elastic distributed SDN controller[C] // 2014 ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems (ANCS), Marina del Rey, CA, 2014: 17-27.
- [13] BARI M F, ROY A R, ZHANG Q, et al. Dynamic Controller Provisioning in Software Defined Networks[C] // Proceedings of the 9th International Conference on Network and Service Management (CNSM 2013), Zurich, 2013: 18-25.
- [14] ZHOU Y, ZHU M, XIAO L, et al. A Load Balancing Strategy of SDN Controller Based on Distributed Decision[C] // 2014 IEEE 13th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, Beijing, 2014: 851-856.
- [15] YU J K, WANG Y, PEI K K, et al. A load balancing mechanism for multiple SDN controllers based on load informing strategy [C] // 2016 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), Kanazawa, 2016: 1-4.
- (上接第 65 页)
- [2] CURRY R M, SMITH J C. A survey of optimization algorithms for wireless sensor network lifetime maximization[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 101: 145-166.
- [3] 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, USA; IEEE Press, 2000: 1-10.
- [4] CHEN Z S, SHEN H. Energy efficient wireless sensor network routing protocol [J]. *Computer Science*, 2015, 42(8): 90-94, 117. (in Chinese)
- 陈战胜, 沈鸿. 能量高效的无线传感器网络路由协议[J]. *计算机科学*, 2015, 42(8): 90-94, 117.
- [5] 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.
- [6] XU Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing[C] // Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome; ACM Press, 2001: 70-84.
- [7] JANNU S, JANA P K. A grid based clustering and routing algorithm for solving hot spot problem in wireless sensor networks [J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(6): 1901-1916.
- [8] HALEEM FARMAN H J, AHMAD J, JAN B, et al. Grid-Based Hybrid Network Deployment Approach for Energy Efficient Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Sensors, Research Gate*, 2016, 2016(3): 1-16.
- [9] MENG X, SHI X, WANG Z, et al. A grid-based reliable routing protocol for wireless sensor networks with randomly distributed clusters[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 51(C): 47-61.
- [10] ZHU M, XIAO Z, LIU H L, et al. A Clustering Routing Algorithm Based on Virtual Grid in WSN [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(5): 143-148. (in Chinese)
- 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.
- [11] ZHANG H B, SHEN H. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2008, 20(10): 1526-1539.
- [12] AKBAR M, JAVAID N, IMRAN M, et al. A multi-hop angular routing protocol for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 12(9): 1-13.
- [13] FENG R, LI T, WU Y, et al. Reliable routing in wireless sensor networks based on coalitional game theory[J]. *IET Communications*, 2016, 10(9): 1027-1034.
- [14] HAN K H H, KO Y B, KIM J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks[C] // IEEE 60th Vehicular Technology Conference, Los Angeles; IEEE Press, 2004: 2979-2983.
- [15] ZHENG M C, ZHANG D F, ZHAO X C. The study on the behavioral characteristics of the wireless sensor network of minimum hop routing [J]. *Computer Application*, 2007, 27(10): 2552-2555. (in Chinese)
- 郑明才, 张大方, 赵小超. 最小跳数路由无线传感器网络行为特征研究[J]. *计算机应用*, 2007, 27(10): 2552-2555.