

移动自组网应用建模及无线收发器选用策略

赵蕴龙^{1,2}, 左德承¹, 时锐¹, 杨孝宗¹

(1. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学高可信技术研究中心, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 移动自组网作为一种特殊的无线网络被越来越广泛的应用, 随之也变得越来越复杂. 所以不同的应用场景需要采用不同的配置来组建自组网, 才能达到网络性能相对最优. 其中网络连通性和能源问题成为重点需要考虑的因素. 为了更加合理高效地组建自组网, 本文定义了一种移动自组网应用模型, 并采用此模型对自组网应用场景进行了分类, 提出了一种组建自组网的方法, 重点对无线收发器的选择进行了研究.

关键词: 移动自组网; 随机图; 移动模型; Random Waypoint

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 07-1153-05

The Application Modeling and the Wireless Transceiver Deploying Scheme of MANET

ZHAO Yun long^{1,2}, ZUO De cheng¹, SHI Rui¹, YANG Xiao zong¹

(1. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. Research Center of High Dependability Computing Technology, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Mobile ad hoc networks are applied in a wider fields and its applying is becoming more and more complex. So, different application scenarios have different deployments of MANET in order to get the more optimal performance. Network connectivity and energy saving are the key factors to consider. In order to construct the mobile ad hoc networks more reasonably and efficiently, this paper defines a type of application model of MANET, and gives three kinds of MANET application scenarios according to such model, and proposes a MANET deploying method, especially researches the wireless transceiver deploying scheme.

Key words: mobile ad hoc networks; random graph; mobility model; random waypoint

1 引言

移动自组网, 国际上称为 MANET: Mobile Ad hoc Networks, 是一种特殊的无线移动网络, 它的组建不依赖预先存在的网络基础设施, 如基站 (BS) 或接入点 (AP), 而是由若干个带有无线收发信机的移动节点构成. 与传统的网络不同, 移动自组网是一个无中心、多跳、自组织的对等式通信网络^[1]. 每个节点同时充当两种角色, 既是计算机又是路由器, 也就是说节点一方面要作为主机运行相关的应用程序, 另一方面还要作为路由器运行相关的路由协议, 进行路由发现、路由维护等常见的路由操作, 对收到的目的节点不是本节点的分组要进行转发.

目前, 国内外专家对自组网的研究重点集中在路由协议上, 相继提出了许多适合自组网的按需式路由协议 (on-demand protocol), 如 AODV、DSR、TORA 和 ABR 等等^[2]. 然而一个好的路由协议应该是在能够准确反映物理链路拓扑结构的基础上, 选择相对最优的路径进行路由. 路由存在的必要条件是必须在相互通讯的两个节点间确实存在一条物理上可相连的

路径, 否则无论多么好的路由协议也无法发现可用的路由. 可见只有组建成高连通率拓扑结构的自组网, 路由协议才有用武之地.

随着近些年人们对移动计算需求的不断增长, 自组网的应用在民用领域也日益受到重视. 为了更好的研究移动自组网的路由协议和推广自组网的应用, 本文根据自组网的实际应用场景, 定义了一种自组网应用模型, 并据此模型对应用场景进行分类. 同时针对每一种应用场景, 运用随机图 (Random Graph) 理论对其进行建模和分析, 提出一种选择无线收发器的优化策略. 因为无线收发器的配置是组建自组网的前提和关键, 应本着可用和节能的准则. 可用性是指所组建网络的拓扑结构必须保证很高的连通性; 节能是指将系统的能源消耗尽可能降到最低, 从通讯的角度看, 是将无线收发器的功率降到最低. 然而这两个准则是相互矛盾的, 如何协调好这个矛盾正是本文研究的重点.

本文的结构如下. 第二部分重点介绍了随机图理论和 Random Waypoint 移动模型等相关知识; 第三部分对自组网的应用模型进行了定义, 并给出一种分类; 第四部分阐述了自组

网的组建方法,尤其是无线收发器的选择策略;第五部分针对每一类应用场景在计算机上进行仿真,并给出了关于固定半径随机图连通性的近似阈值函数 $R(n) = \text{Exp}(a + b)\ln(n)$;结论和进一步研究的方向在第六部分给出。

2 相关理论

本文首先运用随机图理论和移动模型方面的知识定义了一个自组网应用模型 MANET Application Model (MAM),并依据此模型提出了一种自组网应用场景的分类方法,然后针对每一种应用场景运用随机图理论进行分析,给出一个关于固定半径随机图的 θ 1 特性猜想,最后采用 Random Waypoint 移动模型在计算机上针对不同应用模型进行仿真,得出了节点个数、无线收发器传输半径和网络连通率之间的关系,验证了我们的猜想,并给出了关于固定半径随机图连通性的近似阈值函数。下面我们先介绍关于随机图理论和移动模型方面的知识。

2.1 随机图理论

对随机图理论的研究始于 1960 年^[3],由 Erdős 和 Rényi 创立。其实随机图 G 是一种特殊的图,由一些随机过程动态生成。尽管存在各种各样的随机过程,但这些过程都有一个共性,即拥有一个用来控制随机过程的可调整参数。根据调整参数的不同,可以将随机图分成如下四类^[4]。

- (1) 固定边数(Fixed edge number) 随机图
- (2) 伯努利(Bemoulli) 随机图
- (3) 动态(Dynamic) 随机图
- (4) 固定半径(Fixed radius) 随机图

以上四种随机图中前两种已经被许多数学家研究过,通过严格的证明得出了相同的结论:与这两种随机图相关的单调递增(递减)的特性的出现总是很突然的,也就是说总是存在这样一个临界状态和阈值,当调整参数超过这个阈值时这种单调特性会骤然增加(减少),这就是随机图中著名的 0-1 理论^[5]。

引理 1 固定边数随机图 $G_{n,m}$ 的阈值函数 $M(n)$: 对于边数 m 存在一个关于节点个数 n 的函数 $M(n)$, 当 $m \gg M(n)$ 时,随机图 $G_{n,m}$ 的节点保持连通的概率 $\rightarrow 1$; 当 $m \ll M(n)$ 时,随机图 $G_{n,m}$ 的节点保持连通的概率 $\rightarrow 0$ 。

引理 2 伯努利随机图 $G_{n,p}$ 的阈值函数 $p(n)$: 对于任意两点间边的存在概率为 p 存在一个关于节点个数 n 的函数 $p(n)$, 当 $p \gg p(n)$ 时,随机图 $G_{n,p}$ 的节点保持连通的概率 $\rightarrow 1$; 当 $p \ll p(n)$ 时,随机图 $G_{n,p}$ 的节点保持连通的概率 $\rightarrow 0$ 。

关于引理 1、引理 2、阈值函数 $M(n)$ 和 $p(n)$, 文献^[6] 的第三章和第七章定理 3 已经给出精确的公式和证明, 阈值函数分别为:

$$M(n) = \frac{n(\log n + c)}{2} \quad (1)$$

和

$$p(n) = \frac{\log n + c}{n} \quad (2)$$

其中 c 为调整参数。

然而在这四类随机图我们比较关注固定半径随机图,因为它的建立过程跟无线网络节点的连通规则十分相近,所以应用此类随机图对移动自组网进行定性研究比较适合。固定半径随机图表示成 $G_{n,R}$, 其中 $R \geq 0$ 的实数, n 代表顶点数。对于 n 个顶点中的任意两个顶点 v 和 w , 当且仅当 v 和 w 间的距离小于等于 R 时两点间的边才存在。

受到引理 1 和引理 2 的启发,我们很自然得到下面的猜想。

猜想 1 关于固定半径随机图 $G_{n,R}$ 的连通性也应存在 0-1 状态跃变现象和相应的阈值函数 $R(n)$: 对于调整参数 R 存在一个关于节点个数 n 的函数 $R(n)$, 当 $R \gg R(n)$ 时,随机图 $G_{n,R}$ 的节点保持连通的概率 $\rightarrow 1$; 当 $R \ll R(n)$ 时,随机图 $G_{n,R}$ 的节点保持连通的概率 $\rightarrow 0$ 。

猜想 1 的正确性将通过下文的仿真实验得以验证,同时通过实验结果给出一个近似的阈值公式 $R(n)$ 。

2.2 Random Waypoint 移动模型

自组网内的每个节点都可能是时时运动的,所以对自组网的研究首先要搞清楚节点的移动规律,确定一个统一的、符合实际的节点移动模型,然后在此基础上展开不同方向的研究,这样才有针对性和可比性。

移动模型主要分两类^[7,8]: 个体移动模型(Entity Mobility Models)和组移动模型(Group Mobility Models)。个体移动模型中每个节点的运动是相互独立的,而组移动模型中同一组内的节点的运动轨迹具有某种内在相关性。为了简化起见,我们可以假设组内节点的运动具有高度的一致性,从而可以将一个组简化成一个点,从而也符合个体移动模型。个体移动模型大体又分为 7 种,随机游走移动模型(Random Walk Mobility Model)、随机停留点移动模型(Random Waypoint Mobility Model)、随机方向移动模型(Random Direction Mobility Model)、无边界区域移动模型(A Boundless Simulation Area Mobility Model)、高斯马尔可夫移动模型(Gauss Markov Mobility Model)、概率随机游走移动模型(A Probabilistic Version of the Random Walk Mobility Model)和城区移动模型(City Section Mobility Model)。其中 Random Waypoint 移动模型在自组网研究中被广泛应用,因为它比较接近真实世界的运动规则。

在 Random Waypoint 移动模型中,节点首先在初始位置停留一段时间 T (Pause Time),然后在模拟区域内随机选取一个位置作为下一个移动的目的地,并以一个随机的速度 v (满足 $[minspeed, maxspeed]$ 间均匀分布)向目的地移动,到达目的地后再次停留一个预定的时间,然后重复上述动作。通常我们人类的日常行动都具有一定的目的性,而且行走的速度并不是一成不变,当到达目的地后通常要停留一段时间做一些工作,然后去往另一个地方。所以 Random Waypoint 移动模型比较真实的反映了人类的运动规律,而且被移动自组网领域的大多数专家所采用,国内外相关文献中几乎全都采用该移动模型对自组网进行研究和仿真。

3 移动自组网应用模型

3.1 应用模型

自组网的应用是一把双刃剑,一方面由于其应用领域的

宽泛使得自组网技术被许多网络提供商和无线网领域的专家看好,另一方面由于自组网的应用的多样性使得组网变得越来越复杂,无法找到一种通用的组建自组网的方法.为了组建合理的自组网,我们根据固定半径随机图和移动模型知识定义了一个简化的自组网应用模型.

移动自组网应用模型(MANET Application Model)是一个六元组: $MAM = [REQ, MM, AS, R, Abstract, Proc]$ 其中,REQ和MM分别为应用需求集和节点移动模型,是构成应用模型的静态输入元;AS和R分别为应用场景集和实数,作为应用模型的静态输出元;模型的输入元 $(req, mm) \in REQ \times MM$ 与某应用场景 $as \in AS$ 的对应关系表示为 $(req, mm) Abstract as$,显然 $Abstract \subseteq REQ \times MM \times AS$;Proc为针对由Abstract抽象出的某一应用场景 as 获得相对最优的无线收发器传输半径 $r \in R$ 的处理函数,定义为: $Proc: AS \rightarrow r. Abstract$ 和Proc是构成应用模型的动态元.以下对各组成元分别进行讨论.

(1) 应用需求集REQ: REQ是对自组网应用需求的定义,通常包括移动节点数量、应用的相对范围和网络承载的数据类型等具体信息.

(2) 节点移动模型MM: MM包括了2.2节所定义的移动模型,针对所应用的不同移动模型需要给出具体的参数.如Random Waypoint移动模型,则需要提供节点移动速度和节点停留时间两个必不可少的参数.

(3) 应用场景集AS: AS根据某一选定的输入 (req, mm) 经过设计者的加工和分析,抽象出一种适合此种应用需求的应用场景 as , as 包含节点个数 N 、节点活动区域 (L, W) 、移动速度 (V_{min}, V_{max}) 、停留时间 T 和无线信道带宽 B 等参数.

(4) 实数 $R: r \in R$ 代表自组网中每个移动结点所配置的无线收发器的传输半径.

(5) 抽象操作 $Abstract: Abstract$ 其实表示为一种二元关系,将某一特定的应用需求和节点移动模型量化为一个相应的应用场景.

(6) 处理函数 $Proc: Proc$ 定义了对由Abstract操作抽象出的应用场景 as 的处理过程,从而得出一个在满足该种应用场景的前提下能够保持某一连通率所需无线收发器的最小传输半径 r .当所要求的连通率不同时,通过Proc得到的 r 也不同,本文针对连通率为90%的情况对处理函数进行求解.

3.2 应用场景分类

关于应用模型中的处理函数Proc的定义,我们可以运用随机图理论中的阈值函数加以刻画,不过需要事先约定网络连通率为90%.比较第二节中介绍的不同随机图的定义可以看出,固定半径随机图、固定边数随机图和伯努利随机图的本质区别是固定半径随机图边的构成不但与半径 R 有关,而且与点的分布区域大小也有密切关系.而其他两种则仅与一个参数有关,或者是边数 m ,或者是概率 p .所以对于固定半径随机图的研究要更加复杂,从理论上严格地推导出关于连通性的阈值函数还很难,为此我们将采用仿真方法求出该阈值函数.仿真之前需要先对自组网的应用进行分类,针对不同的应用场景分别进行仿真,从而得到适合不同应用的阈值函数,以此作为组建自组网的理论指导.

从森林防火、体育比赛现场报道和学术会议三个比较典型的应用需求出发,分别用MAM应用模型对其建模,经过简单的Abstract抽象操作后,可以得到三类不同的应用场景 as_1, as_2, as_3 ,我们将据此把自组网的应用分为大、中、小三个等级.

(1) 大规模场景: 活动范围大约在方圆1平方公里区域内,类似于数字化战场、灾难救援等应用场合属于大规模应用场景.比如在森林防火中,尽管整个林场的面积要远远大于1平方公里,但是救助人员通常是集体活动,某一时间段内都集中在一个相对小的范围内,所以仍可以归结为此种类型.

(2) 中规模场景: 活动范围大约如一个体育场的范围,类似于体育比赛等新闻现场报道应用场合属于中规模场景.

(3) 小规模场景: 活动范围在室内会议厅和展厅厅等场所,如会议、演出等场合.关于三种类型的具体参数如表1.

表1 MANET应用场景分类

类型	活动范围(长×宽)	节点数目	节点移动速度	典型应用
大规模	1000m × 1000m	数百个	72Km/h(2m/s)	森林防火
中规模	500m × 300m	十几个	7.2Km/h(0.2m/s)	体育比赛 现场报道
小规模	100m × 100m	数十个	3.6Km/h(0.1m/s)	学术会议

4 移动自组网的组建方法

4.1 组网方法

组建自组网时,首先应将应用需求定义清楚,包括网络的应用环境、地理范围、规模、移动速度等各种网络运行指标;然后选择一种适合此种应用的节点移动模型,最常用的是Random Waypoint移动模型;再将应用需求和移动模型进行抽象提取,得到一个恰当的自组网应用场景的形式化描述,具体的形式化指标参考自组网应用模型MAM中的AS的定义;最后对抽象出的特定的应用场景 as 进行利用相应的处理函数Proc进行处理,得到组建该类自组网所需要配置的无线收发器的传输半径.在此基础上再根据应用需求选择相应的路由协议、安全机制,设计并实现所需的应用功能.

在对自组网的组建和总体设计过程中,关于无线收发设备的选择尤为重要,它是所有其他设计的基础,并且直接关系到无线网络连通率的高低,数据的可靠传输和有限能源的合理利用,所以本文提出的应用模型也是以此为核心的.下面重点介绍关于无线收发器的选择和MAM模型中Proc处理函数的定义.

4.2 无线收发器的选择

选择发射功率过大的收发器,不但要增加能源的消耗与浪费,而且由于节点传输能力的增加使得暴露终端的现象加重,从而增加了对无线信道的干扰,使得信道利用率降低;选择发射功率过低的收发器,将降低整个网络的连通性,无法提供可用的物理连接路径.文献[9]对此作了系统的分析:如果节点传输距离越大,则整个网络拓扑结构中存在的边数就越多,意味着有更多的节点可以直接与其他节点一跳连接,所以可以降低中间节点转发数据的负担.假设节点传输距离为 r ,则节点的中继负担为 $O(1/r)$,而产生的相互干扰为 $O(r^2)$,

所以最终的影响为 $O(r)$, 由此可见节点传输距离越小越好. 另一方面, 若传输距离 r 太小, 则会导致网络的连通性降低. 如何选择 r 值将成为一个值得研究的问题, 该问题等价于对 MAM 应用模型 Proc 处理函数的定义, 也等价于固定半径随机图连通性的阈值函数求解问题.

本文分别针对上一节中给出三种应用场景设置相应的环境参数, 节点的运动采用 Random Waypoint 移动模型, 在计算机上模拟相应的应用过程, 并按照固定半径随机图理论计算节点间的连通关系, 通过对仿真结果的分析 and 总结得到自组网无线收发器的相对最优的传输半径, 以此作为组建该种应用场景下自组网的理论指导. 实际应用时还要考虑到信号衰减、噪声干扰、多径干扰和天线等因素的影响而进行相应的修改, 这已经超出了本文讨论的范围.

5 模拟方法及结果

以大规模应用场景为例. 节点移动模型采用 Random Waypoint 模型, 运动区域为 $1000m \times 1000m$ 的正方形区域, 节点初始位置全部位于 $(500, 500)$ 中心处, 移动速度 $2m/s$, 采样间隔 $1s$, 首次采样从运行的第 $1001s$ 时刻开始, 依次采样 1000 次, 总共运行 $2000s$. 之所以要选择第 $1001s$ 时刻开始采样是为了使得所有移动节点分散开, 以避免初始时期节点过于集中所导致的网络连通性过高的特殊时期.

每次采样后, 记录各个节点的坐标, 利用 Dijkstra 算法求出各个节点构成的最小生成树 (Minimum Span Tree: MST), 并找出 MST 中的最长边, 当节点传输半径 R 大于 MST 最长边的长度 R_{MST} 时, 则整个图保持连通. 将每次采样后获得的 R_{MST} 按从小到大的顺序排列, 便可得出连通度与节点传输半径 R 的关系, 如图 1 为 100 个节点的传输半径与连通度的关系图. 由图可见位于在 $1000m \times 1000m$ 的区域内 100 个节点同时运动情况下保持连通度达到 90% 时的节点传输半径 R_{100} 的值约为 $193m$.

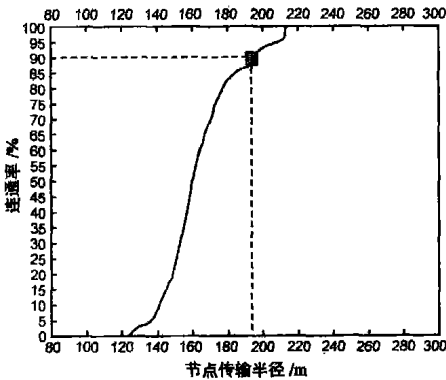


图 1 应用 Random Waypoint 移动模型构成固定半径随机图中的连通性 (100 个点)

应用上述方法就可得到节点个数从 3 到 n 的不同传输半径 R_i , 如图 2 中方块曲线所示. 三角形曲线是通过对仿真结果的分析 and 比较, 给出的一个近似的阈值函数 $R(n)$, 即: $R(n) = \text{Exp}(a + b * \ln(n))$, 其中 a 和 b 是两个调整参数, 针对不同的应用场景取不同的实数值, 如在本文所述的大规模场

景中, 取 $a = 7.02, b = -0.34$, 即

$$R(n) = \text{Exp}(7.02 - 0.34 \ln(n)) \tag{3}$$

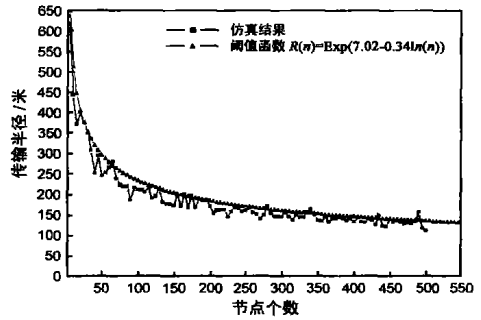


图 2 用 Random Waypoint 移动模型构成固定半径随机图传输半径与节点个数的关系 (大规模)

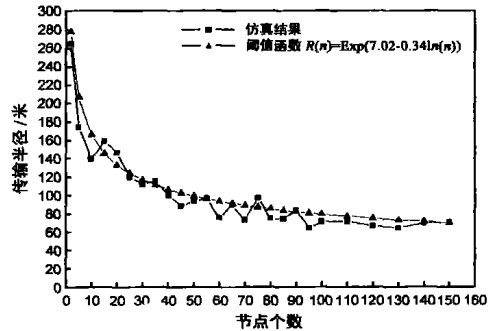


图 3 用 Random Waypoint 移动模型构成固定半径随机图传输半径与节点个数的关系 (中规模)

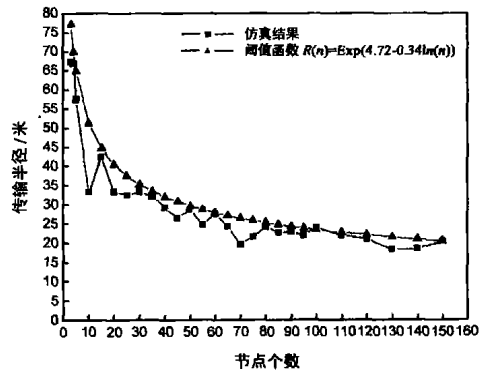


图 4 用 Random Waypoint 移动模型构成固定半径随机图传输半径与节点个数的关系 (小规模)

关于中规模和小规模应用场景的模拟结果如图 3 和 4 所示, 相应的阈值函数分别为:

$$R(n) = \text{Exp}(5.90 - 0.33 \ln(n)) \tag{4}$$

和

$$R(n) = \text{Exp}(4.72 - 0.34 \ln(n)) \tag{5}$$

求出了阈值函数 $R(n)$, 也就得到了自组网应用模型中的 Proc 处理函数, MAM 就可以完整地建立起来. 今后在组建自组网之前, 应用采用 MAM 进行建模分析, 可以有效地指导自组网的快速、高效的应用.

6 结论

本文从自组网应用需求、节点移动模型和无线收发器传

输能力等角度出发,首次定义了一个基于六元组的移动自组网应用模型 MAM;并利用该模型对三种典型的应用进行建模,对自组网的应用场景进行了大、中、小三类的划分,此种分类方法简单、直观、有效.然后在此移动模型基础上又提出了一种组建自组网的方法,并运用随机图理论中的状态跃变现象设计了无线收发器的选择策略.最后在计算机上分别对三类应用场景进行模拟,从而得到一个相对最优的无线收发器传输半径,作为组建自组网的理论数据指导.通过对模拟结果的分析 and 拟合,首次给出一个基于固定半径随机图的节点传输半径 R 的近似阈值函数 $R(n) = \text{Exp}(a + b * \ln(n))$.实验证明该函数与仿真结果十分吻合,可以很好地推广到 MAM 中的 Proc 处理函数中,只要调整参数 a 和 b 即可,从而可以更加准确地指导自组网的应用与组建,具有一定的工程指导意义.关于该阈值函数 $R(n)$ 的严格的数学推导和求证还有待进一步的研究.

参考文献:

- [1] I Chlamtac, M Conti, J J Liu. Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(1): 13- 64.
- [2] E M Royer, Chai Keong Toh. A review of current routing protocols for Ad Hoc mobile wireless networks[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(2): 46- 55.
- [3] P Erdős, A Rényi. On The Evolution of Random Graphs[Z]. Magyar Tud Akad Mat Kut Int Kzl. 1960. 17- 61.
- [4] Krishnamachari B, Wicker S, Bejar R. Phase Transition Phenomena in Wireless Ad Hoc Networks[A]. IEEE GlobCom 2001[C]. Texas, 2001. 2921- 2925.
- [5] M Sanchez, P Manzoni, Z J Haas. Determination of Critical Transmission Range in Ad Hoc networks[A]. Multiaccess Mobility

and Teletraffic for Wireless Communications Workshop(MMT' 99)[C]. Italy, 1999.

- [6] Béla Bollobas. Random Graphs[M]. Academic Press, 1985. 68- 280.
- [7] Tracy Camp, Jeff Boleng, Vanessa Davies. A survey of mobility models for Ad hoc network research[J]. Wireless Communications & Mobile Computing(WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002, 2(5): 483- 502.
- [8] X Hong, M Gerla, G Pei, C Chiang. A group mobility model for Ad hoc wireless networks[A]. In Proceedings of the ACM International Workshop on Modeling and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)[C]. Seattle, 1999. 53- 60.
- [9] P Gupta, P Kumar. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(3): 388- 404.

作者简介:



赵蕴龙 男, 1975 年生于黑龙江省哈尔滨市, 博士研究生, 主要研究方向为无线网络、移动计算、可信计算技术. Email: y_l_zhao@hit.edu.cn.

左德承 男, 1972 年生于黑龙江五常, 博士, 副教授, 主要研究方向为可穿戴计算、分布式计算、容错计算.

时锐 男, 1975 年生于河南洛阳, 博士研究生, 主要研究方向为移动自组网体系结构、网络协议及测试.

杨孝宗 男, 1939 年生于辽宁, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动计算、容错计算和故障注入技术.