基于随机路径点模型的 Ad hoc 网络复杂统计特性

童 超 龙 翔 高小鹏

(北京航空航天大学 计算机学院，北京 100191)

摘 要：为了采用复杂网络理论指导 Ad hoc 网络拓扑结构特性研究，首先介绍复杂网络结构统计特性和随机路径点模型，并从理论上分析基于随机路径点模型的 Ad hoc 网络的度分布和聚类系数. 利用仿真试验的方法产生基于随机路径点模型下的 Ad hoc 网络各种移动场景，得出 Ad hoc 网络在这些移动场景下的平均最短路径长度、聚类系数和度分布等复杂统计特性. 通过分析仿真试验数据回答 Ad hoc 网络是否具有小世界效应、Ad hoc 网络度分布形态如何以及是否具有无标度属性等问题.

关 键 词：计算机网络；系统科学；移动计算；数学模型

中图分类号：TP 393.01

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)10-1236-07

Complexity statistical characteristics for Ad hoc network based on random waypoint model

Tong Chao Long Xiang Gao Xiaopeng

(School of Computer Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Complex network theory can be applied in the context of Ad hoc network topology characteristics. Firstly complex network structure statistical characteristics and random waypoint model were introduced. Secondly the degree distribution and clustering coefficient of Ad hoc network based on random waypoint model were theoretically analyzed. After simulation test generated Ad hoc network mobile scenes based on the random waypoint model, the complex statistical characteristics such as average path length, clustering coefficient and degree under those scenes were gained. Finally by analyzing the simulation test data, these questions whether Ad hoc network have small-world effect or not, whether Ad hoc network is scale free or not and how about the degree distribution of Ad hoc network were definitely answered.

Key words: computer networks; systems science; mobile computing; mathematical models

Watts 和 Strogatz[1] 1998 年在 Nature 上和 1999 年 Barabási 和 Albert[2] 在 Science 上发表的关于复杂网络的文章标志着复杂网络的研究进入了新时代. 复杂网络理论研究也开始从数学向物理学、生物学、管理学、社会学以及计算机科学等众多不同的领域扩展. 复杂网络理论常用于揭示和刻画网络系统结构的统计特性以及发现度量这些性质的合适方法. 在计算机科学领域研究者利用复杂网络理论对 Internet 和 WWW 网络的拓扑特性及建模进行了深入的研究.

Ad hoc 网络是一种自组织、对等、多跳无线移动通信网络. 网络中的节点可以自由地移动并自行相互组织，从而网络的拓扑结构也随着迅速且难以预测地变化. Ad hoc 网络拓扑结构由很多因素决定，其中包括移动模型、节点的密度和信号辐射半径等. 如果能够在拓扑控制过程中根据复杂网络的拓扑特性去考虑网络拓扑结构优化，这样可以优化网络连通性、能量使用更高效、增加网

收稿日期：2007-11-13

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60434030)；国家 863 计划资助项目(2006AA01Z218，2006AA01Z215)

作者简介：童 超(1978—)，男，重庆黔江人，博士生，tongchao@buaa.edu.cn.

络的吞吐率和容量、使网络更健壮,还对网络的协议开发和网络管理等方面有着重要影响.

文献[3]对 Ad hoc 网络的拓扑统计特性进行研究主要集中在网络时延,吞吐量,包丢失率和开销等,较少研究网络的复杂统计特性(平均最短路径长度、聚类系数和度分布等). 文献[4]采用复杂网络理论对 Internet 和 WWW 的网络拓扑特性及建模进行了深入的研究,但是很少有研究者采用复杂网络理论对 Ad hoc 网络的拓扑结构特性进行研究. 如果结合复杂网络理论来研究 Ad hoc 网络的拓扑结构,发现这一领域仍然有许多问题尚待解决. 比如,Ad hoc 网络的度分布、聚集特性和平均最短路径长度如何? Ad hoc 网络拓扑结构能否具有小世界效应[5]? 如果 Ad hoc 网络不是小世界网络,能否将 Ad hoc 网络改造成为小世界网络(事实上已经有研究者[5-7]有意改造 Ad hoc 网络成为一个小世界网络从而利用小世界特性来设计 Ad hoc 网络的资源搜索和路由协议)? 能否在 Ad hoc 网络路由协议中利用小世界特性? 能否通过增加一些"捷径"去减小网络的平均最短路径长度? 如果存在这些"捷径",这些"捷径"是完全随机的吗? 实际的 Ad Hoc 网络可能具有无标度特性吗?

本文首先从理论上对基于随机路径点模型(RWP,Random Waypoint model)的 Ad hoc 网络的度分布和聚类系数进行分析,接着采用仿真试验的方法产生 Ad hoc 网络的 RWP 的移动场景,揭示 Ad hoc 网络在 RWP 的各种移动场景下的平均最短路径长度、聚类系数和度分布等,展示节点数、仿真区域大小、节点移动速度、节点暂停时间、节点信号辐射半径等对 Ad hoc 网络复杂统计性质的影响;并通过分析仿真试验数据回答 Ad hoc 网络是否具有小世界效应、Ad hoc 网络度分布形态如何以及是否具有无标度属性等问题.

1　复杂网络结构统计特性

网络通常由顶点的集合 V 和边的集合 E 组成的图 $G=(V,E)$ 来表示. 设 S 是一个集合,以 $|S|$ 表示集合 S 的基数或者元素个数. 则图 G 中顶点数目称为图的阶(order),记为 $n=|V|$,边数目称为图的规模(size),记为 $m=|E|$. 图 G 中如果边 e 是顶点 u,v 的无序对,边 $e=(u,v)$ 和边 $e=(v,u)$ 为同一条边,则称图 G 为无向图. 如果图 G 中每一条边 e 并不赋予权值,则图 G 为无权图. 本文中的图均为无向无权图.

1.1　平均最短路径长度

设 u 和 v(可相同)是图 G 的顶点,图 G 中一条 u-v 路径(path)是有限的顶点和边的交替序列 $u_0e_1u_1e_2\cdots u_{n-1}e_nu_n(u=u_0,v=u_n)$. 路径中出现的边数 l 称为路径长度(path length). 图 G 中连通的两个顶点 u 和 v 之间的所有 u-v 路径的路径长度的最小值称为最短路径长度(shortest path length),记为 d_{ij}.

网络中任意两个节点之间最短路径长度的最大值称为网络的直径(diameter).

节点 v_i 的平均路径长度定义为

$$L_i=\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}d_{ij} \tag{1}$$

网络的平均最短路径长度(average path length) L 为网络中任意两个节点之间的最短路径长度的平均值. 即

$$L=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}L_i \tag{2}$$

在无向图中,$d_{ii}=0$,$d_{ij}=d_{ji}$. 因此

$$L=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}L_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}d_{ij}=\frac{1}{n(n-1)}\sum d_{ij}=\frac{1}{n(n-1)/2}\sum_{i>j}d_{ij} \tag{3}$$

网络的平均最短路径长度也常被称为网络的特征路径长度(characteristic path length).

对于非连通图,可能存在 $d_{ij}=\infty$,则可根据式(3)计算得出 $L=\infty$. 为了避免这一问题,通常定义网络的平均最短路径长度的值为所有存在路径相连的节点对之间的平均最短路径长度. 或者定义 L 为所有节点对之间的调和平均最短路径长度. 即

$$L^{-1}=\frac{1}{n(n-1)/2}\sum_{i>j}d_{ij}^{-1} \tag{4}$$

1.2　聚类系数

网络中节点 i 如果与节点 j 相连,节点 j 与节点 k 相连,那么节点 i 也可能与节点 k 相连. 这在朋友关系网络中的直观意义就是,你朋友的朋友也有可能是你的朋友. 因此 Watts 和 Strogatz 定义的节点 i 的聚类系数(clustering coefficient)为

$$C_i=\frac{\text{与节点 } i \text{ 相连的三角形个数}}{\text{以节点 } i \text{ 为中心的三元组个数}} \tag{5}$$

网络中节点 i 有 k_i 条边将它与其它节点相连,这 k_i 个节点就称为节点 i 的邻居. 这 k_i 个节点最多有 $k_i(k_i-1)/2$ 条边. 设 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i. 那么还可以定义聚类系数为 E_i 与 $k_i(k_i-1)/2$ 之比.

$$C_i=\frac{E_i}{k_i(k_i-1)/2} \tag{6}$$

对于度为0或者1的节点i(节点没有邻居节点或者只有1个邻居节点),令$C_i=0$.

整个网络的聚类系数C就是所有节点i的聚类系数C_i的平均值.

$$C=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}C_i \tag{7}$$

1.3 度分布

设G是一个图,顶点$i\in V$,与i关联的边的数目称为i的度(degree),记为k_i.

网络中所有节点i的度k_i的平均值称为网络的平均度,记为$<k>$.

$$<k>=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}k_i \tag{8}$$

网络中节点的度的分布情况可以用分布函数$P(k)$来描述.$P(k)$表示网络中度为k的节点个数占总节点个数的比例,或者随机选择一个节点的度为k的概率.

2 Ad hoc网络复杂统计特性分析

本文只考虑运动空间A为二维平面运动空间的情况.除了RWP,本文的分析推导同样适用于其它移动模型,只需根据它们的特征推导出它们的节点的空间分布概率密度函数$f_L(l)$即可进行类似分析.本文中节点之间的连接关系采用最简单的模型,即假定所有节点的信号辐射半径r_0相同,处于节点信号辐射半径范围内的节点与该节点存在连接关系.由于从理论上分析平均最短路径长度过于复杂,本文仅对基于RWP移动的节点的度分布和聚类系数进行分析.

2.1 RWP

RWP[8]最早由Johnson和Maltz提出,由于其简单和适用范围广的特点而被广泛地使用,成为Ad hoc网络仿真的事实标准.

RWP通常形式化定义为:在运动空间A内以均匀分布取起始点S_t和目的点D_e.以概率密度$f_V(v)=U(v_{\min},v_{\max})$选取速度$v$从$S_t$沿直线移动到$D_e$,其中$v_{\max}$是节点的最大移动速度,$v_{\min}$是节点的最小移动速度.在$D_e$处以概率密度$f_T(t)=U(t_{\min},t_{\max})$选取一个时间$t_{\text{pause}}$暂停,其中$t_{\max}$是节点的最大暂停时间;$t_{\min}$是节点的最小暂停时间.这样完成一个Step过程.接着将本次的目的点D_e作为下一个Step的起始点S_t进行下一个Step过程.不断重复上述过程直至仿真结束.

2.2 基于RWP的Ad hoc网络节点度分布

给定一个节点在运动空间A内的位置为$L=(x,y)$或者$L=(r,\theta)$.假定节点的空间分布概率密度函数为$f_L(l)$,由于RWP中节点之间相互独立,因此它们具有相同的空间分布概率密度函数$f_L(l)$.则第二个节点若与该节点连接,则它必然落入以L为圆心,以r_0为半径的圆形区域$A_0(l)$内.第二个节点与给定节点之间连接的概率为

$$P_0(l)=\iint_{A_0(l)}f_L(l)\,\mathrm{d}l \tag{9}$$

若$L=(x,y)$,则

$$P_0(l)=P_0(x,y)=\int_{y-r_0}^{y+r_0}\int_{x-\sqrt{r_0^2-(y'-y)^2}}^{x+\sqrt{r_0^2-(y'-y)^2}}f_{XY}(x',y')\,\mathrm{d}x'\,\mathrm{d}y' \tag{10}$$

网络中有n个节点,则根据二项分布可知节点度K为k的概率分布为

$$P(K=k\mid l)=\binom{n-1}{k}P_0(l)^k(1-P_0(l))^{n-1-k} \tag{11}$$

则节点度K的数学期望为

$$E(K\mid l)=(n-1)P_0(l) \tag{12}$$

整个网络的节点平均度$<k>$为

$$<k>=E(K)=\iint_A E(K\mid l)f_L(l)\,\mathrm{d}l=\iint_A(n-1)P_0(l)f_L(l)\,\mathrm{d}l \tag{13}$$

由文献[9]可知在半径为1即$A=\pi\times1^2=\pi$的圆形区域内RWP中节点空间分布概率密度函数为

$$f_R(r)=\frac{45(1-r^2)}{64\pi}\int_0^{\pi}\sqrt{1-r^2\cos^2\theta}\,\mathrm{d}\theta \tag{14}$$

结合式(9)、式(13)、式(14)可以得到n个基于RWP在以1为半径的圆形区域内节点的Ad hoc网络的平均度为

$$<k>=\iint_A(n-1)f_R(r)\left(\iint_{A_0(l)}f_R(r)\,\mathrm{d}l\right)\mathrm{d}l=\iint_A(n-1)\,\frac{45(1-r^2)}{64\pi}\iint_0^{\pi}\sqrt{1-r^2\cos^2\theta}\,\mathrm{d}\theta\cdot\left(\iint_{A_0(l)}\left(\frac{45(1-r^2)}{64\pi}\iint_0^{\pi}\sqrt{1-r^2\cos^2\theta}\,\mathrm{d}\theta\right)\mathrm{d}l\right)\mathrm{d}l=\frac{2\,025(n-1)}{8\,192\pi}\int_0^1 rh(r)\left(\iint_{A_0(l)}h(r)\,\mathrm{d}l\right)\mathrm{d}r$$

其中,$h(r)=2(1-r^2)\int_0^{\pi}\sqrt{1-r^2\cos^2\theta}\,\mathrm{d}\theta$.

由文献[10]可知在正方形$[0,1]^2$即$A=1^2=1$区域内 RWP 中节点近似空间分布概率密度函数为

$$f_{XY}(x,y)=\begin{cases}f^*_{XY}(x,y) & 0<x\leqslant\frac{1}{2},0<y\leqslant x\\ f^*_{XY}(y,x) & 0<x\leqslant\frac{1}{2},x\leqslant y\leqslant\frac{1}{2}\\ f^*_{XY}(1-y,x) & 0<x\leqslant\frac{1}{2},\frac{1}{2}\leqslant y\leqslant 1-x\\ f^*_{XY}(x,1-y) & 0<x\leqslant\frac{1}{2},1-x<y\leqslant 1\\ f^*_{XY}(1-x,y) & \frac{1}{2}\leqslant x<1,0<y\leqslant 1-x\\ f^*_{XY}(y,1-x) & \frac{1}{2}\leqslant x<1,1-x\leqslant y\leqslant\frac{1}{2}\\ f^*_{XY}(1-y,1-x) & \frac{1}{2}\leqslant x<1,\frac{1}{2}\leqslant y\leqslant x\\ f^*_{XY}(1-x,1-y) & \frac{1}{2}\leqslant x<1,x\leqslant y<1\end{cases}\tag{15}$$

其中

$$f^*_{XY}(x,y)=6y+\frac{3}{4}(1-2x+2x^2)\cdot\left(\frac{y}{y-1}+\frac{y^2}{(x-1)x}\right)+\frac{3y}{2}\left[(2x-1)(y+1)\cdot\ln\left(\frac{1-x}{x}\right)+(1-2x+2x^2+y)\ln\left(\frac{1-y}{y}\right)\right]$$

结合式(9)、式(10)、式(13)、式(15)可以得到n个基于 RWP 在正方形 RWP 区域内节点的 Ad hoc 网络的平均度为

$$<k>=\iint_A(n-1)P_0(l)f_L(l)\mathrm{d}l=(n-1)\int_0^1\int_0^1\left[\int_{y-r_0}^{y+r_0}\int_{x-\sqrt{r_0^2-(y'-y)^2}}^{x+\sqrt{r_0^2-(y'-y)^2}}f_{XY}(x',y')\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\right]\cdot f_{XY}(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

2.3　基于 RWP 的 Ad hoc 网络节点聚类系数

首先考虑某一节点i的聚类系数,假设该节点位于L,由式(6)可计算该节点的聚类系数.根据式(11)可知该节点的度为

$$k_i=(n-1)P_0(l)\tag{16}$$

问题的关键在于求解该节点k_i个节点之间实际存在的边数E_i.这k_i个节点为节点i的邻居,因此位于以L为圆心,以r_0为半径的圆形区域$A_0(l)$内.任取一个节点j以空间分布概率密度函数$f_L(l)$位于$A_0(l)$内,则类似上一节,k_i-1个节点中第二个节点若与该节点连接,则它必然落入以L为圆心,以r_0为半径的圆形区域$A_0(l)$和以L_j为圆心,以r_0为半径的圆形区域$A_j(l)$,即$A_0(l)\bigcap A_j(l)$内,如图 1 所示.

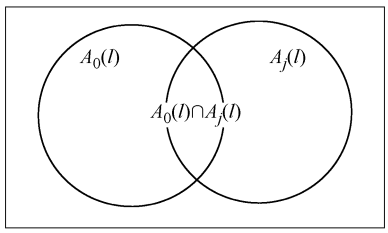

图 1　$A_0(l)\bigcap A_j(l)$示意图

第二个节点与给定节点i之间连接的概率为

$$P_j(l)=\iint_{A_0(l)\bigcap A_j(l)}f_L(l)\mathrm{d}l\tag{17}$$

$A_0(l)$内有k_i个节点,根据二项分布可知节点j度K的数学期望为

$$E(K\mid l_j)=(k_i-1)P_j(l)\tag{18}$$

那么整个$A_0(l)$内的节点平均度$<k_j>$为

$$<k_j>=\iint_{A_0(l)}E(K\mid l_j)f_L(l)\mathrm{d}l=\iint_{A_0(l)}(k_i-1)P_j(l)f_L(l)\mathrm{d}l\tag{19}$$

则整个$A_0(l)$内的k_i个节点的边数为

$$E_i=\frac{k_i\cdot<k_j>}{2}\tag{20}$$

结合式(6)、式(16)、式(17)、式(19)、式(20)可得出节点i的聚类系数为

$$C_i=E_i\Big/\left(\frac{k_i(k_i-1)}{2}\right)=\frac{\iint_{A_0(l)}(k_i-1)\left(\iint_{A_0(l)\bigcap A_j(l)}f_L(l)\mathrm{d}l\right)f_L(l)\mathrm{d}l}{\left((n-1)\left(\iint_{A_0(l)}f_L(l)\mathrm{d}l\right)-1\right)}\tag{21}$$

则可知整个网络的聚类系数C为

$$C=\iint_A C_i f_L(l)\mathrm{d}l\tag{22}$$

结合式(7)、式(21)、式(22)、式(14)可以得出在半径为 1 即$A=\pi\times1^2=\pi$的圆形区域内基于 RWP 移动的网络的聚类系数为

$$C=\frac{45^3}{(128\pi)^3}\cdot\iint_A\left[\iint_{A_0(l)}(k_i-1)\left(\iint_{A_0(l)\bigcap A_j(l)}h(r)\mathrm{d}l\right)h(r)\mathrm{d}l\right]\Big/\left[(n-1)\left(\iint_{A_0(l)}\frac{45h(r)}{128\pi}\mathrm{d}l\right)-1\right]h(r)\mathrm{d}l$$

其中,$h(r)=2(1-r^2)\int_0^{\pi}\sqrt{1-r^2\cos^2\theta}\,\mathrm{d}\theta$.

结合式(7)、式(21)、式(22)、式(15)在正方形$[0,1]^2$即$A=1^2=1$区域内基于RWP移动的网络的聚类系数为

$$C=\iint_A\left[\iint_{A_0(l)}(k_i-1)\left(\iint_{A_0(l)\cap A_j(l)}f_L(l)\mathrm{d}l\right)\cdot f_L(l)\mathrm{d}l\right]\Big/\left[(n-1)\cdot\left(\iint_{A_0(l)}f_L(l)\mathrm{d}l\right)-1\right]f_L(l)\mathrm{d}l=$$

$$\int_0^1\int_0^1\left[\iint_{A_0(l)}(k_i-1)\left(\iint_{A_0(l)\cap A_j(l)}f_{XY}(x,y)\mathrm{d}l\right)\cdot f_{XY}(x,y)\mathrm{d}l\right]\Big/\left[(n-1)\cdot\left(\iint_{A_0(l)}f_{XY}(x,y)\mathrm{d}l\right)-1\right]\cdot f_{XY}(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

3 仿真试验与讨论

3.1 仿真试验介绍

本文采用Bonnmotion根据不同的移动场景参数产生各种RWP移动场景,并在各种不同的移动场景下得出网络的瞬时拓扑结构数据,通过对数据进行统计、分析和计算(如采用Floyd算法计算最短路径)得出网络的平均最短路径长度、聚类系数和度等试验结果.RWP仿真参数如表1所示.

表1 RWP仿真参数

参 数	值
信号辐射半径/m	25, 50, 75, 100, 250
仿真时间/s	500
去掉初始仿真时间/s	500
节点数目/个	100, 500, 1000
仿真区域面积/m×m	500×500, 1000×1000, 2000×2000
节点最大速度/(m·s^{-1})	30, 40
节点最小速度/(m·s^{-1})	0.1
节点最大暂停时间/s	0, 5, 50

3.2 仿真实验结果

1) 平均最短路径长度

图2、图3为Ad hoc网络调和平均最短路径长度图.从图2中可以看出,随着节点数的增加,L^{-1}增加,仿真区域的增大,L^{-1}减少.速度增加,L^{-1}增加,但幅度不大.定义节点密度为

$$D=\frac{\text{节点个数}}{\text{仿真区域面积}}\tag{23}$$

从图2中可以得出,节点密度D越大,L^{-1}越大(网络平均最短路径L越小),反之亦然.从图3中可以看出,随着节点信号辐射半径的增加,L^{-1}增加(网络平均最短路径L减小),但暂停时间对L^{-1}影响不大.

2) 聚类系数

图4、图5为Ad hoc网络聚类系数图.从图4中可以看出,随着节点数的增加,聚类系数增加;仿真区域的增大,聚类系数减少;节点速度增加,聚类系数增加,但幅度较小.因此可以得出,节点密度D越大,聚类系数越高,反之亦然.从图5中可以看出,随着节点信号辐射半径的增加,聚类系数增加,但暂停时间对聚类系数影响有限.

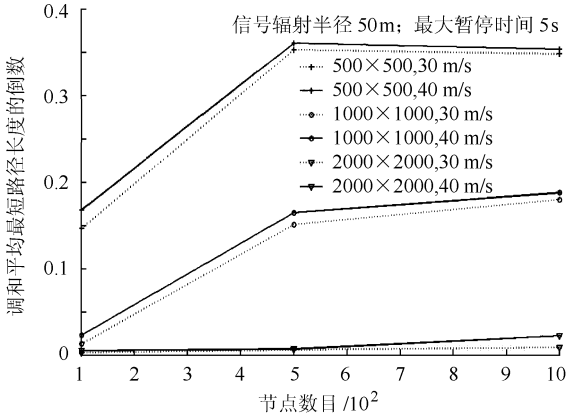

图2 Ad hoc网络调和平均最短路径长度

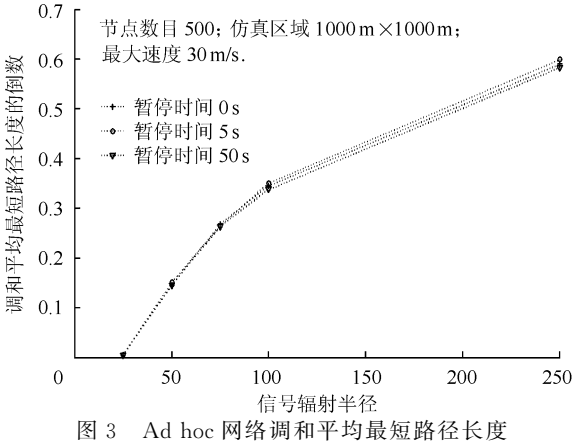

图3 Ad hoc网络调和平均最短路径长度

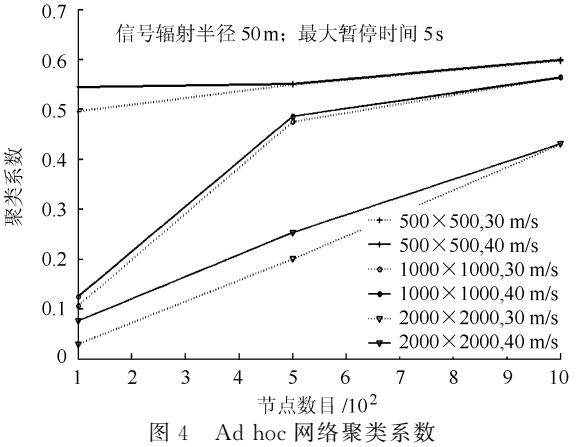

图4 Ad hoc网络聚类系数

3) 度分布

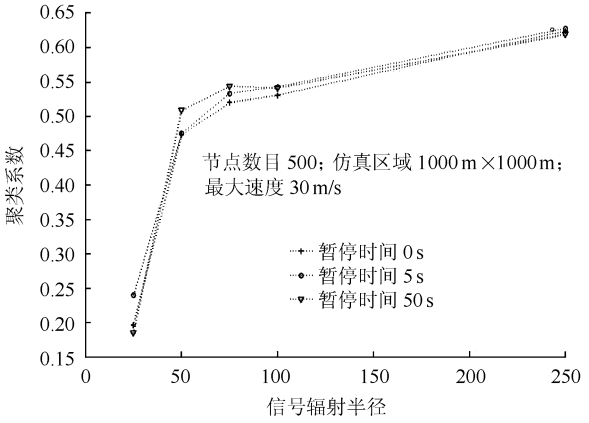

图 5　Ad hoc 网络聚类系数

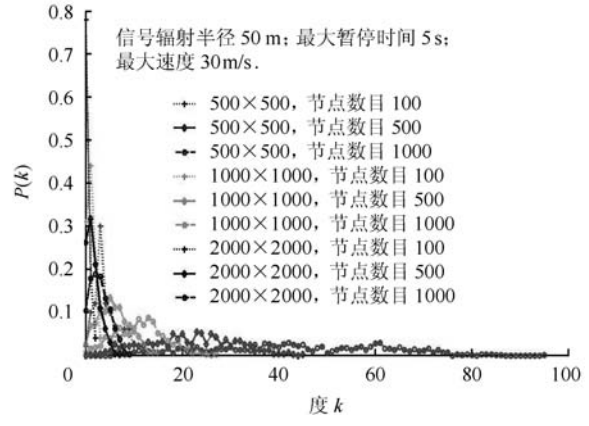

图 6　Ad hoc 网络度分布

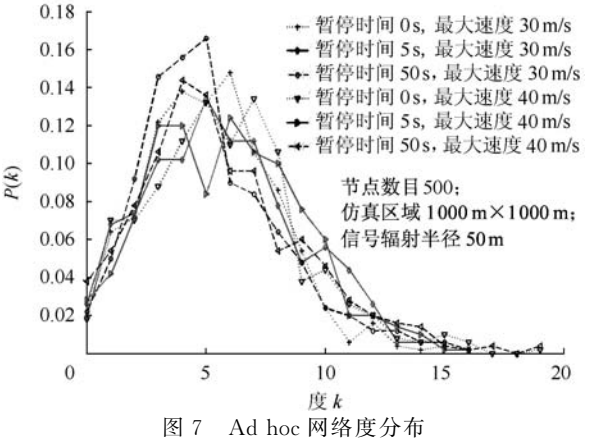

图 7　Ad hoc 网络度分布

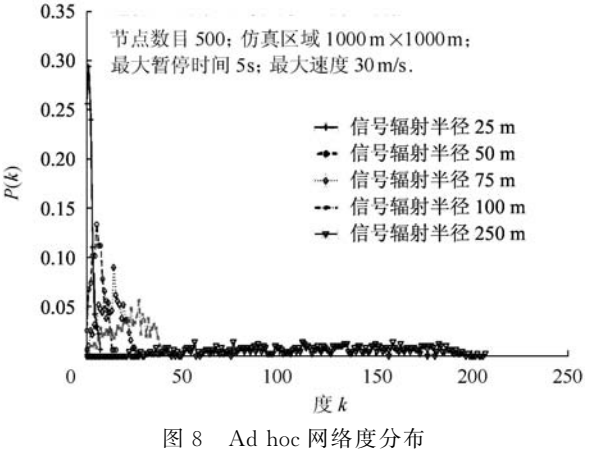

图 8　Ad hoc 网络度分布

图 6、图 7 和图 8 为 Ad hoc 网络度分布图. 从图 6 中可以看出,节点密度 D 较大,节点度 k 也较大,$P(k)$分布较均匀. 节点密度 D 较小,节点度 k 较小,度 k 越小,$P(k)$较大. 从图 7 中可以看出,节点暂停时间和最大速度对节点的度分布影响较小. 从图 8 中可以看出,随着节点信号辐射半径的增加,节点度增加,分布也趋均匀.

3.3　分析讨论

通过分析讨论以上仿真试验数据,可以初步回答以下问题.

1) Ad hoc 网络是否具备小世界效应(大聚类系数和小的平均最短路径)?

只有关系图才可能成为一个小世界图[11]. Ad hoc 网络是空间图,任意两个节点之间的连接关系取决于节点的信号辐射半径,处于某节点信号辐射半径外的其它节点不可能与该节点存在连接关系. 如果 Ad hoc 网络节点信号辐射半径足够大及仿真区域足够小,整个网络内的节点之间的连接关系就不受到节点之间距离的限制,那么 Ad hoc 网络并不是一个纯粹的空间图,也具备关系图的性质. 这一点从仿真试验中可以得到证实. 节点密度 D(最大 1 000 个节点在 500 m×500 m 的仿真区域内)越大时,网络具备较大的聚类系数,比如达到 0.6(节点信号辐射半径 50 m)和 0.82(节点信号辐射半径 250 m),具备较小的平均最短路径长度 2.78(节点信号辐射半径 50 m)和 1.26(节点信号辐射半径 250 m). 实际上,Ad hoc 网络节点密度和节点信号辐射半径越大,网络也由空间图向关系图转化,本试验中,节点信号辐射半径 250 m 和在 500 m×500 m 的仿真区域的情况下,节点信号辐射范围基本覆盖整个仿真区域,网络由空间图转化为关系图. 因此在节点密度和信号辐射半径条件具备的情况下,网络具有较大聚类系数和较小平均最短路径长度的小世界网络的特征. 但是,大多数情况下 Ad hoc 网络并不可能具备成为小世界网络的条件.

2) Ad hoc 网络度分布形态如何(σ 分布,泊松分布)? 是否具备无标度属性?

从试验数据可以看出,节点密度 D 和信号辐射半径越大,其度分布尖峰形状很宽,反之则尖峰形状很窄,趋向 σ 分布. 从节点度分布图转化而成的度分布对数坐标系图可以看出,节点密度 D 和信号辐射半径越小,图像趋近于具备无标度特征的一条直线,趋向幂律分布. 但是,大多数情况下 Ad hoc 网络并不可能具备成为无标度网络的条件.

计算机网络(包括 Ad hoc 网络)受到人类社会关系的影响,比如 WWW 上两个页面之间的超级链接,Internet 中两个路由器之间是否有光纤连接,蜂窝网络中节点之间通话关系均受到人类社会关系的影响. Ad hoc 网络中移动设备的持有者通常是人,设备的移动特征和连接决策行为必然要受到人的行为和社会关系的影响,所以它的通信连接关系不是完全随机的. Ad hoc 网络实际的应用中,增长特性、局域世界、随机化重连和优先连接是可能存在的. 比如在 Ad hoc 网络中节点 i 有 m 个近距离邻居,n 个远距离邻居;i 与 m 个邻近节点通信的概率大于与 n 个远距离邻居节点,而与节点 i 信号辐射范围外的另外的节点没有直接通信;若与节点 i 与节点 j 的通信较多,那么节点 i 与节点 j 的再次通信的概率也较大. 总之,Ad hoc 网络的节点移动特征和连接关系受到人的行为和社会关系的影响,并不是完全随机的. 因此,以上结论是在基于 RWP 的一定程度随机移动模式的前提下得出的,不一定适用未来实际应用场景中 Ad hoc 网络.

4 结束语

本文首先从理论上对基于 RWP 的 Ad hoc 网络的度分布和聚类系数进行分析. 其次对基于 RWP 各种移动场景下 Ad hoc 网络复杂统计特性进行初探,并得出这样的移动场景下 Ad hoc 网络在条件具备的情况下是可能具有小世界效应和无标度性质的,但是,大多数情况下,Ad hoc 网络并不是一个小世界网络,也不具备无标度性质.

目前 Ad hoc 网络仅仅是试验系统,并没有大规模应用,其大规模实用场景下节点移动的模式并不清楚,因此只能采用移动模型来模拟 Ad hoc 网络的移动场景. 本文仅对基于 RWP 移动场景下的特征进行研究,然而移动模型有很多种. 将本文仿真试验采用的移动模型扩展到 GaussMarkov Model, Manhattan Model, Reference Point Group Mobility Model(RPGM)甚至追踪移动模型等多种移动模型将是未来的工作之一. 此外,采用线性规划模型对平均最短路径长度进行分析,将 Ad Hoc 网络的网络性质调查扩展到介数(边介数和节点介数)和扩展仿真中节点数目使其达到较大的规模也将是未来的工作.

参考文献 (References)

[1] Watts Duncan J, Strogatz Steven H. Collective dynamics of'small-world' networks[J]. Nature, 1998,393(6684):440-442

[2] Barabási A, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286:509-512

[3] Johansson P, Larsson T, Hedman N, et al. Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks[C]//Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press,1999:195-206

[4] Dorogovtsev S N, Mendes J F. Evolution of networks: from biological nets to the Internet and WWW[M]. New York: Oxford University Press, 2003

[5] Helmy A. Small worlds in wireless networks[J]. Communications Letters, IEEE, 2003,7(10):490-492

[6] Dave C. Dharma A, Judith K, et al. Exploiting the small-world effect to increase connectivity in wireless ad hoc networks[C]//BRESIL International Conference on Telecommunications. Fortaleza Brazil: Springer LNCS,2004:388-393

[7] Helmy A, Small large-scale wireless networks: mobility-assisted resource discovery[J]. Technology Research News (TRN),2002(86)

[8] Bettstetter C, Hartenstein H, P′erez-Costa X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model[J]. ACM/Kluwer Wireless Networks, Special Issue on Modeling & Analysis of Mobile Networks, 2004, 10(5): 555-567

[9] Hyytia E, Lassila P, Virtamo J. Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6):680-694

[10] Bettstetter C, Resta G, Santi P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003,2(3):257-269

[11] Watts D J. Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness[M]. Princeton: Princeton University Press, 1999

(责任编辑:娄 嘉)