

# 面向多路径的自组网 QoS 路由协议研究<sup>\*</sup>

彭革刚<sup>1</sup>, 李新宇<sup>1</sup>, 宋 鹰<sup>1</sup>, 向黎生<sup>1</sup>, 沈 清<sup>1</sup>, 李仁发<sup>2</sup>

(1. 拓维信息系统股份有限公司 博士后科研工作站, 长沙 410205; 2. 湖南大学 计算机通信学院, 长沙 410082)

**摘 要:** 结合移动自组网拓扑结构动态变化的特点, 提出了基于不同路径选择策略的移动自组网多路径 QoS 路由协议。模拟结果分析表明, 该多路径 QoS 协议能够有效地提高移动自组网的可扩展性、可靠性和抗毁性。

**关键词:** 移动自组网; 多路径; 单播; 路由协议

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0544-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.062

## Research on multi-path QoS routing protocol in Ad hoc mobile network

PENG Ge-gang<sup>1</sup>, LI Xin-yu<sup>1</sup>, SONG Ying<sup>1</sup>, XIANG Li-sheng<sup>1</sup>, SHEN Qing<sup>1</sup>, LI Ren-fa<sup>2</sup>

(1. Post-doctoral Scientific Research Workstation of Talkweb Information System Co. Ltd, Changsha 410205, China; 2. School of Computer & Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** According to the features of Ad hoc network, this paper put forward a multi-path routing protocol suitable for Ad hoc network based on different selection schemes. The simulation results show that the routing protocol can improve network scalability, reliability and survivability.

**Key words:** mobile Ad hoc network; multi-path; unicast; routing protocol

移动自组网是一种没有基础设施支持的移动网络, 它由一组带有无线收发装置的移动节点构成, 具有无中心、自组织、可快速部署、可移动和多跳等特点。这些特点使它可以广泛地应用于国防战备、救灾工作以及某些需要临时快速建立一个通信网络的场合, 具有十分广阔的发展前景。

移动自组网网络拓扑的动态性, 使得在移动自组网寻找和维持路由变得更加困难。针对自组网的特点, 相关研究人员已经提出了许多 Ad hoc 路由协议, 然而这些路由协议大部分都采用单路径 (uni-path) 的方式<sup>[1,2]</sup>。由于多路径路由具有容错、负载均衡和能更多地聚合带宽等优点, 相对单路径路由而言, 多路径路由可以将原本集中在一条路径上的负载分配到了几条不同的路径上, 平衡网络负载, 充分利用网络资源, 从而改善了通信性能, 避免了网络震荡, 同时也减少了路径上中间节点的能量消耗, 进而降低了由于能量消耗殆尽导致的网络分割或拓扑变化发生的概率<sup>[3~5]</sup>。

为了在移动自组网中提供多路径, 相关研究工作已经展开, 一些移动自组网多路径路由协议已经被设计出来<sup>[6,7]</sup>。然而这些路由协议主要侧重于在移动自组网网络环境中找到一条最短路径, 并不一定满足语音等交互性业务对时延的要求, 同时对于视频等多媒体业务的带宽需求也无法保证。随着多媒体应用日益普及, 在移动自组网中如何提供 QoS 已经逐渐成为移动自组网研究中的一个重要研究领域<sup>[8,9]</sup>。

本文结合移动自组网拓扑结构动态变化的特点, 提出了一种适合移动自组网的多路径 QoS 路由协议 MPQRP\_DSS (multi-

path QoS routing protocol for based on different selection schemes)。该协议使用不同的 QoS 多路径选择策略来满足不同 QoS 的应用需求, 能够有效地均衡网络负载, 提高网络的资源利用率。

## 1 协议描述

### 1.1 路径独立性问题

路径的独立性对于多路径路由 (multipath routing) 来说是非常重要的, 路径的独立性越强, 多路径路由越能充分地利用网络资源, 增大节点间的有效带宽, 减轻网络的拥塞从而降低分组丢失率。在多路径路由中, 路径的独立性可分为节点独立性 (node-disjoint) 和链路独立性 (link-disjoint)。具有节点独立性的路径集称之为节点独立路径集, 具有链路独立性的路径集称为链路独立路径集。在节点独立路径集中的路径除了源节点和目的节点以外没有其他共同节点, 而链路独立路径集中的路径没有共同的链路。因此节点独立路径一定是链路独立路径。相对于独立路径而言, 非独立路径的最大优点是在网络中寻找非独立路径更容易。这是因为在一个给定的网络中, 存在的非独立路径数量要比独立路径多, 而且非独立路径并不像独立路径那样有比较严格的限制。然而, 非独立路径上一条链路或一个节点的失效将影响多条路径的使用, 从而降低网络性能。与之相反, 独立路径由于没有共同的节点或链路, 因而它能够提供更好的平衡网络负载和容错能力。进一步, 因为链路

**收稿日期:** 2012-05-26; **修回日期:** 2012-06-25      **基金项目:** “核高基” 国家科技重大专项 (2012ZX01045-004-005); 国家科技支撑计划资助项目 (2007BAH14B00)

**作者简介:** 彭革刚 (1975-), 男, 湖南长沙人, 博士, 主要研究方向为网络通信与信息工程 (penggegang@hotmail.com); 李新宇 (1965-), 男, 硕士, 主要研究方向为网络与计算机体系结构; 宋鹰 (1965-), 男, 硕士, 主要研究方向为网络与无线数据通信; 向黎生 (1975-), 男, 硕士, 主要研究方向为网络与计算机图像处理; 沈清 (1950-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为计算机图形; 李仁发 (1957-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为嵌入式计算、无线网络、信息网络。

独立的路径上仍然存在着共同节点,当共同节点失效时,使用该共同节点的链路都将受到影响。而节点独立路径上的链路或节点失效时,只会影响单个节点和单条链路,不会影响其他多路径的使用。

从以上的分析可以看出,节点独立路径比链路独立路径具有更强的独立性,能够为网络提供更好的负载均衡和容错能力。因此,本文的多路径协议目标是寻找最大节点独立路径来支持多路径 QoS 路由。同时为了方便协议的研究,在 MPQRP\_DSS 协议使用两条 QoS 多路径路由。

## 1.2 主要思想

MPQRP\_DSS 协议是一个按需驱动的 QoS 路由协议,它通过使用路由探测分组和路由回复分组在源节点和目的节点间构建路由。在 MPQRP\_DSS 协议中,当源节点和目的节点之间有 QoS 请求  $R$  时,源节点首先在本节点中查找看是否已有通往目的节点  $D$  的路由,如果没有,它将向其邻节点广播一个 QoS 路由探测分组 QRP (QoS route probe)。当该 QRP 分组被中间节点收到时,中间节点将判断是否已经收到过该路由分组,如果已收到过,将直接丢弃该 QRP 分组,而不再进行进一步的处理,这样能够避免中间节点使用过时的信息来探测 QoS 路由。同时中间节点收到一个新的 QRP 分组后,完成一次 QoS 准入控制(协议使用带宽作为主要的 QoS 参数),不能通过准入控制的 QRP 分组将被该中间节点丢弃。路由探测分组 QRP 主要是用来在网络中探测满足 QoS 请求  $R$  的可行路由。目的节点  $D$  每收到一个来自源节点  $S$  的路由探测分组 QRP,就表明协议已经在源节点  $S$  和目的节点  $D$  之间成功地找到了一条满足 QoS 请求  $R$  的可行路由。

在协议中,当目的节点收到 QoS 路由探测分组 QRP 后将使用三种不同的方案来产生回复分组 QRR (QoS route reply): 最短多路径(shortest-multipath)、最宽多路径(widest-multipath)和最短最宽多路径(shortest-widest-multipath)。

最短多路径是本文使用的一种为了减少端到端延迟的回复分组生成方案,选择两条最短的节点独立路径是该方案的设计目标。在该方案中,当目的节点  $D$  收到第一个 QRP 分组后,它立刻向源节点发送一个 QRR 分组,同时记录下该 QRP 分组中包含的路由,然后目的节点等待 MULTIPATH\_COLLECTION\_TIME 来收集其他的 QRP 分组,在 MULTIPATH\_COLLECTION\_TIME 时间内目的节点将收到多个 QRP 分组,每个分组都携带着一条从源节点  $S$  到目的节点  $D$  的 QoS 可行路由信息,此时目的节点已经得到了一个多路径集,然后目的节点根据第一个 QRP 分组提供的路由信息来从当前的多路径集中选择一条节点独立的路径。如果这样的路径不止一条,目的节点选择具有最短跳数的路径来生成回复分组。如果没有节点独立的路径存在,它选择一条最大链路独立的路径,同样,如果有多条链路独立路径,目的节点优先选择最短的路径来回复,为了描述方便把使用该方案的 MPQRP\_DSS 协议称为 MPQRP\_DSS1 子协议,MPQRP\_DSS1 协议的多路径选择算法如算法 1 所示。

算法 1 MPQRP\_DSS1 多路径选择算法

```
NodeDisjointRoute = FindNodeDisjointRoute();
if (NodeDisjointRoute == 0)
{
    /* Find maximal disjoint route */
    LinkMaxDisjointRoute = FindMaxLinkDisjointRoute();
    if (LinkMaxDisjointRoute > 1)
        SelectRoutewithMinHop();
}
```

```
else if (NodeDisjointRoute > 1)
```

```
    SelectRoutewithMinHop();
```

由于 MPQRP\_DSS1 协议使用最短路径的标准来选择多路径,因此 MPQRP\_DSS1 协议在使用多路径来平衡负载的同时,能够获得最小的端到端延迟。但在另一方面最短路径优先选择策略使得网络负载被大量地集中在最短路径上,而网络的其他部分负载较轻,最短路径上的大部分带宽资源将会被很快地耗尽,而致使随后的 QoS 请求被拒绝,这种现象在带宽资源本来就十分有限的移动自组网中更为明显。因此从充分利用带宽的角度出发,本文提出了最宽多路径选择方案,对应的 MPQRP\_DSS 协议称为 MPQRP\_DSS2 子协议。在 MPQRP\_DSS2 协议中,目的节点  $D$  收到第一个 QoS 路由探测分组 QRP 后,并不马上回复,而是等待 MULTIPATH\_COLLECTION\_TIME 时间。在这段时间内,目的节点将收到多个 QRP 分组,从而得到该 QoS 请求对应的路径集,然后目的节点选择路径集中具有最大可用带宽的路径作为第一条可用路径来回复,如果具有最大带宽的路径有多条,则较短的路径被选择,而后根据已选择出的这条路径的信息,在路径集中剩下的路径中继续查找与该路径节点独立的路径,如果这样的路径不止一条,则从中选择可用带宽较大的路径作为第二条回复路径,在可用带宽相等的情况下,选择跳数较小的路径;如果没有这样的路径存在,则继续查找与该路径链路独立的路径,在存在多条链路独立路径的情况下,可用带宽较大的路径被优先选择,当具有最大可用带宽的链路独立路径有多条时,其中较短的路径被优先选择。MPQRP\_DSS2 协议的多路径选择算法如算法 2 所示。

算法 2 MPQRP\_DSS2 多路径选择算法

```
MaxBWRouteCount = SelectRouteWithMaxBW();
if (MaxBWRouteCount > 1)
{
    SelectRouteWithMinHop();
}
NodeDisjointRoute = FindNodeDisjointRoute();
if (NodeDisjointRoute == 0)
{
    LinkMaxDisjointRoute = FindMaxLinkDisjointRoute();
    if (LinkMaxDisjointRoute > 1)
    {
        /* Find maximal bandwidth route */
        MaxBWCount = SelectRouteWithMaxBW();
        if (MaxBWCount > 1)
            SelectRoutewithMinHop();
    }
}
else if (NodeDisjointRoute > 1)
{
    /* Find maximal bandwidth route */
    MaxBWCount = SelectRouteWithMaxBW();
    if (MaxBWCount > 1)
        SelectRoutewithMinHop();
}
```

MPQRP\_DSS2 协议以可用剩余带宽作为路径选择的优先标准,在一定程度上能够更好地利用网络带宽资源,将网络负载均匀地分配到各条链路上。但是它所选择的路径往往并不是最短的,因而相对于 MPQRP\_DSS1 协议而言,MPQRP\_DSS2 中的端到端的延迟较大,这并不适用于那些对延迟方面有严格要求的多媒体应用。因此,本文提出了最短最宽多路径的选择方案来缓解这个问题,对应地,MPQRP\_DSS 协议称为 MPQRP\_DSS3 子协议。同 MPQRP\_DSS1 协议一样,在 MPQRP\_DSS3 协议中目的节点收到第一个 QRP 分组后,也马上向源节点发送一个 QRR 分组,同时记录下该 QRP 分组中包含的路由。然后

目的节点等待 MULTIPATH\_COLLECTION\_TIME 时间来收集其他的 QRP 分组。当得到一个多路径集后,目的节点根据第一个 QRP 分组提供的路由信息,在该多路径集中选择一条具有最大剩余带宽的节点独立路径,当这样的路径有多条时,较短的被优先选择,如果没有与该路径对应的节点独立路径,则继续查找与该路径链路独立的路径,在存在多条链路独立路径的情况下,选择最大可用带宽的路径,如果最大可用带宽的路径有多条,那么较短的路径被优先选择。MPQRP\_DSS3 协议的多路径选择算法如算法 3 所示。

算法 3 MPQRP\_DSS3 多路径选择算法

```
NodeDisjointRoute = FindNodeDisjointRoute();
if (NodeDisjointRoute == 0)
{
    LinkMaxDisjointRoute = FindMaxLinkDisjointRoute();
    if (LinkMaxDisjointRoute > 1)
    {
        /* Find maximal bandwidth route */
        MaxBWCount = SelectRouteWithMaxBW();
        if (MaxBWCount > 1)
            SelectRouteWithMinHop();
    }
}
else if (NodeDisjointRoute > 1)
{
    /* Find maximal bandwidth route */
    MaxBWCount = SelectRouteWithBW();
    if (MaxBWCount > 1)
        SelectRouteWithMinHop();
}
```

## 2 模拟和性能分析

### 2.1 模拟环境

在模拟中采用自由空间模型,60 个节点随机地分布在 1 000 m × 1 000 m 的矩形区域内,每个节点的无线传输半径为 250 m,信道容量为 2 Mbps,每个数据帧包含 20 个数据时隙,QoS 带宽请求为 3 个数据时隙,请求的源节点和目的节点随机产生,使用 CBR 作为数据源。选择随机路标 (waypoint) 模型作为节点的移动模型,节点的每次停顿时间为 5 s,最小移动速度为 0 m/s,最大移动速度在 1 ~ 10 m/s 变化。每次模拟实验执行 600 s。所有模拟实验结果均为多次试验的平均值。

### 2.2 性能评价参数

性能评价参数包括:a) 请求成功率 (RSR) 为成功的 QoS 请求次数与总 QoS 请求次数之比;b) 端到端延迟 (end-to-end delay) 为目的节点收到数据分组的时间与源节点产生数据分组的时间之差。

### 2.3 模拟结果与性能分析

图 1 分别是当数据发送源个数为 10 和 20 时,各协议在不同节点移动速度下请求成功率方面的性能比较。从图 1 中可以观察到当节点移动速度增加时,三种路由子协议的请求成功率都出现了不同程度的下降;在三种子协议中,MPQRP\_DSS2 获得了最高的请求成功率,这主要是由于 MPQRP\_DSS2 协议以带宽作为路径选择的首要标准,这样的路径选择策略有利于更好地利用网络带宽资源,能够将网络负载均匀地分配到各条链路上;MPQRP\_DSS1 在请求成功率表现出了最差的性能,这主要是因为它的最短路径优先选择的策略使得网络负载被主要集中到最短路径上,这些路径上的大部分带宽资源将会被很快消耗尽,而导致随后的 QoS 请求被拒绝;MPQRP\_DSS3 协议使用最短最宽的多路径选择方案,也在一定程度上优先考虑了

带宽较大的路径,缓解了网络负载被过多地集中在最短路径上的问题,因此在请求成功率方面,它获得了比 MPQRP\_DSS1 更好的协议性能。

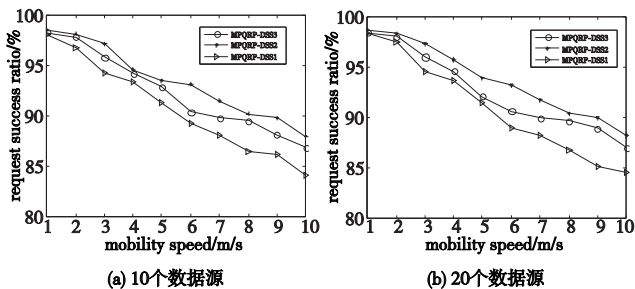


图1 请求成功率

图 2 分别给出了当数据发送源个数为 10 和 20 时,在不同的节点移动速度下,路由协议在端到端延迟方面的性能比较。在端到端延迟方面,MPQRP\_DSS1 协议表现出了最佳的性能。这主要得益于它的最短路径优先的多路径选择策略的使用,由于大部分数据分组沿着最短路径传输,因此它获得了最小的端到端延迟。在另一方面,尽管 MPQRP\_DSS2 协议以带宽作为路径优先选择的标准带来了更高的请求成功率,但是由于它所选择的路径往往并不是最短的,数据分组在较长的路径上传输导致了分组端到端延迟的增加,因而 MPQRP\_DSS2 协议在端到端延迟方面表现出了最差的协议性能。而 MPQRP\_DSS3 协议的最短最宽的多路径选择方案,也在很大程度上优先考虑了最短路径,因此也获得了比 MPQRP\_DSS2 小的端到端延迟。

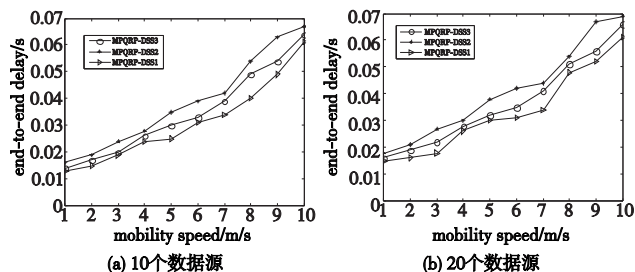


图2 分组端到端的延迟

从以上这组实验结果可以看到,在请求成功率方面,MPQRP\_DSS2 协议取得了最好的性能;在端到端的延迟方面,MPQRP\_DSS1 协议表现最佳;MPQRP\_DSS3 协议在请求成功率和延迟方面均表现居中。因此,从协议应用角度来说,MPQRP\_DSS2 协议适用于对用户 QoS 请求成功率要求较高的多媒体应用,MPQRP\_DSS1 适用于在端到端的延迟方面有较高要求的多媒体应用,而对于那些要求协议具有较高综合性能的多媒体应用而言,MPQRP\_DSS3 协议是比较适合的选择。

## 3 结束语

多路径路由具有可充分利用网络带宽和更好地平衡网络负载等许多优点,这些优点使得它非常适用于网络拓扑结构动态多变和网络带宽资源有限的移动自组网;而对 QoS 而言,在网络中提供多路径路由也能够更好地支持 QoS。本文结合移动自组网拓扑结构动态变化的特点,提出了一种适合移动自组网的多路径 QoS 路由协议 MPQRP\_DSS,根据协议所使用的不同 QoS 多路径选择策略,又分别设计了三种不同的 MPQRP\_DSS 子协议。模拟结果表明,在动态的网络环境下,MPQRP\_DSS 协议能够对网络负载实现有效地均衡,提高了网络的资源利用率,为移动自组网提供了可靠而高效的传输性能。

(下转第 584 页)

警的相关性也就越强,挖掘出的规则也就越多;相反,滑动步长越小,则会使相邻的两个窗口内告警重叠变少,挖掘的关联规则也越少。滑动步长的取值范围为  $Q_{\min} \leq s \leq \Delta W$ 。其中,  $Q_{\min}$  为时间段内不同情景最小间隔的最小值。

通过双约束的时间段划分,可以实现时间窗宽度和滑动步长根据告警事件的具体情况而动态变化,从而更加灵活地提取告警事务。

### 3 实验测试

实验采用的测试数据是某地区电信公司的告警记录,共采集了一周的告警数据,告警发生的时间是从 2009 年 3 月 16 日到 2009 年 3 月 22 日,共包括 228 752 条告警记录。主要测试基于双约束的时间窗划分算法和一般的基于均匀的时间窗划分算法在提取告警事务时的效率比较。

首先清洗原始告警数据,提取设备名称、设备所在的地址、告警类型、告警时间四个重要属性来表示告警事件。采用基于双约束的时间窗划分算法来提取告警事务,设定时间窗的数目分别为 1000、2000、3000、4000 和 5000 个,通过对原始告警的提取,得到的告警事务数目和提取的时间如表 1 所示。

表 1 基于双约束的时间窗划分算法提取告警事务

| 时间窗数目 | 提取时间/s | 告警事务数目 | 时间窗数目 | 提取时间/s | 告警事务数目 |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 1 000 | 65     | 25 762 | 4 000 | 99     | 28 365 |
| 2 000 | 72     | 26 450 | 5 000 | 123    | 29 043 |
| 3 000 | 87     | 27 745 |       |        |        |

从表 1 可以看到,告警事务的数目是随着划分时间窗口的数目增加而增加的。然而,时间窗的数目越多,提取告警事务所需要的时间就越多,不能靠牺牲时间代价来换取告警事务数目的增加,所以要选择合适的时间窗数目。

然后比较了基于双约束的时间窗划分算法和基于均匀时间窗划分算法在提取告警事务时的效率,分别测试了提取 1000~9000 条告警事务所用的时间,图 1 给出了对比的结果。从图 1 中可以看出,本文提出的基于双约束的时间窗划分算法的提取效率明显高于基于均匀时间窗划分算法。两种算法的运行时间差别在提取告警事务数目达到 5000、6000 时达到最大,随着提取告警事务数目的增加,差别却逐渐减少。从实验的结果可以得出,要选择适合的时间窗数目,可以使提取告警事务的效率达到最高。

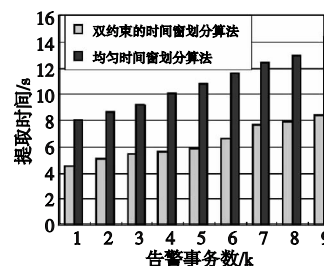


图1 采用两种不同方法提取告警事务的效率比较

### 4 结束语

由于告警数据分布得不均匀,在使用滑动时间窗提取告警事务的时候要考虑到提取的效率问题。本文提出了一种基于双约束的滑动时间窗方法来提取告警事务,算法选择了时间段的中点作为参照点,不仅可以提高提取的效率,还可以将孤立点和异常点作为噪声数据去除。实验证明该算法在提取告警事务时比传统的均匀时间窗方法效率更高。

#### 参考文献:

- [1] VOSS A. Case reusing systems: survey, framework and guidelines [J]. *The Knowledge Engineering Review*, 1997, 12(1): 59-89.
- [2] MANNILA H, TOIVONEN H, VERKAMO A I. Discovery of frequent episodes in event sequences [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2004, 1(3): 259-289.
- [3] AMANI N, FATHI M, DEHGHAN M. A case-based reasoning method for alarm filtering and correlation in telecommunication networks [C]//Proc of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2005: 2182-2186.
- [4] KLEMETTINEN M, MANNILA H, TOIVONEN H. Rule discovery in telecommunication alarm data [J]. *Journal of Network and Systems Management*, 1999, 7(4): 395-423.
- [5] 王仲佳. 具有动态加权特性的关联规则算法及其在电信故障告警序列模式发掘中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [6] HAUPTMANN M, LUBIN J H, ROSENBERG P, et al. The use of sliding time windows for the exploratory analysis of temporal effects of smoking histories on lung cancer risk [J]. *Statistics in Medicine*, 2000, 19(1): 2185-2194.
- [7] Van VAERENBERGH, VIA J, SANTAMANA I. A sliding-window kernel RLS algorithm and its application to nonlinear channel identification [C]//Proc of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2006: 789-792.
- [8] Van VAERENBERGH S, VIA J, SANTAMANA I. Nonlinear system identification using a new sliding-window kernel RLS algorithm [J]. *Journal of Communications*, 2007, 2(3): 1-7.
- [5] ZHANG Zhong-ke, WANG Yun, LI Feng. Reliable packets delivery over segment-based multi-path in wireless Ad hoc networks [C] // Proc of the 6th International Conference on Pervasive Computing and Applications. 2011: 300-306.
- [6] SU S L, SU Yi-wen, CHEN C S, et al. A novel design of node-disjoint multi-path QoS routing in multi-hop Ad hoc networks [C]//Proc of the 41st International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops. 2011: 292-296.
- [7] WANG Qing-hui, LU Yong-jie. A location-based multi-path routing approach in Ad hoc networks [C] //Proc of Chinese Control and Decision Conference. 2010: 2294-2296.
- [8] HANZO L, TAFAZOLLI R. QoS-aware routing and admission control in shadow-fading environments for multirate MANETs [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2011, 36(4): 622-637.
- [9] VARAPRASAD G, WAHIDABANU R S D. Quality of service model for multimedia applications in a mobile Ad hoc network [J]. *IEEE Trans on Potentials*, 2011, 20(6): 44-47.
- [1] ZHANG Xin-ming, WANG En-bo, XIA Jing-jing, et al. An estimated distance-based routing protocol for mobile Ad hoc networks [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2011, 60(5): 3473-3484.
- [2] KATHIRAVELU T, SIVASUTHAN S. A hybrid reactive routing protocol for mobile Ad hoc networks [C]//Proc of the 6th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems. 2011: 222-227.
- [3] DAI Bin, HE Jun-feng, WANG Hui, et al. iRoute: a scalable inter-domain multi-path routing framework for multimedia transmission [C]//Proc of International Conference on Multimedia Technology. 2011: 4966-4969.
- [4] QIN Dong-hong, YANG Jai-hai, ZHANG Bin, et al. Multipath inter-domain routing via deviation from primary path [C]//Proc of International Conference on Information Net-working. 2012: 222-227.

(上接第 546 页)

#### 参考文献: