

# 基于剩余能量等级的 MANET 分簇算法

李根<sup>1</sup>, 肖卓<sup>2</sup>, 徐松毅<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 中国人民解放军第 96764 部队, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 移动自组织网络具有自组织、动态拓扑、多跳通信和分布式控制等特点, 可应用于小型区域战场和灾后现场的通信; 然而通常由于节点能源受限, 网络生存时间短暂, 最大化利用现有资源是研究自组织网络的重要方向; 自适应分簇算法是根据监测区域和节点位置划分网格, 比较不同簇数下 LBF 值, 得到最合理的分簇结构, 选取剩余能量等级最高的节点作为簇头; 通过对 100 个节点时指定簇头、轮换簇头和自适应分簇三种算法下的网络节点生存时间和每轮节点能量的方差进行仿真, 得出自适应分簇算法将网络生存时间明显延长, 并平衡了簇头的负载。

**关键词:** 自组织网络; 自适应分簇算法; 剩余能量等级; 网络生存时间

## A Clustering Algorithm Based on Residual Energy—level in MANET

Li Gen<sup>1</sup>, Xiao Zhuo<sup>2</sup>, Xu Songyi<sup>1</sup>

(1. 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China; 2. Unit 96764, PLA, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Mobile Ad Hoc Network (MANET) has several characteristics, self-organization, dynamic topology, multi-hop communication and distributed control. And it can be applied in small area battlefields or post-disaster scenes. Because the energies of nodes usually are limited, the survival time of network is very short; it is an important direction of doing research to maximize the utilization of existing resources. According to the location of the monitoring areas and the nodes, the adaptive clustering algorithm divides the areas into several clusters. It is obtained that reasonable clustering structure based on the comparison of the LBF under different cluster numbers. By comparing with survival time of 100 nodes and energy variances in each round of three algorithms, it is concluded that the adaptive clustering algorithm obviously prolongs the network lifetime and balance the load of the cluster head than specified cluster head algorithm and cluster head rotation algorithm.

**Keywords:** Ad Hoc Network; adaptive clustering algorithm; level of residual energy; lifetime of network

## 0 引言

移动自组织网络 (Mobile Ad Hoc Network, MANET) 是一种无需依赖固有通信基础设施的网络, 它不仅能够实现快速组网, 还能够通过无线终端的相互协作实现信息传输与维护。MANET 具有自组织性、拓扑动态性、多跳通信和分布式控制等特点<sup>[1]</sup>, 实用于军事战场、地震、水灾等场合的紧急通信。MANET 研究方向主要包括方面六个方面: 定位技术、节能技术、信道接入技术、路由协议、网络体系结构和网络安全技术<sup>[2]</sup>。

MANET 的网络结构分为平面结构和分级结构, 分级结构比平面结构的可扩展性好, 路由和控制开销也相对较小, 更易于实现网络的移动性管理和局部同步<sup>[3]</sup>。目前研究的 MANET 分级结构是基于分簇实现的, 如何设计简单高效的分簇算法来减少 MANET 的路由和计算开销, 提高簇间通信效率是 MANET 研究的一个重要方向。典型分簇算法包括最小 ID 算法、最大连接度算法、最低移动性算法和加权分簇算法<sup>[4]</sup>。由于现有自组织网络设备采用手持或

者背负的携带方式, 能源通常会受到限制, 然而传统算法没有考虑能量消耗的因素。为了实现节能延长网络寿命, 节点剩余能量逐渐成为分簇算法考虑的重要因素。文献 [5] 提出了一种基于局部竞争和双权重通信能量开销的分簇算法, 有效延长网络稳定工作寿命, 提高网络节点能量使用效率。文献 [6] 分别建立能量和密度的影响因子, 并加上不同的权重, 让剩余能量多、密度大的节点当簇首, 均衡网络能耗, 有效延长网络寿命。文献 [7] 分别考虑了单跳和多跳网络, 改进了现有的分簇算法, 在均衡节点能耗的同时, 提高网络的能效和延长网络寿命。

本文主要针对手持型自组织网络的节点能源受限、快速移动以及网络变化随机性强的特点, 研究出一种基于节点剩余能量的分簇算法。根据节点位置信息进行自适应分簇, 建立节点能量等级模型选取最优簇头, 动态构造分级结构的自组织网络, 从而达到延长网络生存时间和平衡簇头负载的目的。

## 1 MANET 网络结构

MANET 拓扑结构可分为平面结构和分级结构。图 1(a) 所示的为 MANET 的平面结构, 网络中各个节点的功能和地位相等, 网络结构具有较强的健壮性。但是由于在大规模组网和节点移动性强的网络中, 平面结构网络的时

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-08-09。

基金项目: 国家自然科学基金(61671179)。

作者简介: 李根(1991-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事自组织网络方向的研究。

延长、路由维护和管理开销大, 随着网络节点数增加, 吞吐量也会急剧下降, 所以它只适用于移动性低的中小型网络。

MANET 的分簇结构如图 1 (b) 所示, 此结构是将网络中的所有节点进行分簇, 将位置比较近的几个节点, 按照某种算法合并成一个簇, 从而将整个网络分成若干个簇。在每个簇中使用簇头对簇内的节点进行集中化管理。同时处于多个簇头节点覆盖范围内的节点叫做网关节点, 或者跨簇节点<sup>[8]</sup>。分簇结构的优点是可扩展性好, 网络规模不受限制, 而且路由和控制开销较小, 易于实现移动性管理和网络的局部同步; 劣势是簇头节点消耗能量大, 容易成为网络生存的瓶颈, 而且分簇结构的安全性较差。

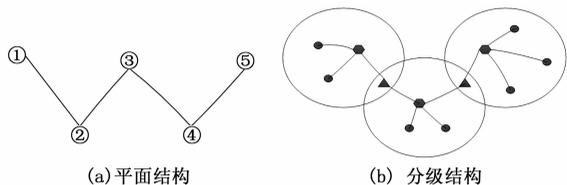


图 1 MANET 网络结构

### 1.1 簇头功能

簇头主要负责管理和维护簇结构与节点信息, 转发簇成员之间的数据<sup>[9]</sup>。簇头是每个簇的管理者, 一般用作网络的管理与调度。簇头可以预先设定, 也可以根据预设的优先级自动产生。当簇内的节点同时处于多个簇头的覆盖范围内时, 某一时刻只能属于一个簇。

### 1.2 性能评价

分簇算法的性能优劣可以从以下几个方面做出评价。

#### 1.1.1 簇个数

MANET 中的簇个数较多或者较少时, 分簇算法性能都会下降。簇个数多会增加端到端时延, 簇个数少会导致簇内平均普通节点数目增多, 吞吐量下降。

#### 1.1.2 稳定性

MANET 中节点的移动会导致簇中节点的离开与新节点的加入, 从而会引起簇结构的变化。可以通过增强簇结构的稳定性, 使分簇算法性能更好。

#### 1.1.3 负载均衡度

簇头因为要维护簇的拓扑结构, 能量消耗会远远大于簇其它节点。通过式 (1) 计算 LBF 值得到簇首的负载均衡度<sup>[10]</sup>。

$$LBF = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - u)^2} = \frac{n}{\sum_i^n (x_i - u)^2} \quad (1)$$

式中,  $n$  表示簇首的数目,  $x_i$  表示簇首节点  $i$  的成员节点数,  $u$  表示所有簇首节点的平均成员节点数,  $N$  表示网络中所有节点数目, LBF 值是  $x_i$  到  $x_n$  方差的倒数, LBF 值越大说明分簇算法的负载越均衡。

#### 1.1.4 节能能力

MANET 要充分利用现有的能源, 降低簇的能量消耗,

延长网络的生存时间。

## 2 MANET 节点能量等级模型

为实现对节点剩余能量的评估, 建立能量级别评估模型。设节点  $i$  接收数据功率为  $P_1$ , 发送数据功率为  $P_2$ ; 接收数据分组时长为  $T_1$ , 发送数据分组时长为  $T_2$ ; 接收数据分组包长为  $L_1$ , 发送数据分组包长  $L_2$ ; 数据接收速率为  $V_1$ , 数据发送速率为  $V_2$ , 则可以将节点消耗能量  $E_i$  用以下的计算公式<sup>[11]</sup>表示:

$$E_i = P_1 T_1 + P_2 T_2 = P_1 L_1 / V_1 + P_2 L_2 / V_2 \quad (2)$$

当初始能量为  $E_0$  时, 则节点的剩余能量表示为:

$$E_r = E_0 - E_i \quad (3)$$

由于簇首节点比普通节点消耗的能量要高, 因此每轮要选择剩余能量相对较高的节点担当簇头。为衡量每个节点剩余能量在子网络中所有节点能量的相对水平, 引入参数  $\lambda$  表示节点剩余能量的级别:

$$\lambda(i, t) = \frac{E(i, t)}{E_{ave}(t)} \quad (4)$$

在上式 (4) 中,  $E(i, t)$  表示  $i$  节点第  $t$  次簇头选择时的剩余能量,  $E_{ave}(t)$  表示簇内存活节点的平均能量。舍去  $\lambda < 1$  的节点, 将剩余的节点设为 4 个等级, 如表 1 所示。

表 1 剩余能量级别

$\lambda$ 的范围	级别
$1 \leq \lambda < 1.5$	一级
$1.5 \leq \lambda < 2$	二级
$2 \leq \lambda < 2.5$	三级
$2.5 \leq \lambda$	四级

## 3 MANET 分簇设计

### 3.1 自适应分簇

自适应分簇过程是将整个网络监测区域内的所有节点按照一定原则, 划分为若干个子区域, 每个子区域中的节点组成一簇。自适应分簇过程可以根据设定的子区域的节点密度范围, 不断调整每个子区域内节点规模, 实现每个簇的均匀分布, 避免部分节点的能量消耗过快。图 2 为某个监测区内节点的分布图, 当单个子区域内节点密度过大时, 可以通过细化方式组成新的簇, 如图 3 所示。

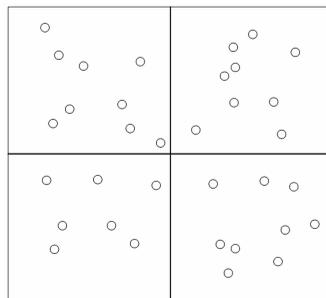


图 2 节点分布图

自适应分簇具体过程如下: 第一步将监测区域分成 4

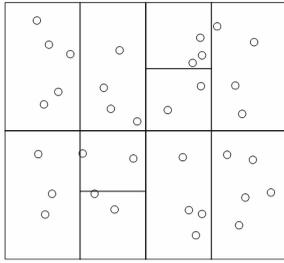


图 3 区域细化

个相等的子区域，根据每个子区域内节点数，计算出 LBF 值；第二部开始细化节点数较多的子区域，设第  $t$  轮的子区域个数为  $L_t$ ，第  $i$  个子区域内的节点数为  $N_i$ ；每轮设定子区域内的节点数上限值  $N_{max}$ ，当  $N_i \geq N_{max}$  时将该区域一分为二，按照基数轮竖向分、偶数轮横向分的顺序依次从左到右，从上向下的顺序直至所有区域满足  $N_i \leq N_{max}$ 。求出每次细化后的 LBF 值，选择最大时的分簇方法作为最终的分簇方案。

### 3.2 簇头选择

确定簇数目和各个簇的规模后，就需要进行簇头选择过程。以某个簇为例，首先根据剩余能量等级模型，计算出子区域内网络节点的剩余能量和平均剩余能量。通过比较各自的能量等级，选出具有最高等级的节点最为簇头。如果处于最高等级的节点不会是一个，需要再通过比较这些节点在子区域内到达最远节点的跳数，选取跳数最小的节点作为簇头，既可以保障网络的稳定性，同时又考虑了拓扑结构。

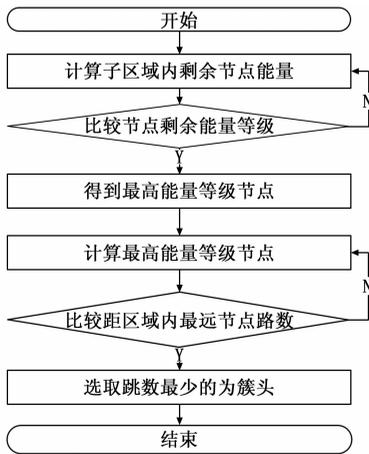


图 4 簇头选择流程图

### 3.3 簇维护

簇头选择完成后，随着网络的运行，节点能量在不断消耗，需要定期对簇头进行维护。

由于位置的移动，节点离开了原来簇头的覆盖区域进入其他簇头覆盖的区域，将重新发起簇头选择过程。如果是两个簇头节点移动到对方的覆盖区域时，具有较低能量等级的簇头将成为具有高能量簇头的节点成员。当通过对能量的计算，如果原簇头能量低于本轮最高节点剩余能量

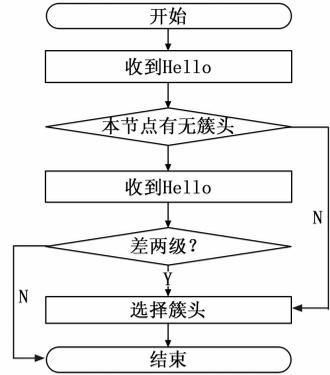


图 5 簇维护流程图

等级两级时，需要重新发起簇头选择过程。

此算法的优势为可以选择最优的簇个数，在保障簇内的吞吐量时，尽量减少端到端的时延。由于考虑了节点的剩余能量，能够避免个别节点过度消耗能量，平衡簇首节点的负载。在簇头剩余能量等级相差两级及以上时才进行簇头重选，适当避免了簇头的频繁更换，保障了网络的稳定性。

### 3.4 网关选择

当两个节点处于同一个簇时，可以通过簇头转发实现通信；属于不同簇时需要通过簇头和网关节点中继通信。网关节点选取的主要方向：保障跨簇通信时延的同时提高通信的稳定性。现有的网关选择方法包括随机算法、最大连接度算法、最小 ID 优先算法以及链路稳定优先算法等<sup>[12]</sup>，各有优势却难以避免节点移动引起的网关节点频繁更换。因此选择连接度大且运动范围较小的节点最为网关。

## 4 仿真计算与分析

Opnet 仿真工具是一种网络仿真技术软件包，能够准确的分析复杂网络的性能，在 1986 年被首次创建后很快应用于各种领域<sup>[13]</sup>。本文采用 Opnet 网络仿真工具对设计的分簇算法进行仿真，并利用 Matlab 软件对其性能进行分析。

### 4.1 分簇过程

运用 opnet 软件，设定节点数目为 40 个，实验区域设定为 10 km \* 10 km 的方形区域，将 40 个节点随机分布在目标区域，如图 6 所示。

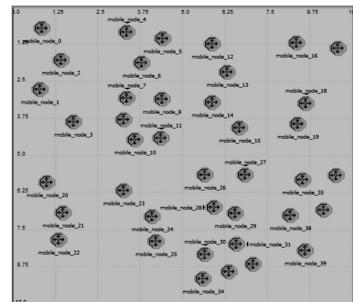


图 6 节点分布图

首先将目标区域分成四个子区域，每个区域内的节点数目分别为 12、8、6 和 14。根据自适应分簇过程，求出不

同簇数目时的 LBF 值如表 2 所示。经过比较 10 个簇时 LBF 值最大, 分簇性能最好。

表 2 不同簇数的 LBF 值

簇数	LBF
6	0.236 8
7	0.286 5
8	0.333 3
9	0.591 2
10	0.625 0
11	0.467 2

当簇个数为 10 时, 根据自适应分簇算法对目标区域的节点进行细化, 得到 40 节点的各个簇中的节点数目。

### 4.2 端到端时延

影响网络时延性能的参数包括网络的规模、网络中的簇首节点个数、簇内成员节点的传输能力与传输范围、簇首节点的传输能力和传输范围、数据包的长度与数据包的到达率、节点的干扰模型和 MAC 层协议<sup>[4]</sup>。

运用 opnet 软件对网络进行仿真, 网络中的节点分布如图 7 所示, 设置传输功率为 0.4 mW, 节点数据包发送到达符合 0.2 秒的指数分布, 数据包长度为 1024 字节, 传输速率为 1 Mbit/s。路由协议选择 AODV 协议, MAC 层协议选择 CSMA/CA 协议。图 8 为总节点数为 40 个时, 分别比较簇个数分别为 6、8、10、12 时端到端时延。由图 8 可知, 当簇头数目为 10 个时端到端时延最小, 同分簇过程得出的结果一致。

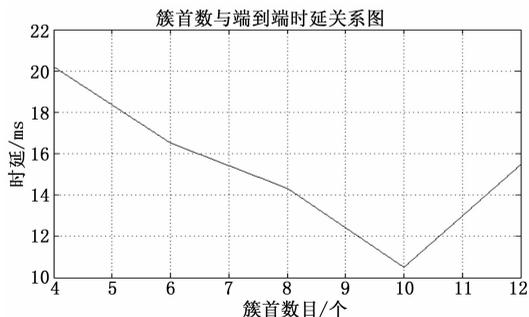


图 7 不同簇数的端到端时延

### 4.3 节点生存时间

仿真环境与参数设置如下: 设节点原始能量随机处于 0.8 到 1.0 J 之间某值, 每轮簇头消耗的能量为 0.001~0.002 J 随机数, 普通节点消耗能量为 0.0001~0.0002 J 随机数, 节点总数为 100 个。

实验一: 参加对比的三种簇头选择方式分别为指定簇头方式、能量较低时随机选择其余节点作为簇头的方式以及本文设计的基于剩余能量等级的簇头选择方式。通过比较三种方式下每轮簇头的剩余能量值, 反映出网络节点的生存时间。

由图 8 可知, 指定簇头方式在第 918 轮指定簇头就会死亡; 轮换簇头方式在第 5680 轮出现节点死亡; 基于剩余能

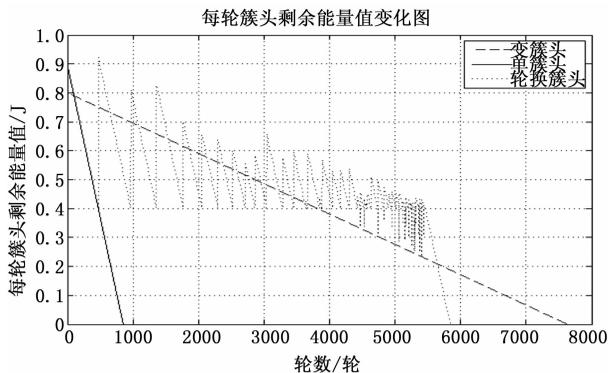


图 8 剩余能量变化图

量等级分配簇头的方式在 7640 轮才会出现有节点死亡。因此本文设计的方法对网络生存时间相比其他方法有很大延长。

实验二: 比较上述三种方式下 100 个节点, 每轮剩余能量方差变化, 可以反映出每轮节点的剩余能量消耗的整体趋向。

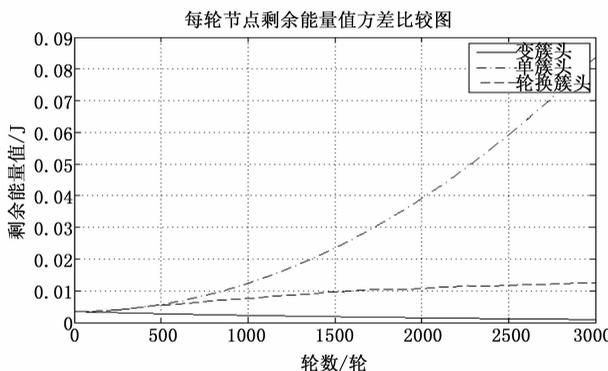


图 9 每轮节点剩余能量值方差变化

通过比较在 3000 轮过程中剩余能量值得方差变化得出, 轮换选择节点作为簇头的方式和本文设计的分簇算法都可以均衡节点的能量损耗, 达到均衡网络能量的目的, 然而本文设计自适的方法更为优越。

## 5 总结

本文提出一种自适应分簇算法, 根据节点位置划分网格, 通过计算不同簇数目下 LBF 值, 得到最合理的分簇结构。通过对指定簇头、轮换簇头和自适应分簇三种算法下的 100 个节点时网络节点生存时间和每轮节点的能量方差进行仿真, 得出自适应分簇算法可以明显将网络生存时间延长, 并平衡簇头的负载。

### 参考文献:

[1] 常来花. 无线自组网的分簇算法研究 [D]. 山东: 青岛理工大学, 2017.  
 [2] 秦 茜, 宋志群, 刘玉涛. 一种固定分配与动态竞争结合的 MAC 层协议算法 [J]. 无线电工程, 2017, 47 (2): 11-14.