

## 三维移动 Ad hoc 网络链路动态性研究

郑博\* 黄国策 张衡阳  
(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

**摘要:** 3 维移动 Ad hoc 网络(3-D MANET)是一种网络场景分布于 3 维空间的移动 Ad hoc 网络。链路动态性分析是研究 3-D MANET 的一项基础性工作,其结论可作为网络协议设计的基础。该文基于 CV(Constant Velocity)移动模型,从概率模型的角度推导出了链路寿命期望和分布的数学表达式,并通过仿真实验进行了验证,表明了理论计算结果的正确性。结论对 3-D MANET 的研究和应用具有一定的参考价值。

**关键词:** 3 维移动 Ad hoc 网络; 链路动态性; 链路寿命; 期望; 概率密度函数

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2605-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00191

## Link Dynamics in Three-dimensional Mobile Ad hoc Networks

Zheng Bo Huang Guo-ce Zhang Heng-yang

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** 3-Dimensional Mobile Ad hoc NETWORK (3-D MANET) is a case of mobile Ad hoc network which is distributed on the 3-Dimensional space. Analysis of link dynamics is a fundamental issue in the studies of 3-D MANET, the conclusion of which can be the basis of the design of network protocol. Based on the Constant Velocity (CV) mobility model, analytical expressions of expected link lifetime and its distributions are derived from a probability model. Simulation results verify the accuracy of the analytical expressions. The conclusion is valuable for the research and application of 3-D MANET.

**Key words:** Three-Dimensional Mobile Ad hoc NETWORKS (3-D MANET); Link dynamics; Link lifetime; Expected; Probability Density Function (PDF)

### 1 引言

近年来,随着对移动 Ad hoc 网络研究与应用的不断深入,其应用场景逐渐由传统地面 2 维场景扩展到空间 3 维场景中,产生了一些崭新的研究领域,如卫星自组网<sup>[1]</sup>,航空自组网<sup>[2]</sup>,无人机自组网<sup>[3]</sup>,以及水声自组网<sup>[4]</sup>等。这些网络的共同特征是,节点在 3 维空间内运动,而且具有大规模的网络分布场景和高动态变化的拓扑结构,都属于 3 维移动 Ad hoc 网络(3-Dimensional Mobile Ad hoc NETWORK, 3-D MANET)。3-D MANET 已引起了研究人员的关注,文献[5-7]提出了多种适用于 3-D MANET 的路由算法。

链路动态性分析是研究 MANET 的一项重要的基础性工作,其结论可以作为 MAC 协议和路由协议设计的基础<sup>[8,9]</sup>。但目前针对 3-D MANET 链路动

态性研究的文献还非常有限,文献[10]从数学上推导出了基于 3 维布朗运动的 MANET 链路寿命平均值的表达式,然而布朗运动模型的随机性过强、实用性较差。研究人员针对传统 2 维 MANET 链路动态性已开展了较为深入的研究:文献[11]基于 CV (Constant Velocity)移动模型,采用概率计算的方法,推导出了多个关于链路寿命、链路建立,以及链路断开的数学表达式,深入分析了链路动态性;文献[12-14]分别针对 RWP(Random WayPoint), RD(Random Direction) 和 SMS(Semi-Markov Smooth)等移动模型,采用马尔科夫模型计算了链路寿命的累积分布函数;文献[15]基于 RWP 模型,采用了  $M/G/\infty/\infty$  循环队列模型得出了链路断开率的数学表达式。这些研究成果都为 3-D MANET 链路动态性的研究提供了可借鉴的方法。

本文对 3-D MANET 链路动态性进行了较为深入的研究。基于 CV 移动模型,采用概率计算的方法,推导出了链路寿命期望和分布的数学表达式,最后通过仿真实验进行了验证,表明了理论计算结果的正确性。结论对 3-D MANET 网络协议的设计具有一定的参考价值。

2011-03-10 收到, 2011-07-08 改回

国家自然科学基金(60972042), 航空科学基金(20095596016)和陕西省自然科学基金(2009JM8010, 2010JQ8010)资助课题

\*通信作者: 郑博 zbkgd@163.com

## 2 链路动态性分析

本文针对 3-D MANET 链路动态性的分析采用 CV 移动模型, 并基于以下几点假设条件:

(1) 网络中所有节点的通信半径为  $R$ , 即当两个节点间的距离小于  $R$  时, 二者间可建立双向通信链路, 当其距离大于  $R$  时, 链路断开。

(2) 节点运动速率均匀分布于区间  $[a, b]$ , 且每个节点在运动过程中速率保持恒定。

(3) 节点在运动过程中方向不变, 水平角度均匀分布于  $[0, 2\pi]$ , 垂直角度均匀分布于  $[0, \pi]$ 。

(4) 节点的运动速率、方向, 及其所处位置互相独立。

### 2.1 链路寿命期望

假设在 3 维空间中, 存在节点 1 和节点 2。定义节点 1 的速度  $\mathbf{v}_1 = v_1 \mathbf{k}$ , 节点 2 的速度  $\mathbf{v}_2 = v_2 \cos \theta \sin \varphi \mathbf{i} + v_2 \sin \theta \sin \varphi \mathbf{j} + v_2 \cos \varphi \mathbf{k}$ , 则节点 2 相对于节点 1 的速度为

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 = v_2 \cos \theta \sin \varphi \mathbf{i} + v_2 \sin \theta \sin \varphi \mathbf{j} + (v_2 \cos \varphi - v_1) \mathbf{k} \quad (1)$$

因此, 相对速率为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{(v_2 \cos \theta \sin \varphi)^2 + v_2^2 \sin^2 \varphi \sin^2 \theta + (v_2 \cos \varphi - v_1)^2} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1 v_2 \cos \varphi} \quad (2)$$

若只考虑相对速度, 节点 1 在原点  $O$  静止, 节点 2 从  $A$  点进入节点 1 的通信区域, 从  $B$  点离开其通信区域, 如图 1 所示。定义相对速度的水平方向为  $\alpha$ , 则

$$\alpha = \theta \quad (3)$$

定义相对速度的垂直方向为  $\beta$ , 则

$$\beta = \arccos \frac{v_2 \cos \varphi - v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1 v_2 \cos \varphi}} \quad (4)$$

由于  $\mathbf{OA}$  可表示为  $\mathbf{OA} = R(\cos \theta_A \sin \varphi_A \mathbf{i} + \sin \theta_A \sin \varphi_A \mathbf{j} + \cos \varphi_A \mathbf{k})$ ,  $\mathbf{OB}$  可表示为  $\mathbf{OB} = R(\cos \theta_B \sin \varphi_B \mathbf{i} + \sin \theta_B \sin \varphi_B \mathbf{j} + \cos \varphi_B \mathbf{k})$ 。设  $\mathbf{AB} = |\mathbf{AB}| \cdot (\cos \alpha \sin \beta \mathbf{i} + \sin \alpha \sin \beta \mathbf{j} + \cos \beta \mathbf{k})$ , 则

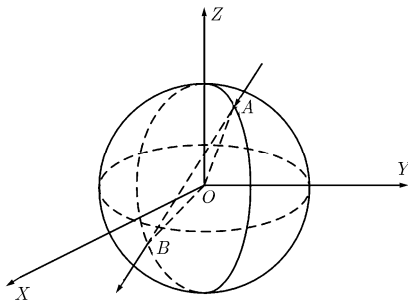


图1 节点1与节点2相对运动的几何模型

$$\mathbf{OB} = \mathbf{OA} + \mathbf{AB} \quad (5)$$

即

$$R(\cos \theta_A \sin \varphi_A \mathbf{i} + \sin \theta_A \sin \varphi_A \mathbf{j} + \cos \varphi_A \mathbf{k}) + |\mathbf{AB}| \cdot (\cos \alpha \sin \beta \mathbf{i} + \sin \alpha \sin \beta \mathbf{j} + \cos \beta \mathbf{k}) = R(\cos \theta_B \sin \varphi_B \mathbf{i} + \sin \theta_B \sin \varphi_B \mathbf{j} + \cos \varphi_B \mathbf{k}) \quad (6)$$

由于  $|\mathbf{OB}| = R$ , 可以求得

$$|\mathbf{AB}| = -2R(\cos \theta_A \cos \alpha \sin \varphi_A \sin \beta + \sin \theta_A \sin \varphi_A \sin \alpha \sin \beta + \cos \varphi_A \cos \beta) = -2R[\sin \varphi_A \sin \beta \cos(\theta_A - \alpha) + \cos \varphi_A \cos \beta] \quad (7)$$

因此, 节点 1 与节点 2 之间的链路长度为

$$d_{\text{link}} = 2R[\sin \varphi_A \sin \beta \cos(\theta_A - \alpha) + \cos \varphi_A \cos \beta] \quad (8)$$

链路寿命  $t_{\text{link}} = d_{\text{link}}/v$ 。则链路寿命期望为

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{link}}(v_1) &= E_{v, \alpha, \beta, \theta_A, \varphi_A}[t_{\text{link}}] \\ &= \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} t_{\text{link}} f_{v, \alpha, \beta, \theta_A, \varphi_A} \\ &\quad \cdot (v, \alpha, \beta, \theta_A, \varphi_A) dv d\alpha d\beta d\theta_A d\varphi_A \quad (9) \end{aligned}$$

经推导, 随机变量  $v, \alpha, \beta, \theta_A$  和  $\varphi_A$  的联合概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_{v, \alpha, \beta, \theta_A, \varphi_A}(v, \alpha, \beta, \theta_A, \varphi_A) &= \frac{vg(v, \alpha, \beta, v_1) \sin \varphi_A}{2\pi^3(b-a)} \\ &\quad \cdot [\sin \varphi_A \sin \beta \cos(\theta_A - \alpha) + \cos \varphi_A \cos \beta] \\ &\quad \cdot \left[ u\left(\varphi_A - \frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} - \left|\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right|\right) \right. \\ &\quad \left. - u\left(\varphi_A - \frac{5\pi}{4} + \frac{\beta}{2} + \left|\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right|\right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$g(v, \alpha, \beta, v_1) = \frac{u(h(v, \alpha, \beta, v_1) - a) - u(h(v, \alpha, \beta, v_1) - b)}{h(v, \alpha, \beta, v_1)} \quad (11)$$

$$h(v, \alpha, \beta, v_1) = \sqrt{v^2 + v_1^2 + 2vv_1 \cos \beta} \quad (12)$$

将式(8), 式(10)代入式(9), 推导可得

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{link}}(v_1) &= \frac{2R}{\pi(b-a)} \left[ \int_0^\pi \left( -\sin^5 \beta + \frac{5}{3} \sin^3 \beta + \frac{2}{3} \right) \right. \\ &\quad \cdot \ln \left( \frac{b + \sqrt{b^2 - v_1^2 \sin^2 \beta}}{v_1 + v_1 \cos \beta} \right) d\beta \\ &\quad - \int_{\pi - \arcsin(a/v_1)}^\pi \left( -\sin^5 \beta + \frac{5}{3} \sin^3 \beta + \frac{2}{3} \right) \\ &\quad \cdot \ln \left( \frac{a + \sqrt{a^2 - v_1^2 \sin^2 \beta}}{a - \sqrt{a^2 - v_1^2 \sin^2 \beta}} \right) d\beta \left. \right] \quad (13) \end{aligned}$$

若  $a = 0$ , 则式(13)可简化为

$$\bar{T}_{\text{link}}(v_1) = \frac{2R}{\pi b} \int_0^\pi \left( -\sin^5 \beta + \frac{5}{3} \sin^3 \beta + \frac{2}{3} \right) \cdot \ln \left( \frac{b + \sqrt{b^2 - v_1^2 \sin^2 \beta}}{v_1 + v_1 \cos \beta} \right) d\beta \quad (14)$$

若  $a = 0$ ,  $b = 100$  m/s,  $R = 250$  m, 根据式(14)计算链路寿命期望, 计算结果如图 2 所示。由图可知, 链路寿命期望随节点速率的增大而减小, 速率为 20 m/s 时的平均链路寿命约为速率为 100 m/s 时的 3 倍。同时, 根据式(14)可知, 链路寿命的期望与节点通信半径成正比。

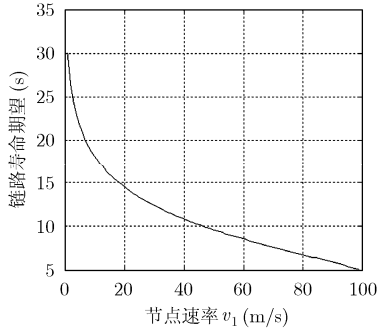


图 2 当  $a=0$ ,  $b=100$  m/s,  $R=250$  m 时的链路寿命期望

## 2.2 链路寿命分布

链路寿命的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 可定义为

$$F_{\text{link}}^{v_1}(t) = \text{Prob}\{t_{\text{link}} \leq t\} \quad (15)$$

当  $t < 0$  时,  $F_{\text{link}}^{v_1}(t) = 0$ 。当  $t \geq 0$  时, 有

$$\begin{aligned} F_{\text{link}}^{v_1}(t) &= \text{Prob} \left\{ \frac{2R |\sin \varphi_A \sin \beta \cos(\theta_A - \alpha) + \cos \varphi_A \cos \beta|}{v} \leq t \right\} \\ &= 1 - \text{Prob} \left\{ |\sin \varphi_A \sin \beta \cos(\theta_A - \alpha) + \cos \varphi_A \cos \beta| > vt/(2R) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

由于

$$\begin{aligned} &\text{Prob} \left\{ |\sin \varphi_A \sin \beta \cos(\theta_A - \alpha) + \cos \varphi_A \cos \beta| > \frac{vt}{2R} \right\} \\ &= \frac{1}{2\pi^2(b-a)} \left[ \int_0^{\pi/2} d\beta \int_{\pi/2-\beta}^\pi d\varphi_A \int_0^{4R/t} vM(v, \varphi_A, \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv \right. \\ &\quad + \int_{\pi/2}^\pi d\beta \int_0^{3\pi/2-\beta} d\varphi_A \int_0^{4R/t} v \\ &\quad \cdot M(v, \varphi_A, \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv - \int_0^{\pi/2} d\beta \int_{\pi/2-\beta}^\pi d\varphi_A \\ &\quad \cdot \int_0^{4R/t} vN(v, \varphi_A, \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv - \int_{\pi/2}^\pi d\beta \\ &\quad \left. \cdot \int_0^{3\pi/2-\beta} d\varphi_A \int_0^{4R/t} vN(v, \varphi_A, \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv \right] \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} M(v, \varphi_A, \beta, t) &= \frac{\sin \varphi_A}{R} \left( -4R^2 \cos(\varphi_A - \beta) \cos(\varphi_A \right. \\ &\quad \left. + \beta) - v^2 t^2 + 4Rvt \cos \varphi_A \cos \beta \right)^{1/2} \\ &\quad + \sin 2\varphi_A \cos \beta \\ &\quad \cdot \arccos \left( \frac{vt - 2R \cos \varphi_A \cos \beta}{2R \sin \varphi_A \sin \beta} \right) \\ &\quad + \pi \sin 2\varphi_A \cos \beta \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} N(v, \varphi_A, \beta, t) &= -\frac{\sin \varphi_A}{R} \left( -4R^2 \cos(\varphi_A - \beta) \cos(\varphi_A \right. \\ &\quad \left. + \beta) - v^2 t^2 - 4Rvt \cos \varphi_A \cos \beta \right)^{1/2} \\ &\quad + \sin 2\varphi_A \cos \beta \\ &\quad \cdot \arccos \left( \frac{vt + 2R \cos \varphi_A \cos \beta}{2R \sin \varphi_A \sin \beta} \right) \\ &\quad + \pi \sin 2\varphi_A \cos \beta \end{aligned} \quad (19)$$

所以, 链路寿命的累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_{\text{link}}^{v_1}(t) &= 1 - \frac{1}{2\pi^2(b-a)} \left[ \int_0^{\pi/2} d\beta \int_{\pi/2-\beta}^\pi d\varphi_A \right. \\ &\quad \cdot \int_0^{4R/t} vM(v, \varphi_A, \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv \\ &\quad + \int_{\pi/2}^\pi d\beta \int_0^{3\pi/2-\beta} d\varphi_A \\ &\quad \cdot \int_0^{4R/t} vM(v, \varphi_A, \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv \\ &\quad - \int_0^{\pi/2} d\beta \int_{(\pi/2)-\beta}^\pi d\varphi_A \int_0^{4R/t} vN(v, \varphi_A, \\ &\quad \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv - \int_{\pi/2}^\pi d\beta \int_0^{3\pi/2-\beta} d\varphi_A \\ &\quad \left. \cdot \int_0^{4R/t} vN(v, \varphi_A, \beta, t)g(v, \alpha, \beta, v_1)dv \right] \end{aligned} \quad (20)$$

根据式(18), 式(19)和式(20)可计算链路寿命的累积分布函数。对式(20)关于  $t$  微分, 可得链路寿命的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF)。

当  $a = 0$ ,  $b = 100$  m/s,  $R = 250$  m 时, 链路寿命的 PDF 如图 3 所示。由图可知, 链路寿命集中分布于 0~15 s 的范围内, 当节点速率增大时, 链路寿命更加向短时间区域集中, 而且链路寿命的分布与节点密度、节点位置无关。

## 3 仿真实验

下面采用蒙特卡罗实验的方法对上一节理论计算结果进行验证。在 3 维空间中建立一个半径为 500 m 的球体, 设置 100 个节点, 其中节点 1 的初始位置位于球心, 其他节点的初始位置在球体内随机分布, 除节点 1 外的其他节点随机选择运动速率和方向, 在运动过程中速度保持不变, 同时所有节点的运动不受球体空间限制。每次实验设定节点 1 的速

率值, 在每个速率值重复进行蒙特卡罗实验, 具体仿真参数如表 1 所示。实验结束后统计计算节点 1 与其他所有节点间链路寿命的平均值和节点 1 速率为零时链路寿命的概率密度函数, 并与理论计算值进行对比, 如图 4 和图 5 所示。由图可知, 仿真结

表 1 仿真参数设置

仿真参数	数值
最小速率	0 m/s
最大速率	100 m/s
节点通信半径	250 m
仿真时间	7200 s
实验次数	100000

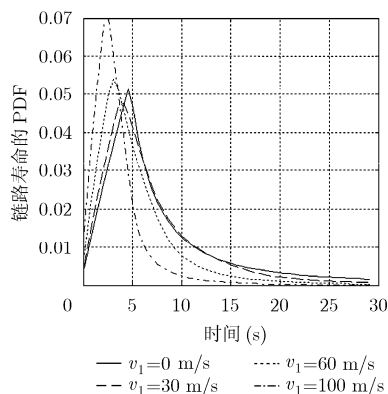


图 3 链路寿命的 PDF

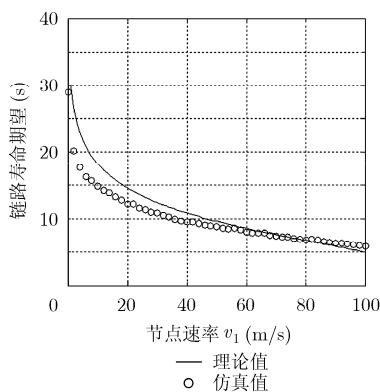
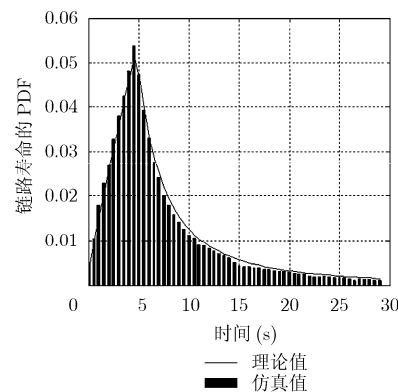


图 4 链路寿命期望的理论值与仿真值

图 5 当  $v_1 = 0$  m/s 时链路寿命 PDF 的理论值与仿真值

果与理论计算结果得到了较好的吻合, 这验证了理论计算结果的正确性。

## 4 结束语

本文系统研究了 3-D MANET 的链路动态性。基于 CV 移动模型, 采用概率计算的方法, 推导出了链路寿命期望和分布的数学表达式, 并利用蒙特卡罗实验进行了验证, 表明了理论计算结果的正确性。研究表明, 链路寿命期望随节点速率的增大而减小, 速率为 20 m/s 时的平均链路寿命约为速率为 100 m/s 时的 3 倍; 链路寿命集中分布于 0~15 s 的范围内, 当节点速率增大时, 链路寿命更加向短时间区域集中。结论对 3-D MANET 网络协议的设计具有一定的参考价值, 下一步将为 3-D MANET 设计适用的路由协议。

## 参考文献

- [1] Chang Zhi-jiam and Gaydadjiev G. Cross-layer designs architecture for LEO satellite Ad hoc network[C]. Proceedings of the 6th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC), Tampere, Finland, May 2008: 164-176.
- [2] 郑博, 张衡阳, 黄国策, 等. 航空自组网的现状与发展[J]. 电信科学, 2011, 27(5): 38-47.  
Zheng Bo, Zhang Heng-yang, Huang Guo-ce, et al. Status and development of aeronautical Ad hoc networks [J]. *Telecommunications Science*, 2011, 27(5): 38-47.
- [3] Frew E W and Brown T X. Airborne communication networks for small unmanned aircraft systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(12): 2008-2027.
- [4] Foo K Y, Atkins P R, Collins T, et al. Sea trials of an underwater, Ad hoc, acoustic network with stationary assets [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 2-16.
- [5] Liu Cong and Wu Jie. Efficient geometric routing in three dimensional Ad hoc networks [C]. 28th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Rio de Janeiro, Brazil, April 2009: 2751-2755.
- [6] Durocher S, Kirkpatrick D, and Narayanan L. On routing with guaranteed delivery in three-dimensional Ad hoc wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(1): 227-235.
- [7] Liu Song, Fevens T, and Abdallah A E. Hybrid position-based routing algorithms for 3D mobile Ad hoc networks [C]. 4th International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Networks, Wuhan, China, Dec. 2008: 177-186.
- [8] 胡曦, 李喆, 刘军. 移动 Ad hoc 网络中基于链路稳定性预测的按需路由协议[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 284-289.  
Hu Xi, Li Zhe, and Liu Jun. A link stability prediction-based on-demand routing protocol in mobile Ad hoc networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 284-289.
- [9] 吴大鹏, 武穆清, 甄岩, 等. 面向链路稳定性的 MANET 路径建立机制[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2227-2231.  
Wu Da-peng, Wu Mu-qing, Zhen Yan, et al. Reliable routing mechanism in MANET towards link stability [J]. *Journal of*

- Electronics & Information Technology*, 2009, 31(9): 2227-2231.
- [10] Chau Y A and Chen Yao-hua. Analytical link lifetime of a MANET based on the three-dimensional brownian mobility model [C]. Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Xiamen, China, Nov. 2007: 505-508.
- [11] Samar P and Wicker S B. Link dynamics and protocol design in a multihop mobile environment [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(9): 1156-1172.
- [12] Wu Xian-ren, Sadjadpour H R, and Garcia-Luna-Aceves J J. From link dynamics to path lifetime and packet-length optimization in MANETs [J]. *Wireless Networks*, 2009, 15(5): 637-650.
- [13] Wu Xianren, Sadjadpour H R, and Garcia-Luna-Aceves J J. Link dynamics in MANETs with restricted node mobility: modeling and applications [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(9): 4508-4517.
- [14] Zhao Ming and Wang Wen-ye. A unified mobility model for analysis and simulation of mobile wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2009, 15(3): 365-389.
- [15] Qin Guang-cheng, Yang Pan-long, and Tian Chang. Analytical framework of link dynamics in Ad hoc network-a perspective in queuing system [C]. 2010 Fifth International Conference on Frontier of Computer Science and Technology, Changchun, China, Aug. 2010: 187-191.
- 郑 博： 男，1982 年生，博士生，研究方向为移动 Ad hoc 网络。
- 黄国策： 男，1962 年生，教授，博士生导师，研究方向为军事通信网。
- 张衡阳： 男，1978 年生，讲师，博士，研究方向为移动 Ad hoc 网络、无线传感器网络、航空数据链等。