

# 基于 Markov 预测模型的 ETX 路由判据研究

苏浩明<sup>1</sup>, 黄 晞<sup>1</sup>, 施文灶<sup>1</sup>, 刘一粟<sup>2</sup>

(1. 福建师范大学 光电与信息工程学院, 福建 福州 350007;

2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007)

**摘 要:**在传统 ETX 路由判据的基础上,提出了一种改进的 ETX 路由判据。通过在 ETX 路由判据中加入 Markov 数学模型,建立先验的地理位置预测机制。在无线 Mesh 网络节点运动频繁的情况下,使用 Markov 模型预测节点下一时刻的地理位置,进而根据节点下一时刻的地理位置,判断原路由是否失效,若原路由已失效,则重新选择 ETX 值次之路由,以此类推,直至选出可用的最佳路由。在仿真实验平台 NS-2 中分别提高节点的运动速度和业务速率,从吞吐量、丢包率和平均时延三方面对 ETX 路由协议进行仿真模拟实验和分析,保持节点的移动速度为 30 m/s,使用改进的 ETX 路由判据,网络的平均吞吐量提高约 40%,丢包率和平均时延分别降低约 30% 和 60%。保持节点的业务速率为 25 kbps,使用改进的 ETX 路由判据,网络的平均吞吐量提高约 30%,丢包率和平均时延分别降低约 30% 和 80%。

**关键词:**无线 Mesh 网络;路由协议;ETX 路由判据;Markov 预测模型;NS-2

**中图分类号:**TP393.17

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2018)10-0049-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2018.10.010

## Research of ETX Routing Metric Based on Markov Prediction Model

SU Hao-ming<sup>1</sup>, HUANG Xi<sup>1</sup>, SHI Wen-zao<sup>1</sup>, LIU Yi-su<sup>2</sup>

(1. School of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:**Based on the traditional ETX routing criterion, we propose an improved ETX routing criterion which establishes a prior location prediction mechanism by applying Markov mathematical model into ETX routing criteria. Under the situation of wireless Mesh nodes frequent movement, the Markov model is used to predict the geographical location of node at next moment, according to which the original route validity is estimated. If the original route has failed, reroute the next route to the ETX value until the best available route is selected. In the simulation experiment platform NS-2, the motion speed and business speed of nodes are respectively improved, and the ETX routing protocol is simulated and analyzed from the three aspects of throughput, packet loss rate and average time delay. Keeping the node at the speed of 30 m/s, using the improved ETX routing criterion, the average throughput of the network rises by about 40%, the packet loss rate and the average time delay reduces by about 30% and 60% respectively. Keeping the nodes' business at the rate of 25 kbps, by the improved ETX routing criterion, the average throughput of the network rises by about 30%, and the packet loss rate and the average time delay respectively reduces by about 30% and 80%.

**Key words:**wireless Mesh network; routing protocol; ETX routing metric; Markov prediction model; NS-2

## 0 引言

无线 Mesh 网络结合了 ad hoc 网络 and 传统无线网络的优点。其核心指导思想是让网络中的每个移动或固定节点都可以发送和接收信号,节点间的通信不再需要接入点转接。通过多跳网络的构造,数据可以通过相邻节点间的转发传送到目的地,减小了流量拥塞

的可能性,大大提高了网络整体性能<sup>[1-2]</sup>。

路由判据用来计算源节点到目的节点的开销最小的路径,需确保路由稳定、网络性能良好、算法明确、无路由环路。众多适合于无线 Mesh 网络的路由判据中,ETX(expected transmission count,期望传输次数)通过某个链路从源节点到目的节点在过去一段时间内

收稿日期:2017-11-12

修回日期:2018-03-15

网络出版时间:2018-05-16

基金项目:国家自然科学基金(41701491);福建省自然科学基金(2017J01464)

作者简介:苏浩明(1991-),男,研究生,研究方向为无线通信网络;黄 晞,博士,副教授,研究方向为 FPGA、人工智能;施文灶,博士,副教授,研究方向为数字图像信息提取。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180515.1702.074.html>

发送一个数据包的平均传输次数,来预测未来发送一个数据包所需要的传输次数。但这样的路由判据只能反映历史时间内网络性能的情况,没有考虑节点移动引起的网络拓扑和性能的变化,因此对于网络节点移动频繁的场景,该路由判据有很大的局限性<sup>[3-4]</sup>。因此,文中提出一种改进的基于 Markov 数学模型的 ETX 路由判据,通过节点过去一段时间的位置,预测节点未来的位置,判断在下一时刻源节点和目的节点是否在彼此的通信范围内,以确定 ETX 路由判据是否失效,从而选择出更加合适的路由。

## 1 ETX 判据及其改进

### 1.1 传统 ETX 判据

ETX 路由判据的思路是根据历史时间内成功传输到目的节点所需要的平均发送次数来预测未来一段时间成功传输到目的节点所需要的发送次数。这一路由判据一般应用于无线 Mesh 网络<sup>[4]</sup>。无线链路的 ETX 是指无线链路上成功传输一个分组时所需的平均预计传输次数<sup>[5]</sup>。ETX 中,每个节点定期广播一个固定长度的专用链路探测包,这个数据包包含最后一段探测时间内从每个相邻节点接收到的探测分组的数据。

每个节点通过相邻节点转发或反向发送的专用链路探测包,可以计算出成功递交率  $d_r$  和  $d_r$ <sup>[6]</sup>,然后就可以得到期望传输次数了,如下所示:

$$ETX = 1/d_r \times d_r \quad (1)$$

这种传统 ETX 路由判据没有考虑节点的运动带来的拓扑变化,无法判断下一时刻节点是否在彼此的通信范围内,不能据此做出相应的路由调整,且对拓扑变化的反应速度太慢,存在潜在的不稳定性,难以满足节点地理位置和网络拓扑变化频繁的网络系统高速率传输、高吞吐量和快速收敛的需求。

### 1.2 改进的 ETX 判据

改进传统 ETX 路由判据的问题,不仅需要预测未来节点之间的平均传输次数,还需要预测节点未来的运动轨迹,据此判断下一时刻节点是否在彼此的通信范围内,是否需要调整路由。通过在直角坐标系中定位网络系统中各节点的位置,获取节点的横纵坐标,并以时间为自变量,将历史时间内节点的坐标-时间的关系带入 Markov 数学预测模型,来预测节点下一时刻的坐标,从而获取节点下一时刻的位置。根据对节点下一时刻位置的预测,如果下一时刻节点还在彼此的通信范围内,则原 ETX 路由判据不需要修改,如果不在彼此的通信范围内,那么这条链路判定失效<sup>[7-9]</sup>,选择 ETX 次之的路由并同样判断下一时刻是否在彼此的通信范围内,以此类推直至找出最优路由。

## 2 改进 ETX 判据的实现

### 2.1 在专用链路探测包中加入地理位置信息

传统的 ETX 路由判据的探测包中有探测包生成的时间、历史时间内接收到的相邻节点的 IP 信息及其发出的探测包的数目<sup>[10]</sup>。改进 ETX 判据,需在探测包中加入节点地理位置的信息,预测节点下一时刻的位置。文中的路由判据在 DSR 路由协议内实现,其探测包的格式可以改进为:

```
struct link_probe {
    float now_;
    .....
    double position_x;//①
    double position_y;//②
    double position_z;//③
};
```

其中,①、②、③三句为探测包中添加的信息,position\_x、position\_y、position\_z 为节点的地理位置在三维直角坐标系中的三维坐标。

### 2.2 利用 Markov 模型预测节点下一时刻地理位置

Markov 链是一种离散时间随机过程,可以根据当前位置,预测下一时刻位置<sup>[11]</sup>。Markov 模型可以很好地预测基于时间序列的各种参数,是一种消耗代价小、准确率较高的地理位置预测方法。其基本思想为:  $X_n = i$  表示在  $n$  时刻对象处于状态  $i$ ,对于每一个状态  $i$ ,存在一个固定概率  $P_{ij} \geq 0$ ,使其下一时刻处于状态  $j$ <sup>[12-13]</sup>。其公式为:

$$\Pr(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P_{ij} \quad (2)$$

对于上述公式,可以解释为:任何下一时刻的状态  $X_{n+1}$  独立于过去时刻的状态  $X_{n-1}, \dots, X_1, X_0$ ,只取决于上一时刻状态  $X_n$ <sup>[12-13]</sup>,即

$$\Pr(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = \Pr(X_{n+1} = j | X_n = i) = P_{ij} \quad (3)$$

建立转移概率矩阵:

$$M = \begin{matrix} & a_1 & \cdots & a_i & \cdots & a_m \\ \begin{matrix} a_1 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1j} & \cdots & P_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \cdots & P_{ij} & \cdots & P_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mj} & \cdots & P_{mm} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

矩阵的行元素表示历史位置(状态),列元素表示下一个位置。矩阵元素表示在行元素代表的历史位置(状态)的条件下的下一个位置到达列元素代表的位置的概率。

$$P_{ij} = \frac{\text{number of trajectories on}(a_i, a_j)}{\text{number of trajectories on all outgoing edges}} \tag{5}$$

在进行移动预测时,根据轨迹定位到转移概率矩阵中的相应行,该行中最大概率值对应的列所代表的位置为预测结果:

$$X_p = \operatorname{argmax}\{p\{X_{n+1} \mid C\}\} \tag{6}$$

其中,  $X_p$  为预测结果;  $C$  为当前位置。

对于 ETX 路由判据,由于其周期性广播探测包,时间序列为离散的,故文中涉及到的对于地理位置的预测可以使用该方法。根据节点在  $t-1$  时刻和  $t$  时刻的地理位置信息,利用 Markov 模型分别预测出  $t+1$  时刻节点的位置,再利用最小均方误差预测,修正计算出节点在  $t+1$  的地理位置作为最终预测结果。

2.3 判断下一时刻节点是否在各自通信范围内

利用上述方法分别计算出相邻节点  $i$  和  $j$  各自在下一时刻的地理位置,并据此计算出两个相邻节点下一时刻的距离:

$$d = \sqrt{(x_i(t+1) - x_j(t+1))^2 + (y_i(t+1) - y_j(t+1))^2} \tag{7}$$

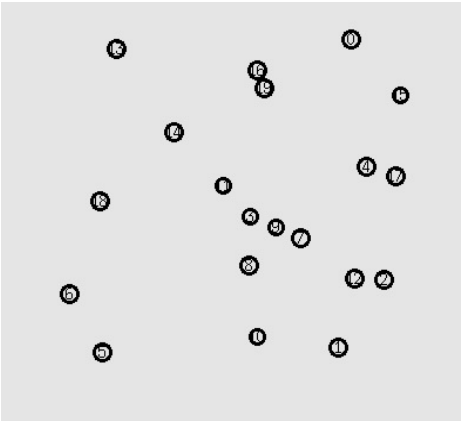
其中,  $x_i$ 、 $y_i$  分别指两个相邻节点<sup>[14-15]</sup>。

3 测试与仿真

3.1 仿真环境

基于 Ubuntu 操作系统的 NS-2 仿真平台进行仿真模拟实验,实验使用 DSR 路由协议。NS-2 是一种面向对象的网络模拟器,使用 OTCL 和 C++两种语言,可用于模拟各种不同的通信网络和通信协议<sup>[16-17]</sup>。DSR(dynamic source routing,动态源路由)协议是一种按需更新反应式路由协议<sup>[18]</sup>。

实验设计 20 个节点随机分布在一个 800 m×800 m 的区域内,每个节点的通信范围均为 250 m,信道容量 2 Mbit/s,如图 1 所示。



万方数据 图 1 仿真环境

仿真流程如图 2 所示。

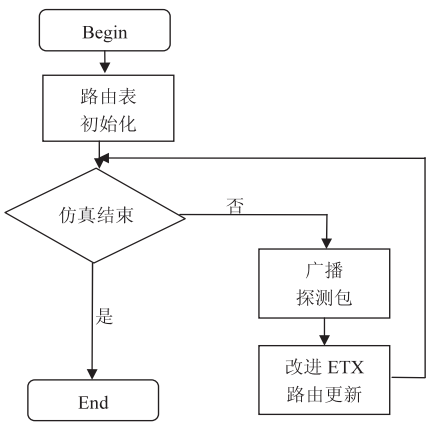


图 2 仿真流程

3.2 仿真结果

首先固定节点移动速度,改变业务速率,分别仿真分析加入改进的 ETX 路由判据节点的吞吐量、丢包率和时延的变化情况。

固定节点的移动速度为 30 m/s,分别改变节点的业务速率进行仿真实验。每个节点的业务速率从 5 kbps 增加到 30 kbps。随着节点业务速率的不断提升,DSR 和加入改进 ETX 路由协议的吞吐量均有提升,且加入改进 ETX 路由协议的提升更加明显。当节点速率为 5 kbps 和 10 kbps 时,改进 ETX 路由协议和 DSR 路由协议的吞吐量大致相同,但是当节点业务速率进一步提升时,DSR 路由协议的吞吐量最终维持在 280 kbps 左右,而改进 ETX 路由协议可达到 390 kbps,改进 ETX 路由协议的吞吐量提高了约 40%。仿真结果如图 3 所示。

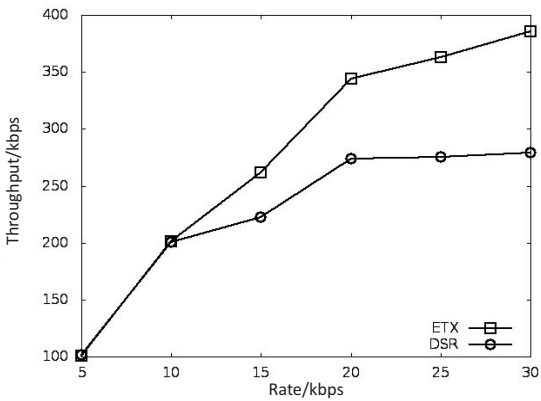


图 3 吞吐量随业务速率的变化

从丢包率来看,随着业务速率的不断提升,相应的 DSR 路由协议和改进的 ETX 路由协议的丢包率均明显提升,但改进 ETX 路由协议的丢包率均小于 DSR 路由协议。当节点业务速率为 30 kbps 时,丢包率降低约 30%。从时延来看,改进的 ETX 路由协议对于业务时延的保障显著优于 DSR 路由算法,业务速率在 20 kbps 以内,时延基本保持不变,业务速率大于 20 kbps,

其时延才会提高,但仍然明显低于 DSR 路由协议,当节点业务速率为 30 kbps 时,平均时延降低了约 60%,如图 4 和图 5 所示。

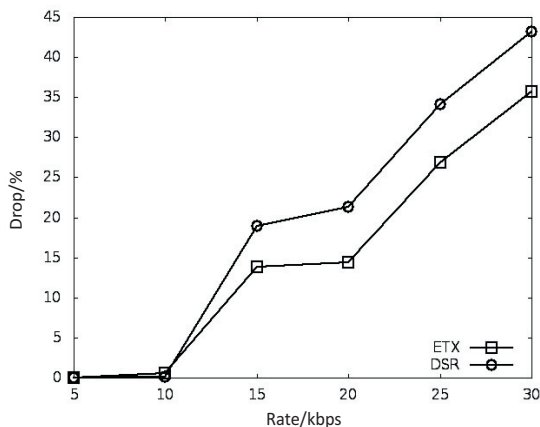


图 4 丢包率随业务速率的变化

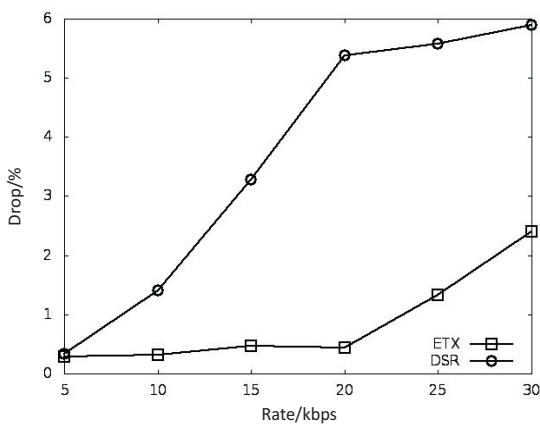


图 5 时延随业务速率的变化

再固定节点的业务速率,改变移动速度,分别仿真分析加入改进的 ETX 路由判据前后节点的吞吐量、丢包率和时延的变化情况。

固定节点的业务速率为 25 kbps,分别改变节点的移动速度进行仿真实验。每个节点的移动速度从 5 m/s 增加到 30 m/s。随着节点移动速度的不断提升,DSR 和加入改进 ETX 路由协议的吞吐量显著降低,因为随着节点的移动网络拓扑发生变化,DSR 需要不断发送探测包更新路由表。但加入改进 ETX 路由协议的降低幅度较小。当节点速率为 5 kbps 和 10 kbps 时,改进 ETX 路由协议和 DSR 路由协议的吞吐量大致相同,但是当节点业务速率进一步提升时,DSR 路由协议的吞吐量最终维持在 280 kbps 左右,而改进的 ETX 路由协议则可以达到 390 kbps,改进 ETX 路由协议的吞吐量提高了 30%,数据变化趋势与固定节点移动速度、改变业务速率时类似。

从丢包率来看,节点移动速度的不断提升,相应的 DSR 路由协议和改进的 ETX 路由协议的丢包率均有增加,但是 ETX 路由协议的丢包率始终小于 DSR 路

由协议,当节点业务速率为 30 m/s 时,丢包率降低约 30%。从时延来看,从两种路由协议在平均时延方面的对比可以看出,当节点业务速率不变、移动速度增加时,ETX 路由协议的时延始终保持在 DSR 路由协议时延的 1/3 以下,节点移动速度为 30 m/s 时,此时延比例降低为 1/5;改进 ETX 路由协议时延保持了良好的稳定性,节点移动速度由 5 m/s 增加到 30 m/s 时,平均时延比未改进时降低约 80%,较为明显。两组的数据变化趋势也均与固定节点移动速度,改变业务速率时类似。再次说明 ETX 路由协议对于业务的时延具有良好的保障。

综上,在加入改进 ETX 路由协议后,当节点业务速率不变时,随着节点运动速度的增加,其吞吐量比没有加入改进 ETX 的 DSR 路由协议有所提高,时延和丢包率有所降低;当节点的运动速度不变时,随着节点业务速率的增加,其吞吐量也比没有加入改进 ETX 的 DSR 路由协议有所提高,时延和丢包率有所降低。在节点运动频率较高的网络系统中,改进的 ETX 路由判据明显提高了网络整体性能,且随着节点运动速度和业务速率的提高,这种网络性能的提高越来越明显。

## 4 结束语

传统 ETX 路由判据由于缺乏对节点运动引起的网络变化的预测,存在路由选择不尽合理、影响网络整体性能的问题。在传统 ETX 路由判据的基础上,文中提出一种基于 Markov 地理位置预测模型的 ETX 路由判据,预测节点下一时刻的地理位置,确定原路由是否失效,从而优化路由的选择,提高网络整体性能。在 NS-2 中的仿真结果表明,在节点运动频率较高时,改进的路由判据明显提高了网络的整体性能。

## 参考文献:

- [1] HOSSAIN E, LEUNG K K. Wireless mesh networks architectures and protocols[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 张彦,罗继军,胡宏林.无线网状网:架构、协议与标准[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [3] 郑晶晶,柴远波.无线 Mesh 网中面向节点稳定性的可靠路由方案[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2016, 15(1):70-75.
- [4] 任伟,董育宁,赵海涛.一种改进的基于地理位置的无线 Mesh 网络路由协议[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版, 2012,32(1):75-83.
- [5] 王夫沐,李建波,宋有美,等.基于历史与位置信息的容迟网络路由算法[J]. 计算机工程,2018,44(4):89-97.
- [6] 沙毅,郭义斌,初家福,等.嵌入节点轨迹预测算法的 ETX 路由判据[J]. 东北大学学报:自然科学版,2013,34



中,在算法效率上有明显提升。而在网络规模稀疏的情况下可能效果会有所衰减,因为算法可能会忽略较多的细节从而导致准确率下降。后续会将这种算法应用到实际问题中,例如挖掘社交网络的密集用户社区,以进一步挖掘社区中的隐含信息等。

参考文献:

[1] NEWMAN M E, PARK J. Why social networks are different from other types of networks[J]. Phys Rev E StatNonlin Soft Matter Phys, 2003, 68(3 Pt 2):036122.

[2] 王 莉,程学旗. 在线社会网络的动态社区发现及演化[J]. 计算机学报,2015,38(2):219-237.

[3] 范超然,黄曙光,李永成. 微博社交网络社区发现方法研究[J]. 微型机与应用,2012,31(23):67-70.

[4] 许 为,林柏钢,林思娟,等. 一种基于用户交互行为和相似度的社交网络社区发现方法研究[J]. 信息安全,2015(7):77-83.

[5] 崔 泓. 社交网络中一种基于模块化的社区检测算法[J]. 计算机工程,2014,40(7):62-68.

[6] PAIIA G, DERENYI I, FARKAS I, et al. Uncovering the o-verlapping community structures of complex networks in nature and society[J]. Nature,2005,435(7043):814-818.

[7] DUAN Dongsheng, LI Yuhua, LI Ruixuan, et al. Incremental K-clique clustering in dynamic social networks[J]. Artificial Intelligence Review, 2012, 38(2):129-147.

[8] CHAKRABARTI D, KUMAR R, TOMKINS A. Evolution-ary clustering [C]//Twelfth ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining. Phila-delphia, PA, USA: ACM, 2006:554-560.

[9] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community structure in so-cial and biological networks[J]. Proc of National Academy of Science, 2002, 9(12):7821-7826.

[10] TYLER J R, WILKINSON D M, HUBERMAN B A. Email

as spectroscopy:automated discovery of community structure within organizations [M]//Communities and technologies. Netherlands:Springer,2003:143-153.

[11] NEWMAN M E. Fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. Physical Review E Statistical Non-linear & Soft Matter Physics, 2003, 69(6Pt2):066133.

[12] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating com-munity structure in networks[J]. Physical Review E Statisti-cal Nonlinear & Soft Matter Physics, 2004, 69(2Pt2):026113.

[13] LU Hao, HALAPPANAVAR M, KALYANARAMAN A. Parallel heuristics for scalable community detection[J]. Par-allel Computing, 2015, 47:19-37.

[14] RAGHAVAN U N, ALBERT R, KUMARA S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2007, 76(3Pt2):036106.

[15] LEUNG I X, HUI P, LIÒ P, et al. Towards real-time com-munity detection in large networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2009, 79(2):066107.

[16] TIBÉLY G, KERTÉSZ J. On the equivalence of the label propagation method of community detection and a Potts mod-el approach[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Appli-cations, 2008, 387(19-20):4982-4984.

[17] 乔少杰,韩 楠,张凯峰,等. 复杂网络大数据中重叠社区检测算法[J]. 软件学报,2017,28(3):631-647.

[18] 李刘强,桂小林,安 健,等. 采用模糊层次聚类 的社会网络重叠社区检测算法[J]. 西安交通大学学报,2015,49(2):6-13.

[19] YANG T, CHI Y, ZHU S, et al. Directed network community detection:a popularity and productivity link model[C]//SI-AM international conference on data mining. Columbus, Ohio, USA:[s. n.], 2010:742-753.

(上接第 52 页)

(8):1091-1094.

[7] BINDEL S, HILT B, CHAUMETTE S. F-ETX:an enhance-ment of ETX metric for wireless mobile networks [M]//Communication technologies for vehicles. [s. l.]:[s. n.], 2015:35-46.

[8] JAGADEESH G R, SRIKANTHAN T. Online map-matching of noisy and sparse location data with hidden Markov and route choice models[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(9):2423-2434.

[9] 崔青华,夏井新. 基于 ARIMA-GARCH 模型的城市主干道行程时间时变置信区间预测[J]. 东南大学学报:英文版,2014,30(3):358-362.

[10] 王 兴,蔡 毅. 改进的无线 Mesh 网路由判据算法及其路由协议[J]. 计算机系统应用,2016,25(5):153-158.

[11] 宋路力,王力数据 Markov 模型的移动对象位置预测算法研究

[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.

[12] 杨 迪. 基于混合多步 Markov 模型的位置预测方法研究 [D]. 沈阳:东北大学,2014.

[13] 王黎明,玉 连,杨 楠. 应用时间序列分析[M]. 上海:复旦大学出版社,2008.

[14] 郭自强. 基于地理位置预测的 DSR-iETT 路由协议研究 [D]. 沈阳:东北大学,2013.

[15] 杨奔全. 基于位置预测的 Ad Hoc 网络路由协议研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.

[16] 丁 雄,卢 嫣. 基于 MESH 网络环境下的负载均衡路由判据研究[J]. 信息系统工程,2016(5):129.

[17] 符 琦. 一种具有业务感知的多路径 QoS 路由策略[J]. 计算机学报,2014,37(10):2153-2164.

[18] 陈贵海,李宏兴,韩 松,等. 多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由[J]. 软件学报,2010,21(8):1908-1919.