

一种能量高效的无线传感器网络改进 LEACH 协议

朱素霞, 马宏飞, 孙广路

(哈尔滨理工大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对无线传感器网络(WSN)传统的层次聚类协议 LEACH 中的节点能量消耗速率快、网络生命周期短及通信能力弱等问题,提出了一种能量高效的改进 LEACH 协议(MOD-LEACH)。首先,全面兼顾节点剩余能量、邻居数量以及和基站间距离,求出节点作为簇头真实概率,借此优化簇头选举阈值。其次,节点按照簇头的能量、邻居数量和两者间距离,求出成本函数,从而科学判定簇头。最后,簇头根据与基站之间的距离通过单跳或者多跳方式和基站通信,以降低簇头能耗。仿真结果表明,MOD-LEACH 协议性能比现有几种协议更优,该协议与 LEACH、DEEC、H-LEACH 相比,网络生命周期分别延长了 61%、42.6%、14.2%,同时 MOD-LEACH 协议中基站接收的数据量相比其它三种协议也得到大幅提高。

关键词: 无线传感器网络; LEACH 协议; 能量高效; 网络生命周期; 簇头选举

DOI: 10.15938/j.jhust.2021.03.013

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2021)03-0091-08

An Energy-efficient Improved LEACH Protocol for Wireless Sensor Networks

ZHU Su-xia, MA Hong-fei, SUN Guang-lu

(School of Computer and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the problems of fast energy consumption rate, short network life cycle and weak communication capability of nodes in LEACH, a modified LEACH protocol (MOD-LEACH) with high energy efficiency was proposed. Firstly, the remaining energy of the node, the number of neighbors and the distance between the node and the base station are taken into full consideration to calculate the true probability of the node as the cluster head, so as to optimize the voting threshold of cluster heads. Secondly, the nodes calculate the cost function according to the energy of the cluster head, the number of neighbors and the distance between them, so as to judge the cluster head scientifically. Finally, the cluster head communicates with the base station through single-hop or multi-hop mode according to the distance between the cluster head and the base station, so as to reduce the energy consumption of the cluster head. Simulation results show that the performance of MOD-LEACH protocol is better than the existing protocols. Compared with LEACH, DEEC and H-LEACH, the network life cycle of this protocol is extended by 61%, 42.6% and 14.2% respectively. At the same time, the amount of data received by the base station in MOD-LEACH protocol is also greatly improved compared with the other three protocols.

Keywords: wireless sensor network; low energy adaptive clustering hierarchy(LEACH) protocol; energy-efficient; network life cycle; election of cluster heads

收稿日期: 2020-04-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61502123); 黑龙江省留学归国人员科学基金(LC2018030)。

作者简介: 朱素霞(1978—),女,博士,副教授,博士研究生导师;

孙广路(1979—),男,博士,教授,博士研究生导师。

通信作者: 马宏飞(1995—),男,硕士研究生, E-mail: 2406077902@qq.com.

0 引言

无线传感器网络 WSN(wireless sensor network) 作为物联网的核心技术,近几年受到了越来越多的关注和重视^[1]。一个 WSN 往往包含各种小型传感器节点,它们由通信、处理、电源、传感 4 个主要单元构成,其中,通信单元信息收发往往占用大部分能量^[2]。从实际应用来看,众多传感器节点需要配置于远方无人场景内,无论充电亦或替换电池均面临严重阻碍,因此,如何有效利用传感器节点能量,在保证网络稳定性及通信能力的条件下延长 WSN 的生命期就成为该领域研究的热点问题。

目前,可从硬件、架构、平面/层次协议^[3]等多方面延长 WSN 生命期,其中,分簇路由协议因其简单高效而成为研究重点^[4-5]。分簇协议 LEACH^[6](low energy adaptive clustering hierarchy)按轮随机选取簇头,以此均衡网络负载,但仍面临能耗快、生命期短等问题,为此,文^[7-14]对原 LEACH 从不同角度进行改进,以优化其性能。文^[15]将节点度、剩余能量定义成评价因素,借此确定簇头。文^[16]构建链式簇结构收集数据。文^[17]从节点、网络平均两种剩余能量出发,以此确定簇头。文^[18]根据簇头到基站的距离控制簇大小,以用于簇间多跳传输。文^[19-20]分别针对通信安全、地下管廊场景提出相应的协议。以上协议多数从簇头选取方面优化 WSN,而忽略节点入簇、簇间通信方式的影响,且簇构建阶段所考虑的因素过少,因此网络生命期仍有待提高。

针对以上问题,本文提出一种基于 LEACH 改进的分簇协议 MOD-LEACH(Modified-LEACH)。簇头选举阶段,使用节点能量、密度及基站距离因素优化选举阈值,以确保合理簇头的产生;成簇阶段,节点会结合簇头能量、距离等因素选择最合适的簇头加入;簇间通信阶段,综合考虑簇头能量、基站距离、簇内成员数等因子使簇头与基站之间多跳通信,可有效降低簇头能耗。通过实验验证,该协议的能耗、网络生命期及通信能力均显著优于当前已有分簇路由算法。

1 LEACH 协议分析

1.1 LEACH 协议概述

LEACH 属于 WSN 方面首个能量有效层次化动

态聚类协议,相较静态形式而言,必须周期性调整 WSN 簇结构。事实上,LEACH 各个节点作为簇头几率完全一致,理想条件下,各个节点应依次作为簇头。各簇头采用单跳形式将信息传输至基站(BS, base station)。簇头选择和簇形成操作分布式执行,不需要集中控制,这使 LEACH 协议具有良好的可伸缩性和鲁棒性。LEACH 以“轮”方式运行,一轮分为两个过程:簇建立与稳态过程。关于前者,即确定簇头,同时把网络细分成簇,面向内部所有成员完成信息传输调度;关于后者,信息会得到聚合、压缩处理,与此同时发送至 BS。

由节点自行判断各自能否当簇头,彼此间无须进行任何协商交流,最后簇头随机产生。不同节点从 $[0, 1]$ 中确定 1 个随机数,若数值低于阈值 $T(n)$,那么该节点便是该轮簇头;反之就是一个成员。下面是 LEACH 协议中 $T(n)$ 基本算式:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * \lfloor \text{mod}(1/p) \rfloor}, n \in G, \\ 0, \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 是节点作为簇头几率; r 是现在轮数; G 是最近 $1/p$ 轮没有作为簇头的剩余所有节点集^[4]。通过集合 G 完成节点分类,能有效防止节点持续多次作为簇头。

当簇头选择完毕时,另一些普通节点需要求出和不同簇头间距离,并加入距离最近的簇头。各簇头采取 TDMA 技术面向成员节点分配信息传输时隙,如此一来,可防止簇中信息发送阶段相互产生影响。这些节点仅在对时隙发送信息,平时处于休眠状态,借此降低能耗。簇头聚合由成员节点获得的信息,经聚合处理再传输至 BS。

1.2 LEACH 协议不足

即便 LEACH 具备节能特征,能够一定程度增加网络寿命,但实践应用阶段同样有着许多问题与弊端,必须引起高度重视,经归纳整理说明如下:

1) 簇头确定过程中,并未注重节点所在位置,这种情况下,容易导致感知范围内簇头非均匀分布,如此一来,会出现负载不均问题,同时所产生的簇规模有着明显差距。

2) 凭概率随机确定簇头,并未考虑节点能量问题。若所确定簇头能量偏低,容易出现能量耗尽以及网络覆盖问题。

3) 簇头选举过程中,并未注重节点邻居数量。若较少者被确定成簇头,那么簇内距离明显偏远,这种情况下,能耗也随之越快。

4) 簇头把聚合处理所得信息传输至 BS。距离 BS 偏远/偏近簇头相较而言,前者能耗更快。

2 系统模型

2.1 网络模型

假定有 1 个适合特定环境的 WSN,且内部传感器节点、基站数量分别是 N 个与 1 个,前者均匀分布于 $M \times M \text{ m}^2$ 二维平面区间,各自均有着唯一标识 ID。下面关于 WSN 属性提出相应假设:

1) 基站(BS)位于网络区域中心且不可移动(或 BS 可以规律性的移动),其没有能量限制并具有较高的计算能力。

2) 节点一旦部署则无法移动,初始能量有限而且完全一致。另外它们均为同构,换言之,信息处理、通信能力以及硬件配置完全一致。

3) 节点能够感知自身位置、剩余能量、通信区域所有邻居,根据接受信号强度求出彼此间距离。一方面能和 BS 通信,另一方面能调整发射功率,进而调节自身通信区域。

4) 节点由簇头、成员节点两种模式间切换。簇头将所接受的成员节点信息聚合成 1 个数据包传输至 BS。

5) 相比于通信能耗,节点的数据处理能耗很小,因此可以忽略。

2.2 能耗模型

根据实际情况考虑,经全面对比研究,本次选择文 [6-7] 中一阶无线通信模型来分析,其结构详情参见图 1,相关公式为 (2) ~ (4)。结合图例进行说明,通过图例分析可知,节点能耗受两方面直接影响,其一,数据包大小(m),其二,收/发节点间距离。当两节点间距离是 d 时,发送 $m \text{ bit}$ 信息能耗可通过下式求得:

$$E_{TX}(m, d) = \begin{cases} mE_{elec} + m\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ mE_{elec} + m\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_{elec} 为接收或发送 1 bit 数据时能耗, ϵ_{fs} 与 ϵ_{mp} 依次为自由空间衰减、多径衰减信道两种模型信号放大系数。 d_0 为距离阈值,即节点最远通信距离,下面是其对应表达式:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (3)$$

节点接收 $m \text{ bit}$ 数据的能耗 E_{RX} 由式 (4) 给出:

$$E_{RX}(m) = mE_{elec} \quad (4)$$

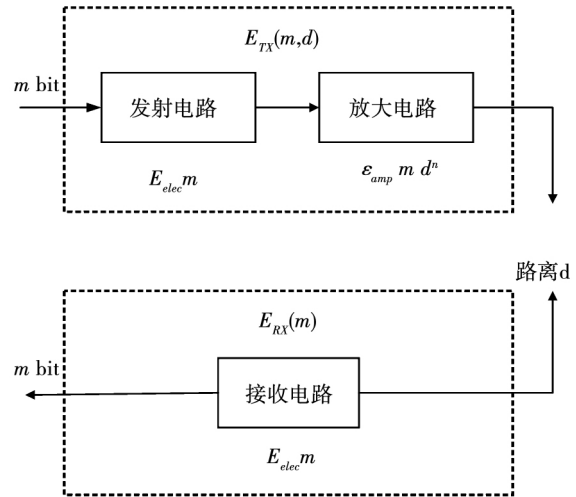


图 1 无线通信模型

Fig. 1 Wireless communication model

3 改进的 LEACH 协议(MOD-LEACH)

本文提出的 MOD-LEACH 协议同 LEACH 一样,按“轮”运行。每轮包括簇建立阶段和稳态阶段,而第一阶段又可分为簇头选择和节点入簇两个阶段。簇建立过程中,主要以节点剩余能量、邻居数量以及至 BS 距离选择簇头,然后由其它节点求出和各簇头成本函数值,同时经全面对比,加入其中最小值对应的簇头。稳态过程中,簇头需要采集簇内成员信息,同时把聚合处理所得信息采用单跳或多跳形式传输至 BS。

3.1 簇头选择

由早期 LEACH 协议来看,已提前设置节点簇头优化比例 p ,同时网络全生命期内 p 始终处于固定状态。 p 也代表着节点成为簇头的概率,并与当前轮数共同决定阈值 $T(n)$ 的大小。但是,随着网络的不断运行,各个节点的剩余能量越来越少,差距越来越大,而且到后期,死亡节点不断增多,如果总是以固定的 p 来衡量节点成为簇头的概率,而忽略节点剩余能量因素,显然是不合理的。另外,节点位置与作为簇头概率间有着密切关联,如果距离 BS 偏远,那么需要消耗更多能量解决聚合信息发送问题,就算源簇头采用多跳形式发送聚合信息,多跳路径所有中继节点信息收发阶段,同样造成总体能耗大幅提升。故而,所选簇头应当尽量靠近 BS。不仅如此,邻居数量与作为簇头概率间也有着紧密联系,当所选簇头邻居数量很多时,那么可以给大量簇成员

提供服务,不但数据聚合比更高,而且成员至簇头平均距离减小,这种情况下,簇内能耗随之减少。

基于上述分析,本文引入剩余能量因子 E_i 、距离因子 d_i 、节点邻居数量因子 N_i 来动态的计算每轮中各个节点成为簇头的概率,使簇头选举更加合理。各因子计算公式及改进后的阈值公式 $T(n)$ 如下:

$$E_i = E(i) / E_{\text{average}} \quad (5)$$

$$N_i = 1 - |N(i)| / (np) \quad (6)$$

$$d_i = (\max BS - d_{\text{toBS}}(i)) / \max BS \quad (7)$$

$$p(i) = \frac{E_i}{\alpha N_i + \beta d_i} \quad (8)$$

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p(i)}{1 - p(i) \lfloor \text{mod}(\lfloor 1/p(i) \rfloor) \rfloor}, & n \in G, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $p(i)$ 为节点 i 作为簇头实际概率; E_{average} 、 $E(i)$ 分别为网络内部现有存活节点的平均能量、节点 i 当前轮的剩余能量; $N(i)$ 表示节点 i 的邻居集合, $|N(i)|$ 则为节点 i 通信区域内存活邻居数量; n 、 np 分别为网络节点总数、标准簇内成员节点数; $\max BS$ 为网络内部节点至 BS 最远距离; $d_{\text{toBS}}(i)$ 为节点 i 和 BS 之间的距离; r 为当前轮数; G 为最近运行轮内没有作为簇头一部分节点集合; α 与 β 为权重因子,满足 $\alpha + \beta = 1$,二者大小按实际场景而定。

根据式(5) - (9) 不难发现,当节点剩余能量较大、邻居较多、与 BS 较近时,那么 $p(i)$ 值较大, $T(n)$ 值同样较大,所产生随机数低于 $T(n)$ 可能性随之增大,换言之,此节点更有可能作为簇头。由此可见,本文的 MOD-LEACH 协议结合多因素合理选择簇头,可以有效均衡各节点的能耗,延长网络生命周期。

3.2 节点入簇

当簇头被成功选择后,那么它将在本身通信区域内广播作为簇头这一消息 CH_WIN(具体包含节点身份 ID、剩余能量等信息)。而其它节点据此以及有关信号强度,求出加入各簇头成本函数值,最后向具有最小值的簇头发送 JOIN_REQUEST 消息。直至这一步,节点分簇也随之结束。

关于节点 i 和某一簇头 c 的成本函数,需要考虑三方面问题,首先是簇头 c 的剩余能量,其次是簇头 c 的邻居数量,最后是节点 i 、簇头 c 之间的距离。如果节点 i 通信区域内包含大量簇头,仅仅兼顾距离因素时,需要添加最近簇头,也就是:

$$\text{cost}F(i, c) \propto \text{dis}(i, c) \quad (10)$$

簇头的邻居数量对其形成簇的规模及能耗具有很大影响。一个具有较多邻居的簇头,若为周围所有邻居节点提供数据转发服务,会加剧其能耗,这并不利于网络的整体性能。因此,为了使各簇的规模相当,节点应尽可能地选择邻居数量较小的簇头加入。即:

$$\text{cost}F(i, c) \propto |N(c)| \quad (11)$$

簇头的能耗比普通节点高,因此,节点应选择能量较高的簇头加入,即:

$$\text{cost}F(i, c) \propto \frac{1}{E(c)} \quad (12)$$

综合式(10) ~ (12),得到成本函数:

$$\text{cost}F(i, c) = a_1 \frac{\text{dis}(i, c)}{\max BS} + a_2 \frac{|N(c)|}{n} + a_3 \frac{E_0}{E(c)} \quad (13)$$

式中: $\text{dis}(i, c)$ 为节点 i 和簇头 c 之间的距离; E_0 为每个节点的初始能量; $|N(c)|$ 为簇头 c 的邻居节点数; a_1 、 a_2 、 a_3 为加权因子,调节式中各项对成本函数影响程度大小,且 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。

3.3 簇间数据通信

由 LEACH 实际应用情况来看,各个簇头全部采用单跳形式把聚合信息传输至 BS,这种情况下,如果和 BS 距离偏远,那么能耗必然更快。而与 LEACH 等传统分簇协议不同的是,MOD-LEACH 协议在簇头与基站之间建立一条多跳传输路径用于聚合数据的转发,以减少远距离簇头的能耗。该协议在成簇后,会为远离基站的簇头选择中继节点,这些中继节点就是距离基站较近的一些簇头。由无线电能耗模型来看,节点的能耗与通信距离呈正相关,因此,在簇头选取下一跳中继节点时,着重考虑距离这一因素。下面将描述如何在簇头与 BS 之间构建多跳传输路径。

在选取中继节点之前,需要收集邻居簇头的相关信息。每个簇头将在其通信半径内广播 route_msg 消息,同时也接受其它簇头发来的 route_msg 消息。这个消息包括簇头的身份标识、基站距离、剩余能量等信息。一旦广播结束,簇头便会掌握所有邻居簇头节点的信息,然后根据这些信息及本身基站距离确定与基站的通信方式。具体分为以下两种情况:

1) 若 BS 位于簇头一跳通信区域内,即簇头与基站的距离小于其通信距离,那么簇头直接把聚合信息传输给 BS。对于这种情况而言,如果采用邻居

簇头节点中继传输,必然使能耗大幅提升。

2) 若 BS 位于簇头一跳通信范围外,则该簇头需考虑各邻居簇头的基站距离、剩余能量、簇内成员节点数等因子,使用式(14)计算各邻居簇头的转发概率,并选择具有最大概率值的邻居簇头作为下一跳中继节点。被选择的邻居簇头继续采用上述方式确定下一跳,直至聚合数据被成功发送到 BS。

假定有簇头 i 及其邻居簇头 j ,那么 i 确定 j 是下一跳节点的转发概率表达式为

$$P(i,j) = \begin{cases} \frac{E(j)}{\sum_{k \in N(i)} E(k)} \frac{1/|N(j)|}{\sum_{k \in N(i)} 1/|N(k)|}, & j \in N(i), \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\tau_{ij} = \frac{2\max BS - dis(i,j) - d_{toBS}(j)}{2\max BS} \quad (15)$$

式中: τ_{ij} 为 i 和 j 距离因子; $N(i)$ 为 i 邻居节点集合,其它参数全部同前文所述。由式(14)、(15)可知,邻居簇头 j 到基站的距离越近,与簇头 i 的距离越近,剩余能量越高,邻居数量越小,其被选为中继节点的概率就越大。

4 仿真测试

为了评价改进 MOD-LEACH 协议的性能,使用 Matlab 仿真软件搭建网络环境,对 LEACH^[6]、DEEC^[7]、H-LEACH^[8]、MOD-LEACH⁴ 4 种协议在不同评价指标下对比。假定 100 个节点随机分散于 $100 \times 100 \text{ m}^2$ 区间,另外初始能量完全一致,基站则处在中心位置,具体分布情况参见图 2。实验仿真参数如表 1 所示。

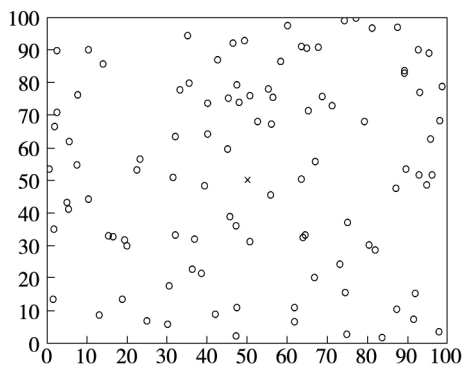


图2 网络节点分布图

Fig. 2 Diagram of network node distribution

表1 实验参数配置

Tab. 1 Experimental parameter configuration

参数	值
目标区域 $(M \times M) / \text{m}^2$	100×100
节点初始能量 E_0 / J	0.5
节点数目 n / 个	100
基站位置 / m	(50,50)
簇头优化比例 p	0.05
数据包大小 m / bit	4000
控制包大小 / bit	20
通信半径 R / m	40
多径信道衰减系数 $\varepsilon_{mp} / \text{pJ} / (\text{bit} \cdot \text{m}^4)$	0.0013
自由空间衰减系数 $\varepsilon_{fs} / \text{pJ} / (\text{bit} \cdot \text{m}^2)$	10
发送或接收数据能耗 $E_{elec} / (\text{nJ} / \text{bit})$	50
数据聚合能耗 $E_{DA} / (\text{nJ} / \text{bit})$	5
α, β	0.6, 0.4
a_1, a_2, a_3	0.5, 0.3, 0.2

4.1 网络生命周期对比

图3描述了在所配置的网络仿真环境中, LEACH、DEEC、H-LEACH 以及 MOD-LEACH 协议的死亡节点数随时间的变化关系。本文将首个节点死亡轮数定义成网络生命周期,究其原因不难发现,在首个节点死亡前提下,网络就会处于非稳定期。从图3中可以看出,所有协议的死亡节点数随着运行时间都在增加,但是本文提出的 MOD-LEACH 协议相比于其它3种协议,网络生命周期显著延长,而且整个运行过程中,MOD-LEACH 协议的节点死亡速率远远低于其它3种协议。归根结底在于 MOD-LEACH 全面考虑节点位置、能量与邻居数量,借此合理确定簇头,不仅如此,还面向节点入簇方法完成适当优化,能让簇分布及其规模更科学,与此同时,簇头能采用多跳形式与 BS 通信,这种情况下,必然可以大幅减少节点能耗,增加其存活周期。

图4给出了4种协议不同比例节点死亡时间对比。LEACH、DEEC、H-LEACH、MOD-LEACH 的第一个节点死亡时间分别是 868 轮、980 轮、1 224 轮、1 398 轮; 10% 节点死亡时间分别是 963 轮、1 064 轮、1 343 轮、1 540 轮; 所有节点的死亡时间分别是 1 276 轮、1 296 轮、1 635 轮、2 494 轮。MOD-LEACH 网络生命周期相对于 LEACH、DEEC、H-LEACH 分别提高了 61%、42.6%、14.2%,由此可见,本文提出的 MOD-LEACH 协议可以有效的延长网络生存时间。

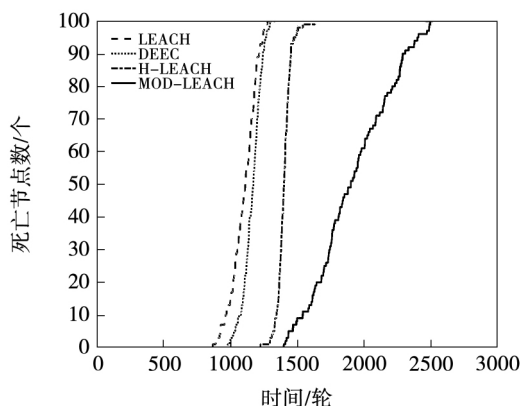


图3 网络生命周期对比

Fig. 3 Comparison of network life cycles

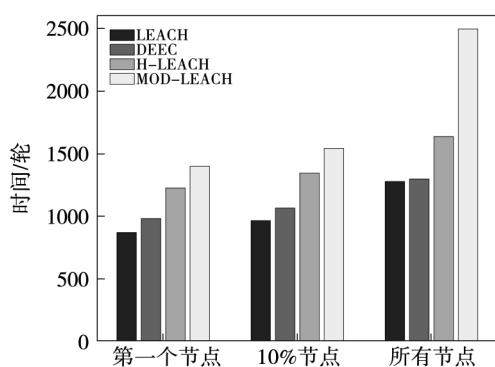


图4 节点死亡时间对比

Fig. 4 Comparison of network node death time

4.2 网络能耗对比

根据图5进行说明。通过图例分析不难发现,随着运行时间不断推移,各种协议网络剩余能量均呈现下降趋势,但相比之下不难发现,MOD-LEACH这项因素一直高于其它3种。在1700轮时,LEACH、DEEC、H-LAECH协议的网络能量已耗尽,而MOD-LEACH的网络能量仍剩余7J,其能量耗尽是在2000轮之后,由此可见,本文提出的MOD-LEACH协议相对于其它3种协议在能量利用方面更加高效,节能效果更好。MOD-LEACH协议比其它3种协议能耗更低,主要是在簇头选举、节点入簇及簇间通信阶段充分考虑了剩余能量、邻居节点数量等影响因素,可以有效均衡各个节点的能耗,因此与其它协议相比,相同运行时间内存活节点数较多,从而网络整体剩余能量也比较多。

4.3 基站接收数据量对比

LEACH、DEEC、H-EACH以及MOD-LEACH 4种协议的基站接收数据量随时间的变化情况如图6所示。可以看出,4种协议的基站接收数据包数都

在不断增加,并在某一轮数之后保持不变,而且在整个运行周期内,MOD-LEACH的基站接收数据包数始终多于其它3种协议。LEACH和DEEC的基站接收数据包数在1300轮之后就不再增加,H-LEACH协议的基站接收数据包数在1700轮之后达到饱和,但是MOD-LEACH协议中基站一直到2000轮左右仍在接收数据,由此可见,MOD-LEACH的数据传输能力优于其它3种协议。

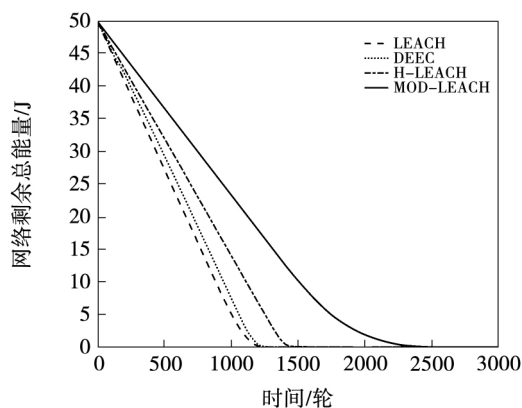


图5 网络剩余能量对比

Fig. 5 Comparison of the remaining energy

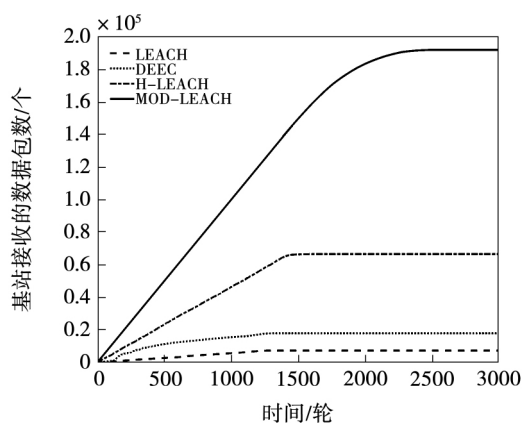


图6 基站接收数据量对比

Fig. 6 Comparison of the amount of data received by the BS

图7表明了4种协议生命周期结束后,基站总共接收的数据包数。从图中数据看出,MOD-LEACH的基站收到的数据包总数分别是LEACH、DEEC、H-LEACH协议的26倍、10.7倍、2.88倍。经过以上分析可得,MOD-LAECH协议中基站接收的数据量比其它3种协议更多,能耗速率更低。MOD-LEACH协议中基站接收数据量高,主要得益于节点能耗降低,网络生命周期延长,因此在网络运行后期仍然有很多存活节点向基站发送数据。

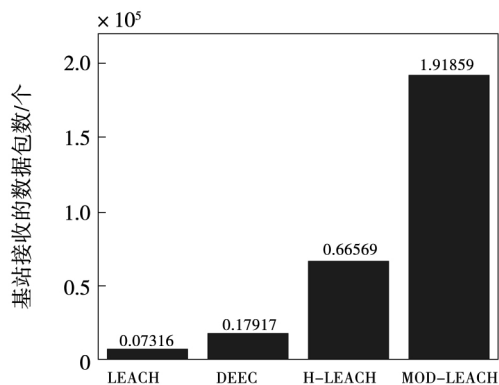


图7 基站接受的最大数据量对比

Fig. 7 Comparison of the maximum amount of data received by BS

4.4 非静态 WSN 下的生命周期和能耗对比

实际应用中,基站有时会进行移动以高效的收集感知数据,这种情况下的网路拓扑是始终变化的,为了验证 MOD-LEACH 协议在这种场景中的性能,本文进行了仿真实验。实验中的场景同样按照图 2 和表 1 配置网络和实验参数,但基站不再是静态的,而是具有移动性。基站的移动路径是以坐标(50,0)为起点,(50,120)为终点的一条直线。图 8 和图 9 展示了基站移动情况下几种协议在生命周期和能耗方面的仿真结果。从图 8 可以看出,本文提出的 MOD-LEACH 协议的节点率先死亡,时间为 829 轮,而 LEACH、DEEC、H-LEACH 的第一个节点死亡时间分别为 863 轮、971 轮、1117 轮,产生这种现象的原因是 MOD-LEACH 协议在选择簇头时,考虑了距离这一因素,这就使靠近 BS 的节点在每轮中有更多的机会被选为簇头,从而会造成 BS 附近的一些节点过早死亡。MOD-LEACH 的全部节点死亡时间最长,而且随着网络的运行,其节点死亡速率远低于

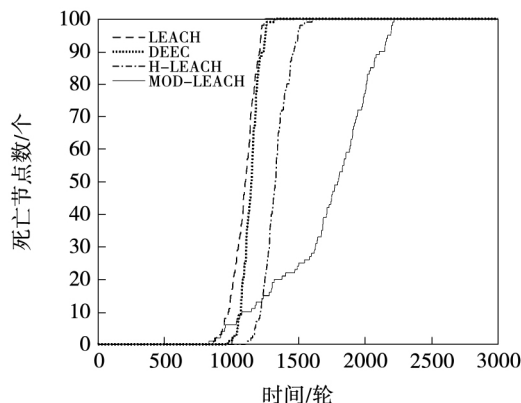


图8 网络生命周期对比

Fig. 8 Comparison of network life cycles

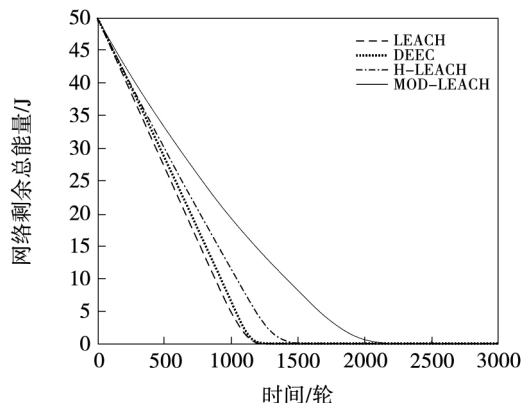


图9 网络剩余能量对比

Fig. 9 Comparison of the remaining energy

其它 3 种协议,这也正是因为其在 BS 移动的情况下考虑了距离这一因素,保证了簇头选择的合理性,从而减少节点之间的通信能耗,增加了节点的存活时间。

从图 9 可以看出,即使 MOD-LEACH 协议的第一个节点死亡的最早,但是其在整个网络运行周期内,剩余总能量始终高于其它 3 种协议。这也表明了所提出的协议考虑距离、能量、邻居节点数 3 个因素成簇,可以有效节约网络的能量。

5 结 语

面向 WSN 传统 LEACH 协议存在的节点能耗快、存活时间短等问题,本文基于 LEACH 建立改进后 MOD-LEACH 协议。该协议首先使用节点能量、基站距离、邻居数量等因子来优化选举阈值,以保证合理簇头的产生。其次,考虑簇头能量、簇内成员数等因子来优化节点入簇及簇间通信,以均衡并降低簇头能耗。通过实验研究不难发现,本文 MOD-LEACH 相较 LEACH、DEEC、H-LEACH 三者而言,一方面能大幅节省网络能量,延长网络寿命,另一方面可显著提高基站接收信息量。而且,在非静态 WSN 场景下,MOD-LEACH 协议也具有不错的性能。

参考文献:

- [1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless Sensor Network Survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292.
- [2] BHATTACHARJEE D, KUMAR S, KUMAR A, et al. Design and Development of Wireless Sensor Node [J]. IJCSE International Journal on Computer Science and Engineering, 2010, 2(7): 2431.
- [3] GKUR K, KAUR P, SINGH E S. Wireless Sensor Network: Ar-

- chitecture, Design Issues and Applications [J]. International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER), 2014, 92 (11): 6.
- [6] ROSTAMI A S, BADKOOBE M, MOHANNA F, et al. Survey on Clustering in Heterogeneous and Homogeneous Wireless Sensor Networks [J]. The Journal of Super computing, 2018, 74 (1): 277.
- [5] KUMAR A. Energy Efficient Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network [D]. Phagwara: Lovely Professional University, 2017.
- [6] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks [C] // Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE Computer Society, 2000: 8020.
- [7] HEINZELMAN WB, CHANDRAKASAN AP, BALAKRISHNAN H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1 (4): 660.
- [8] RAZAQUE A, ABDULGADER M, JOSHI C, et al. P-L-EACH: energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [C] // 2016 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT). IEEE, 2016: 1.
- [9] RAZAQUE A, MUDIGULAM S, GAVINI K, et al. H-L-EACH: Hybrid-low Energy Adaptive Clustering Hierarchy for Wireless Sensor Networks [C] // 2016 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT). IEEE, 2016: 1.
- [10] AL-BAZ A, EL-SAYED A. A New Algorithm for Cluster Head Selection in LEACH Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. International Journal of Communication Systems, 2018, 31 (1): e3407.
- [11] BEHERA T M, MOHAPATRA S K, SAMAL U C, et al. Residual Energy Based Cluster-head Selection in WSNs for IoT Application [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6 (3): 5132.
- [12] BENDJEDDOU A, LAOUFI H, BOUDJIT S. LEACH-S: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy for Sensor Network [C] // 2018 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). IEEE, 2018: 1.
- [13] NGANGBAM R, HOSSAIN A, SHUKLA A. Improved Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy and Its Optimum Cluster Head Selection [J]. International Journal of Electronics, 2020, 107 (3): 390.
- [14] 李兰英, 刘昌东. 一种无线传感器网络路由协议 LEACH 的改进算法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20 (2): 75.
- LI Lanying, LIU Changdong. An Improved Algorithm of LEACH Routing Protocol in Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2015, 20 (2): 75.
- [15] 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.
- [16] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: Power-efficient Gathering in Sensor Information Systems [C] // Proceedings, IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2002, 3: 3.
- [17] 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.
- [18] GOWDA S B B, SUBRAMANYA G N. DUCA: An Approach to Elongate the Lifetime of Wireless Sensor Nodes [M]. Springer: Engineering Vibration, Communication and Information Processing, 2019: 329.
- [19] BISWAS S, SAHA J, NAG T, et al. A Novel Cluster Head Selection Algorithm for Energy-efficient Routing in Wireless Sensor Network [C] // 2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC). IEEE, 2016: 588.
- [20] 王丹丹, 王姮, 张华. 对地下管廊无线传感器网络 LEACH 协议的改进 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19 (1): 40.
- WANG Dandan, WANG Heng, ZHANG Hua. An Improved LEACH Protocol for Wireless Sensor Networks in Underground Pipe Gallery [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19 (1): 40.

(编辑: 温泽宇)