

稳定且负载均衡的移动 Ad Hoc 网络加权分簇算法^①

唐翠微

(雅安职业技术学院, 雅安 625000)

摘要: 针对移动 Ad Hoc 网络中传统加权分簇算法(WCA)的缺陷, 提出一种稳定且负载均衡的改进型 WCA(SLB-WCA). 在节点组合权值计算中, 增加了考虑节点的稳定性, 并提出一种“相对典型节点度”代替传统 WCA 中的单纯节点度因素, 同时根据各个节点的节点度制定本簇大小约束, 代替传统算法中的全局约束. SLB-WCA 能够更加合理的计算节点权值和控制簇大小, 均衡网络负载. 通过实验与传统 WCA 相比, SLB-WCA 形成的簇数目较少且具有良好的覆盖率, 提高了网络的生命周期.

关键词: 移动 Ad Hoc 网络; 加权分簇算法; 负载均衡; 网络覆盖率

Stable and Load balanced Weighted Clustered Algorithm in Ad Hoc

TANG Cui-Wei

(Ya'an Vocational and Technical College, Ya'an 625000, China)

Abstract: For the issues of the defects of traditional weighted clustering algorithm (WCA) in Mobile Ad Hoc Networks, a safe and load balanced WCA (SLB-WCA) is proposed. SLB-WCA take nodes stability into consideration of the combination weights computing of nodes, and a “relatively typical node degree” is proposed to substitute the simple node degree factors in traditional WCA. In the meantime, according to the degree of each node, SLB-WCA formulates local cluster size constraints instead of global constraints in traditional algorithm. SLB-WCA can make node weights calculation and cluster size control more reasonably, and make the network load more balanced. Compared with traditional WCA, SLB-WCA has less number of cluster heads, better network coverage, which improves the network lifetime effectively.

Key words: mobile Ad Hoc network; weighted clustering algorithm; load balancing; network coverage

移动 Ad Hoc 网络在许多领域有重要的应用, 如军事战场通信、移动教室、灾害管理、环境监测和交通控制等^[1]. 移动 Ad Hoc 网络是一组带有无线收发装置的移动节点组成的多跳临时性自治系统, 具有多跳路由、网络拓扑变化频繁等特点^[2]. Ad Hoc 网络通常采用分层分簇拓扑结构, 分簇算法的优劣直接影响 Ad Hoc 网络的各种性能. 分簇算法的目标是构造一个能够覆盖整个网络并能够均衡网络能量的簇集合^[3]. 为节约网络能量消耗, 分簇算法应简单高效, 当节点移动和拓扑变化较慢时, 网络拓扑结构应尽量保持不变. 理想情况下希望以最少的簇覆盖整个网络.

一些传统的分簇算法只考虑节点某一方面的性能来选举簇头, 不能满足最优簇头的选举. 所以, 学者们提出了多种簇头选举算法. 其中, 最高节点度分簇算法(HDCA)是一种致力于提高网络控制能量和降低簇头数目的分簇算法, 其将每个节点以白色标记, 当一个白色节点在邻居白色节点中具有最高的节点度时, 则被选举为簇头^[4]. 这种算法适合于移动性较弱且节点密度较低的网络. 加权分簇算法(Weighted Clustering Algorithm, WCA)是一种综合考虑节点多种属性的典型分簇算法, 为每个节点根据其作为簇头的合适度来分配权值^[5]. 传统 WCA 算法是一种组合加权

① 基金项目:四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(川教函[2014]156号)

收稿时间:2015-08-31;收到修改稿时间:2015-10-22

分簇算法^[6], 为每个节点分配一个组合权值(weight)来决定其作为簇头的概率, 组合权值考虑了多种因素, 包括节点移动性(mobility)、节点能量(energy)和节点度(degree). 节点组合权值计算公式为:

$$Weight = a \times mobility + b \times energy + c \times degree \quad (1)$$

其中, a、b、c 为对应各个环境因素的权值, 根据节点的组合权值来选择具有最小权值的节点作为簇头. 然而, 传统 WCA 算法中计算节点组合权值的因素较为简单, 没有和整个网络建立关联, 不能准确反映节点的能力, 且在分簇过程中, 没有很好的控制簇的大小^[7]. 针对这些问题, 本文提出一种稳定且负载均衡的改进型 WCA(Stable and Load balanced Weighted Clustered Algorithm, SLB-WCA) 方案, 提高网络的分簇性能, 增加网络的覆盖率.

1 网络模型

Ad Hoc 网络由多个节点组成, 节点之间的链路可以由一个无向图 $G=(V, E)$ 来表示, 其中 V 是节点 v_i 集合, E 是链接 e_j 集合. 在网络运行过程中 V 的基数 $|V|$ 保持不变, 但 $|E|$ 会随着链接的创建和删除而改变^[8]. 网络的分簇可以看成具有附加约束的图形分割问题, 在一些特定参数下(例如: 最小分区数量), 实现图的最优分割是一个 NP 困难问题^[9]. 簇头节点 v_i 的邻居集 $N(v_i)$ 为在节点 v_i 传输范围内的所有节点.

2 提出的SLB-WCA算法

本文提出一种稳定且负载均衡的 SLB-WCA 方案, 对传统 WCA 算法中节点组合权值的计算进行改进, 除了考虑节点移动性、节点能量和节点度, 本文 SLB-WCA 算法增加了对节点稳定性因素的考虑, 同时引入“相对典型度”改进原始的节点度因素权值计算.

2.1 节点稳定性

大多数链路稳定性模型的基本思想是直接或间接地使节点靠近. 文献[10]阐述了稳定性会随着两个端点的远离而降低, 顶点 i 和 j 之间链路 e 的稳定性, 是两个节点 v_i 和 v_j 之间的距离 d_{ij} 的一个线性函数, 因此, 一条边 e 的稳定性 $\psi(e)$ 收敛描述为:

$$\lim_{d_{ij} \rightarrow 0} \psi(e) = 1, \lim_{d_{ij} \rightarrow \infty} \psi(e) = 0 \quad (2)$$

基于式(1), 本文设定稳定性函数 $\psi(e)$ 为:

$$\psi(v_i, v_j) = \begin{cases} 1, & \text{if } v_i \text{ 和 } v_j \text{ 之间存在直接链接} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

则节点 v_i 的稳定性函数为:

$$\phi(v_i) = \sum_{i=1}^{|N(v_i)|} \psi(v_i, v_j) = deg(v_i) \quad (4)$$

上式中, $deg(v_i)$ 为节点 v_i 的节点度, 即节点的一跳邻居节点的总数. 节点 v_i 的节点度 $deg(v_i)$ 是邻居集 $N(v_i)$ 的基数, 节点 v_i 的邻居集 $N(v_i)$ 为直接与其连接的节点集合(位于其传输范围 $R(v_i)$ 内), $N(v_i)$ 表达式为:

$$N(v_i) = \{v_j, \text{ such that } dist(v_i, v_j) < R_{v_i}\} \quad (5)$$

上式中, $dist(v_i, v_j)$ 为节点 v_i 与 v_j 之间所测量出的平局距离, 节点 v_i 的节点度 $deg(v_i)$ 为:

$$deg(v_i) = |N(v_i)| \quad (6)$$

根据节点度, 设定节点 v_i 的稳定性权重 $S(v_i)$ 为:

$$S(v_i) = \ln(deg(v_i)) \quad (7)$$

稳定性与链路中端点分离距离相关, 直接链接比间接链接更稳定. 可以通过减少形成簇的数量和不同情况下隶属关系的数目来提高分簇拓扑结构的稳定性.

2.2 节点相对典型度

簇头的负载取决于它所掌控的节点数量, 簇头通过无线方式接收其簇内节点信息, 再转发给其它簇头, 通过多跳方式来实现源节点与目的节点之间的通信. 整个过程中, 为了保证数据传输的稳定性, 不希望有任何簇过载. 然而, 由于节点和簇头之间频繁的分离和连接, 所以保持系统良好的负载均衡是困难的. 本文提出一种新的分簇度约束和引入“典型度(Typical degree)”概念来改进文献[11,12]中的 WCA 算法.

2.2.1 改进分簇度约束

分簇度约束是在网络分簇过程中限制簇大小的一个参数, 其不影响节点组合权值的计算, 但对网络分簇的数量和大小具有决定性作用. 文献[11,12]设定一个簇头能够理想操控的节点数目约束为一个值 δ , 即每个簇大小的最大值为 δ , δ 为一个全局参数, 用于整个网络的分簇过程, 并计算每个节点 v_i 的度差(Degree-difference):

$$\Delta_{v_i} = |deg(v_i) - \delta| \quad (8)$$

然而文献中没有解释怎样合理选择 δ , 只是设定为一个常数, 如果没有很好的选择 δ , 将会产生很多的簇头, 导致更多的能量消耗. 由于网络分布不均匀, 每个节点的节点度都不同, 设定全局约束 δ 没有考虑

到节点差异性,显然不太合理.为克服这种低效率情况,本文提出一种本地约束,根据每个节点的节点度设定特定的约束,代替全局约束 δ .

文献[13]中假设节点均匀分布且没有边界效应,每个簇头具有相同数目的簇成员节点.其总结出,在这种典型情况下,一个典型簇头(Typical cluster head)能理想操控的节点总数,即典型节点度 $tdeg(v_i)$,应大于其邻居总数的一半.在本文中,当节点均匀分布时,设定以下不等式:

$$deg(v_i)/2 < tdeg(v_i) \leq deg(v_i) \quad (9)$$

根据式(9),我们可以推导出一个典型簇头 v_i 的典型度 $tdeg(v_i)$ 的平均值,如下式所示:

$$tdeg(v_i) = (deg(v_i) + deg(v_i)/2)/2 \quad (10)$$

$$= 3/4deg(v_i)$$

这意味着,为了使簇负载均衡,一个典型簇头应包含与其直接链接的预期邻居总数的四分之三.相反,若设定太小,可能会产生大量的簇,从而增加分层路径的长度,增加了端到端时延.因此,本文设定节点 v_i 的节点度约束值(δ)为:

$$deg(v_i)/2 < \delta \leq 3/4deg(v_i) \quad (11)$$

在本文算法中,不同的节点具有不同的约束,当一个簇的大小超过簇头的本地约束时,则会调用重新分簇过程来调整这个簇中的节点数目.

2.2.2 相对典型度

文献[11,12]中的节点度没有和网络大小($|E|$)进行比较,不能表现出全局特性.为此,本文引入了节点 v_i 的相对度(Relative degree): $rdeg(v_i)$,表达式为:

$$rdeg(v_i) = deg(v_i)/|E| \quad (12)$$

根据公式(12),本文用一种新的符号,即节点 v_i 的相对典型度(Relative typical degree): $rtdeg(v_i)$. $rtdeg(v_i)$ 表示一个典型簇头 v_i 能够理想操控的网络中(不是一个簇)节点总数,计算如下:

$$rtdeg(v_i) = tdeg(v_i)/|E| \quad (13)$$

根据公式(13)和公式(10),得到:

$$rtdeg(v_i) = tdeg(v_i)/|E| = (3/4deg(v_i))/|E|$$

$$= 3/4(deg(v_i)/|E|) = 3/4rdeg(v_i)$$

即,

$$rtdeg(v_i) = 3/4rdeg(v_i) \quad (14)$$

2.3 节点移动性和能量

移动 Ad Hoc 网络中,节点以不同的方式移动,移

动性较弱的节点比较适合作为簇头.为此,本文计算了每个节点 v_i 在时间 T 内的平均移动速度.文献[14]中给出了计算移动性的表达式 $M(v_i)$ 为:

$$M(v_i) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{(x_t - x_{t-1})^2 + (y_t - y_{t-1})^2} \quad (15)$$

上式中, (x_t, y_t) 和 (x_{t-1}, y_{t-1}) 分别是节点 v_i 在时间 t 和 $(t-1)$ 时的坐标,若 $M(v_i) = 0$ 则表示节点没有移动.

一个具有较长剩余电池寿命的节点也比较适合作为簇头.由于数据通信消耗的能量较大,且不同节点之间变化很大,所以,计算节点消耗的能量比较困难^[14].然而,可以很容易地估计节点的剩余电池能量 $remen(v_i)$,设定节点 v_i 与其相对稳定的邻居进行通信时,单位时间内所消耗的能量为 $power(v_i)$.则其剩余电池寿命可表示为^[15]:

$$Rbl(v_i) = remen(v_i)/power(v_i) \quad (16)$$

2.4 SLB-WCA 分簇算法步骤

基于上述讨论,本文提出的 SLB-WCA 算法有效地结合了上述各系统参数,且能够根据系统需要选择合适的加权因子.加权因子的灵活可变性有助于应用本文算法到各种网络中.簇头选举过程的输出是一组簇头节点,称为支配集.在系统启动时或当前支配集无法覆盖所有节点时,将调用簇头选举程序.选举算法的每次调用,并不意味着之前支配集中的所有簇头都被替换.如果一个节点从当前簇中主动脱离,且连接到另一个簇头,则相关的簇头更新它们的成员列表,不会调用选举过程.

2.4.1 簇头选举过程

簇头选举步骤如下:

步骤 1: 找出每个节点 v_i 的邻居,计算节点度 $deg(v_i)$.

步骤 2: 对每个节点 v_i ,计算它的移动性 $M(v_i)$.

步骤 3: 计算每个节点的能量水平.

步骤 4: 利用公式(7)计算每个节点的稳定性.

步骤 5: 利用公式(14)计算每个节点的相对典型度.

步骤 6: 计算每个节点 v_i 的组合权值 $W(v_i)$:

$$W(v_i) = w_1M(v_i) + w_2Rbl(v_i) \quad (17)$$

$$+ w_3S(v_i) + w_4rtdeg(v_i)$$

上式中, w_1, w_2, w_3, w_4 是各系统参数对应的加权

因子, 且 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$.

步骤 7: 选择具有最小权值 $W(v_i)$ 的节点作为簇头.

步骤 8: 从 G 中删除节点 v_i 和它的 $N(v_i)$, 避免两个簇头成为邻居.

2.4.2 簇形成阶段

构建簇是本文 SLB-WCA 算法的最后一步, 定义距离簇头最大 2 跳的节点为其邻居, 并作为簇的成员. 接下来, 每个簇头储蓄其成员的所有信息, 同时所有节点记录簇头的标识. 由于拓扑结构是动态的, 节点的位置、移动速度和移动方向都不停的变化. 在考虑负载均衡下, 通过约束 δ 来控制簇的大小, 尽量避免节点高频率的移进移出, 减小能量消耗.

3 实验及分析

3.1 实验案例

为了更好的理解本文提出的算法, 本文举了个例子, 构建一个由 15 个节点组成的网络模型, 其拓扑结构是任意, 如图 1 所示, 图 1 显示了网络中各个节点的初始位置(IDs), 虚线圆表示每个节点固定的传输范围. 在这个网络上, 分别执行 WCA 算法和本文 SLB-WCA 算法. 实验中, 各参数的加权因子设定为 $w_1 = 0.1$, $w_2 = 0.5$, $w_3 = 0.2$, $w_4 = 0.2$, 满足 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$, 通过加权因子的适当组合来调整这 4 个参数的作用.

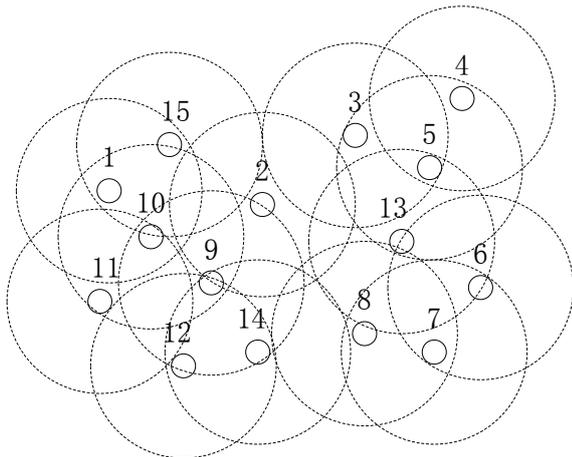


图 1 网络拓扑结构

图 2 显示了具有最小 $W(v_i)$ 的节点以分布式方式被选择作为簇头(实心节点), 两个节点之间的边表示这两个节点为直接邻居. 其中, 两个簇头不能是直接

邻居. 图 3 显示了执行 SLB-WCA 分簇算法得到的初始簇. 图 4 显示了执行 WCA 算法得到的初始簇. 很明显, SLB-WCA 算法形成簇的数量(4 个)比 WCA(8 个)的要少, 这是因为本文应用本地簇头节点度约束代替全局约束, 初始时, 簇头能量和节点度都较大, 形成的簇也较大, 从而减少了簇额数量.

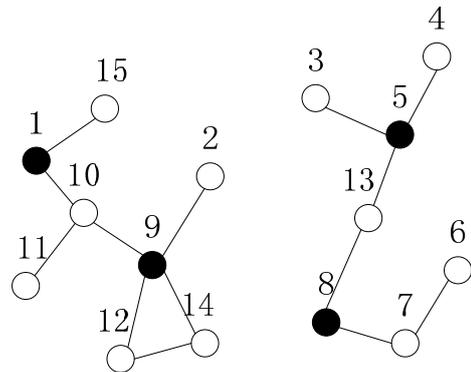


图 2 SLB-WCA 算法簇头选举阶段

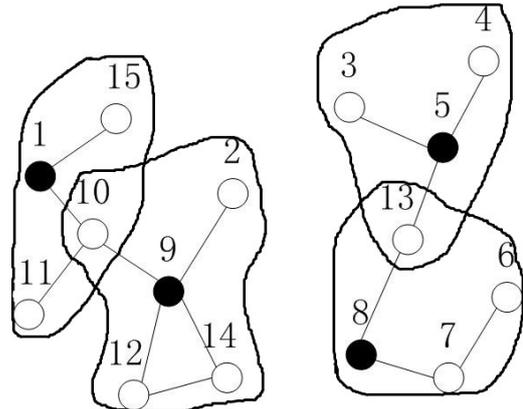


图 3 SLB-WCA 算法簇形成阶段

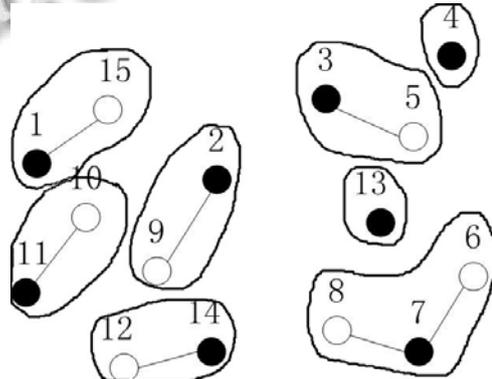


图 4 WCA 算法簇形成阶段

3.2 对比实验

利用 NS2 工具^[16]构建网络场景, 大小为 200m*200m, 30 个节点随机分布于网络中, 节点移动

速度最大为 5m/s, 运行 1000 秒, 各参数的加权因子同样设定为 $w_1 = 0.1, w_2 = 0.5, w_3 = 0.2, w_4 = 0.2$. 在网络中分别执行本文 SLB-WCA 和传统 WCA 算法, 图 5 显示了运行过程中簇头的数目, 图 6 描述了网络覆盖率.

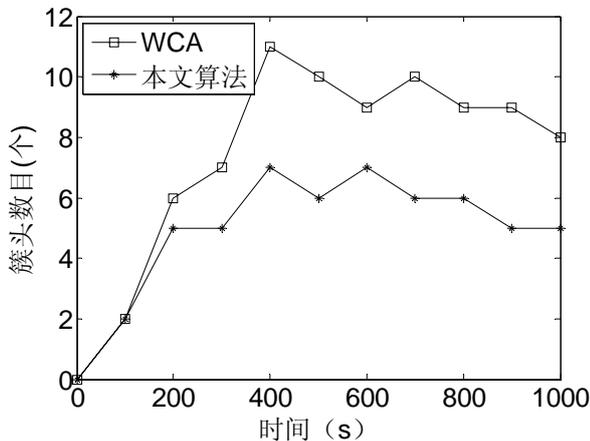


图 5 运行过程中簇头数目

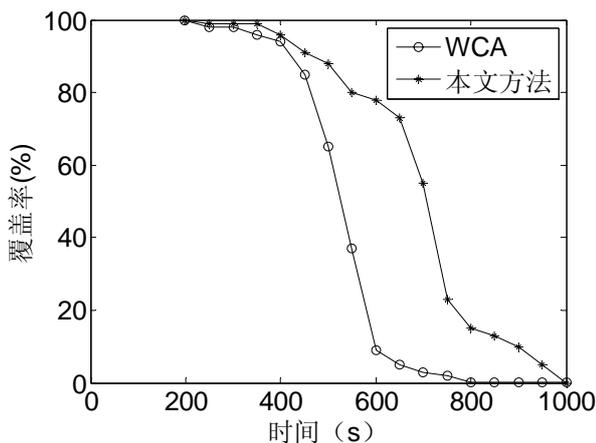


图 6 运行过程中网络覆盖率

从图 5 可以看出, 本文 SLB-WCA 算法形成的簇头数量明显小于 WCA 算法, 这是因为本文设定了本地簇头节点度约束, 根据簇头节点的综合能力决定簇的大小, 在保证负载均衡的情况下, 减少簇的数量, 节约能量消耗. 图 6 中, 200 秒后, 网络分簇结构基本形成, 在 400 秒内, 2 种算法的网络覆盖率大致相同, 400 秒后, 由于 WCA 形成的簇数量较多, 簇头的能量消耗大于普通节点, 这就使得整个网络的能量水平降低, 降低网络的覆盖率. 而本文 SLB-WCA 算法根据簇头的能力决定簇的大小, 在计算簇头组合权值时, 增加考虑了节点的稳定性, 并用相对典型节点度代替

WCA 中单纯的节点度, 使形成的簇更加稳定且能量均衡, 提高了网络的覆盖率.

4 结束语

无线移动 Ad Hoc 网络中, 由于节点的移动、故障、插入/删除导致网络的拓扑结构不断变化, 这就需要一种鲁棒性强的分簇算法. 本文提出了一种稳定且负载均衡的 SLB-WCA 分簇方案. 增加了考虑节点的稳定性, 并提出一种“相对典型节点度”来更合理的表示节点度因素, 同时根据各个节点的节点度制定本地簇大小约束, 克服 WCA 算法全局控制簇大小的缺陷. 通过仿真实验与传统 WCA 相比, 在相同场景下, SLB-WCA 形成的簇数目较少且具有更长的网络生命周期.

参考文献

- 1 方园. 基于复杂网络理论的移动自组网路由算法研究. 计算机测量与控制, 2011, 19(3): 694-696.
- 2 孙杰, 郭伟. MANET 中基于链路稳定性路由的跨层传输控制协议. 软件学报, 2011, 22(5): 1041-1052.
- 3 雷向东, 郭坤坤, 李梦甜, 等. 移动自组网中基于分簇的通用一致性协议. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(7): 2629-2635.
- 4 秦军, 付珍珍, 王小丽. 基于蚁群的 Ad Hoc 网络分簇路由算法. 计算机技术与发展, 2012, 22(1): 72-75.
- 5 Hung CC, Kulkarni S, Kuo BC. A new weighted fuzzy c-means clustering algorithm for remotely sensed image classification. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(3): 543-553.
- 6 Efi D, Chen A, Lotker Z. Fast randomized algorithm for 2-hops clustering in vehicular ad-hoc networks. Ad Hoc Networks, 2013, 11(7): 2002-2015.
- 7 杨睿, 贾小珠. 一种基于 CGSR 的 Ad Hoc 网络分簇路由协议改进. 青岛大学学报: 自然科学版, 2014, 27(4): 35-38.
- 8 邓亚平, 邓利军. 无线传感器网络的能量有效加权分簇算法. 计算机工程与设计, 2011, 32(4): 1216-1219.
- 9 杜国勇, 束永安. 基于链接率的 Ad Hoc 自适应按需加权分簇算法. 计算机技术与发展, 2014, 24(1): 93-97.
- 10 Abid MA, Belghith A. Stability routing with constrained path length for improved routability in dynamic MANETs. Personal and Ubiquitous Computing, 2011, 15(8): 799-810.

- 11 Cheng H, Cao J, Wang X, et al. Stability aware multi-metric clustering in mobile ad hoc networks with group mobility. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2009, 9(6): 759-771.
- 12 Rathika SKB, Bhavithra J. An efficient fault tolerance quality of service in wireless networks using weighted clustering algorithm. *International Journal of Research in Communication Engineering*, 2012, 4(3): 49-58.
- 13 Song L, Yuan Z, Li L, et al. Distributed clustering algorithm for cognitive radio ad hoc networks. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012: 645-652.
- 14 丁春利,朱敏,黄建,等.一种节点特征累积的自适应加权分簇算法. *四川大学学报:自然科学版*,2010,32(3):488-492.
- 15 Aissa M, Belghith A. A node quality based clustering algorithm in wireless mobile ad hoc networks. *Procedia Computer Science*, 2014, 32: 174-181.
- 16 Papakostas D, Katsaros D. A simulation-based performance evaluation of a randomized MIS-based clustering algorithm for ad hoc networks. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2014, 48(1): 1-23.

WWW.C-S-A.ORG.CN

WWW.C-S-A.ORG.CN