

移动 Ad Hoc 网络的 k 连通性研究

盛 敏, 史 琰, 田 野, 李建东, 周恩惠

(西安电子科技大学ISN 国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 连通性是 MANETs(Mobile Ad Hoc Networks) 网络进行可靠数据传输的基础. 随着通信需求的日益增长, 要求 MANETs 网络具有更加健壮的网络拓扑结构, 从而有效地避免网络瓶颈节点并防止网络分割. 具有 k 连通特性的 MANETs 网络可以很好的满足上述要求, 因此本文着重研究了使 MANETs 网络满足 k 连通性的最佳传输半径问题, 获得的结论普适于节点分布在任何凸形区域 MANETs 网络, 在网络容错性设计方面具有较大的理论和实用价值.

关键词: 移动 Ad Hoc 网络; k 连通性; 最佳传输半径

中图分类号: TP913.2 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2008)10-1857-05

On the k -Connectivity in Mobile Ad Hoc Networks

SHENG Min, SHI Yan, TIAN Ye, LI Jiarr dong, ZHOU Err hui

(ISN State Key Laboratory, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Connectivity is the fundamental of the MANETs for end to end data transmissions. The robust network topology of MANETs is desired to meet the communication requirements, which has no hot spot nodes and can avoid network partition effectively. In this paper, the k -connectivity of MANETs is discussed, and an analytical expression of the probability of network k -connectivity is derived that enables the determination of the required critical transmitting range. The results of this paper are of practical value for the scenarios with high requirements on fault tolerate of node failure in MANETs.

Key words: mobile ad hoc networks; k -connectivity; critical transmitting range

1 引言

移动自组织网络^[1] (MANETs, Mobile Ad Hoc Networks) 由于其灵活性和有效性, 已经成为了蜂窝网络的有效加强并在移动通信网络中扮演着重要作用. 在 MANETs 网络中, 为了实现任意节点之间的可靠数据传输, 要求网络必须满足连通性条件, 即网络中不存在孤立节点或分割的子网络. 具备 k 连通特性的 MANETs 网络不仅可以保证网络的连通性要求, 而且在网络中有 $k-1$ 个节点或链路失效的情况下, 它也能网络中任意一对节点提供传输路径. 因此, 满足 k 连通特性的 MANETs 网络呈现出更强的抗毁性和鲁棒性. 此外, 更为重要的是: 由于任意一对节点之间至少具有 k 条不相同的路径, k 连通网络有利于网络负载的均衡, 能够有效地避免网络中出现瓶颈节点.

目前, 关于 MANETs 网络 k 连通特性的研究大多忽略了网络节点的移动性. 文献[2~4]给出了在圆形和正

方形静态网络场景中, 节点服从均匀分布时, Ad Hoc 网络渐进 k 连通的条件. 该结论仅适用于存在大量节点的网络环境, 即要求网络节点数目趋于无穷多; C. Bettstetter 在文献[5]中给出了有限节点均匀分布时, 静态网络 k 连通的条件. 当 MANETs 网络中的节点运动后, 节点的空间分布不再呈现出均匀分布的特性^[6], 这使得网络连通性问题的研究变得相对复杂. Polo Santi 等在 RWP (Random Waypoint)^[12] 移动模型下, 得出了 MANETs 网络简单连通 ($k=1$) 的关键传输半径^[7]; 文献[8]给出了圆形分布区域中, 有限节点服从 RWP 移动模型时, 网络的 k 连通条件. 从上面的讨论可以看出, 已有的研究成果都有一定的局限性, 主要表现在它们仅适用于某种特定区域的网络. 针对目前研究现状的不足, 本文研究了任意凸形区域下有限节点服从 RWP 运动模型时, MANETs 网络 k 连通的条件, 获得了网络 k 连通的关键传输半径 CTR (Critical Transmitting Range), 为建立更加健壮的网络拓扑提供了技术支撑.

收稿日期: 2007-09-17; 修回日期: 2008-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60572146, 60532060), 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2007AA01Z217); 国家杰出青年科学基金 (No. 60725105); 教育部重点项目 (No. 107103); 教育部新世纪优秀人才支持计划; 高等学校学科创新引智计划 (No. B08038)

2 RWP 模型下 MANETs 网络的 k 连通特性

MANETs 网络的一个显著特点是节点的移动性. 目前, Random Waypoint (RWP) 模型^[12] 是描述 MANETs 网络节点运动最常用的模型, 它描述了在给定区域内移动节点的运动方式. 该模型把节点的整个运动过程分解为一系列暂停和移动交替的过程. 也就是说, 节点在一个位置停留一定的时间后向下一个随机选取的目的地移动. 由于边界效应的影响, 当 RWP 运动模型在达到稳态后, 网络中节点将呈现非均匀分布.

下面针对分布在任意凸多边形区域 $D \subset R^2$ 内, 有限数量节点 (节点个数为 n , 所有节点的通信半径均为 d) 构成的 MANETs 网络场景, 讨论网络实现 k 连通的条件.

设网络节点按照 RWP 模型运动一段时间达到稳态时, 节点位于 (x, y) 处的概率密度函数为:

$$f_{XY}^D(x, y) = \begin{cases} f_{XY}(x, y), & (x, y) \in D \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

对于网络中位于 $(x_i, y_i) \in D$ 的任意节点 i 而言, 其覆盖范围 $B_d(x_i, y_i)$ 是以 (x_i, y_i) 为圆心, d 为半径的圆, 相应的极坐标方程可表示为 $(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d^2$, 其中 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$.

若点 (x_i, y_i) 与原点的距离大于或等于通信半径 d , 即 $\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \geq d$ (如图 1(a) 所示), 则有 $(r \cos \theta - x_i)^2 + (r \sin \theta - y_i)^2 = d^2$, 化简可得 $r^2 - 2r(x_i \cos \theta + y_i \sin \theta) + (x_i^2 + y_i^2 - d^2) = 0$. 这是一个关于 r 得一元二次方程, 解之得:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin \left[\frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right] - \arcsin \left[\frac{d}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right] \\ \theta_2 = \arcsin \left[\frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right] + \arcsin \left[\frac{d}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right] \\ r_1 = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta - \sqrt{(x_i \cos \theta + y_i \sin \theta)^2 - (x_i^2 + y_i^2 - d^2)} \\ r_2 = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta + \sqrt{(x_i \cos \theta + y_i \sin \theta)^2 - (x_i^2 + y_i^2 - d^2)} \end{cases} \quad (1a)$$

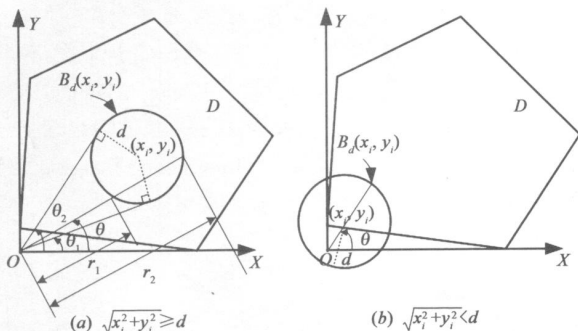


图1 网络模型

若 $\sqrt{x_i^2 + y_i^2} < d$ (如图 1(b) 所示), 原点将位于点 (x_i, y_i) 覆盖范围之内, 则有:

$$\begin{cases} \theta_1 = 0 \\ \theta_2 = 2\pi \\ r_1 = 0 \\ r_2 = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta + \sqrt{(x_i \cos \theta + y_i \sin \theta)^2 - (x_i^2 + y_i^2 - d^2)} \end{cases} \quad (1b)$$

设区域 D 中, 任意一个节点落入点 i 的覆盖范围 $B_d(x_i, y_i)$ 内的概率为 $p(x_i, y_i, d)$, 则有:

$$p(x_i, y_i, d) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \int_{r_1}^{r_2} f_{XY}^D(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr \quad (2)$$

那么点 i 有至少 k 个邻节点的概率为:

$$P_{\geq k}(x_i, y_i, d) = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} \binom{n-1}{j} \cdot p(x_i, y_i, d)^j \cdot (1 - p(x_i, y_i, d))^{n-1-j} \quad (3)$$

由于点 i 是凸多边形 D 内任意一点, 且 D 中各点具有独立性, 则凸多边形 D 内任意一个点有至少 k 个邻节点的概率为:

$$Q_{n, \geq k}(d) = \iint_D f_{XY}(x, y) P_{\geq k}(x, y, d) dx dy \quad (4)$$

根据文献[5], 网络 k 连通的概率近似为:

$$C_{n, k}(d) = P(\text{网络 } k \text{ 连通}) \approx (Q_{n, \geq k}(d))^n \quad (5)$$

根据公式(1)~(5)的结论, 若给定区域及在该区域下 RWP 模型的位置概率密度分布, 我们就可以分析得到使网络保持 k 连通的概率. 若期望网络 k 连通的概率较高 (如大于 95%), 则可以直接利用公式(1)~(5)获得使网络 k 连通的关键传输半径.

以上我们获得了任意凸形区域、RWP 模型下有限节点的 MANETs 网络 k 连通的理论分析结果, 下面通过具体的例子来验证上述结论.

3 仿真实验

这里选择 $[0, 1]^2$ 的正方形区域进行验证. 仿真时, 根据不同的运动参数随机生成了 10000 幅拓扑, 借助 DFS 算法^[10] 计算具有 k ($k = 1, 2, 3$) 连通特性的网络拓扑的数目, 并以该数目与 10000 的比值近似作为网络 k 连通的概率.

在正方形区域中, 节点服从 RWP 运动模型, 那么节点空间分布的概率密度函数与节点的停留时间 t_p 及节点的运动速度 v 有关, 下式给出了该概率密度函数^[9]:

$$f_{RWP}^D(x, y) = \begin{cases} P_{\text{pause}} \pm (1 - P_{\text{pause}}) f_m(x, y), & \text{if } (x, y) \in [0, 1]^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

这里, $P_{\text{pause}} = \frac{t_p}{t_p + \frac{v}{0.521405}}$

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

其中 (x, y) 的取值范围是 $Q^* = \{(x, y) \in [0, 1]^2 | (0 < x \leq 0.5) \wedge (0 < y \leq x)\}$. $f_m(x, y)$ 在正方形区域其它剩余

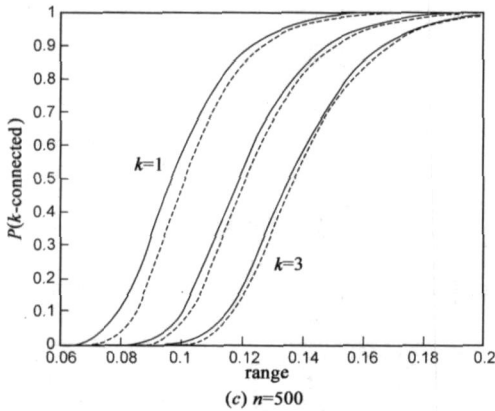
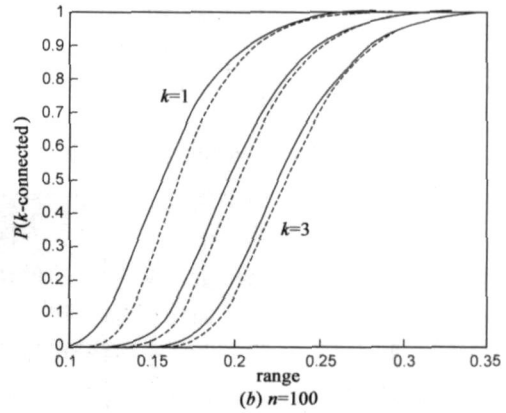
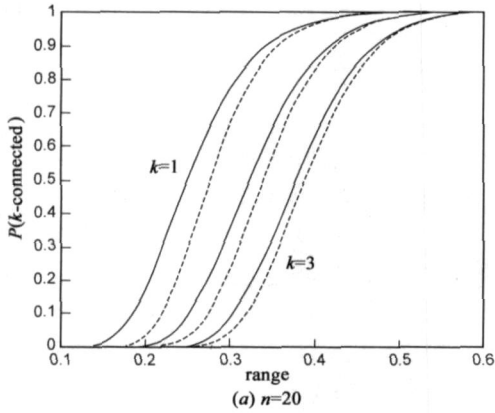
部分的概率密度函数可以通过对称性获得, 即:

$$f_m(x, y) = f_m(y, x) = f_m(1-x, y) = f_m(x, 1-y)$$

由此, 根据第 2 节公式(1)~(5)的结论, 可以得到网络 k 连通的概率.

3.1 停留时间对网络 k 连通的影响

(a) $t_p = 0$. 在这种情况下网络中所有的节点一直进行运动, 此时边缘效应最强.



$k \backslash n(\text{Prob.})$	1	2	3
	CTR	CTR	CTR
20(95%)	0.38	0.46	0.5
20(99%)	0.46	0.52	0.58
100(95%)	0.23	0.27	0.3
100(99%)	0.27	0.31	0.34
500(95%)	0.14	0.16	0.18
500(99%)	0.16	0.185	0.2

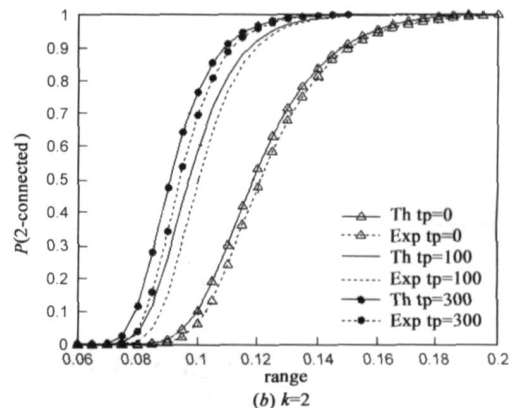
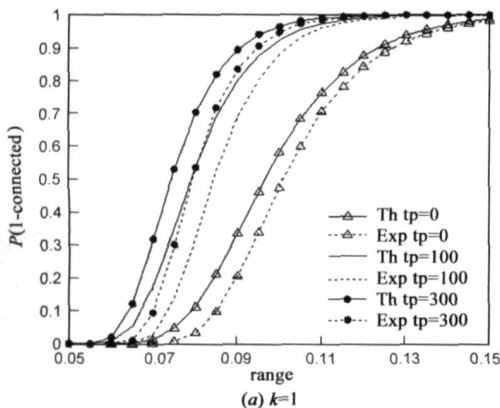
(d) k 连通情况下节点 CTR 值

图 2 n 个节点的网络 k 连通特性, 节点运动速度为 0.01m/s. 虚线为仿真值, 实线理论值

图 2 给出了不同网络规模情况下网络的连通性 ($k = 1, 2, 3$). 可以看出网络中节点数目越多, 网络 k 连通的理论值和仿真值越接近. k 值越大, 理论结果越理想. 同时, 我们还给出了在不同节点数目的网络环境下网

络满足 k 连通的 CTR 值. 例如: 利用图 2(d) 的结果, 我们可以获得要使网络以 95% 以上的概率 k ($k = 1, 2, 3$) 连通的关键传输半径, 分别为 0.14、0.16 和 0.18.

(b) 不同 t_p 的影响



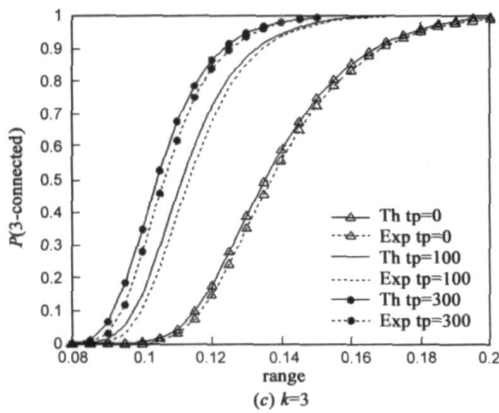


图3 网络节点数为500, 节点运动速度为0.01m/s. “Th”表示理论值, “Exp”表示仿真值

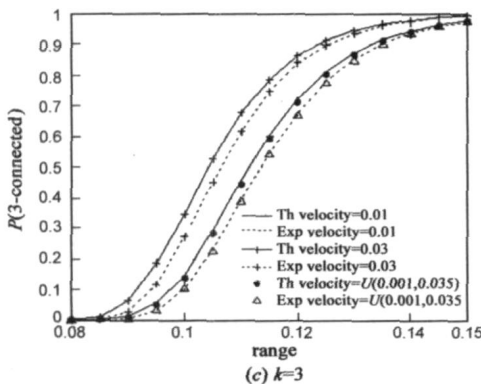
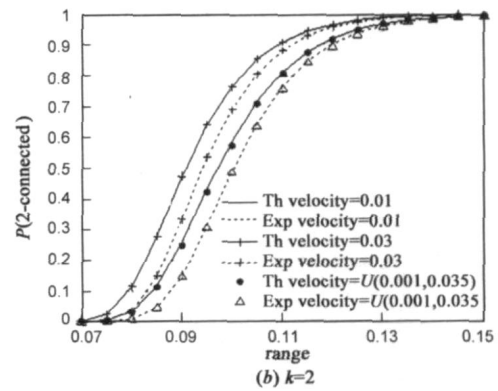
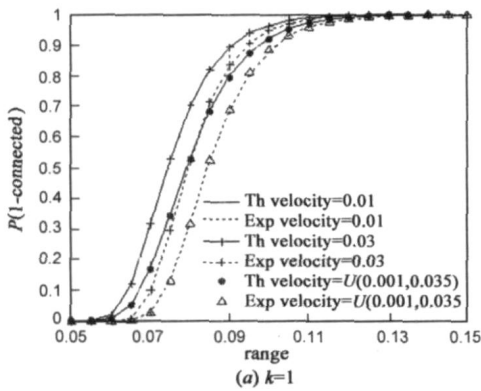
$n(\text{Prob.}) \backslash k$	1	2	3
	CTR	CTR	CTR
0(95%)	0.14	0.16	0.18
0(99%)	0.16	0.185	0.2
100(95%)	0.105	0.125	0.135
100(99%)	0.12	0.145	0.15
300(95%)	0.1	0.12	0.135
300(99%)	0.12	0.135	0.15

(d) k 连通情况下节点CTR值

众所周知, 正方形区域下 RWP 模型下, 停留时间越长, 节点的空间概率密度分布越接近于均匀分布. 在图 3 中, 我们可以清楚的看到相同的结论, 即越长的停留时间将导致节点的分布越均匀, 从而使网络 k 连通所需的最佳传输半径越小. 此外, 从图 3 中不难发现停留时间大于 100 以后, 网络 k 连通的最佳传输半径非常的近似, 这是因为当停留时间大于 100 以后, 节点的空间概率密度分布将趋于均匀分布, 因此得到的最佳传输半径在停留时间大于 100 以后基本相同.

3.2 运动速度对网络 k 连通的影响

在正方形区域下的 RWP 模型的概率密度分布函数中, 如果停留时间保持不变, 那么运动速度越快将会导致越短的运动持续时间, 从而也会使节点的概率密度分布呈现越均匀的情况. 图 4 验证了该结论. 同时, 在图 4 中, 如果运动速度服从 $(0.001, 0.035)$ 之间的均匀分布, 依照 RWP 运动模型可求得运动速度的平均值大约为 0.01, 所以这两种情况下获得的结果比较接近.



$n(\text{Prob.}) \backslash k$	1	2	3
	CTR	CTR	CTR
0.01(95%)	0.105	0.125	0.135
0.01(99%)	0.12	0.145	0.15
0.03(95%)	0.1	0.12	0.13
0.03(99%)	0.115	0.135	0.14
$U(95\%)$	0.105	0.125	0.135
$U(99\%)$	0.125	0.145	0.15

(d) k 连通情况下节点CTR值

图4 网络节点数为500, 无停留. “Th”表示理论值, “Exp”表示仿真值

4 结论

本文提出了一种分析在任意区域、RWP 运动模型下 MANETs 网络 k 连通性的分析方法, 获得了使网络保

持 k 连通的最佳传输半径. 在正方形区域中对所得结论进行了验证, 重点讨论了停留时间及运动速度对网络 k 连通的影响. 该结果对构建具有容错能力的网络

拓扑,提高网络的抗毁性具有重要的意义.

参考文献:

- [1] R Ramanathan, J Redi. A brief overview of ad hoc networks: challenges and directions[J]. IEEE Communication Magazine, 2002, 40(5): 20– 22.
- [2] C Bettstetter. On the connectivity of wireless multihop networks with homogeneous and inhomogeneous range assignment[A]. In Proc. IEEE VTC' 02 [C]. Vancouver: IEEE Press, 2002. 1706– 1710.
- [3] Peng Jun Wan, Chih Wei Yi. Asymptotic critical transmission radius and critical neighbor number for k -connectivity in wireless ad hoc networks[A]. In Proc. ACM MobiHoc' 04[C]. Tokyo: ACM Press 2004. 1– 8.
- [4] C Bettstetter, J Zangl. How to achieve a connected ad hoc network with homogeneous range assignment: an analytical study with consideration of border effects [A]. In Proc. MWCN' 02 [C]. Stockholm: IEEE Press, 2002. 125– 129.
- [5] C Bettstetter. On the connectivity of ad hoc networks[J]. Computer Journal, 2004, 47(4): 432– 447.
- [6] C Bettstetter, O Krause. On border effects in modeling and simulation of wireless ad hoc networks[A]. In Proc. MWCN' 01 [C]. Recife: IEEE Press, 2001.
- [7] Paolo Santi. The critical transmitting range for connectivity in mobile ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(3): 310– 317.
- [8] Pasi Lassila Esa Hyytia Henri Koskinen. Connectivity properties of random waypoint mobility for ad hoc network[OL]. www.netlab.tkk.fi/tutkimus/ahras/publ/rwpcnrmethocerc.pdf.
- [9] C Bettstetter, G Resta, P Santi. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(1): 25– 39.
- [10] Stephane Devismes. A silent self stabilizing algorithm for finding cut nodes and bridges [J]. Parallel Processing Letters, 2005, 15(1– 2): 183– 198.

作者简介:



盛 敏 女, 1975 年 8 月出生于湖南长沙. 西安电子科技大学教授、博士. 中国电子学会会员, 陕西省通信学会青年委员会委员. 主要研究方向包括移动 Ad Hoc 网络、无线传感器网络、QoS 技术以及个人通信网络等.
E-mail: msheng@mail.xidian.edu.cn