

一种Ad Hoc网络群组移动模型^{*}

彭辉⁺, 沈林成, 卜彦龙, 王林

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

Group Mobility Model for Ad Hoc Networks

PENG Hui⁺, SHEN Lin-Cheng, BU Yan-Long, WAN Lin

(School of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: E-mail: penghui.ph@gmail.com

Peng H, Shen LC, Bu YL, Wan L. Group mobility model for ad hoc networks. *Journal of Software*, 2008,19(11):2999-3010. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2999.htm>

Abstract: This paper makes a full-scale introduction to the advancement of research on group mobility model and analyses characteristics and the application range of different models. Most of the existing group mobility models exhibit certain drawbacks in describing the group movement behaviors. A Gibbs sampler based simulated annealing group mobility (GGM) model is proposed to address this deficiency. By simulation comparison with reference point group mobility (RPGM) model, this paper analyzes the impact of two models on Ad Hoc network protocol performance. Experimental results show that the proposed GGM model can describe three different behaviors of group movements effectively, which are group gathering, dispersion, and linear formation, by choosing Gibbs potential functions. The simulation also indicates that different group mobility models have different impact on the performance evaluation of ad hoc network protocol.

Key words: mobile ad hoc network; group mobility model; group behavior; Gibbs potential function; simulated annealing

摘要: 全面介绍了当前群组移动模型的研究进展,分析了不同群组移动模型的特点和应用范围,针对现有移动模型不能有效反映群组节点运动过程中行为特性的不足,提出了基于 Gibbs 分布模拟退火的群组移动(Gibbs sampler based simulated annealing group mobility,简称 GGM)模型,并与目前广泛采用的参考点群组移动(reference point group mobility,简称 RPGM)模型进行仿真比较,分析了两种群组移动模型对网络协议性能评价与网络拓扑的影响。仿真结果表明,通过选择不同的 Gibbs 势函数,GGM 模型能够有效描述群体运动过程中的聚集行为、分散行为和列队行为;模型比较的结果也表明,不同的移动模型对 Ad Hoc 网络协议性能具有不同的影响。

关键词: 移动自组织网络;群组移动模型;群体行为;Gibbs 势函数;模拟退火

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.G5130801 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Postgraduate Innovation Foundation of the National University of Defense Technology of China under Grant No.B080304 (国防科学技术大学优秀研究生创新基金)

Received 2006-11-28; Accepted 2007-06-29

移动 Ad Hoc 网络(mobile ad-hoc network,简称 MANET)是一种具有高度动态拓扑结构、节点任意移动的组织网络,它无须架设网络基础设施,可快速展开,抗毁性强,近年来广泛应用于战场通信、抢险救灾、野外科考等领域.未来的移动 Ad Hoc 网络将面临各种各样的应用场合,包括移动传感器网络(mobile sensor network)^[1]、车载移动自组网(vehicular ad hoc networks,简称 VANETS)^[2]、多无人机集群(swarm of UAV (unmanned aerial vehicle))^[3]组成的战术互联网等等.对于不同的应用场合,Ad Hoc 网络的节点表现出迥异的移动特征.例如,在传感器网络中,大部分节点移动缓慢甚至保持静止;而在多无人机构成的战术互联网中,节点则以很高的速度运动.不同的节点移动模型对网络协议的性能评价具有不同的影响^[4],因此,为了达到最好的网络设计性能,在研究网络协议和进行网络设计时,必须选择合适的移动模型.

针对 Ad Hoc 网络仿真,目前已经提出了多种节点移动模型,每种模型中节点的运动特征各不相同.按照节点之间的移动相关性,可以将现有移动模型分为两种类型^[4,5]:实体移动模型和群组移动模型.实体移动模型侧重于反映各个节点互不相干的独立运动,其单个节点的运动方式和状态独立于其他节点,如随机行走模型(random walk model)^[4]和随机点模型(random waypoint model)^[4].群组移动模型则侧重于描述组内节点的相对运动,强调节点作为群体之一有着共同的移动规律,如参考点群组移动(reference point group mobility,简称 RPGM)模型^[6].相对于实体移动模型,群组移动模型更能反映现实世界中大规模实体之间的运动联系.因此,本文主要针对 Ad Hoc 网络群组移动模型展开研究.

群组移动模型应反映 Ad Hoc 网络群体节点的真实特性^[4,6],包括节点的移动特性和群体的行为特性.节点移动特性反映了移动实体的运动图样,包括移动节点的位置、速度和加速度随时间变化的规律;群体行为特性则描述了多个自治节点共同运动时,整体所表现出来的趋势和特点,如群体节点的聚合和离散行为等.目前所提出的大多数群组移动模型集中于反映节点的移动特性,致力于描述贴近现实的实体运动轨迹,忽略了大规模节点运动时所表现出来的群体行为特性.而在未来 Ad Hoc 网络的应用场合中,群组节点在区域内的运动行将与特定任务紧密关联:组内节点的聚合行为反映了大规模节点在某一地点的汇集,如大规模无人机在指定空域的编队会合任务;组内节点的离散行为则描述大规模移动节点如何在任务区域内进行分散和展开,如大规模无人机集群在敌空域内执行区域搜索和侦察任务^[7].在不同的任务目标下,群体的运动行为是不同的,由此带来网络拓扑的变化也各不相同,现有群组移动模型都不能有效地描述上述行为特性.

针对以上问题,本文提出了一种 Ad Hoc 网络群组移动模型,即基于 Gibbs 分布模拟退火的群组移动模型(Gibbs sampler based simulated annealing group mobility,简称 GGM).该模型在群组节点运动的基础上添加“群体行为”选项,包括群组节点的聚集行为、分散行为和列队行为,通过选择不同的 Gibbs 势函数来反映不同的群体行为目标,节点的运动则采用改进的基于 Gibbs 分布模拟退火的节点移动算法来控制,从而有效地控制群体节点向势能函数值最小的网络拓扑方向运动,使得移动模型能够描述不同应用场合下移动节点的群体行为特性.

本文第 1 节分析和总结目前国内外所提出的各种 Ad Hoc 网络群组移动模型.在此基础上,第 2 节提出基于 Gibbs 分布模拟退火的群组移动模型.第 3 节利用 NS-2 网络仿真工具对所提出的群组移动模型进行网络仿真,并与目前最常用的参考点群组移动模型(RPGM)进行比较和分析.第 4 节给出结论和后续工作展望.

1 Ad Hoc 群组移动模型

在 Ad Hoc 网络群组移动模型中,移动节点被有组织地分群,节点的运动方式和状态依赖于组内其他节点.目前,国内外研究学者已经提出了多种群组移动模型,下面对现有群组移动模型进行简要的介绍和分析.

1.1 指数相关随机移动模型

指数相关随机移动模型(exponentially correlated random mobility model,简称 ECRM)是最早提出来的群组节点运动模型之一^[4,6].该模型基于运动函数控制节点的移动,通过调整不同的函数参数以实现不同的群体节点运动.假定 $\vec{b}(t)$ 表示 t 时刻的节点位置,则 $t+1$ 时刻节点的位置 $\vec{b}(t+1)$ 可以通过以下运动函数计算获得:

$$b(t+1) = b(t)e^{-1/\tau} + (\delta\sqrt{1-(e^{-1/\tau})^2})r \quad (1)$$

其中, $b(t)=(r, \theta)$ 表示一个节点在 t 时刻的位置描述; τ 用来调整节点从 t 时刻到 $t+1$ 时刻的位置变化率, τ 值越小意味着节点位置改变越大; r 为高斯随机变量, 描述新位置的随机偏差, 方差为 σ . 不同的群组, 其参数 τ 和 σ 的取值不同, 从而产生不同的群组移动模式. 指数相关随机移动模型的缺点是需要预先定义网络中所有群组的 (τ, σ) 取值, 因而很难找到合适的 (τ, σ) 值以产生所需要的群组运动^[4].

1.2 参考点群组移动模型

参考点群组移动模型^[6]是目前 Ad hoc 网络仿真中最常用的群组移动模型. 该模型可以描述多组移动节点的随机运动, 如图 1、图 2 所示, RPGM 模型具有如下特点^[6]:

- 1) 每个群组都有一个逻辑中心, 逻辑中心可以指定也可以完全随机, 移动节点分布在逻辑中心范围内. 逻辑中心的移动属性定义了群组节点的运动方式, 包括位置、速度、方向和加速度等. 群组的运动轨迹和位移矢量由逻辑中心的轨迹和矢量提供, 一般逻辑中心的移动采用实体移动模型, 如随机点模型等.
- 2) 群组内每个节点都被分配一个参考点(reference point, 简称 RP), 参考点跟随群组的移动而发生位置变化. 节点自由分布在参考点周围并在参考点范围内独立移动, 参考点为节点提供配置参数.
- 3) 当参考点发生移动时, 首先参考点 $RP(t)$ 带着群组的位移矢量 GM (由逻辑中心的位移决定) 发生位移 $RP(t) \rightarrow RP(t+1)$. 然后, 新的节点位置由随机的位移矢量 RM 加到新的参考点 $RP(t+1)$ 生成, 矢量 RM 独立于移动节点以前的位置, 其大小是参考点地理范围半径的随机量, 方向 $0^\circ \sim 360^\circ$ 随机.

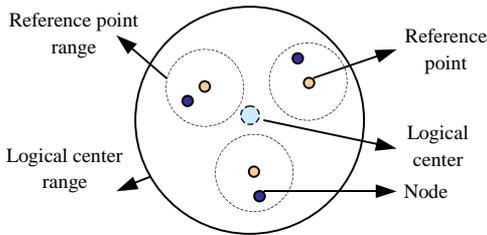


Fig.1 RPGM model
图 1 RPGM 模型

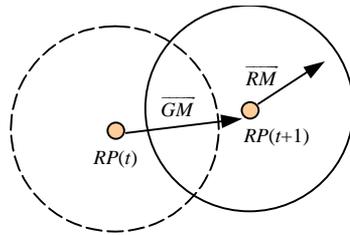


Fig.2 Sketch map of reference point displacement
图 2 参考点位移示意图

RPGM 模型保留了单个移动节点的随机运动特征, 同时有效地反映了群组节点的整体移动特性. 针对不同的应用场合和特点, 国内外学者提出了多种基于 RPGM 模型的改进模型, 这些模型都部分地来源于 RPGM 模型或者具有 RPGM 模型的一些基本特征.

1) 参考速度群组移动模型(reference velocity group mobility model, 简称 RVGM)^[8]

在该模型中, 节点的运动特征由速度 $V=(v_x, v_y)$ 来描述, 其中, v_x, v_y 为节点在 x 和 y 方向的分速度. 每个群组都有一个特征组速度, 组内移动节点的速度在特征组速度的小范围内随机变化, 因此, 特征组速度也是该群组的平均速度. 当群体节点移动时, 第 j 组第 i 个节点的运动 $V_{j,i}(t)$ 可以描述为 $V_{j,i}(t)=W_j(t)+U_{j,i}(t)$, 其中, $W_j(t)$ 为群组 j 的特征组速度, $U_{j,i}(t)$ 为节点 i 相对于 $W_j(t)$ 的速度偏差. $W_j(t)$ 和 $U_{j,i}(t)$ 是服从一定分布的随机变量, 选择不同的分布函数(如高斯分布等)会得到不同的群组移动模型. 由此可见, 参考速度群组移动模型是 RPGM 模型的速度描述形式, 可以通过公式(2)实现转换:

$$V_{j,i}(t) = \frac{dX_{j,i}(t)}{dt} = \frac{dY_j(t)}{dt} + \frac{dZ_{j,i}(t)}{dt} = W_j(t) + U_{j,i}(t) \tag{2}$$

其中, $X_{j,i}(t)$ 表示第 j 组第 i 个节点位置, $Y_j(t)$ 为第 j 组参考点位置, $Z_{j,i}(t)$ 表示节点相对于参考点的位移.

2) 基于虚拟轨迹的移动模型(virtual track based group mobility model)^[9]

该模型在 RPGM 模型的基础上引入了“交换站(switch stations)”的概念. 交换站随机配置在节点的任务区域内, 交换站之间通过一定宽度的“虚拟轨迹(virtual tracks)”连接, 群组节点沿着虚拟轨迹在交换站之间运动. 群组内节点的运动通过设置参考点实现. 在交换站上, 大规模群组能够被分割成多个小规模群组, 并且向不同的交换站方向运动. 群组的分割与合并由不同的群组稳定值来控制. 该模型适合描述在公路网上运动的移动节点群组,

如车载移动自组网.

3) 队列移动模型(column mobility model)^[10,11]

该模型为群体追踪和搜索运动提供了一种合理描述.它表示一组移动节点被组织成一列纵队统一地向同一方向推进,在推进过程中,组内节点可以在各自参考点位置范围内随机徘徊.队列移动模型实际上是 RPGM 模型的特例,该模型中所有节点的参考点排成一列纵队.

4) 游牧团体移动模型(nomadic community mobility model)^[10,11]

该模型描述了一组移动节点共同从一个点移动到另一个点的过程.群组中个体节点在给定的参考点附近采用随机实体移动模型徘徊.实体移动模型的参数定义了该节点距离参考点的大小和方向.与 RPGM 模型不同,游牧团体移动模型中所有移动节点共用一个参考点.

5) 追逐移动模型(pursue mobility model)^[10,11]

该模型可以描述一组移动节点追逐一个特定的目标.相对于 RPGM 模型,在该模型下,参考点的随机运动方式受到目标点运动方式的影响,因此,移动节点的随机程度是受限制的,以保持被追逐移动节点的有效路径.追逐移动模型可适用于军事领域的 Ad hoc 组网.

6) 狭长的组移动模型(confined group mobility,简称 CGM)^[12]

该模型由国内学者提出,主要针对战场环境下的战术互联网应用,认为在作战部队的行军过程中,部队内部各个节点通常分布在一个相对狭长的地带.此时,RPGM 模型的组内节点的圆形分布将不能真实反映单位内部节点的移动相关性^[12],因此,CGM 模型对 RPGM 模型进行了改进.在 CGM 模型中,群组的运动也取决于逻辑中心和参考点,所不同的是,当参考点以运动矢量 \overline{GM} 从 $RP(t)$ 运动到 $RP(t+1)$ 后,偏移矢量 \overline{RM} 的选取规则不同,从而控制组内节点分布在以参考点为中心的矩形区域内.

1.3 群组力移动模型

群组力移动模型(group force mobility model)由 William 和 Huang 等人提出^[13],是一种结合了引力和斥力概念的群组移动模型.该模型借鉴了社会力(social force)的概念模型^[14],提出节点之间存在 3 种类型的“虚拟”群组力,即目标点对节点的吸引力、节点之间避碰的斥力和节点与边界之间的斥力,并利用服从指数分布的群组力来调节移动群组节点的运动,两节点之间的斥力随着节点间距离的增加呈指数下降.当节点间距离增大到某个距离阈值时,斥力转化为引力.

群组力模型中初始的节点速度计算与 RVGM 模型类似,每个群组设定一个组速度,组内移动节点的速度在组速度取值小范围内随机变化.在节点移动过程中,每隔一段时间,所有节点需要计算与其邻居节点之间的距离.当某个邻居节点的位置处于所设定的距离阈值范围内时,则计算两节点间的作用力.最后,通过综合作用力计算节点的当前速度.在群组力移动模型中,节点的运动能够适应环境的改变,该模型能够较为真实地模拟现实世界中节点运动过程中的避碰行为.但由于每个节点需要计算与其他所有节点的距离和作用力,因此,该模型计算负载较重,比较适合于小规模群组移动仿真.

1.4 参考区域群组移动模型

参考区域群组移动模型(reference region group mobility model,简称 RRGM)由 Ng 等人提出^[15].在该模型中,每个群组与一个参考区域(reference region)关联,群组节点向参考区域运动,当群组内所有节点到达该参考区域后,模型会产生新的参考区域位置.RRGM 模型定义了两种类型的群组:活动群组(active group)和等待群组(standby group).活动群组有确定的目标点,组内节点可以向参考区域运动或者在参考区域范围内运动;等待群组没有分配目标点,组内节点仅在当前区域内运动,直到该群组被分配目标点产生新的参考区域位置为止.

初始时,所有节点随机选择一个子群组加入,每个子群组随机选择目标点 (x_d, y_d) ,通过公式(3)、公式(4)计算每个子群组的参考区域位置 (x_i, y_i) .其中, (x_0, y_0) 为初始群组的中心位置, $0 < d_x, d_y < 1$ 用于描述参考区域相对于初始位置的远近, r 和 r' 为 $(0, 1)$ 范围内的随机变量.分配参考区域后,该群组中的节点将以速度 $v = (1+r'')v_0$ 向参考区域运动, v_0 为群组运动速度, r'' 表示微小扰动.当所有节点到达参考区域后,将在区域内持续运动一段时间,然后分配

新的参考区域 (x_{i+1}, y_{i+1}) ,新位置仍采用公式(3)、公式(4)迭代计算.

$$x_i = (x_d - x_0)d_x r' + x_0 \quad (3)$$

$$y_i = (y_d - y_0)d_y r' + y_0 \quad (4)$$

在 RRGGM 模型中,群组的分解通过设定新目标点来实现.在群组节点的运动过程中,如果出现新的目标点,则距离目标点最近的等待群组将变为活动群组,并向目标点运动;如果没有处于等待状态的群组,则从距离目标点最近的活动群组中随机选择一定数量的节点组成新的群组,根据公式(3)、公式(4)为当前群组确定参考区域位置并向该参考区域运动,从而实现组的分解.当一个群组到达目标点后,该群组将变为等待群组,与目标点范围内的其他等待群组合并成新的群组,并向距离最近的参考区域运动.

RRGGM 模型既描述了节点的运动,又描述了群组分解和群组合并行为,采用基于群组密度的方法来控制群组节点覆盖区域的大小,比较适合于军事行动、搜索和救援行动中的群组节点运动模拟.

1.5 事件驱动的群体移动模型

事件驱动的群体移动模型(event-driven mobility model,简称 EMM)最早由 Chang 提出^[16],是一种基于节点轨迹的移动模型.目前,该模型主要用来描述大规模移动用户的运动(例如,校园内所有学生的运动轨迹).Chang 通过观察现实世界中大规模移动用户的运动轨迹,发现节点的移动均是受到事件的驱动,例如开会、用餐等事件,这些事件导致节点在不同时间运动到不同地点,节点的位移由一连串“移动-停留”动作构成.基于此观点,EMM 模型采用改进的着色 Petri 网(meta CP-net)描述移动节点的 3 种基本“移动-停留”动作模式,然后结合节点的事件生成移动节点的着色 Petri 网(CP-net),最后通过 CP-net 基于一系列运动规则产生大规模节点的运动轨迹.目前,通过考察某校园内学生的移动情况,EMM 模型可以系统化地产生 6 780 名学生在校园里一天的位移情况^[16],比较适合于描述较长一个时期内大规模人群节点的运动轨迹.

综合上述分析可知,现有群组移动模型缺乏对节点运动过程中群体行为特性的描述,大部分模型如指数相关随机移动模型、RPGM 模型、群组力移动模型和 EMM 模型等,主要偏重对节点运动轨迹的模拟和合成;少数模型如参考区域群组移动模型和基于虚拟轨迹的移动模型虽然考虑了节点运动过程中的行为特性,但节点行为的随机性太大,模型无法有效控制,且所考虑的节点行为仅限于群组分割和群组合并,无法描述更为复杂的节点聚集行为、分散行为和列队行为.为了能够有效地描述群体节点的运动行为,需要设计新的群组移动模型,以反映真实的应用环境.

2 基于 Gibbs 分布模拟退火的群组移动模型

基于 Gibbs 分布模拟退火方法最早由 Baras 和 Tan 等人用于分布式机器人协同控制领域^[17],通过选择 Gibbs 势函数,该方法可以控制集群机器人的协同运动方式.借鉴该方法的基本思想,本文在移动模型的基础上添加了“群体行为”参数,并针对 3 种典型的群体行为选择相应的 Gibbs 势函数,改进了基于 Gibbs 分布的模拟退火算法,将其应用于群组节点的运动轨迹生成和群体行为描述.

2.1 Gibbs 分布和模拟退火

根据马尔可夫随机场理论^[18],设 S 为有限集,集合的势为 σ ,集合的元素为 s .相空间 \mathcal{A} 为有限集,随机变量 X_s 的集合 $X = \{X_s\}_{s \in S}$ 称为相位在 \mathcal{A} 取值的 S 上的随机场,其中, X_s 在相空间 \mathcal{A} 上取值,因此,随机场 X 可以看成在组态空间(configuration space) \mathcal{A}_S 上取值的随机变量. $x \in \mathcal{A}_S$ 称为系统的组态(configuration),描述为 $x = \{x_s, s \in S\}$,其中,对于任意的 $s \in S$ 都有 $x_s \in \mathcal{A}$.集合 S 的相邻系统(neighborhood system)记为 $N = \{N_s\}_{s \in S}$,其中, $N_s \subset S$,并且对于任意的 $s \in S$,满足以下条件,则称 N_s 为元素 s 的近邻:1) $s \notin N_s$;2) 当且仅当 $r \in N_s$ 时,有 $s \in N_r$.

当且仅当随机场 X 的联合概率分布满足公式(5)的 Gibbs 分布形式时,随机场 X 称为 Gibbs 随机场.

$$P(X = x) = \frac{e^{-U(x)/T(n)}}{Z}, \quad \forall x \in \mathcal{A}^S \quad (5)$$

其中, $T(n)$ 为温度变量, $U(x)$ 为系统组态 x 的势函数, $Z = \sum_{x \in \mathcal{A}^S} e^{-U(x)/T}$ 为归一化常量,称为 Gibbs 分布的配分常数.

由于 Gibbs 随机场可以归结为系统组态间按某种相邻系统 N 的势能函数^[19],从而可以用能量函数或 Gibbs 分布对系统组态进行描述.势能函数 $U(x)$ 通常采用公式(6)的描述形式,其中, $\Phi_s(x)$ 为 x 的势函数描述.

$$U(x) = \sum_{s \in A} \Phi_s(x) \quad (6)$$

针对上述能量函数形式,对能量函数的 Gibbs 分布作模拟退火.由于该 Gibbs 分布依赖于温度函数 $T(n)$,根据模拟退火的原理,当 n 充分大时,温度变量 T 趋向于 0,此时,Gibbs 分布将以大概率收敛到能量函数最小的组态所组成的集合中^[19].因此,选择不同的势能函数,采用 Gibbs 分布的模拟退火可以得到不同类型的系统组态.

基于上述思想,对应本文的领域问题,群组中所有移动节点位置所构成的集合可以看成是一个 Gibbs 随机场,在每一个离散时刻,节点位置所形成的网络拓扑可以看成是一个系统组态,设计不同的 Gibbs 势函数可以反映群组节点运动的全局目标.此时对 Gibbs 势函数作模拟退火,能够使群组节点的运动收敛到势能函数最小值的网络拓扑,即实现不同的群组行为特性.

2.2 群体行为与Gibbs势函数选择

目前,大多数群组移动模型都是基于二维平面的,为便于后续的比较,下面主要针对二维情况展开讨论.假定在二维平面环境 $N_x \times N_y$ 中,坐标为 (i, j) ,其中, $1 \leq i \leq N_x, 1 \leq j \leq N_y, N_x, N_y > 0$,群组内节点总数为 $K, x_k = (i_k, j_k)$ 表示节点 k 的坐标,每个移动节点的通信/传感器范围为 R_s ,节点移动速度为 v_m ,其中, $v_m \cdot \Delta t < R_s$,即在单位时间 Δt 内,节点的运动不能超出其感知范围.节点 k 可感知到 R_s 半径范围内的其他节点的位置和状态,位于感知范围内的节点称为节点 k 的邻居节点.每个节点的 v_m, R_s 取值可以不同.势能函数的形式为 $U(x) = \sum_k \Phi_k(x_k)$,其中, $x = \{x_k, 1 \leq k \leq K\}$ 为所有节点位置的集合,表示群组节点所形成的网络拓扑构型.因此,势函数 $U(x)$ 的值描述了节点构成的网络拓扑构型 x 的势能大小.

根据不同应用场合中群组移动节点的任务特点^[1-3],可以归纳出 3 种典型的群体行为:

- 1) 聚集行为:表现为分散的大规模移动节点向指定地点的汇集过程,例如战术部队的集结、作战飞机的编队汇合等.
- 2) 分散行为:表现为大规模移动节点在特定区域内的分散和展开过程,例如大规模无人机集群在敌空域内执行区域搜索和侦察任务.
- 3) 线性编队行为:表现为分散的大规模节点形成有规律的线性队形的过程.

由于不同的群体行为最终导致不同的网络拓扑构型 x ,根据第 2.1 节的原理分析,我们可以在节点移动模型中添加表征“群体行为”的行为模式参数 BM ,不同的行为模式采用不同的 Gibbs 势函数 $\Phi_k(x_k)$ 来描述,则群体行为的控制就可以转化为势函数 $\Phi_k(x_k)$ 的选择,在不同的势函数下采用基于 Gibbs 分布的模拟退火算法可以得到特定的网络拓扑构型 x ,从而实现对群组节点运动行为的分布式控制.不同的群体行为所对应的 Gibbs 势函数可以如下方法选取^[17]:

1) 聚集行为的 Gibbs 势函数

$$\Phi_k(x_k) = \lambda_1 \|x_k - x_{tar}\| + \begin{cases} \frac{\lambda_2}{\sum_{k' \in N_k} \|x_k - x_{k'}\|}, & \text{if } N_k \neq \emptyset \\ \Delta, & \text{if } N_k = \emptyset \end{cases} \quad (7)$$

其中, x_{tar} 表示群体节点的聚集位置; N_k 表示节点 k 的近邻节点集合; $\Delta > 0$ 为一个无穷大量,表示对没有近邻节点的惩罚; λ_1, λ_2 为可调系数,用于控制节点聚集的快慢程度.函数的第 1 项使得节点向逐渐目标点移动,函数的第 2 项使得群组节点趋向聚集.通过该函数可以控制移动节点向目标点的聚集.

2) 分散行为的 Gibbs 势函数

$$\Phi_k(x_k) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\min_{k' \in N_k} \|x_k - x_{k'}\|}, & \text{if } N_k \neq \emptyset \\ \varepsilon, & \text{if } N_k = \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

其中, ε 为一个无穷小量,表示对没有近邻节点的奖励; λ 为比例系数.节点位置的势能值与节点间距离成反比,群

组节点之间距离越大,其势函数值就越小,因此采用该函数可以控制群组节点在区域内的分散.

3) 线形编队行为的 Gibbs 势函数

$$\Phi_k(x_k) = \begin{cases} \frac{\lambda}{m_k} \sum_{k' \in N_k} \frac{d_{k,k'}}{R_s} (1 - |\sin(\theta_{k,k'})|)^2, & \text{if } m_k > 0 \\ \Delta, & \text{if } m_k = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $d_{k,k'}$ 表示节点 k,k' 之间的距离; $\theta_{k,k'}$ 表示 k,k' 组成的线段相对于 x 轴的角度; m_k 表示节点 k 的近邻节点集合 N_k 的元素个数; $\Delta > 0$ 为无穷大, 表示对没有近邻节点的惩罚. 通过该函数, 可以实现对群组节点形成平行与 y 轴方向编队行为过程的运动模拟.

2.3 基于 Gibbs 分布模拟退火的群组节点移动算法

针对不同的群体行为和 Gibbs 势函数, 采用基于 Gibbs 分布模拟退火算法来生成节点的运动轨迹. 为了保留单个移动节点的随机特征, 本文提出了改进的基于 Gibbs 分布模拟退火的群组节点移动算法, 将单个节点的随机方向移动模型应用于原有的算法, 通过切换不同的行为模式参数 BM , 可以得到不同的群体行为.

改进的基于 Gibbs 分布模拟退火的群组节点移动算法描述如下:

- Step 1. 初始化. 设定循环次数 N , 当前循环 $n=1$, 设定时间步长 Δt .
- Step 2. 选择模拟退火温度函数 $T(n)$, 设定群体行为模式参数 BM ;
- Step 3. 对于 $1 \leq k \leq K$, 更新群组中节点 k 的位置, 节点位置更新步骤如下:
 - 1) 采用随机方向模型计算节点 k 下一时刻运动位置集合 P_k :

$$P_k = \left\{ (i_{km} j_{km}) / \sqrt{(i_{km} - i_k)^2 + (j_{km} - j_k)^2} \leq v(t) \cdot \Delta t, \arctan \frac{i_{km} - i_k}{j_{km} - j_k} = \theta(t) \right\},$$

其中, $m=1,2,\dots,M$, M 表示集合 P_k 的元素个数. 对于当前时间 $t=n \cdot \Delta t$, 速度 $v(t)$ 服从 $[v_m - \Delta v, v_m + \Delta v]$ 上的均匀分布或者高斯分布, $\Delta v > 0$ 表示速度的微小变化量; 运动方向 $\theta(t)$ 服从 $(0, 2\pi)$ 上的均匀分布.

- 2) 确定节点 k 的候选位置集合 $C_k = A_k \cap P_k$, 其中, A_k 表示未被其他节点占用的可行位置集合.

$$A_k = \{ (i, j) | i \neq i_t, j \neq j_t, 1 \leq i \leq N_x, 1 \leq j \leq N_y \}, t=1, 2, \dots, k.$$

- 3) 计算节点 k 的近邻节点集合 N_k

$$N_k = \left\{ (i_{k'}, j_{k'}) / \sqrt{(i_{k'} - i_k)^2 + (j_{k'} - j_k)^2} \leq R_s \right\}, 1 \leq k' \leq K, k' \neq k.$$

- 4) 对于每一个 $c \in C_k$, 根据当前不同的行为模式参数 BM 的取值, 计算节点的势能函数值 $\Phi_k(x_k=c)$ 和选择概率 $P(x_k=c)$, 其中,

$$P(x_k = c) = \frac{e^{-\frac{\Phi_k(x_k=c)}{T(n)}}}{\sum_{c' \in C_k} e^{-\frac{\Phi_k(x_k=c')}{T(n)}}}$$

- 5) 更新节点 k 的位置 $x_k=c_{\max}$, 其中, c_{\max} 满足:

$$P(x_k = c_{\max}) = \max_{c \in C_k} P(x_k = c), c_{\max} \in C_k.$$

即选择概率最大(对应能量函数值最小)的候选位置作为节点 k 的新位置.

- Step 4. $n=n+1$, 如果 $n=N$, 则算法结束; 否则, 转到 Step 3 运行.

3 仿真实验

3.1 模型仿真实现

在 Matlab 环境下, 对所提出的基于 Gibbs 分布模拟退火的群组移动模型进行仿真实现, 不同群体行为模式下移动模型的运动仿真结果如图 3~图 5 所示. 其中, 模拟退火温度函数为 $T(n)=1/(4 \times \log(400+n))$, 仿真节点数目

为 100, 群组节点的运动范围为 100×100 .

图 3 显示了随机分布的 100 个节点在算法控制下逐渐向目标点(45,40)自组织聚集的运动过程, 其中的参数分别为 $\lambda_1=0.1, \lambda_2=1, \Delta=10^4, R_m=3, R_s=5$. 从图 3 可以看出, 经过 99 次仿真循环, 群组节点实现聚集; 图 4 显示了移动节点从聚集区域向任务区域的分散运动过程, 其中, $\lambda=0.6, \varepsilon=10^{-7}$. 经过 69 次仿真循环, 100 个节点覆盖了整个区域; 图 5 显示了随机分布的移动节点形成线形编队的动态过程, 不同的节点感知范围将影响线形编队行为的形成过程. 其中, $\lambda=11, \Delta=10^4, R_s=15$. 如图所示, 经过 69 次循环, 100 个移动节点最终形成平行于 y 轴方向的编队.

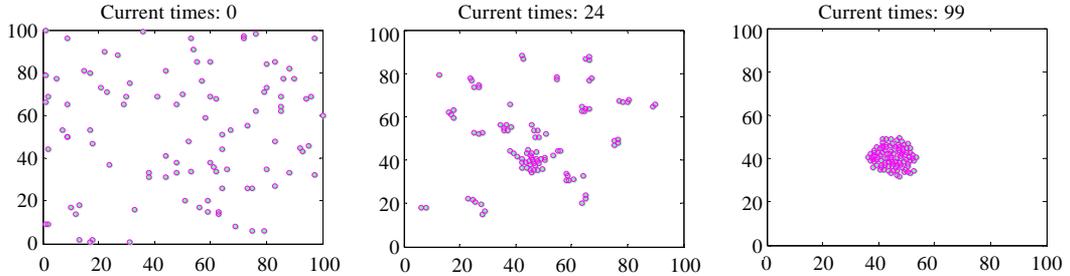


Fig.3 Simulation results of group nodes gathering behavior

图 3 群组节点聚集行为的仿真结果

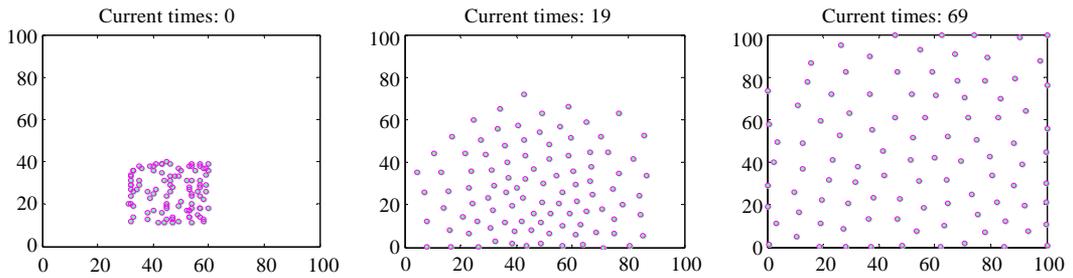


Fig.4 Simulation results of group nodes dispersion behavior

图 4 群组节点分散行为的仿真结果

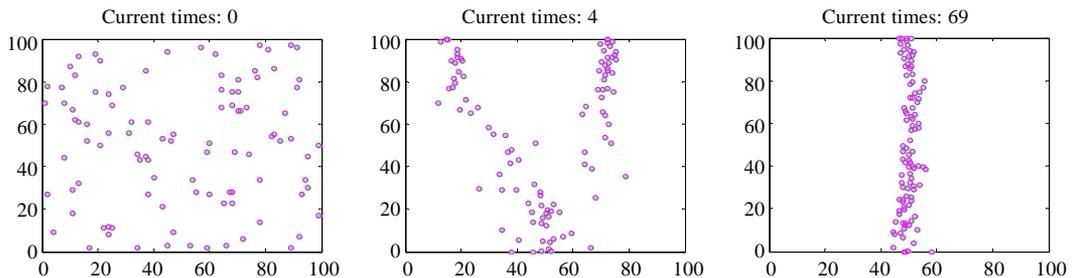


Fig.5 Simulation results of group nodes forming lines behavior

图 5 群组节点线形编队行为的仿真结果

3.2 模型仿真比较

3.2.1 仿真环境

本文选择目前广泛使用的参考点群组移动模型(RPGM)与所提出的 GGM 模型进行仿真比较. 仿真环境为 Linux 下的网络仿真工具 NS-2^[20]. 仿真节点数目为 50, 节点运动范围为 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$, 所有节点在同一组内, 网络带宽为 2Mb/s, 节点的通信半径为 120m, 节点运动速度从 5m/s 到 30m/s 变化, 每次仿真时间为 1000s, 在 GGM

模型的仿真过程中,综合考虑了 3 种行为模式,模型的行为参数经过一段时间后随机切换.考虑到模型运行的稳定性,只统计从 50s 到 950s 期间内共 900s 的仿真数据结果.通信配置随机选择 30 对节点之间发送 CBR(constant byte rate)数据流,每个发送节点每隔 0.5s 发送一个报文,报文长度固定为 512Byte.

仿真过程中选取 AODV(ad hoc on demand distance vector)路由协议.AODV 协议是一种按需路由协议,只有当节点有数据要发送时才激活路由机制,寻找到达目的地的路由,比较适合网络拓扑频繁变化的网络环境.本文从以下几项指标^[4,11]来分析移动模型对于 AODV 网络协议性能的影响:

- 1) 平均报文传输率:网络中所有节点接受到的数据包与所有源节点发送的数据包之比,用于衡量网络中节点的数据传输情况以及数据丢包情况.
- 2) 平均跳数:网络中所有节点总发送的报文数目(包括成功发送的报文与节点转发的报文)与所有节点成功接收的报文总数之比.该指标与平均报文传输率联合考虑,可衡量路由协议的有效性.如果报文传输率很高而平均跳数较低,则表明该协议只在跳数较小的范围内有效,一旦跳数增加则协议失效,将不发送报文.
- 3) 平均端到端延迟:接收节点收到数据包与发送节点发送数据包的平均时间间隔,主要为建立路由所消耗的时间与数据转发所占用的时间之和.该指标用于衡量网络数据传输的实时性.
- 4) 平均吞吐量:单位时间内发送节点到接受节点的总字节数,即一段时间内两节点间的数据传输量与时间之比,用于衡量网络运行过程中的负载状况;
- 5) 链路通断次数:节点在移动过程中会引起通信链路的通断:当节点之间距离大于通信范围时,通信连接将会中断;当节点之间距离小于通信范围时,连接恢复,因此,链路通断次数可以衡量网络拓扑的稳定性.
- 6) 路由协议开销:由于本文仿真过程中所发送的用户报文数相同,路由协议开销可以通过路由协议发送的控制报文数来衡量.该指标反映路由协议的工作效率.

3.2.2 仿真结果及分析

采用上述仿真环境和比较策略,运行 10 次不同的仿真场景,所得到的平均数据统计结果如图 6~图 11 所示.

图 6 给出了在 RPGM 和 GGM 两种模型下,平均报文传输率随节点移动速度的变化情况.可以看出,随着群组节点平均移动速度的增加,网络拓扑变化频繁,网络报文传输率随之下降.由于 RPGM 模型组内节点在逻辑中心小范围运动,其组内拓扑相对稳定,而 GGM 模型节点在整个任务区域内运动,所以,AODV 协议在 RPGM 模型下的组内报文传输率要远大于在 GGM 模型下的传输率,其平均值为 GGM 模型的 2.056 倍.图 7 描述了平均跳数随节点速度发生变化的情况.在两个模型下,AODV 协议的平均跳数值比较稳定,在同一速度下,AODV 协议在 RPGM 模型下的平均跳数略小于 GGM 模型.平均端到端延迟随节点速度变化的情况如图 8 所示,协议在两个模型下的平均延迟随速度变化不大,在 RPGM 模型下平均延迟为 151.5701ms,在 GGM 模型下平均延迟为 153.6486ms,两模型平均传输延迟基本相同.

图 9 给出了两种模型下 AODV 协议的网络平均吞吐量随节点速度发生变化的情况.可以看出,节点速度的增加带来的路由失效更加频繁,导致网络数据吞吐量逐渐下降.由于 GGM 模型下网络拓扑变化更为剧烈,AODV 协议路由失效的情况更为突出.因此,GGM 模型下的平均吞吐量要小于 RPGM 模型.图 10 描述了链路通断次数随节点速度的变化情况,随着速度的增加,两个模型下的链路通断次数都明显增大,RPGM 模型的链路通断次数要小于 GGM 模型,从一个侧面也反映了 GGM 模型下网络拓扑变化更为剧烈.图 11 给出了 AODV 路由协议开销随节点速度的变化情况,在两个模型下,路由协议开销随节点移动速度增大而增大,频繁的拓扑变化导致 AODV 协议发送更多的路由请求,在同一速度下,GGM 模型的组间通信协议开销最大为 RPGM 模型的 2.098 3 倍,最小为 1.356 1 倍.综合图 6~图 11 可以分析得出,AODV 协议在 GGM 模型和 RPGM 模型下的综合性能差异较大.因此,选择合适的群组移动模型对于评价网络协议的性能至关重要.同时可以看出,GGM 模型着重于描述组内节点的相对运动,根据不同的任务目标,可以描述拓扑变化剧烈的节点聚集、分散和编队行为,适用于一类具有战术任务特性的高速运动实体,如无人机机群所组成的动态自组织网络场合.

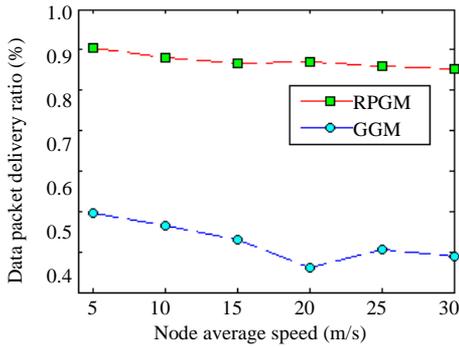


Fig.6 Data packet delivery ratio vs. speed
图 6 报文传输率 vs.速度

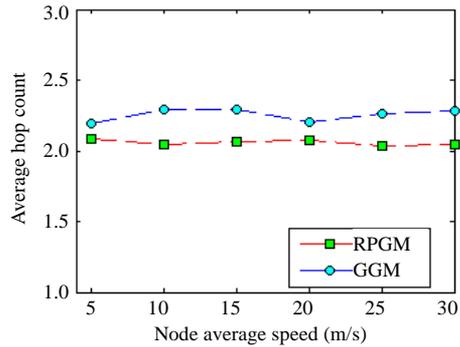


Fig.7 Average hop count vs. speed
图 7 平均跳数 vs.速度

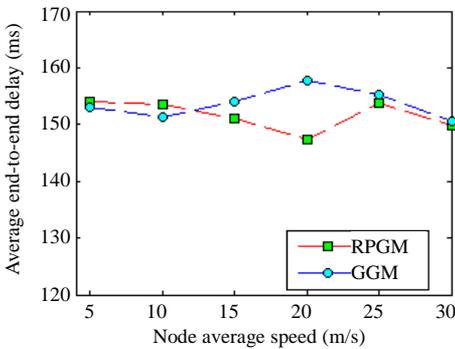


Fig.8 Average end-to-end delay vs. speed
图 8 平均端对端时延 vs.速度

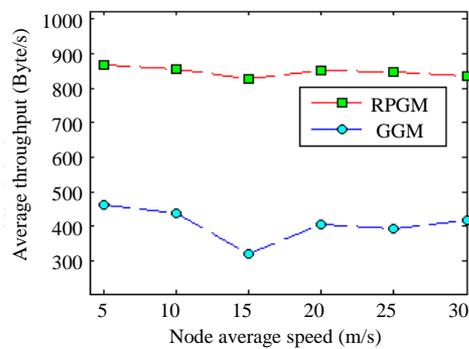


Fig.9 Average throughput vs. speed
图 9 平均吞吐量 vs.速度

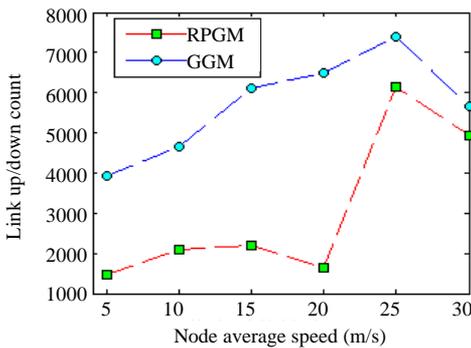


Fig.10 Link up/down count vs. speed
图 10 链路通断次数 vs.速度

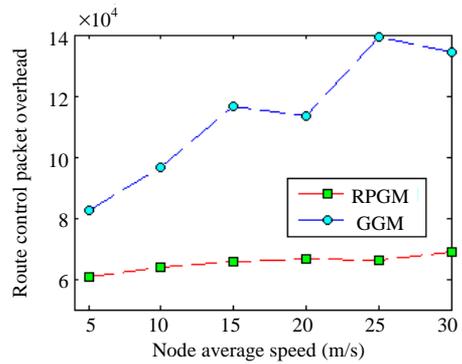


Fig.11 Route control packet overhead vs. speed
图 11 路由协议开销 vs.速度

4 结论

移动模型对 Ad Hoc 网络设计和网络协议的性能评价有较大的影响,要准确评价网络协议的综合性能,必须选择能够反映特定应用场合下节点真实特性的移动模型.不同场合下,群组节点的运动特性与特定任务紧密关联,现有的移动模型不能有效反映出群组节点运动过程中的行为特性.本文针对不同应用场合中群组移动节点的任务特点,提出一种 Ad Hoc 群组移动模型——基于 Gibbs 分布模拟退火的群组移动模型(GGM),在移动模型

的基础上引入“群体行为”选项,针对典型的群体行为,通过改进的基于 Gibbs 分布模拟退火的群组节点移动算法控制群组节点向适合于任务执行的网络拓扑构型演化.仿真结果表明,GGM 模型能够有效地描述节点运动过程的群体聚集、群体分散和群体编队行为,适用于描述具有战术任务特性的大量高速运动实体所构成的动态网络;AODV 协议在 GGM 模型和 RPGM 模型下的综合性能差异较大,不同移动模型对 Ad Hoc 网络拓扑和协议性能评价有重要影响.为了适应不同的 Ad Hoc 网络应用需求,在进行网络协议设计和网络仿真时,必须根据不同的应用场景和任务特性建立合适的移动模型.

本文只建立了二维的 GGM 模型.进一步的工作将建立三维空间中的 GGM 模型,并对不同路由协议在 GGM 模型下作性能评估和比较分析,同时,基于 GGM 模型的特点改进现有路由协议也是下一步的主要工作.

致谢 在此,向曾经对本文提出宝贵建议的审稿专家以及曾参与本文内容讨论的老师和同学表示衷心的感谢.

References:

- [1] Lee U, Magestretti E, Zhou B, Gerla M, Bellavista P, Corradi A. Efficient data harvesting in mobile sensor platforms. In: Proc. of the 2nd IEEE Int'l Workshop on Sensor Networks and Systems for Pervasive Computing (PerSeNS 2006). Washington: IEEE Communication Society Press, Computer Society Press, 2006. 352–357.
- [2] Saha AK, Johnson DB. Modeling mobility for vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004). New York: ACM Press, 2004. 91–92.
- [3] Sauter JA, Matthews R, van Dyke Parunak H, Brueckner SA. Performance of digital pheromones for swarming vehicle control. In: Proc. of the 4th Int'l Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. New York: ACM Press, 2005. 903–910.
- [4] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications & Mobile Computing: Special Issue on Mobile ad hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2002,2(5):483–502.
- [5] Zhao JJ, Zhu PD. A survey of mobility models for ad hoc networks. *Computer Engineering & Science*, 2005,27(5):15–16 (in Chinese with English abstract).
- [6] Hong XY, Gerla M, Pei GY, Chiang CC. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In: Boukerche A, ed. Proc. of the Int'l Workshop on Modeling and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Seattle: ACM Press, 1999. 53–60.
- [7] Kuiper E, Nadjm-Tehrani S. Mobility models for group reconnaissance applications. In: Proc. of the Int'l Conf. on Wireless and Mobile Communications. Bucharest: IEEE Computer Society Press, 2006. 33–33.
- [8] Wang KH, Li BC. Group mobility and partition prediction in wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2002). New York: IEEE Press, 2002. 1017–1021.
- [9] Zhou B, Xu KX, Gerla M. Group and swarm mobility models for ad hoc network scenarios using virtual tracks. In: Proc. of the Military Communications Conf. (MILCOM 2004). Monterey: IEEE Press, 2004. 289–294.
- [10] Sanchez M, Manzoni P. ANEJOS: A Java based simulator for ad hoc networks. *Future Generation Computer Systems*, 2001,17(5): 573–583.
- [11] Davies VA. Evaluating mobility models within an ad hoc network [MS. Thesis]. Golden: Colorado School of Mines, 2000.
- [12] Dong C, Yang PL, Tan C. Group mobility model for ad hoc network. *Journal of System Simulation*, 2006,18(7):1879–1883 (in Chinese with English abstract).
- [13] Williams SA, Huang DJ. A group force mobility model. In: Proc. of the 9th Communications and Networking Simulation Symp. Huntsville: IEEE Press, 2006. 333–340.
- [14] Helbing D, Farkas I, Vlcsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000,407(6803):487–490.
- [15] Ng JM, Zhang Y. Reference region group mobility model for ad hoc networks. In: Proc. of the Wireless and Optical Communications Networks. 2005. 290–294.
- [16] Chang YC, Liao HC. EMM: An event-driven mobility model for generating movements of large numbers of mobile nodes. *Elsevier Journal of Simulation Modeling Practice and Theory*, 2005,13(4):335–355.
- [17] Baras JS, Tan XB. Control of autonomous swarms using Gibbs sampling. In: Proc. of the 43rd IEEE Conf. on Decision and Control. Atlantis: IEEE Press, 2004. 4752–4757.

- [18] Brémaud P. Markov Chains, Gibbs Fields, Monte Carlo Simulation and Queues. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [19] Gong GL, Qian MP. Applied Stochastic Process Course and Random Model in Algorithm and Intelligent Computing. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 209–225 (in Chinese).
- [20] The networks simulator ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

附中文参考文献:

- [5] 赵金晶,朱培栋.Ad Hoc 网络移动模型及其应用.计算机工程与科学,2005,27(5):15–16.
- [12] 董超,杨盘龙,田畅.一种 Ad Hoc 网络组移动模型.系统仿真学报,2006,18(7):1879–1883.
- [19] 龚光鲁,钱敏平.应用随机过程教程及在算法和智能计算中的随机模型.北京:清华大学出版社,2004.209–225.



彭辉(1980—),男,湖北武汉人,博士生,主要研究领域为自组织网络,UCAV 自组织网络系统.



卜彦龙(1979—),男,博士生,主要研究领域为图像处理,任务规划.



沈林成(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为任务规划,智能控制,分布式人工智能.



王林(1981—),男,博士生,主要研究领域为分布式计算,自组织网络.