

# 一种层次蜂窝结构的负载均衡 GAF 算法

陈祖爵, 欧阳焯龙

(江苏大学计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 针对无线传感器网络中的负载均衡问题, 在蜂窝结构 GAF 算法(GAFH)的基础上, 提出一种层次蜂窝结构的 GAF 算法(GAFHH)。GAFHH 由若干相邻蜂窝栅格内的节点组成一簇, 按照各栅格在簇中的位置进行编号。选择簇中间的栅格为活跃栅格, 根据最大剩余能量原则选择簇首, 由各簇首构建骨干网络进行通信。通过移动各簇的边界, 使活跃栅格始终位于簇的中间。仿真结果表明, GAFHH 的网络负载均衡和网络吞吐量均优于 GAFH。

**关键词:** 无线传感器网络; 负载均衡; 层次蜂窝结构; GAF 算法; 簇首

## Load Balance GAF Algorithm with Hierarchical Honeycomb Structure

CHEN Zu-jue, OUYANG Ye-long

(School of Computer Science & Telecommunications Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**【Abstract】** For the problem of load balance in Wireless Sensor Network(WSN), based on the Geographic Adaptive Fidelity of Hierarchical Structure(GAFH) algorithm, the Geographic Adaptive Fidelity of Hierarchical Honeycomb structure(GAFHH) algorithm is proposed for WSN. The nodes belong to several adjacent honeycomb grids construct a cluster in GAFHH, and each grid is unified numbered according to its position in the cluster. Selecting a middle grid as an active grid in each cluster, and adopting the principle of maximum residual energy to select a node as a cluster head in each active grid. And all cluster heads construct the backbone network of wireless sensor network is using of communicating. At the beginning of the next round, re-selecting the active grid, and moving the boundaries of each cluster to make the active grid is always in the center of the cluster. Simulation results show that the load balance and throughput of GAFHH is superior to the GAFH.

**【Key words】** Wireless Sensor Network(WSN); load balance; hierarchical honeycomb structure; Geographical Adaptive Fidelity(GAF) algorithm; cluster head

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.03.035

### 1 概述

随着微机电系统、传感器技术、通信技术的发展, 无线传感器网络已广泛应用于环境、家庭等领域<sup>[1-2]</sup>。GAF (Geographic Adaptive Fidelity)算法<sup>[3]</sup>是一种能量有效的路由算法, 该算法将监测区域划分为虚拟的正方形网格, 并让节点尽量处于关机状态以节省能量。文献[4]在 GAF 算法的基础上提出一种基于蜂窝结构模型的 GAF 算法, 相对于方格结构的 GAF 算法, 该算法可有效地提高网络的平均节点存活率, 从而延长网络的生命周期。文献[5]提出基于蜂窝结构的改进 GAF 算法。该算法提出以蜂窝结构虚拟划分单元格, 增加单元格边长, 扩大单元格面积, 将单元格重叠区域中的节点作为骨干网络的中转节点, 实现簇间的多跳通信。文献[6]在蜂窝式结构的基础上, 在路由转发时加上贪心传递算法和周界传递算法, 以此绕过一个路由空洞或者障碍物, 从而达到节省网络能量, 延长网络运行时间的目的。

本文针对无线传感器网络的负载均衡问题, 在蜂窝结构 GAF 算法(Geographic Adaptive Fidelity of Honeycomb Structure, GAFH)基础上, 提出一种层次蜂窝结构的负载均衡 GAF 算法(Geographic Adaptive Fidelity of Hierarchical Honeycomb structure, GAFHH)。

### 2 蜂窝栅格划分和簇的形成

#### 2.1 蜂窝栅格划分

如图 1 所示, 视整个监测区域为一个平面区域, 在这个

平面区域选定参考点, 建立平面直角坐标系, 以边长为  $d$  的蜂窝栅格为单位划分监测区域, 并给各蜂窝栅格进行编号, 各传感器节点  $(x, y)$  按照下面的算法, 归属到相应编号的蜂窝栅格中。

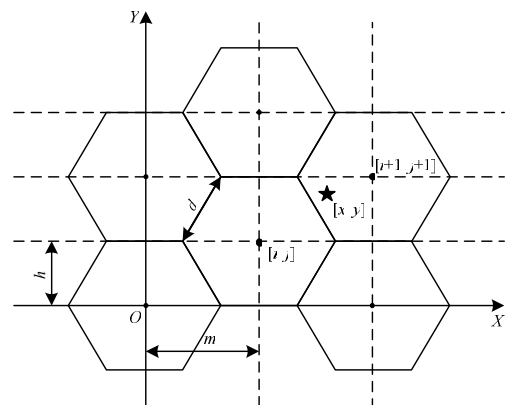


图 1 蜂窝栅格划分

#### 蜂窝栅格划分算法

$$m=3 \times (d/2);$$

$$h=\sqrt{3} \times (d/2);$$

**作者简介:** 陈祖爵(1951—), 男, 教授, 主研方向: 嵌入式系统, 无线传感器网络; 欧阳焯龙, 硕士研究生

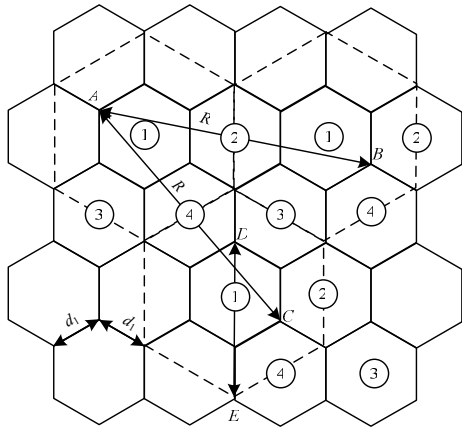
**收稿日期:** 2011-05-09 **E-mail:** oyangyelong10@163.com

```

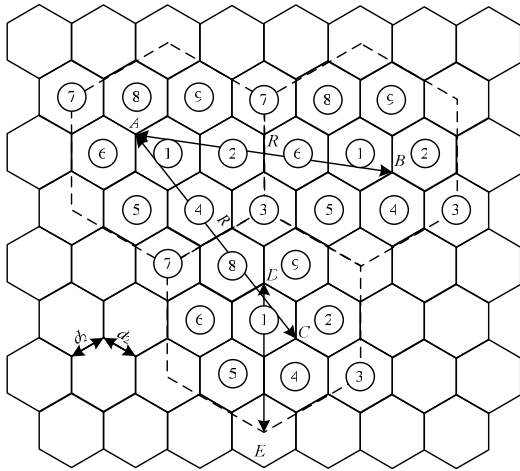
i=int(x/m);
j=int(y/h);
a=x-i×m;
b=y-j×h;
if ((i+j)%2==0) // (i+j)是偶数
    if (a^2+b^2≤(m-a)^2+(h-b)^2)
        (x,y)∈cell[i, j];
    else
        (x,y)∈cell[i+1, j+1];
else
// (i+j)是奇数
    if (a^2+(h-b)^2)≤(m-a)^2+b^2)
        (x,y)∈cell[i, j+1];
    else
        (x,y)∈cell[i+1, j];
    
```

2.2 簇的形成

GAFHH 算法把监测区域划分为许多蜂窝单元, 相邻的几个蜂窝组成一个大蜂窝(虚线蜂窝)作为一簇, 如图 2 所示。选择位于大蜂窝中间的小蜂窝栅格作为活跃栅格, 即编号为 1 的栅格。并且在各活跃栅格中, 按照“最大剩余能量原则”的簇首选择机制, 选择一个节点作为簇首。各簇中的栅格轮流成为活跃栅格。当活跃栅格改变时, 则各簇的边界(即虚线)进行移位, 使新的活跃栅格总是位于簇的中间位置。



(a)活跃栅格间隔 1 个栅格(i=1)



(b)活跃栅格间隔 2 个栅格(i=2)

图 2 层次蜂窝结构

3 GAFHH 算法的连通性及簇的覆盖范围

在 GAFHH 算法中, 必须保证相邻两簇的簇首之间及簇首与本簇的其他节点之间能够通信。所以, 各蜂窝栅格的尺

寸受到这些条件的约束。

如图 2 所示, 相邻活跃栅格之间最远的 2 点间的距离 AB 和 AC, 必须小于节点的通信半径 R; 活跃栅格与本簇内的其他栅格内的最远节点之间的距离 DE 也应该小于节点的通信半径 R。

3.1 相邻簇首间的连通性

如图 2 所示, 选择 2 个相邻活跃栅格间隔 i 个蜂窝栅格, 假定各蜂窝栅格的边长为  $d_i$ , 节点的通信半径为 R。为保证相邻簇首之间的连通性, 必须满足以下条件:

$$\left(2(i+2)d_i \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right)^2 + d_i^2 \leq R^2 \quad (1)$$

解不等式(1), 得到:

$$d_i \leq \frac{R}{\sqrt{3(i+2)^2 + 1}} \quad (2)$$

因此,  $d_i$  满足式(2), 即可保证相邻簇首间的连通性。

3.2 簇首与簇内节点间的连通性

簇首可能在活跃单元的任意一处, 因此, 活跃栅格的边界与簇的边界间的最大距离也必须小于节点的通信半径 R。蜂窝边长  $d_i$  必须满足以下条件:

$$(i+2)d_i \leq R \quad (3)$$

解不等式(3), 得到:

$$d_i \leq \frac{R}{i+2} \quad (4)$$

综合不等式(2)和不等式(4), 解得:

$$\begin{cases} d_i \leq \frac{R}{\sqrt{3(i+2)^2 + 1}} \\ d_i \leq \frac{R}{i+2} \end{cases} \Rightarrow d_i \leq \frac{R}{\sqrt{3(i+2)^2 + 1}} \quad (5)$$

式(5)和式(2)同解, 由此可知, GAFHH 算法的连通性, 只要满足相邻簇首间的连通性要求, 则簇首与簇内节点间的连通性必然满足要求。

3.3 簇的覆盖区域

如图 2 所示, GAFHH 算法把监测区域划分为许多蜂窝单元, 其相邻的几个蜂窝组成一个大蜂窝(虚线蜂窝)作为一簇。各蜂窝栅格的面积  $S_{cell}$  为:

$$S_{cell(i)} \leq 3d_i^2 \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2(3(i+2)^2 + 1)} \quad (6)$$

各簇覆盖  $(i+1)^2 - 2$  个完整栅格和 6 个 1/3 栅格, 因为一个簇中总共覆盖  $(i+1)^2$  个栅格, 所以整个簇的面积为:

$$S_{cluster(i)} = (i+1)^2 S_{cell(i)} = \frac{3\sqrt{3}R^2(i+1)^2}{2(3(i+2)^2 + 1)} \quad (7)$$

4 活跃栅格的循环机制

为了均衡节点负载, GAFHH 算法中的各栅格轮流成为活跃单元。如图 2 所示, 栅格中的编号代表各栅格成为活跃单元的顺序。为了保证相邻簇首间的连通性及活跃栅格布置的均匀性, 在各簇中相应编号的栅格必须同时成为活跃单元。为了减少位置误差与时钟误差, 新的活跃栅格要选择与前面活跃栅格的邻居栅格。除此之外, 簇的边界必须随着活跃单元的改变而移位, 使活跃栅格总是位于簇的中间位置。

5 GAFHH 仿真测试与分析

5.1 仿真平台构建

本文实验在网络仿真软件 NS2 下进行, 实验参数设计如表 1 所示。

表1 实验参数名称及参数值

参数名	参数值	参数名	参数值
仿真区域/m	320×320	接收数据能耗/W	5.22×10 <sup>-2</sup>
Sink 节点个数	1	监听能耗/W	6×10 <sup>-5</sup>
Sink 节点能量	∞	睡眠能耗/W	3×10 <sup>-6</sup>
路由节点初始能量/mJ	5	发送数据大小/Byte	80
路由节点个数	500	$\epsilon_{ts}/(\text{pJ}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^2)$	10
源节点个数	12	$E_{elec}/(\text{nJ}\cdot\text{bit}^{-1})$	50
源节点能量	∞	$\epsilon_{amp}/(\text{pJ}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^4)$	0.001 3
发送数据能耗/W	5.91×10 <sup>-2</sup>		

考虑到本文实验用蜂窝栅格对实验区域进行簇划分，实验区域边界处的栅格并非完整的蜂窝栅格，形成的簇较小，所以，把 12 个源节点均匀分布在边界处，Sink 节点放置在实验区域中央，如图 3 所示。路由节点均匀分布在实验区域。

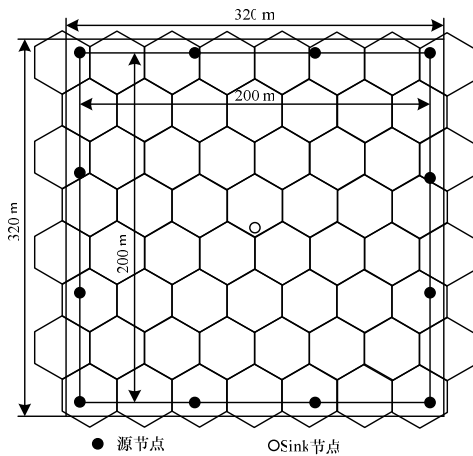


图3 源节点和 Sink 节点分布

5.2 网络负载均衡测试与分析

网络负载均衡由负载平衡因子(LBF)度量：

$$L_{LBF} = \frac{ch\_num}{\sum_{i=1}^{ch\_num} (x_i - u)^2} \tag{8}$$

其中，ch\_num 为本轮产生的簇首数目； $x_i$  为簇首节点  $i$  的成员节点数目； $u$  为本轮簇首的平均成员节点数目。由式(8)可知，LBF 的值越大，网络负载均衡程度越好。

在 5.1 节所述的场景下，分别对 GAFH、GAFHH( $i=1$ )和 GAFHH( $i=2$ )进行仿真，随机选择其中的 10 轮，计算它们的 LBF 值，比较结果如图 4 所示。

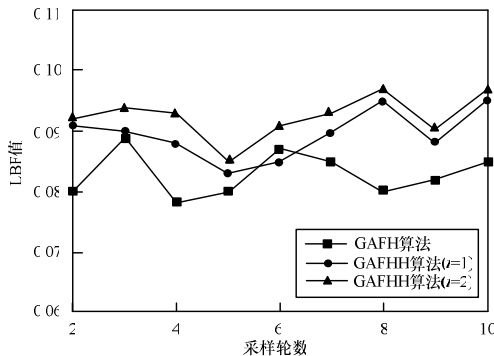


图4 网络负载均衡

在抽取的 10 轮中，这 3 种算法的负载平衡因子都在波动，而且有时波动较大。这是因为 GAFH 算法每轮都要重新

对监测区域进行蜂窝栅格的划分；而 GAFHH( $i=1$ )和 GAFHH( $i=2$ )算法在每一轮中要选择新的蜂窝栅格作为活跃栅格，并移动簇的边界，使新的活跃栅格处于该簇的中央位置，并在活跃栅格内按“最大剩余能量原则”选择簇首。这些因素会影响这 3 种算法在每轮中的簇首数目、各簇的成员节点数目和本轮簇首的平均成员节点数目。所以，这 3 种算法在各轮中，其负载平衡因子都会波动。

由图 4 可知，GAFH、GAFHH( $i=1$ )和 GAFHH( $i=2$ )的负载平衡因子分别集中在 0.075~0.085、0.085~0.09、0.09~0.095 之间，根据推理可知，这 3 种算法的负载均衡性： $L_{LBF\text{GAFH}} < L_{LBF\text{GAFHH}(i=1)} < L_{LBF\text{GAFHH}(i=2)}$ 。因为 GAFH 算法每轮都要进行栅格划分建模，并且簇首的选择是随机的，所以相邻的 2 个栅格中选择的簇首可能相隔很远，发送数据的簇首能耗很大，导致该节点较早失效。而 GAFHH 算法一旦对区域进行蜂窝栅格划分，之后就不用再划分了，节省了栅格划分建模的能耗；在各轮中选择相应编号的栅格作为活跃栅格并移动各簇的边界，使各活跃栅格位于各簇的中间，并在活跃栅格中按照“最大剩余能量原则”选择簇首。簇首集中在簇的中间并且剩余能量较高的位置。因此，GAFHH 算法的负载均衡性比 GAFH 算法好； $L_{LBF\text{GAFHH}(i=1)} < L_{LBF\text{GAFHH}(i=2)}$  是因为在  $i=2$  的簇首的分布情况比  $i=1$  的情况下更均匀(如图 2 所示)，所以负载均衡性更好。

5.3 网络吞吐量测试与分析

从图 5 可以看出，在经过若干轮的数据传输后，Sink 节点接收到的数据量开始减少，最后趋于水平。这是由于网络系统在生命后期，存活的节点数目越来越少，能够成功发送到 Sink 节点的数据也越少。在图 5 中，GAFH、GAFHH( $i=1$ )和 GAFHH( $i=2$ )向 Sink 节点传输的数据量依次增多，说明这 3 种算法的数据传输能力依次增强。而且 GAFHH 算法在整个网络生命周期中相对 GAFH 具有更好的数据传输速率。由上文可知，GAFH、GAFHH( $i=1$ )和 GAFHH( $i=2$ )的网络负载均衡程度依次递增，即各节点的能耗越均衡，则各节点的使用寿命越长，从而延长网络生存时间。因此，从图 5 可以推知，GAFH、GAFHH( $i=1$ )和 GAFHH( $i=2$ )的网络生存时间也依次递增。综上所述，GAFHH 算法具有较好的网络吞吐能力。

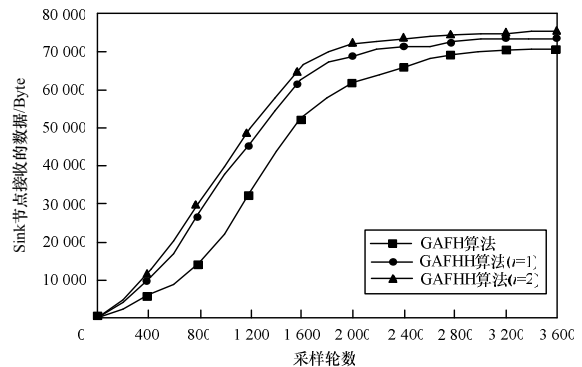


图5 网络吞吐量

6 结束语

由于平面结构的簇首个数多，而分层结构的簇首个数少，因此引入层次思想。通过移动各簇的边界，可以使各活跃单元总处于各簇的中间位置，从而使各簇首分布比较均匀，有利于均衡节点负载，提高网络性能。实验结果表明，GAFHH

(下转第 118 页)