

基于连通度的 Ad hoc 网络路由协议研究与仿真*

袁培燕^{1,2}, 李腊元¹

(1. 武汉理工大学 计算机系, 湖北 武汉 430063; 2. 河南师范大学 物理学院, 河南 新乡 453007)

摘 要: 对 Ad hoc 网络各种路由协议进行仿真评估, 分析它们在不同约束条件下不同度量的相对性能, 是了解与学习路由协议性能的重要手段。目前的度量标准主要集中在吞吐量、延时、抖动、丢包率等 QoS 因子或路由负载、寻路时间等外部特性上, 还没有以 Ad hoc 网络系统本身的连通度作为度量标准进行仿真, 评价各种路由协议在不同试验条件下对于同一网络系统连通度的影响的相关研究。基于能量模型、节点密度、停留时间及移动速率四种约束条件对 MANET 提出的四种路由协议进行了关于网络连通度的仿真与评估, 给出了这方面的初步结论。

关键词: 连通度; 能量模型; 移动模型; 无线自组网络; 网络仿真; 网络协议

中图分类号: TP393.01 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2007)05-0273-05

Study and Simulation of Connectivity
Based on Routing Protocols in Ad hoc Networks

YUAN Pei-yan^{1,2}, LI La-yuan¹

(1. Dept. of Computer, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China; 2. College of Physical & Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang Henan 453007, China)

Abstract: It's main method to study routing protocols with simulation in different condition constrained and metrics. The current metrics are mainly focusing on the QoS factors such as throughput, delay, jitter, loss ratio and the external characteristics such as routing load or routing time. However, the related study using the connectivity as a metric to analysis the impact on network connectivity of diversified routing protocols in varying environment, are very few. The situation based on energy model, mobility model, node density, and draws some abecedarian conclusions were studied and simulated.

Key words: connectivity; energy model; mobility model; Ad hoc networks; network simulation; routing protocol

0 引言

Ad hoc 是一种特殊的无线网络, 没有中央控制设施。网络中的节点既是路由器, 又是主机, 作为对等实体连接在一起。非相邻的两两节点间的通信必须通过网络中的其他节点进行转发才能实现。如何在节点间选择合适的路由, 是 Ad hoc 网络的核心问题。

目前比较经典的路由算法有距离向量路由协议 DSDV^[1]和其他三种按需路由协议 AODV^[2]、DSR^[3]、TORA^[4]。一般地, 后者具有较低的路由负载而前者具有较低的端到端的延时。DSDV 是一种表驱动的路由协议, 基于改进后的经典的 Bellman-Ford 算法, 它使用序列号的机制, 避免了路由环路的产生和无限计数的问题。网络中的每一个节点维护一张路由表, 在该路由表中包含了所有可能到达的目的地以及到达这些目的地之间的跳数。尽管 AODV、DSR 和 TORA 同属于按需路由协议, 但它们的路由机制是不同的, AODV 使用表驱动的路由框架和目的序列号; DSR 使用源路由机制; 而 TORA 使用反向链路的路由机制。

对于 Ad hoc 网络连通度的研究, 目前主要以图论和连续统渗透理论^[5~8]为理论基础, 以移动节点服从泊松分布为前提

条件, 以 N 维空间为研究背景, 考察节点在什么样的发射半径下^[9~12]或节点的平均度^[12~17]在什么范围内, 整个网络拓扑是 k 连通的。这里, 假设网络的拓扑结构为一无向图 $G(V, E)$ 。其中 V 是节点的集合, E 是边的集合(v_i, v_j), $v_i, v_j \in V$ 。如果对于图中任意两个顶点 v_i, v_j , v_i 和 v_j 之间至少存在一条路径, 则称 G 是连通图。如果存在 k 条路径, 则称 G 是 k 连通的。一般地, 当发射功率满足 $r \geq c_1 \times \sqrt{(\ln n + c_2) / \pi n}$, 或节点的度 d 满足 $d \geq c_3 \times \log n$, 则网络拓扑是连通的。目前在理论方面存在的开放区域是当 $N \geq 2, k \geq 2$ 时, 关键的 r, d 和 λ_c 难以界定。这里节点的度指节点邻居节点的个数。两种研究方法的侧重点恰好相反, 前者每个节点的 r 是固定的, d 是变化的; 后者每个节点的 r 是变化的, d 是固定的。这种差异性的根本原因在于 Ad hoc 网络的移动特性。正是这种移动特性, 造成了局部节点密度 $\text{density}(t)$ 的不同。

文献[18]中同样对这四种路由协议进行了关于能耗的分析。它们的仿真模型考虑了不同停留时间对上述协议的影响; 25 个节点随机放置在大小为 500×500 的场景中。节点接收包时的能耗为 230 mW, 发送包时的能耗为 330 mW, 两者之比约为 0.69 ~ 1。文献[19]构建的仿真场景大小为 670×670 , 节点变化范围为 20 ~ 100, 节点停留时间为 40 s。分析了 DSR 和

DSDV 在能耗及节点终止率方面的性能。文献[20]构建的仿真场景为 1500×300 , 节点个数为 20, 速率为服从 $[0, 20]$ 的均匀分布, 源节点个数 10, 停留时间为 0、50、100、250 和 300s, 对 DSR、AODV 和 DSDV 进行了关于能耗方面的评价。由上可看出, 文献[18, 20]以停留时间的变化来构建仿真场景, 文献[19]以节点密度为变化来进行仿真分析。本文认为, 一方面, 他们的仿真模型是不完善的; 另一方面, 仅仅对能量和节点终止率进行分析, 以能耗的多少衡量协议性能的优劣, 没有考虑协议对于节点能耗的平衡性, 没有分析节点终止在不同仿真阶段的分布情况, 更没有进一步分析由于节点终止而造成的网络拓扑结构连通性的变化。此外, 文献[19, 20]也没有给出接收与发送时能耗的比例。这一点在进行关于能耗方面的评估是至关重要的。文献[18]中虽然给出了一个比例关系, 但是据了解^[21~23], 这种比例关系是不恰当的。基于上面的考虑, 笔者认为对 Ad hoc 目前这几种典型的路由协议进行关于网络连通度方面的评估是非常有必要的。

1 相关模型

1.1 能耗参数

在试验中, 采用了如下能量消耗计算公式:

$$\text{Energy} = \text{Power} \times \text{Time}$$

即当一个节点发送或接收一个包时所消耗的能量, 是由该节点发送或接收的功率和处理该包所需要的时间决定的。这里, 计算处理一个包的时间为

$$\text{Time} = 8 \times \text{PacketSize} / \text{Bandwidth}$$

因此: $E_{\text{tx}} = P_{\text{tx}} \times 8 \times \text{PacketSize} / \text{Bandwidth}$

$$E_{\text{rx}} = P_{\text{rx}} \times 8 \times \text{PacketSize} / \text{Bandwidth}$$

其中, P_{tx} 和 P_{rx} 分别代表发送和接收时需要的功率。

需要特别提出的一点是: 由于从路由层上看, 在节点上存在转发一个包的情况实际相当于在该节点处一个包在被接收之后再被转发出去。转发一个包所消耗的能量计算为

$$E_f = E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}}$$

在试验中根据文献[22]得出的结论, 选择 $P_{\text{tx}}/P_{\text{rx}} = 0.8$ 。

1.2 移动模型

1.2.1 发射节点的定位问题

发射节点的定位问题是所有移动模型的基础。因为网络中的每个节点在不同时刻担任不同的角色, 通过准确定位每个发射节点, 进而可以定位网络中的所有节点。目前有三种比较经典的定位技术, 即灯塔定位技术、定向技术和抵达时差技术^[24]。灯塔定位技术是在固定点放置大量的接收节点(灯塔), 每个接收节点根据收到的信号强度判断它们与发射节点的相对距离。一般来说, 收到最强信号的灯塔距离发射节点最近。该灯塔的位置可以用来估计发射节点的位置。灯塔定位技术的优点在于简单、耗费低, 不需要在各个接收节点同步时钟; 缺点是估计发射节点的位置不够准确。定向技术是根据接收节点收到信号的抵达角度(AOA)来决定发射节点的位置。明显地, 根据两个接收节点收到的信号抵达角度, 可以划出两条到达发射节点的直线, 则两条直线的交点就近似估计为发射节点的位置。因此, 定向技术的关键问题是要准确判断信号抵达的角度, 而这需要复杂的硬件设施的支持, 这是定向技术的不足之处。定向技术的优点在于它只需要两个接收节点就能

判断发射节点的近似位置, 精确性高于灯塔定位技术。定位技术的第三种方法是利用多对(发射节点、接收节点)信号抵达的时间差值(TDOA)。每一次 TDOA 的测量产生一条可能存在发射节点的双曲线, 两条双曲线的交点就近似估计为发射节点的位置。TDOA 需要每个接收节点的时钟同步, 根据三个节点的 TDOA 值, 可以近似计算出发射节点的位置:

$$R_{ij} = c \times t_{ij} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} \quad (1)$$

$$R_{ik} = c \times t_{ik} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2} \quad (2)$$

其中, R_{ij} 是接收节点 i, j 到发射节点距离的差值; t_{ij} 是发射节点的信号抵达接收节点 i, j 的时间差值; c 是光速; (x_i, y_i) 是接收节点 i 的位置; (x, y) 是发射节点的位置。

通过式(1)和(2), 可以求得两个未知量 x 和 y 的值。该值为发射节点的一个近似值, 可以求出几组解, 最后求得一个较优的平均值来近似表示发射节点的位置。

1.2.2 Random Waypoint Mobility 模型

文献[25]提出了一种随机的 Ad hoc 网络移动模型。基于这种模型, 节点在二维平面内的移动由一系列长度为随机值的移动间隔 T_n^i 组成。在每一个移动间隔中, 节点以固定速度 V_n^i 和固定方向 θ_n^i 移动, 每个移动间隔的移动距离为 $T_n^i \times V_n^i$ 。其中 V_n^i 、 θ_n^i 服从不同的分布, 移动间隔的个数 $N_n(t)$ 是一个离散的随机过程。图 1 显示了单个节点的间隔随机移动矢量情况。图 2 显示了 Ad hoc 网络的随机移动模型^[25]。

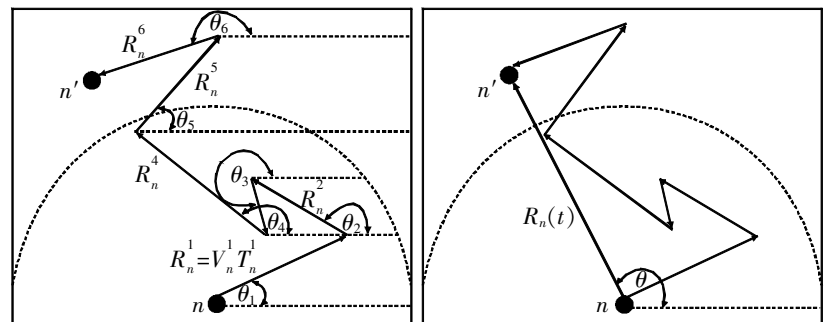


图 1 间隔随机移动矢量

图 2 随机移动模型

每个节点在移动过程中需要满足如下条件的约束:

- (1) 移动间隔的长度满足独立同分布的指数分布, 均值为 $1/\lambda_n$ 。
- (2) 移动的方向为满足在 $[0, 2\pi]$ 之间的均匀分布。
- (3) 移动的速率为满足均值为 μ_n 、方差为 σ_n 的独立同分布的正态分布。

同时, 上述三个参数之间没有必然的联系。移动模型与节点链路的失败之间相互独立。由文献[25]知, 两个节点之间的相互移动速率近似满足 Rayleigh 分布, 移动方向满足 $[0, 2\pi]$ 之间的均匀分布。

1.2.3 Reference Point Group Model(RPGM)

文献[26]提出了一种 RPGM 模型。在这种模型中, 节点在仿真的开始阶段被划分为不同的组, 每个组有一个逻辑中心; 逻辑中心的运动决定组成员的运动。每个节点拥有一个指向组运动的参考点, 该参考点随着组的运动而运动。单个节点的运动由两个矢量决定, 即组运动矢量和单个节点的参考点运动矢量。这两个矢量决定了单个节点的网络运动矢量。组的运动由一系列预先指定的检测点组成, 组的中心节点必须遍历这些检测点。自然地, 通过改变相应的检测点, 可以构造不同的仿真场景。组的运动模式由随机点线移动模型决定。每当

组到达某个目的节点时, 组内的所有节点停留一段时间, 然后重复上述过程, 向下一个目的节点移动。

1. 2. 4 曼哈顿网格移动模型

曼哈顿网格移动模型是由仿真类似市区场景而提出来的。市区一般由相互垂直的街道交织而成。节点在该场景下的移动只能按照水平或垂直方向运动, 而不能像上面的两种移动模型那样沿斜线运动。单个节点在某条街道随机选择一个点开始向目的节点以预先定义好的速率运动, 到达目的节点时, 停留一段随机时间; 然后向下一个目的节点重复进行上述运动, 详细的描述参考文献[27]。

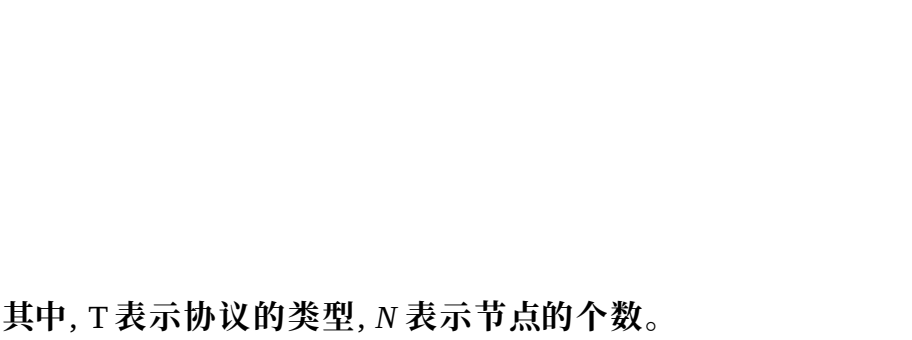
1. 3 其他参数的设置

试验中以 NS2^[28] 作为仿真平台, 实验所需的网络拓扑由 NS2 的 Setdest 工具生成, 节点的运行速率和初始位置均随机设置, 在整个仿真时间内模拟出各节点的随机运行场景。整个实验场景的区域为 1 000 m×1 000 m, 仿真时间为 300 s, 节点运行的最大速率为 40 m/s。节点间的数据流由 cbrgen 工具随机设置, 分别随机产生 6、12、24、30 和 60 对 UDP 流; 每个 CBR 包的大小为 512 Bytes, 每秒发送一个包, 网络的初始连通度为 0. 666, 带宽为 2 MB, 节点的发射半径为 250 m。本文一共使用了四种仿真场景: ①仿真场景的节点停留时间为 0, 节点个数分别为 10、20、40、50 和 100(改变场景的节点密度); ②仿真场景的节点个数为 50, 停留时间分别为 0、50、100、150、200、250、300 s; ③仿真场景的节点个数为 100, 停留时间与②一致; ④仿真场景为节点 50, 停留时间为 0, 最大移动速率分别为 10、20、30、40 m/s。上述四种场景有一小部分是重叠的, 即场景①节点个数为 50 和 100 时, 分别对应②和③停留时间为 0 的情况。试验一共生成 210 种随机拓扑, 每种情况对应 10 种, 最后的数据为 10 种拓扑所产生数据的平均值。试验中使用的无线信道模型是 Two Ray Ground Reflection Model^[29]。在 MAC 层使用 IEEE 802. 11 的 DCF(Distributed Coordination Function)^[30]。此外, 假定无线接收装置的抗干扰性能力较强^[31]。如果信干比(到达包的信号强度相对于干扰包信号强度的最小比率)^[32] 大于规定的门阈值, 接收到达的分组; 否则丢弃。

2 仿真结果分析

2. 1 节点密度对连通度的影响

表 1~3 显示了四种路由协议在不同的节点密度下死亡节点总数、网络存活时间和系统能耗的变化情况。



由三张表可以看出, 随着节点个数的增多, 四种协议的死亡节点总数和能耗均呈上升趋势, 网络存活时间呈下降趋势。TORA 的死亡节点最多, AODV 最少; AODV 耗能最多, 其次为 DSDV、DSR、TORA; TORA 的网络存活时间最短, DSDV 的网络存活时间最长。这说明 AODV 协议节点能耗平衡性较好, 能

够最大限度地保持网络的连通, 而 TORA 协议节点能耗平衡性则较差, 能耗过多地集中在少数几个节点上, 其连通性能也最差。这里笔者丰富了文献[19] 中的结论。文献[19] 只仿真了 DSDV 和 DSR 在不同节点密度下的能耗, 其结论与表 3 一致, 但没有分析节点终止对拓扑连通性能的影响。

表 3 能 耗					
T \ N	10	20	40	50	100
AODV	19. 52	41. 45	101. 81	156. 15	452. 36
DSDV	16. 83	22. 90	53. 37	68. 19	186. 60
DSR	14. 82	19. 60	25. 28	35. 50	84. 50
TORA	9. 66	10. 08	13. 35	14. 03	18. 64

AODV 虽然是一种按需路由协议, 但其仍需要定期的 HELLO 报文来检查邻居节点之间链路的连通情况, 并且这部分 HELLO 控制报文的数量会随着节点数目的增加呈幂方的形式递增。这也是表 3 中所显示 AODV 的能耗随着节点数的增多上升很快的原因。DSDV 是一种表驱动的路由协议, 网络中的控制报文过多, 因此 DSDV 的能耗也很大。也正是由于这种机制, 使得它的能耗表现得比较平稳。TORA 表现出了最小的能耗特性。由下面的分析可以知道, TORA 节点终止时间最早, 节点终止个数最多, 造成 TORA 网络的连通性能最差。由于 TORA 使用反向链路机制, 当节点与邻居节点之间的链路发生中断时, 中断节点把自己的序号设为邻居节点序号中的最大值, 这样路由就会向水流一样绕过中断节点。由于 TORA 中断节点个数最多, 造成在活跃节点之间的路由数目减小, 控制报文自然随之减少, 能耗也最低。

2. 2 停留时间对连通度的影响

表 4~6 显示了节点个数为 50 时, 每种协议在不同停留时间死亡节点、网络存活时间和能耗的情况。表 7~9 显示了节点个数为 100 时的相应情况。这里 T 表示协议的类型, P 表示停留时间(s)。可以看出, 随着停留时间的增大, 四种协议表现出共同的趋势: 节点终止的时间滞后, 节点终止的个数减少; AODV 和 DSDV 的能耗略呈下降趋势, DSR 和 TORA 的能耗略呈上升趋势。50 与 100 个节点两种情况相比, 后者的差异性减小, 在表中表现为各类数据更为接近; 不同之处在于 DSDV 受停留时间的影响较大(表 5), 而三种按需协议则较小。这是由于随着节点停留时间的增加, 网络拓扑由动态逐渐过渡为静态, 拓扑结构趋于稳定, DSDV 在静态拓扑结构下能够发挥出自身路由机制的优势, 而在动态的拓扑结构中则抖动较大。同时, 与节点密度对相应度量标准的影响相比, 在不同停留时间下, 死亡节点总数和能耗展现了几乎完全不同的趋势: 死亡节点个数减少, 能耗减少(AODV 和 DSDV)。但总体说来, 依然是 AODV 能耗最多, 死亡节点个数相对较少; TORA 能耗最少, 死亡节点个数最多, 网络存活时间最短。这说明在不同的停留时间下, AODV 协议节点能耗平衡性较好, 能够最大限度地保持网络的连通, 而 TORA 协议节点能耗平衡性则较差, 能耗过多地集中在少数几个节点上, 其连通性能也最差。DSDV 和 DSR 在能耗平衡性方面居中。

在此本文得出了与文献[18~20] 不同的结论。文献[18] 中的结论为 DSR 耗能最少, TORA 耗能最多, 并且随着停留时间的增加, 三种按需路由协议呈现下降的趋势; 而从表 6 和 9 可以看出, DSR 并没有表现出下降的趋势, 反面有轻微的上升

趋势。文献[20] 中没有仿真 TORA 协议, 关于能耗的结论与文献[18] 类似, 但没有给出三种按需路由协议呈现下降的趋势这一结论。文献[19] 中只仿真了 DSDV 和 DSR 在不同节点密度下的能耗, 结论与表 3 一致。但没有仿真两种协议在不同停留时间下的情况。除此之外, 文献[18, 20] 并没有分析节点终止的情况; 文献[18 ~20] 都没有分析节点终止对拓扑连通性能的影响。

表 6 不同停留时间下能耗情况

P T	0	50	100	150	200	250	300
AODV	156.15	135.29	96.03	102.49	114.24	91.89	89.84
DSDV	68.19	71.07	58.42	52.99	58.59	60.73	53.90
DSR	35.50	47.62	52.00	69.16	71.99	52.68	56.52
TORA	14.03	15.76	16.30	20.56	18.64	18.18	19.54

表 9 节点个数为 100 时, 能耗情况

P T	0	50	100	150	200	250	300
AODV	452.36	223.13	319.64	233.17	301.43	295.54	341.18
DSDV	186.60	196.79	169.81	159.51	170.26	169.89	153.29
DSR	84.50	83.55	83.21	76.21	123.15	95.67	125.87
TORA	18.64	21.38	24.05	21.40	25.81	21.28	26.20

2.3 移动速率对连通度的影响

表 10 ~12 显示了上述三种度量在不同移动速率下的变化情况。这里, T 表示协议的类型, V 表示节点移动的最大速率 (m/s)。与节点密度和停留时间下的结论几乎完全不同(死亡节点个数趋势相似, 但差异性也很小)。从三张表中可以看到, 移动速率对三种度量的影响很小, 在表中表现为同类数据之间的差值很少。除 DSDV 的存活时间略呈上升趋势之外, 其他三种路由协议略呈下降趋势。在能耗方面, 虽然依旧是 AODV 耗能最多, 但其他三种则几乎没有什么变化。仔细分析三张表之间的数据, 发现一个有趣的现象, 以速率为 30 m/s 为界限, 表中的数据总体上呈现出两种不同的趋势, 对于死亡节点总数和网络存活时间来说, 几乎全部是先下降再上升, 或先上升再下降(TORA 的存活时间一直下降)。对于能耗来说, 则表现为上升趋势(AODV 表现为一直上升, TORA 表现为下降趋势)。因此, 在仿真 Ad hoc 网络路由协议时, 建议速率为 30 m/s, 它是一个应当值得关注的数字。

表 12 节点个数为 50 时, 不同移动速率下能耗情况

V T	10	20	30	40
AODV	43.64	44.81	47.06	57.41
DSDV	29.86	28.98	29.27	27.89
DSR	17.97	19.00	17.89	19.57
TORA	14.63	14.41	15.09	14.77

总体说来, 依然是 AODV 能耗最多, 死亡节点个数相对较少; TORA 能耗最少, 死亡节点个数最多, 网络存活时间最短。这说明在不同的移动速率下, AODV 协议节点能耗平衡性较好, 能够最大限度地保持网络的连通, 而 TORA 协议节点能耗平衡性则较差, 能耗过多地集中在少数几个节点上, 其连通性能也较差。

3 结束语

本文与相关文献的不同点在于, 并没有从理论上证明或验证 Ad hoc 网络保持 k 连通的各种约束条件, 而是从考察协议节点能耗的平衡性出发, 仿真分析了目前四种典型的 Ad hoc 网络路由协议在保持网络连通度方面的相对性能。笔者认为: TORA 协议节点能耗平衡性差, 连通性能最差; AODV 协议关于各个节点的能耗比较均匀, 能够最大限度地保持网络的连通; DSDV 节点终止的时间最迟, 停留时间对其能耗性能影响较大, 停留时间较短时, 节点终止个数较少, 但能耗却仅次于 AODV。这说明在移动比较频繁的环境中, DSDV 协议节点能耗平衡性好, 停留时间长时, 节点终止个数多, 在相对静态的环境中, DSDV 协议节点能耗平衡性下降; DSR 协议在能耗平衡性方面居中。同时应当指出的是, 移动速率对系统能耗等度量指标的影响要小于停留时间和节点密度对它的相应影响, 并且 30 m/s 这个数字应当引起人们更多的关注。

参考文献:

[1] EKINS CHARLES E, BHAGWAT P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing for mobile computers[EB/OL]. (2003). [http://www. cs. umd. edu/projects/mcml/papers/ Sigcomm94. ps](http://www.cs.umd.edu/projects/mcml/papers/Sigcomm94.ps).

[2] PERKINS C. RFC3561 Ad hoc on-demand distance vector routing [S]. [S. l.]: [s. n.], 2003.

[3] JOHNSON D B, MALTZ D A, HU Yih-chun. The dynamic source routing protocol for mobile Ad hoc networks, Internet-Draft, draft-ietf-manet-dsr-10. txt[R]. [S. l.]: [s. n.], 2004.

[4] PARK V D, CORSON M S. Temporally-ordered routing algorithm (TORA) version 1: functional specification, Internet-Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-00. txt[R]. [S. l.]: [s. n.], 1997.

[5] BROADBENT S R, HAMMERSLEY J M. Percolation processes, I and II[C]. London: Cambridge Philos. Soc. , 1957: 629-645.

[6] BENJAMINI I, SCHRAMM O. Percolation beyond z^d , many questions and a few answers[J]. **Electron. Comm. Probab.**, 1996, **8** (1): 71-82.

[7] GRIMMETT G. Percolation[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

[8] BOOTH L, BRUCK J, FRANCESCHETTI M, *et al.* Covering algorithms, continuum percolation and the geometry of wireless networks [J]. **Annals of Applied Probability**, 2003, **13**(2): 722-741.

[9] SANTI P. The critical transmitting range for connectivity in mobile Ad hoc networks[J]. **IEEE Trans. on Mobile Computing**, 2005, **4** (3): 310-317.

[10] GUPTA P, KUMAR P R. Critical power for asymptotic connectivity in

wireless networks[C] . Boston: Birkh user, 1998: 547-566.

[11] SANTI P, BLOUGH D M. The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless Ad hoc networks[J] . **IEEE Trans. on Mobile Computing**, 2003, **2**(1) : 25-39.

[12] WAN P J, YI C W. Asymptotic critical transmission radius and critical neighbor number for k -connectivity in wireless Ad hoc networks [C] . Japan: IEEE Computer Society Press, 2004: 1-8.

[13] BETTSTETTER C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network[C] . Switzerland: IEEE Computer Society Press, 2002: 80-91.

[14] HEKMAT R, VANMIEGHEM P. Degree distribution and hopcount in wireless Ad hoc networks [C] . Sydney: IEEE Computer Society Press, 2003: 603-609.

[15] TONGUZ O K, FERRARI G. Is the number of neighbors in Ad hoc wireless networks a good indicator of connectivity[C] . Switzerland: IEEE Computer Society Press, 2004: 40-43.

[16] FERRARI G, TONGUZ O K. Minimum number of neighbors for fully connected uniform Ad hoc wireless networks[EB/OL] . http://www.ece.cmu.edu/~tonguz/paper/ICC2004_Neighbors_CR.pdf.

[17] XUE Feng, KUMAR P R. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks [J] . **Wireless Networks**, 2004, **10**(2) : 169-181.

[18] CANO J C, MANZONI P. A performance comparison of energy consumption for mobile Ad hoc network routing protocols[C] . San Francisco: IEEE Computer Society Press, 2000: 57-64.

[19] ANNE A, WENG Jie. Performance comparison of Ad hoc routing protocols for networks with node energy constraints[EB/OL] . (2004) . http://www.stanford.edu/~amaaron/ee360/EE360_FINAL_PAPER.pdf.

[20] 袁明, 张连芳, 舒炎泰. Ad hoc 网络路由协议能量消耗分析[J] . **计算机工程与应用**, 2003, **39**(15) : 146-149.

[21] STEMM M, KATZ R H. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices[J] . **IEICE Transactions on Communications**, 1997, **E80-B**(8) : 1125-1131.

[22] KASTEN O. Energy consumption[EB/OL] . (2001) . <http://www.inf.ethz.ch/~kasten/Research/bathtub/energy-consumption.html>.

[23] CHEN B, JAMIESON K, BALAKRISHNAN H, *et al.* Span: an energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in Ad hoc wireless networks[C] . Rome: ACM, 2001: 85-96.

[24] KEVIN J K, THOMAS E B, THEODORE S R. Wireless position location: fundamentals, implementation strategies, and sources of error [C] . America: IEEE, 1997: 919-923.

[25] MCDONALD A B. A mobility-based framework for adaptive clustering in wireless Ad hoc networks[J] . **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 1999, **17**(8) : 1466-1487.

[26] HONG X, GERLA M, PEI G, *et al.* A group mobility model for Ad hoc wireless networks[C] . Seattle: ACM/IEEE, 1999: 53-60.

[27] Universal Mobile Telecommunications System(UMTS) . Selection procedures for the choice of radio transmission technologies: America, TS 30.03 3GPP[P] . 1998.

[28] KEVIN F, KANNAN V. The network simulator: NS-2[EB/OL] . (2005) . <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>.

[29] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice [M] . New Jersey: Prentice Hall, 1996: 641-656.

[30] HAYES V, O'HARA B. IEEE Std 802.11-1997 Wireless LAN medium access protocol and physical layer specification[S] . New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.

[31] LEE S-J, HSU Julian, HAYASHIDA R, *et al.* Selecting a routing strategy for your Ad hoc networks[J] . **Computer Communications**, 2003, **26**(7) : 723-733.

[32] FRIIS H T. A note on a simple transmission formula: proc. of IRE [C] . [S.l.] : [s.n.] , 1946: 254-256.

[33] 祁彪, 何建华, 杨宗凯. 无线 Ad hoc 网络协议的仿真评估[J] . **华中科技大学学报: 自然科学版**, 2004, **32**(8) : 66-69.

[34] DAS S R, PEKIN C E, ROYER E M. Performance comparison of two on-demand routing protocols for Ad hoc networks: proc. of INFOCOM [C] . Tel Aviv: IEEE, 2000: 3-12.

(上接第 272 页)

[23] CHOLLMEIER R, GRUBER I, NIETHAMMER F. Protocol for peer-to-peer networking in mobile environments: proceedings of the 12th International Conference on Computer Communications and Networks [C] . [S.l.] : [s.n.] , 2003: 121-127.

[24] HSIAO H C, KING C T. Bristle: a mobile structured peer-to-peer architecture: International Parallel and Distributed Processing Symposium(IPDPS '03) [C] . [S.l.] : [s.n.] , 2003.

[25] MAMEI M. Creating overlay data structures with the TOTA middleware to support content-based routing in mobile P2P networks: proceedings of the International Workshop on Hot Topics in Peer-to-Peer Systems[C] . Washington DC: IEEE Computer Society, 2004.

[26] PUCHA H, DAS S M, HU Y C. Ekta: an efficient DHT substrate for distributed applications in mobile Ad hoc networks: proceedings of the 6th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications [C] . Washington DC: IEEE Computer Society, 2004.

[27] PENG Gang, LI Shanping, JIN Hairong, *et al.* M-CAN: a lookup protocol for mobile peer-to-peer environment: proceedings of the 7th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks[C] . [S.l.] : [s.n.] , 2004.

[28] YONEKI E, BACON J. Dynamic group communication in mobile peer-to-peer environments: proc. of the ACM Symposium on Applied Computing[C] . New York: ACM Press, 2005: 986-992.

[29] YU Chansu, PARK S M, KIM H N. Every node is born equal: attacking preferential attachment in peer-to-peer mobile multihop networks: proceedings of the 3rd Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops[C] . [S.l.] : [s.n.] , 2005.

[30] PAPADOPOULI M, SCHULZRINNE H. Design and implementation of a peer-to-peer data dissemination and prefetching tool for mobile users: the 1st New York Metro Area Networking Workshop[C] . New York: Watson Research Center, 2002.

[31] MASCOLO C, CAPRA L, ZACHARIADIS S, *et al.* XMIDDLE: a data-sharing middleware for mobile computing[J] . **International Journal on Wireless Personal Communications**, 2002, **21**(1) : 77-103.

[32] HOROZOV T, GRAMA A, VASUDEVAN V, *et al.* MOBY: a mobile peer-to-peer service and data network: proc. of the International Conference on Parallel[C] . Washington DC: IEEE Computer Society, 2002: 437-444.

[33] KOTILAINEN N, WEBER M, VAPA M, *et al.* Mobile chedar: a peer-to-peer middleware for mobile devices: proceedings of the 3rd Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops [C] . [S.l.] : [s.n.] , 2005: 86-90.

[34] MAMEI M, ZAMBONELLI F, LEONARDI L. Tuples on the air: a middleware for context-aware computing in dynamic networks: proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops[C] . [S.l.] : [s.n.] , 2003: 342.