

一种带有能量自补给节点的异构传感器网络分簇路由算法

徐新黎 吕 琪 王万良 皇甫晓洁

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 针对现有无线传感器网络分簇路由算法的网络生命周期短、能量消耗不均衡等问题,结合节点的能量采集技术,提出了一种带有能量自补给节点的异构传感器网络分簇路由算法。考虑到实际环境中节点能量补给不稳定,根据节点的剩余能量和当前能量自补给状态,设计了能量均衡的簇头选举机制和簇间多跳机制。仿真结果表明,在延长网络生命周期和均衡全网能量消耗方面,该算法优于采用相同能量补给规律的传统分簇路由算法(LEACH算法和SEP算法)和其他基于能量自补给的分簇路由算法(PHC算法和EBCS算法)。

关键词 异构传感器网络,分簇路由,能量自补给,能量采集

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.01.026

Clustering Routing Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks with Self-supplying Nodes

XU Xin-li LV Qi WANG Wan-liang HUANGFU Xiao-jie

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract Aiming at the problem of short network lifetime and unbalanced energy consumption in existing clustering routing algorithms, this paper presented a new clustering routing algorithm for heterogeneous wireless sensor networks with energy self-supplying nodes. Considering that energy supply is not stable in actual environment, an energy-balanced cluster head election mechanism and a multi-hop inter-cluster routing were designed in heterogeneous wireless sensor networks according to the residual energy and current energy supply states of nodes. Simulation results show that the proposed algorithm is more effective to extend the network life cycle and balance the energy consumption of whole network than the traditional clustering routing algorithms (LEACH and SEP) with the same energy replenishment mechanism and other clustering routing algorithms based on energy harvesting (PHC and EBCS).

Keywords Heterogeneous wireless sensor networks, Clustering routing, Energy self-supplying, Energy harvesting

1 引言

无线传感器网络(WSNs)通常由数量庞大的节点构成,这些节点用于收集目标地区的数据,最后把采集的数据发回基站。目前 WSNs 已在军事跟踪、自然灾害应急和危险地区监测等^[1]方面得到了应用。

但能量问题仍是困扰 WSNs 实际应用的主要障碍之一^[2,3]。由于汇聚节点或者基站周围的节点不仅需要执行自身范围内的数据采集任务,而且还要负责转发外围节点发送过来的数据,因此能量会过早耗尽,进而成为 WSNs 能耗瓶颈。近年来,许多学者也提出了各种汇聚节点移动方案^[4,5],以使整个网络能量消耗更为均衡,从而缓解能耗瓶颈问题。另外,目前部署的传感器节点中绝大部分仍然使用电池供电,其能量是有限的^[5]。随着能量采集技术的不断完善,现在已经能够将周围环境中的太阳光照、热力温差、机械振动等转化为可用的电能^[6,7]补给传感器节点。但目前从环境中获取能量的技术尚不稳定,能量采集效率很大程度上取决于

周围环境状况,而且不同时刻的能量采集效率差别较大^[8]。

为了均衡网络能耗和延长网络生命周期,已经提出了一些分簇路由算法^[3,9-12],以及含有能量补给的分簇路由算法^[13,14]。根据传感网络种类,已有的分簇路由算法可以分为两类:同构分簇算法和异构分簇算法^[9]。LEACH, HEED^[10], Ring Routing^[11], PHC^[13]和 EBCS^[14]等同构分簇路由算法都假设所有节点拥有相同的结构、能量和功能。但在实际应用场景中,由不同功能结构节点构成的异构传感器网络是广泛存在的。而已有的分簇路由算法研究大多是基于同构网络的,适用于异构传感器网络的分簇路由算法(如 DEEC^[9], SEP^[12]等)的研究较少。

本文针对带有能量自补给节点的异构传感器网络,采用汇聚节点沿固定轨迹移动接收数据的方式,在簇头选举方面,为功能不同的节点分配不同的阈值,同时结合节点剩余能量和当前能量自补给状态选举簇头;在簇间多跳方面,根据与汇聚节点的距离,采用路径最短的原则,普通簇头节点负责将簇内采集到的数据发送给高级节点簇头,再由其发送给汇聚节

到稿日期:2015-12-13 返修日期:2016-03-24 本文受国家自然科学基金资助项目(61379123,61402414,61402415),“十二五”国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAD10B01)资助。

徐新黎 女,副教授,主要研究方向为智能计算、调度优化、无线传感器网络,E-mail:xxl@zjut.edu.cn;吕 琪 男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、调度优化,E-mail:lvqi_zjut@163.com;王万良 男,教授,博士生导师,主要研究方向为生产计划与智能调度、网络控制等,E-mail:wwl@zjut.edu.cn;皇甫晓洁 女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:845052991@qq.com。

点,从而达到均衡网络能量消耗和延长网络生命周期的目的。

本文第 2 节分析了目前国内研究现状;第 3 节给出了异构传感器网络模型、实际环境中能量补给模型和高级节点状态转换模型;第 4 节阐述了所提算法,包括簇头选举机制和簇间多跳机制;第 5 节进行了实验仿真;最后总结全文。

2 相关工作

目前研究适用于异构传感器网络的分簇算法已经逐渐成为热点。文献[12]针对两种拥有不同初始能量的节点,提出了根据节点剩余能量选举簇头的算法,给不同节点分配不同的簇头加权概率,如式(1)所示, p_{opt} 为理想簇头所占比例, $E_i(r)$ 表示当前剩余能量, $\bar{E}(r)$ 表示网络当前平均剩余能量, α 表示能量额外倍数, λ 为高级节点比例。SEP 算法可以延长网络的生命周期,但是无法适应节点具有能量自补给能力的异构 WSNs。

$$p_i = \begin{cases} \frac{P_{opt} E_i(r)}{(1+\alpha)\bar{E}(r)}, & s_i \text{ 是普通节点} \\ \frac{P_{opt} (1+\alpha) E_i(r)}{(1+\alpha)\bar{E}(r)}, & s_i \text{ 是高级节点} \end{cases} \quad (1)$$

针对具有能量补给的 WSNs,文献[13]提出了一种具有能量补给的分簇路由算法 PHC(Power-Harvesting Clustering),其考虑了节点自身的能量变化以及能量供给水平,修正了传统的簇头选择机制。但是,PHC 算法假定所有节点都具有能量自补给功能,因此并不适用于异构传感器网络。

文献[14]提出了一种能量均衡的自供能 WSNs 分簇路由算法 EBCS(Energy Balanced Clustering with Self-Energized)。考虑到不同地理区域的节点所获得的补给能量的大小不同,EBCS 算法结合实际能量补给的特点,改进了簇头的选举机制,并采用一种自适应的簇间通信机制,从而达到了充分保存与利用补给能量的目的。在 EBCS 算法中,簇头选举的阈值 $T(i)$ 的设置如式(2)所示:

$$T(i) = P \frac{E_{residual}(i) + \sum_{k=r-n}^r E_{harvest}(i,k)}{E_{start}} \quad (2)$$

其中, P 表示簇头所占节点总数的百分比, $E_{residual}(i)$ 表示节点 i 目前的剩余能量, $E_{harvest}(i,r)$ 代表节点在第 r 轮获得的补给能量, E_{start} 表示节点 i 的初始能量, $\sum_{k=r-n}^r E_{harvest}(i,k)$ 表示节点从上次成为簇头的轮次开始到最近 n 轮次总共补给的能量。EBCS 算法假定所有节点都具有能量自补给功能,因此所适用的 WSNs 仍是同构网络。

此外,上述含有能量补给的分簇路由算法还存在以下不足:

(1)文献[13,14]中,节点的能量自补给方案均是持续不间断采集能量,考虑了节点剩余能量和能量补给总量,但未考虑各个节点的当前能量自补给状态。由于传感器节点分布在一个较为广阔的空间中,无法保证每个节点都能获得相同的采集效率,仍然存在部分节点采集能量较小、效率较低的情形,因此要避免在相同情况下由当前能量自补给状态较差的节点担任簇头。

(2)PHC 算法和 EBCS 算法仅考虑了节点剩余能量,提高了剩余能量高的节点成为簇头的情况,当所有节点参与该簇头选举机制,依然会出现由能量剩余相比较小的节点担任

簇头的情况,对能量过低的节点无特殊保护措施,无法完全避免能量过低的节点担任簇头的情况。

鉴于以上问题,本文提出了一种带有能量自补给节点的异构传感器网络分簇路由算法(Heterogeneous Network includes Self-Supplying Nodes, HNS)。本文的研究工作重点包括:1)设计高级节点状态转换模型,使高级节点根据剩余能量自适应地调整转换状态。节点的状态分别有活跃期、储能期和休眠期,处于不同状态阶段的节点所对应承担的功能不同。2)根据节点的剩余能量和能量自补给状态,改进簇头选举机制,设计节点能量自补给状态系数,使当前能量自补给状态较好的节点能够获得更大的簇头选举概率,从而均衡网络消耗。

3 模型构建

3.1 网络模型

本文对带有能量自补给节点的异构 WSNs 作如下假设:

(1)网络由小部分高级节点(具有能量自补给能力)和大部分的普通节点(只含有有限的电池能量)组成。

(2)传感器节点非均匀地随机分布在一定的区域。所有传感器节点一旦部署完成,位置无法变动。

(3)每个节点都有一个单独的编号 ID,并具有一定的数据存储能力。

(4)汇聚节点沿着固定轨迹匀速循环往复运动,同时收集其他传感器节点需要传输的数据。本文没有计算移动汇聚节点所付出的能量代价,即汇聚节点的能量可以补充。

3.2 能量补给模型

目前基于周围环境的传感器能量补给在实际应用中以太阳能和振动能为主,其中太阳能的功率密度为 $10 \sim 15 \text{mW/cm}^2$,振动能功率密度约为 0.275mW/cm^2 。虽然太阳能有较高的能量补给效率,但由于夜晚无光照的限制,无法在晚上进行能量采集,从而影响网络的实用性,因此本文采用振动能作为节点能量补给的来源。

文献[15]指出振动能受地理位置影响而随机性较大,同一时刻不同位置的机械振动强度不同,而且相同位置不同时刻的节点能量采收率也不同。文献[16]通过实验证明了压电振动能量采集装置在实际环境应用中会由于电压的变化而导致采收率变化,即采收率不是稳定不变的。

假设振动源中心处节点获得的振动能量最大,所有节点获得的振动能量与振动源中心处的距离成反线性关系,如式(3)所示,节点 i 在时间 t 内采集到的补给能量总共为:

$$E_{harvest}(i) = \begin{cases} \frac{\lambda t}{d(i)}, & 1 < d(i) \\ \lambda t, & 0 < d(i) \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

由于能量补给在短时间内具有一定的连续性,假设节点 i 在当前时间段内的能量补给速率为 $\lambda \text{J/s}$,该时间段长度为 t ,该高级节点 i 到振动源的距离为 $d(i) \text{m}$ 。当节点与振动源中心处的距离小于等于 1m 时,该节点采集到的补给能量为 λt 。

3.3 高级节点状态转换模型

这里的高级节点状态转换模型是针对具有能量自补给功能的节点。假定高级节点持续不间断地采集能量,根据其剩余能量,定义了高级节点的 3 个阶段:活跃期、储能期和休眠期。不同的能量水平决定了节点的不同功能,如表 1 所列。

表1 节点能量与各功能之间的关系

阶段	能量范围	能否成为簇头	是否采集数据
活跃期	$E > E(AR)$	是	是
储能期	$E(AR) \geq E > E(ID)$	否	是
休眠期	$E(ID) \geq E$	否	否

在活跃期,节点剩余能量 $E > E(AR)$,其中 $E(AR)$ 为活跃期与储能期之间的能量界限。在此阶段,节点能量较为充裕,可以采集数据和竞争簇头。

在储能期,节点的剩余能量 $E \leq E(AR)$,且 $E > E(ID)$,其中 $E(ID)$ 为储能期与休眠期之间的能量界限。在此阶段,一方面,节点继续进行能量自补给和数据采集;另一方面,节点暂时退出簇头的竞争。

在休眠期,节点剩余能量 $E \leq E(ID)$ 。在此阶段,节点只开启能量自补给功能,关闭采集数据和竞争簇头等功能,以最快的速度补充能量。

高级节点能量模型的状态转换过程如图1所示。高级节点首先根据自身剩余能量,进入不同的状态阶段,不同的阶段(活跃期、储能期和休眠期)决定了节点能否拥有成为簇头和是否采集数据的功能;然后,通过能量补给,每隔时间 t 节点重新进行状态转换,从而实现高级节点自适应地调整状态,以避免剩余能量相对过低的高级节点当选簇头,从而延长了高级节点的生命周期。

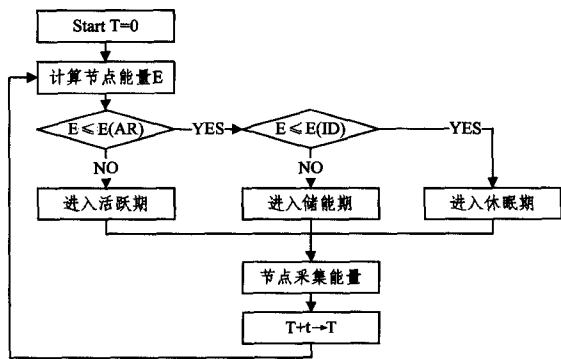


图1 高级节点的状态转换过程图

4 算法设计

4.1 簇头选举机制

在 SEP 算法^[12] 和 EBCS 算法^[14] 的基础上,本文提出了一种带有能量自补给节点的异构传感器网络簇路由算法 HNS。在簇头选举时,将普通节点和高级节点分开讨论,设计了能量自补给状态系数 $C(s_i)$,设置的高级节点和普通节点的簇头选举阈值 $T(s_i)$ 如下:

$$T(s_i) = \begin{cases} P_{opt} \frac{E_{residual}(s_i)}{E_0}, & s_i \text{ 是普通节点} \\ P_{opt} \frac{E_{residual}(s_i) + \sum_{r'=r-k+1}^r E_{har}(s_i, r')}{E_0} C(s_i), & s_i \text{ 是高级节点} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$C(s_i) = 1 + \sum_{j=1}^k W_j \frac{E_{har}(s_i, r-j+1)}{E_{har-max}(s_i)} \quad (5)$$

$$W_j = \frac{1}{j} \sum_{l=1}^k \left(\frac{1}{L}\right), j=1, 2, \dots, k \quad (6)$$

式(4)中, p_{opt} 为理想簇头所占的比例, $E_{residual}(s_i)$ 表

示节点 i 当前的剩余能量, E_0 表示节点初始能量, $\sum_{r'=r-k+1}^r E_{har}(s_i, r')$ 表示节点从上次成为簇头的轮次开始到最近 k 轮次总共补给的能量, $C(s_i)$ 表示能量自补给状态系数。

式(5)给出了参数 $C(s_i)$ 的设计, k 表示选取节点最近 k 轮采集的能量进行比较, $E_{har}(s_i, r)$ 代表节点 i 在第 r 轮获得的补给能量, $E_{har-max}(s_i)$ 表示节点 s_i 在最近 k 轮中能量采集最大的数值。

文献^[17] 提出的抽样权重 W_j 如式(6)所示。 W_j 的选择具有多样性,其特点为:1)抽样权重与距离成反比,距离越小,权重越大;2)权重函数简便易用。

根据式(4)一式(6),簇头选举算法一方面通过节点剩余能量与原始能量的比较,保证了能量高的节点有较高的成为簇头的概率;另一方面,每一轮采集的能量与最近 k 轮中采集到的最大能量数值的对比能反映出该高级节点当前能量自补给的状态与趋势,同时加入了抽样权重 W_j ,使得节点最近轮次的能量补给状态能获得最大的系数,参数 $C(s_i)$ 代表了当前节点的能量自补给状态。

簇头选举算法考虑了节点当前的能量自补给状态,使能量自补给状态较好的节点拥有更大的概率成为簇头,从而达到节约节点能量和均衡化网络消耗的目的。假设 WSNs 中有 N 个节点,每个节点在当前轮中被选为簇头的概率为 p ,则网络当前轮中的簇头数为 Np ,非簇头数为 $N(1-p)$ 。首先,所有节点产生的随机数与阈值比较的执行次数共 $O(N)$,簇头向汇聚节点发送的消息数共 $O(Np)$ 。其次,簇头节点向邻居传感器节点发送簇头成立通知的消息数共 $O(Np)$,非簇头节点回复簇首请求加入簇的消息数共 $O(N(1-p))$,簇头分配时隙表的消息数约共 $O(N(1-p))$ 。综上所述,簇头选举算法的复杂度过程汇总为 $O(Np) + O(Np) + O(N(1-p)) + O(N(1-p))$,所以其算法的时间复杂度为 $O(N)$ 。

4.2 簇间多跳机制

根据文献^[13] 提出的基于路径最短的簇间多跳机制,能量的消耗与路径的选择有很大的关系。针对异构传感器网络和部分节点具有自补给的特点,改进了簇间多跳机制,结合路径最短的原则,同时使担任簇头的高级节点更多地承担转发任务。

在传输数据阶段,该算法采用一阶无线通信能量消耗模型^[18]。根据距离计算能量消耗:

$$E_{Tr}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d_0 \leq d \\ lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d_0 > d \end{cases} \quad (7)$$

其中, ϵ_{fs} 表示自由空间放大器能量消耗因子系数, ϵ_{mp} 表示多径衰减功率放大器能量消耗系数, l 则是等待发送的数据包的长度。当两个节点的距离关系为 $d < d_0$ 时,选择自由单跳模型;当 $d \geq d_0$ 时,则选择多跳模型。

簇间多跳机制具体流程如下:

(1)簇头节点接收完簇内成员节点的所有数据,进行融合、压缩之后,计算其到汇聚节点轨迹的距离 d_n ,设定各邻居高级簇头节点 i 之间的距离 $d_a(i)$ 和各节点到汇聚节点移动轨迹的直线距离 $d_i(i)$ 。

(2)若不存在 $d_a(i)$ 小于 d_n 的情况,如图2中的①所示,则说明该普通簇头节点到汇聚节点的距离小于该节点到任意邻居高级簇头节点的距离,所以将汇聚节点作为下一跳节点,将数据直接发送给汇聚节点。

(3)若 $d_a(i)$ 小于 d_n , 则存在两种情况:1)考虑根据不同的邻居高级簇头节点位置的选择,把 $d_a^2(i) + d_n^2(i)$ 最小的组合作为一种多跳传输的选择,如图 2 中的②所示;2)同时存在普通节点直接跟汇聚节点传输的情形,如图 2 中的③所示。

(4)由于存在(3)中两种下一跳节点的选择问题,从节省能量的角度,普通节点在选择下一跳节点之前,先根据式(7)分别计算如图 2 中②、③所示的多跳传输和直接传输所需要消耗的能量,选择能量消耗较小的方式作为下一跳节点。

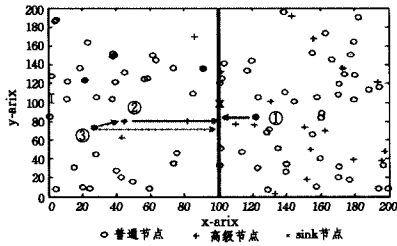


图 2 簇间多跳选择策略

综上所述,本文的簇间多跳机制尽量避免簇头与汇聚节点直接传输引起能量大量消耗。簇头节点下一跳选择高级簇头节点作为中继节点,一方面,由于高级节点具有能量自补给的功能,充分利用补给的能量;另一方面,其是为了使普通簇头节点通过多跳传输的方式节省能量。

4.3 算法流程

HNS 算法按照轮次进行循环,每一个轮次都包含簇的建立和数据传输的稳定阶段,具体的算法流程如下。

在每一轮簇的建立阶段,节点计算当前的剩余能量、从上次当选簇头到目前所补给的能量和节点当前补给状态的参数,从而计算出选举阈值。

(1)节点根据自身剩余能量,若剩余能量 E 小于 $E(AR)$ 同时大于 $E(ID)$,则本轮暂时退出簇头的竞争,转步骤(3)。若 E 小于 $E(ID)$,则节点进入休眠期,本轮只开启能量自补给功能,关闭采集数据和竞争簇头等功能,以最快的速度补充能量。

(2)节点产生一个 0 到 1 之间的随机数,若随机数小于阈值,则节点当选簇头,转步骤(4);反之,则选择其他簇头,成为其簇成员。

(3)簇成员节点定期采集数据并发送给簇头。

(4)簇头除自身定期采集数据外,同时接收簇内成员节点发送过来的数据,对数据进行压缩、融合,进入数据传输阶段,数据经过簇间多跳传输,最终传输到汇聚节点。

5 实验仿真

5.1 仿真场景及参数设定

网络仿真场景为 $200 \times 200 \text{m}^2$ 正方形区域,100 个节点随机分布在其中,为了满足在不同情况下与其他算法进行实验对比,对两种不同的汇聚节点分别收集各节点传输数据的实验方案进行仿真:1)移动汇聚节点,即汇聚节点以 3m/s 的速度在 $[100, 0]$ 和 $[100, 200]$ 两点之间往复上下移动;2)固定汇聚节点,即汇聚节点固定在 $[100, 100]$ 位置进行数据采集。

节点能量补给的来源采用文献[6]中的振动能,其电源体积设为 2 节 AA(5 号)电池大小(约 9cm^3),每轮时间为 15s 。在实际环境中,振动能实时的采收率随机性较大,具有一定的

波动,本文采用正态分布的随机能量补给规律模型 (ν, σ^2) 。根据文献[19],通过实验得出 ν 为 $200 \sim 300 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ 。 σ^2 值的选取参照文献[15],为验证 σ^2 值选取的科学性,本文实验通过设置不同方差从而确定 σ^2 值,每组实验运行 10 次并取平均值,结果如表 2 所列。

表 2 不同的采收率方差对网络稳定周期的影响

σ^2 值(方差)	1	10	50	100	200
出现第一个死节点的轮数/网络剩余能量值	898/ 0.029J	910/ 0.031J	938/ 0.032J	978/ 0.032J	974/ 0.032J

振动能补给时,随机方差取值不同,网络仿真结果稍有差异。由表 2 可知,当方差为 100 时,网络稳定周期比其他几种稍长;方差为 1 和 10 时,能量采收率的波动随机性较小,无法体现 HNS 算法的簇头选举式(5)中 $C(s_i)$ 能量自补给状态系数,其根据高级节点实时采集能量的效率选择簇头的作用;方差为 50,100 和 200 时,差别不大,因此方差 σ^2 的值选择 100。因此本文振动能采收率服从正态分布量的 $(\nu = 275 \mu\text{W}/\text{cm}^3, \sigma^2 = 100)$,从而较为真实地反映了在实际环境中的节点能量补给状态。

在相同的网络环境条件下,HNS 算法的高级节点状态转换模型中的 $E(AR)$ 值和 $E(ID)$ 值通过不同的设定值进行实验对比得出。设定值分别从 $0.2 * E_0$ 变化到 $0.7 * E_0$,实验次数为 10 次,不同设定值下,出现第一个死节点的平均轮数如表 3 所列。当 $E(AR)$ 取 $0.5 * E_0$ 时,网络出现第一个死节点的轮数最迟,所以本文设定 $E(AR)$ 为高级节点的初始能量的 50%。通过相同实验, $E(ID)$ 设定为初始能量的 10%。设置能量自补给状态系数 $C(s_i)$ 时,选取最近 4 次的能量补给总量进行比较,因此设定 $W_1 = 0.48, W_2 = 0.24, W_3 = 0.16$ 和 $W_4 = 0.12$ 。其它参数如表 4 所列。

表 3 相同网络中设定不同的 $E(AR)$ 值时能量消耗结果分析

$E(AR)$	$0.2 * E_0$	$0.3 * E_0$	$0.4 * E_0$	$0.5 * E_0$	$0.6 * E_0$
出现第一个死节点的轮数	389	162	184	502	324

表 4 仿真参数设定

参数	参数含义	参数值
m	高级节点比例	0.2
N	节点个数	100
$V(x, y)$	振动源位置	(50, 150)
E_0	节点初始能量	0.1J
P_{opt}	理想簇头所占比例	0.1
E_{elec}	发射电路损耗	50nJ/bit
ϵ_{fs}	自由空间放大器能量消耗因子	10pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	多径衰减功率放大器能量消耗因子	0.0013pJ/bit/m ²
l	数据包长度	4000bit
d_0	距离阈值	87m

5.2 仿真结果及分析

本文利用 MATLAB 仿真软件在相同规律的能量补给条件下,对含有能量采集节点(占 20%)的无线传感器网络分别采用 LEACH 算法[10]、SEP 算法[12]、PHC 算法[13] 和 EBCS 算法[14] 进行实验。通过仿真对比分析它们和本文 HNS 算法的网络平均剩余能量、剩余存活节点数量、能量均衡消耗情况等指标的性能差异。

(1)网络生命周期对比

由图 3 可知,随着轮数的增加,不同算法的网络节点平均

剩余能量均不同程度下降,但 HNS 算法下降得相对较慢,而且 HNS 算法在汇聚节点移动和固定时的平均剩余能量均高于其他算法,说明该算法根据不同功能的节点设置不同的阈值,通过采用高级节点状态转换模型,优化簇头选择方法和簇间多跳网络机制,能够有效延长网络的生命周期。从前 1500 轮的网络剩余存活节点数(见图 4)来看,采用相同能量补给规律的 LEACH 算法和 SEP 算法在 1500 轮时剩余存活节点数低于 50%,PHC 算法、EBCS 算法和 HNS 算法(固定汇聚节点)剩余存活节点数分别为 54、61 和 76,而 HNS 算法(移动汇聚节点)的剩余存活节点数仍在 80 以上。

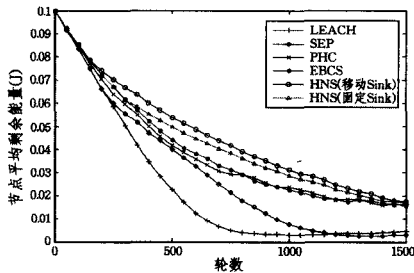


图3 网络节点平均剩余能量对比

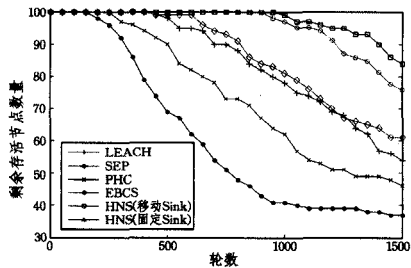


图4 网络剩余存活节点数量对比

另外,采用移动汇聚节点作为收集各节点传输数据的方式进行仿真实验,各算法在不同时刻的网络平均剩余能量和存活节点数量如表 5 所列,各对比算法均有一定程度的提高,但是 HNS 算法在这两个方面仍优于其他算法。

表 5 各种算法在不同时刻的网络平均剩余能量和存活节点数量

算法(均为移动汇聚节点)	初始时刻	500 轮	1000 轮	1500 轮
LEACH	0.1J/100	0.021J/91	0.004J/45	0.004J/41
SEP	0.1J/100	0.038J/92	0.009J/64	0.003J/49
PHC	0.1J/100	0.040J/97	0.024J/80	0.017J/58
EBACS	0.1J/100	0.041J/98	0.023J/85	0.017J/66
HNS	0.1J/100	0.054J/100	0.031J/98	0.018J/83

(2)有无考虑节点当前能量自补给状态的对比

在实际的 WSNs 运用场景中,各个高级节点的能量自补给状态是实时随机变化的,所以对于本文提出的 HNS 算法簇头选举策略,在高级节点选择簇头的过程中,考虑了节点当前能量自补给状态,与此作对比实验的簇头选举机制(见式(2))仅仅考虑了节点当前剩余能量和采集到的补给能量的情况。如图 5 所示,在其他条件相同的情况下,不考虑节点能量自补给状态的 HNS 算法出现第一个死节点的轮数为 832,而考虑节点当前能量自补给状态的 HNS 算法出现第一个死节点的轮数为 987,使网络的“稳定周期”延长了 150 轮左右。同时,随着轮数的增加,从剩余存活节点数量的角度,考虑节点当前能量自补给状态的 HNS 算法的剩余存活节点数量均多于不考虑节点当前能量自补给状态的 HNS 算法。

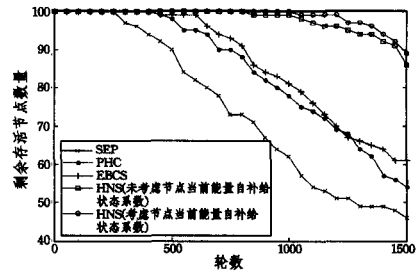


图5 有无考虑节点当前能量自补给状态的对比

(3)网络的稳定周期对比

在 WSNs 中,通常把网络从初始化开始到第一个节点死亡的这段时间称为网络的“稳定周期”。较长时间的稳定周期对于保证整个网络的正常运行和高效的数据传输具有重要意义。如图 6 所示,HNS 算法(移动汇聚节点和考虑节点当前能量自补给状态)的稳定周期最长,其次是 HNS-1 算法(固定汇聚节点和考虑节点当前能量自补给状态),最后是 HNS-2 算法(固定汇聚节点和未考虑节点当前能量自补给状态),其出现第一个死亡节点的轮数是 798。而且 HNS, HNS-1 和 HNS-2 在网络稳定周期方面均优于 LEACH, SEP, PHC 和 EBACS。

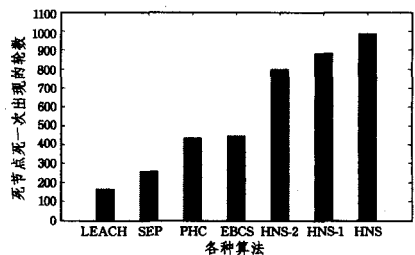


图6 网络的稳定周期对比

(4)网络能量消耗的均衡情况对比

PHC, EBACS 和 HNS 的网络所有节点剩余能量方差的变化曲线如图 7 所示,与 PHC 和 EBACS 相比,无论是在汇聚节点移动还是固定的情况下,HNS 的能量方差曲线基本都缓慢平稳增长,与此同时都低于其他两种算法的方差。由此可见,随着轮数的增加,HNS 算法能够有效地均衡网络各个节点之间的能量消耗。

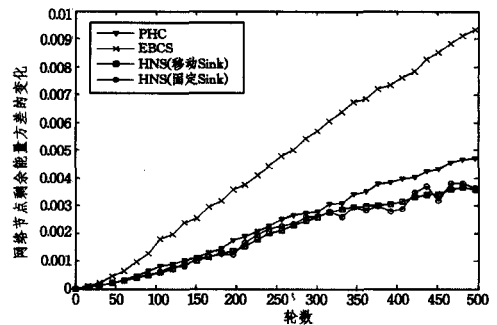


图7 网络所有节点剩余能量的方差变化曲线

PHC, EBACS 和 HNS 的网络当选簇头节点剩余能量方差的变化曲线如图 8 所示,PHC 和 EBACS 的当选簇头能量方差都高于 HNS 算法,而且曲线波动相对较大。实验仿真选取前 500 轮,仍处于传感器网络的前中期,但 PHC 和 EBACS 的当选簇头的节点能量相差较大,而 HNS 的簇头能量变化方差曲线波动较小,说明采用 HNS 算法后能当选簇头的节点

的能量相对较为均衡,能有效避免能量过低的节点担任簇头,从而延长网络的生命周期。

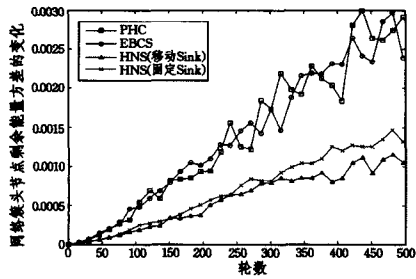


图 8 网络簇头节点剩余能量的方差变化曲线

结束语 本文提出了一种适用异构传感网络的能量自补给分簇路由算法 HNS。考虑到异构传感器网络的广泛适用性,将节点分为具有能量自补给功能的高级节点和能量有限的普通节点,设计了高级节点的状态转换模型,从而避免了剩余能量相对过低的节点当选簇头。针对不同类型的节点和实际环境中节点能量补给不稳定的问题,分配不同的簇头选举阈值,使剩余能量较高和当前采集状态较好的节点获得更大的簇头选举概率。仿真结果表明,在延长网络生命周期和均衡全网能量消耗方面,HNS 算法优于采用相同能量补给规律的传统分簇路由算法(LEACH 算法和 SEP 算法)和其他基于能量自补给的分簇路由算法(PHC 算法和 EBSCS 算法)。

参考文献

- [1] YAO Xin-wei, WANG Wan-liang, YANG Shuang-hua, et al. PABM-EDCF: parameter adaptive bi-directional mapping mechanism for video transmission over WSNs[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2013, 63(3): 809-831.
- [2] SHI H Y, WANG W L, KWOK N M, et al. Game Theory for Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 9055-9097.
- [3] WANG Yi, FAN Xing-gang, WANG Wan-liang, et al. HQEA • Based Energy-Efficient Routing Algorithm for WSN[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(2): 253-258. (in Chinese)
王翊, 范兴刚, 王万良, 等. 基于混合量子进化算法的高效节能无线传感器网络路由算法[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(2): 253-258.
- [4] GAO Shuai, ZHANG Hong-ke, XU Huai-song. Efficient Data Gathering Approach in Sensor Networks with Path-Fixed Sinks [J]. *Journal of Software*, 2010, 21(1): 147-162. (in Chinese)
部帅, 张宏科, 徐怀松. Sink 轨迹固定传感器网络的高效数据采集机制[J]. *软件学报*, 2010, 21(1): 147-162.
- [5] LIN Zhi-gui, WANG Xi, ZHAO Ke, et al. Energy-efficient Routing Algorithm on Mobile Sink in Wireless Sensor Network[J]. *Computer Science*, 2014, 41(s2): 199-203. (in Chinese)
林志贵, 王玺, 赵可, 等. 带移动 sink 节点的 WSN 节能路由算法 [J]. *计算机科学*, 2014, 41(s2): 199-203.
- [6] SRBINOVSKI B, MAGNO M, O'FIYNN B, et al. Energy aware adaptive sampling algorithm for energy harvesting wireless sensor networks[C]// *Sensors Applications Symposium (SAS)*. 2015 IEEE, 2015: 1-6.
- [7] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. *Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey*[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 17(2): 757-789.
- [8] VISSER H J, VULLERS R J M. RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(6): 1410-1423.
- [9] QING Li, ZHU Qing-xin, WANG Ming-wen. A Distributed Energy-Efficient Clustering Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Software*, 2006, 17(3): 481-489. (in Chinese)
卿利, 朱清新, 王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J]. *软件学报*, 2006, 17(3): 481-489.
- [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] CAN Tunca C, IISK S, DONMEZ M Y, et al. Ring Routing: An Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, PP(99): 1-14.
- [12] WANG Jin, ZHANG Zhong-qi, XIA Feng, et al. An Energy Efficient Stable Election-Based Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. *Sensors*, 2013, 13(11): 14301-14320.
- [13] FAN Xiao-ping, YANG Xi, LIU Shao-qiang, et al. Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks with Power Harvesting[J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(11): 120-122. (in Chinese)
樊晓平, 杨玺, 刘少强, 等. 具有能量补给的无线传感器网络分簇路由算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(11): 120-122.
- [14] YAO Yu-kun, WANG Guan, REN Zhi, et al. Energy Balanced Clustering Algorithm for Self-Energized Wireless Sensor Networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013(10): 1420-1425. (in Chinese)
姚玉坤, 王冠, 任智, 等. 能耗均衡的自供能无线传感器网络分簇路由算法[J]. *传感技术学报*, 2013(10): 1420-1425.
- [15] ZHANG Yu-juan. *Research of Clustering Routing of WSN with Ambient Energy Harvesting*[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
张玉娟. 具有能量补给的无线传感器网络分簇路由算法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [16] OTTMAN G K, HOFMANN H F, BHATT A C, et al. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, 17(5): 669-676.
- [17] WAN Xing, DING Jing, YAN Bin-zhong, et al. The Self-adaptive NNBR-ANN Coupling Model for Annual Runoff Forecast[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2005, 37(5): 5-8. (in Chinese)
万星, 丁晶, 严秉忠, 等. 年径流预测的自适应 NNBR-ANN 耦合模型[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2005, 37(5): 5-8.
- [18] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.