

## 提高无线传感器网络能效的双轮成簇协议设计\*

陈庆章<sup>+</sup>, 赵小敏, 陈晓莹

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310014)

### Design of Double Rounds Clustering Protocol for Improving Energy Efficient in Wireless Sensor Networks

CHEN Qing-Zhang<sup>+</sup>, ZHAO Xiao-Min, CHEN Xiao-Ying

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

+ Corresponding author: E-mail: qzhcen@zjut.edu.cn

**Chen QZ, Zhao XM, Chen XY. Design of double rounds clustering protocol for improving energy efficient in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(11):2933-2943. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3668.htm>**

**Abstract:** This paper focuses on the communication aspect to present a protocol for WSN to improve energy efficiency. It is called Energy Efficient Double Rounds Clustering Protocol (EEDRCP). It improves the LEACH protocol as follows: it adds a parameter of energy for the head node's election arithmetic, combines flat topology, hierarchical topology and location-based routing to form a hybrid topology, uses double rounds clustering instead of every round clustering. Finally, it is simulated on Matlab, and the results are compared with LEACH and DIRECT protocol. The results show that it improves the energy performance of network by 33%~82%.

**Key words:** wireless sensor network; energy efficiency; clustering protocol; flat topology; hierarchical topology; location-based routing

**摘要:** 提出一种用于提高无线传感器网络能效的双轮成簇协议(energy efficient double rounds clustering protocol,简称EEDRCP)。它对LEACH协议进行改进,以提高网络的能效。它在簇头选取算法中引入剩余能量参数,并且结合平面拓扑、层次拓扑和基于位置拓扑的优点形成混合型拓扑类型,同时改单轮成簇为双轮成簇。最后,在Matlab平台上模拟EEDRCP,并与LEACH和DIRECT协议进行分析比较。仿真结果表明,与LEACH协议相比,EEDRCP协议可提高网络能效达33%~82%。

**关键词:** 无线传感器网络;能效;成簇协议;平面型拓扑;层次型拓扑;基于位置的拓扑

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络(wireless sensor network,简称WSN)是一种由传感器节点构成的网络,能够协作实时地监测、感知和采集节点部署区域内的各种监测对象的信息,并对这些信息进行处理,以无线的方式发送给需要这些信息的观察者<sup>[1]</sup>。它是集数据采集、数据处理、数据传输于一体的复杂系统,改变了人与自然界的交互方式<sup>[2]</sup>。

\* Supported by the Major Science and Technology, Special and Priority Themes of Zhejiang Province of China under Grant No.2007C13064 (浙江省重大科技专项和优先主题)

Received 2008-12-21; Revised 2009-03-30; Accepted 2009-05-05

传感器网络通常包括传感器节点、汇聚节点(Sink 节点)和管理节点<sup>[3,4]</sup>.它在军事、环境、生物、医疗保健、空间探索和商业应用方面显示了很大的应用价值<sup>[2,3,5]</sup>.

在传感器网络中,传感器节点具有端节点和路由的功能:一方面实现数据的采集和处理;另一方面实现数据的融合和路由,对自身采集的数据和收到的其他节点发送的数据进行融合,再转发路由到汇聚节点.具体应用不同,传感器网络节点的设计也不尽相同,但其基本结构是一样的<sup>[5]</sup>.传感器网络节点一般由处理器单元、无线传输单元、传感器单元和电源模块单元 4 部分组成<sup>[4,5]</sup>,如图 1 所示.

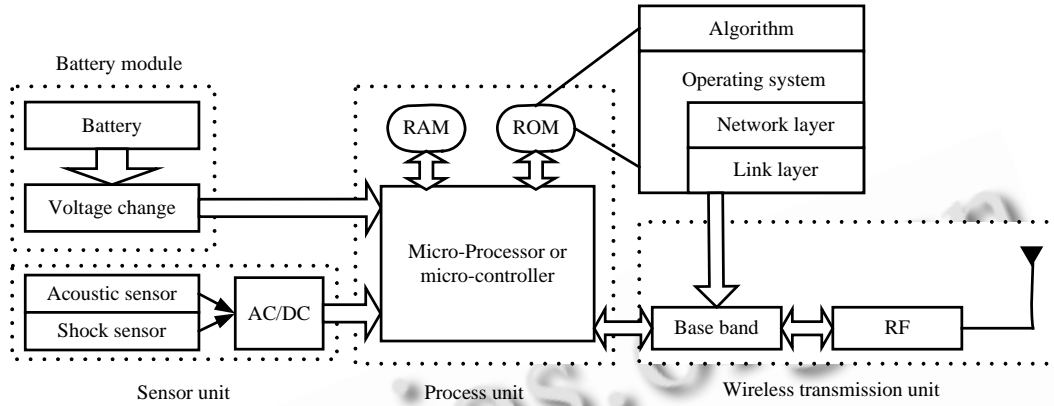


Fig.1 Components of sensor node

图 1 传感器节点的组成

无线传感器网络在偏远或恶劣的环境之中得到了很好的应用,但网络节点的电源更换或再充电等工作通常无法进行.网络节点电源的无法替换性使能量消耗问题相对于传感器网络的其他关键技术而言尤为重要<sup>[6]</sup>.在不影响性能的前提下,设计有效的能量消耗控制策略成为传感器网络软硬件设计中的核心问题.

在图 1 所示的 4 个模块中,绝大部分的能量消耗集中在无线传输单元上,传输单元消耗的能量是其他单元处理各种行为消耗能量的几倍<sup>[6]</sup>.本文主要考虑网络拓扑和通信路由来节省能耗,提出一种基于能效的双轮成簇协议(energy-efficient double rounds clustering protocol,简称 EEDRCP)协议,并与 LEACH 协议<sup>[7]</sup>进行比较,最后用 Matlab 进行网络仿真给予验证.

## 1 WSN 网络节能协议研究现状

在 WSN 网络中,为了达到节省能耗的目的,许多研究针对层次型(成簇)网络拓扑结构提出.这种网络拓扑将整个监测区域分为一个个的簇(cluster),它们是具有某种关联的网络节点集合.每个簇有一个簇头(cluster head)节点,其他为簇内节点.低一级网络的簇头是高级网络中的簇内成员,由最高层的簇头与汇聚节点通信,这类算法将整个网络划分为相连的区域.在每个簇内,簇内节点将数据传输到本簇头节点.由簇头节点完成簇内数据融合和簇之间的路由通信,最后将数据传送到汇聚节点<sup>[8]</sup>.

典型的层次路由协议包括 LEACH(low energy adaptive clustering hierarchy)<sup>[7]</sup>,TEEN(threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)<sup>[9]</sup>和 PEGASIS(power-efficient gathering in sensor information systems)<sup>[10]</sup>等等.

由 Heinzelman 等人提出的 LEACH,是 WSN 中最早提出的成簇路由协议.它的基本思想是,通过等概率地随机循环选择簇头,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点,从而达到降低网络能量耗费、延长网络生命周期的目的<sup>[7,11]</sup>.该协议的优点是,成簇算法简单,有效地延长了网络的生存时间.其不足在于:(1) 离汇聚节点(Sink)远的节点能量先耗尽;(2) 此协议假定初始能量相同,每一轮节电耗能也相同,这种同构的网络不符合实际应用中能量异构的特点;(3) 每轮成簇的代价较大.

Manjeshwar 等人提出的 TEEN 协议<sup>[9]</sup>采用类似 LEACH 的分簇算法,但传感器节点的数据不是以固定的速度发送的. TEEN 使用两个用户自定义的参数硬门限(hard threshold,简称 HT)和软门限(soft threshold,简称 ST),以决定当前传感的信息是否需要发送.当检测的值超过了硬门限,它被立刻发送出去;如果当前检测的值与上一次之差超过了软门限,也被立刻发送出去<sup>[8,11]</sup>.采用这样的方法可以监视一些突发事件和热点地区,减小网络内信息包数. TEEN 存在两个缺陷:(1) 如果门限值不能达到,则节点不会传送任何数据,不适合需周期性上报数据的应用;(2) 数据一旦符合门限值要求,节点立即传送,容易造成信号干扰<sup>[8]</sup>.

Lindsey 等人提出的 PEGASIS 协议<sup>[10]</sup>中的簇就是一条基于地理位置的链.其成簇的基本思想是,假设所有节点都是静止的,根据节点的地理位置形成一条相邻节点之间距离最短的链.但是,PEGASIS 在实际应用中有一定的缺陷,主要表现在:(1) 形成链需要保持各节点的全局信息,这在实际中比较困难;(2) 如果在一条链上某个节点失效,将导致整条链失效,容错性不佳;(3) 因为成链状传输,时延比较大,不适应与实时性较强的网络.

近年来,国内外对 WSN 网络基于能效的协议进行了大量的研究,但还有许多难点需要解决.在这种研究背景下,本文提出一种成簇协议(EEDRCP).它基于 LEACH 协议,并从网络拓扑、成簇算法和簇头选择周期等方面对 LEACH 进行改进,并且在成簇阶段,综合平面型拓扑和层次型拓扑的优点,在簇间传递数据时,结合位置路由协议的特点,最终期望达到节省节点能耗、均衡各节点能耗负载、延长网络生存时间的目的.仿真结果显示, EEDRCP 协议对 LEACH 有较大改进,可提高网络能效性能达 33%~82%.

## 2 EEDRCP 协议设计

### 2.1 模型的建立

无线传感器网络应用的环境多种多样,执行的监测任务也不尽相同,但其基础是在一定的区域随机分布众多无线感知节点,这些节点将感知到的数据通过无线设备向某个汇聚中心(Sink)传送.本论文用到的网络模型、传输模型和时间轴模型介绍如下.

#### 2.1.1 EEDRCP 网络模型

本论文的网络节点分布如图 2 所示,在长为  $X$ 、宽为  $Y$  的矩形区域内,随机分布  $n$  个感知节点,区域范围为  $X \times Y$ ,汇集节点位于区域中心,其坐标为  $Sink(X/2, Y/2)$ ,如图 2 中的“x”标记.此传感器网络具有如下性质:(1) 传感器节点在一次部署后就不做移动;(2) 汇聚节点 Sink 固定位于区域的中心,且其能量不受限制;(3) 感知节点具有相似的能量,地位平等;(4) 所有感知节点都有能力直接与汇聚节点通信;(5) 感知节点类型同构且能量受限;(6) 无线发射功率可控;(7) 部署后网络不需要人为维护,即网络自组织;(8) 每轮中各节点的能耗不同,即能量异构;(9) 部署后位置信息已知;(10) 节点具有数据融合的能力;(11) 节点周期性有数据传送;(12) 此网络主要考虑节点的能量和均衡网络的能量消耗,达到提高网络运行时间的目的,暂不考虑节点传输失败的容错性、节点通信的安全性等其他方面.

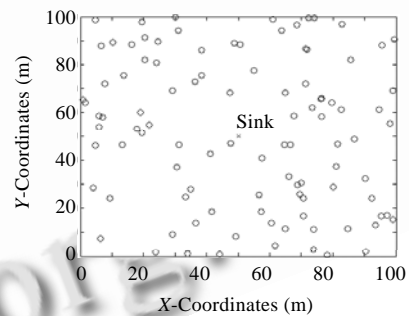


Fig.2 Network model of EEDRCP

图 2 EEDRCP 网络模型

#### 2.1.2 EEDRCP 传输模型

EEDRCP 协议用到的无线通信模型与文献[12]相同,传输模型如图 3 所示.该无线传送模型的传输和接收的能耗公式如下公式(1)和公式(2):

$$E_{tr}(k, d) = E_{elec}(k) + E_{amp}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

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

其中,  $E_{elec}$  是传送或接收每比特数据所需要的电路能量,参数  $\varepsilon_{fs}$  和  $\varepsilon_{mp}$  取决于使用的传输放大器模型,而  $d$  是发送端到接收端的距离,  $k$  为传输的比特数.

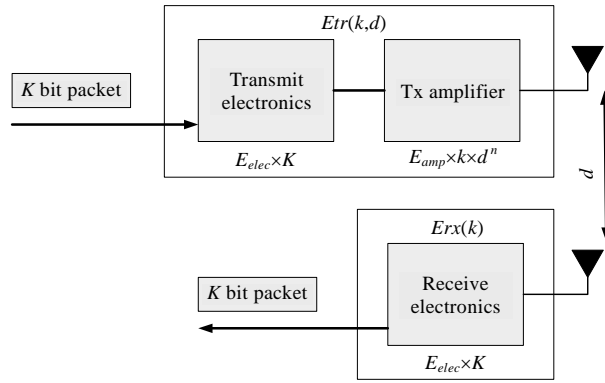


Fig.3 Transmission model of EEDRCP

图3 EEDRCP 传输模型

2.1.3 EEDRCP 时间轴模型

LEACH 协议<sup>[7]</sup>将网络的运行按轮数来划分,每一轮又分为簇头选取、簇的形成和簇的通信 3 个阶段.本文的 EEDRCP 协议基于 LEACH 进行了改进,网络运行阶段分配如下:首先是网络初始阶段用  $T_{ini}$  表示,然后网络自组织成簇,用轮来表示运行阶段  $T_{round}$ .本文使用双轮成簇策略来节省成簇能耗,所以各轮分为奇数轮和偶数轮,分别用  $T_{o\_round}$  和  $T_{e\_round}$  来表示.在奇数轮  $T_{o\_round}$  内,又分为簇头选取、簇的形成、簇内通信和簇间通信 4 个阶段,分别表示如下: $T_{choose}$ ,  $T_{cluster}$ ,  $T_{io\_CH}$  和  $T_{io\_Sink}$ .在偶数轮,因为不用重新成簇,所以可将运行阶段分为簇内通信  $T_{io\_CH}$  和簇间通信  $T_{io\_Sink}$ .时间轴模型如图 4 所示.

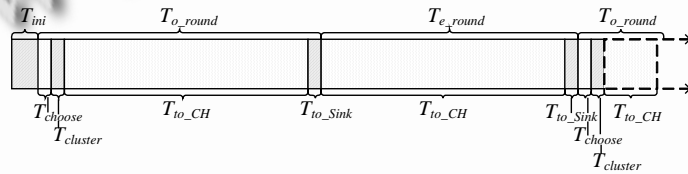


Fig.4 Time-Axis model of EEDRCP

图4 EEDRCP 时间轴模型

2.2 WSN网络初始建立

在网络部署的初期,所有的传感器节点按照飞机空中抛洒等方式随机分布在  $X \times Y$  的区域内,汇聚节点 Sink 位于此区域的中央,其坐标为  $Sink(X/2, Y/2)$ .此网络有传感器节点的总数为  $n$ ,各节点的坐标为  $S_i(x_i, y_i), i=1, 2, 3, \dots, n$ ,各传感器节点的初始能量相同为  $E_0$ .

两节点间的距离公式为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, i, j \in 1, 2, 3, \dots, n, i \neq j \tag{3}$$

则到汇聚节点的距离  $d_{io\_Sink}$  为

$$d_{io\_Sink}(i) = \sqrt{(X_{X/2} - x_i)^2 + (Y_{Y/2} - y_i)^2}, i \in 1, 2, 3, \dots, n \tag{4}$$

在 WSN 网络建立后,节点之间彼此的通信包括控制信息 CM(control message)和数据信息 DM(data message).由于传感器节点收集的数据是主要的,而控制信息是为了维持整个网络节点之间的联系,数据量小,所以本文假定 CM 和 DM 为常数,且  $DM \gg CM$ .在网络建立后某一时刻, Sink 节点发送同步信息,网络进入第 1 轮簇头节点的选取.

### 2.3 奇数轮簇头选取算法

文献[7]提出的 LEACH 协议假定每个节点在网络运行期间的能耗是均衡的,这种能量同构的网络在实际应用中是不存在的.但是,每个簇的大小和簇头到 Sink 的距离不一样,每个节点在每一轮消耗的能量并不相等<sup>[7]</sup>.针对 LEACH 算法的这个问题,在 EEDRCP 协议中,簇头的选取门限值  $T(s)$  将引入节点的剩余能量参数来达到均衡节点能耗的目的.文献[13–15]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.我们采用与文献[15]类似的节点剩余能量公式,如公式(5)所示:

$$T(s)_{EEDRCP} = \frac{p}{1 - p[r \bmod (1/p)]} \left[ \left( 1 - \left( r_n \operatorname{div} \frac{1}{p} \right) \right) \frac{E_{r\_current}}{E_0} + r_n \operatorname{div} \frac{1}{p} \right] \quad (5)$$

其中,  $r_n$  表示节点连续未当选簇头的轮数.一旦当选了簇头,  $r_n$  重置为 0<sup>[15]</sup>.

### 2.4 奇数轮成簇策略

#### 2.4.1 簇头广播信息

按照 EEDRCP 协议的算法已经选择了簇头节点.此后,簇头节点向所有节点广播自己成簇的消息,消息中包含本簇头的位置信息  $S_{cj}(x_{cj}, y_{cj})$ ,  $cj$  为该簇头的编号,其控制信息的大小设为 CM.簇头广播此信息时用最大发送功率传输,以使得最远的节点也能收到此控制信息.由于图 2 中的网络模型是矩形区域,则最大发送功率时使用的距离  $d_{\max}$  为

$$d_{\max} = \sqrt{X \times Y} \quad (6)$$

簇头广播自身为簇头的能耗为

$$E_{bro} = CM \times E_{elec} + CM \times \varepsilon_{-fs} d_{\max}^2 \quad (7)$$

#### 2.4.2 普通节点入簇抉择

在成簇规则中,设普通节点到 Sink 节点的直接距离为  $d_{to\_Sink}$ .EEDRCP 网络模型是 Sink 节点位于监测区域内,所以总有一些感知节点离 Sink 节点比到各簇头的距离  $d_{to\_CH}$  更近,如图 5 所示.这些节点称为独立节点,它发送数据给 Sink 的能耗为

$$\begin{cases} E_{to\_Sink\_Controll} = CM \times E_{elec} + CM \times \varepsilon_{-fs} d_{to\_Sink}^2 \\ E_{to\_Sink\_Data} = DM \times E_{elec} + DM \times \varepsilon_{-fs} d_{to\_Sink}^2 \end{cases} \quad (8)$$

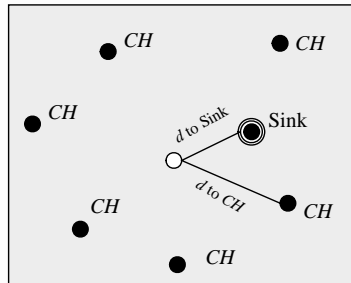


Fig.5 Situation of  $d_{to\_Sink} < d_{to\_CH}$

图 5  $d_{to\_Sink} < d_{to\_CH}$  的情况

### 2.5 偶数轮的拓扑网络组织

在网络成簇阶段,普通节点和簇头节点都处于监听、发送或接收状态,且各节点之间的控制消息数量很大,这些行为都会消耗网络的能量.所以在整个网络中,每一轮的成簇时间相对于簇稳定后的通信时间应该要短得多.为有利于网络的扩展和容错能力以及整个网络能耗的均衡,我们考虑让网络自组织成簇,将每轮成簇一次改进为两轮成簇一次.簇头在组织自身的簇时,根据簇成员节点的剩余能量  $E_{r\_current}$ ,选择最大剩余能量的节点  $n_{\max E}$ ,为它分配第 1 个时隙 slot 1,这个策略就是为偶数轮簇头轮换做准备.在偶数轮开始时,原来的簇头节点转

换为普通的簇成员节点,它对应的通信时隙为该轮的第 1 个时隙,而上一轮位于 slot 1 的节点自动成为该轮的簇头节点,开始监听信道.其他节点仍为簇成员节点,它们根据上一轮控制信号中的簇头位置信息,计算出自身到新簇头的距离,调整发送功率,向新的簇头转发自己的数据消息.由此可见,在偶数轮,簇头和成员节点间没有任何控制消息传输,即不用为维持网络功能而消耗额外能量,这可以较大地节省整个网络的能耗.

2.6 EEDRCP数据通信问题

2.6.1 EEDRCP 簇内通信

WSN 网络节点可以处在激活(传送、接收或监听)或休眠状态.由文献[16]可知,激活状态节点的能耗高.节点处于监听状态的能耗只比发送和接收的能耗略少,而节点处于休眠时的能耗要远远小于节点激活状态的能耗,只占 10%左右.

本文考虑运用休眠机制,将休眠机制与采用时分多址(time division multiple access,简称 TDMA)技术结合,为簇内的每个成员节点分配一个时隙(time slot),节点只在自己的时隙到达时醒来并传送数据,在其他时刻处于休眠状态,关闭自身的通信模块停止监听信道.

在奇数轮时,簇内的时隙包括  $T_{cluster}$  和  $T_{to\_CH}$  两个阶段.在  $T_{cluster}$  阶段,主要完成时隙的注册;在  $T_{to\_CH}$  阶段,各节点按时隙编号传送数据.在时隙 0 时,簇头节点收集各成员节点的注册信息,然后分配时隙给每个节点,分别为 slot 1, slot 2, slot 3...,如图 6 所示.A 为此轮的簇头节点,slot 1 的时隙分配给下一轮的簇头节点.即在此轮,簇头 A 计算各成员节点的剩余能量,选择最大的节点 B,为它分配时隙 1(slot 1),其他节点为普通成员节点.

由于偶数轮没有成簇的过程,所以没有注册的时间  $T_{cluster}$ .在  $T_{to\_CH}$  中,slot 1 替换成前一轮的簇头节点 A,而其他时隙的分配不变.

在奇数轮结束之前,簇头 A 将这一轮的所有数据发往汇聚节点 Sink,在偶数轮结束前后,簇头 B 将所有此轮数据发往 Sink.

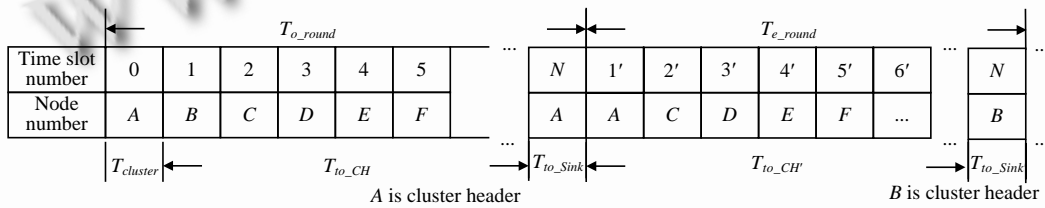


Fig.6 Time slot of double rounds clustering

图 6 双轮成簇时隙

每一个数据传送时隙应该为多大?文献[17]指出,时隙的大小等于最大数据包的最大传输时间.在 EEDRCP 中,我们设数据传输时隙为  $T_{slot}$ ,一轮的时间间隔为  $T_{interval}$ .在奇数轮,每个成员节点根据簇头广播的时隙信息,找到自己的时隙号  $m$ ,计算从休眠中醒来的时间.

奇数轮醒来的时间为

$$T_{o\_wake\_up}=(m-1)T_{slot} \tag{9}$$

偶数轮醒来的时间为

$$T_{e\_wake\_up}=T_{interval}+(m-1)T_{slot} \tag{10}$$

2.6.2 EEDRCP 簇间通信

在无线传感器网络中,所有的节点通信公用一个广播通道,这使得相邻的两个簇之间会有信号覆盖的情况而造成信号干扰.为了解决信号干扰的问题,本文采用 CDMA 技术,给每个簇分配一个不同的码,当一个节点在奇数轮成为簇头后,它将随机在频谱中选择一个码,然后在广播时隙分配信号时附带这个码.这使得该簇内节点都按照这个码进行传送,簇头节点过滤掉不是该簇频谱码的信息,避免了冲突<sup>[7]</sup>.

在簇头与 Sink 节点的通信中,由于距离的远近,能耗不均衡.为了使能耗在整个网络中更均衡,我们改

LEACH 协议的单跳为单跳与两跳相结合.具体策略如下:

将整个网络分为两层:第 1 层距离 Sink 较近,第 2 层距离 Sink 远. $D_{diff}$  为两层的分割线,距 Sink 距离小于  $D_{diff}$  的节点位于第 1 层,其他节点位于第 2 层.在簇头形成后,每个簇头广播自己是簇头的信息,此时其他簇头节点接收此信息,位于第 2 层的簇头选择离自己最近的第 1 层簇头,设此第 1 层节点为  $S_{CH}(w)$ ,在向 Sink 发送数据时,先将数据发往  $S_{CH}(w)$ ,然后由  $S_{CH}(w)$  将信息发往 Sink,构成一个两跳的网络通信方式;而第 1 层节点因为离 Sink 较近,则采用单跳的方式与 Sink 通信.这样,平衡了因距离远近带来的能耗不均问题.在此策略中, $D_{diff}$  的选择非常重要,应根据具体网络情况决定. $D_{diff}$  过大或过小,都不利于均衡能耗.

我们给出的  $D_{diff}$  公式如下:

$$D_{diff} = Q \frac{\sqrt{X \times Y}}{4}, \quad 0 < Q < 2 \tag{11}$$

其中, $X \times Y$  为整个区域的面积, $Q$  为根据实际网络环境选择的参数.如果  $Q=0$ ,则所有节点都属于第 2 层;如果  $Q=2$ ,则所有节点都属于第 1 层.

### 2.6.3 Sink 与各传感器节点的通信

在讲述簇内和簇间通信时,我们避开了讨论 Sink 节点与传感器节点的控制消息的通信,这里我们将集中阐述 Sink 节点和各传感器节点的通信过程.Sink 节点相对于其他传感器节点,其能量不受限.具体可分如下步骤:

- (1) 在网络部署初期,经过一个短暂的  $T_{ini}$  后,Sink 节点广播同步信号,整个网络进入成簇阶段,即奇数轮开始簇头选择.
- (2) 在奇数轮簇形成时,各簇的簇头节点都立即向 Sink 发送一个控制消息,其中包括该簇的簇成员个数.
- (3) Sink 节点收集各簇成员的个数,计算各簇的最多成员个数  $l_{cluster}$ .
- (4) 独立节点的数据传送方法.独立节点在确定自己不成簇后,运用 CDMA 向 Sink 发送自己的信息.因为独立节点较少且距离 Sink 较近,独立节点也将像簇成员节点一样分配一个时隙,只是这个时隙的分配由 Sink 发送,并且独立节点向 Sink 直接传送数据.换句话说,可以将独立节点看成是一个以 Sink 为簇头的特殊的簇.Sink 记录该奇数轮独立节点的个数为  $l_{solo}$ .
- (5) Sink 节点取  $l_{max} = \max(l_{cluster}, l_{solo})$ ,以此  $l_{max}$  计算出  $T_{interval} = l_{max} \times T_{solo} + T_{to\_Sink}$ .此后,Sink 节点将  $T_{interval}$  广播给各个节点,并开始簇内的通信过程.
- (6) 在步骤(5)之后,经过两轮,即  $2T_{interval}$  后,Sink 重新发送同步信号,网络恢复到最初的状态,进行新一轮的成簇.即每两轮(奇数轮和偶数轮)后,网络恢复初始状态.
- (7) 循环步骤(2)~步骤(6),直到网络运行的生命期结束.

## 3 协议仿真和结果分析

### 3.1 仿真环境

本文在 Matlab 平台上进行 WSN 网络的仿真.监测范围为一个  $100m \times 100m$  的正方形区域.为不失一般性,假定汇聚节点(Sink)位于该区域的中心.在监测范围内随机分布 100 个节点,节点的初始能量  $E_0=0.02J$ ,仿真中用到的参数见表 1.

Table 1 Experimental parameter in simulated environment

表 1 仿真环境中的实验参数

Parameter	Parameter value	Parameter	Parameter value
$E_{elec}$	5nJ/bit	$E_{DA}$	5nJ/bit/message
$\epsilon_{fs}$	10nJ/bit/m <sup>2</sup>	$E_0$	0.02J (0.05J/0.1J/0.5J)
Data message size (DM)	4000bit (1000/2000/3000)	Control message size (CM)	32bit
$\lambda$	0.6	$n$	100 (200)
X-Max	100m	Y-Max	100m
$p$	0.1 (0.05)	$D_{diff}$	25m

### 3.2 EEDRCP与LEACH和DIRECT性能比较

本文的 EEDRCP 对 LEACH 进行了多处改进,设计出完整的仿真代码,将 EEDRCP 与 LEACH 协议和 DIRECT 协议(每个节点将数据消息直接发送给 Sink 节点)进行比较,仿真结果的节点存活轮数如图 7 所示.

从图 7 中可以看出,EEDRCP 比 LEACH 提高网络运行时间 33%~82%,比 DIRECT 提高网络运行时间 123~177%,它的首节点失效轮数为 259 轮,远远长于 LEACH 协议的 144 轮和 DIRECT 协议的 111 轮.而 500 轮后,EEDRCP 协议下 WSN 网络仍有 50% 节点存活,而 LEACH 协议 50% 节点存活的轮数在 300 轮左右,DIRECT 协议在 200 轮左右.可见,使用 EEDRCP 协议时,所有节点都存活着的网络稳定时间远远大于其他两个协议.

由于 DIRECT 方式将节点的数据消息直接向 Sink 节点发送,没有数据融合,所有节点时刻处于激活状态,且每个节点传送的距离固定为  $d_{to\_Sink}(i)$ ,这将使节点的能量较快的耗尽.LEACH 协议将网络分簇,只有簇头节点能耗较大,并且轮换簇头节点来均衡能量,有效地改进了网络的性能.但是它也有自身的不足,如簇头选择的完全随机性、成簇代价大、距离 Sink 远的节点最先耗尽等等.EEDRCP 协议针对这些不足对 LEACH 协议进行了改进,所以网络的性能得到进一步的提高.

而在图 7 中我们也可以看出,当失效节点数大于 75% 时,EEDRCP 协议的优势变得不明显.我们认为,当 WSN 网络的存活节点数小于 25% 时,网络变得极度不稳定,有些监测区域已不可达.而簇头数也降低到很少的个数,此时有些消息已不能传送到 Sink 节点,网络的连通性很差.此时的 WSN 网络已基本不可用,因而各种协议失效节点数/轮数趋向于相同.从图 7 中可看出,EEDRCP 协议 75% 节点失效的轮数在 600 轮左右,而 LEACH 和 DIRECT 协议只有 450 轮左右.图 8 给出了 1%,20%,50% 和 90% 节点失效的轮数比较.从仿真结果可以看出,在相同的轮数,EEDRCP 协议的节点存活量远大于其他两种协议,即 EEDRCP 协议网络的稳定性更强,说明 EEDRCP 协议比 LEACH 和 DIRECT 更有效.

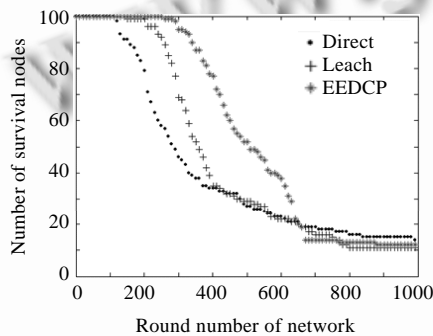


Fig.7 Round number of survival nodes in EEDRCP, LEACH and DIRECT

图 7 EEDRCP,LEACH 和 DIRECT 协议的节点存活轮数

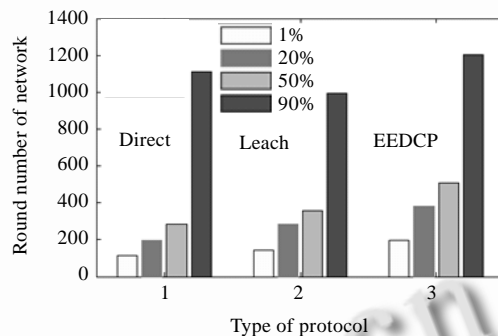


Fig.8 Round number in 1%, 20%, 50% and 90% nodes failure

图 8 1%,20%,50%,90% 节点失效轮数

我们保持其他参数不变,而将初始能量  $E_0$  改变,分别取  $E_0=0.05J/0.1J/0.5J$  来进行仿真,以此验证 EEDRCP 协议对各个初始能量值都比 LEACH,DIRECT 协议在相同条件下更有效性和网络稳定性,如图 9~图 11 所示.

仿真的结果与  $E_0=0.02J$  时一样.由此可知,EEDRCP 对于不同的初始能量适用.我们比较 EEDRCP, LEACH 和 DIRECT 协议在 0.02J,0.05J,0.1J 和 0.5J 情况下,1%,50% 和 80% 节点失效的轮数,见表 2.

从表 2 中我们可以看出,对首个失效节点的情况即网络完全稳定运行的时候,EEDRCP 协议比 DIRECT 协议提高能效 123%~177%,比 LEACH 协议提高 22%~80%.而对于网络 50% 节点失效的情况下,EEDRCP 协议也比 DIRECT 协议提高能效 42%~90%,对 LEACH 协议提高能效 17%~51% 不等.而我们看 80% 节点失效时,即此时的网络已经基本不可用,多数区域监测不可达,此时,EEDRCP 协议与 LEACH 和 DIRECT 协议比较没有明显优势,反而失效的轮数更少,而此时的结果也正是我们期望的.这一结果表明,EEDRCP 协议具有更好的收敛性,



而 WSN 网络的生命周期需要有必要的收敛性<sup>[18,19]</sup>.

**Table 2** Comparison of round number when 1%, 50% and 80% of nodes failure

**表 2** 1%,50%,80%失效节点时轮数比较

$E_0$		Failure number					
		11% (round number)	EEDCP percentage increase	50% (round number)	EEDCP percentage increase	80% (round number)	EEDCP percentage increase
0.02J	DIRECT	111	133%	283	80%	654	-0.3%
	LEACH	144	80%	358	42%	644	1.2%
	EEDCP	259	-	508	-	652	-
0.05J	DIRECT	286	123%	827	53%	1 827	-12%
	LEACH	502	27%	1 050	17%	1 795	-9%
	EEDCP	637	-	1 263	-	1 634	-
0.1J	DIRECT	517	157%	1 303	90%	3 651	-10%
	LEACH	1 087	22%	1 788	39%	2 975	10%
	EEDCP	1 331	-	2 481	-	3 285	-
0.5J	DIRECT	2 657	177%	8 563	47%	20 105	-23%
	LEACH	5 561	32%	8 337	51%	12 895	26%
	EEDCP	7 358	-	12 569	-	16 293	-

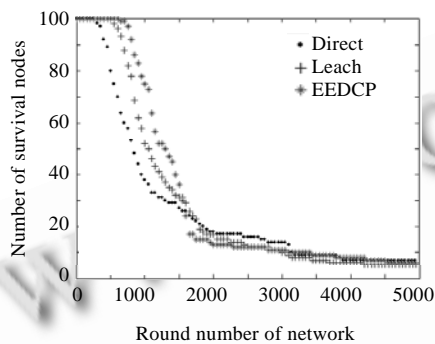


Fig.9 Round number of survival nodes when  $E=0.05$

图 9  $E=0.05$  时存活节点轮数

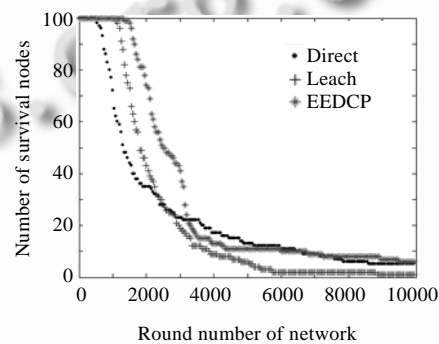


Fig.10 Round number of survival nodes when  $E=0.1$

图 10  $E=0.1$  时存活节点轮数

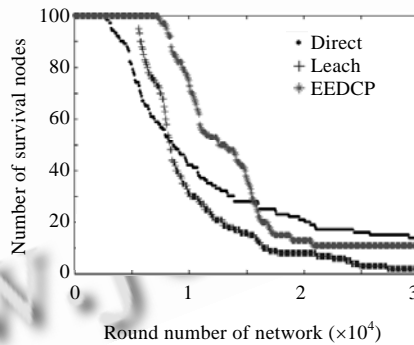


Fig.11 Round number of survival nodes when  $E=0.5$

图 11  $E=0.5$  时存活节点轮数

#### 4 总 结

本文提出了一种无线传感器网络基于能效的双轮成簇协议(EEDRCP),意在提高网络的能效,改善节点能量“稀缺”问题.EEDRCP 协议基于 LEACH 协议,对其作了多处改进,包括协议簇头算法、网络拓扑和通信方式等

方面,具体概括如下:

- (1) 改进簇头选取算法. LEACH 协议的簇头按随机数轮换,但 WSN 网络的能量消耗不是同构的,所以在 EEDRCP 协议中,我们考虑节点的剩余能量,将其作为一个参数引入簇头算法,使整个网络的能耗更加均衡.
- (2) 混合型网络拓扑. LEACH 协议是典型的层次拓扑结构,而在 EEDRCP 协议中,我们提出了独立节点的概念,使独立节点与簇节点并存,节点基于距离决定是否加入簇群. 独立节点采用平面拓扑结构,而其他簇节点采用层次型拓扑. 这种混合型拓扑国内外研究较少,仿真结果表明,此类网络拓扑更有能效.
- (3) 双轮成簇一次,簇头轮换一次. 为了节省成簇时较大的通信能耗,同时为了保持网络的自组织和自适应性,我们改 LEACH 协议的单轮成簇为双轮成簇. 在奇数轮,节点组织成簇;而在偶数轮,只是在簇内轮换簇头而不用重新成簇.

最后,我们在 Matlab 环境下对 EEDRCP 协议进行仿真,并比较 EEDRCP 协议与直接传输协议 DIRECT 和成簇协议 LEACH 性能的优劣. 分析仿真结果,从而验证 EEDRCP 协议的能效性、稳定性和适用性,表明它提高了网络能效 33%~82%.

#### References:

- [1] Li JZ, Gao H. Survey on sensor network research. Journal of Computer Research and Development, 2008,45(1):1-15 (in Chinese with English abstract).
- [2] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks, 2002,38(4):393-422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [3] Ma ZC, Sun YN, Mei T. Survey on wireless sensors network. Journal of China Institute of Communications, 2004,25(4):114-124 (in Chinese with English abstract).
- [4] Akyildiz LF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102-114.
- [5] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003,14(7):1282-1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [6] Dhanaraj M, Manoj BS, Murthy CSR. A new energy efficient protocol for minimizing multi-hop latency in wireless sensor networks. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications. Hawaii: IEEE Computer Society, 2005. 117-126. <http://www.percom.org/2005/index.htm>
- [7] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the 33rd Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000. 3005-3014.
- [8] Shen B, Zhang SY, Zhong YP. Cluster-Based routing protocols for wireless sensor networks. Journal of Software, 2006,17(7):1588-1600 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1588.htm> [doi: 10.1360/jos171588]
- [9] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: Proc. of the 15th Parallel and Distributed Processing Symp. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009-2015.
- [10] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems. In: Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002. 1125-1130. <http://ceng.usc.edu/~raghu/pegasisrev.pdf>
- [11] Xu JB. Research on distributed clustering and energy-saving data Gathelling protocol for wireless sensor network [Ph.D. Thesis]. Changsha: Hu'nan University, 2007.
- [12] Heinzelman WR, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670. [doi: 10.1109/TWC.2002.804190]
- [13] Ngo HQ, Lee YK, Lee SY. MEPA: A new protocol for energy-efficient, distributed clustering in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Wireless Communication Systems. Norway: Wireless Communication Systems, 2007. 40-44.
- [14] Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(4):660-669.

- [15] Handy MJ, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. In: Proc. of the 4th IEEE Conf. on Mobile and Wireless Communications Networks. Stockholm: IEEE Communications Society, 2002. 368–372.
- [16] Stemm M, Katz RH. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices. IEICE Trans. on Communications, 1997,E80-B(8):1125–1131.
- [17] Arisha KA, Youssef MA, Younis MF. Energy-Aware TDMA-based MAC for sensor networks. In: Proc. of the IEEE Workshop on IMPACCT. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002. 372–382.
- [18] Duarte-Melo EJ, Liu MY. Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks. In: Proc. of the Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2002). 2002. 21–25. <http://www.globecom2002.com.tw>
- [19] Chang JH, Tassiulas L. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2000. 563–561.

#### 附中文参考文献:

- [1] 李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展.计算机研究与发展,2008,45(1):1–15.
- [3] 马祖长,孙怡宁,梅涛.无线传感器网络综述.通信学报,2004,25(4):114–124.
- [5] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282–1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [8] 沈波,张世永,钟亦平.无线传感器网络分簇路由协议.软件学报,2006,17(7):1588–1600. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1588.htm> [doi: 10.1360/jos171588]
- [11] 徐建波,无线传感器网络分布式分簇和节能的数据收集协议研究[博士学位论文].长沙:湖南大学,2007.



陈庆章(1955—),男,河南济源人,博士,教授,主要研究领域为网络与计算机通信,计算机支持的协同工作,传感器网络.



陈晓莹(1982—),女,硕士,主要研究领域为传感器网络.



赵小敏(1976—),男,博士生,主要研究领域为网络与计算机通信,传感器网络,网络安全.