

## 可量化的移动 Ad Hoc 网络时空动态特性评估方法\*

王伟<sup>1,2+</sup>, 管晓宏<sup>1</sup>, 王备战<sup>3</sup>, 王亚平<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(西安交通大学 智能网络与网络安全教育部重点实验室 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

<sup>2</sup>(西安工程大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710048)

<sup>3</sup>(厦门大学 软件学院, 福建 厦门 361005)

<sup>4</sup>(Department of Industrial and Systems Engineering, Texas A&M University, TX 77843, USA)

### Evaluation Method with Measureable Space-Time Dynamic Properties for Mobile Ad Hoc Networks

WANG Wei<sup>1,2+</sup>, GUAN Xiao-Hong<sup>1</sup>, WANG Bei-Zhan<sup>2</sup>, WANG Ya-Ping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Ministry of Education Key Laboratory for Intelligent Network and Network Security, State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

<sup>2</sup>(School of Computer Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

<sup>3</sup>(School of Software, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

<sup>4</sup>(Department of Industrial and Systems Engineering, Texas A&M University, TX 77843, USA)

+ Corresponding author: E-mail: wangweinwpu@gmail.com

**Wang W, Guan XH, Wang BZ, Wang YP. Evaluation method with measureable space-time dynamic properties for mobile ad hoc networks. *Journal of Software*, 2011, 22(6): 1333–1349. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3966.htm>**

**Abstract:** Mobility model is a crucial feature to differentiate ad hoc networks from other networks. The evaluation of dynamic network properties caused by mobility model is the basic problem for research on protocol simulation and related technologies, such as topology control and network performance measurement, in ad hoc networks. In this paper, a model-based description of ad hoc networks is improved to avoid the drawbacks in describing the corresponding space-time dynamic properties. Then a universal evaluation method with measureable space-time dynamic properties is presented. The dynamic properties of several mobility models are studied by constructing the space distribution of the nodes and designing the models for analyzing the topological space-time dynamic properties. Furthermore, a novel mobility model based on circular curve movement is proposed to improve the flexibility and the capability to describe realistic scenarios with curve movement. Simulation with NS2 shows the presented method can effectively evaluate the characteristics of the existing mobility models. The numerical

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60921003); 中国博士后科学基金(20090451384); 国家高技术研究发展计划(863)(2008AA01Z415); 高等学校博士学科点专项科研基金(20070698107); 国家杰出青年科学基金(60825202); 中央高校基本科研业务费专项资金(xjj20100051)

收稿时间: 2010-02-08; 修改时间: 2010-07-16; 定稿时间: 2010-11-08

CNKI 网络优先出版: 2011-03-16 11:30, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20110316.1130.000.html>

results also show that the proposed mobility model has good dynamic properties in comparison with the existing mobility models.

**Key words:** mobile ad hoc network; mobility model; space-time dynamic property; measurable evaluation; circle curve mobility model

**摘要:** 移动模型是 Ad Hoc 网络区别于其他形式网络的重要标志,对其产生的动态网络特性(简称动态特性)进行评估,是研究 Ad Hoc 网络的协议仿真和网络相关技术(如拓扑控制和网络性能测量等)的基础性问题.在已有研究的基础上,改进了网络的模型化描述,克服了以往模型无法很好地描述相关联的时空动态特性的缺陷,并在此基础上,提出了移动模型通用的可量化时空动态特性评估方法.通过构建节点空间位置分布,建立网络拓扑时空动态特性的分析模型,深入研究了儿种移动模型的动态性.提出一种圆周曲线移动模型,弥补了以往移动模型难以描述现实的曲线移动场景.仿真实验结果表明,该方法能够有效地对现有移动模型的动态性进行评估.实验结果表明,圆周曲线移动模型与以往移动模型相比,具有良好的时空动态特性.

**关键词:** 移动 Ad Hoc 网络;移动模型;时空动态特性;量化评估;圆周曲线移动模型

**中图法分类号:** TP393 **文献标识码:** A

在移动 Ad Hoc 网络(简称 Ad Hoc 网络)中,移动模型(mobility model,简称 MM)描述并反映移动节点(mobile node,简称 MN)的运动模式、速度和方向等几何特性,它是网络拓扑变化的主要因素.在已有的 Ad Hoc 网络相关研究中(如 MAC 协议和路由协议的优化、网络性能的预测等),往往都要以特定的 MM 为前提<sup>[1]</sup>.MM 使得 Ad Hoc 网络无论在时间还是空间上都表现出了复杂动态特性(如节点位置的空间分布、网络链路连通的持续时间等)<sup>[2]</sup>.而在实际应用中,人们期望 MM 及其产生的动态网络特性(以下简称动态特性)满足:(1) MM 能够描述现实中的物体移动模式,这是衡量 MM 是否满足实际应用的基本准则.例如,在现实生活中,节点不可能总是以固定的速度沿直线移动;(2) MN 在移动区域内经过一段时间的移动,其位置分布状况在统计上能够收敛于一个稳态分布,是研究 Ad Hoc 网络许多相关理论的重要基础.现有的许多文献对 Ad Hoc 网络基本特性的理论研究和数学描述都是基于节点位置分布为均匀分布的假设<sup>[2]</sup>.此外,在一些现实的应用(军事上的地域侦查)中,理想的节点位置分布应具有均匀性;(3) 在路由方式、物理环境和节点无线传输范围一定的条件下,Ad Hoc 网络在移动过程中能够满足良好连通性,这是网络正常通信必要条件之一.在文献[3]中,张衡阳等人对 MM 及其动态特性也提出了类似要求.因此,对 MM 及其动态特性进行准确地评估是确保 Ad Hoc 网络服务质量和部署应用的关键,具有重要现实意义.

另一方面,现有 MM 大多都基于简单、随机的(或盲目的)直线运动,不但难以描述现实中的曲线运动模式,还产生诸如边界效应(border effect)、速度衰减等缺陷,造成了基于这些 MM 的模拟研究无法准确反映网络真实行为<sup>[4,5]</sup>,客观上需要建立一种接近于现实的 MM.而如何对不同 MM 下的 Ad Hoc 网络动态特性及其仿真结果进行系统分析和全面比较,理论上要求提出一个通用、可量化的评估方法<sup>[6]</sup>.目前,MM 动态特性研究大多都针对 MM 本身及其某一侧面(如时间或空间动态性)来建立特定计算模型,因其难以独立于 MM,缺乏可比性和通用性.

基于此,本文首先在对现有 MM 分析的基础上,通过建立 Ad Hoc 网络拓扑的时空动态模型,提出了一种独立于 MM 的通用评估方法——可量化时空动态特性的评估方法(evaluation method with measurable space-time dynamic properties,简称 EMWMSDP),从网络节点位置的分布、网络拓扑和链路的生存期等时空变化角度来量化评估移动模型的动态特性.接着构建了一种圆周曲线移动模型(circle curve mobility model,简称 CCMM),该模型能够描述现实中沿圆周曲线运动的移动场景,如无人机(UAV)围绕移动区域进行搜救或监控、士兵围绕军事要地进行巡逻等.不同网络场景下的仿真实验结果表明,EMWMSDP 方法能够对 CCMM 和现有的儿种移动模型动态特性进行有效地评估,评估结果显示,CCMM 较其他移动模型具有良好的动态特性.

本文第 1 节讨论移动模型及其动态特性的相关研究.第 2 节详细介绍 EMWMSDP 方法及其相关模型和算

法.第3节提出 CCMM 模型,并对其应用进行分析.第4节给出仿真实验结果和分析.第5节对本文进行总结并指出下一步的工作.

## 1 相关研究

在对 Ad Hoc 网络进行模拟研究时,人们大多采用基于单独实体的 MM<sup>[2]</sup>,如典型的 RWPM(random waypoint mobility model)<sup>[7]</sup>,RWM(random walk mobility model)<sup>[8]</sup>,RDM(random direction mobility model)<sup>[9]</sup>和 GMMM(gauss markov mobility model)<sup>[10]</sup>等.其中的 RWPM 是基本模型,也是最常用的 MM.在 RWPM 中,MN 随机在移动区域内取起始点  $S$  和目的点  $D$ ,随机取速度  $v$ ,从  $S$  沿直线移动到  $D$ .MN 到达  $D$  后,随机选取一个暂停时间保持静止,这样就完成了一个 step.接着,以本轮目的点  $D$  作为下次运动的起始点  $S$ ,进行下一轮 step 移动.其他 MN 都遵循上述移动模式并相互独立地运动.大量的研究表明<sup>[11]</sup>,RWPM 模型因其固有的缺陷会给 Ad Hoc 网络的动态特性带来了严重的后果:(1) MN 随机的、毫无目的简单直线运动会产生所谓的“边界效应”<sup>[12]</sup>;(2) RWPM 不但导致 MN 在现实应用中因盲目性而缺乏使用效率,而且给网络拓扑的连通性能带来很大的影响;(3) 其动态特性在实际应用中会产生一些难以预料的灾难性后果,如多个节点易撞毁等事故.

其他一些模型大都是由 RWPM 演变而来的:当 RWPM 中 MN 的暂停时间为零时,RWPM 就变为 RWM. RWM 会产生不现实的动态特性,如“突然停止(sudden stop)”和“急转弯(sharp turn)”现象<sup>[12]</sup>;RDM 是在 RWPM 的基础上削减了节点的密度波动现象,但还无法改善 RWPM 下的网络拓扑连通性能;GMMM 是在 RWPM 的基础上使用了马尔可夫链来建立的运动模型<sup>[13]</sup>,它试图描述一个更加现实的移动模式,但由于 MN 在某些方向上运动速度无法变化,导致网络的动态特性依然存在缺陷(如节点的位置分布等).

上述这些 MM 的基本共同点是都建立在简单随机的直线运动基础上,导致它们难以描述曲线移动场景.为此,作者曾在文献[14]中提出了 CMBM(circle movement based-mobility model)模型.在该模型中,MN 在从  $S$  到  $D$  的每个 step 中都包括 3 个阶段:半径方向的调整期间,MN 从  $S$  所在的圆周以速度  $v$  径向移动到  $D$  所在圆周上;圆周运动期间,MN 以线速度  $v$  沿圆周运动到  $D$ ;暂停期间,MN 在到达  $D$  点后,暂停一段时间,并随机地在移动区域内选择下一个目的点.尽管该模型包含了曲线移动场景,但它仍然无法克服节点盲目移动和“急转弯”等缺陷,尤其是缺乏现实的应用场景.在此基础上,作者在文献[15]中提出了一种半随机的圆周运动移动模型 SRCM(semi-random circular movement)来克服上述的“急转弯”,但 SRCM 在 MN 均远离圆心位置的情况下,难以保证网络具有良好的连通性.

针对不同的 MM 所特有的动态特性,人们主要从两方面对其进行了研究:(1) 节点位置在空间上的概率分布特性;(2) 链路(路径)在时间上的持续性.Navidi 和 Camp<sup>[16]</sup>通过研究 RWPM 模型的速度等参数,得到了网络节点在移动区域内非均匀的稳态分布,并从数学上证明了 MN 穿过中心区域的概率明显高于边界区域,这正是边界效应产生的根源所在.该研究结果也得到了文献[17]的实验验证.为了研究 RWM 和 RDM 两种移动模式的动态特性,时锐等人在文献[17,18]中利用概率统计的计算方法给出了这两种 MM 下运动节点空间概率分布公式,结果表明,MN 按照简单的直线移动模式难以克服节点空间分布的非均匀性.针对 CMBM 模型,作者在文献[14]中利用几何概率的方法从节点空间概率分布的角度研究了 CMBM 的动态特性,发现 MN 在 CMBM 曲线移动模式下节点空间分布不均匀现象能够获得明显地改善.此外,在文献[15]中,作者还对 SRCM 模型的空间应用特性(包括无人机扫描范围和网络连通性)在无人机应用场景下进行了研究.这些研究方法的共性在于,针对各自的 MM 空间动态特性需要建立不同的节点分布计算模型.由于缺乏通用性,仅能对各 MM 的动态特性做粗略地描述而难以进行精确的定量分析和比较.

为了从时间特性上反映 Ad Hoc 网络在 RWPM 模型下的动态性,Gerharz 等人<sup>[19]</sup>从网络局部链路持续时间的角度研究了网络动态特性;Sadagopan 等人<sup>[20]</sup>通过研究最短生命期路径来分析网络的动态性对路由协议的影响;而魏晓海等人<sup>[21]</sup>利用网络最长生命期路径来研究其拓扑的时间动态性.他们为 MM 的时间动态性研究提供了基础,但其不足之处在于:(1) 仅从时间特性上研究了 MM 的动态性,由于无法反映相关的空间动态性,而缺乏对 MM 的动态特性进行全面地反映;(2) 所提出的计算模型仅适用于 RWPM 模型,难以扩展到其他 MM.

总体上看,造成上述 MM 动态性研究中所存在的缺陷,主要归因于以下两点:

(1) 以往 MM 所固有的缺陷给其时空动态特性的研究带来了困难,例如边界效应导致网络在短期所表现出的动态特性与其长期的动态特性出现较大的差异,其根源在于 MM 的动态特性导致了节点的不均匀分布;

(2) 缺乏合理的 Ad Hoc 网络时空动态模型.在以往的研究中,人们一般将 Ad Hoc 网络形式化表示为无向图  $G$ ,即  $G=(V,E)$ ,其中  $V=\{v|v \text{ 是 } G \text{ 中的一个节点}\}$ , $E=\{(u,v)|u,v \in V \text{ 且 } u,v \text{ 相邻接}\}$ , $G$  表示邻接矩阵  $M$ .这种模型不能描述 MM 的时间动态性和空间动态性之间所固有的关联关系,因而并不适用于 Ad Hoc 网络.为此,蔡一兵等人在文献[22]中对  $G=(V,E)$ 进行了改进,提出了  $G(t)=(V,E(t))$ 模型描述  $t$ 时刻 Ad Hoc 网络拓扑,其中, $E(t)$ 表示  $t$ 时刻无线链路集合.但这种模型无法体现  $G(t)$ 的在空间上的持续时间,因而并不能完整地描述 Ad Hoc 网络时空动态特性.在 MM 的实际应用环境中,Ad Hoc 网络的报文传输、接收和中继均在一个有限的区域内进行,除了受一些物理因素(如地形和天气等)影响外,主要受 MM 自身的移动模式及其时空动态性的共同约束.因此,从量化评估 MM 的角度来看,将其时间动态性和空间动态性相结合的分析方法无疑更具合理性.

本文所提出的 EMWMSDP 评估方法可对相互关联的 MM 时间和空间动态特性进行量化评估.在此基础上,还提出了 CCMM 模型来描述具有现实场景的曲线移动模式.为简单起见,假设 MN 在圆形区域内移动,但可扩展到其他形状的移动区域(如矩形等),并能对不同 MM 时空动态特性进行量化比较.由于该方法独立于任何 MM,可使不同 MM 下的 Ad Hoc 网络相关研究(如协议优化和性能评估等)<sup>[23]</sup>所得结果具有可比性,其结论也更具可信度.此外,EMWMSDP 方法能够较全面地对 MM 的时空动态特性进行评估,弥补了单一动态特性研究的不足.

## 2 EMWMSDP 评估方法

本节首先给出 EMWMSDP 评估框架,通过建立 Ad Hoc 网络时空动态特性模型,提出 MM 下的 MN 位置空间分布和 Ad Hoc 网络拓扑时空动态特性的分析模型及其算法描述.

### 2.1 EMWMSDP 评估框架

在 MM 下,Ad Hoc 网络的动态特性对网络应用产生了至关重要的影响,例如报文在 Ad Hoc 网络中的传输、中继和接收均依赖于 MN 随时间变化的空间几何位置以及网络拓扑连通性.因此,本节从节点位置的概率分布和网络拓扑的生存期两个角度,提出通用的 MM 动态特性评估框架,如图 1 所示.

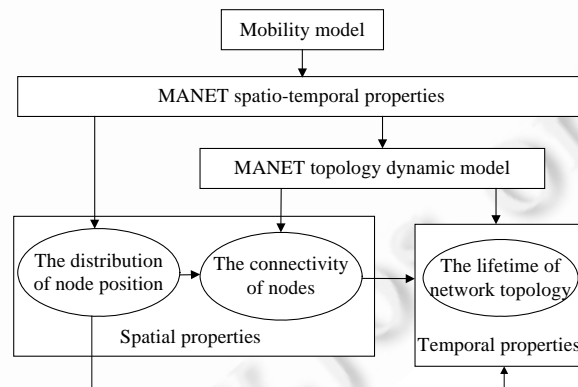


Fig.1 Evaluation frame of dynamic properties for MM in mobile ad hoc networks

图 1 Ad Hoc 网络移动模型的动态特性评估框架

下面给出 EMWMSDP 评估框架中所涉及到的一些假设和相关的概念.

- 假设 1. Ad Hoc 网络部署在二维半径为  $R$  的圆域  $\Omega$  内;
- 假设 2. Ad Hoc 网络的所有节点具有相同的物理属性(如电能、无线覆盖范围等).

上述假设条件同样出现在许多与 Ad Hoc 网络相关的研究文献[24,25]中,这主要是为了简化计算.尽管如此,本文所提出的模型和算法也具有可扩展性.

**定义 1.** 逻辑拓扑是指 Ad Hoc 网络中路由上的逻辑关系,它是由网络的逻辑链路所组成,其中的每条逻辑链路可能包含了多条物理链路.

注意,逻辑拓扑与其物理拓扑<sup>[26]</sup>有着显著的差别.如果 Ad Hoc 网络的源节点到所有目的节点的逻辑路由在某段时间内没有改变,不管物理拓扑是否发生变化,我们均认为网络逻辑拓扑在这段时间内是稳定的.因此,利用逻辑拓扑来分析和评估 Ad Hoc 网络在 MM 下的动态性问题,能够极大地减小问题的复杂性,尤其是对强动态的 MM.

**定义 2.** 网络拓扑的实际生存期(real live time,简称 RLT)是指 Ad Hoc 网络的逻辑拓扑在某时刻所固有的一种时间特性,即网络逻辑拓扑在该时刻所能够保持的稳定时间片,它是网络逻辑拓扑在此时的实际生存期.

由于 Ad Hoc 网络具有复杂的时空动态特性,一般很难直接得到 RLT.为此,我们提出了最小生存期(minimum live time,简称 MLT)概念.

**定义 3.** 网络拓扑的最小生存期(MLT)是指网络逻辑拓扑在任一时刻所能保持的最小稳定时间片.

值得注意的是,MLT 对于 Ad Hoc 网络的研究具有实际意义:一方面,MLT 值的大小直接可以反映出 Ad Hoc 网络动态特性,MLT 越大,网络拓扑动态性越小,就越利于网络数据的传输;另一方面,由于网络在 MLT 期间相对稳定,因此我们还可以方便地利用 MLT 对其进行其他方面(如网络性能或网络安全状况等)的研究.

## 2.2 Ad Hoc 网络时空动态模型

针对  $G=(V,E)$  和  $G(t)=(V,E(t))$  模型无法描述 MM 的动态特性在时间和空间上的相关性,本文提出了一种时空动态特性相关联的 Ad Hoc 网络模型.

如果用  $T(T>0)$  表示 Ad Hoc 网络系统的整个运行时间,  $V$  表示系统  $N$  个节点的集合即  $V=\{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ , 那么网络系统在任意时刻  $t(t \in T)$  所建立的链路集合就可  $L(t)$  表示, 系统逻辑拓扑在  $t$  时刻的 RLT 表示为  $LT(t)$ , 那么  $t$  时刻的 Ad Hoc 网络拓扑可用下面的形式化描述来唯一确定:

$$T(t)=(V,L(t),LT(t)) \quad (1)$$

该模型的意义在于,它能够从时间和空间相关联的角度来准确地界定网络拓扑和描述其动态特性.

## 2.3 MN 位置的空间分布

在 Ad Hoc 网络中,节点位置的动态特性依赖于节点的运动轨迹,具体表现为节点在移动期间其轨线覆盖移动区域的状况,即节点位置在移动区域内的概率分布状况.

### 2.3.1 分析模型

假设  $\Omega$  能够划分为若干子区域,并设想这些子区域内分别部署了计数器.不管 MN 采用何种 MM,只要 MN 经过该子区域,其计数器就会加 1.因此,我们从子区域计数问题的角度出发,利用统计方法来获取节点位置在  $\Omega$  内的概率分布.对于任意 MM,当节点在二维圆域  $\Omega$  (半径为  $R$ ) 内移动时,我们将  $\Omega$  划分为  $2m \times 2m$  ( $m$  为正整数) 个网格,则每个网格为边长  $\frac{R}{m}$  的小正方形.不失一般性,我们研究任一 MN ( $n_k, k \in N$ ) 在  $\Omega$  内的概率分布.

(1)  $n_k$  在  $\Omega$  内作直线移动的情形.对于任一网格,它可用  $grid(i,j)$  来表示,其中,  $(i,j) \in \{0,1,2, \dots, m\}$ , 如图 2(左)所示.如果用  $N'(i,j,k)$  表示  $n_k$  当前已经过  $grid(i,j)$  的次数,那么它在下一个 step 内  $n_k$  从  $S(x,y)$  到  $D(x',y')$  (用表示  $S \rightarrow D$ ) 所穿过  $grid(i,j)$  的次数  $N(i,j,k)$  计算模型为:

依据  $SD$  的直线方程  $\frac{X-x}{Y-y} = \frac{x-x'}{y-y'}$  ( $X \in [0,x], Y \in [0,y]$ ), 仅当  $grid(i,j)$  满足  $i \leq X \wedge j \leq Y$  时,则有

$$N(i,j,k) = N'(i,j,k) + 1 \quad (2)$$

(2)  $n_k$  在  $\Omega$  内沿半径为  $r$  的圆周上作曲线移动的情形.在极坐标系下,上述  $grid(i,j)$  可用  $grid(r_{i,j}, \phi_{i,j})$  来表示,其中,  $r_{i,j} = \sqrt{i^2 + j^2}$ ,  $\phi_{i,j} = \arctan \frac{j}{i}$ , 如图 2(右)所示.同理,  $N'(i,j,k)$  可表示为  $N'(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k)$ .

那么,  $n_k$  在下个 step 内从  $S\left(r, \arctan \frac{y}{x}\right)$  到  $D\left(r, \arctan \frac{y'}{x'}\right)$  所穿过  $grid(r_{i,j}, \phi_{i,j})$  的次数  $N(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k)$  计算模型为:

依据圆弧  $\widehat{SD}$  的方程为  $X^2+Y^2=r^2(X \in [0, x], Y \in [0, y])$ ,

当且仅当  $grid(r_{i,j}, \phi_{i,j})$  满足  $(\sqrt{(i-1)^2 + (j-1)^2} < r_{i,j} \leq \sqrt{i^2 + j^2}) \wedge \left(\arctan \frac{j-1}{i} < \phi_{i,j} \leq \arctan \frac{j}{i-1}\right)$  时, 则有

$$N(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k) = N'(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k) + 1 \tag{3}$$

此时, 如果用  $\alpha(i, j, k)$  和  $\alpha(i, j)$  来分别表示  $n_k$  和所有节点在网格  $grid(i, j)$  (或  $grid(r_{i,j}, \phi_{i,j})$ ) 上的概率, 则有

$$\alpha(i, j, k) = \begin{cases} \frac{N(i, j, k)}{\sum_{i=1}^{2m} \sum_{j=1}^{2m} \sum_{k=1}^N N(i, j, k)} \times 100\%, & \text{当 } S \rightarrow D \text{ 按直线移动时} \\ \frac{N(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k)}{\sum_{i=1}^{2m} \sum_{j=1}^{2m} \sum_{k=1}^N N(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k)} \times 100\%, & \text{当 } S \rightarrow D \text{ 按圆周曲线移动时} \end{cases} \tag{4}$$

$$\alpha(i, j) = \sum_{k=1}^N \alpha(i, j, k) \tag{5}$$

利用公式(4)和公式(5), 可方便地获得所有节点位置在  $\Omega$  内的不同网格上概率分布. 为了直观地评估节点位置在整个移动区域内分布的均匀状况, 我们采用概率差别最大值 ( $\alpha_{\max}$ ) 和概率差别平均值 ( $\bar{\alpha}$ ) 作为评估参数:

$$\alpha_{\max} = \text{Max} |\alpha(i, j) - \alpha(p, q)|_{(i,j,p,q) \in \{0,1,2,\dots,m\}} \tag{6}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{m} \sum |\alpha(i, j) - \alpha(p, q)|_{(i,j,p,q) \in \{0,1,2,\dots,m\}} \tag{7}$$

其中:  $\alpha_{\max}$  表明了移动区域内节点位置分布概率最大值和最小值之间的差异程度,  $\alpha_{\max}$  越大, 这种分布两极化趋势越明显;  $\bar{\alpha}$  则反映了节点位置概率分布在整体上的差异程度,  $\bar{\alpha}$  越小, 这种分布就越趋于均匀.

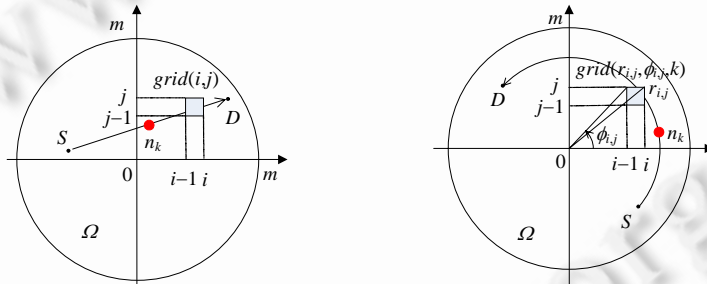


Fig.2 MN  $n_k$  traversing the grid  $grid(i,j)$   
图 2 节点  $n_k$  穿过网格  $grid(i,j)$  的情形

2.3.2 算法描述

MM 在 MM 下的位置空间分布评估由算法 1 来实现, 具体描述如下.

算法 1.

Input: MM and its parameters,  $R, m, n_k, i$  and  $j; \quad \forall (i,j) \in \{0,1,2,\dots,m\}, k=1,2,3,\dots,N;$

Output:  $\alpha(i,j)$ , the probability of all MNs traversed the grid  $grid(i,j)$ .

Steps:

1. For each grid give row serial number  $i=(1,2,3,\dots,m)$
2.     For each grid give line serial number  $j=(1,2,3,\dots,m)$
3.     For each MN  $n_k$
4.         If  $n_k$  has traversed the grid  $grid(i,j)$
5.         If MM is the linear mobility model
6.              $N(i,j,k)++;$

7. 
$$\alpha(i, j, k) = \frac{N(i, j, k)}{\sum_{i=1}^{2m} \sum_{j=1}^{2m} \sum_{k=1}^N N(i, j, k)} \times 100\% ;$$
8. If MM is the curvilinear mobility model
9. 
$$N(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k) ++;$$
10. 
$$\alpha(i, j, k) = \frac{N(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k)}{\sum_{i=1}^{2m} \sum_{j=1}^{2m} \sum_{k=1}^N N(r_{i,j}, \phi_{i,j}, k)} \times 100\% ;$$
11. 
$$\alpha(i, j) = \sum_{k=1}^N \alpha(i, j, k)$$
12. End
13. End
14. End

算法 1 的第 1 行~第 3 行是针对移动场景中 MN 和移动区域内网格的赋值,第 4 行~第 10 行是用来计算每个 MN 穿过不同的网格概率,第 11 行表示各个网格中出现 MN 的概率(即 MN 在移动区域内的概率分布),该算法的复杂度与移动区域划分格子大小的粒度和 MN 的数量成正比,即  $O(Nm^2)$ .

## 2.4 网络拓扑的时空动态特性

### 2.4.1 分析模型

#### (1) 空间动态特性评估

不失一般性,对于  $T(t)$  中的两个任意节点  $n_i$  和  $n_j (i \neq j \text{ 且 } (i, j) \in N)$ ,仅当它们之间的空间几何距离  $d_{i,j} \leq R_r$  时,才可建立无线链路  $l_{i,j} (l_{i,j} \in L(t))$ .此时,我们称  $n_j$  是  $n_i$  的一阶邻近节点,并将  $n_i$  的所有一阶邻居节点集合表示为

$$V_i^1(n_i) = \{n_j \in V \setminus \{n_i\}\} \quad (8)$$

同理,  $n_i \in V_i^1(n_j)$ . 为方便起见,令  $\{n_i\} = V_i^0(n_i)$ ,即节点  $n_i$  的第 0 阶邻近节点集.

对于其他节点  $n_k (k \neq i \neq j)$ ,如果  $n_k \in V_i^1(n_j)$  且  $n_j \in V_i^1(n_i)$ ,那么  $n_k \in V_i^2(n_i)$ . 以此类推,就可得到  $n_i$  的所有各阶邻居节点集.这样, $n_i$  的第  $\eta$  阶( $\eta$  为正整数且  $1 \leq \eta \leq N-1$ ) 邻近节点集可表示为

$$V_i^\eta(n_i) = \left\{ n_k \in V \setminus \bigcup_{\lambda=0}^{\eta-1} V_i^\lambda(n_i) \right\}_{k \in N} \quad (9)$$

在公式(9)中,如果  $n_k \in V_i^\eta(n_i)$ ,那么连接节点  $n_k$  和  $n_i$  路径的最小链路数为  $\eta$ .显然,如果  $V_i^{\eta+1}(n_i) = \emptyset$ ,那么  $n_i$  邻居节点的最高阶为  $\eta$ .对网络中的所有节点,它们所能到达的节点集可用  $V_i(\cdot)$  来表示:

$$V_i(\cdot) = \left\{ \bigcup_i^N V_i^\eta(n_i) \right\} \quad (10)$$

$V_i(\cdot)$  的本质在于它能够揭示 Ad Hoc 网络拓扑  $T(t)$  在空间上的连通状况,即  $t$  时刻网络对移动区域内的移动节点覆盖范围.为了便于研究 MM 在空间上的动态特性,我们在 MM 移动区域的中心处部署一个参考节点  $n_0$ ,通过考察它的一阶邻居节点数  $N_{\eta(1)}$  和邻居节点阶数最大值  $\eta_{\max}$  来评估 MM 的空间动态特性:

$$N_{\eta(1)} = \sum V_i^1(n_0) \quad (11)$$

$$\eta_{\max} = \max_{n_0} [\eta] \quad (12)$$

其中,  $N_{\eta(1)}$  反映了节点在  $\Omega$  内中间区域的聚集程度,  $\eta_{\max}$  显示了  $\Omega$  内中心位置在空间上距离 MN 的最大距离.显然:  $N_{\eta(1)}$  越大,节点聚集程度愈高,网络的边界效应越显著;  $\eta_{\max}$  的大小反映了网络拓扑在相同条件下(如移动区域、节点数量等)所能覆盖的空间范围大小.明显地,前者反映了网络在中心区域的连通密度,后者反映了网络在边缘区域的连通广度,它们共同揭示了网络拓扑在 MM 下的空间动态性.

#### (2) 时间动态特性评估

对于 Ad Hoc 网络拓扑在时间上的动态性而言,如果用  $LT_{\min}^{(t)}$  表示  $T(t)$  的 MLT,则有  $LT_{\min}^{(t)} \leq LT(t)$ . 显然,

$LT_{\min}^{(t)}$  的大小依赖于所有链路的 MLT,而  $t$  时刻的网络拓扑及其 MLT 依赖于此时的所有链路及其生存期.为了分析独立于 MM 的网络拓扑时间动态特性,我们在此提出了 Ad Hoc 网络链路临界点的概念.所谓链路临界点,就是指 MN 决定它所在链路由连通状态转变为断开状态的空间位置点.显然,每条链路的临界点是由连接它的两个节点位置来决定,而临界点的空间变化又决定着该链路在时间上的动态性.

我们首先分析圆周曲线移动下的网络链路.对于任意  $n_i$  和  $n_j$  主要有两种情形:① 二者之一为  $n_0$ ;② 二者均非  $n_0$ .对于情形①,只需判断另一节点(非  $n_0$ )距  $n_0$  的半径是否小于或等于  $R_r$ ;若是,则  $l_{i,j}$  存在;否则相反.对于情形②,假设  $n_i$  和  $n_j$  在  $t$  时刻的极坐标为  $P_i^{(t)}(r_i, \phi_i(t))$  和  $P_j^{(t)}(r_j, \phi_j(t))$ .当  $r_i=r_j$  时,  $d_{i,j}=2r_i \times \sin(|\phi_i(t)-\phi_j(t)|/2)$ .如果  $d_{i,j} \leq R_r$ ,  $l_{i,j}$  存在;否则,  $T(t)$  中不含链路  $l_{i,j}$ .当  $r_i \neq r_j$  时,  $d_{i,j} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(|\phi_i(t) - \phi_j(t)|/2)}$ .显然,如果  $|r_i - r_j| > R_r$  时,由于  $d_{i,j} > R_r$ ,  $l_{i,j}$  不存在.故只需考虑  $|r_i - r_j| \leq R_r$  且  $d_{i,j} \leq R_r$ .

不失一般性,假设  $r_i < r_j$ ,令  $Z_i(r_i^*, \phi_{i,R_r}(t))$  是  $t$  时刻  $n_i$  在  $P_i^{(t)}(r_i, \phi_i(t))$  位置上的无线覆盖范围与  $n_j$  移动路径前方的交点,  $Z_i(r_i^*, \phi_{i,R_r}(t))$  是  $t$  时刻  $n_j$  在  $P_j^{(t)}(r_j, \phi_j(t))$  位置上的无线覆盖范围与  $n_i$  移动路径前方的交点,如图 3 所示.对于  $n_i$  而言,假使  $n_j$  处于静止状态,则当  $n_i$  跨过  $Z_i(r_i^*, \phi_{i,R_r}(t))$  点时,  $l_{i,j}$  就断开.同理,  $Z_j(r_j^*, \phi_{j,R_r}(t))$  对于  $n_j$  也如此.因此,  $Z_j(r_j^*, \phi_{j,R_r}(t))$  和  $Z_i(r_i^*, \phi_{i,R_r}(t))$  就是  $l_{i,j}$  在  $t$  时刻潜在的两个临界点.

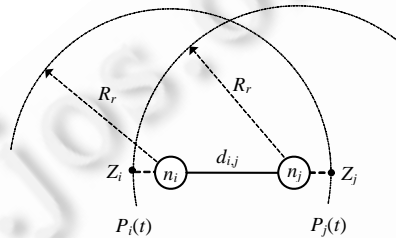


Fig.3  $n_i$  and  $n_j$  corresponding to the critical points  $Z_i$  and  $Z_j$  at time  $t$

图 3 在  $t$  时刻,  $n_i$  和  $n_j$  对应的临界点  $Z_i$  和  $Z_j$

类似地,对于简单直线移动下的网络链路,我们也可以得到链路的两个临界点.假设  $n_i$  和  $n_j$  在  $t$  时刻的坐标分别用  $P_i^{(t)}(x_i, y_i)$  和  $P_j^{(t)}(x_j, y_j)$  来表示,如果它们之间的几何距离  $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq R_r$ ,那么  $l_{i,j}$  存在.此时,  $l_{i,j}$  的两个临界点分别表示为  $Z_i(x_i(j, R_r, t), y_i(j, R_r, t))$  和  $Z_j(x_j(i, R_r, t), y_j(i, R_r, t))$ .

对于上述两种移动模式下,如果用  $LT_{i,j}^{(t)}(i)$  表示  $n_i$  在  $t$  时刻从  $P_i^{(t)}$  移动到  $Z_i$  所经历的时间,则有

$$LT_{i,j}^{(t)}(i) = \begin{cases} \frac{(\phi_{j,R_r}(t) - \phi_i(t)) \times ST_i}{\phi_i}, & \text{当 } n_i \text{ 按照圆周曲线移动时} \\ \frac{[(x_i(j, R_r, t) - x_i)^2 + (y_i(j, R_r, t) - y_i)^2]^{\frac{1}{2}}}{v_i}, & \text{当 } n_i \text{ 按直线移动时} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $ST_i$  和  $\phi_i$  分别是步时和步角,  $v_i$  是移动速度.类似地,我们可用  $LT_{i,j}^{(t)}(j)$  表示  $n_j$  在  $t$  时刻从  $P_j^{(t)}$  移动到  $Z_j$  所需的时间,则有

$$LT_{i,j}^{(t)}(j) = \begin{cases} \frac{(\phi_{i,R_r}(t) - \phi_j(t)) \times ST_j}{\phi_j}, & \text{当 } n_j \text{ 按照圆周曲线移动时} \\ \frac{[(x_j(i, R_r, t) - x_j)^2 + (y_j(i, R_r, t) - y_j)^2]^{\frac{1}{2}}}{v_j}, & \text{当 } n_j \text{ 按直线移动移动时} \end{cases} \quad (14)$$

注意,从图 3 可明显地看出,在  $n_i$  和  $n_j$  可能的移动方向中,  $LT_{i,j}^{(t)}(i)$  和  $LT_{i,j}^{(t)}(j)$  是链路  $l_{i,j}$  维持连通情形下所具有的两个更小的时间片.因此,利用公式(13)和公式(14),我们可得到  $l_{i,j}$  在  $t$  时刻的 MLT:



$$LT_{i,j}^{(t)} = \min[LT_{i,j}^{(t)}(i), LT_{i,j}^{(t)}(j)]_{i \neq j \wedge (i,j) \in V} \quad (15)$$

这样,根据  $t$  时刻网络中所有链路的 MLT,就可以得到该时刻网络拓扑的 MLT:

$$LT_{\min}^{(t)} = \min[LT_{i,j}^{(t)}]_{i \neq j \wedge (i,j) \in V} \quad (16)$$

利用公式(16),将  $LT_{\min}^{(t)}$  作为对 MM 时间动态特性评估参数,可获得  $t$  时刻的网络拓扑在时间上的动态特性.

### 2.4.2 算法描述

Ad Hoc 网络在 MM 下的空间动态特性和时间动态特性评估分别由算法 2 和算法 3 完成.

#### 算法 2.

Input: MM and its parameters,  $R, n_i, n_j, \eta, t$  and  $R_r$ ;  $//t \in T, i \neq j, 1 \leq \eta \leq N-1$  and  $(i,j) \in \{0,1,2,\dots,N\}$ ;

Output:  $V_t(\cdot)$ , the set of neighbor nodes which can be connected at time  $t$ .

Steps:

1. For each MN  $n_i$
2.     For each MN  $n_j (j \neq i)$
3.         If  $d_{i,j} \leq R_r$  then
4.              $V_t^1(n_i) = \{n_j \in V \setminus \{n_i\}\}$  and  $l_{i,j}$  can be connected
5.         else if  $n_k \in V_t^{\eta-1}(n_i)$  and  $n_j \in V_t^1(n_k)$  then
6.              $V_t^\eta(n_i) = \left\{ n_k \in V \setminus \bigcup_{\lambda=0}^{\eta-1} V_t^\lambda(n_i) \right\}_{k \in N}$
7.         End
8.     End
9.  $V_t(\cdot) = \left\{ \bigcup_i^N V_t^\eta(n_i) \right\}$ ; Output  $V_t(\cdot), N_{\eta(1)}$  and  $\eta_{\max}$

算法 2 中的第 1 行~第 8 行用来计算网络中任意节点各阶邻居节点集,其中:第 3 行和第 4 行用来判断任意两个节点之间是否存在直接连接的链路,进而获得节点的一阶邻居节点集;第 6 行和第 7 行用来获得节点的一阶邻居节点集.最后,算法 2 在第 9 行得到所有节点各阶邻居节点集  $V_t(\cdot)$ ,并输出  $V_t(\cdot)$ 、参考节点  $n_0$  的一阶邻居节点数  $N_{\eta(1)}$  和邻居节点阶数最大值  $\eta_{\max}$ ,作为对 MM 在空间动态特性上进行评估的指标.该算法的复杂度与 MN 的数量相关,并随其增加而增大,即  $O(N^2)$ .

#### 算法 3.

Input: MM and its parameters,  $R, n_i, n_j, t$  and  $R_r$ ;  $//t \in T, i \neq j$  and  $(i,j) \in \{0,1,2,\dots,N\}$ ;

Output:  $LT_{\min}^{(t)}$ , the MLT of network topology at time  $t$ .

Steps:

1. For each MN  $n_i$
2.     For each MN  $n_j (j \neq i)$
3.         If MM is the linear mobility model
4.             If  $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq R_r$ ,
5.              $\{l_{i,j}$  is connected and has two critical points  $Z_i(x_i(j, R_r, t), y_i(j, R_r, t))$  and  $Z_j(x_j(i, R_r, t), y_j(i, R_r, t))\}$ ;
6.              $LT_{i,j}^{(t)}(i) = \frac{[(x_i(j, R_r, t) - x_i)^2 + (y_i(j, R_r, t) - y_i)^2]^{\frac{1}{2}}}{v_i}$ ;
7.              $LT_{i,j}^{(t)}(j) = \frac{[(x_j(i, R_r, t) - x_j)^2 + (y_j(i, R_r, t) - y_j)^2]^{\frac{1}{2}}}{v_j}$ ;
8.         Else
9.              $l_{i,j}$  is null.
10.         If MM is the curvilinear mobility model
11.             If  $d_{i,j} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(|\phi_i(t) - \phi_j(t)|/2)} \leq R_r$ ,

$\{l_{i,j}$  is connected and has two critical points  $Z_i(r_i^*, \phi_{j,R_r}(t))$  and  $Z_j(r_j^*, \phi_{i,R_r}(t))$ ;

$$LT_{i,j}^{(i)} = \frac{(\phi_{j,R_r}(t) - \phi_i(t)) \times ST_i}{\varphi_i};$$

$$LT_{i,j}^{(j)} = \frac{(\phi_{i,R_r}(t) - \phi_j(t)) \times ST_j}{\varphi_j}; \}$$

10.

Else

$l_{i,j}$  is null.

11.  $LT_{i,j}^{(i)} = \min[LT_{i,j}^{(i)}(i), LT_{i,j}^{(i)}(j)]_{i \neq j \wedge (i,j) \in V}$

12. End

13. End

14.  $LT_{\min}^{(i)} = \min[LT_{i,j}^{(i)}]_{i \neq j \wedge (i,j) \in V}$ ; Output  $LT_{i,j}^{(i)}$  and  $LT_{\min}^{(i)}$

算法3从时间动态性的角度对MM进行了评估.针对直线移动(如RWPM)和圆周曲线移动(如CCMM)两种情形下的MN,算法在第3行~第7行和第8行~第10行分别对不同情形下的任意两个MN之间是否存在直接链路做出判断,并计算出该链路上的两个MN分别从它们当前位置移动到各自的临界点所需时间.利用这些时间数据信息,算法在第11行得到网络中所有直接链路的最小生存期 $LT_{i,j}^{(i)}$ .最后,算法在第14行得到网络拓扑的最小生存期 $LT_{\min}^{(i)}$ ,并输出 $LT_{i,j}^{(i)}$ 和 $LT_{\min}^{(i)}$ ,作为对MM在时间动态特性上的评估指标.在算法3中,算法复杂度主要由MN的数量所决定,可近似地表示为 $O(N^2)$ .

### 3 CCMM 模型

本节首先提出一种优化的圆周曲线移动模型——CCMM模型,然后将该模型与现有的几种MM进行简单地比较分析.

#### 3.1 模型描述

考虑若干无人机在特定的区域进行航空扫描或搜索目标等现实应用场景,我们假设:(1)所有MN初始时随机分布在二维半径为 $R$ 的圆 $\Omega$ 内,圆心为静止节点 $n_0$ ,MN可感知到 $n_0$ 及它们之间的距离(可通过GPS或位置服务程序);(2)所有MN沿各自的圆周独立地以相同的方向(顺时针或逆时针)移动;(3)MN能确定其移动方向和目的地;(4)所有的节点具有相同的无线覆盖范围 $R_r$ .这里,我们假设无人机在二维区域内飞行,是基于两方面的考虑:其一,同种类型的无人机一般在相同高度的上空飞行<sup>[27]</sup>;其二,模型本身是描述节点在移动区域内的移动模式,可不考虑无人机的起飞和着陆状态.同样的假设也出现在文献[28,29]中.

不失一般性,设 $n_i$ 为任意MN,用极坐标表示其位置 $P_i^{(0)}(r_i, \theta_i^{(0)})$ ,它在圆周表示为 $C_i$ ,如图4(a).经过暂停时间 $t_i$ 后, $n_i$ 以逆时针方向和速度 $v_i$ 沿 $C_i$ 运动到第1个目的点 $P_i^{(1)}(r_i, \theta_i^{(0)} + \varphi_i)$ ,其中, $\varphi_i$ 是步角.这样,该MN就完成了第1个step.接着,在 $P_i^{(1)}(r_i, \theta_i^{(0)} + \varphi_i)$ 处暂停 $t_i$ 后,以同样方式移动到第2个目的点 $P_i^{(2)}(r_i, \theta_i^{(0)} + 2\varphi_i)$ ,完成第2个step.依此类推,直到它完成了在该圆周上的移动.此时,该MN可以利用事先制定的策略(如由外向里或由里向外)来确定下一个圆周 $C'_i(C'_i \neq C_i)$ ,通过径向移动来调整它距 $n_0$ 的距离,到达指定的 $C'_i$ 并以上述方式进行移动,直到任务完成为止.注意,为了避免急转弯现象, $n_i$ 在从 $C_i$ 到 $C'_i$ 两处过渡点(如图4(b)所示的A、B点)按照最小转弯半径(minimum turning radius)<sup>[29]</sup>来移动.为方便起见,我们将上述 $P_i^{(k)}(r_i, \theta_i^{(0)} + k\varphi_i)$  ( $k=0,1,2,\dots$ )称为步点,则 $n_i$ 的步时为 $ST_i = \varphi_i r_i / v_i + t_i$ ,步长为 $L_i = \varphi_i r_i$ .

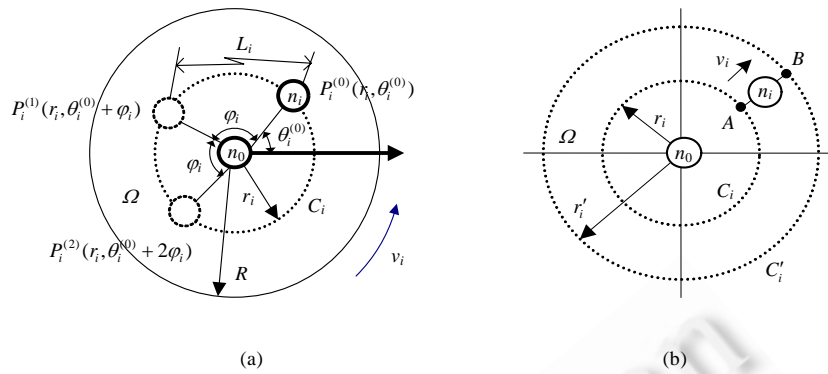


Fig.4 CCMM model  
图 4 CCMM 模型

### 3.2 模型比较

从模型定义的角度来看,CCMM 模型和 CMBM 既有区别又有联系.区别在于:MN 在 CCMM 中可按照事先规划的策略(如航拍扫描等)有目的地进行移动,更具有实际应用背景;而 CMBM 中的 MN 随机地、毫无目的地移动,缺乏应用价值.联系在于:CCMM 是 CMBM 的特殊形式;而 CMBM 是 CCMM 的抽象.它们都具有曲线运动的形式,这和典型的 RWPM 模型具有本质的不同.此外,CCMM 与 CMBM 和 RWPM 相比,由于 MN 在移动过程中能够进行平滑过渡,而不会出现“急转弯”和“突然停止”现象.

## 4 仿真实验结果及其分析

本节以仿真的方法来验证第 2 节所提出理论方法的有效性,并分别对 RWPM,RMBM 和 CCMM 这 3 种移动模型的动态特性进行评估.仿真采用 NS2<sup>[30]</sup>工具,自行编写几个 MM 的模块并集成到了 NS2 之中,配合相关的数据分析进行仿真结果验证.

### 4.1 仿真环境的设置

我们分别在 NS2 中实现了上述 3 种移动模型,并采用两种不同数量节点的模拟场景:(1) 11 个节点,即 Ad Hoc 网络的节点由 1 个静止节点( $n_0$ )和 10 个 MN( $n_1 \sim n_{10}$ )组成;(2) 21 个节点,即 Ad Hoc 网络的节点由 1 个静止节点( $n_0$ )和 20 个 MN( $n_1 \sim n_{20}$ )组成.其中, $n_0$  在整个模拟期间( $T=1200s$ )始终位于圆心.MN 的移动区域为  $R=1000m$  的圆  $\Omega$  内,所有节点具有相同的无线电覆盖半径  $R_c=250m$ .在初始时,MN 的位置随机部署在移动区域内.实验所涉及到的其他参数见表 1.

Table 1 Simulation parameters  
表 1 仿真参数

Parameter	Case	
	Case 1	Case 2
Number of nodes	11	21
Propagation model	Free space	
Transmission range	250 m	
Simulation time	1200 s	
Node's mobility speed	0~15 m/s	
Node pause time	0~10 seconds	

### 4.2 节点位置分布的实验结果及其分析

为了评估节点位置在移动区域内的分布状况,我们将移动区域均匀地划分为  $20 \times 20$  的网格(即  $m=10$ ).图 5 和图 6 分别是 3 个 MM 在不同场景下的节点位置概率分布状况.

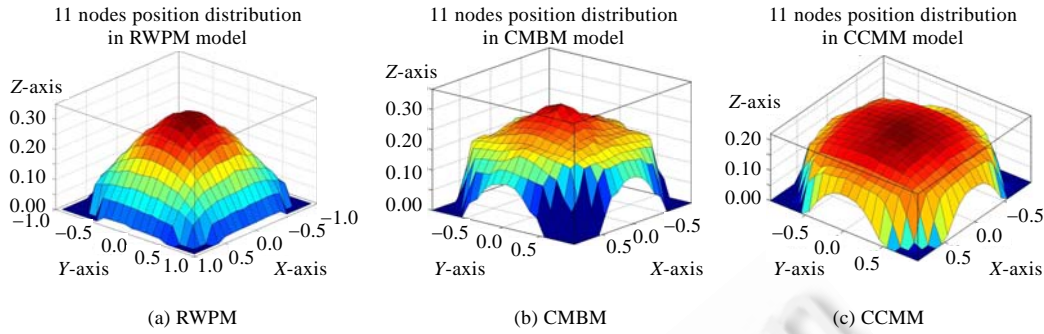


Fig.5 Distribution of the MNs under case 1

图 5 场景 1 下的节点位置分布状况

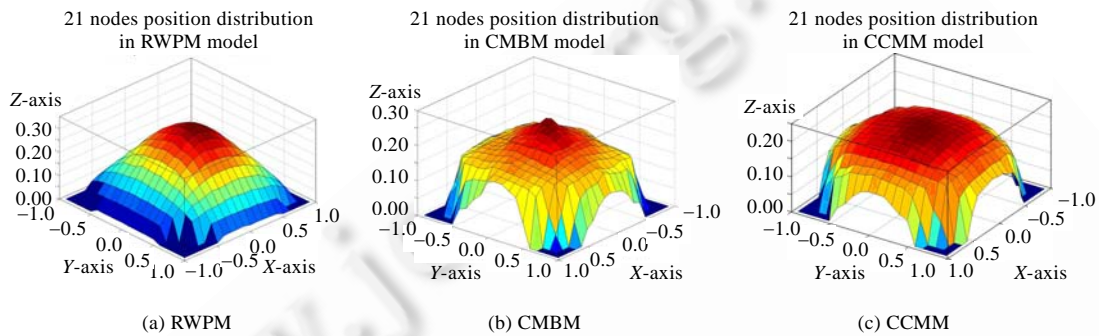


Fig.6 Distribution of the MNs under case 2

图 6 场景 2 下的节点位置分布状况

从图 5 和图 6 看出,采用第 2.3 节所提出的 MN 位置空间分布评估算法,几种 MM 下的节点位置概率分布状况分别在不同的场景下基本保持一致,这说明了该算法能够适于不同的 MM,而且具有通用性.对于 RWPM 模型,在移动区域中心附近的节点位置分布的概率明显要大于其在边缘区域概率,这种分布状况和已有研究所发现的边界效应现象相吻合.相对于 RWPM,尽管 CMBM 下的节点位置分布概率趋于均匀,但在中心区域的概率还是明显大于边缘区域的概率.这主要是由于 CMBM 模型本身所致,MN 在半径方向的调整期间选择经过中心方向的概率要大于其相反方向的概率.而在 CCMM 模型中,MN 在每个 step 中克服了其在 CMBM 模型中不完整的圆周曲线移动模式,因此,相对于 RWPM 和 CMBM 模型,节点位置分布的概率在 CCMM 模型下几乎完全区域均匀,这主要是由于 CCMM 模型克服了其他两种模型的缺陷.

根据图 5 和图 6 的实验结果,我们分别对这 3 种 MM 下的节点位置分布进行了量化评估,其结果见表 2.该表反映了节点在移动区域内分布的均匀程度及其在 3 种 MM 下的显著差异性.通过比较可知,度量值  $\alpha_{max}$  和  $\bar{\alpha}$  在 RWPM 模型下最大,而在 CCMM 模型中最小,并且这种差异程度在 Case 1 和 Case 2 中均基本保持一致.这说明了第 2.3 节中的算法能够对不同 MM 的动态特性进行可量化地评估.

Table 2 Elevation results of the MN distribution in different MM with different cases

表 2 几种 MM 下的节点位置分布评估结果

MM	Case 1		Case 2	
	$\alpha_{max}$ (%)	$\bar{\alpha}$ (%)	$\alpha_{max}$ (%)	$\bar{\alpha}$ (%)
RWPM	27	16	28	18
CMBM	15	13	17	14
CCMM	8	2	9	3

### 4.3 网络拓扑时空动态特性的实验结果及其分析

在 Ad Hoc 网络拓扑空间动态特性的实验中,我们利用中心静止节点  $n_0$ (参考点)的有利位置来观测不同 MM 下的动态性.尽管典型的 RWPM 模型中并无中心静止节点,但部署该节点并未对模型中移动节点的动态特性造成任何影响.此外,在实际应用中,通过部署  $n_0$  能够增强区域内 MN 的连通性和整个网络的吞吐量.

#### 4.3.1 空间动态特性评估

图 7 和图 8 分别反映了不同场景下各 MM 下的网络拓扑的空间动态特性评估结果.

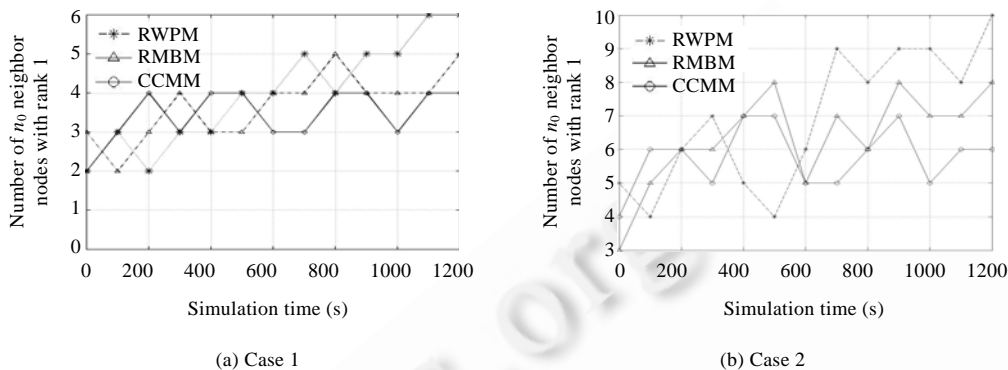


Fig.7 Graphs of the number ( $N_{\eta(1)}$ ) of  $n_0$  neighbor nodes with rank 1

图 7 节点  $n_0$  的一阶邻居节点数( $N_{\eta(1)}$ )示意图

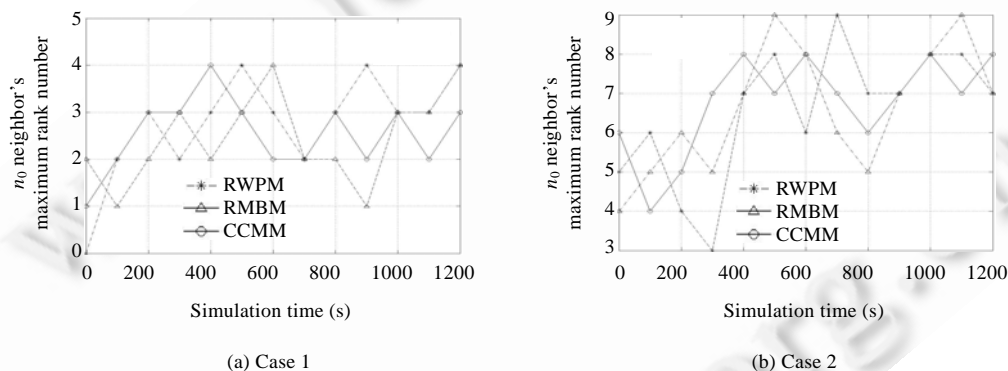


Fig.8 Graphs of the maximum ranks ( $\eta_{max}$ ) of  $n_0$  neighbors

图 8 节点  $n_0$  的各邻居最高阶数( $\eta_{max}$ )示意图

如图 7(a)所示,在节点数较小的情况下(case 1),随着仿真时间的增加,CCMM 模型的  $N_{\eta(1)}$ 能够保持较稳定的节点数(3~4),RBMB 模型  $N_{\eta(1)}$ 的数量则表现出较差的稳定性(3~5),RWPM 模型  $N_{\eta(1)}$ 值的稳定性最差(3~6).这种结果一方面表明了 CCMM 模型较其他两种 MM 具有较好的网络连通性,另一方面也说明了 CCMM 模型在节点空间分布上较其他两种 MM 明显趋于均匀,这和第 4.2 节中的实验结果相吻合.此外,由于 Ad Hoc 网络的空间复用问题,网络节点不能太密集.当一个节点和另一个节点进行数据传输时,为了避免冲突,该节点一跳内的其他节点只能处于等待之中,从而导致了网络吞吐量的下降<sup>[31]</sup>.因此在实际应用中,CCMM 较其他两种 MM 可使 Ad Hoc 网络获得更高的吞吐量.在节点数较多的情况下,如图 7(b)所示,我们同样可以得出上述的结论.

这里应该注意:(1) 随着 MN 数量的增加,Ad Hoc 网络动态性随之增强<sup>[32]</sup>,因此,3 种 MM 在 Case 2 中的  $N_{\eta(1)}$ 值分别较 Case 1 中对应的值要大,其增幅分别为 71%,75%和 78%;(2) 3 种  $N_{\eta(1)}$ 值在两种场景下的仿真初期(0s~200s)表现出不同程度的剧烈变化,这主要是由于节点在仿真初始的随机部署所致.

这几种 MM 在两种场景下  $n_0$  的邻居节点最大阶数( $\eta_{\max}$ )随时间变化的情况如图 8 所示.在 Case 1 中(图 8(a)),除过仿真的初期阶段(0s~200s),CCMM 模型下的  $\eta_{\max}$  值大部分时间都基本稳定在 2~3 之间,RBMM 和 RWPM 模型的  $\eta_{\max}$  值都出现了较大幅度的波动(1~4).在 Case 2 中(图 8(b)),由于 Ad Hoc 网络拓扑及其动态性随着节点数的增加而增大<sup>[33]</sup>,3 种 MM 的  $\eta_{\max}$  值及其变化明显大于它们在 Case 1 下的值,但我们依然能够发现:(1)  $\eta_{\max}$  值在 CCMM 模型下要比它在其他两种 MM 下稳定许多,这表明网络拓扑在 CCMM 下具有较好的动态特性;(2)  $\eta_{\max}$  值在 CCMM 模型下大于它在 RWPM 模型下的值,这从侧面印证了后者具有较强的边界效应;(3) 尽管 RBMM 模型的  $\eta_{\max}$  值大于 CCMM 模型的  $\eta_{\max}$  值,但前者波动范围更大,明显不利于网络的应用.

从上述评估结果可以看出,Ad Hoc 网络拓扑的空间动态特性在 CCMM 模型下要优于其在 RWPM 和 RBMM 模型的空间动态特性.

#### 4.3.2 时间动态特性评估

图 9 和图 10 分别反映了不同场景下各 MM 的时间动态特性评估结果.

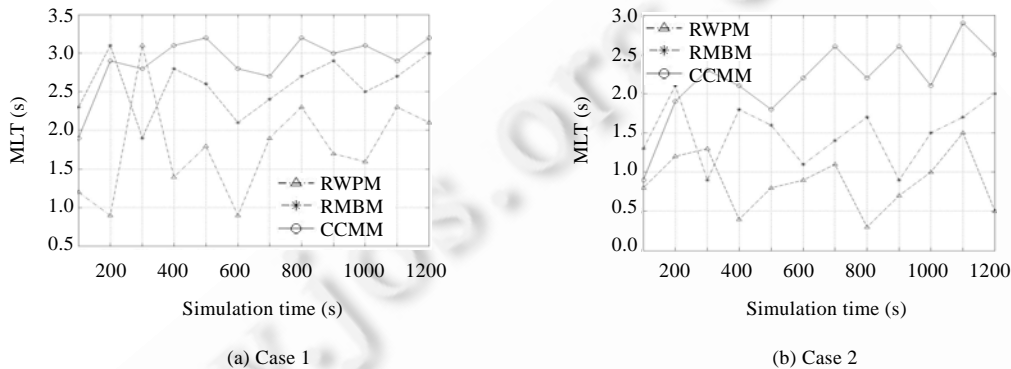


Fig.9 Graphs of the MLTs

图 9 各 MLT 示意图

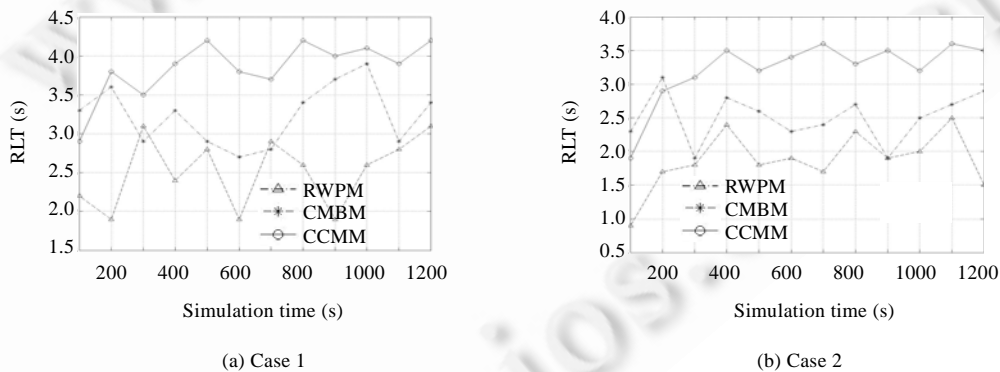


Fig.10 Graphs of the RLTs

图 10 各 RLT 示意图

图 9(a)反映了 3 种 MM 下的网络 MLT 随时间变化的过程.在仿真进行 350s 之后,各时刻的 MLT 值按照 CCMM,RBMM 和 RWPM 模型顺序依次降低,而 MLT 的变化幅度却依次增强.类似地,我们从图 9(b)可以看出,MLT 值在仿真时间 330s 之后显示了同样的变化规律.此外,在节点数较大的情况下,3 种 MM 下的 MLT 值明显变小,其原因在于网络动态性随着节点的增多而增强,这与网络的空间动态性变化相一致.

为了验证 MLT 值的合理性和正确性,我们给出了 MLT 在 3 种 MM 下所对应的真实值(RLT),如图 10 所示.

可以看出,3种MM的RLT值在两种场景下(如图10(a)和图10(b)所示)的变化规律和它们所对应的MLT相吻合,并且各MLT都处于其RLT范围之内.这一方面说明了MLT能够描述MM的时间动态特性,另一方面也验证了第2.4节分析模型及其算法的有效性.

综合3种MM在不同的网络场景下的时空动态特性评估结果,我们可以得出如下的结论:CCMM模型的动态性最优,RWPM的时空动态性最差,而RMBM介于前两种模型之间.造成这种结果的原因,正是由于它们自身的移动模式所致.

## 5 结束语

移动模型具有复杂的、相关联的时间动态特性和空间动态特性,对其动态特性的评估是Ad Hoc网络相关应用研究中的基本问题.本文提出了一种基于可量化时空动态特性的Ad Hoc网络移动模型评估方法,通过对节点位置的空间分布、网络拓扑时间和空间动态特性建模,给出了相应的评估算法.该方法能够独立于现有的移动模型,因而具有通用性.为了对该方法进行验证,本文利用仿真软件对所提出的圆周曲线移动模型及现有的几种移动模型进行了动态特性评估,仿真结果表明了评估方法的有效性,同时显示出移动模型具有良好动态特性.

下一步工作将该方法运用到Ad Hoc网络的其他应用研究中.例如,根据各种移动模型的时空动态特性来研究网络路由协议的优化问题、网络性能的评估研究等.

**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行表示衷心的感谢.同时也感谢西安交通大学郑庆华教授、高峰教授、赵银亮教授及蔡忠副教授等人所给予的关怀和帮助.

## References:

- [1] Gowrishankar S, Basavaraju TG, Sarkar SK. Effect of random mobility models pattern in mobile ad hoc networks. *Int'l Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 2007,7(6):160–164.
- [2] Lin GL, Noubir G, Rajaraman R. Mobility models for ad hoc network simulation. In: *Proc. of the 23rd IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2004)*. Hong Kong: IEEE Communication Society, 2004. 454–463. [doi: 10.1109/INFOCOM.2004.1354517]
- [3] Zhang HY, Xu D, Liu YH, Cai XP. A smooth Gauss-Semi-Markov mobility model for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2008,19(7):1707–1715 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1707.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01707]
- [4] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communication & Mobile Computing*, 2002,2(5):483–502. [doi: 10.1002/wcm.72]
- [5] Pazand B, McDonald C. A critique of mobility models for wireless network simulation. In: Roger L, Morshed U, Sid R, Thuy L, eds. *Proc. of the 6th IEEE/ACIS Int'l Conf. on Computer and Information Science (ICIS 2007)*. Melbourne: IEEE Computer Society, 2007. 141–146. [doi: 10.1109/ICIS.2007.15]
- [6] Souley AKH, Cherkaoui S. Advanced mobility models for ad hoc network simulations. In: Dini P, Lorenz P, Soulhi S, Cherkaoui S, Mynbaev D, Rodrigues JJ, Hafid A, Zepernice HJ, Zheng J, eds. *Proc. of the 2005 Systems Communications*. Montreal: IEEE Computer Society, 2005. 50–55. [doi: 10.1109/ICW.2005.22]
- [7] Yoon J, Liu M, Noble B. Random waypoint considered harmful. In: *Proc. of the 22nd IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2003)*. San Francisco: IEEE Communication Society, 2003. 1312–1321. [doi: 10.1109/INFOCOM.2003.1208967]
- [8] Chiang KH, Shenoy N. A 2-D random-walk mobility model for location-management studies in wireless networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2004,53(2):413–424. [doi: 10.1109/TVT.2004.823544]
- [9] Nain P, Towsley D, Liu BY, Liu Z. Properties of random direction models. In: *Proc. of the 24th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2005)*. Miami: IEEE Communication Society, 2005. 1897–1907. [doi: 10.1109/INFOCOM.2005.1498468]

- [10] Liang B, Haas ZJ. Predictive distance-based mobility management for PCS networks. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM'99). New York: IEEE Communication Society, 1999. 1377–1384. [doi: 10.1109/INFCOM.1999.752157]
- [11] Cho S, Hayes JP. Impact of mobility on connection stability in ad hoc networks. In: Proc. of the 2005 IEEE Communication and Networking Conf. (WCNC 2005). New Orleans: IEEE Communication Society, 2005. 1650–1656. [doi: 10.1109/WCNC.2005.1424761]
- [12] Bettstetter C, Resta G, Santi P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc network. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003,2(3):257–269. [doi: 10.1109/TMC.2003.1233531]
- [13] Campos CAV, Otero DC, de Moraes LFM. Realistic individual mobility Markovian models for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 2004 IEEE Communication and Networking Conf. (WCNC 2004). Atlanta: IEEE Communication Society, 2005. 1980–1985. [doi: 10.1109/WCNC.2004.1311389]
- [14] Wang W, Cai WD, Wang BZ, Li YJ, Tian GL. Research on a mobility model based on circle movement in ad hoc network. Journal of Computer Research and Development, 2007,44(6):932–938 (in Chinese with English abstract).
- [15] Wang W, Guan XH, Wang BZ, Wang YP. A novel mobility model based on semi-random circular movement in mobile ad hoc networks. Information Sciences, 2010,180(3):399–413. [doi: 10.1016/j.ins.2009.10.001]
- [16] Navidi W, Camp T. Stationary distributions for the random waypoint mobility model. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004, 3(1):99–108. [doi: 10.1109/TMC.2004.1261820]
- [17] Shi R, Yang XZ. Research on the node spatial probabilistic distribution of the random waypoint mobility model for ad hoc network. Journal of Computer Research and Development, 2005,42(12):2056–2062 (in Chinese with English abstract).
- [18] Shi R, Yang XZ. Research on node space probabilistic distribution according to random direction mobility model in ad hoc network. Journal of Computer Research and Development, 2004,41(7):1166–1173 (in Chinese with English abstract).
- [19] Gerharz M, de Waal C, Frank M, Martini P. Link stability in mobile wireless ad hoc networks. In: Jacobs A, ed. Proc. of the 27th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks. Los Alamitos: IEEE Press, 2002. 30–39. [doi: 10.1109/LCN.2002.1181761]
- [20] Sadagopan N, Bai F, Krishnamachari B, Helmy A. PATHS: Analysis of PATH duration statistics and their impact on reactive MANET routing protocols. In: Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). Annapolis: ACM Press, 2003. 246–256. [doi: 10.1145/778415.778444]
- [21] Wei XH, Chen GL, Wan YY, Zhang XM. Longest lifetime path in mobile ad hoc networks. Journal of Software, 2006,17(3): 498–508 (in English with Chinese abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/498.htm> [doi: 10.1360/jos170498]
- [22] Cai YB, Li HB, Li ZC, Xie GG. A method of selecting steady path based on neighbor change ratio in mobile ad hoc networks. Journal of Software, 2007,18(3):681–692 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/681.htm> [doi: 10.1360/jos180681]
- [23] Chen LJ, Sun T, Yang G, Sanadidi MY, Gerla M. Ad hoc probe: Path capacity probing in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Conf. on Wireless Internet (WICON 2005). Budapest: IEEE Communication Society, 2005. 156–163. [doi : 10.1109/WICON.2005.7]
- [24] RoyChoudhury R, Bandyopadhyay S, Paul K. A distributed mechanism for topology discovery in ad hoc wireless networks using mobile agents. In: Proc. of the 1st Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2000). Massachusetts: IEEE Press, 2000. 145–146. [doi: 10.1109/MOBHOC.2000.869229]
- [25] Wang W, Cai WD, Wang BZ, Li YJ, Tian GL. Mobile ad hoc network delay tomography. In: Proc. of the 2007 IEEE Int'l Workshop on Anti-counterfeiting Security, Identification. Xiamen: IEEE Press, 2007. 365–370. [doi: 10.1109/IWASID.2007.373657]
- [26] Johnsson A, Björkman M, Melander B. A study of dispersion-based measurement methods in IEEE 802.11 ad-hoc networks. In: d'Auriol BJ, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Communication in Computing. Las Vegas: CSREA Press, 2004. 227–230.
- [27] Kuiper E, Nadjm-Tehrani S. Mobility models for UAV group reconnaissance applications. In: Dini P, Ahlund C, Dini C, Borcoci E, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Wireless and Mobile Communications. Bucharest: IEEE Computer Society, 2006. 33–33.



- [28] Yan J, Yan L, Minai AA, Polycarpou MM. Balancing search and target response in cooperative unmanned aerial vehicle (UAV) teams. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2006,36(3):571–587. [doi: 10.1109/TSMCB.2005.861881]
- [29] Ioannidou K, Milani A. Distributed aerial scanning in mobile ad-hoc networks. In: Davide F, ed. *Proc. of the 1st Int'l Conf. on Autonomic Computing and Communication Systems*. Rome: ICST Press, 2007. 1–10.
- [30] The network simulator—ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [31] Papadopoulos F, Psounis K. Predicting the performance of mobile ad hoc networks using scaled-down replicas. In: Durrani TS, ed. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2007), Symp. on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Glasgow: IEEE Press, 2007. 3928–3935. [doi: 10.1109/ICC.2007.647]
- [32] Ishibashi B, Boutaba R. Topology and mobility considerations in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2005,3(6): 762–776. [doi: 10.1016/j.adhoc.2004.03.013]
- [33] Donnet B, Raoult P, Friedman T, Crovella M. Efficient algorithms for large-scale topology discovery. In: Eager D, ed. *Proc. of the 2005 ACM SIGMETRICS Int'l Conf. on Measurement and Modeling of Computer Systems*. Banff: ACM Press, 2005. 327–338. [doi: 10.1145/1064212.1064256]

#### 附中文参考文献:

- [3] 张衡阳,许丹,刘云辉,蔡宣平.一种平滑高斯半马尔可夫传感器网络移动模型. *软件学报*,2008,19(7):1707–1715. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1707.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01707]
- [14] 王伟,蔡皖东,王备战,李勇军,田广利.基于圆周运动的自组网移动模型研究. *计算机研究与发展*,2007,44(6):932–938.
- [17] 时锐,杨孝宗.自组网 Random Waypoint 移动模型节点空间概率分布的研究. *计算机研究与发展*,2005,42(12):2056–2062.
- [18] 时锐,杨孝宗.自组网 Random Direction 移动模型点空间概率分布的研究. *计算机研究与发展*,2004,41(7):1166–1173.
- [21] 魏晓海,陈国良,万颖瑜,张信明.移动自组网中的最长生命期路径. *软件学报*,2006,17(3):498–508. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/498.htm> [doi: 10.1360/jos170498]
- [22] 蔡一兵,李海波,李忠诚,谢高岗.移动自组网基于邻居变化率稳定路径选择方法. *软件学报*,2007,18(3):681–692. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/681.htm> [doi: 10.1360/jos180681]



王伟(1969—),男,陕西乾县人,博士,CCF 会员,主要研究领域为网络性能评估,网络信息安全.



王备战(1965—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为分布计算系统,数据仓库.



管晓宏(1955—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络安全,系统优化与调度.



王亚平(1981—),女,博士生,主要研究领域为数学规划,分布式计算.