

# 一种空间信息网成簇算法研究

于 耕,邵定蓉,李署坚

(北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100083)

**摘 要:** 空间信息网是一种融合陆海空天信息系统的新型网络,为适应该类网络规模不断扩大的需要,本文提出一种新型成簇算法:采用层次分析的智能决策方法选择簇首,形成非交叠、多跳的分簇网络拓扑结构;使用移动代理技术,通过征聘方式,在迁移簇首时综合考虑节点移动性和簇结构的均衡性;综合采用局部簇重构、归属切换和动态调整更新周期等手段进行簇维护.仿真结果表明该算法适用于空间信息网,提高了网络的可扩展性和稳定性.

**关键词:** 空间信息网;自组网;分簇算法;层次分析法;移动代理

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0448-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.006

## A Spatial Information Network Clustering Algorithm

YU Geng, SHAO Ding-rong, LI Shu-jian

(Institute of Electronica, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Space information networks, which have become a popular research focus, are a new type of self-organizing network constituted by information systems of land, sea, air and space. A clustering algorithm for space information networks was proposed to enhance network scalability. Analytic hierarchy process (AHP) was used to select cluster heads, and then nonoverlapping k-hop clusters could be formed. With taking node mobility and cluster equalization of space information networks into account, mobile agents were used to migrate and duplicate functions of cluster heads in a recruiting way. Dynamical maintaining mechanisms like cluster merger/partition, reaffiliation and adaptive adjustment of information update period were also designed. Simulation results show the proposed clustering algorithm is suitable for use in space information networks and it can improve network scalability.

**Key words:** space information networks; self-organizing networks; clustering algorithm; AHP; mobile agent

## 1 引言

空间信息网是由部署在不同轨道、执行不同任务的航天器、航空器以及地面通信设施构成的天空地一体化网络.由于网络规模庞大,常采用分级结构提高网络的可扩展性,成簇算法成为构建合理的分层拓扑结构,提高网络性能的关键.

现有自组织网络成簇算法从簇首选择标准方面可以分为基于节点 ID、基于节点连接度、基于链路稳定性、基于位置预测等算法;簇首产生后,生成的簇从结构上可以分为交叠的簇和非交叠的簇,  $k$ -跳簇(成员与簇首之间的距离为  $k$  跳,  $k = 2, 3, \dots$ )或 1-跳簇<sup>[1~4]</sup>;针对特定网络环境的分簇算法还包括面向单向链路的算法,面向节能要求的算法<sup>[5,6]</sup>等.现有簇维护方法大都只考虑节点加入和离开原簇的情况,较少考虑节点移动或群体移动造成的拓扑改变,通常采用发送加入、离开消息

和重新成簇进行维护,开销较大.

由此可见,分簇算法的设计目标特定于应用的需求,与网络的结构和应用特点密切相关.空间信息网具有以下不同于一般自组织网络的特点:

(1)网络拓扑的变化比较频繁,但卫星等节点运行具有周期性和可预知性.

(2)空间通信环境恶劣,资源受限.

(3)传输延时长,前向和反向链路容量不对称,链路断续且错误率高.

(4)网络中节点功能和性能差异较大.

(5)存在较多具有群体移动特性的节点.

现有分簇算法,如果直接用于空间信息网,则无法利用空间信息网的上述特性,造成不必要的开销.本文设计一种簇生成算法,采用层次分析的决策方法分配簇首,组织簇结构,根据不同区域承担的任务、环境和组网特点,灵活选择权值因素和分配权重,更客观地选出簇

首,设计基于移动代理的簇维护策略,有效减少开销,实现局部快速重构,提高资源利用率和网络性能.

2 空间信息网成簇算法

2.1 簇的建立

2.1.1 簇首的选择

簇首选取时采用层次分析法 AHP(Analytic Hierarchy Process),选举簇首的步骤如下:

(1)建立层次结构图

将选择簇首作为目标层,影响簇首选取的准则为决策层,最底层为确定簇首节点的方案层,采用剩余能量、功率水平、节点度和相对速度作为准则层参数.

(2)构造比较矩阵

定义 1 层次结构图中同一层次因素按照定性因素的量化方法确定相互间的重要程度,通过标度表达,形成的矩阵称为比较矩阵,记为  $A$ .

用两两比较法,在同层准则间构造比较矩阵,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

其中,  $a_{ij}$ 表示准则  $C_i$  相对于准则  $C_j$  的重要程度(即标度),各准则间的相对重要程度根据应用需求调整,表 1 给出了各标度的含义.

定义 2 根据比较矩阵  $A$ ,计算对于上一层某因素而言本层次与之有联系的各因素重要性次序权值,称为层次单排序.

表 1 判别矩阵中各元素的参考值

标度	含义
1	$C_i$ 与 $C_j$ 的影响相同
3	$C_i$ 比 $C_j$ 的影响稍强
5	$C_i$ 比 $C_j$ 的影响强
7	$C_i$ 比 $C_j$ 的影响明显强
9	$C_i$ 比 $C_j$ 的影响绝对强
2,4,6,8	$C_i$ 与 $C_j$ 的影响之比在上述两相邻等级之间
1,1/2, ..., 1/9	$C_i$ 与 $C_j$ 的影响之比为上面标度的倒数

层次单排序可归结为计算比较矩阵  $A$  的特征根和特征向量,使

$$AW = \lambda W \tag{1}$$

其中,  $\lambda$  为  $A$  的特征根,  $W$  是对应于  $\lambda$  的特征向量,可表示为  $W = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ .

$W$  的分量  $w_i$  是相应因素单排序归一化权值,

$$w_i = \frac{\overline{w_i}}{\sum_{i=1}^n \overline{w_i}} \tag{2}$$

其中,  $\overline{w_i} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$ ,  $\overline{w_i}$  是比较矩阵每行元素的几何平均值.

(3)层次单排序一致性检验

通过一致性指标 CR 衡量特征值偏差大小,并判断比较矩阵  $A$  是否可用,CR 的计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{3}$$

其中  $CI = \frac{\lambda - m}{m - 1}$ ,  $\lambda = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(Aw)_i}{w_i}$ ,  $m$  为  $A$  的阶;RI 为平均随机一致性指标,与  $\lambda$  的对应关系可通过查表确定,如表 2 所示.

如果  $CR = 0$ ,说明矩阵  $A$  具有完全一致性且可用;如果  $CR < 0.1$ ,认为比较矩阵  $A$  是一致的,权重向量  $w_i$  可被接受;否则,说明所构造的比较矩阵  $A$  误差较大,将影响特征值的计算,需要重新构造比较矩阵.

表 2 RI 值

$\lambda$	RI	$\lambda$	RI	$\lambda$	RI
1	0	4	0.9	7	1.32
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

(4)层次总排序

建立 4 个  $n$  维比较矩阵,其中  $n$  是待选簇首节点数,各比较矩阵记为  $B_i$ ,可表示为:

$$B_i = [b_{i1} \ b_{i2} \ \cdots \ b_{ij} \ \cdots \ b_{in}], i = 1, 2, 3, 4$$

其中  $b_{ij}$ 是第  $j$  个待选簇首节点的第  $i$  个准则要素的取值.分别计算出各矩阵  $B_i$  的特征向量  $V_i$ ,由于  $B_i$  取值为实际测量数值,因此不需要进行一致性检验.

设方案总权重矩阵为  $D$ ,则

$$D = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}^T \times W^T = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,n} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,n} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & \cdots & v_{3,n} \\ v_{4,1} & v_{4,2} & \cdots & v_{4,n} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

由此,得到待选簇首节点权值的总排序  $D_i$ ,作为选择簇首节点的重要依据.

(5)选出簇首

簇首候选节点在一跳通信范围内与其他候选节点交换信息,使用 AHP 方法选出簇首节点.约束条件设定为:簇首节点通信范围内不能有其他簇首节点.

2.1.2 簇的形成

空间信息网的拓扑可以表示为一个有向图  $G = (V, E, \varphi)$ ,它由点集  $V = \{v_1, v_2, \cdots\}$ ,边集  $E = \{e_1, e_2, \cdots\}$  和一个把每一边映射到序偶  $(vi, vj)$  上的映射  $\varphi$  组成.

定义 3 如果节点  $vi$  和  $vj$  都和边  $ek$  关联,且箭头从  $vi$  指向  $vj$ ,则称  $vi$  是  $ek$  的起点,  $vj$  是  $ek$  的终点.

定义 4 关联边起点为簇首,自身为终点的节点称为域归属求助节点,未收到任何簇首节点通告消息的

节点称为脱管节点。

簇结构的形成包括簇的初步形成、簇归属求助和脱管节点处理三部分,在假设原始网络拓扑连通的情况下,簇形成后,网络仍然是连通的,不存在没有归属的节点,所形成的簇属于多跳、非交叠簇。

### (1) 簇的初步形成

簇首广播“簇首通告”,非簇首节点根据收到“簇首通告”的能力值  $CP_A$  决定归属的簇,定义  $CP_A = L_{m,n}(t)/DL$ ,其中  $L_{m,n}(t)$  是节点与簇首间链路稳定性的预测值,其计算方法将在 2.2.1 节说明;DL 为“簇首通告”接收延时,节点将选择链路稳定性高、通信延时小的簇首作为归属。

### (2) 节点发起簇归属求助

通过“簇首通告”中的发送功率字段,节点能判断出与簇首间是否存在自指向单向链路,如果确定存在单向链路,广播“域归属求助”消息,在计时器允许的短时间内收到邻居的“域归属应答”,则采用与选择归属簇首相同的方式选择一个邻居,建立到达簇首的路由,并发送“域归属请求”,进而完成在想要加入簇的注册,等待“簇首确认”。

### (3) 脱管节点处理

没有收到任何“簇首通告”的脱管节点主动广播“脱管节点通告”,与域归属求助过程相似,等待邻居节点的回复,通过发送“域归属请求”和必要时启用域归属求助过程以建立与簇首间的双向路由。

## 2.2 簇的维护

### 2.2.1 簇首的迁移

利用移动代理技术,通过具有簇首功能代理的迁移携带簇内信息,能够减少新簇首获取簇内拓扑信息产生的开销。基本思想为:当前簇首的簇有效性小于门限值  $\beta$  时,簇首通过征聘的方式将具有簇首功能的代理迁移到本簇内簇有效性最大且大于门限值  $\beta$  的节点,则该节点成为新的簇首。

簇有效性  $C_n(t)$  定义为簇结构的稳定性和均衡性的综合考量,通过簇首与簇成员之间链路稳定性的预测值  $L_n(t)$  和关联程度方差  $G_n(t)$  来计算,  $t$  表示当前时间,则

$$C_n(t) = A \cdot L_n(t) + B \cdot G_n(t) \quad (5)$$

假设:节点在时间间隔  $T_n^i$  内速度和方向保持不变,从一个时间间隔到另一个时间间隔,速度方向随机变化,即  $T_n^i$  内节点沿  $\theta_n^i$  方向直线位移为  $V_n^i T_n^i$ 。  $T$  内的时间间隔数是一个离散随机过程  $N_n(t)$ 。使用  $\lambda_n, \mu_n, \sigma_n^2$  描述节点  $n$  的移动特征:

(1) 时间间隔同参数指数分布,参数  $\lambda_n$ ;

(2)  $\theta_n^i$  相互独立,  $[0, 2\pi)$  上均匀分布;

(3)  $V_n^i$  独立同分布,期望为  $\mu_n$ ,方差为  $\sigma_n^2$ ;

(4) 速度、方向、时间间隔互不相关;

(5) 节点间移动不相关,链路故障概率相互独立。

如图 1 所示,节点  $u$  为簇首,通信半径为  $R$ ;  $v$  是它的簇成员,处于  $u$  的  $\varphi$  方向上,相对点  $u$  向  $\theta$  角方向运动。用节点  $v$  与簇首  $u$  之间保持连通的概率表示链路的稳定性(推导过程略),连通概率为:

$$L_{m,n}(t) = P(\alpha_{m,n}(t_0 + t) = 1 | \alpha_{m,n}(t_0) = 1) \\ = P(R_{m,n}(t) < z)$$

$$= \int_0^{2R} \left( 1 - \exp\left(-\frac{z^2}{a_{m,n}}\right) \right) \frac{2}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - (z/2)^2} dz$$

其中,  $\alpha_{m,n} = \begin{cases} 0, m, n \text{ 不连通} \\ 1, m, n \text{ 连通} \end{cases}$ , 则簇内总体链路稳定性为:

$$L_n(t) = 1 - \prod_{m \in C^n} (1 - L_{m,n}(t)) \quad (6)$$

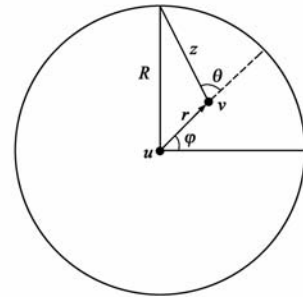


图1 基于节点间相对运动的链路稳定性预测

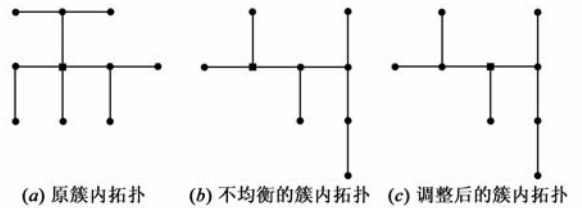


图2 依赖簇均衡程度的簇首移动

如图 2, 方形节点代表簇首, 圆形节点代表簇成员, 图 2(a) 表示原始均衡的簇结构, 图 2(b) 表示簇内拓扑发生变化导致簇的拓扑结构不均衡, 图 2(c) 表示迁移簇首位置后使簇结构保持了均衡性。用簇首与簇成员关联程度的方差衡量簇结构的均衡程度:

$$G_n(t) = D^{-1}(G_{m,n}(t)) \\ = \left( \frac{\sum_{m=1}^{|V_C^i|} G_{m,n}^2(t)}{|V_C^n|} - \left( \frac{\sum_{m=1}^{|V_C^i|} G_{m,n}(t)}{|V_C^n|} \right)^2 \right)^{-1} \quad (7)$$

其中  $G_{m,n}(t) = \frac{\omega}{H_{m,n}(t)} (R - r)$ ,  $R$  为簇首通信半径,  $r$  为簇成员到簇首的距离,  $H_{m,n}(t)$  为簇成员到簇首的跳数,  $\omega$  为调整参数,  $|V_C^n|$  表示簇  $n$  内的成员节点数, 根据式(5)可求得簇的有效性。

簇首功能移动代理迁移过程如下:

- (1) 簇首检测到簇有效性小于阈值  $\beta$ , 发征聘信息;
- (2) 簇成员收到征聘消息, 计算自身成为簇首后的簇有效性, 如果大于  $\beta$ , 返回应聘响应;
- (3) 簇首选择有效性最大者作为迁移的目标节点;
- (4) 簇成员得到簇首委任后, 发布簇首通告;
- (5) 簇首没有收到应聘响应, 放弃迁移。

### 2.2.2 归属切换

簇内节点根据邻居节点所属簇的比例决定是否进行归属簇的切换, 如果当前簇的切换指示值  $D_{\text{switch}}^i$  低于门限  $T_{\text{switch}}$ , 即触发归属域切换,  $D_{\text{switch}}^i$  的计算公式如下:

$$D_{\text{switch}}^i = \frac{|Nb_{CH_i}|}{\sum_{j=1}^{M_{CH}} |Nb_{CH_j}|} \quad (8)$$

其中,  $|Nb_{CH_i}|$  指邻居中隶属于第  $i$  号簇首的邻居数,  $M_{CH}$  为网络中簇首的个数; 门限  $T_{\text{switch}} \in [0, 1]$ , 根据对于簇稳定程度的需求选取适当的值。归属域切换被触发后, 节点选择当前切换指示值  $D_{\text{switch}}^i$  最大的簇进行切换。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 仿真环境

使用 NS2 网络模拟器, 对空间信息网成簇算法进行仿真, 并与自组网中综合考虑各项簇首选择标准的权值算法(WCA)对比分析, 仿真参数设置如下:

候选簇首数: 15, 22, 30, 38, 45, 52, 60;

其他节点数: 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20。

### 3.2 仿真结果分析

#### (1) 可扩展性

如图 3 所示, 随着网络规模的扩大, 使用成簇算法提高了成功分组投递率, 增强了网络的可扩展性, 且比基于权值的分簇算法具有更好的性能。

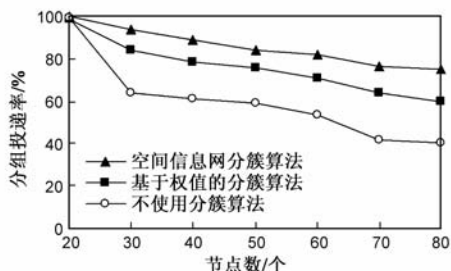


图3 不同网络规模下分组成功投递率

#### (2) 成簇开销

从图 4 中可以看到空间信息网成簇算法的开销较小, 这是由于簇维护阶段考虑到网络节点具有群组移动的特点, 使用了移动代理技术将簇首功能快速转移, 避免了由于大量节点频繁加入、离开原归属簇而产生

过多的控制消息; 同时空间信息网分簇算法考虑了拓扑可能发生的多种变化, 尽量将簇的重构控制在局部范围之内, 避免了当拓扑发生变化时进行全网重新成簇所带来的大量控制开销。

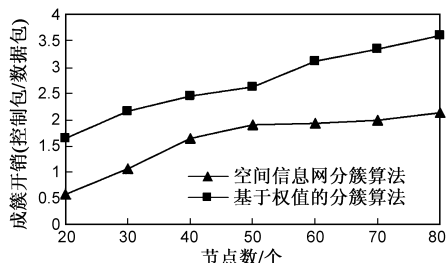


图4 成簇开销

#### (3) 簇的稳定性

如图 5, 空间信息网成簇算法基于移动代理进行维护, 且考虑了节点群组移动的特性, 因此使节点相对于具有簇首功能的移动代理归属关系改变次数相对较少, 从而提高了网络结构的稳定性。

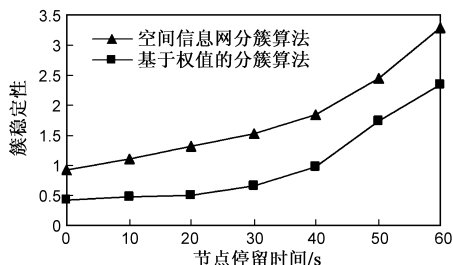


图5 簇稳定性

## 4 结论

本文结合空间信息网的组成特性和应用背景, 为其设计了一种簇生成和维护算法。采用层次分析的方法综合各种因素及需求选取簇首, 赋予了网络自组织、自适应和智能决策的能力, 比普通的权值方法更客观灵活地反映节点和网络的状态; 通过动态簇首功能代理的迁移和复制调整维护簇结构, 实现局部快速重构, 有效保证了簇结构的稳定性, 控制了分簇过程中产生的开销, 增强了网络的可扩展性, 提高了网络性能。

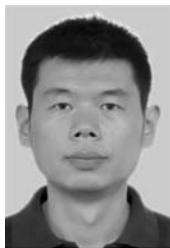
### 参考文献

- [1] Jin-Il Kim, Jeong-Young Song, Yoon-cheol Hwang. Location-based routing algorithm using clustering in the MANET[A]. Future Generation Communication and Networking[C]. Jeju Island, Korea: IEEE, 2007. 527 - 531.
- [2] Yoon-cheol Hwang, Yoon-su Jeong, Sand-ho Lee. Advanced efficiency and stability combined weight based distributed clustering algorithm in MANET[A]. Future Generation Communication and Networking[C]. Jeju Island, Korea: IEEE, 2007. 478 - 483.
- [3] Jianpan Li, Yueh Shun Li, Tung Ying Lee. A novel cluster

routing protocol with power balance in Ad hoc networks[A]. The 10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2008)[C]. Phoenix Park Gangwon-Do: IEEE, 2008. 602 – 606.

- [4] Rezaee, Mohammad Yaghmaee, Mohammad Hossien. A new clustering protocol for mobile Ad hoc networks[A]. International Symposium on Telecommunications 2008 (IST 2008) [C]. Tehran: IEEE, 2008. 376 – 381.
- [5] P Ding, J Holliday, A Celik. Distributed energy efficient hierarchical clustering for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05)[C]. Marina Del Rey, CA: IEEE, 2005. 466 – 467.
- [6] K Wang, S A Ayyash, T D C Little, P Basu. Attribute-based clustering for information dissemination in wireless sensor networks[A]. Proceeding of 2nd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 2005)[C]. Santa Clara, CA: IEEE, 2005. 498 – 509.

## 作者简介



于 耕 男, 1973 年 12 月出生于陕西, 北京航空航天大学博士学位研究生, 沈阳航空航天大学民用航空学院教授, 主要研究方向为航空移动自组织网、通用航空飞行动态监控等。

E-mail: yug@sau.edu.cn



邵定蓉 男, 1937 年 9 月生于江苏宜兴, 北京航空航天大学电子信息工程学院博士生导师, 主要研究方向为扩展频谱通信和信号处理技术。

李署坚 男, 1953 年 11 月生于湖南, 北京航空航天大学电子信息工程学院硕士研究生导师, 主要研究方向为高动态扩频/跳频通信、卫星通信、高动态卫星导航技术。