文章编号:1000-582X(2010)12-109-05

链路可用性的 MANET 网络分簇算法

冯文江,吴 迪
(重庆大学 通信工程学院 重庆 400044)

摘 要:针对 MANET 网络中分簇拓扑管理开展研究。为了提高网络逻辑拓扑的稳定性,对经典的 Lin-Gerla 分簇算法进行改进。改进算法充分考虑了通信系统中节点的移动性,引入了相对运动的概念,选取运动较为稳定的节点成为簇头,使得在随机方向模型下的移动网络的稳定性有所加强。针对可能出现分簇集中度过高的问题,提出了一种应用于簇维护阶段快速的簇分裂方法。最后对改进算法进行了仿真和性能分析。

关键词:分簇算法;移动自组网;链路可用性
中图分类号:TN929.5 **文献标志码**:A

A clustering algorithm based on link availability for MANET

FENG Wen-jiang, *WU Di*
(College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The cluster topology management in the MANET network is studied in. The classic Lin-Gerla clustering algorithm is improved to increase the logical topological stability. By considering the node mobility in the communication systems, the notion of relative motion is introduced, and the nodes more stable are chosen as the cluster-heads, which effectively increases the stability of mobile network with Random Direction Model. Regarding the possible high concentration, a fast cluster splitting method is proposed for cluster maintenance. The simulation and performance analysis for the improved algorithm are given.

Key words: clustering; topology management; link availability

MANET(mobile ad hoc networks)网络是一种高移动性的自组织网络,已广泛应用于犯罪跟踪、应急通信、紧急医疗服务等领域。MANET 网络具有灵活部署、快速机动等优点,也具有带宽和成员电池能量有限、拓扑变化快、可扩展性和安全性差等不足。因此,以对等网络为基础,建立一种类似于虚拟骨干网络的动态管理机制用以提升 MANET 网络的资源分配、安全认证等管理功能是解决此类问题的一个重要内容。MANET 网络的分布式管理通常采用分级分布式结构,即网络是分级的,而管理机制是分布式的,借助于节点的自组织能力来实现[1]。网络被划分成多个簇,分簇管理依赖于簇头节点(cluster head),同时,簇头节点构建的管理层除具备管理功能之外,还肩负着路由功能。目前 MANET 网络的分簇算法的研究方向大致分为基于支配集(dominating set)的分簇算法、低维护(Low-maintenance)分簇算法以及复合型权值分簇算法等[2]。其中 Lin-Gerla 分簇算法[3-4]是一种经典的低

收稿日期:2010-06-12
基金项目:国家 863 计划资助项目(2008AA01Z202);国家自然科学基金资助项目(60872038);重庆大学"211 工程"三期创新人才培养计划建设资助项目(S-09102)
作者简介:冯文江(1963-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等方向研究;(E-mail) fwj@ccee.cqu.edu.cn。

维护分簇算法。

Lin-Gerla 分簇算法对最小 ID 算法进行了修正，每一个移动节点保持唯一的可排序的标志号 ID (identification number)，通过与邻居节点的信息交互，获得其标志号信息，并利用拓扑发现分组的扩散来完成全网拓扑结构的生成，获得分簇结果，该算法的优点是计算简单、实现方便、收敛较快，并且在移动环境下，簇头更新频度较低，维护簇头的开销较小。但是 Lin-Gerla 算法也存在不足，在该算法中，簇头的选择完全依赖于固定的 ID 信息，这样会使得部分移动节点被频繁选举为簇头，承担大量的网络管理和通信转发任务，导致电池能量快速耗尽。为此，研究了在随机移动环境下节点相对移动与簇稳定之间的关系，通过融合和改进经典的最小 ID 分簇算法和最大度算法，提出一种基于链路稳定性的分簇算法。该算法首先对节点的权值进行计算、比较，然后选举较为合适的节点作为簇头，最后由簇头节点对其邻居节点进行染色，形成对整个网络的覆盖。其中，权值的计算主要依据节点相对移动速度、距离等因素。在簇头选择中通过引入节点相对移动性参数，在保证链路可用性的基础上维持分簇的稳定性，并且针对可能出现的分簇过大的问题给出一种簇自适应分裂方法，以提高分簇的稳定性。

1 随机方向模型下链路可用性分析

文献[5]引入了链路可用度 (link availability) 的概念，定义为：若在 t_0 时刻，2 个可以直接通信的移动节点之间存在一条有效链路，在 $t_0+\Delta t$ 时刻该链路仍有效的概率。假设只考虑距离因素，即如果 2 个移动节点距离小于天线覆盖范围，则认为其间链路是有效的。链路可用度反映了 2 个移动节点之间链路的稳定性。

移动节点的运动由时间轴上一系列运动间隔组成，在每个运动间隔上节点的运动速度和方向都保持不变。移动节点 n 在 t_i 时刻沿方向 $\vec{a}_i^n$ 直线运动的距离为 $v_i^n\Delta t_n$，其中 v_i^n 为节点运动速度。节点 n 的运动用 $(\lambda_n,\mu_n,\sigma_n^2)$ 参数表征，其中运动间隔 Δt_n 服从参数为 λ_n 的指数分布；运动速度 v_i^n 服从均值为 μ_n、方差为 σ_n 的高斯分布，且各个移动节点的运动速度是独立同分布(IID)的；运动方向 $\vec{a}_i^n$ 服从[0，2π]上的均匀分布。

设节点 m 和 n 分别按照参数 $(\lambda_m,\mu_m,\sigma_m^2)$ 和 $(\lambda_n,\mu_n,\sigma_n^2)$ 移动，随机移动向量分别为 $\boldsymbol{R}^m(t)=|\boldsymbol{R}^m(t)|\boldsymbol{a}_t^m$，$\boldsymbol{R}^n(t)=|\boldsymbol{R}^n(t)|\boldsymbol{a}_t^n$，它们的模 $|\boldsymbol{R}^m(t)|$ 和 $|\boldsymbol{R}^n(t)|$ 服从参数为 β_m 和 β_n 的 Rayleigh 分布，那么节点 m 相对于节点 n 的随机移动向量为 $\boldsymbol{R}_{m,n}(t)=\boldsymbol{R}^m(t)+\boldsymbol{R}^n(t)$，对应的模 $|\boldsymbol{R}_{m,n}(t)|=|\boldsymbol{R}^m(t)|+|\boldsymbol{R}^n(t)|$ 服从参数为 $\beta_{m,n}=\beta_m+\beta_n$ 的 Rayleigh 分布，方向角服从[0，2π]上的均匀分布。

链路的建立有 2 种情况[5]：

第一种情况是在 t 时刻节点 m 和 n 之间的链路已存在，概率为

$$P(\boldsymbol{R}_{m,n}(t)<Z)=\int_0^{2R}\left(1-\exp\left(-\frac{z^2}{\beta_{m,n}}\right)\right)\frac{-z}{\pi R^2}\sqrt{R^2-(z/2)^2}\,\mathrm{d}z。\tag{1}$$

第二种情况是在 t 时刻，由于移动使得 2 节点之间的距离小于通信半径而建立 1 条新的链路，概率为

$$P(\boldsymbol{R}_{m,n}(t)<Z)=\frac{1}{2}\int_0^{2R}\left(1-\exp\left(-\frac{z^2}{\beta_{m,n}}\right)\right)/\pi\sqrt{R^2-(z/2)^2}\,\mathrm{d}z,\tag{2}$$

其中：R 为节点的传输半径；Z 为节点 m 沿相对运动方向运行到节点 n 天线覆盖边界的距离；$P(\boldsymbol{R}_{m,n}(t)<Z)$ 表示链路有效的概率。由此可知，m 和 n 之间的链路可用度取决于相对随机移动向量 $\boldsymbol{R}_{m,n}(t)$。

2 基于链路稳定性的分簇算法

分簇的稳定程度依赖于簇头节点和簇内成员节点之间的链路稳定性。某移动节点与其所有邻居节点的链路可用度之和反映了该节点天线覆盖区域内所有链路的稳定程度，对应于以该节点生成的簇的稳定性，称为成簇稳定性。

2.1 权值计算

提出的改进算法基于权值比较机制，对每个节点赋以一个权值 w，用来表征当前节点担任簇头的合适程度，定义

$$w=\sum_{i=0}^{k-1}I_i,\tag{3}$$

权值 w 反映了当前节点与所有 k 个邻居节点的 k 条链路可用度 I_i 的和，I_i 的设计引入了门限的方式[6]，区分同向运动和反向运动的情况。链路可用度 I_i 如下表达式

$$I_i=\begin{cases}\left(1-\dfrac{R-S_{m,n}}{\Delta t\times 2\times v_{\max}}\right)\times\left(1-\dfrac{\Delta S_{m,n}}{2\times v_{\max}\times\Delta\tau}\right), & \Delta S_{m,n}>0;\\ 1, & \Delta S_{m,n}\leqslant 0;\end{cases}\tag{4}$$

式中 $S_{m,n}$ 和 $\Delta S_{m,n}$ 分别为节点 m 和 n 之间的距离和距离改变量；$v_{\max}$ 为节点可达到的最大运动速度；Δt 为 2 次速度改变之间的时间间隔；$\Delta\tau$ 表示用于测算相对速度和距离而进行的相邻 2 次控制信息交互的时间间隔。I_i 表示整合了 2 点间距离和相对运动的参数，反映链路的稳定程度，I_i 值越大，表明链路稳定度越高，最高为 1。I_i 还反映了对节点运动的预测因素，$\Delta S_{m,n}\leqslant 0$ 表示在 Δt 时间段维持同向运动，链路会保持稳定；$\Delta S_{m,n}>0$ 表示在 Δt 时间段维持反向运动，此时 $I_i\in(0,1)$，表征稳定程度。

针对可能出现的某些簇集中度过高的问题，在分

簇维持部分还加入了对度数过大的簇进行分裂的设计。分簇算法包括簇生成、簇维持和簇分裂 3 个部分。

2.2　簇生成算法

为了测算 2 个移动节点 m 和 n 之间距离的变化量情况，在 $\Delta\tau$ 时段进行 2 次控制信息的交互，即根据 $\Delta\tau$ 内节点的运动状态来估计 Δt 内的运动特性。由于电波传播与距离相关，可以用相邻 2 次周期性信息交互时的信号强度的比值来判断节点间距离的变化，用 p_{rnew} 表示本次测得的信号强度，p_{rold} 表示前一次测得的信号强度，p_t 为信号发射功率。$p_r^{new} > p_r^{old}$ 表明距离减小，反之距离增大，用 $\frac{\| p_{\mathrm{rnew}} - p_{\mathrm{rold}} \|}{p_t}$ 近似反映距离改变量 $\Delta S_{m,n}$ 的大小[3]。利用能量检测法获得信号能量的估计值和变化值来表征相对位置和相对位置的变化量，是一种不依赖于绝对位置信息的方法，相对于基于 GPS 定位的分簇方式[7]，虽然在定位精度上有所损失，但是，鉴于逻辑关系是依赖于簇头节点与相邻移动节点的相对远近程度的，在简化设备的条件下，该方式同样可以达到目的。

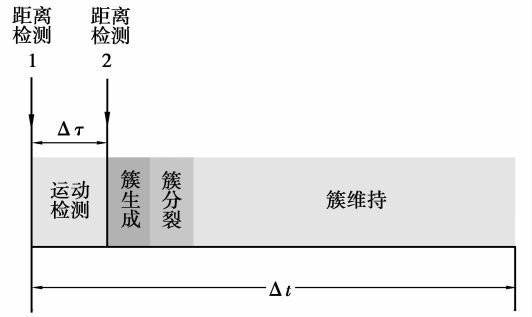

图 1　分簇过程

簇生成算法描述如下：

网络中每个节点具有唯一可比较的 ID 号，这个继承于 Lin-Gerla 算法的目的在于在节点权值相同的特殊情况下，可以通过比较 ID 号来选取簇头。每个移动节点维持一张邻居节点表(neighbors table)，用以记录邻居节点的基本信息、信号强度信息和权值。网络需要周期性交互基本控制消息，通过检测基本控制消息中的信号强度来估算节点之间的相对位置和相对位置改变量。所有网络实体都处于未定、簇头、簇成员 3 种状态之一。

Step 1：在初始状态下，所有节点都处于未定状态，以标准功率周期性发送并接收基本控制消息。所有节点检测接收信号强度，测算出当前距离 $S_{m,n}$ 和 Δt 时间段相对位置改变量 $\Delta S_{m,n}$。当前节点根据式(4)计算节点 m 和 n 之间的链路稳定度 I_i，进而求出当前节点对所有邻居节点的簇稳定度 w 作为权值。

Step 2：所有节点广播自身的权值，接收邻居节点的权值消息，并将对应信息填入邻居表保存，直到下 1 个消息交互时间。节点比较自己的权值和邻居表中邻居节点的权值。

Step 3：若当前节点的权值最大(权值越大则说明越适合成为簇头)，则升级成为簇头。并向邻居节点广播分簇控制消息，邀请邻居节点加入以当前节点为簇头的分簇。当节点接收到权值比自身大的节点发送的分簇控制消息时，选择加入以该节点为簇头的分簇。

Step 4：查找仍处于初始状态的节点，重复进行 Step 2 和 Step 3，直到所有节点都不处于初始状态。

Step 5：若 2 个节点的权值相等，在互相竞争成为簇头的情况下，参照 Lin-Gerla 分簇算法，选取具有较小 ID 值的节点成为簇头。

2.3　簇维护算法

移动节点物理位置的变化往往导致网络拓扑随之变化，为此，需要建立一种合适的分簇保持机制，以尽量减少分簇逻辑关系的变更。分簇保持的目的是尽量把群维护期间触发的簇头选举的动作推迟到下 1 个簇生成时间，以此回避连续的簇生成动作造成的网络负荷。

Step 1：判断当前节点是否进入其他簇头节点覆盖范围。

Step 2：当前节点是簇头节点，则维持当前的逻辑分簇，直到下 1 个簇生成时间。

Step 3：当前节点是簇成员节点，若当前节点能维持与所选定簇头的联系，仍然不改变簇关系，直到下 1 个簇生成时间；若当前节点不被任何簇头节点覆盖，则成为孤立节点，升级为新簇头，直到下 1 个簇生成时间。

2.4　簇分裂算法

因为分簇算法是针对随机分布和随机运动的情况，所以可能会出现分簇过于集中，产生成员较多的分簇。而分布较多的随机移动的簇成员会降低簇的稳定性，而且过于集中的分簇也会造成簇头节点负荷过重。为此本算法还设计了簇分裂机制。当簇成员数目超过预先设置的度数门限 δ_{degree} 时，触发簇分裂。δ_{degree} 可以动态设置成簇成员数目算术平均值的若干倍，如 $\delta_{\mathrm{degree}} = 2 \times n_{\mathrm{node}} / n_{\mathrm{cluster}}$，其中 n_{node} 为网络移动节点总数，n_{cluster} 为簇数；也可以根据经验数据进行固定预设。

Step 1：由簇头指定待分裂分簇中距离簇头最远的节点成为新簇头。

Step 2：新簇头向簇中成员节点发送控制信息。

Step 3：所有收到控制信息的簇成员，可能存在部分簇成员无法接收到控制信息，通过比较簇头和新簇头的权值 w，决定是否加入新簇。

3　仿真设计与结果分析

因为目前流行的网络系统仿真软件，如

OPNET、NS2 等都没有整合分簇算法，利用 visual c ++ 6.0 开发平台，设计了专用的仿真程序，考虑全向天线和双向链路的环境。

3.1 移动模型

所有移动节点基于随机方向模型(random direction model)运动，即所有移动节点在 1 个固定区域内移动(见图 2)。从某一运动时段开始，节点在[0，2π]范围内随机选取 1 个方向角度 α，运动速度范围[v_{min}，v_{max}]。随机选择瞬时运动速度 v，并在 Δt 时间段维持方向角度为 α。若移动节点到达指定运动区域边缘，就重新选择运动方向和速度，如图 2 所示[8]。

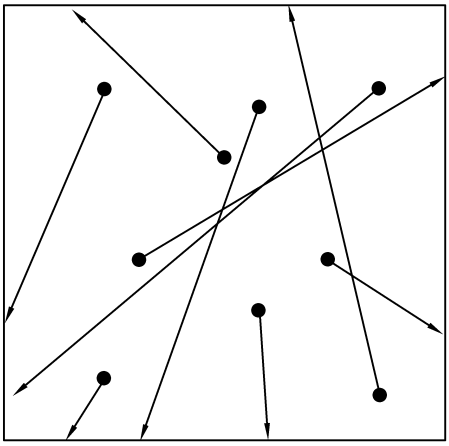

图 2 随机方向模型

3.2 测试参数

1)簇数量：指分簇算法完成后，网络中所划分的簇总数(见图 3)。

2)重入簇次数：表征在单位时间间隔内发生逻辑位置关系变化的移动节点数目，包括因为节点移动导致簇成员节点离开簇头节点的覆盖范围并进入其他簇头节点覆盖范围成为其他簇的簇成员的节点数目，以及进入孤立区域成为新簇头的数目的总和(见图 4-5)。

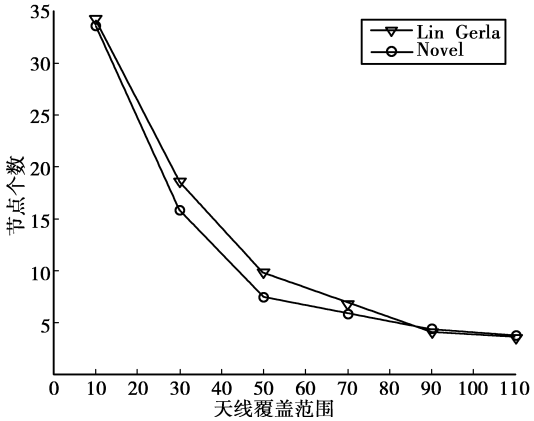

图 3 簇数量随天线覆盖范围变化情况

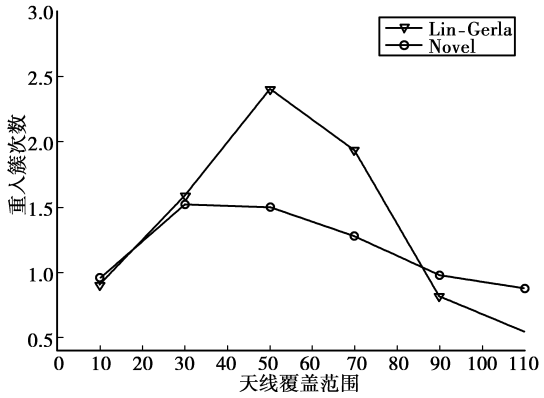

图 4 重入簇次数随天线覆盖范围变化情况

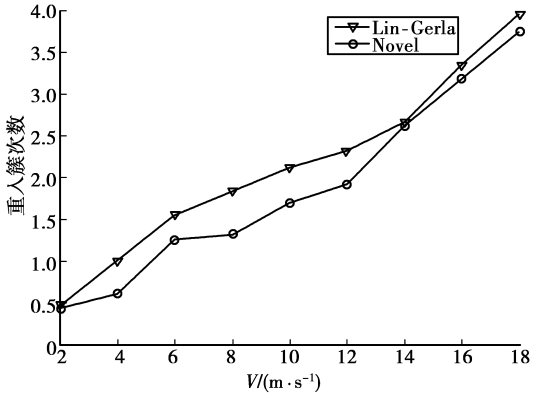

图 5 重入簇次数随速度变化情况

3.3 试验结果和分析

仿真选取在 200×200 m 区域内，40 个移动节点。测试 1 和测试 2 中，移动节点基于最大速度 v_{max} 为 10m/s 的随机方向模型，天线覆盖范围的变化是[10，100]m。测试 3 中，天线覆盖范围设置为 50 m，最大速度 v_{max} 变化范围为[2，18]m/s。具体数据如表 1 所示。在实验中，预测时间和运动时间比值($\Delta\tau/\Delta t$)越大则预测越准确，与此同时，预测阶段应维持在较小的时间范围内，这样的预测才有意义。经过实验，取值 0.3 时准确率大概在 75%左右(见表 1)。

表 1 实验参数说明

参数	含义	取值
N	移动节点个数	40
$X \cdot Y$/m	实验区域	200×200
v_{max}/(m·s^{-1})	移动节点最大速度	2－18
Range/m	天线覆盖范围	10－100
Run time/s	运行时间	200
$\Delta\tau/\Delta t$	预测时间和运行时间比值	0.3
δ_{degree}	簇度数门限	簇度数均值的 2 倍

图 3 给出了簇数目随天线覆盖范围的变化情况，从图中可以看出，随着天线覆盖范围的扩大，簇数目减少。和 Lin-Gerla 算法相比较，改进算法的簇数略小，即簇集中度略高。图 4 给出了重入簇次数随天线覆盖范围的变化情况，随着天线覆盖范围的扩大，重入簇次数是先增加后降低的，这是因为在天线覆盖范围较小时，簇成员很少，甚至大部份分簇可能是孤立的，在这种情况下，节点的移动对分簇逻辑结构的改变很小，而在天线覆盖范围较大时，单位时间内移出簇头节点天线覆盖范围的可能性较小，较少引发逻辑位置的改变。与 Lin-Gerla 算法相比，提出的改进算法的重入簇次数随天线覆盖范围变化较为平稳。图 5 给出了重入簇次数伴随速度变化情况，从图中可以看出，速度的增加，簇改变的情况是不断增加的。和 Lin-Gerla 算法相比，速度较高时基本一致，在[4，12]m/s 的区域，改进算法性能更优越，重入簇数目明显减少。

众所周知，簇数量越大，簇结构越简单，改变量一定是越小的。改进算法并未造成簇数目增加，甚至有减少，可见，通过参考分簇稳定度来进行的分簇以及簇维护方法能明显提升簇结构的健壮性。

4　结　论

分析了链路稳定度和分簇稳定度，在 Lin-Gerla 算法的基础上，结合链路可用性提出了一种改进的分簇算法，使得在分簇时可以产生更稳定的簇结构，适应于具有较高移动性的无线网络。同时，针对分簇集中的问题，提出了一种快速的簇分裂方法，使得分簇更为合理。对算法进行的仿真结果表明，改进算法可以在增加簇数量的情况下，有效提升分簇的稳定性，具有一定的实用价值。

参考文献：

[1] DALI W，CHAN H A. Clustering Ad Hoc networks：schemes and classifications [C] // 2006 IEEE Communications Society Conference on Sensor，Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. USA：IEEE，2006：920-926.

[2] JANE Y Y，PETTER H J C. A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials，2005，7(1)：32-48.

[3] LIN R，GERLA M. Adaptive clustering for mobile wireless networks [J]. IEEE JSAC，1997，15(7)：1265-1275.

[4] ZHOU W，CHEN H M，XIE W H. Cluster merging algorithm with link optimization for wireless sensor networks[C] // 2006 IEEE Wireless Communications，Networking and Mobile Computing. USA：IEEE，2006：1-4.

[5] MCDONALD B，ZNATI T E. A Mobility-based framework for adaptive clustering in wireless ad Hoc networks[J]. IEEE JSAC，1999，17(8)：1466-1487.

[6] JIANG G X，YANG Z Y. A distributed clustering algorithm based on cluster stability for mobile ad hoc networks[C] // 2008 IEEE 4th International Conference on Wireless Communications，Networking and Mobile Computing. USA：IEEE，2008：1-6.

[7] DHURANDHER S K，SINGH G V. Weight based adaptive clustering in wireless ad hoc networks[C] // 2005 IEEE International Conference on Personal Wireless Communications . USA：IEEE，2005：95-100.

[8] PAOLO SANTI. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks[M]. US：Hoboken，John Wiley & Sons，2005.

[9] HUSSEIN A H，ABU SALEM A O，YOUSEF S. A flexible weighted clustering algorithm based on battery power for Mobile Ad hoc Networks[C] //2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. USA：IEEE，2008：2102-2107.

[10] 王建新，朱贤曼，陈建二. 移动自组网中任意时刻链路可用性计算方法[J]. 电路与系统学报，2009，15(7)：1-7.
WANG JIAN-XIN，ZHU XIAN-MAN，CHEN JIAN-ER. Link availability for any time in mobile ad hoc networks [J]. Journal of Circuits and Systems，2009，15(7)：1-7.

[11] JAMAL N，KARAKI A L，AHMED E K. Efficient virtual-backbone routing in mobile ad hoc networks[J]. Computer Networks，2008，52(2)：327-350.

[12] ZHANG J，WANG B，ZHANG F. A distributed approach of WCA in ad-hoc network[C] //2006 IEEE Wireless Communications，Networking and Mobile Computing. USA：IEEE，2006：1-5.

[13] CHATTERJEE M，DAS S K，TURGUT D. WCA：A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks[J]. Journal of Clustering Computing，2002，5(2)：193-204.

[14] WANG Y，CHEN H R，YANG X Y，et al. WACHM：Weight based adaptive clustering for large scale heterogeneous MANET [C] //7th International Symposium on Communications and Information Technologies. USA：IEEE，2007：936-941.

[15] TILLETT J，RAO R，SAHIN F. Cluster-head identification in ad hoc sensor networks using particle swarm optimization [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Personal Wireless Communications 2002. USA：IEEE，2002：201-205.

（编辑　侯　湘）