

文章编号 1004-924X(2009)08-2053-07

# 无线传感网基于梯度的非均匀分簇

黄河清, 沈 杰, 马 奎, 姚道远, 刘海涛

(中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 无线传感网与通信重点实验室, 上海 200050)

**摘要:**针对无线传感网负载均衡问题并考虑在数据收集流量模式下节点的负载与距离数据收集节点 Sink 的跳数相关的特点,提出了一种基于梯度的非均匀分簇算法。通过构建符合实际流量模式的分簇拓扑结构,寻求网络的负载均衡,在一定程度上缓解近 Sink 的网络拥塞(“热区”)问题。分析此种数据汇集模式的数据流量特性,给出了节点至 Sink 跳数(梯度)与其负载流量的关系;从不同梯度的簇头负载与相同梯度的负载两方面着手,设计了负载均衡的非均匀分簇调整算法(WUC),依据节点自身的梯度确定分簇的规模,以多权值优化的方式成簇。仿真结果表明,网络中不同梯度的簇头流量负载标准差降低了 9 倍左右,网络的负载平衡有了显著改善。

**关键词:**无线传感网;负载均衡;梯度;分簇

**中图分类号:**TP212.9;TP393 **文献标识码:**A

## Grade-based unequal clustering for wireless sensor networks

HUANG He-qing, SHEN Jie, MA Kui, YAO Dao-yuan, LIU Hai-tao

*(Key Laboratory of Wireless Sensor Network and Communication, Institute of Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)*

**Abstract:** In consideration of the characteristics that loads of nodes and hops to Sink are interrelated in data gathering traffic model, a grade-based unequal clustering algorithm is proposed to solve the load-balancing problem of wireless sensor networks. A traffic-mode-based clustering topologic structure is built to realize the load balancing of network and to relieve the traffic congestion around Sink (“Hot Spot” problem). Based on the analysis of the data gathering traffic model, the relationship between the hops to Sink and the load of Cluster Heads(CHs) is given. Then, a grade-based load-balancing clustering algorithm for a wireless sensor network is presented, in which the cluster size is based on nodes’ grade and the cluster head selection uses multi-weight. Simulation results show that the standard deviations of CHs’ load with different grades are reduced by 9 times, so that the load balance of the wireless sensor network is improved effectively.

**Key words:** wireless sensor network; load balancing; grade; clustering

## 1 引言

通过追求无线传感网中节点的负载均衡以最大化网络生存时间,是无线传感网研究中的重要课题之一<sup>[1]</sup>。对于分簇的网络结构来说,可以分为簇头之间的负载平衡及簇头与簇成员的负载平衡两方面的问题。

由于簇头不仅负担簇内节点的调度管理、数据收集与任务分配等功能,还需要负担簇头之间的协同交互、数据转发等任务,因此分簇拓扑下的负载均衡的研究主要集中于簇头的负载处理,即考虑网络局部特性,构建分簇结构,使得簇头的选择与分布合理,簇成员的分布均匀,从而平衡簇头负载。

而在传感网的数据会聚型应用中,数据流具有明显的方向性,网络中的数据最终均汇聚至 Sink 节点,在这种流量模式下,靠近 Sink 节点的簇头的簇间流量负载就远高于网络边缘的簇头负载,可能会导致严重的网络拥塞,同时,高负载意味着高能耗,即存在所谓的“热区(Hot Spot)”,节点将过早消耗完能量而导致网络分裂,从而降低整个网络的生存时间<sup>[2]</sup>。

在这种情况下,分簇结构的建立就需要考虑到簇头节点所负担的数据流特征,即网络全局的特性,因此,本文在分析网络负载的基础上,提出一种基于梯度的非均匀分簇算法 WUC(Weight-based Unequal Clustering Algorithm),其思想是同时考虑网络全局特性(数据流模式)及网络局部特性(节点发射功率、能量、簇规模及节点度等)来构建负载均衡的分簇结构。在全局上,结合梯度路由建立过程,依据节点距离 Sink 的跳数(即:节点梯度)来控制簇头的密度,靠近 Sink 的簇头密度高,远离 Sink 的簇头密度低,以此获得较好的簇间负载平衡,同时,在局部范围内,通过考虑多种网络因素的多全权值簇头选举算法,使得梯度相同的簇具有相当的簇内负载。仿真表明,该算法对网络的流量和能量做了较好的平衡,延长了网络生存时间。

## 2 相关研究简介

负载均衡是无线传感网研究中追求网络生

命周期最大化的主要研究方向之一。研究者针对此问题已提出了一些解决方法,通过改变路由策略和网络结构<sup>[3]</sup>或者引入节点移动性<sup>[4]</sup>来达到网络的负载均衡。

早期的研究多从路由策略方面来寻求网络负载的均衡,Shah 等人<sup>[5]</sup>提出一种能量感知的多路径路由策略,在数据传输时选择高剩余能量的节点路由以平衡网络负载,Braginsky 等人<sup>[6]</sup>提出基于随机游走(Random Walk)的路由算法,通过随机化下一跳路由选择的方法来平衡网络负载,在多 Sink、查询请求多、网络事件少的情况下较为有效,其适用范围有限。

另一方面,研究者从构建层次化的网络结构方面着手来寻求负载平衡,其主要思想是基于一种或多种网络信息,力图使算法生成的簇的规模比较均匀,并通过定期轮换簇头来平衡网络负载,如 LEACH<sup>[7]</sup>、HEED<sup>[8]</sup>、WCA<sup>[9]</sup>等,其主要着重于簇内负载的均衡,对簇间均衡较少关注,因此,不能直接应用于无线传感网的数据会聚型应用中。

近年来,研究者开始利用层次型拓扑结构来寻求网络的负载均衡。

Sora 等人<sup>[10]</sup>首次提出采用非均匀分簇来平衡负载(Unequal Cluster Size, UCS),文中假设网络为两层同心圆环,如图 1 所示。

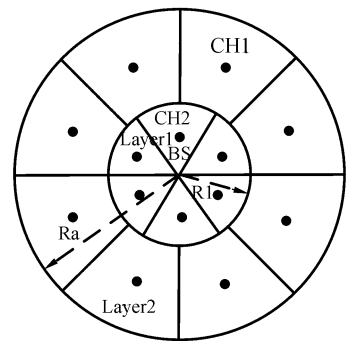


图 1 双层环状非均匀分簇结构示意图

Fig. 1 Two-tier unequal cluster structure

UCS 的主要思想是通过减少内层簇的成员数来减少簇内通信能耗,以更多地承担簇间数据转发任务,其研究的是异构网络且簇头节点位置预设,实用性较差,但是提供了解决这种不均衡问题的一个很好的思路。

Shu 等人<sup>[11]</sup>利用功率控制来构建非均匀分

簇结构,仅考虑簇间数据转发负载,越靠近 Sink 的簇头负载越高,则设置其发射功率越小,以平衡簇头能耗。其网络结构示意图如图 2 所示。

其中  $d_{\max}$  与  $d_{\min}$  表示网络中节点到 Sink 的最大距离与最小距离,  $d(s_i, BS)$  表示节点  $s_i$  到 Sink 的距离,  $c$  为预设参数,  $R_{\text{comp}}^0$  为节点的最大竞争半径。

这种算法要求知道节点的位置信息,且认为节点的竞争半径与其距 Sink 的距离成线性关系,其性能取决于参数  $c$ ,但是并未给出参数  $c$  的确定方法。

综上所述,通过调整簇规模以适应网络数据流模式、平衡不同位置的 CH 负载是受到认可的解决方法,但是,现有算法一般均要求节点位置已知,且过于理想化,难以在实际中应用。

### 3 基于梯度的非均匀分簇算法

在本节中,提出基于梯度的非均匀分簇算法,结合网络梯度路由建立过程,从网络全局考虑,依据节点的梯度设定簇头竞争半径,以获得不同密度的簇头分布,从网络局部考虑,通过多权值加权的方法充分考虑网络参数,以获得较佳的簇分布,从而实现较好的网络负载均衡。算法分析模型及具体描述如下:

#### 3.1 系统模型

设网络布设在一个半径为  $R$  的圆形区域,数据收集节点 Sink 位于圆心。节点以密度  $\rho$  均匀分布于该区域内,并以速率  $\lambda$  (bit/s) 生成数据传送至 CH, CH 间通过多跳 (Multi-hop) 方式将数据发送至 Sink。为避免非对称链路的问题,且为更加符合实际情况,令 CH 在工作中采用两种功率级别, CH 间通信时采用相同的功率级别,簇内通信时则依据成簇时的簇头竞争功率,由此则可依据 CH 至 Sink 的跳数将网络区域划分为若干个环状区域,如图 3 所示。

设单跳的平均距离为  $d$ , 网络最大跳数为  $R_a$ , 跳数为  $r$  的圆环  $S_r$  内节点承担的数据总流量为  $S_r$ , 其外区域节点产生的数据加上  $S_r$  内节点产生的数据之和为

$$L_{S_r} = \pi \rho \lambda d^2 [R_a^2 - (r-1)^2], \quad (5)$$

处于环  $S_r$  内的单个节点的平均负载为

$$\begin{aligned} \bar{L}_r &= \frac{L_{S_r}}{N_{S_r}} = \frac{\pi \rho \lambda d^2 [R_a^2 - (r-1)^2]}{\pi \rho d^2 [r^2 - (r-1)^2]} = \\ &= \frac{\lambda [R_a^2 - (r-1)^2]}{2r-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

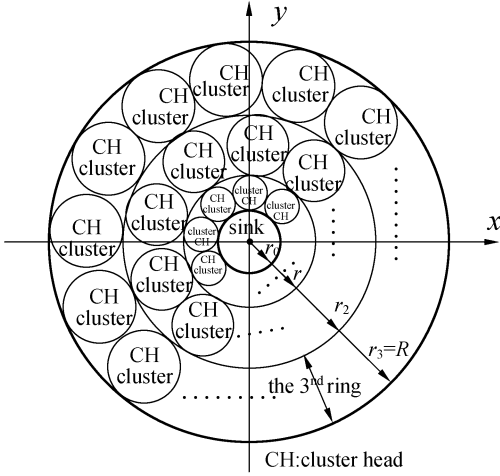


图 2 功率控制的非均匀分簇示意图

Fig. 2 Power-optimal unequal clustering

在假定节点均匀分布且簇头位于簇内中心位置的条件下,可得在第  $i$  环的 CH 的流量负载  $\lambda_i$  为:

$$\lambda_i \approx \frac{(R^2 - r_{i-1}^2)(r_i - r_{i-1})}{2r_i} \rho \lambda, \quad (1)$$

其中,  $R$  为网络半径,  $r_{i-1}$  与  $r_i$  分别是第  $i$  环的簇距 Sink 的最近与最远距离,  $\rho$  为节点分布密度,  $\lambda$  为节点的流量生成速率。

在第  $i$  环的 CH 的能耗为:

$$P_i = [e_{tr} + e_{tr} + e_{amp} \cdot (\frac{r_i - r_{i-1}}{2})^n] \cdot \lambda_i, \quad (2)$$

即为寻求  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_K)$ , 以获得

$$\begin{cases} \text{minimize}_{\{r_1, \dots, r_K\}} \{ \max \{ P_1(\mathbf{r}), \dots, P_K(\mathbf{r}) \} \} \\ r_0 < r_1 < \dots < r_K = R \end{cases}, \quad (3)$$

则问题转化为符号几何规划的优化问题。这种算法是集中式处理算法,其假设条件过于理想化,而且由于各环的发射功率不一致,生成的是单向链路,网络链路不对称,难以在实际中应用。

文献[12]中提出的算法 EEUC 对节点的分布不做要求,而是基于节点至 Sink 的距离,通过分布式的方法来调整簇头的竞争半径,从而获得非均匀的分簇结构,其竞争半径  $s_i$ ,  $R_{\text{comp}}$  的计算公式为:

$$s_i, R_{\text{comp}} = (1 - c \frac{d_{\max} - d(s_i, BS)}{d_{\max} - d_{\min}}) R_{\text{comp}}^0, \quad (4)$$

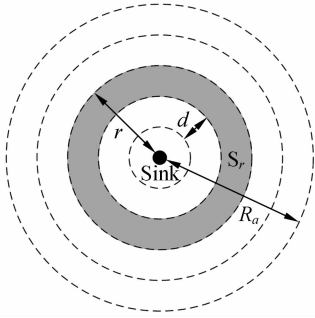


图 3 网络负载计算示意图

Fig. 3 Network load analysis

在分簇网络中,簇头除了要转发其它簇头的数  
据,还要转发自己簇内成员产生的数据,所以其  
平均负载为非分簇网络中节点平均负载乘以平均  
簇内节点数。设环  $S_r$  内的平均簇规模为  $\delta_r$ ,则环  
 $S_r$  内簇头的平均负载可以表示为

$$\overline{L_{CH,r}} = \delta_r \overline{L_r} = \frac{\lambda [R_a^2 - (r-1)^2] \delta_r}{(2r-1)}. \quad (7)$$

### 3.2 设计思路

算法结合网络梯度与分簇策略,从两方面着  
手平衡节点负载:(1)针对不同梯度节点的流量负  
载特性,在分簇算法中引入网络梯度,基于梯度来  
调整 CH 的密度,平衡网络负载;(2)对于相同梯  
度的 CH,则通过多权值的分簇算法来达到 CH  
的负载平衡。

对于不同梯度的 CH 负载,由上述分析,簇头  
的负载平衡的问题可描述为寻求  $\{\delta_i, i=1, \dots,$   
 $R_a\}$ ,使得  $\{\overline{L_{CH,r}}, r=1, 2, \dots, R_a\}$  的方差  $\sigma$  最小, $\sigma$   
的计算如下:

$$\sigma^2 = \lambda^2 \cdot \sum_{r=1}^{R_a} \left( \frac{R_a^2 - (r-1)^2}{2r-1} \cdot \delta_r - \frac{1}{R_a} \sum_{j=1}^N \frac{R_a^2 - (j-1)^2}{2j-1} \cdot \delta_j \right)^2, \quad (8)$$

令  $R_r$  为梯度为  $r$  的簇半径,则  $R_r = \sqrt{\delta_r / (\pi \rho)}$ ,依  
据获得的  $\{\delta_i, i=1, \dots, N\}$ ,可计算出相应的簇半  
径,设置相应的簇头竞争功率即可在相应梯度区  
域内获得所需的簇头分布密度。

对于相同梯度的 CH,采用基于多权值优化  
的分簇算法以获得较好的簇分布。通过综合考虑  
网络局部信息,选择局部最佳的节点作为 CH,从  
而逼近全局最优解。

在本文的网络模型中,可选取节点发射功率、  
节点能耗、节点可能的成簇规模、节点的邻居簇数

目等因素,选取适当的加权系数  $\omega_j$ ,计算出每个  
节点的最终权值,作为节点竞争簇头的依据。权  
值计算方法如下:

$$W_i = \omega_1 P_i + \omega_2 E_i + \omega_3 D_{inter,i} + \omega_4 D_{intra,i}, \quad (9)$$

其中,  $E = (E_{max} - E_{cur}) / E_{max}$ ,表示归一化的节点  
能耗;  $D_{intra} = |D_0 - \delta|$ ,表示簇内通信时节点度  $D_0$   
与预设的簇规模  $\delta$  的偏差;  $D_{inter} = |D_1 - \Delta| / \Delta$ ,  
表示簇间通信时 CH 的度  $D_1$  与预设的最佳值  $\Delta$   
的偏差。加权系数  $\omega_j$  要求满足  $\sum \omega_j = 1$ ,即必  
须是归一化的。上述因素中节点的成簇规模和邻  
居簇数对簇头的负载平衡有较大影响,故作为主  
要的参考因素,其加权系数设置较大。

### 3.3 算法步骤

(1) 汇聚节点 Sink 发起网络梯度建立过程:  
在网络初始化之后, Sink 节点以通信半径  $r$  广播  
Grade\_Construct 消息,除 Sink 外,网络中每个节  
点的初始跳数设为无穷大, Grade\_Construct 消  
息中包含泛洪序号及跳数等信息,初始跳数设置  
为 0;

(2) 网络梯度建立过程:当节点接收到 Grade  
\_Construct 消息后,首先通过泛洪序号检查是否  
收到过该消息,若未曾收到,则该节点将发送节  
点的信息加入其路由表中,并发送节点设为自己  
的上游节点,将 Grade\_Construct 消息的跳数加 1  
并将其设置为自己的跳数,然后同样以通信半径  
 $r$  将新的 Grade\_Construct 消息广播出去;若之前  
收到过该 Grade\_Construct 消息,则等待一段退  
避时间后,对所收到的 Grade\_Construct 消息的  
跳数与已保存的跳数做比较,若新收到的 Grade\_  
Construct 消息的跳数不小于当前跳数,则丢弃此  
消息,否则,若差值为 1,则将其作为另一个上游  
节点加入路由表,若差值大于 1,则发送节点成  
为其新的上游节点,并相应地更新自身跳数,并继续  
转发。在此阶段结束时,网络中每个节点均获得  
自己至 Sink 多跳数,即网络梯度值;

(3) 簇头竞争与成簇:节点依据自身梯度值,  
计算相应的簇头竞争半径  $R_r$ ,设置对应的簇头竞  
争功率,并以自己的簇头竞争功率通过分布式竞  
争方式竞争簇头。簇头竞争成功后,周期性的广  
播 Beacon 帧,用于簇内时间同步、簇成员时隙分  
配、备份 CH 节点通知等,非簇头节点持续侦听信  
道,在接受到簇头的 Beacon 帧后,置自己为“准簇  
成员(PreCM)”,向信号强度最高的簇头发送入网

申请消息 MSG\_JOIN\_REQ,簇头节点判断自身簇状况,若满员,回复入网确认消息 MSG\_JOIN\_ACK,并在下一个 Beacon 帧中为其分配时隙,否则回复拒绝消息 MSG\_JOIN\_DENY。准簇成员向邻居簇头持续发送入网申请直至成功入簇,置自身状态为“簇成员(CM)”。在节点入网前,采用基于 CSMA/CA 的 MAC 层协议,而入网后则为基于 TDMA 的混合 MAC 接入协议,遵循其簇头的时序调度。由此即可完成网络的成簇过程。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真场景设置

本文采用网络仿真软件 QualNet v4.0 搭建仿真平台,其前身为 GloMoSim,具有仿真速度快、支持的仿真规模大等特点。

设置仿真区域为半径  $R=1\ 000\text{ m}$  的四分之一圆形区域,最大跳数  $R_n=5$ ,则有  $d=200\text{ m}$ ,节点均匀分布,密度为  $1/\pi r_0^2$ (其中  $r_0=30\text{ m}$ ),Sink 节点位于场景左下角的圆心位置。在 QualNet 中,采用 802.15.4 标准的物理层设置,双径模型,理想无衰落信道;在成簇阶段采用 CSMA 的 MAC 层协议;每个节点以  $\lambda=512\text{ bit/s}$  的 Poisson 分布生成数据。

仿真中,将节点的成簇规模和邻居簇数作为影响簇头选择的主要因素,式(9)中计算节点权值的参数设为  $w_1=0.1, w_2=0.1, w_3=0.4, w_4=0.4$ 。

### 4.2 仿真结果与分析

图 4 为全网的数据流量分布。越靠近 Sink,簇头负担的数据转发任务越重,在其所有数据中所占的比重越大。

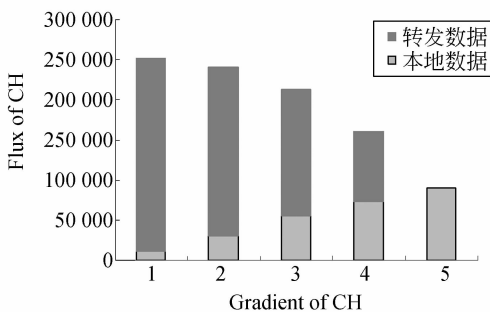


图 4 网络数据流量分布

Fig. 4 Load distribution of network

图 5 描述了算法的分簇结果及 CH 的负载状况。簇头密度随着网络梯度的增加而降低,靠近 Sink 的一跳范围内聚集了大量的簇头,从而分担了流量,使得簇头的负载比较均衡,表现为图中黑点浓度较均匀。

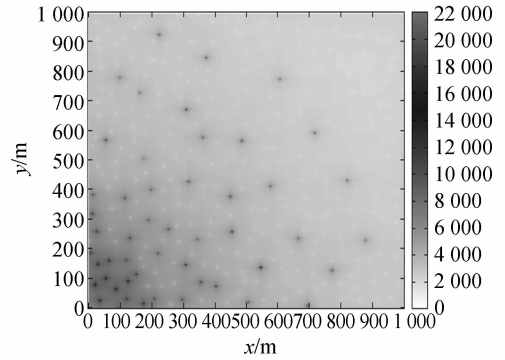


图 5 WUC 算法的分簇结果

Fig. 5 Clustering result of WUC

为研究基于梯度的非均匀分簇算法(WUC)的性能表现,以非均匀分簇算法 EEUC 及未引入梯度参数的多权值优化分簇算法(EVEN)作为对比分析对象。依据文献[12]的仿真分析结果,取 EEUC 算法的簇头竞争半径调整公式(4)的参数  $c=0.5$ 。仿真结果如图 6、7 所示。

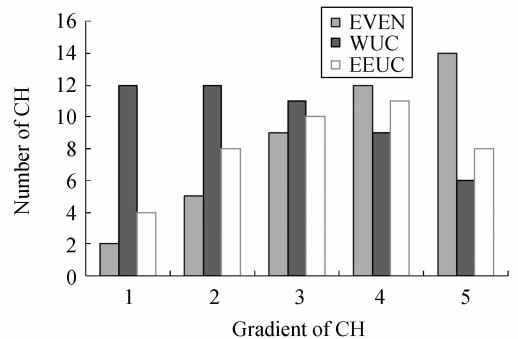


图 6 簇头数分布

Fig. 6 Distribution of CH number

由图 6 可见,在均匀分簇中(EVEN),随着簇的梯度的增加,节点数目线性增加,从而相应地令簇头的数量呈线性增长趋势,EEUC 算法则在近 Sink 处生成了较多的 CH,随着网络梯度增加,CH 竞争半径增大,生成的 CH 数有所减少,而 WUC 算法生成的 CH 数量随梯度增长呈下降

趋势,与图 4 所示的网络数据流量分布特征相符,则可得 CH 的平均负载情况如图 7 所示。

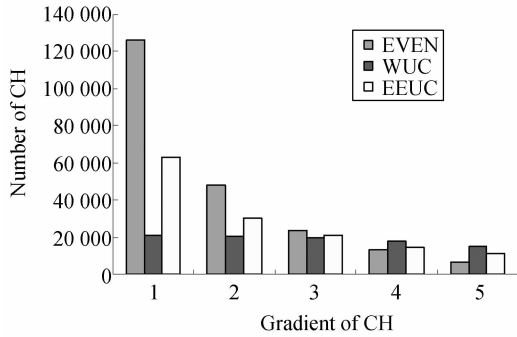


图 7 簇头的平均负载

Fig. 7 Average load of CHs

可见,相对于差异巨大的均匀分簇的 CH 负载,EEUC 算法对 CH 负载具有一定程度的改善,但由于其算法设计时并未对网络流量作深入分析,故改善有限,WUC 算法则有效地平衡了不同梯度的簇头负载。其不同梯度 CH 平均负载的标准差从均匀分布的 1.120 降低至 0.125。

为了平衡负载,除了基于梯度作簇头密度调整外,对于相同梯度的簇头来说,保持其簇规模一致以在同一梯度的节点内保持负载均衡亦是极为重要的,其负载平衡特性用负载平衡因子 LBF<sup>[8]</sup> ( $LBF = n_c / \sum_{i=1}^{n_c} (x_i - \mu)^2$ ) 来表征,其值越大则分簇均匀性越好。

WUC 算法随着梯度增加分簇的均匀性变化如图 8 所示。可见,网络中距离 Sink 在两跳之外,两种分簇结构保持稳定的 LBF 值并且值相近,这说明相同梯度的分簇的均匀性较佳,而在距 Sink 两跳内,WUC 算法的 LBF 值激增,是由于此时簇的规模很小(接近于 1),从而计算的 LBF 值较大。

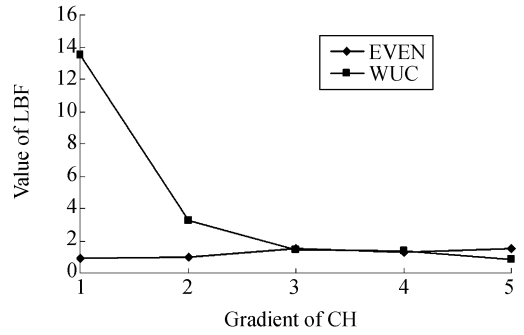


图 8 LBF 值与跳数

Fig. 8 LBF vs. Hops

从上述仿真结果可知,基于梯度的非均匀分簇算法生成的簇头的分布与网络的流量分布对应,很好地平衡了不同梯度簇头的负载,同时,相同梯度的簇具有一致的簇规模,簇头分布合理,为数据路由提供了良好的拓扑结构,能够有效地实现负载均衡,避免了网络拥塞和缓解“热区”问题。

## 5 结 论

本文在研究网络流量分布特性的基础上,提出了一种基于梯度非均匀分簇算法,将不同梯度的节点组织成不同规模的簇,越靠近 SINK 节点簇规模越小,以此来达到不同梯度的簇头的负载平衡,采用多权值分簇的方法,将相同梯度的节点组织成均匀的簇,以此平衡相同梯度的簇头负载,仿真结果表明,本算法提供了一个良好的负载平衡网络拓扑结构,在 Sink 一跳范围内的簇头负载相对于均匀分簇算法降低了 5 倍以上,相对于 EEUC 算法降低了 3 倍,负载平衡性提高显著。但是,算法是基于均匀数据产生模型,下一步,将考虑更一般的网络流量并加入数据融合等条件,对算法做进一步的分析和改进。

## 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al.. A survey on sensor networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] WAN C Y, EISENMAN S E, CAMPBELL A T, et al.. Siphon: overload traffic management using multi-radio virtual sinks [C]. *Proc. of the 3rd*

*ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, San Diego: ACM Press, 2005: 116-129.

- [3] PERILLO M, CHENG Z, HEINZELMAN W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks [C]. *Proceedings of the IEEE GLOBECOM Workshops on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, 2004: 74-79.

- [4] 马奎,黄河清,沈杰,等. 基于混合汇聚节点的无线传感器网络数据收集方法[J]. 光学精密工程, 2008,16(9):1752-1758.  
MA K, HUANG H Q, SHEN J, *et al.*. A data collection method with hybrid sinks in wireless sensor networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (9):1752-1758. (in Chinese)
- [5] SHAH R C, RABAHEY J M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks [C]. *Proc. of the 3rd IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* (WCNC), Orlando, 2002; 151-165.
- [6] BRAGINSKY D, ESTRIN D. Rumor routing algorithm for sensor networks [C]. *Proc. of the 1st workshop on sensor networks and applications*, Atlanta; ACM Press, 2002;22-31.
- [7] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]. *Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences*, Maui; IEEE Computer Society, 2000;3005-3014.
- [8] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2004,3(4):660-669.
- [9] CHATTERJEE M, DAS S K, TURGUT D. WCA: a weighted clustering algorithm for mobile Ad Hoc networks [J]. *Journal of Cluster Computing IEEE*, 2002,5(2):193-204.
- [10] SORA S, HEINZELMAN W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering [C]. *Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, 2005;8-17.
- [11] SHU T, KRUNZ M, VRUDHULA S. Power balanced coverage-time optimization for clustered wireless sensor networks [C]. *Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile ad Hoc Networking and Computing*, 2005;111-120.
- [12] LI C, YE M, CHEN G, *et al.*. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks [C]. *Proc. of Mobile Adhoc and Sensor Systems Conf.* (MASS), 2005;8-15.

#### 作者简介:



黄河清(1981—),男,江西宜春人,工学博士,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2008年于中科院上海微系统所获博士学位,主要从事无线传感网络拓扑与MAC协议研究。E-mail: sarafis.huang@gmail.com



姚道远(1982—),男,安徽安庆人,工学博士,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2009年于中科院上海微系统所获博士学位,主要从事无线传感网MAC协议研究。E-mail: yaody1982@163.com



沈杰(1980—),男,浙江湖州人,工学博士,2002年于浙江大学获得学士学位,2007年于中科院上海微系统所获博士学位,主要从事无线传感网协议研究。E-mail: sqinghe@mail.sim.ac.cn

#### 导师简介:



刘海涛(1968—),男,新疆吉昌人,博士,研究员,1998年于中国科学技术大学获博士学位,现为中科院上海微系统与信息技术研究所副所长,主要从事无线传感网与通信系统研究。E-mail: lht@mail.sim.ac.cn



马奎(1979—),男,四川成都人,工学博士,分别在2003年、2008年于中国科学技术大学获得学士及博士学位,主要从事移动无线传感网研究。E-mail: kevinmakui@gmail.com