

能量高效的无线传感器网络路由协议

陈战胜^{1,3} 沈 鸿^{1,2,4}

(北京交通大学计算机与信息技术学院 北京 100044)¹ (中山大学信息科学与技术学院 广州 510006)²

(北京联合大学应用科技学院 北京 102200)³

(阿德莱德大学计算机科学学院 阿德莱德 sa 5074)⁴

摘 要 针对目前无线传感器网络分簇路由协议存在的节点能耗不均衡的问题,提出一种基于分簇思想的能量高效的多跳路由协议(EEMR)。该协议首先基于节点临近度将网络划分成簇,采用簇首自适应轮转模式优化簇内节点通信的能量消耗,以高剩余能量短路径向心角的适应度路由算法均衡簇间通信负载和能量消耗,有效避免多跳路由中出现的能量消耗不均衡问题。仿真结果表明,EEMR协议能有效均衡网络内节点的能量消耗,显著延长无线传感器网络的生命期并提高网络能量利用率。

关键词 无线传感器网络,路由协议,生命期,能量消耗

中图法分类号 TP393

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.020

Energy-efficient Multi-hop Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

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

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

(School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)²

(School of Applied Science and Technology, Beijing Union University, Beijing 102200, China)³

(School of Computer Science, University of Adelaide, Adelaide sa 5074, Australia)⁴

Abstract In order to address the node energy consumption imbalance issue caused by clustering-based multi-hop routing protocol in wireless sensor networks, a novel clustering-based energy-efficient multiple-hop routing protocol (EEMR) was proposed. Initially, the network is divided into clusters based on nodes proximity. Then, adaptive cluster-head round-robin schema is used to optimize energy consumption among nodes communication in each cluster, and fitness routing algorithm based on high residual energy-short path-radial angle for traffic load balance and energy consumption among traffic-heads is used to deal with the node energy consumption imbalance issue occurred in multi-hop routing protocols. Simulation shows that EEMR protocol can effectively balance the energy consumption among nodes in WSN, significantly improving WSN lifetime and network utilization.

Keywords Wireless sensor networks, Routing protocols, Lifetime, Energy consumption

1 引言

大规模的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)依靠成千上万的微型传感器节点来对目标进行监测,节点周期性地感知周围环境信息并执行简单计算,通过自组织方式与其通信半径内的邻居节点通信,采用无线传输方式以单跳或多跳的方式将感知节点采集的环境信息发送至基站由观察者进行处理^[1]。WSNs是一种新的集信息采集、信息处理和数据传输于一体的复杂系统,被广泛应用于军事国防、环境监测、生物医疗、抢险救灾以及商业应用领域。

在大多数情况下,传感器节点通过飞机抛洒的方式随机

部署在许多人类无法接近的场合,且其能量一般由电池提供,环境恶劣使得节点需要在不能补充能量的情况下工作几个月甚至几年。因此如何有效降低节点能耗并延长网络的寿命成为无线传感器网络的研究热点^[2]。

2 相关研究

为了能够降低节点能耗并使得节点能耗均衡,国内外众多研究学者提出了一系列基于簇的层次网络拓扑结构^[3,4]。这种拓扑结构将无线传感器网络覆盖的整个监测场景划分为一个个的簇(cluster),即关联亲密度高的节点集合。通常,节点依据概率宣布成为簇首,其余节点通过判断与之距离的远

到稿日期:2014-08-21 返修日期:2015-11-19 本文受国家自然科学基金(61170232,81160183,K13A800070),轨道交通控制与安全国家重点实验室项目(RS2012K011),教育部创新团队项目(241147529),科学技术项目(W14L00320),北京联合大学新起点计划项目(zk10201303),北京市职业院校教师素质提高工程资助项目资助。

陈战胜(1979—),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络,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、安全计算、数据挖掘。

近等原则选择加入某个簇。簇首和汇聚中心(Sink)间的数据通信可以采用单跳或多跳的方式。单跳方式是指簇首节点收集簇内成员的数据,进行数据压缩、融合后直接将信息发送给 Sink 节点;多跳方式是指由簇首完成本簇内节点数据的收集和融合,并由所有簇首协作完成簇间路由通信,最后将数据传送到 Sink 节点。

典型的层次路由协议包括 LEACH(low energy adaptive clustering hierarchy)^[5]、HEED(hybrid, energy-efficient, distributed)^[6]、TEEN(threshold sensitive energy efficient sensor protocol)^[7]和 PEGASIS(power-efficient gathering in sensor information systems)^[8]等。其中,由 Heinzelman 等人提出的 LEACH 是 WSNs 中最早提出的分簇路由协议,其基本思想是通过等概率周期性的轮循方法选举簇首来达到有效降低节点能耗、延长 WSN 网络生命周期的目的^[5]。LEACH 协议无需中心节点控制,算法简单有效,但存在离 Sink 较远的节点能量率先耗尽的现象,且成簇代价较大。Younis 等人提出的 HEED^[6]分簇算法通过若干次迭代生成较为均匀的簇,能够均衡节点能耗并延长网络生命期,但算法复杂。Manjeshwar 等人提出的 TEEN^[7]协议采用的成簇算法通过引入用户自定义的绝对阈值和相对阈值来决定节点感知的数据是否发送,适用于监事突发事件和事件敏感地区,但不适用于周期性上报数据的应用领域。Lindsey 等人提出的 PEGASIS^[8]协议从节点地理位置出发形成一条相邻节点间距离最短的链,不足之处是一旦某个节点失效,将会导致整条链失效,容错性差且数据传输延迟较大。针对上述诸协议均忽视簇首之间能耗不均衡的问题,国内学者孙彦清提出 UCDP^[9]协议,即从与 Sink 节点距离远近的角度出发,使得距离 Sink 较近的区面积较小,以节省能量供数据转发使用,综合考虑距离因子和剩余能量因子进行区内非均匀成簇,结合单跳和多跳进行路由传输,但并未明确给出区头数量和簇首数量之间的关系。蒋畅江等提出的 DEBUC 协议^[10]将非均匀分簇和多跳路由相结合,在基于时间的簇首竞争算法基础上,能够有效延长网络生命期。李朋飞等提出的分簇拓扑控制算法^[11]从节点能量等级划分的角度出发,能够有效保证簇首的合理分布,并有效推迟首个节点的死亡时间,在均衡节点能耗的同时延长网络生存时间。李洪兵等则根据改进粒子群算法进行非等概率静态分簇,提出非均匀等级分簇拓扑结构^[12],在优化网络分簇的基础上有效延长网络生命期。鉴于非均匀分簇、多跳路由以及非等概率分簇方面的研究背景,本文提出了一种能量高效的多跳路由协议(Energy-Efficient Multi-hop Routing, EEMR)。它基于 LEACH 协议,首先采用 AP 聚类算法,以 WSN 中节点欧氏距离相似度作为参考度进行节点划分成簇,并改进簇首轮循机制,在簇首之间协调转发数据时采用单跳和多跳相结合的方式,不仅节省了节点的能耗,而且有效均衡了网络能耗,从而延长了 WSN 的寿命。仿真结果表明,与 LEACH 协议和 DIRECT 协议相比,该协议能够大幅延长 WSN 网络的寿命。

3 模型建立

无线传感器网络路由协议与具体应用密切相关,应用环境不同,节点监测的任务也不尽相同,但其本质都是在一定区域内通过随机抛洒的方式部署众多感知节点,节点借助自组

织成网网络采用单跳或多跳的方式,将感知的数据无线传输到 Sink。下面简单介绍本文用到的网络模型、传输模型、数据融合模型和运行时间模型。

3.1 EEMR 网络模型

本文将 N 个感知节点随机分布在长为 X 、宽为 Y 的监测区域,区域范围为 $X \times Y$,汇聚节点 Sink 的坐标为 $(X/2, 3Y/2)$,网络节点分布如图 1 所示。本文采用的传感器网络具有如下性质:

- (1)节点部署一次,不再移动且不需要人为维护,网络自组织运行。
- (2)Sink 节点能量不受限,有很强的计算和存储能力。
- (3)网络中初始总能量固定,感知节点类型同构、地位平等,能量受限且可异构。
- (4)感知节点具有唯一 ID,能获悉自身坐标信息,可担任簇首或簇之成员。
- (5)感知节点均有能力直接与 Sink 节点通信,通信功率可控,可以根据接收信号强度计算通信节点之间的距离。
- (6)节点周期性进行数据传送并具有数据融合的能力。

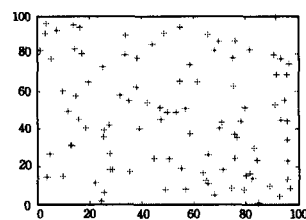


图 1 EEMR 网络模型初始状态

3.2 EEMR 传输模型

EEMR 协议采用与文献[11]相同的无线通信模型。该无线通信模型的传输和接收的能耗公式如式(1)和式(2)所示:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{dec}(k) + E_{amp}(k, d) \quad (1)$$

$$E_{amp}(k, d) = \begin{cases} kE_{dec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{dec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases}$$

$$E_{Rx}(k) = kE_{dec} \quad (2)$$

本文采用的节点能量消耗模型仅仅计算节点的通信传输能耗,忽略节点在计算和存储等过程中的能量消耗。其中, d 是节点信息传输经过的距离, k 为传输信息的比特数, E_{dec} 为发送或接收每比特数据所需消耗的电路能量,传输放大器模型参数 ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 的值取决于参数 d 的大小,若 $d < d_0$,则发送方发送数据的能耗与 d 的平方成正比,否则与 d 的四次方成正比。

3.3 EEMR 数据融合模型

EEMR 采用数据融合技术来减少 WSNs 网络数据通信量,以达到节约网络能耗的目的。本文在仿真实验中基于簇内节点采集数据具有较高的时空冗余度,簇首接收其成员的数据并将其融合为一个长度固定的数据包,然后发送给 Sink 节点。其中 $E_{DA} = 5nJ/bit$ 。

3.4 EEMR 运行时间模型

EEMR 协议将 LEACH 协议中的“轮”作为网络运行时间的单位,每一轮分为簇的形成和簇的通信两个阶段。网络运行时间分配模型如图 2 所示。

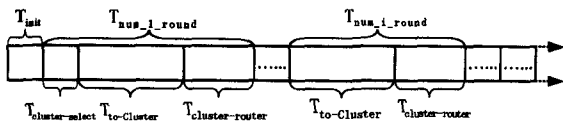


图2 EEMR 协议运行时间模型

其中, T_{init} 表示 WSN 网络初始阶段, T_{round} 表示网络自组织成簇的运行时间轴。为了避免 LEACH 中频繁成簇带来的能耗代价, EEMR 协议不再固定使用单轮或双轮^[13]成簇策略, 而是采用动态的 m 轮成簇策略。其中, m 的值取决于 WSNs 的总剩余能量与网络初始能量的比值。

4 EEMR 协议设计

4.1 EEMR 网络初始化

传感器节点采用飞机空中随机抛洒方式部署在 $X \times Y$ 的监测区域内, 节点坐标为 $S_i(x_i, y_i)$, 初始能量均为 E_0 。

EEMR 协议采用节点临近度进行簇的划分, 使得簇的覆盖范围趋于均衡。任意两节点的距离计算公式如式(3)所示。

$$d_{ij} = -\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

其中, $i, j \in 1, 2, 3, \dots, n+1, i \neq j$ 。距离 d_{ij} 取负值表示节点距离越小, 节点间亲密度越高。

网络运行期间, 节点的通信能耗主要由控制信息 CM (Control message) 和数据信息 DM (Data message) 两部分构成。节点周期性地采集并传送数据信息, 通过控制消息维护网络节点之间的关系。其中, CM 和 DM 均取固定值, 且 $DM \gg CM$ 。当汇聚节点 Sink 节点发出指令后, 网络进入簇首选举阶段。

4.2 EEMR 协议 m 值的确定

LEACH^[5] 协议让节点轮流担当簇首来均衡节点能耗是基于每轮节点能耗相等的前提。鉴于簇的规模大小不一、簇首与 Sink 之间距离不等的现实情况, 文献[13, 14]均提出了采用剩余能量的方法来改进 LEACH 协议, 取得了一定的效果。

EEMR 协议首先采用临近传播算法将 WSNs 监测区域划分成簇, 并且在簇建立后采用动态的 m 轮簇首轮询机制。其中, m 的值由式(4)决定。

$$m = \frac{E_{res_total}}{E_{init_total}} \quad (4)$$

其中, E_{res_total} 表示网络剩余总能量, E_{init_total} 表示网络初始总能量。为了有效抑制成簇带来的网络能耗, 本文采用的 m 轮成簇方案在确定簇首后, 剩余的 $m-1$ 轮保持簇首不变, 大大减少了维护网络拓扑所需的能耗。

4.3 EEMR 协议簇首选举阶段

在簇内节点选簇阶段, 引入节点剩余能量以及数据传输有向性两个因素来改进 LEACH 协议中的簇首选举门槛值 $T(s)$, 期望达到网络节点能耗全局均衡的目的。 $T(s)$ 的计算如式(5)所示。

$$T(s) = \frac{p}{1 - p(r \bmod(1/p))} (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \quad (5)$$

$$\text{其中, } T_1 = \frac{E_{r_cur}}{E_0}, T_2 = \frac{E_{r_cur}}{C_{i_rem} \sum_{r=1}^{C_{i_rem}} E_{r_cur}}, T_3 = \frac{d_{to_Sink}}{C_{i_rem} \sum_{k=1}^{C_{i_rem}} d_{k_to_Sink}}$$

$$T_4 = r_m \div \frac{1}{p}.$$

式(5)中 E_{r_cur} 表示节点当前轮的剩余能量, C_{i_rem} 表示节点所属簇的规模大小, d_{to_Sink} 表示节点到 Sink 节点的距离, r_m 表示节点连续未担任簇首的轮数, 一旦节点担任簇首, 置 r_m 为 0。

4.4 EEMR 协议簇首广播阶段

按照 EEMR 协议的簇首选举算法, 簇首确立后需要向所辖簇内成员广播自己成簇的控制消息, 其主要包含簇首的位置属性 $L_{c_i}(x_{c_i}, y_{c_i})$ 。其中, c_i 表示簇首编号, 控制消息的大小采用固定数值的 CM。簇首广播采用动态可调节的最大发送功率传输, 使得簇首所辖簇内所有成员节点均可收到该控制消息。由于每个簇的覆盖范围不尽相同, 因此最大发送功率取决于簇内成员节点到簇首自身的最大距离 d_{c_max} , 如式(6)所示。

$$d_{c_max} = \max\{d_{c_ik}\}, k=1, 2, 3, \dots, C_{i_rem} \quad (6)$$

4.5 EEMR 协议通信阶段

4.5.1 簇内通信

WSNs 网络节点状态包括激活和休眠两类, 其中激活状态分为监听、接收和传送 3 种, 耗能较高, 而休眠能耗仅仅占其 10% 左右。本文就 WSNs 周期性数据收集问题, 采用节点休眠机制和时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 技术相结合, 由簇首给每个成员节点分配一个时隙, 使其仅在时隙到达时醒来传送数据, 其它时间进入休眠状态的运行机制。

4.5.2 簇间通信

在 WSNs 网络中, 相邻簇之间存在的信号覆盖会引发信号干扰现象。本文采用 CDMA 技术给每个簇分配唯一的码来避免信号干扰问题。

由于簇首与 Sink 距离远近不一, 直接传输模式会导致远距离簇首率先死亡, 产生网络不连通的现象。本文提出层次路由策略, 其基本思想是将 WSNs 网络逻辑分层, 采用单跳和多跳相结合的路由策略, 具体的分层公式如式(7)所示。

$$Layer_{CHi} = (d_{CHi_Sink} \div d_0) + 1 \quad (7)$$

其中, $d_0 = \sqrt{efs/emp}$, $i=1, 2, 3, \dots, N_{CH}$, N_{CH} 表示网络中簇首的个数。

经过网络逻辑分层之后, 存在以下两种路由模型。

(1) 单跳路由模型

处于第 1 逻辑层的簇首采用单跳方式与 Sink 节点直接传输通信模式, 当簇首接收到其他簇首转发的数据时, 经过数据压缩将数据直接发送到 Sink 节点。

(2) 多跳路由模型

处于第 2 逻辑层之上的簇首采用多跳方式与 Sink 节点通信, 其关键在于选择下一跳路由由节点的策略。为了有效均衡整个网络节点能耗的均衡性, 本文选择下一跳节点的路由策略如式(8)所示。

$$f = \lambda_1 \left(\frac{E_{ch_res}}{E_0} \right) + \lambda_2 \left(\frac{1}{d_0 - d_{i,j}} \right) + \lambda_3 \left(\frac{1}{\cos\theta} \right) \quad (8)$$

其中, $\lambda_i (i=1, 2, 3)$ 为各个因子的权重系数, E_{ch_res} 为簇首剩余能量, θ 为数据传送偏向角。

在 EEMR 协议通信过程中, Sink 节点通过控制消息与 WSNs 节点通信, 协调整个网络的数据通信, 工作主要包括网络初始的自组织聚类成簇, 接收簇首的相关信息, 发布动态值, 并动态发布同步信息使得网络恢复初始状态进行新一轮

的成簇选举,直到网络寿命终止。

5 EEMR 协议仿真与结果分析

5.1 仿真环境

本文采用 MATLAB 作为仿真平台,监测场景为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的二维平面,在监测范围内随机部署 100 个节点,仿真中具体参数如表 1 所列。

表 1 协议仿真中的实验参数

参数	Value	参数	Value
E_{elec}	5nJ/bit	p	0.05
efs	10nJ/bit/m ²	emp	0.0013nJ/bit/m ²
DM	2000bit	d_0	$\sqrt{efs/emp}$
CM	100bit	E_{DA}	5nJ/bit/message
n	100(200/400/600/1000)	X	100m(200/400/800/1200)
E_0	0.5(0.01/0.02/0.05/1.0)	Y	100m(200/400/800/1200)

5.2 生存周期

本文基于节点临近度将 WSNs 网络初始划分成簇,如图 3 所示。借鉴 LEACH 协议中簇首轮循的优点,对网络成簇和簇首路由策略进行了多处改进,并基于 MATLAB 进行仿真,将 EEMR 协议与 LEACH 协议、DIRECT 协议相比较,仿真结果中节点的存活轮数如图 4 所示。

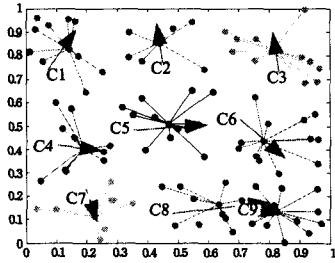


图 3 网络初始划分成簇结果

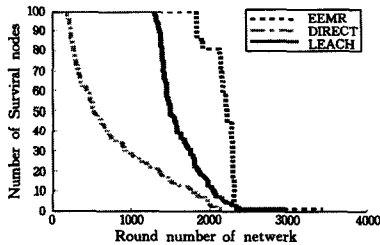


图 4 EEMR、LEACH 和 DIRECT 协议中节点存活轮数

本文定义网络的死亡时间为首节点失效和 75% 网络节点失效两个时间点。从图 4 可知, EEMR 协议的网络运行时间比 LEACH 提高了 24.4%~41%, 比 DIRECT 协议提高了 84.8%~89.1%。EEMR 协议首轮失效节点在 1834 轮, 75% 的节点失效在 2295 轮; LEACH 协议则分别为 1301 轮和 1803 轮; DIRECT 协议分别为 185 轮和 1131 轮。仿真结果表明, EEMR 协议的运用使得 WSNs 网络的稳定运行时间大大增长, 不仅能有效避免 DIRECT 协议直接传输模式导致能耗过快的缺陷, 而且规避了 LEACH 频繁成簇和簇首随机选举带来的系统开销。综上, EEMR 协议既能够有效均衡网络节点能耗, 又能够大幅延长网络的寿命, 整体性能较佳。

EEMR 协议划分的簇间平均能量消耗比率趋于一致, 如图 3 中所示的 C5 由于处于网络中心位置, 根据式(8)该簇会频繁较早地过多担任路由转发的角色, 失效时间相对较早, 但仿真结果表明该簇并未影响网络的连通性, 并且避免了

LEACH 协议和 DIRECH 协议出现的网络极度不稳定的现象, 各个簇失效时间集中在一个时间段, 具有良好的收敛性。

5.3 协议收敛性

本文通过对比 3 种协议的收敛率来辅助衡量协议的性能, 其中收敛率 r_{conv} 的定义如式(9)所示。

$$r_{conv} = \frac{R_{invalid-first}}{R_{invalid-75\%} - R_{invalid-first}} \quad (9)$$

其中, $R_{invalid-75\%}$ 表示网络失效节点达 75% 时所经历的轮数。式(9)能够客观地比较 3 种协议在网络首节点失效到 75% 节点失效之间所经历的时间, r_{conv} 值越大表明协议的收敛性越佳。3 种协议的收敛率比较如图 5 所示。

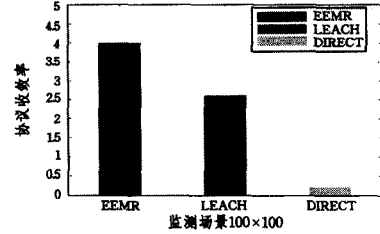


图 5 EEMR、LEACH 和 DIRECT 协议的收敛率

5.4 协议稳定性

WSNs 网络在给定比例失效节点的前提下, 比较 3 种协议的失效轮数, 能够有效衡量协议的稳定性, 并且结合时间跨度可以很好地验证协议的收敛性。本文给出 1%、10%、20%、50%、75% 和 90% 节点失效时 3 种协议失效轮数的比较, 如图 6 所示。

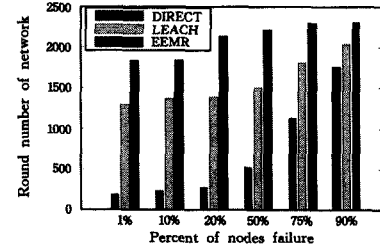


图 6 给定失效节点数量下 EEMR、LEACH 和 DIRECT 协议的失效轮次

从图 6 中观察 3 种协议在首节点失效至 90% 节点失效期间协议失效轮次的幅值变化可知, DIRECT 协议变化最为明显, LEACH 协议次之, EEMR 协议变化幅值最小。其中, DIRECT 协议的幅值从首节点失效的 185 轮跃迁至 90% 节点失效的 1757 轮, 幅值增幅为 1572 轮; LEACH 协议的幅值从首节点失效的 1301 轮跃迁至 90% 节点失效的 2033 轮, 幅值增幅为 732 轮; EEMR 协议的幅值从首节点失效的 1834 轮跃迁至 90% 节点失效的 2308 轮, 幅值增幅为 474 轮。再结合 EEMR 协议首节点失效轮数为 1834 轮, 远远大于 DIRECT 协议和 LEACH 协议的情形, 仿真结果表明在网络节点能耗均衡性方面, EEMR 协议最佳。

通常认为网络失效节点达 75% 以上时, WSN 网络中存在无法监测的区域。从 WSNs 网络节点的失效时间跨度分析, 从 50%~75% 和 75%~90% 两个局部时间跨度来看, EEMR 协议分别延续了 81 轮和 13 轮, 而 LEACH 分别为 299 轮和 231 轮, DIRECT 则为 609 轮和 620 轮; 但就时间跨度而言, DIRECT 协议最差, EEMR 和 LEACH 协议趋势一致。结合 50% 时 EEMR 的 2214 轮及 LEACH 的 1503 轮, 可

以得出与 LEACH 和 DIRECT 协议相比, EEMR 协议所经历的失效时间跨度更短, 进一步验证了 EEMR 具有更好的收敛性。从首个失效节点到 75% 失效节点的全局时间跨度分析, LEACH 和 DIRECT 分别为 502 轮和 946 轮, EEMR 协议经历的时间跨度 461 轮最短, 同样验证了 EEMR 协议较强的收敛性。

5.5 协议可扩展性

为了验证 EEMR 协议的可扩展性, 本文分别在 4 种不同的场景中, 对 EEMR、LEACH 和 DIRECT 进行仿真, 其它参数保持不变, 场景参数如表 2 所列。

表 2 4 种场景参数

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
节点个数	200	400	600	1000
场景边长	200	400	800	1200
Sink 坐标	100, 250	200, 450	400, 850	600, 1250
初始能量	1.0	2.0	3.0	4.0

根据表 2, 本文对网络监测区域为 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 、 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 、 $800\text{m} \times 800\text{m}$ 以及 $1200\text{m} \times 1200\text{m}$ 的 WSNs 网络生命周期进行仿真, 效果如图 7—图 10 所示。

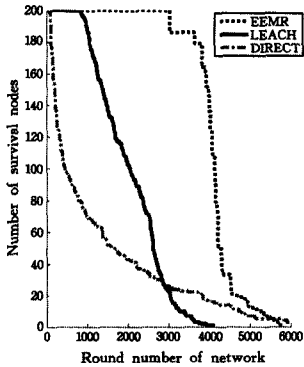


图 7 监测场景为 $200\text{m} \times 200\text{m}$

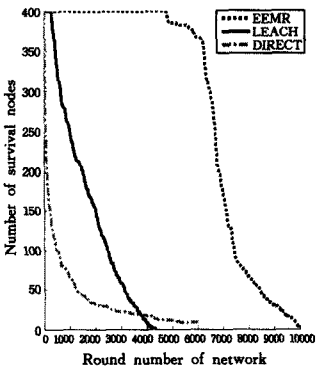


图 8 监测场景为 $400\text{m} \times 400\text{m}$

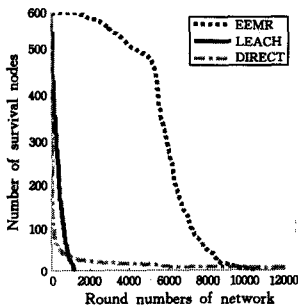


图 9 监测场景为 $800\text{m} \times 800\text{m}$

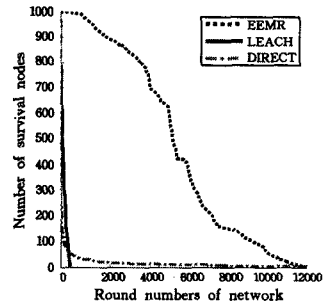


图 10 监测场景为 $1200\text{m} \times 1200\text{m}$

在图 7—图 10 的 4 个场景中, LEACH 协议首节点失效分别为 200、262、21 和 1 轮, DIRECT 协议首节点失效分别为 82、15、21 和 1 轮, 而 EEMR 协议首节点失效分别为 3031、4775、1238 和 1000 轮, 可见 EEMR 协议的能量消耗控制性能较佳。就 EEMR 协议而言, 其性能在场景 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 中表现最佳, 而在场景 $800\text{m} \times 800\text{m}$ 和场景 $1200\text{m} \times 1200\text{m}$ 中首节点失效相对较早。以图 9 为例, 监测场景尺寸 800m 是图 4 的 8 倍, 监测节点是其 6 倍, 但是采用节点临近度成簇的数量仅为 3 倍, 这样簇内成员数成倍增加, 簇首之间的距离倍增, 必然使得场景 $800\text{m} \times 800\text{m}$ 的首节点失效轮次提前。图 10 的效果与图 9 相似。

5.6 簇首数量

不失一般性, 假定在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的目标监测场景中随机部署 100 个传感器节点, 分别从 LEACH 协议和 EEMR 协议的仿真过程中随机挑选 100 轮, 统计每个协议簇首个数的分布情况, 会发现 LEACH 协议簇首数目变化最大, 这是因为 LEACH 协议的随机选簇使得簇首数目的波动范围很大, 而 EEMR 协议则相对稳定, 呈阶段递减态势。经 100 次仿真, 发现 EEMR 的初始簇首数目稳定在 7~10 个, 簇首数量范围变动较小, 协议稳定性较好。

结束语 为了解决无线传感器网络协议中出现的“热点”问题以及节点能耗不均衡的现象, 本文借鉴 LEACH 协议的分簇思想, 提出一种新的能量高效 WSNs 路由协议 (EEMR)。与 LEACH、DIRECT 协议相比, 该协议能够产生相对均匀分布的簇, 采用单跳和多跳相结合的改进路由策略, 既能减轻簇首内部的通信负载, 又能够均衡簇首之间路由转发的能量消耗。仿真结果表明, EEMR 协议不仅能够有效地均衡整个 WSN 网络内节点的能量消耗, 延长 WSN 网络的生命期, 而且具有较好的收敛性和可扩展性。

参考文献

- [1] 张晓玲, 梁炜, 于海斌, 等. 无线传感器网络传输调度方法综述 [J]. 通信学报, 2012, 33(5): 143-157
Zhang Xiao-ling, Liang Wei, Yu Hai-bin, et al. Survey of transmission scheduling methods in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(5): 143-157
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330
- [3] Li B, Wang W J, Yin Q Y, et al. An energy-efficient geographic routing based on cooperative transmission in wireless sensor networks [J]. Sci China Inf Sci, 2013, 56: 4757-4762

(下转第 117 页)

- [4] Williams C. What is a green data center[OL]. 2011. <http://www.mnn.com/-green-tech/computers/stories/what-is-a-green-data-center>
- [5] Liao W H, Yen Wen-ming. Power-saving Scheduling with a QoS Guarantee in a Mobile WiMAX System[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2009, 32: 1144-1152
- [6] Dong Ji-guang, Chen Wei-Wei, WU Hai-Jia, et al. Load balancing study in cloud storage based on dynamic replica technology[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(9): 3422-3425
- [7] 吴琦,熊光泽. 非平衡自相似业务下自适应动态功耗管理[J]. 软件学报, 2005, 16(8): 1499-1505
Wu Qi, Xiong Guang-ze. Adaptive Dynamic Power Management for Non-Stationary Self-Similar Requests[J]. Journal of Software, 2005, 16(8): 1499-1505
- [8] Roderio I, Jaramillo J, Quiroz A, et al. Energy-efficient application-aware online provisioning for virtualized clouds and data centers[C]//Proc of International Conference on Green Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 31-45
- [9] 肖志娇, 明仲, 蔡树彬. 基于状态管理的服务器节能策略研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 22-30
Xiao Zhi-jiao, Ming Zhong, Cai Shu-bin. Study on Energy Optimization of Servers Based on States Management[J]. Computer Science, 2013, 40(4): 22-30
- [10] 谭一鸣, 曾国荪, 王伟. 随机任务在云计算平台中能耗的优化管理方法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 266-278
Tan Yi-ming, Zeng Guo-sun, Wang Wei. Policy of Energy Optimal Management for Cloud Computing Platform with Stochastic Tasks[J]. Journal of Software, 2012, 23(2): 266-278
- [11] Lin M H, Wierman A, Andrew L L, et al. Dynamic right-sizing for power-proportional data centers[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2013, 21(5): 1378-1391
- [12] Beloglazov A, Abawajy J, Buyya R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(5): 755-768
- [13] 李钰, 张海文, 吴名瑜, 等. 一种面向异构机群系统的低功耗任务调度算法[EB/OL]. 2009-10-23. http://d.wanfangdata.com.cn/Conference_7242376.aspx
Li Yu, Zhang Hai-wen, Wu Ming-yu, et al. An Efficient, Energy-aware Heuristic Scheduling Algorithm for Heterogeneous Clusters[EB/OL]. 2009-10-23. http://d.wanfangdata.com.cn/Conference_7242376.aspx
- [14] 何丽, 饶俊, 赵富强. 一种基于能耗优化的云计算系统任务调度方法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20): 19-22
He Li, Rao Jun, Zhao Fu-qiang. Task scheduling method based on energy optimization in cloud computing system[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(20): 19-22
- [15] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
Lin Chuang. Stochastic Petri net and Performance evaluation of systems(2nd edition)[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2005
- [16] 宋杰, 李甜甜, 闫振兴, 等. 一种云计算环境下的能效模型和度量方法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 200-214
Song Jie, Li Tian-tian, Yan Zhen-xing, et al. Energy-Efficiency Model and Measuring Approach for Cloud Computing[J]. Journal of Software, 2012, 23(2): 200-214

(上接第 94 页)

- [4] Huang W W, Peng Y K, Wen J, et al. Energy-efficient hierarchical routing protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE Computer Society, 2009, 35(2): 469-472
- [5] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proc. of the Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. San Francisco: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014
- [6] Younis O, Fahmy S. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach[C]//Zhang Z S, Low S, eds. Proc. of the IEEE INFOCOM. San Francisco: IEEE Computer Society Press, 2004
- [7] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]//Proc. of the 15th Parallel and Distributed Processing Symp. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001: 2009-2015
- [8] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems[C]//Proc. of the IEEE Aerospace Conference Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002: 1125-1130
- [9] 孙彦清, 彭舰, 刘唐, 等. 基于动态分区的无线传感器网络非均匀成簇路由协议[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 198-206
Sun Yan-qing, Peng Jian, Liu Tang, et al. Uneven clustering routing protocol based on dynamic partition for wireless sensor network[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 198-206
- [10] 蒋杨江, 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, 23(5): 190-200
Jiang C J, Shi W R, Tang X L, et al. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 190-200
- [11] 李朋飞, 李志华, 尹熙, 等. 基于能量等级的分簇拓扑控制算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 96-99
Li Peng-fei, Li Zhi-hua, Yin Xi, et al. Energy-level Based Clustering Network Topology Control Algorithm[J]. Computer Science, 2014, 41(3): 96-99
- [12] 李洪兵, 熊庆宇, 石为人. 无线传感器网络非均匀等级分簇拓扑结构研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(2): 49-52, 77
Li Hong-bing, Xiong Qing-yu, Shi Wei-ren. Study on Topology with Non-uniform Hierarchical Clustering for Wireless Sensor Networks[J]. Computer Science, 2013, 40(2): 49-52, 77
- [13] 陈庆章, 赵小敏, 陈晓莹. 提高无线传感器网络能效的双轮成簇协议设计[J]. 软件学报, 2010, 21(11): 2933-2943
Chen Q Z, Zhao X M, Chen X Y. Design of double rounds clustering protocol for improving energy efficient in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(11): 2933-2943
- [14] 苏金树, 郭文忠, 余朝龙, 等. 负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法[J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 445-456
Su Jin-shu, Guo Wen-zhong, Yu Chao-long, et al. Fault-Tolerance Clustering Algorithm with Load-Balance Aware in Wireless Sensor Network[J]. Chinese journal of computers, 2014, 37(2): 445-456