

Ad hoc 无线网络负载自适应平衡跨层多径路由算法

卢先领^{1,2},孙亚民¹,陈 树²

LU Xian-ling^{1,2},SUN Ya-min¹,CHEN Shu²

1.南京理工大学 计算机科学与技术学院,南京 210094

2.江南大学 通信与控制工程学院,江苏 无锡 214112

1.School of Computer Science and Technology,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China

2.School of Communication and Control Engineering,Jiangnan University,Wuxi,Jiangsu 214112,China

E-mail:jnluxl@gmail.com

LU Xian-ling,SUN Ya-min,CHEN Shu.Load adaptive cross-layer multi-path routing algorithm for Ad hoc wireless networks.Computer Engineering and Applications,2008,44(32):31-34.

Abstract: This paper presents a Load Adaptive Cross-Layer Multi-path Routing Algorithm(LACLMPRA) for Ad hoc wireless networks.In order to improve performance of Ad hoc networks,LACLMPRA combines the cross-layer information of networks such as the end to end delay of network,the number of re-transmission before success,the length of packets in sending buffer in nodes to find multiple node-disjoint paths in Ad hoc wireless networks.The sending node allocated rate for each path adaptively according to the quality of routing path to improve performance.The algorithm can reduce congestion in nodes and prolong the life time of networks.The results show that LACLMPRA is able to reduce average delay,improve the throughput and prolong the life time of networks compared with SMR and AOMDV.

Key words: cross-layer design;adaptive;multi-path routing;load-balance

摘 要:提出了一种 Ad hoc 无线网络流量自适应平衡的多径路由选择算法 LACLMPRA。算法 LACLMPRA 利用网络的跨层信息:传输层提供的数据端到端传输延迟、节点 MAC 层提供的最近一次传输成功前重传次数、网络层的缓存队列长度等信息,构建多条不相交的多径路由。在实际的数据传输过程中,根据路由的质量,在多条路径中自适应分配流量,缓解节点的拥塞,延长 Ad hoc 无线网络的生存时间。仿真结果也显示该算法与 SMR、AOMDV 等多径路由算法相比,在降低网络平均延迟、提高吞吐量、延长网络生存时间方面,有更好的表现。

关键词:跨层设计;自适应;多径路由;负载平衡

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2008.32.010 **文章编号:**1002-8331(2008)32-0031-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP393.02

1 引言

Ad hoc 无线网络是由众多的无线移动节点通过分布式算法自组织而成的一种网络,每个节点兼有终端和路由器的功能,这些节点不需要网络基础设施的支持,自发地以多跳的方式快速地建立通信联系,具有部署方便、灵活的特点。Ad hoc 无线网络具有自我建立、自我组织及自我管理的能力,节点间能相互协作,采用分布式算法控制网络行为,共同完成任务^[1-2],并可以在移动、不稳定连结的情况下有效地使用资源,因而在商业、军事等领域具有诱人的应用前景。

Ad hoc 无线网络的移动终端由电池供电,发射功率有限,有时需要多跳转发实现数据传输,环境的变化、节点的移动造成网络拓扑不断变化。单径路由由于拓扑的改变,节点的死亡,链路的临时失效,引起路由的失效,导致目标节点不可达。与单径路由协议相比,多径路由协议可以同时多条不相交的路径

上传数据包,能更充分地利用网络的能量和带宽等资源,此外,多路径路由在容错、路由可靠性、QoS 路由等方面具有更多优势。

当前已提出了多个多径路由解决方案。SMR^[3]多径路由协议是通过扩展 DSR^[4]以并发或替换的方式实现多径路由,AOMDV^[5]协议是在 AODV^[6]协议的基础上扩展的多径路由协议,该协议通过获取、维护多条最短的路径来实现多径路由的。上述这些多径路由算法主要集中在算法的容错性和路径的鲁棒性上,网络的流量主要集中在主路径上,只在主路径失效时才将流量切换到备用路径上。这些算法没有充分考虑网络节点流量的平衡,特别是路由的质量改变时,无法根据路由的质量变化自适应地分配网络流量,因而造成数据传输的不平衡,易引起局部网络的拥塞。拥塞导致路由信息丢失,同时触发更多的路由请求和路由维护等控制分组的产生,从而进一步加重拥塞,加快耗尽

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA10Z335)。

作者简介:卢先领(1972-),男,博士生,讲师,主要研究领域为无线自组织网络、传感器网络、计算机网络通信与优化;孙亚民(1946-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络通信,网络算法与协议;陈树,男,博士,讲师,研究方向,计算机网络。

收稿日期:2008-08-05 **修回日期:**2008-10-01

负载重的节点的能量,缩短网络的生命时间。此外,这些路由算法没有考虑 Ad hoc 无线网络层与层之间的协作,影响了多径路由协议的效率。因此,在 DSR 的基础上提出了流量自适应平衡的跨层多径路由选择算法 LAQLMRA,该算法采用 Ad hoc 无线网络跨层设计的方法,综合考虑网络协议各层提供的信息,决策多条路由的选择,通过选择低延迟的链路,避开负载重的节点,构建多条不相交的多径路由。并根据路由的质量,在多条路径中自适应地分配数据流量,缓解了网络的拥塞,减少了网络控制开销。仿真表明该算法在降低网络平均延迟、提高吞吐量、延长网络生存时间方面,均优于 SMR、AOMDV 多径路由协议。

2 相关工作

Ad hoc 无线网络节点移动性高,能量、带宽等资源有限,连接中断率高,导致网络分裂机会多,控制信息的通信开销较大,网络拥塞概率也较大,这些特点使得 Ad hoc 无线网络的单径路由无法适应大量数据传输的要求,多径路由能很好地解决上述问题,但在源节点和目标节点间寻找多条合适的路径并合理分配流量却具有相当大的挑战性。

为了提高多径路由的性能,学者们做了许多有意义的探索。现有的多径路由协议主要集中在以下四类:MP-DSR^[7]、AOMDV、APR^[8]等多径路由协议主要是提高数据传输端到端的可靠性,使得在数据传输的过程中,能够在高速动态环境下拥有较好的链路容错能力和恢复机制;文献[9-10]等多径路由协议的目标是减少端到端延迟;文献[11-12]等多径路由协议的目标主要是为数据的传送提供高带宽的需求;文献[13-14]等多径路由协议是以降低能量的消费,延长网络的寿命为目标。

上述的 Ad hoc 无线网络中多径路由协议分别有各自的优点,在某些方面提高了网络的性能,它们主要适用于网络数据传输处于不饱和状态,其验证大多是采用低负载、各路径的链路、节点等状态变化不大的场合。这些多径路由都忽视了 Ad hoc 无线网络流量的分配平衡,特别是网络拓扑、路径质量发生变化时,无法动态调整网络的流量分配,使得 Ad hoc 无线网络的数据流在各路由上分配不平衡,负载重的节点来不及处理数据而导致拥塞的产生。拥塞导致数据包丢失重传,进一步加重了网络的负担,延长网络的延迟,增加网络能量的消费,从而降低网络的性能。算法利用网络的跨层信息,决策源节点和目标节点间多条路径路由的选择,通过选择高质量的路径,并根据各条路由的质量动态地分配流量,减少了拥塞的产生和数据端到端传输的延迟,提高了网络的性能。

3 网络模型及问题描述

3.1 网络模型

对网络做如下假设:网络由 N 个节点组成,这些节点随机地分布在一个特定的区域内,各个节点使用全向天线。将网络建模为有向图 $G=\langle V, E \rangle$,即 G 代表任意拓扑结构的网络, V 为 G 中所有移动节点的集合, E 为 G 中的链路集合。 G 中任意两个节点之间至多只有一条边,并满足 $E \subseteq V^2$ 。如果边 $\langle u, v \rangle \in E$,则节点 u 与 v 可以互相通信,这里认为链路通信是双向的。假设初始时网络中各节点相互连通,整个网络也是连通的。各节点向自己邻居周期性广播,告知自己的邻节点自己的缓存队列

长度、最近一次传输成功前重传次数。假设各节点的缓存的总长度相同均为 N_{\max} ,各节点在转发 RREQ 前已经知道邻节点的缓存队列的长度以及最近一次传输成功前重传次数。

3.2 问题描述

源节点设为 S ,目标节点设为 D ,对于网络中任意节点 S 和 D ,其间的的多径路由可以表示为: M 条 $\langle V_1 V_2 V_3 \dots V_n \rangle$ 有向序列,满足:

$$V_1^k = S, V_n^k = D; 0 \leq k \leq M, 1 \leq n \leq N$$

$$\langle V_i^k, V_{i+1}^k \rangle \in E, 0 \leq k \leq M, 1 \leq i \leq N-1 \quad (1)$$

$$V^k \neq V^l, 0 \leq k \leq M, 0 \leq l \leq M$$

本文的目标是在任意源节点 S 和目标节点 D 之间可能存在的 M 条不相交路径来构建多径路由,该多径路由能根据各路径的质量,平衡网络的流量分配,提高网络性能,如图 1 所示。

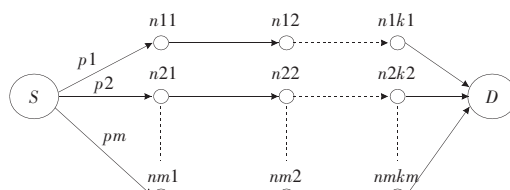


图1 不相交的多径路由

4 算法描述

网络的性能依赖于选用的路由算法,流量自适应平衡的跨层多径路由算法 LAQLMRA 是采用按需的方式,在路由发现和路由维护阶段通过对网络跨层信息的综合分析,从中选择高质量的路径组成多径路由,并在数据传送的过程中,根据路径的质量,自适应调整流量在各条路径上的分配,从而解决流量分配平衡问题。

流量自适应平衡的跨层多径路由算法 LAQLMRA 与 DSR 路由算法类似,主要由路由发现、路由选择、路由维护三个过程组成。

4.1 路由发现

当源节点需要和另一目标节点进行通信且没有到目的节点的有效路由时,通过广播路由请求分组(RREQ)发起路由发现过程。源节点在发送信号时将自己的发送时间 t ,最大网络延迟 D_{\max} 写在报头上。

每个中间节点收到路由请求分组 RREQ 后,判断是否满足下面两条:(1)首先判断该分组的发送路径是否成环;(2)其次,根据节点的接收时间与源节点的时间差判断目前是否已经超过最大网络延迟 D_{\max} 。如果满足上述两条中的任一条,则直接丢弃该请求分组,否则再转发该分组。

这样,目的节点收到 RREQ 分组后,根据该分组头部的信息,计算出端到端的延迟 T_n ,然后利用 RREQ 的反向路径信息以单播的方式向源节点发送路由请求的应答 RREP。RREP 中包含了源端到终端数据传输延迟 T_n 、经过节点及其邻节点提供的最近一次传输成功前重传次数和缓存队列的长度等信息。

4.2 路由选择过程

网络的端到端延迟是衡量路径质量优劣的重要指标之一,端到端延迟主要由网络路径的带宽和网络的拥塞状态决定的。

带宽越大, 数据的传输延迟就小, 网络的拥塞现象越小, 通信就越顺畅, 数据重传的几率也越小。因此, 将路径的传输延迟、节点及其邻节点的缓存队列长度、节点最近一次成功传输前重传的次数, 作为衡量路径质量的尺度。

源节点收到 RREP 后, 用公式(2)来计算各条路径的质量权重值。

$$C_k = \prod_1^n e_{(i,j)} \times \prod_i^n V_{(i,j)} \quad (2)$$

$\prod_1^n e_{(i,j)}$ 为路径 k 上各链路的权重值, $\prod_i^n V_{(i,j)}$ 为路径 k 上各节点的权重值。 C_k 表征了路径 k 的质量, C_k 值越小, 则路径 k 越稳定, 其质量就越高, 可以分配的流量就越大。

$e_{(i,j)}$ 可以由公式(3)得到:

$$e_{(i,j)} = \exp\left[\frac{T_i}{T}\right] \quad (3)$$

其中 T 为多径路由中各条路径传输延迟的平均值:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n T_a \quad (4)$$

T_i 为经过节点 i 的路径的网络端到端延迟, $e_{(i,j)}$ 值越小说明该路径的延迟越小, 网络的质量就越好。

$V_{(i,j)}$ 可以由公式(5)得到:

$$V_{(i,j)} = \sum_{i \in L(i)} \frac{N_i}{N_{\max}} \times f(x_i) \quad (5)$$

其中 N_i 是节点 i 的缓存队列的长度, x_i 是节点 i 最近一次传输成功前重传次数, $L(i)$ 是节点 i 的邻节点的集合。由于 Ad hoc 无线网络媒体共享特性, 节点 i 及其邻节点相互干扰, $V_{(i,j)}$ 表征了节点 i 周围无线链路的拥塞情况。 $f(x_i)$ 可以由公式(6)得到:

$$f(x_i) = \ln(1+x_i) \quad (6)$$

得到各条路径的权重后, 算法 LAQLMRA 对其进行排序, 路径的权重值越小, 表示该路径的质量越高, 路径周围的局部网络通信顺畅, 拥塞的潜在危险少, 带宽能被充分利用, 被选中的优先级就越高, 在实际的数据通信中可以分配更多的数据流。根据文献[15]的结论, 选取其中权重值最小的 3 条作为传输路径, 其余的作为候补路径。各条路径的数据流分配比例按照公式(7)计算。

$$R_k = \frac{C_k}{\sum_1^3 C_k} \quad (7)$$

4.3 路由维护过程

Ad hoc 无线网络的拓扑动态多变, 节点的邻节点数量及

其缓存队列长度都要发生变化, 再加上网络环境也随时发生变化, 数据需要多次发送才能够成功, 发送的次数也是动态变化的。算法 LAQLMRA 需要了解各路径上节点的实时信息, 从而及时调整各条路由。当多径路由中某条路径恶化, 算法 LAQLMRA 用其他的备用路径来替代该路径, 如果不存在备用路径, 则重新发起新的路由发现过程, 选择新的状态更好的路径, 重新进行流量分配进行后续的数据传输。

5 仿真分析

5.1 仿真环境和性能评估标准

使用软件 OPnet8.0^[6]进行仿真实验, 考察算法 LAQLMRA 的性能。仿真中节点随机分布在二维平面上, 节点移动符合 WayPoint 随机模型^[7], 移动速度在 1~10 m/s, 停留时间在 0~50 ms 之间。仿真中参数设置如下: 仿真范围为 1 000 m×1 000 m, 节点传输距离为 200 m, 分组长度为 256 Byte, 无线带宽为 1 Mb/s, 仿真时间 1 000 s, 网络中节点数为 100 个。仿真中对算法性能的评估主要集中在网络端到端的平均时延、吞吐量和网络的生存时间, 其定义如下:

网络端到端平均时延: 目的节点正确收到源节点发送的数据包延迟的平均值, 它包括数据包在转发队列中的等待时间和 MAC 层接入信道的时间和链路上的传输时间。

吞吐量: 整个仿真过程中目的节点正确收到数据包的总数; 该参数越大, 网络的能量和带宽的利用率越高, 性能越好。

网络的生存时间: 网络分裂为两个不连通的网络的开始时间, 在相同环境下, 各节点能量消费越小则网络生存时间越长。

5.2 仿真结果及性能分析

本文进行了两组仿真实验, 分别检验网络负载变化和拓扑变化时对算法性能的影响。仿真包含 20 条实时的业务流的传输, 实验采用不同的随机值运行 60 次, 结果取平均值。

实验 1 保持网络的拓扑不变, 不断地增加网络的负载, 比较不同比特率 CBR 环境下网络的性能。

图 2 是在网络的拓扑不变的情况下, 网络的 CBR 从 5 packet/s 逐渐增加到 50 packet/s, 网络性能的仿真结果。

从图 2(a)可以看出随着 CBR 流的增加, 网络的负载不断增加, 三种算法的网络生存时间均减少, 算法 LAQLMRA 的网络生存时间略长于 SMR、AOMDV 路由算法。网络负载越重, 这一趋势更加明显。这主要由于算法 LAQLMRA 传输数据时, 能够根据路径的质量分配流量, 平衡网络中流量, 缓解拥塞的产生, 减少了控制和数据重传等通信开销。而算法 SMR、AOMDV, 没有考虑路径流量的平衡, 负载重的节点易引起拥塞, 从而快速耗尽能量, 造成网络的分裂, 网络的生存时间缩短。

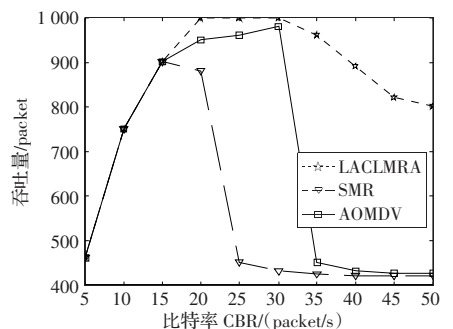
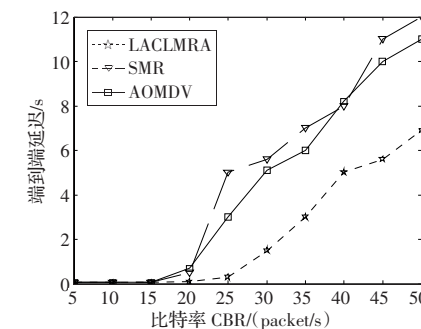
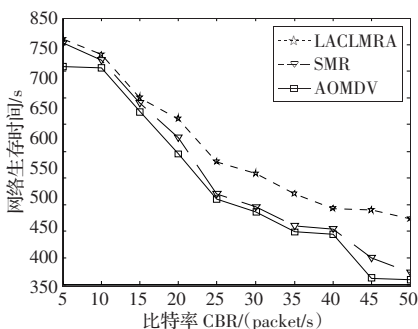


图 2(a) 静态拓扑环境下网络生存时间比较

图 2(b) 静态拓扑环境下网络端到端平均延迟比较

图 2(c) 静态拓扑环境下网络吞吐量比较

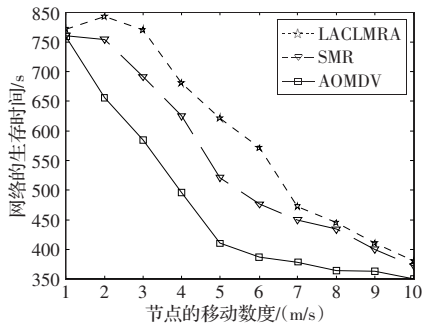


图 3(a) 动态拓扑环境下网络生存时间

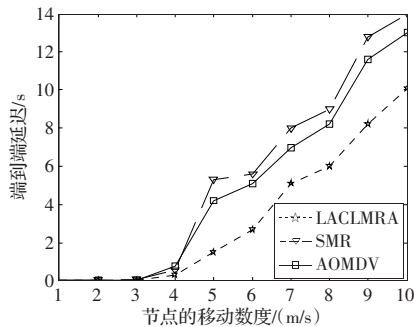


图 3(b) 动态拓扑环境下网络端到端平均延迟

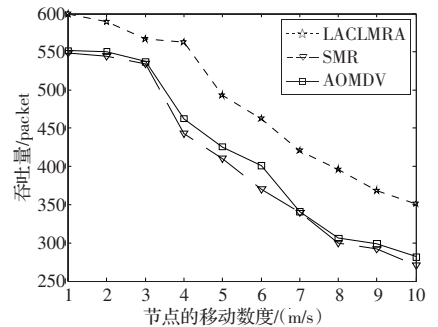


图 3(c) 动态拓扑环境下网络吞吐量

图 2(b)是在不同的网络负载下,算法 LACL MRA、SMR、AOMDV 网络平均时延的仿真结果。从图 2(b)可知,在负载较轻时,各路径的带宽能满足数据传输需要时,三种算法的网络平均延迟相近,随着网络负载的增加,路由上节点的负载加重,节点缓存队列增加,数据冲突增加,开始出现拥塞,SMR、AOMDV 两种算法没有考虑流量平衡和避开网络的拥塞节点,故拥塞现象较算法 LACL MRA 严重,延迟增加较算法 LACL MRA 快。

图 2(c)是在不同的网络负载下,比较算法 LACL MRA、SMR、AOMDV 网络吞吐量的仿真结果。当网络负载较轻时,三种算法的吞吐量相近,并随着网络负载的增加而增加,当每条路径上的负载超过链路的带宽时,网络的吞吐量开始急剧下降。由于算法 LACL MRA 能平衡流量的分配,充分利用有效的带宽,尽量避开拥塞节点,网络的吞吐量略有下降,但下降的幅度相对较少。

从上述实验看出,网络拓扑保持不变,当网络负载较大时,算法 LACL MRA 能更好地平衡网络中流量,从而使得网络具有更好的性能。

实验 2 固定网络负载,恒定比特率 CBR 为 16 packet/s,增加网络中节点的移动速度,比较不同的算法对拓扑变化的反应能力。

从图 3 看出,网络负载恒定状态下,随着节点移动速度的增加,网络的生存时间,吞吐量均减少,网络的平均延迟增加。这是由于链路经常失效造成的结果。

从图 3(a)来看,网络拓扑随机变化时,算法 LACL MRA 其网络生存时间要长于其他两种算法。这主要是因为网络节点的移动速度增加,链路断路频繁,算法 LACL MRA 能根据网络节点的综合信息实时调整各路径的流量分配,减少了数据重传的次数,降低了网络的能量消费,而 SMR、AOMDV 无法调整网络中的数据流在各路径中的比例,易造成网络的拥塞,从而导致数据通信的失败重传,能量消费的增加。

从图 3(b)看出在平均网络延迟算法 LACL MRA 较算法 SMR、AOMDV 低,说明网络传输路径失效时,算法 LACL MRA 自适应调整路由的能力较算法 SMR、AOMDV 强。

由图 3(c)可以看出在吞吐量方面,算法 LACL MRA 较算法 SMR、AOMDV 高。在节点移动状态下,网络的吞吐量主要和丢包数有关,算法 LACL MRA 在链路断开时能及时通过调整路径和流量分配比例,在必要时重新寻径,发送数据包,所以丢包数目也相对比较低,此外,网络端到端延迟较短,也为数据包的正确传输创造了有利的条件。

从实验 2 可以看出,网络负载不变,而网络拓扑发生变化

时,算法 LACL MRA 仍然能够平衡网络中流量在各路径中的分配,使得网络保持较好的性能。

6 结论

提出了流量平衡的跨层多径路由算法,该算法利用跨层信息建立多条不相交的路由,平衡数据在各路径上的传输,因此能有效地提高网络的性能。通过仿真实验显示,该算法与算法 SMR、AOMDV 相比,在延长网络生存周期、提高网络的吞吐量和减少网络平均延迟等方面有较好的性能。

参考文献:

- [1] Chlamtac I, Conti M. Mobile Ad Hoc networking: imperatives and challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(1): 13-64.
- [2] Corson M S, Macker J P. Internet-based mobile ad hoc networking[J]. IEEE Internet Computing, 1999, 3(4): 63-70.
- [3] Lee S J, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks[C]//Proceedings of the IEEE ICC, 2001: 3201-3205.
- [4] Johnson D B, Maltz D A, Hu Y, et al. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR). IETF Internet Draft (work in progress) [2002-02]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-07.txt>.
- [5] Marina M K, Das S R. On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 2001: 14-23.
- [6] Perkins C E, Royer E M. Ad hoc on demand distance vector routing, IETF Internet Draft [EB/OL]. [1999]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manetaodv-03.txt>.
- [7] Leung R, Liu J, Poon, et al. MP-DSR: A QoS-aware multipath dynamic source routing protocol for wireless ad-hoc networks[C]//Proceedings of the 26th IEEE Annual Conference on Local Computer Networks, 2001: 132-141.
- [8] Dong X, Puri A. DSDV-based multipath routing protocol for Ad hoc mobile networks[C]//ICWN, 2002.
- [9] Wang L, Shu Y, Dong M, et al. Adaptive multipath source routing in ad hoc networks[C]//IEEE International Conference on Communications, 2001, 3.
- [10] Das S K, Mukherjee A. Improving Quality-of-Service in ad hoc wireless networks with adaptive multi-path routing[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, 2000.
- [11] Liao W-H, Tseng Y-C. A multi-path QoS routing protocol in a wireless mobile ad hoc network[C]//IEEE International Conference On Networking, 2001.