

文章编号 :1001 - 2486( 2005 )01 - 0078 - 06

# 战术移动 Ad Hoc 网络下的分布式位置辅助功率控制算法\*

江元龙,王世练,张尔扬

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** :针对战术移动自组( Ad Hoc )网络提出一种分布式位置辅助的功率控制算法( LAPCA ),它通过位置预测来推算节点的邻节点数目,进而调整信号发射功率,以保持最佳的网络连通性,由此提高整个网络的有效流量。该算法作为一个独立模块可以方便地与已有的移动自组网络路由协议相结合。采用较为适合战术环境的参考点群组移动( RPGM )模型来产生网络仿真场景,从仿真实验结果来看,几乎在所有的 RPGM 场景下采用该算法后的网络有效流量相对于纯粹的 AODV 路由协议都得到了提高。

**关键词** :通信与信息系统;功率控制;分布式算法;战术网络;Ad Hoc 网络;无线网络;拓扑控制;移动组网  
中图分类号 :TP393 ;TN914.5 文献标识码 :A

## LAPCA-A Distributed Location Aided Power Control Algorithm for Tactical Mobile Ad Hoc Networks

JIANG Yuan-long, WANG Shi-lian, ZHANG Er-yang

( College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China )

**Abstract** :To improve the throughput of the tactical Ad Hoc networks, a distributed Location Aided Power Control Algorithm ( LAPCA ) is developed which computes the number of the neighboring nodes by location prediction, then adjusts transmitting power of the node to maintain an optimal connectivity when nodes are in motion. This algorithm can work as an independent module in company with most of the popular routing protocols. The Reference Point Group Mobility ( RPGM ) model, which is more suitable for tactical scenarios, is used to generate network simulation scenarios. As shown by the results of simulation, the throughput of the network in almost all the RPGM scenarios can be thus greatly improved with respect to the pure AODV routing protocol.

**Key words** :communication & information system; power control; distributed algorithms; tactical networks; Ad Hoc networking; wireless networks; topology control; mobile networking

移动 Ad Hoc 网络是一种自组织的多跳无线网络,其各个节点可以自由移动,通过共享的无线信道进行通信,而无须任何固定设施。各个节点互为中继节点,从而可以与超出自身通信距离以外的节点进行通信。近年来这一领域受到了极大的关注。

因特网任务组( IETF )之下的移动自组网络( MANET )工作组正在开发移动 Ad Hoc 网络的路由协议规范,目前他们已经推出若干核心路由协议的 Internet 草案和 RFC 文档,包括 Ad Hoc 按需距离矢量协议( AODV )<sup>[1]</sup>、动态源路由协议( DSR )等。这些协议支持自动网络形成、路由发现和维护、可靠的组播和单播、最大限度的服务质量、多跳中继等网络功能。直到目前为止,MANET 的研究主要还是集中在 IEEE 802. 11 和蓝牙等短距离无线通信技术上(通信距离只有数十米到二百米左右)。随着研究的深入,如何将它应用于战术环境中就显得越来越重要。

本文所讨论的战术移动 Ad Hoc 网络,其通信设备主要是基于对当前美国正在使用的近期数字无线电台( NTDR )<sup>[2]</sup>和改进型定位报告系统( EPLRS )的认识,众所周知,这两个系统在美军新一代战术互联网中起着举足轻重的作用,是旅到营各级军队单位的骨干通信设备。基于实际战术要求和对这些已有战术系统的认识,本文假设网络中各个节点知道自己的当前位置,并且假设节点之间的最大通信距离为

\* 收稿日期 2004 - 04 - 28

作者简介:江元龙(1971—)男,讲师,博士。

10km,工作频率为 300MHz,带宽为 300Kbps,功率分五级可调。

通过功率控制减少无线通信发射所消耗的功率,以得到更长的工作时间,在以无线传感器设备为背景的网络下已经有过一些研究<sup>[3-6]</sup>。但在战术通信中,功率消耗的重要性并不特别突出,而提高通信的容量、增加通信的隐蔽性则更具迫切性。网络各节点若能根据自身位置信息和周围节点的位置信息,自适应控制电台的发射功率,使得其邻节点数目处于最优,既保证通信的顺利进行,又减少了彼此之间的干扰,从而增加网络空间复用的效率,最终必然会提高整个网络的通信流量。基于这一认识,本文提出一种根据节点位置信息调整通信功率,从而改善网络拓扑结构的分布式算法,以便有效地提高整个网络的通信流量。该算法作为一个独立模块,可以方便地插到现有的几种使用比较广泛的 MANET 路由协议(如 AODV、DSR 等)模块之上。对于战术网络来说,这相当于仅仅增加一点软件就可以提高整个网络的有效通信流量(从仿真结果来看,最高增幅可达 50%)。

## 1 分布式位置辅助功率控制算法(LAPCA)

### 1.1 发射功率和覆盖范围的关系

假设网络中各个节点都配置有一部收发机,通过 CSMA/CA 协议访问信道,每个节点通过定期在数据链路层进行信息交换,可以知道其邻近节点的惟一标识号、所在位置坐标、移动速度,以及发射功率等参数。

算法基本思想:通过调整输出功率,可以改变节点的有效通信范围,进而控制节点的拓扑结构;当网络中的每个节点的邻节点数(称为度数)控制在一定范围内时,网络连通性和总流量可以取得比较好的平衡。

由无线电信号的地面反射(双线)传播模型<sup>[7]</sup>,传播损耗  $PL$  一般可表达为:

$$PL(r) = PL(r_0) + 10\lambda \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为路径损耗指数,表明路径损耗随距离增长的速率(对于频带在 225 ~ 450MHz 范围内,以地波为主的战术通信来说,  $\lambda$  一般为 4)  $r_0$  为近地参考距离,  $r$  为发射机和接收机之间的距离。

若假设无线电台的接收灵敏度为常数  $S$ ,要使得接收机能够正确无误地接收发射信号,那么发射机的发射功率  $P_t$  与距离  $r$  必须满足:

$$P_t - \left[ PL(r_0) + 10\lambda \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) \right] \geq S \quad (2)$$

从而得到当发射功率为  $P_t$  时的最大通信距离:

$$r_{\max} = 10^{(P_t - P_0)/10\lambda} \quad (3)$$

其中  $P_0 = S + PL(r_0) - 10\lambda \lg r_0$ ,为常数。

在实际的无线台中,功率一般都不是连续可调的,而是分级调整的。假设  $P_1, P_2, \dots, P_M$  为无线电台的可调功率,  $r_1, r_2, \dots, r_M$  则是它们所对应的最大通信距离(由式(3)计算得到)。

### 1.2 位置预测及节点度数计算

每个节点定义三个与邻节点个数(节点度数)相关的参数:期望度数  $N_d$ ,上限度数  $N_h$ ,下限度数  $N_l$ 。

假设整个网络有一个统一的时间基准。周期性地,各个节点通过传感器测量(例如机械陀螺或光纤陀螺)、GPS 定位或无线电相互定位的方式得到自己的当前位置、速度,然后通过问候(HELLO)分组将这些信息连同位置的采样时间、当前发射功率、当前度数等参数广播到周围的邻节点。例如在第  $i$  个时钟周期,节点  $k$  测量得到自身的坐标  $(x_k^i, y_k^i)$ ,它从周围的邻节点广播的 HELLO 分组中可以得到它们的上一周期的位置  $(x_1^{i-1}, y_1^{i-1}), (x_2^{i-1}, y_2^{i-1}), \dots, (x_N^{i-1}, y_N^{i-1})$ 、速度  $(vx_1^{i-1}, vy_1^{i-1}), (vx_2^{i-1}, vy_2^{i-1}), \dots, (vx_N^{i-1}, vy_N^{i-1})$ ,以及发射功率  $P_1^{i-1}, P_2^{i-1}, \dots, P_N^{i-1}$  等,由此可以预测这些邻节点在第  $i$  个时钟周期的位置  $(x_m^i, y_m^i)$ 。这种 HELLO 广播帧的周期  $T$  与节点的相对移动性有关,相对的移动性越大,周期越短。

如果以节点  $k$  的当前位置  $(x_k^i, y_k^i)$  为圆心,以当前节点  $k$  的发射功率所对应的最大通信距离  $r_k^i$  为半

径作圆,显然,当邻节点  $m$  的位置  $(\hat{x}_m^i, \hat{y}_m^i)$  处于该圆的内部时,它才能正确接收到节点  $k$  的信号,即当:

$$(\hat{x}_m^i - x_k^i)^2 + (\hat{y}_m^i - y_k^i)^2 \leq (r_k^i)^2 \quad (4)$$

其中

$$\hat{x}_m^i = x_m^{i-1} + vx_m^{i-1}T, \quad \hat{y}_m^i = y_m^{i-1} + vy_m^{i-1}T \quad (5)$$

时  $k$  发射的信号能够为  $m$  所接收。

为了形成双向链路(许多路由协议都依赖于双向链路来完成路由的生成),还需要进一步判断  $m$  发射的信号能否为  $k$  所接收。

$$(\hat{x}_m^i - x_k^i)^2 + (\hat{y}_m^i - y_k^i)^2 \leq (r_m^{i-1})^2 \quad (6)$$

当式(4)、(6)同时成立的时候,节点  $k$  的度数  $N$  增 1。

由于不同的节点在网络中的位置不同,它的理想的邻节点数目是不一样的。如果节点位于网络边缘,它的期望度数可以稍低一些,而如果它处于网络内部,则期望度数应较高一点。

有了以上分析,只需判断节点在网络中处于何种地位,就可以确定节点的理想度数,然后用实际计算所得度数来进行比较。每个节点周期性地检查其周围活动的邻节点的个数  $N$ ,若度数大于  $N_h$ ,该节点就降低其发射功率;反之,若度数小于  $N_l$ ,该节点就增大其发射功率;如果  $N_l \leq N \leq N_h$ ,则不做任何动作。功率的调整量是期望度数  $N_d$  和当前度数  $N$  的函数,  $N_d$  和  $N$  差别越大,功率的调整量也越大。当然,功率的增减量要受到无线电台本身的实际功率限制。

### 1.3 分布式功率控制算法

如图 1 所示,节点移动可能会引起邻节点关系的变化,图中实心圆点代表原始节点位置,空心圆点表示移动的节点位置,  $a, b, m$  为  $k$  的初始邻节点,  $b', m', d'$  为移动到  $k'$  后的邻节点。现在对节点  $k$  进行分析,当它从位置  $k$  移动到  $k'$  时,其周围邻节点可能会出现以下情况:

- (1) 原来在其通信距离之内,现在仍然在其通信距离之内,例如节点  $b, m$ ;
  - (2) 原来在其通信距离之内,现在移动至其通信距离之外,例如节点  $a$ ;
- 上述两种情况  $k$  自身都可以通过位置预测进行计算。

- (3) 原来不在其通信距离之内,现在相对移动到其通信距离之内(例如  $d$ ),这可以分为两种情况:

①  $k$  的某个邻节点观测到这一情况,并可以提前将这一信息发送给  $k$ 。由于每个节点可能有多达几十个邻节点,要计算这些邻节点的相互运动,并将结果通过控制分组告诉各个邻节点,无论是从算法的复杂性还是通信的冗余度来考虑,都是难以接受的,因此,算法中对此暂时不加处理。

②  $k$  没有邻节点知道这一情况,因而完全无法预测这一情况。这种情况只有当  $k$  处于网络边缘时较可能发生,在非稀疏网络的内部不太可能出现。

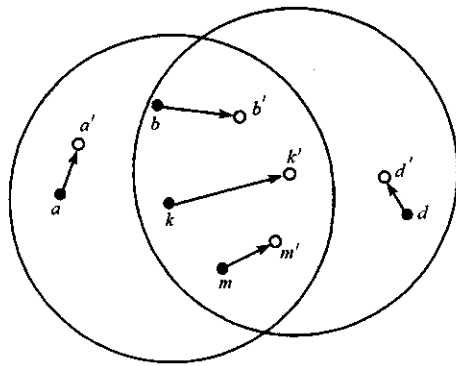


图 1 节点移动引起邻节点关系的变化

Fig. 1 The change of neighborhood with nodes moving

算法步骤:

- (1) 首先,各节点以初始的同一功率进行通信,通过与邻节点互相交换 HELLO 分组(HELLO 分组

首部包括节点 ID、采样时间、位置、速度和当前功率等信息)以建立初始的邻节点表。邻节点表只记录离它位置最近的  $N_h$  个邻节点的信息。

(2) 各节点通过测量得到自身的当前坐标、当前速度,从所接收的 HELLO 分组统计得到当前的邻节点度数  $N$ ,并通过 HELLO 分组广播给它的邻节点。

(3) 各节点从接收到的 HELLO 分组得到其邻节点的位置、速度及其采样时间。

(4) 根据公式(5)计算各个邻节点的位置,由公式(4)、(6)预测它们在下一时钟周期内是否还能与自己形成双向链路,从而得到节点度数  $\hat{N}$ 。

(5) 在新的时钟周期里,根据  $\hat{N}$  调整节点的发射功率(是否要考虑上次的  $N$ )。如果  $\hat{N} < N_i$ ,那么就将发射功率向上调整一级;如果  $\hat{N} > N_h$ ,相应地,就将发射功率向下调整一级。

(6) 重复步骤(2)。

## 2 参考点群组移动(RPGM)模型<sup>[8]</sup>

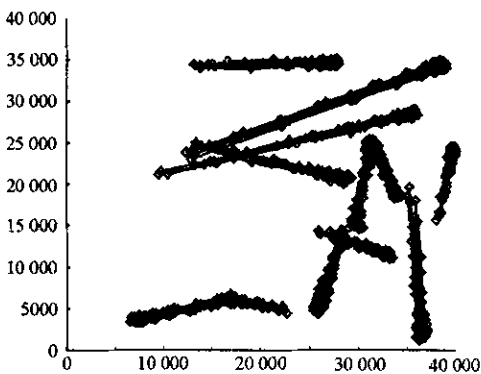
当前网络仿真中主要有两种类型的合成运动模型:实体运动模型和群组运动模型。前者侧重于各个节点的互不相干的独立运动,例如随机驻点模型(Random Waypoint Model);而后者则强调节点作为群体之一有着共同的移动规律,例如 RPGM 模型。

在 Ad Hoc 网络的研究中,研究者一般都假设各网络节点处于随机运动状态,各个节点之间的连接也是完全随机的,并且各节点的负载是均衡的。这对于节点数量特别大的网络从统计意义上来说是成立的,但对于节点数量较少的网络,则不太符合实际。因为在较短的时间间隔中,连接数总是有限的,各个节点占有的带宽也是不平衡的。

而对于战术部队来说,部队的特殊指挥控制结构更是决定了其各成员必然要协调一致地行动,在行动过程中经常分成若干行动单位,遵循其相应首长的命令成群地行动,因此,其行动是有组织、有规律的。不但运动状态是有规律的,而且其通话连接也是有其特点的。通常来讲,行动小组内部的通话占主要部分,行动小组和上级单位的通话数量较少,至于各个行动小组之间的通话,数量则更少。

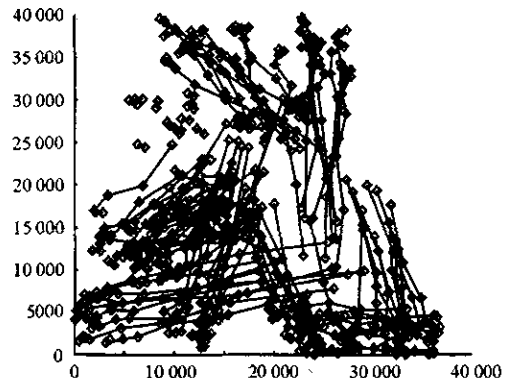
RPGM 作为一种基于群组运动的模型<sup>[9]</sup>相对于实体运动模型来说,它更符合于实际的军事行动。而在群组运动模型中,RPGM 是更为通用的模型,其它的各种模型可作为其特例来建模<sup>[9]</sup>。

RPGM 模型可用于建模随机的群体运动,它的运动控制参数主要包括平均速度、平均驻留时间、参考点分隔、节点分隔。前二者决定各个节点的运动特性,从而决定网络拓扑的变化率。平均速度越大,平均驻留时间越短,则网络拓扑变化越快。而后二者决定整个网络呈现的群组运动的随机性。参考点分隔和节点分隔越大,则群组运动的随机性越大。此外各节点在其组内还具有一定的随机性。图 2、3 是两幅在不同移动参数下的 RPGM 节点轨迹图。



2 RPGM 节点轨迹图(RefPtSep = 500, NodeSep = 200)

Fig. 2 Traces of nodes in RPGM



3 RPGM 节点轨迹图(RefPtSep = 4000, NodeSep = 800)

Fig. 3 Traces of nodes in RPGM

### 3 仿真实验及结果

采用加州伯克利大学和南加州大学等研究机构联合开发的 NS2<sup>[10][11]</sup> 软件来进行网络仿真。NS2 是一个事件驱动的网络仿真器,它有一个扩展容易、配置方便的仿真引擎,能够详细建立多种 MAC 层(例如 IEEE 802.11、CSMA/CA、TDMA 等等),支持多种流行的 TCP 协议和路由调度算法,其扩展移动网络模块提供了多种 Ad Hoc 路由协议。它采用 Otcl(扩展的 Tel 脚本语言)作为仿真描述语言,为用户提供了简洁、方便的开放式接口,而核心代码则采用高效率的系统编程语言 C++ ,因此,在自组织移动网络的研究中,它已经成为应用最广泛的仿真工具之一。

仿真网络由 100 个移动节点组成,按 RPGM 模型分成 10 组,每组 10 个节点。每个组有一个参考点(逻辑中心),该中心的移动特性(如位置、速度、方向等)代表所在群组的移动特性。每一群组进行独立运动。通信连接为 20 个 CBR 信流,其中组内连接为 18 个,组间连接数为 2 个。仿真区域为 40km × 40km 的正方形。无线电台的最大传输距离为 10km,有 5 级可调功率。仿真采用高度为 1.5m 的全向天线,以及地面反射(双线)传播模型。通信频率为 300MHz,数据率为 300Kbps,仿真时间为 300s。取  $N_t = 20$ ,  $N_h = 30$ 。

由于 AODV<sup>[11]</sup> 路由协议是目前正式的四种 Internet 草案(RFC)之一,它也是当前研究最活跃、最成熟的一种路由协议,并且在 NS2 软件中有其软件包,因此在仿真中采用它作为支撑算法,而与 LAPCA 算法(它要与 AODV 协议同时运行)做对照的则是纯粹 AODV(为保证连通性采用最大功率进行通信),假设 LAPCA 有五级可调功率。由于仿真场景的随机性,对于同样的参数集仿真 3 次,以其平均值作为仿真结果以减小误差。

采用 LAPCA 算法和纯粹的 AODV 协议的仿真结果的比较如图 4、5、6 所示。图中每个点的计算公式为:

$$100 * (\text{LAPCA 下的净流量}) / (\text{AODV 下的净流量})$$

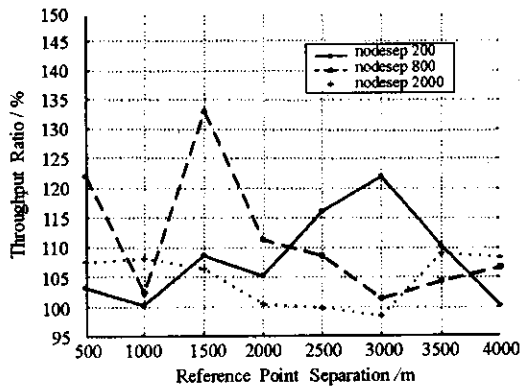


图 4 低速度低分组速率场景中的仿真结果

Fig. 4 Results in scenarios with low velocity and low packet rate

网络在各种运动速度和通信速率下,采用 LAPCA 算法后其结果与采用纯粹的 AODV 算法相比较通常都有改善。三幅图的 72 个结果中,仅在图 4 中当参考点距离为 3000,节点分隔为 2000 时,LAPCA 算法的结果比纯粹 AODV 略差。之所以出现这一例外,一方面是由于在该参数下的场景群组特性并不明显,接近于随机驻点模型下的轨迹;另一方面也与仿真次数较少有关。由此可以看出,采用 LAPCA 算法确实提高了网络的总有效流量。另外,无论是在随机实体模型还是在群组模型中,其速度都可以随机突变,这在物理上是不可能的,同时也使得位置预测误差偏大。在实际战术场景中,位置预测将更为准确,LAPCA 算法的性能因此会更好一些。

### 4 结束语

战术移动网络和 MANET 网络正在趋向融合,如何将 MANET 网络的协议有效地应用于战术环境,

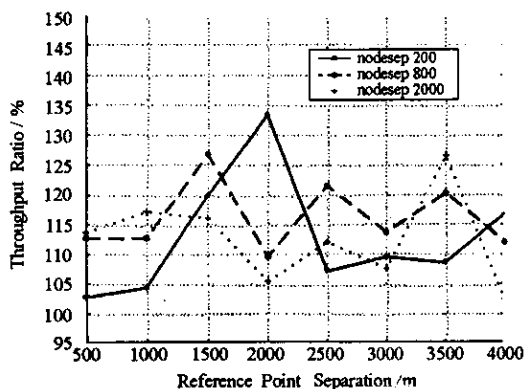


图5 中等速度中等分组速率场景中的仿真结果

Fig. 5 Results in scenarios with middling velocity and middling packet rate

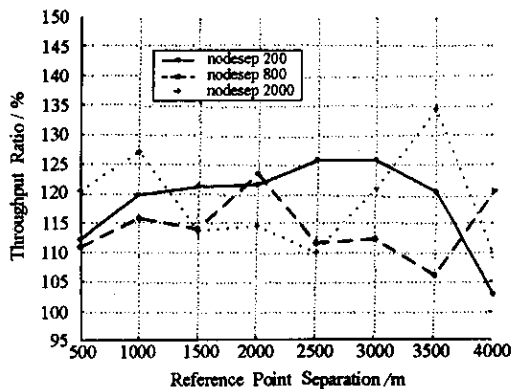


图6 高速度高分组速率场景中的仿真结果

Fig. 6 Results in scenarios with high velocity and high packet rate

正日益引起人们的兴趣。本文提出了一种结构化的功率控制算法,它利用各个节点的位置信息,通过改变发射功率,以自适应地调整网络的拓扑结构和各个节点的邻节点个数,减少各个节点之间的通信干扰。在RPGM群组模型下的NS2仿真结果表明,它在各种群组移动场景下一般都能够提高整个网络的有效流量。由于该算法独立于路由协议,故此它也可以用于其它的路由协议,如DSR等。值得注意的是,该算法由于需要交换位置、速度等信息,增加了网络的控制分组流量。如果要减少其冗余,可以将其与路由协议的HELLO分组有机结合在一起,从而减少发送的分组数。另外,如何自适应地确定理想的节点度数也还有待于进一步的研究。

## 参考文献:

- [ 1 ] Perkins C E , Royer E M , Das S R. Ad Hoc on Demand Distance Vector ( AODV ) Routing [ EB ]. <http://WWW.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-07.txt>, Nov. 2000 , IETF Internet Draft ( Work in Progress ).
- [ 2 ] Ruppe R , Griswald S , Walsh P , et al. Near Term Digital Radio ( NTDR ) System [ A ]. MILCOM97 [ C ] , Nov. 1997.
- [ 3 ] Ramanathan R , Rosales-Hain R. Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment [ A ]. Proc. IEEE INFOCOM 2000 Conference [ C ] , March 26 - 30 2000 , Tel Aviv , Israel.
- [ 4 ] Wattenhofer R , Li L , Bahl P , et al. Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks [ A ]. Proc. IEEE INFOCOM 2001 Conference [ C ] , April 22 - 26 2001 , Anchorage , Alaska.
- [ 5 ] Borbash S A , Jennings E H. Distributed Topology Control Algorithm for Multihop Wireless Networks [ A ]. In Proceedings of IEEE Int. Joint Conference on Neural Networks [ C ] , 2002 355 - 360.
- [ 6 ] Rodoplu V , Meng T H. Minimum Energy Mobile Wireless Networks [ J ]. IEEE JSAC , 1999 17 ( 8 ) : 1333 - 1344.
- [ 7 ] Rappaport T S. Wireless Communication Principles and Practice [ M ]. Prentice Hall Inc. , 1996.
- [ 8 ] Hong X , Gerla M , Pei G , et al. A Group Mobility Model for Ad Hoc Wireless Networks [ A ]. Proceedings of ACM/IEEE MSWiM99 [ C ] , Seattle , WA , 1999 53 - 60.
- [ 9 ] Camp T , Boleng J , Davies V. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research [ J ]. Wireless Communication & Mobile Computing ( WCMC ) : Special Issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research , Trends and Applications , 2002 2 ( 5 ) : 483 - 502.
- [ 10 ] Breslau L , Estrin D , Fall K , et al. Advances in Network Simulation [ J ]. IEEE Computer , 2000 33 ( 5 ) : 59 - 67.
- [ 11 ] Fall K , Varadhan K. The NS Manual [ EB ]. LBNL <http://WWW.isi.edu/nsnam/ns/doc/index.html> 2001.



