

## 基于非均匀分簇的无线传感器网络分层路由协议

黄廷辉<sup>1,2</sup>, 伊 凯<sup>1\*</sup>, 崔更申<sup>1</sup>, 王玉良<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 广西可信软件重点实验室, 广西 桂林 541004)

(\* 通信作者电子邮箱 510873561@qq.com)

**摘 要:**针对大规模无线传感器网络(WSN)中由于簇首节点分布不合理而导致节点消耗能量过快的问题,设计了一种基于非均匀分簇的无线传感器网络分层路由协议(HRPNC)。HRPNC 结合低功耗自适应集簇分层型协议(LEACH)中的分簇思想,并在分层的基础上对能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议(DEBUC)中竞争半径的算法进行改进,即通过分层机制及竞争机制选取簇首,使簇首节点分布更加合理,有效均衡节点的能量消耗。在 Matlab 上进行的仿真实验中,HRPNC 在生存周期上较 LEACH 协议与 DEBUC 协议分别提高了约 500 轮、300 轮;HRPNC 的节点平均剩余能量高于 LEACH 协议与 DEBUC 协议,节点能量的消耗在生存周期期间基本保持较低且平稳的能量消耗;HRPNC 较 LEACH 协议与 DEBUC 协议在数据包传输总量上分别提高了约 300%、130%;在不同仿真环境下,HRPNC 的丢包率均比 LEACH 协议和 DEBUC 协议低。实验结果表明,HRPNC 不仅能有效延长网络的生存周期,提高数据的传输数量与网络的稳定性,并且能有效降低数据传输的丢包率。

**关键词:**低功耗自适应集簇分层型协议;非均匀分簇;路由协议

**中图分类号:** TP391.4 **文献标志码:** A

## Hierarchical routing protocol based on non-uniform clustering for wireless sensor network

HUANG Tinghui<sup>1,2</sup>, YI Kai<sup>1\*</sup>, CUI Gengshen<sup>1</sup>, WANG Yuliang<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Trusted Software, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** According to the problem of excessive energy consumption caused by the unreasonable distribution of cluster head nodes in the large-scale Wireless Sensor Network (WSN), a Hierarchical Routing Protocol for wireless sensor networks based on Non-uniform Clustering (HRPNC) was designed. HRPNC combined the idea of clustering in Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH), and basing on stratification improved the algorithms of competitive radius regarding Energy-Balanced Unequal Clustering routing protocol for WSN (DEBUC). Through taking advantage of hierarchical mechanism and the mechanism of competition, the distribution of the cluster heads turned out to be more reasonable and the energy consumption of such nodes got balance effectively. In the simulation performed on the Matlab, the life cycle of HRPNC was higher than that of the LEACH and DEBUC by about 500 and 300 rounds respectively. The average residual energy of the nodes with HRPNC was higher than that of the nodes with LEACH and DEBUC. As to the energy consumption, it remained lower and more stable during the survival phase. Besides, compared with LEACH and DEBUC, the aggregate of data packet of HRPNC was 300% and 130% higher respectively. What is more, under different simulations, the packet loss rate of HRPNC was lower than that of LEACH and DEBUC. The experimental results show that HRPNC can not only extend the lifetime of the network, and increase network stability and the number of data transmission, but also reduce the loss rate of data transmission effectively.

**Key words:** Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) protocol; non-uniform clustering; routing protocol

## 0 引言

无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)被广泛应用于军事、医疗、商业、环境和家庭等各种领域的信息获取和处理当中。由于有限的硬件和电池能量消耗过快的问题,近年来,尽量减少 WSN 中节点的能耗、延长整个网络的生存周期和提高网络的传输效率已成为 WSN 传输机制和网络协

议研究的重点之一<sup>[1]</sup>。

根据 WSN 中的拓扑结构,可把 WSN 的网络协议分为平面路由协议和层次路由协议两种。因为平面路由协议存在着需要维护庞大的路由表、占用较大的存储空间、对网络的变化适应速度慢等缺点,所以它并不适用于大规模无线传感器网络。而层次路由协议通过分簇和数据融合的方式传输数据,更加适用于大规模的无线传感器网络<sup>[2]</sup>。典型的层次路由

收稿日期:2015-07-09;修回日期:2015-09-06。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61063040);广西研究生教育创新计划资助项目(YCSZ2013068)。

作者简介:黄廷辉(1970-),男,广西贵港人,副教授,硕士,主要研究方向:嵌入式系统设计、无线传感器网络软件、物联网信息协同处理;伊凯(1990-),男,福建南平人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络软件、物联网信息协同处理;崔更申(1971-),男,湖北天门人,副教授,硕士,主要研究方向:嵌入式系统及应用、物联网、计算机视觉;王玉良(1991-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:分布式计算、无线传感器网络软件、物联网信息协同处理。

协议有低功耗自适应集簇分层型 (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) 协议<sup>[2]</sup>、传感器信息系统的高效采集 (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems, PEGASIS)<sup>[3]</sup>、无线传感器网络中一种高效节能的聚类方案 (Energy Efficient Clustering Scheme in wireless sensor networks, EECS)<sup>[4]</sup>等。其中 LEACH 协议是 WSN 中经典的分簇路由协议,它是通过簇首轮转的方式来均衡 WSN 中节点的能量,然而这种均衡仅仅是局部的,从整体上看,远离基站的簇首仍然消耗了更多的能量,导致这些节点过早地死亡,影响整个网络的数据监测和生存周期。PEGASIS 协议是在 LEACH 协议的基础上采用簇间多跳的传输来发送数据,虽然减少了距离基站较远的簇首节点的能量损耗,但是由于离基站较近的簇首节点处于多跳线路的尾端,接收到大量的数据,发送给基站时消耗过多地能量,从而导致了网络提前死亡,同样也影响了整个网络的数据监测和生存周期,因此并没有解决 WSN 中能量整体分布不均衡的问题。

基于 WSN 中能量整体分布不均衡的问题,许多学者对 LEACH 协议进行了改进。EECS 协议采用了簇的非均衡分布的方式,以簇间单跳的形式进行数据传输,因为它是以单跳形式进行数据传输,所以它只能缓解簇首的能量消耗,但无法从整体上实现节点间的能量平衡,并且不适用于大规模的无线传感器网络。在 LEACH 协议在大规模无线传感器网络中的改进<sup>[5]</sup> (Improvement in LEACH protocol for large-scale wireless sensor networks) 中通过改变簇首的成簇方式,从而减少簇内节点与簇首通信的能量消耗,但没有考虑簇首间的通信能耗。周东鑫等<sup>[6]</sup>根据通信代价的方法对网络进行分层,提出了基于分层多跳的无线传感器网络分簇路由协议 (Layer Based Multi-hop Clustering routing algorithm for wireless sensor networks, LBMC),它与 LEACH 等协议相比,获得了更好的能量效率与网络生存周期,但是它的阈值选取偏大,并且对于簇首的分布没有较合理的布局。蒋畅江等<sup>[7]</sup>提出了一种能量高效均衡的分布式非均匀分簇路由协议 (Distributed Energy-Balanced Unequal Clustering routing protocol for wireless sensor networks, DEBUC),它采用非均匀分簇和簇间多跳相结合,基于时间的簇首竞争算法,通过控制不同位置候选簇头的竞争算法,使得距离基站较近的簇的几何尺寸较小,使得网络中不同位置的簇内节点和簇间通信能耗可以相互补偿,有效地节约单个节点的能量、均衡网络能耗、延长网络生存周期。由于 DEBUC 协议计算出竞争半径的大小是逐渐地增大,并没有对其进行适当的限制,当它用于大规模的无线传感网络中会造成远离基站的簇规模过大,簇内通信距离达到能量计算模型中的多路径衰减模型的阈值,导致数据传输时消耗的能量成倍地增加,从而影响了整个网络的数据监测和生存周期。

针对上述提出的一些协议的缺点,为了使大规模无线传感器网络节点能量消耗更加均衡,本文结合了 LEACH 协议中的分簇思想,并在分层的基础上,对 DEBUC 协议中的竞争半径的算法进行改进,设计了一种基于非均匀分簇的无线传感器网络分层路由协议 (Hierarchical Routing Protocol for wireless sensor networks based on Non-uniform Clustering, HRPNC)。

## 1 模型及假定

### 1.1 网络模型

假设 WSN 具有以下性质:

- 1) 节点随机均匀分布在监测区域,每一个节点都拥有唯一的编号。
- 2) 基站 (Base Station, BS) 位置固定且唯一,但能量是有限的。所有节点位置固定,能量有限。
- 3) 所有节点拥有近似的处理和通信能力,地位平等。
- 4) 所有节点都能够依据收到信息的强弱程度来判断同发送者的近似距离,进而调节自己的发射功率。
- 5) 节点没有安装具有全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 功能的天线,不具有位置感知功能。
- 6) 采用数据融合技术减少数据的传输量。
- 7) 每一个节点都能够通过计算得出当前的剩余能量。

### 1.2 无线通信能耗模型

HRPNC 的无线通信能耗模型采用 LEACH 协议<sup>[6]</sup>中的无线通信能耗模型,数据发送的能量消耗主要来自于发送电路和功率放大电路,而功率放大电路的损耗主要依据发送者和接收者之间的距离进行计算,二者分别采用自由空间模型和多路径衰减模型,式(1)为发送数据消耗的能量:

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + lE_{fs}d^2, & d < d_{init} \\ lE_{elec} + lE_{mp}d^4, & d \geq d_{init} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $d$  为发送距离;  $E_{elec}$  (nJ/bit) 为射频能耗系数;  $E_{fs}$  (pJ/(bit · m<sup>2</sup>)) 和  $E_{mp}$  (pJ/(bit · m<sup>4</sup>)) 分别表示两种信道模型下功率放大电路能耗系数;  $d_{init} = \sqrt{E_{fs}/E_{mp}}$ , 计算得出  $d_{init} \approx 87.7$  m。

式(2)为节点接收数据的能量能耗:

$$E_{RX}(l) = l \times E_{elec} \quad (2)$$

## 2 算法概述

### 2.1 网络初始化

HRPNC 中网络初始化包括层次划分、计算每层的簇首个数和计算每个节点的竞争半径几个步骤。具体规则如下。

1) 层次划分。通过分层将整个网络划分成  $s$  个层次,靠近基站的节点为第1层,即  $F = 1$ ,依次向外确定层次,  $F = 2, 3, \dots, s$ 。网络初始化后进入分层,由基站向全网节点发送广播消息,包括第1层的层宽  $d_0$  以及划分间隔  $d_{next}$ ,所有节点收到广播消息后根据接收信号的强弱计算自身到基站的距离  $D$ ,根据层次计算式(3)求出其所属的层次:

$$F = \begin{cases} 1, & D \leq d_0 \\ \lfloor (D - d_0)/d_{next} \rfloor + 1, & D > d_0 \end{cases} \quad (3)$$

对于第1层中所选出的簇首来说,簇首直接传输到基站的距离应该要小于放大功率在多路径衰减模型中的门限  $d_{init} \approx 87.7$  m。由于靠近基站需要发送较大的数据量,所以簇头数量应该较多为好,因此对于  $d_{next}$  来说应该小于  $d_0$ ,通过仿真结果可知,取  $d_0 = 140$  m,  $d_{next} = 50$  m 效果最佳。

2) 计算每层的簇首个数。整个网络已经被划分为  $s$  层,每层的节点个数为  $N_k$  ( $k = 1, 2, \dots, s$ );  $p$  为节点当选为簇首的概率,根据文献[9]中分析的最优簇首概率,取  $p = 0.05$ 。由式(4)可算出每层的簇首个数为  $m_k$ :

$$m_k = p \times N_k \quad (4)$$

3) 计算每个节点的竞争半径。在 HRPNC 中簇形成阶段采用簇首竞争算法,依据局部范围内是否存在竞争的簇首进行分析,因此竞争半径的选取十分关键。竞争半径的确定分为两个阶段。

首先,根据每层的面积  $A_k$ ,求得每层的基准竞争半径  $\bar{R}_k$ ,基准竞争半径的计算如式(5)所示:

$$\bar{R}_k = \sqrt{A_k / (m_k \pi)} \quad (5)$$

然后,再根据基准竞争半径计算出每个节点的竞争半径  $R_{id} (id = 1, 2, \dots, n)$ ,如式(6)~(7),其中:  $r_i$  为当前节点到基站的距离,  $r_{\max}$  与  $r_{\min}$  分别是当前的层次到基站的最近与最远的距离。文献[7]中没有对竞争半径进行限制,导致离基站越远的节点竞争半径越大,因此这并不适用于大规模的无线传感器网络。对每层选取基准竞争半径,通过仿真可知通过  $\ln \sqrt{C}$  对基准半径进行微调,控制其竞争半径在  $0.75 \bar{R}_k$  与  $1.25 \bar{R}_k$  之间,取  $K_1 = 0.5, K_2 = 2$ ,求出每个节点合理的竞争半径。

$$C = 2(r_i - r_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min}) \quad (6)$$

$$R_{id} = \begin{cases} (\ln \sqrt{C} + 1) \bar{R}_s, & K_1 < C < K_2 \\ (\ln \sqrt{K_1} + 1) \bar{R}_s, & K_1 \geq C \\ (\ln \sqrt{K_2} + 1) \bar{R}_s, & C \geq K_2 \end{cases} \quad (7)$$

## 2.2 成簇算法

在 HRPNC 中成簇算法包括簇首选举、节点入簇和簇首轮换几个步骤。具体规则如下。

1) 簇首选举。在 HRPNC 中簇首选举采用类似 LEACH 协议的算法,每个节点根据式(8)计算出自己的选举门限  $T(n)$ ,并随机选举,成为候选簇首,比较自身收到的本层其他簇首的广播消息,并计算是否在其竞争半径范围内,如果都不在本层其他簇首的竞争半径范围内,则成为簇首,并以固定功率广播自己,等待节点入簇。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (8)$$

2) 节点入簇。节点依据接收的簇首节点的信号强弱来选择信号最强的一个,由于簇首是以固定功率广播,正常情况下,接收信号强的,距离就短,通信能耗低;接收信号弱的,距离就长,通信能耗高,并没有要求某一层的节点必须连接到这一层的簇首,而是完全根据接收信号的强弱来判断加入簇首,最大限度地节约节点的通信能量。节点入簇连接如图1所示,图中  $n$  为节点 ID,CHA 与 CHB 分别表示在  $K-1$  层与  $K$  层的簇首节点,节点  $n$  并没有选择加入本层的簇首 CHB,而是选择加入离自己比较近的  $K-1$  层的簇首 CHA 中。



图1 节点入簇的连接

3) 簇首轮换。因为簇首不仅要负责发送数据给基站,还要融合簇内节点发送的数据,所以能量消耗较快,在 LEACH 协议中,为了平衡节点的负载,需要每轮重新选举簇首,这样消耗了多余的能量。为了避免频繁地选举簇首,在本协议中

并不是每轮都重新选举簇首,而是当簇首能量小于本簇内平均能量时,由簇首指定簇内剩余能量最大的节点为代理簇首节点,完成簇首的工作。由基站记录循环轮数,当循环到一定轮数  $L$  时,才按照改进的协议重新执行算法。

## 2.3 簇间多跳路由

HRPNC 采用簇内单跳和簇间多跳的方式进行数据传输。每个簇首需要从邻居簇首中选择一个作为其中继节点,转发至基站。与 PEGASIS 协议不同,本协议簇间通信不进行数据融合,只转发接收到簇首数据的完整数据包。

HRPNC 的簇间多跳路由由建立采用文献[7]中的贪婪算法建立最小代价函数来建立簇间多跳路由。簇首  $s_i$  运用贪婪算法在其邻居簇首中选择中继节点  $RN_i$ ,中继节点  $RN_i$  在所有候选节点中具有最小代价函数,代价函数定义如下:

$$\text{cost}(i, j) = \begin{cases} a \frac{\bar{E}_{\text{neighbor}}(s_i)}{E_{\text{current}}(s_j)} + b \frac{N_{\text{non-CH}}(s_j)}{N_{\text{non-CH}}(s_i)} + c \frac{d_{s_i \rightarrow j}^2 + d_{j \rightarrow \text{BS}}^2}{d_{s_i \rightarrow \text{BS}}}, & i \neq j \\ a \frac{\bar{E}_{\text{neighbor}}(s_i)}{E_{\text{current}}(s_j)} + b \frac{N_{\text{non-CH}}(s_j)}{N_{\text{non-CH}}(s_i)}, & i = j \text{ 且 } d_{s_i \rightarrow \text{BS}} \leq d_{\text{init}} \\ + \infty, & i = j \text{ 且 } d_{s_i \rightarrow \text{BS}} > d_{\text{init}} \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\bar{E}_{\text{neighbor}}(s_i)$  表示簇首  $s_i$  的邻居簇首剩余能量均值;  $E_{\text{current}}(s_j)$  表示簇首  $s_j$  的剩余能量;  $N_{\text{non-CH}}(s_j)$  表示簇首  $s_j$  的成员节点数;  $N_{\text{non-CH}}(s_i)$  表示簇首  $s_i$  的邻居簇首成员节点数量均值;  $d_{s_i \rightarrow j}$  表示簇首  $s_i$  到簇首  $s_j$  的距离;  $d_{j \rightarrow \text{BS}}$  表示簇首  $s_j$  到基站的距离;  $d_{\text{init}}$  为簇首到基站距离的临界值;  $a, b, c$  为加权系数,且满足  $a + b + c = 1$ ,因此,  $\text{cost}(RN_i) = \min \{ \text{cost}(i, j) \}$ 。若是簇首  $s_i$  的中继节点是自身,则直接发送数据到基站;否则,簇首  $s_i$  发送数据到中继簇首节点,一旦每个簇首节点都找到中继节点,则簇间多跳路由建立。

## 3 仿真结果分析

实验仿真采用 Matlab 进行仿真,首先,对 HRPNC 算法分层算法与竞争半径中的  $K_1$  与  $K_2$  的取值进行可行性分析。然后,再将改进算法同 LEACH 协议与 DEBUC 协议进行性能比较,从节点的存活个数、节点的平均剩余能量、整个网络的数据传输量及数据传输的丢包率 4 个方面进行考虑,评估改进算法的性能。最后,通过与 DEBUC 协议的时效性对比,评估改进算法的效率。

### 3.1 仿真环境

仿真能量模型参照文献[6],由于本文主要针对大规模的无线传感器存在的问题,因此选定网络区域为  $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ ,并且有 400 个节点随机均匀地分布在此区域内,基站节点在区域外的一固定位置  $(450, 200)$ 。广播消息包为 200 bit;数据融合的能耗为  $E_{\text{DA}} = 5 \text{ nJ/bit}$ ;  $d_{\text{init}} = 87.7 \text{ m}$ ,具体参数设定如表1所示。

LEACH 协议中,簇首分布不均匀及簇首与基站的单跳通信是导致网络生存周期提前结束的重要原因。DEBUC 协议中采用竞争机制选举簇首并通过簇间多跳减少整个网络的能量消耗,但是该协议中对于竞争半径的算法是逐渐增大的,在大规模的无线传感网络中会导致远离基站的簇规模过大,簇内节点数量过多,簇内通信距离增加,从而数据传输时消耗了

更多的能量,导致网络生存周期提前结束。HRPNC 结合上述两个协议的优点,通过分层机制及竞争机制选取簇首的竞争半径,合理地分布簇首的位置,不仅有效地降低了能耗、延长了网络的生存周期、提高了数据传输数量,并且有效地降低了数据传输的丢包率。

表 1 实验仿真参数

参数	值	参数	值
节点初始能量	2 J	$d_0$	140 m
数据包长度	4 000 bit	$d_{next}$	50 m
广播包长度	200 bit	$p$	0.05
$E_{elec}$	50 nJ/bit	$K_1$	0.5
$E_{DA}$	5 nJ/bit	$K_2$	2
$E_{fs}$	10 pJ/(bit · m <sup>2</sup> )	$a$	0.3
$E_{mp}$	0.0130 pJ/(bit · m <sup>4</sup> )	$b$	0.3
$d_{init}$	87.7 m	$c$	0.4

3.2 算法可行性分析

HRPNC 协议中竞争半径的选取是本算法的关键步骤,求每个节点的竞争半径,以便后续算法的持续有效地运行。在此对竞争半径中对其限制的参数  $K_1$  与  $K_2$  进行分析,比较它们的取值对整个算法性能的影响。

若未限制竞争半径,节点竞争半径由式(5)中的基准竞争半径计算公式得来,这样,离基站近的簇首或者离上一层簇首节点较近的簇首都承担较大的数据传输量。为了避免它们消耗过多的能量,它们的取值应该比由式(5)中计算出的基准竞争半径小;反之,离基站远的簇首节点或者离上一层簇首节点较远的簇首节点承担较小的数据传输量,它的竞争半径的取值应该比由式(5)中计算出的基准竞争半径大,并且,逐渐远离基站的层次中,基准竞争半径逐步增大,也符合上面的分析。

若限制式(7)中的  $K_1$  过小,则距离基站近的位置或者距离上一层簇首近的位置,会造成簇首个数过多,额外地消耗了不必要的能量;反之,若限制式(7)中的  $K_2$  过大,则距离基站较远的层次中竞争半径的大小极易大于式(1)中的  $d_{init}$ ,会成倍地消耗簇内节点数据传输的能量。

由表 2 中的数据,仿真结果显示  $K_1 = 0.5, K_2 = 2$  相比  $K_1 = 0.5, K_2 = 2$  生存周期提高了 253 轮,相比  $K_1 = 0.5, K_2 = 2$  生存周期提高了 473 轮,对于固定  $K_1$  或者固定  $K_2$  生存周期也分别提高了 362 轮与 385 轮。上述分析符合仿真结果,竞争半径设计合理可行,式(7)中的  $K_1 = 0.5, K_2 = 2$  的取值对于竞争半径的限制合理可行。

表 2 竞争半径可行性分析

$K_1$	$K_2$	仿真时间/轮	$K_1$	$K_2$	仿真时间/轮
0.5	2	3 567	0.1	2	3 172
1.0	1	3 314	0.5	4	3 205
0.1	4	3 094			

由于需要对每层的基准竞争半径进行单独的计算,故分层机制十分必要,现在对分层参数  $d_0$  与  $d_{next}$  进行讨论。

由表 3 可知,当  $d_0 = 50\text{ m}, d_{next} = 140\text{ m}$  的仿真时间效果最好,比  $d_0 = 80\text{ m}, d_{next} = 180\text{ m}, d_0 = 80\text{ m}, d_{next} = 140\text{ m}$  与  $d_0 = 50\text{ m}, d_{next} = 180\text{ m}$  分别提高了 281 轮、220 轮与 202 轮。

故选取  $d_0 = 50\text{ m}, d_{next} = 140\text{ m}$  效果最佳。

表 3 层次划分可行性分析

$d_0/\text{m}$	$d_{next}/\text{m}$	仿真时间/轮	$d_0/\text{m}$	$d_{next}/\text{m}$	仿真时间/轮
50	140	3 559	80	140	3 339
80	180	3 278	50	180	3 357

3.3 算法性能分析

图 2 是 3 种路由协议在存活节点数的对比情况,从图 2 可以看出 HRPNC 改进算法的网络生存周期较 LEACH 协议与 DEBUC 协议分别提高了约 500 轮、300 轮,而且在 3 000 轮之前死亡节点约为 50 个,不仅在整体上延长了网络的生存周期,而且在网络生命周期结束之前基本保证整个无线传感器网络有相同的规模,显著地提高了网络的稳定性。

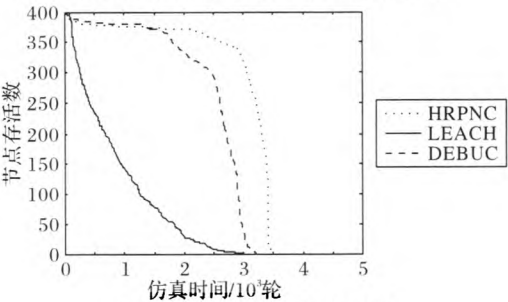


图 2 3 种协议的生命周期对比

图 3 是 3 种路由协议在平均节点剩余能量的对比情况,HRPNC 改进算法的节点平均剩余能量高于另外两个协议算法,节点能量的消耗在生存周期期间基本保持较低且平稳的能量消耗,符合图 2 中得出的显著提高网络稳定性的结论,因此 HRPNC 从整体上均衡了节点的能耗,提高了能量效率。

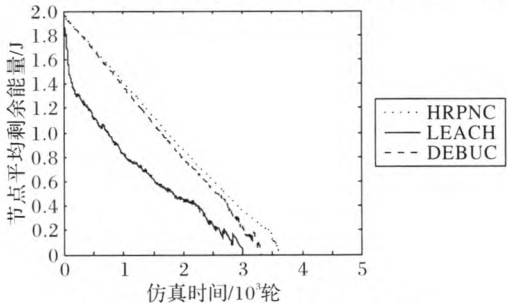


图 3 3 种协议节点平均剩余能量对比

图 4 是 3 种协议传输数据包总量的对比,从图 4 中可看出 HRPNC 改进协议的算法较 LEACH 协议与 DEBUC 协议在数据传输数据包的总量上分别提高了约 300%、130%。由于 HRPNC 传输数据时,簇间不进行融合,因此在不丢包的情况下每轮数据包传输的个数即为簇首的个数,比较图 2 中 3 种协议的生存周期对比图的存活节点数量可看出,当网络中存活节点数量减少时,当选簇首的个数减少,数据包传输的数量也随之减少,符合图 4 数据包传输量的曲线。

图 5 是 3 种协议在 3 种仿真环境下丢包率的对比情况,图 5(a)是网络区域 200 m × 200 m 范围内中有 200 个无线传感器节点;图 5(b)是网络区域 300 m × 300 m 的范围内有 300 个无线传感器节点;图 5(c)是网络区域在 400 m × 400 m 范围内中有 400 个无线传感器节点。从图 5 中可看出:HRPNC 改进协议的算法对比 LEACH 协议与 DEBUC 协议在丢包率上至少降低了约 1/8 与 1/4,而且当网络区域与节点数量不同时,HRPNC 依然能够保持着较低的丢包率。LEACH 协议的

丢包率同网络区域与节点的数量有直接的关系,网络区域越大或者节点数量越多,丢包率也越高,而 DEBUC 协议的丢包率则不够稳定,网络区域的变化也会造成丢包率的变化。

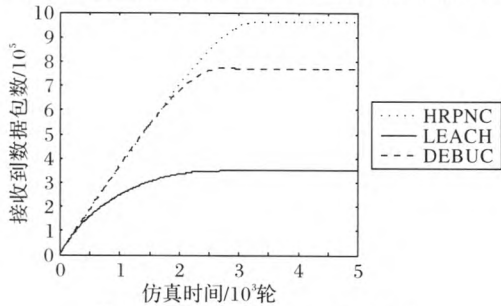


图4 3种协议传输数据包总量对比

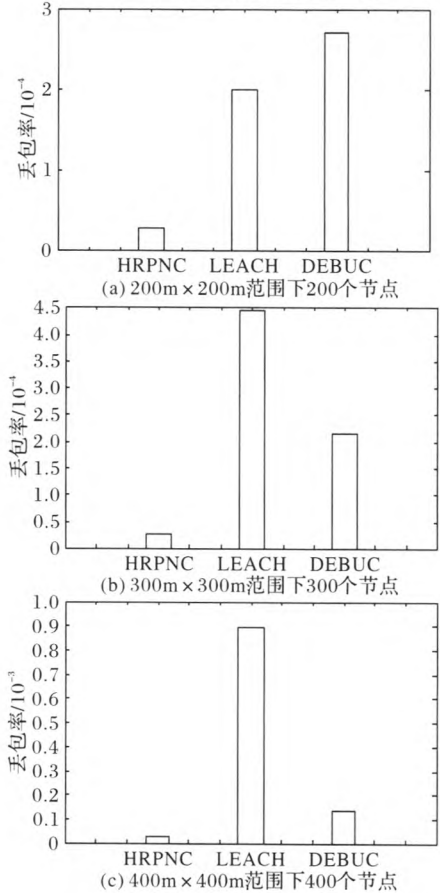


图5 3种协议丢包率对比

3.4 算法时效性分析

通过之前的一些仿真实验对本文算法的可行性与性能进行了相应的分析,但是仍未对 HRPNC 的时效性进行分析。

由表 4 计算表中 6 种情况的时效比,其中时效比为仿真时间秒数与仿真时间轮数的比值,分别为 0.096 s/轮、0.10 s/轮、0.065 s/轮、0.064 s/轮、0.040 s/轮与 0.038 s/轮。从这个比值可看出,HRPNC 算法在时效性上相比 DEBUC 算法略微有优势,特别是在大规模无线传感器网络中,而在小规模无线传感器网络中时效性上虽然比 DEBUC 有稍许差距,但相差也并不大。

4 结语

为了解决大规模无线传感器网络中,簇首分布不合理而导致节点能量消耗过快的问题,从而达到均衡无线传感器网

络节点能量消耗的作用,本文设计了一种能基于非均匀分簇的无线传感器网络分层路由协议(HRPNC)。

通过实验仿真表明了 HRPNC 算法是可行的,在性能上该协议不仅能有效地延迟网络生存周期、均衡节点的能量消耗、提高数据包的传输数量,并且能有效地降低了数据传输的丢包率;同时在时效性上相比 DEBUC 算法有略微的提高,但是。由于本文在数据融合技术上只进行简单的引用,缺乏具体的实现算法。为了使 HRPNC 具有更好的实践效果,在此基础上须在数据融合技术上进行深入的研究,从而使 HRPNC 在均衡节点能量消耗上达到更好的效果,并且还需要进一步研究无线传感器网络的广泛应用。

表 4 算法时效性分析

算法名称	网络区域/m <sup>2</sup>	节点数	仿真时间/s	仿真时间/轮
HRPNC	400 × 400	400	343	3 567
DEBUC	400 × 400	400	327	3 187
HRPNC	300 × 300	300	235	3 651
DEBUC	300 × 300	300	210	3 216
HRPNC	200 × 200	200	170	4 302
DEBUC	200 × 200	200	155	4 085

参考文献:

[1] 洪锋,褚红伟,金宗科,等.无线传感器网络应用系统最新进展综述[J].计算机研究与发展,2010,47(S2):81-87. (HONG F, CHU H W, JIN Z K, et al. Review of recent progress on wireless sensor network applications [J]. Journal of computer research and development, 2010, 47(S2): 81-87.)

[2] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Washington, D. C.: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.

[3] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems [C]// Proceedings of the 2002 Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 1125-1130.

[4] YE M, LI C, CHEN G, et al. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 24th IEEE International Performance Computing and Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 533-540.

[5] KATTIYAR V, CHAND N, GAUTAM G, et al. Improvement in LEACH protocol for large-scale wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2011 Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1070-1075.

[6] 周东鑫,金文光,容志能.基于分层的无线传感器网络多跳分簇路由算法[J].传感器技术学报,2011,24(1):73-78. (ZHOU D X, JIN W G, RONG Z N. Layer based multi-hop clustering routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2011, 24(1): 73-78.)

[7] 蒋畅江,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):1222-1232. (JIANG C J, SHI W R, TANG X L, et al. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor network [J]. Journal of software, 2012, 23(5): 1222-1232.)

[8] LEE H, LEE K, LEE H, et al. CBERP: cluster lased energy efficient



- routing protocol for wireless sensor network [C]// Proceedings of the 12th International Conference Networking, VLSI and Signal Processing. Cambridge, Eng.: University of Cambridge, 2010: 24–28.
- [9] 王开通. 无线传感器网络 LEACH 路由算法优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (WANG K T. Optimization of LEACH routing algorithm in wireless sensor networks [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)
- [10] 杨军, 张德运. 非均匀分簇的无线传感器网络数据传送机制[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 14–17. (YANG J, ZHANG D Y. A data transmission mechanism for wireless sensor networks using unequal clustering [J]. Journal of Xi'an jiaotong university, 2009, 43(4): 14–17.)
- [11] XIANG M, SHI W, JIANG C, et al. Energy efficient clustering algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor networks [J]. AEU—international journal of electronics and communications, 2010, 64(4): 289–298.
- [12] ZIN S M, ANUAR N B, KIAH M L M, et al. Routing protocol design for secure WSN: review and open research issues [J]. Journal of network and computer applications, 2014, 41: 517–530.
- [13] BILAL A, LESZEK T. Comparison by simulation of energy consumption and WSN lifetime and LEACH-SM [J]. Procedia computer science, 2014, 34: 180–187.
- [14] 李悦, 孙力娟, 王汝传, 等. 一种改进的无线传感器网络 LEACH 算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(S2): 131–134. (LI Y, SUN L J, WANG R C, et al. Improvement of LEACH algorithm in wireless sensor network [J]. Journal of computer research and development, 211, 48(S2): 131–134.)
- [15] 周玉, 景博, 杨洲. 一种基于遗传算法的无线传感器网络 LEACH 路由协议的改进算法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(S2): 175–179. (ZHOU Y, JING B, YANG Z. An improved LEACH routing protocol based on genetic algorithms for wireless sensor network [J]. Journal of computer research and development, 2010, 47(S2): 175–179.)

## Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61063040), Innovation Project of Guangxi Graduate Education (YCSZ2013068).

**HUANG Tinghui**, born in 1970, M. S., associate professor. His research interests include designing embedded systems, software of wireless sensor network, IoT for information collaborative processing.

**YI Kai**, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include software of wireless sensor network, IoT for information collaborative processing.

**CUI Gengshen**, born in 1971, M. S. candidate, associate professor. His research interests include designing embedded systems and applications, IoT, computer vision.

**WANG Yuliang**, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include distributed computing, software of wireless sensor network, IoT for information collaborative processing.

(上接第56页)

- [7] CHENG W, HÜLLERMEIER E, DEMBCZYNSKI K J. Bayes optimal multilabel classification via probabilistic classifier chains [C]// Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning. New York: ACM, 2010: 279–286.
- [8] SUCAR L E, BIELZA C, MORALES E F, et al. Multi-label classification with Bayesian network-based chain classifiers [J]. Pattern recognition letters, 2014, 41(9): 12–22.
- [9] YU Y, PEDRYCZ W, MIAO D. Multi-label classification by exploiting label correlations [J]. Expert systems with applications, 2014, 41(6): 2989–3004.
- [10] ZHANG M L, ZHOU Z H. ML-KNN: a lazy learning approach to multilabel learning [J]. Pattern recognition, 2007, 40(7): 2038–2048.
- [11] ZHANG M L, ZHOU Z H. Multilabel neural networks with applications to functional genomics and text categorization [J]. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 2006, 18(10): 1338–1351.
- [12] NAM J, KIM J, MENCIA E L, et al. Large-scale multi-label text classification-revisiting neural networks [C]// Proceedings of the 2014 European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases. Berlin: Springer, 2014: 437–452.
- [13] SCHAPIRE R E, SINGER Y. BoostText: a boosting-based system for text categorization [J]. Machine learning, 2000, 39(2): 135–168.
- [14] SPYROMITORS E, TSOUMAKES G, VLAHAVAS I. An empirical study of lazy multilabel classification algorithm [C]// SETN'08: Proceedings of the 5th Hellenic Conference on Artificial Intelligence: Theories, Models and Applications. Berlin: Springer, 2008: 401–406.
- [15] XU C, MADDAGE M C, SHAO X. Automatic music classification and summarization [J]. IEEE transactions on speech and audio processing, 2005, 13(3): 441–450.
- [16] BOUTELL M R, LUO J, SHEN X, et al. Learning multi-label scene classification [J]. Pattern recognition, 2004, 37(9): 1757–1771.
- [17] ELISSEEFF A, WESTON J. A kernel method for multi-labelled classification [C]// NIPS 2001: Proceedings of the 2001 Conference on Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 2001: 681–687.
- [18] CORREA GONCALVES E, PLASTINO A, FREITAS A A, et al. A genetic algorithm for optimizing the label ordering in multi-label classifier chains [C]// Proceedings of 2013 IEEE 25th International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 469–476.
- [19] TSOUMAKAS G, KATAKIS I, VLAHAVAS I. Mining multi-label data [M]// Data mining and knowledge discovery handbook. Berlin: Springer, 2010: 667–686.

## Background

This work is partially supported by Natural Science Foundation of Sichuan Province (14ZB0140).

**ZHANG Luoyang**, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include data mining, multi-label classification.

**MAO Jiaji**, born in 1979, Ph. D. candidate, associate professor. Her research interests include data mining, text clustering.

**LIU Bin**, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include recommender system, pattern recognition.

**WU Tao**, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include recommender system, pattern recognition.