

分类号:

单位代码: 10422

学 号:



山东大学

硕士学位论文

Shandong University Master's Thesis

论文题目: Ad hoc网络独立多路径路由的研究与改进

作者姓名 朱伟

专 业 通信与信息系

指导教师姓名 陈曙 副教授

专业技术职务 副教授

2006年4月16日

目 录

目 录.....	1
摘 要.....	3
ABSTRACT.....	4
第一章 绪论.....	5
1.1 引言.....	5
1.2 论文的内容安排.....	6
第二章 无线 Ad hoc 网络.....	7
2.1 Ad hoc 网络介绍.....	7
2.1.1 无线自组网的定义.....	7
2.1.2 无线自组网的模型.....	8
2.2 Ad hoc 网络研究中的难点问题及关键技术.....	9
2.2.1 Ad hoc 网络面临的问题.....	9
2.2.2 实现网络的关键技术.....	10
2.3 各个功能层的研究情况.....	12
第三章 Ad hoc 网络路由及多路径路由研究.....	13
3.1 Ad hoc 网络路由协议分类及比较.....	13
3.1.1 路由协议分类简介.....	13
3.1.2 Ad hoc 路由协议的比较.....	15
3.2 DSR 源路由协议.....	16
3.2.1 DSR 路由发现.....	17
3.2.2 DSR 路由维护.....	20
3.2.3 DSR 协议的优化.....	20
3.2.4 选择 DSR 协议的原因.....	21
3.3 Ad hoc 多路径路由.....	22
3.3.1 多路径相关概念.....	22
3.3.2 多路径路由的分类.....	23
3.3.3 多路径路由的优点.....	25

3.3.4 多路径的稳定性分析	25
3.4 典型的多路径源路由协议	29
3.4.1 多路径源路由 MSR(Multipath Source Routing Algorithm)	29
3.4.2 分裂多路径路由算法 SMR(Split Multipath Routing)	31
第四章 基于 DSR 的多路径源路由协议的分析与改进	33
4.1 最优路径数目确定	33
4.2 SIMR 简单独立多路径算法的提出	36
4.2.1 SIMR 路由发现	36
4.2.2 SIMR 路由计算	39
4.2.3 SIMR 业务分配策略	42
4.2.4 SIMR 路由维护	44
4.2.5 SIMR 协议问题分析	44
4.3 仿真实验及结果分析	45
4.3.1 NS 仿真模型	45
4.3.2 统计参量的确定	47
4.3.3 仿真场景介绍	48
4.3.4 仿真数据比较分析	48
第五章 结论与展望	55
5.1 论文总结	55
5.2 下一步工作	55
参考文献:	56
致 谢	60
攻读硕士期间参与的工程项目和发表的论文	61
参加导师主持的工程项目:	61
发表的论文	61

摘 要

自从二十世纪七十年代以来,无线网络越来越受到通信业界的重视。无线网络以网络拓扑结构为标准可以分为两类:一类是集中式控制的,即有中心的,典型的如无线局域网、GSM网等。另一类是不带接入点的无线自组网,即无线Ad hoc网络。

Ad hoc无线移动网络由于其灵活性和实用性受到越来越多的关注与应用,但网络的特殊性使得传统有线网络的技术无法直接在Ad hoc网络使用,这就需要为Ad hoc网络设计许多新的协议和技术,比如信道接入技术、安全技术、路由技术等。其中Ad hoc网络路由协议的提出及其相关的性能分析评价也成为学术界的研究热点。本文主要着眼于Ad hoc网络的路由技术,将路由技术中的独立多路径路由作为研究方向进行探讨。

论文首先对Ad hoc网络及其路由协议进行了综述,然后介绍了Ad hoc网络路由协议的分类以及常用的Ad hoc多路径路由协议,讲解了单路径路由协议与多路径路由协议的优劣,以及独立多路径与非独立多路径的比较。最后作者在DSR的基础上提出了一种新的独立多路径协议方案SIMR,并对SIMR的路由发现、维护、负载分配等进行了详细的阐述。

本文作者利用软件仿真的手段,实现了基于DSR源路由协议的独立多路径路由协议SIMR, SIMR采用简单的路由发现策略,利用少量的路由开销获得节点独立多路径,在多路径上实行负载分配,从而达到充分利于Ad hoc网络资源,提高网络吞吐量的目的。

论文对SIMR协议与普通DSR多路径路由协议进行了仿真性能比较,结果表明SIMR协议在网络节点密度大,网络拓扑结构变化快的情况下,在网络延迟、数据传输率等方面比普通DSR多路径路由协议具有更好表现。

关键词: Ad hoc, 路由协议, DSR, 独立多路径, SIMR

ABSTRACT

Wireless network was becoming more and more important in the field of communication science since 1970s. It can be categorized into two: one is center-controlled network such as Wireless Local Area Network, the other is self-organized wireless network with no access points such as Ad hoc network. The Ad hoc mobile wireless network is receiving increasing attention and application due to its mobility and convenience it can provide to people.

Wireless Ad Hoc Network owns some characteristics like self-organization, multi-hop and a frequently-changed topology. The uniqueness of Wireless Ad Hoc Network makes it impossible to adopt the technologies utilized in traditional networks. So some new protocols and technologies need to be developed specially for Ad Hoc network on channel access, network security and routing. Various routing protocols that are tailored to ad hoc networks have been put up in recent years by researchers around the world and related analysis are being down from different aspects. We focus on the routing protocols and algorithms of Ad Hoc network in this paper, and we chose the multi-path routing techniques as our main research point.

This paper first introduces ad hoc network and it's routing protocols, especially explains the differences between single-path routing protocol and multi-path routing protocol, the differences between independent multi-path routing algorithm and normal multi-path routing algorithm. Then the author proposes a simple independent routing algorithm based DSR protocol.

Using a network simulation tool, the author realized the new proposed routing algorithm SIMR. This paper compares the performance of SIMR with that of ordinary DSR multipath protocol. In many scenarios we simulated, SIMR is more efficient than DSR.

Key Words: Ad hoc, DSR, Routing Protocol, Independent MultiPath, SIMR

第一章 绪论

1.1 引言

Ad hoc[1][2]网络,也就是无线移动自组网,英文全称Wireless Mobile Ad hoc Network (WMANET)是当前无线通信领域一种新的、正在发展的网络,它正在迅速的从军事通信领域渗透到相关的民用通信领域。这种网络模型作为一种新型的移动多跳无线网络,与传统的无线网络有很大不同,它不依赖于任何固定的基础设施和管理中心,而是通过传输范围受限的移动节点间的相互协作和自我组织来保持网络连接和实现其它特殊的功能。因此这种网络也叫做无基础设施网络(infrastructureless network)。

“Ad hoc”一词来源于拉丁语,表示“特别的,专门的,临时的为某一即将发生的目标、事件或局势而不为其它的”的意思。这里的“Ad hoc网络”指的是一种无线特定的网络结构,强调了多跳、自组织、无中心的概念。MANET(Mobile Ad hoc Network)或WMANET(Wireless Mobile Ad Hoc Network)则更分别强调了该网络的移动和无线移动特性。国内一般把Ad hoc网络译为“自组网”,相应的MANET和WMANET分别译为移动自组网和无线移动自组网。在原有的网络构架技术中,移动无线通信网络通常包括蜂窝移动通信网络和无线局域网(WLAN)。蜂窝移动通信网络的移动终端接入固定网络是基于基站的中心接入方式,而在无线局域网中,多台终端通过到一个接入点(Access Point, AP)直接无线访问固定网络,这两种网络都是“单跳(Single-Hop)”网络。

Ad hoc网络有别于中心接入和单跳的特征,强调多跳和无中心接入特征。移动终端不仅具有主机的功能,同时还具有路由器的功能。在这种网络中,如果距一台终端的最近的节点比较拥挤,那么它可以将数据路由到邻近的其它低流量节点。数据以这种方式不断从一个节点“跳(hop)”到另一个节点,直到最终到达目的地。Internet就是一种典型的“多跳(multi-hop)”网络的实例,只不过Internet网络是有线网络而Ad hoc网络强调的是无线网络。

Ad hoc网络最初主要用于军事领域,在战场环境下有着不可替代的作用。由于这种网络不需要基础设施,网络的投资主要在用户终端上,配置快捷方便,构造成本较低,它正逐渐地运用于商业和民用环境。网络运营商可以用它快速地建

立一个较大规模的接入网,提供高速接入,这将明显优于其它的接入方式。尤其是在一些特殊的工作环境中(如抢险救灾、科考探险等),工作人员所在的工作场地没有可以利用的设备或者由于某种因素的限制(投资、安全、政策等)不能使用已有的网络通信基础设施,这时用户之间的信息交流以及协同工作就需要利用Ad hoc技术来完成通信网络的快速部署,从而满足用户对移动数据通信的需求。

由于MANET网络具有广阔的应用前景,它吸引了越来越多网络研究人员的关注。国际上对Ad hoc网络的研究早已成为无线计算机网络的热点,1991年成立的IEEE 802.11 [3]标准委员会采用了“Ad Hoc”一词来描述这种特殊的自组织对等式多跳移动网络,Ad Hoc网络就此诞生。IETF (Internet Engineering Task Force, 互联网工程任务组) [4]专门成立了MANET (Mobile Ad Hoc Network) [5]小组来研究无线Ad Hoc网络的相关问题。美国加州大学洛杉矶分校的“无线自适应移动实验室”(Wireless Adaptive Mobility Laboratory)、康奈尔大学的“无线网络实验室”(Wireless Networks Laboratory)、伊利诺基大学Urbana-Champaign分校的Ad Hoc网络研究小组,马里兰大学的“移动计算与多媒体实验室”(The Mobile Computing and Multimedia Laboratory)都是MANET研究比较活跃的研究团队。关注MANET研究的团队还包括美国陆军、海军和一些企业的研究机构。

1.2 论文的内容安排

本文主要对Ad hoc网络路由技术中的独立多路径路由协议进行了分析研究。在DSR的基础上提出了一种确定完全独立多路径的路由方案SIMR,并通过实验仿真,将新路由方案与DSR多路径协议进行比较。

本论文的主要章节内容安排如下:

第一章绪论,简单介绍Ad hoc网络。

第二章介绍了Ad hoc网络的定义、模型、当前研究情况以及Ad hoc网络的关键技术。

第三章介绍并分析Ad hoc网络的多路径路由,分析了常用的几种多路径路由。并根据稳定性分析来探讨独立多路径与非独立多路径。

第四章在DSR协议的基础上提出了SIMR协议,阐述了SIMR的路由发现、路径选择计算、负载分配等,并对SIMR进行了仿真,对结果进行了比较分析。

第五章对全文的研究工作进行了总结,指出了其中的不足与下一步的工作。

第二章 无线 Ad hoc 网络

Ad hoc网络是一种工作在无固定结构环境下自组织的无线移动网络。新的网络环境和新的应用需求使Ad hoc网络协议的设计和研究成为了热点。本章比较详细的介绍了Ad hoc网络的特点，Ad hoc网络的关键技术及难点问题，以及目前国际上Ad hoc的研究热点问题。

2.1 Ad hoc 网络介绍

2.1.1 无线自组网的定义

Ad hoc网络是不依赖于任何基础设施的移动节点的互联。连接与否取决于网络的拓扑结构、节点的运动速度、网络局部的通信流量等因素。在这种环境中，由于终端的无线覆盖范围的有限性，两个无法直接进行通信的用户终端可以借助于其他节点进行分组转发。在Ad hoc网络中，除了网络节点外不需要任何基础设施。网络节点间的距离定义了网络的边界。这就说明两个或多个移动节点在一定范围内的分布，就可以以Ad hoc方式定义一个新的网络。Ad hoc网络最主要的特点是网络拓扑动态变化、节点之间以多跳方式通信、节点之间以无线方式通信。图2.1是一个简单的Ad hoc网络示意图。无线移动自组织网络与传统的无线网络之间的区别如图2.2所示。

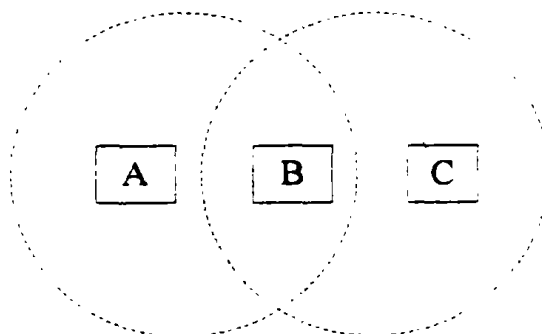


图2.1 具有三个移动节点的Ad hoc网络

	传统无线网络 (GSM/CDMA)	Ad hoc网络
无线网络结构	单跳	多跳
主干网络的拓扑结构	固定	动态
中继设备	基站、网络子系统	网络中的移动节点
骨干网的特点	高速、可靠、全双工方式工作	低容量、高误码率、半双工或全双工工作
无线节点的控制管理	由基站负责	移动节点本身

图2.2 自组网与传统网络的区别

2.1.2 无线自组网的模型

与有线网络相比, Ad hoc网络的工作环境有诸多不同, 因此所选技术也有较大差异, 主要体现在网络的底三层, 即物理层、链路层和网络层, 其中网络层的差异最大。下面根据移动自组网的特点, 参照OSI 7层模型, 从各个层面来分析 Ad hoc网络的技术特点, 并就各个层次的构成来逐一介绍。其协议栈结构如图2.3所示。

应用服务	应用层
传输服务	传输层
分组转发和路由	网络层
链路控制/信道接入	链路层
无线信道	物理层

图2.3 Ad hoc网络协议

最底层物理层, 是一组低功率、高能力、能在运动中工作的物理传输设备, 提供无线传输能力、完成无线信号编码译码、发送和接收等工作, 以支持移动组网。链路层控制对共享无线信道的访问以及对逻辑链路的控制, 提供可行的无线通信的逻辑链路层, 以支持有效的介质访问。网络层是Ad hoc技术的重点, 也是它与其他现有网络的主要区别所在, 支持网络工作的传输协议、移动组网算法和动态路由协议。传输层主要完成端到端通信的建立, 目前一般是对有线网中的TCP/UDP进行改造, 使之适应无线环境; Ad hoc的高层主要包括建立在Ad hoc之上的无线应用以及接入移动通信核心的各种业务。

2.2 Ad hoc 网络研究中的难点问题及关键技术

2.2.1 Ad hoc 网络面临的问题

自组网的特性为自组网路由协议设计提出了新的问题和挑战，主要有以下几点：1) 特殊的信道共享方式

通信网络中的信道共享方式一般有 3 种：点对点、点对多点和多点共享。如图 2.4 所示。点对点是最简单的共享方式，两个节点可以共享一个信道（有线或无线）。点对多点一般用于有中心控制的无线信道，例如蜂窝移动通信系统的无线信道。在这种方式中，终端（如移动电话）在中心站（如基站）的控制下共享一个或多个无线信道，所有终端均处于中心站的覆盖范围内。多点共享是指多个终端共享一个广播信道，以太网就是典型的多点共享方式。在多点共享方式中，一个终端发送报文，所有的终端都可以侦听到，即相当于一个全互联的网络，这种共享方式下的信道为一跳共享广播信道。

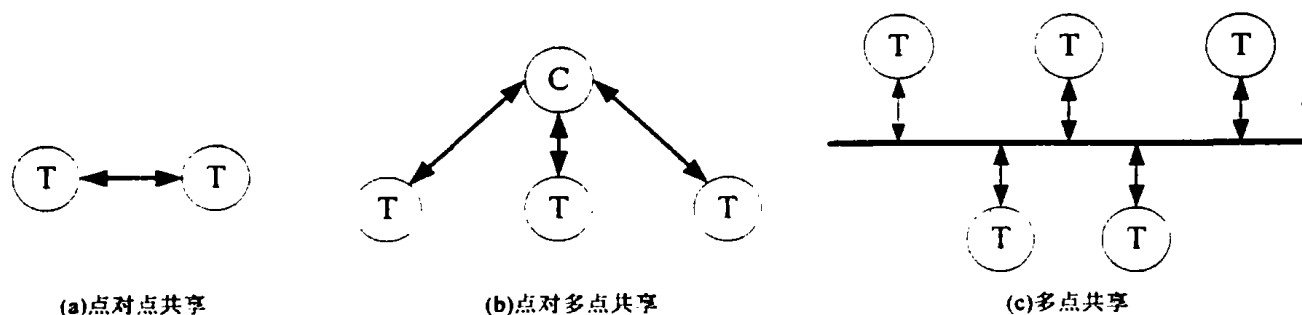


图 2.4 信道共享方式

Ad hoc 网络的无线信道虽然也是一个共享的广播信道，但不是一跳共享的。因为当一个节点发送报文时，只有在其覆盖范围内的节点（称为邻居）才能收到，Ad hoc 网络的这种共享信道称为共享广播信道。

2) 动态变化的网络拓扑结构

Ad hoc 网络中的设备大多处于移动状态，导致网络拓扑动态变化。由于常规路由协议需要花费较长时间才能到达算法收敛状态，而此时拓扑结构可能在达到收敛状态之前又发生了变化，后果是使主机在花费了很高的代价（如网络带宽、能源、CPU 资源等）之后得到的网络路由信息内容变得陈旧，使路由协议始终处于不收敛状态。所以在 Ad hoc 网络中，路由算法应具有快速收敛的特性，减少路由查找的开销，快速发现路由，提高路由发现的性能和效率。

3) 有限的无线传输带宽

Ad hoc网络使用无线传输技术作为底层通信手段,与有线信道相比,带宽窄,信道质量差,对协议的设计提出了新的要求。为了节约有限的带宽,Ad hoc网络协议设计的原则是要尽量减少节点间交互的信息量,减少控制信息带来的附加开销,此外,由于无线信道的衰落、节点移动等因素会造成报文冲突和丢失,将严重影响TCP的性能。因此,在Ad hoc网络中要对TCP的传输层服务进行改进,以满足数据传输的需要。

另外还有节能问题、网络管理方面的问题和安全性问题等等。

2.2.2 实现网络的关键技术

1) 路由协议

设计良好的路由协议是建立Ad hoc网络的首要问题,其协议应该具有以下功能:

- 能感知网络拓扑结构的变化
- 能维护网络拓扑的连接
- 具有良好的高度自适应性

2) 服务质量 (QoS)

目前,保障网络QoS[6]采用两种策略:一是采用保守的方法通过提供足够的网络资源来避免资源竞争;二是采用对带特定分组进行标记,并提供不同优先级的方法来确保某些特性业务的QoS,如IETF提出的综合服务模型和区分服务模型。

3) MAC协议

在Ad hoc网络中,由于节点的通信范围受限,终端可以随机移动,会产生隐藏和暴露终端的问题[7],使CSMA[8]协议不能直接应用于Ad hoc网络。因此必须设计新的MAC协议,以获得较高的信道利用率、较低的时延和终端公平的接入。

4) 功率控制

一般无线系统是干扰受限系统,无论在传统蜂窝还是无线Ad hoc网络中,一般都需要控制功率。无线Ad hoc网络的特点是每一个节点的信号覆盖范围十分有限,因而其干扰区域也很小,而这是建立在较为理想的功率控制基础上的。

5) 安全问题

Ad hoc网络存在以下的安全性问题[9]：无线链路Ad hoc网络容易受到链路层的攻击，包括被动窃听和主动假冒、信息重放和信息破坏，节点在敌方环境漫游时缺乏物理保护，使网络容易受到已经泄密的节点的攻击；Ad hoc网络的拓扑结构和成员经常变化，节点间的信任关系经常变化，Ad hoc网络没有值得信任的第三方的帮助，在节点间建立信任关系成为Ad hoc网络安全的中心问题；Ad hoc网络包含成百上千个节点，需要采用具有扩展性的安全机制。

6) Ad hoc网络的互连

如图2.5所示，Ad hoc网络与Internet和广域网的互联，从外部来看，可以认为Ad hoc网络是一个IP子网。网内部分分组的传送由网内路由协议完成，而当分组进入或离开子网时采用标准IP路由机制。这就要求网关节点要能运行多种路由协议。

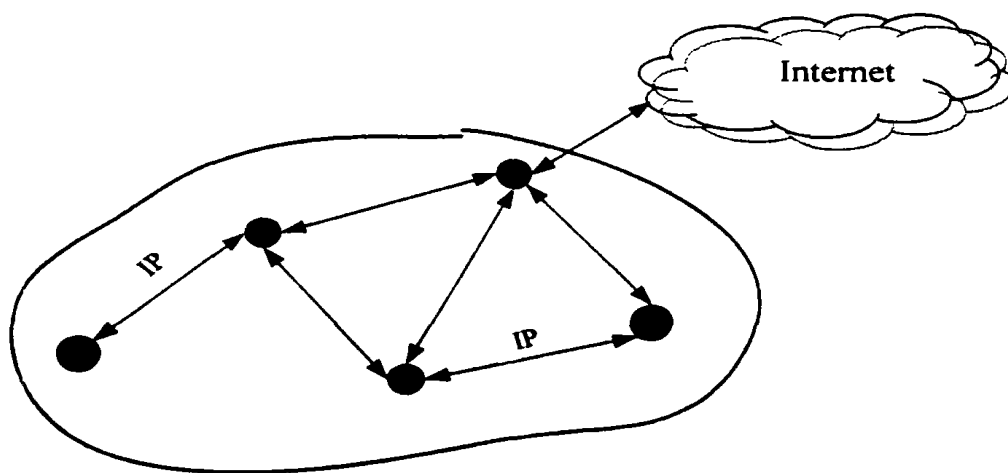


图2.5 Ad hoc方式构成的IP骨干

7) Ad hoc网络的资源管理

无线Ad hoc网络的资源管理非常复杂。首先，无线Ad hoc网络的无线资源管理主要针对各种数据业务，其服务质量要得到保证；其次，在某种应用中，网络的拓扑结构快速变化，而且不可预知。数据分组可能在任何两个移动节点之间传递，或者经过中间节点的转发，转发的节点数受路由协议和服务质量要求的限制，而不需要固定基站的转接。另外，大量移动节点的能源只能由电池来提供，因此功率管理也不是孤立的，必须从整体出发，才有可能得到优化。

2.3 各个功能层的研究情况

1. 物理层

当今研究的重点有软件无线电技术和超宽带无线电技术，软件无线电技术可把多波段天线、射频变换、宽带数模变换、中频处理、模数变换、基带处理和信号处理等组合在一起，灵活地进行软件处理，形成可编程的、模块化的无线电系统。其目标是在全波段内根据环境设置参数，在多个频段上进行通信。超宽带无线电技术是一种先进的无线通信技术，可提供低功耗、超宽带及相对简捷的通信技术。它解决了困扰无线技术多年的有关传播方面的重大难题，具有对信道衰落不敏感、发射信号功率频谱密度低、系统复杂度低、能提供厘米级的定位精度等优点。

2. 链路层

由于Ad hoc网络使用的多跳无线网络具有动态拓扑结构，所以在链路层大都采用随机接入多址协议。共享无线信道网络两种最基本的随机接入协议是ALOHA和CSMA，时延和隐藏终端问题是固有的问题，因此MAC协议必须要解决这两个问题。

3. 网络层

网络层的路由选择协议分两类：表驱动路由选择协议和源驱动按需路由选择协议。从目前研究情况看，按需源驱动路由是未来的发展方向。网络层的具体路由细节将在第三章中讲述。

4. 传输层

在固定的互联网中，传输层主要解决网络的阻塞问题，而在移动Ad hoc网络中，在策略上有所不同：一是局部解决方法，即解决局部的链路不可靠问题；二是端到端的解决方法，即让传输层了解链路的情况，对阻塞引起的丢包和链路质量问题引起的丢包分别处理。

第三章 Ad hoc 网络路由及多路径路由研究

传统的路由算法如RIP(选路信息协议)[10]和OSPF(开放最短路径优先协议)[11]是为有线固定网络而设计的, 它们的拓扑结构是固定的, 不会出现大的网络结构变化, 因此不需要考虑路由器的移动性, 路由的更改主要是由于网络流量的变化, 或发生网络拥堵的缘故, 而Ad Hoc网络的节点是移动的, 路由信息随时可能改变, 所以必须对路由算法进行改进。IETF特别成立的MANET工作组专门来研究无线Ad hoc中的路由协议问题。

3.1 Ad hoc 网络路由协议分类及比较

3.1.1 路由协议分类简介

路由协议是网络层的主要功能。由于无线信道变化的不规则性, 节点的移动、加入、退出等引起网络拓扑结构变化, Ad hoc 网络中路由协议的作用就是在这种环境中, 监控网络拓扑结构变化, 交换路由信息, 定位目标的节点位置, 发现、选择和维护路由, 并根据选择的路由转发数据, 提供网络的连通性。它是移动节点相互通信的基础。

目前MANET工作组已经提出了许多协议草案, 他们根据不同的角度可以进行不同的分类[12][13], 如图3.1所示。

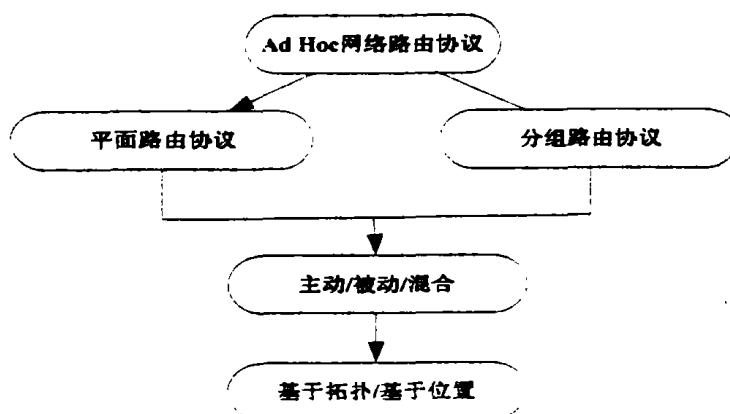


图3.1 Ad hoc网络路由协议分类

①平面路由协议 (flat)。在平面路由协议中, 所有节点在形成和维护路由信息责任上是等同的。路由协议的逻辑视图是平面结构, 结构的地位是平等的。其

优点是不存在特殊节点,路由协议的鲁棒性较好,通信流量平均地分散在网络中。缺点是缺乏可扩展性,限制了网络的规模[14]。

②分级路由协议(cluster-head)。分级路由协议中,网络由多个簇组成,节点分为两种类型:普通节点和簇头节点。处于同一簇的簇头节点和普通节点共同维护所在簇内部的路由信息,簇头节点负责所管辖簇的拓扑信息的压缩和摘要处理,并于其他簇头节点交换处理后的拓扑信息。层次结构就是一种典型的簇方式。采用簇路由主要有两个目的。一是通过减少参与路由计算的节点数目,减小路由表大小,降低交换路由信息所需的通信开销和维护路由表所需的内存开销,这与有线网络中层次思想的目标是一致的;二是基于某种簇形成策略,选举产生一个较为稳定的子网络,减少拓扑结构变化对路由协议带来的影响。簇路由的优点是适合大规模的自组网环境,可扩展性较好;缺点是簇头节点的可靠性和稳定性对全网性能影响较大,并且为支持节点在不同簇之间漫游所进行的移动管理将产生一定的协议开销。

现在已提出的自组网路由协议大多数是基于平面路由思想,主要原因是自组网目前主要以一种末端网络形式存在,应用规模都比较小,使用簇思想的作用不明显。

按照路由的发现策略划分,可分为主动路由协议、被动路由协议和混合路由协议。

①主动路由协议(proactive)。主动路由的路由发现策略与传统路由协议相似,各节点通过周期性地广播路由信息分组,交换路由信息,主动发现路由。同时,节点必须维护去往全网所有节点的路由。它的优点是当节点需要发送数据分组时,只要去往目的节点的路由存在,所需延时很小;缺点是主动路由需要花费较大的开销,尽可能使得路由更新能够即时反映当前拓扑结构的变化。然而,动态变化的拓扑结构可能使得这些路由更新变成过时信息,路由协议始终处于不收敛状态。

②被动路由协议(reactive)。被动路由称为按需路由。与主动路由相反,按需路由认为在动态变化的自组网环境中,没有必要维护去往其他所有节点的路由。它仅在源节点有分组要发但没有去往目的节点的路由时,才“按需”进行路由发现。因此,路由表内容是按需建立的,它可能仅仅是整个拓扑结构信息的一部分。它的优点是不需要周期性的广播路由信息,节省了一定的网络资源;缺点

是发送数据分组时，如果没有去往目的节点的路由，数据分组需要等待因路由发现引起的延时。

③混合路由协议(hybrid)。混合路由协议是一类混合使用主动路由和被动路由策略的协议，即在一定的网络区域内采用主动路由的方式，区域间则采用被动路由的方式。比如ZRP协议。

迄今为止，已提出的主动路由协议主要有WRP[15]、DSDV[16]、GSR[17]、FSR[18]、CGSR[19]，按需路由协议主要有DSR[20][21][22]、TORA[23]（临时排序路由算法temporary ordered routing algorithm）、AODV[24][25]（Ad Hoc按需距离矢量协议Ad Hoc on demand distance vector）、ABR（基于关联的路由协议associativity-based routing）[26]、SSR(Signal Stability Routing)[27]等。

3.1.2 Ad hoc 路由协议的比较

传统的IP路由就是一种表驱动方式的路由。Ad hoc网络中的表驱动路由继承传统IP路由方式，如DSDV，CGSR，WRP等，其差别只在于路由表数量与路由更新方式。按需路由，如DSR，AODV等，只有在需要一条路径时才开始建立路径，发送端必须等待一段时间，直至路径建立完成才能开始传送数据分组。表驱动路由不管路径是否会用到，都不断地利用节点间彼此的信息交换来维持路由表，比较适合网络拓扑变化程度较小时的情况。图3.2[28]给出了表驱动路由和按需路由在延迟、控制开销、耗电量和带宽开销等性能参数上的比较。

	表驱动路由	按需路由
路由协议	DSDV、CGSR、WRP	AODV、DSR、TORA、ABR、SSR
路由获取延时	低	高
控制负载	高	低
耗电量	高	低
带宽开销	高	低

图3.2 表驱动路由和按需路由比较

各种按需路由协议性能的简单比较由图3.3给出。AODV 的路由发现机制同DSR类似，但是二者相比还有一些不同。在路由请求分组发出的时候，AODV的分组中只带有目的节点的信息，而DSR由于是源路由方式，数据分组中包含路由

所需的全部信息。因此，DSR的开销要大一些。在路由应答分组返回时，AODV和DSR的开销是一样的。AODV的一个缺点是要求所有的链路都是对称的，无法使用不对称链路，而DSR却无此限制。AODV和DSR的另一主要区别是DSR能够支持分组挽救，而AODV不支持，因此在中间节点发现路径中断时，AODV只能将分组丢弃；而DSR却可以在路由缓存中寻找其他的路径对分组进行补救。

	AODV	DSR	TORA	ABR	SSR	CEDAR
整体复杂性	中等	中等	高	高	高	高
开销	低	中等	中等	高	高	高
路由模式	平面	平面	平面	平面	平面	核心提取
Loop-free	是	是	是	是	是	是
多径支持	否	是	是	否	否	否
路由存放位置	路由表	路由缓存	路由表	路由表	路由表	路由表
路由重置位置	删除路由，通知源端	删除路由，通知源端	链路反向，路由恢复	局部广播查询	删除路由，通知源端	动态路由计算，通知源端
路由度量	最新和最短	最短路径	最短路径	相关度和最短路径	相关度和稳定度	最短和最宽路径

图3.3 各种按需路由协议性能比较

随着对Ad Hoc网络的研究的不断深入，单路路由协议的研究已经相对成熟。但是，简单的单路路由协议还不能满足容错、路由可靠性、QoS路由等更高层次的路由要求。多路路由恰恰是解决这些问题的一个很好的途径，下一节我们将详细讨论Ad hoc网络的多路路由协议。

3.2 DSR 源路由协议

DSR(Dynamic Source Routing)协议是最早采用按需路由协议(On Demand)思想的路由协议。它包括路由发现和路由维护两个过程。它的主要特点是使用了源路由机制进行分组转发。它的缺点是每个数据分组都携带了路径信息，造成开销较大。DSR的优点是中间节点不需要维护去往全网所有节点的路由信息，而且可以避免出现路由环路。

为了将信息包发送至另一主机，源节点在信息包的头部构造一个源路径(source route)，它顺序标明信息包发送至目的主机所需经过的各个主机的地址，接着源节点将信息包传送至源路径中指定的第一个主机。当某主机接收到数据包时，它先检查自己是否是数据包的最终目的地，如果不是，它就按照包头内的源路径将其发送至下一跳。

Ad hoc网络中的每一台主机都必须维护一个路由缓存(route cache)，其中缓存着它学到的路径。当源主机准备向目的主机发送信息包时，首先查看路由缓存，如果在路由缓存中找到通往目的主机的路径，它就用这条路径发送信息包。如果没有源主机可以通过路由发现协议(route discovery protocol)来寻找路径。在等待路由发现协议完成的过程中，源主机既可以继续处理其余的工作也可以与其它主机通讯。源主机可以缓存该信息包，等路由发现协议找到路径之后将其发送出去。源主机也可以丢弃该信息包，依靠高层协议软件进行必要的重传。路由缓存中的每一条路径都有过期时间，当超过该时间后，相应的路径就被从缓存中删除。

在主机使用某一条源路径的过程中，主机要对该路径的正确性进行监控。例如，如果源路径中所标明的源节点、目的节点、或任一中间节点移动出了其上一跳或下一跳节点的无线传播半径，该源路径就不能继续被用来向目的节点发送信息包。同样，当源路径上的任何一个节点出了故障或关机时，该源路径也不能再继续使用。这种对路径的正确性的监控称为路由维护(route maintenance)。当路由维护探测到正在使用中的路径出了问题时，路由发现协议就可能被启动，以发现新的正确的路径。

3.2.1 DSR 路由发现

为了启动一次路由发现，源主机将广播一个路由请求(route request)包，所有位于其无线传输半径之内的主机都会收到。路由请求包中标明了所请求路径的目的主机，称为目标(target)。如果路由请求成功的话，源主机将收到路由应答(route reply)包，其中列出一个由若干网络节点组成的序列，顺序通过该序列的各个节点，源主机就可以将信息包发送至目标主机。

路由请求包中除了包含发起主机地址和目标主机地址之外，还包含一个路由记录(route record)，其中逐一记录了此次路由发现过程中该路由请求包在Ad hoc网络中传播时所经过的各个主机地址。每一个路由请求包还包含一个唯一的路由

请求标识号(request id)，它由发起主机根据本地维护的一个序列号而设置。为了辨别出重复的路由请求，Ad hoc网络中的每个主机都要维护一张由最近接收到的<发起主机地址，路由请求序列号>对所组成的列表。

RREQ分组格式如下：

分组类型	分组ID	源地址	目的地址	控制信息	路由记录
------	------	-----	------	------	------

{信源地址 分组ID}用于唯一的识别一个RREQ包, 以便于RREQ包的接收处理。路由记录是从源节点到目的节点所经过的节点序列, 从而完成路由发现的功能。各节点对收到的RREQ分组按如下顺序处理：

1. 查看本分组是否在最近收到的“历史RREQ记录中存在”，若存在则丢弃该RREQ分组，不作进一步的处理。
2. 如果收到分组的“路由纪录”中包含本节点，丢弃该RREQ分组，不作进一步的处理。
3. 如果本节点是目的节点，发送路由应答分组RREP。
4. 否则，将本节点的地址添加到RREQ的“路由记录”后面，重新广播更新后的RREQ分组。

目的节点或存在到目的节点路由的中间节点发送应答分组RREP。RREP分组的传送分两种情况：

1. 网络中链路是双向的。若目的节点存在到源节点的反向路由，则RREP分组按反向路由传输到源节点。若不存在反向路由，RREP按“路由记录”进行反向传输到源节点。
2. 网络中存在单向链路。若目的节点存在到源节点的反向路由，则RREP分组按反向路由传输到源节点。若不存在反向路由，则目的节点启动到源节点的路由搜索程序，产生一个新的RREQ, 为了避免相互寻找对方造成搜索循环，这个新的RREQ分组中要包括RREP。

图 3.4, 3.5 描述了一个路由请求发起和路由应答返回的过程。图 3.4 中源节点 1 (Quelle) 要发送数据包到节点 5 (Senke) 并发起路由请求，RREQ 包分别经过两条路径传输，第一条通过节点 {1, 2, 4, 5} 到达目的节点，第二条通过节点 {1, 2, 3} 到达中间节点 3。图 3.5 描述了目的节点或中间节点返回 RREP 应答包的过程，目的节点 5 发送 RREP 包到源节点，而由于中间节点 3 缓存内有到

目的节点 5 的路径 $(3, 5) \gg \{3, 6, 5\}$ ，因此中间节点 3 不再继续向下传播 RREQ 包，而是发送 RREP 包到源节点。源节点 1 接收到分别由节点 5 和节点 3 发过来的 RREP 包，并将两条路由信息 $(1, 5) \gg \{1, 2, 4, 5\}$ ， $(1, 5) \gg \{1, 2, 3, 6, 5\}$ 存储在路由缓存内。

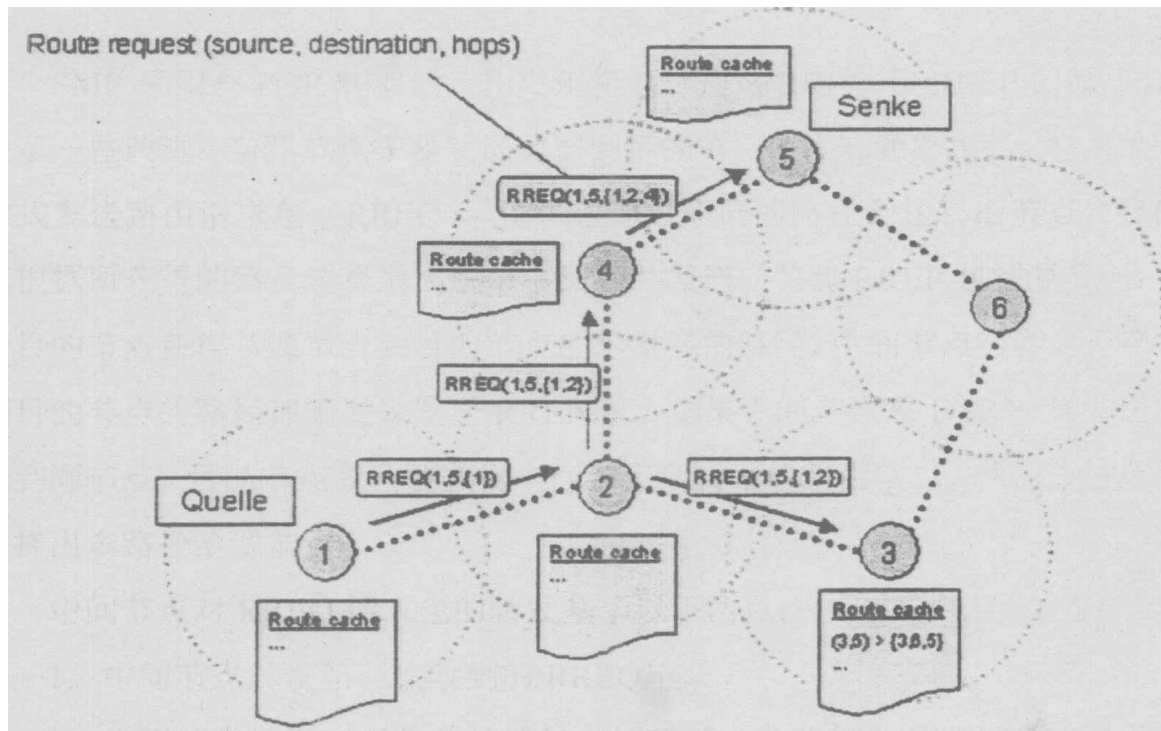


图 3.4 路由请求包传播

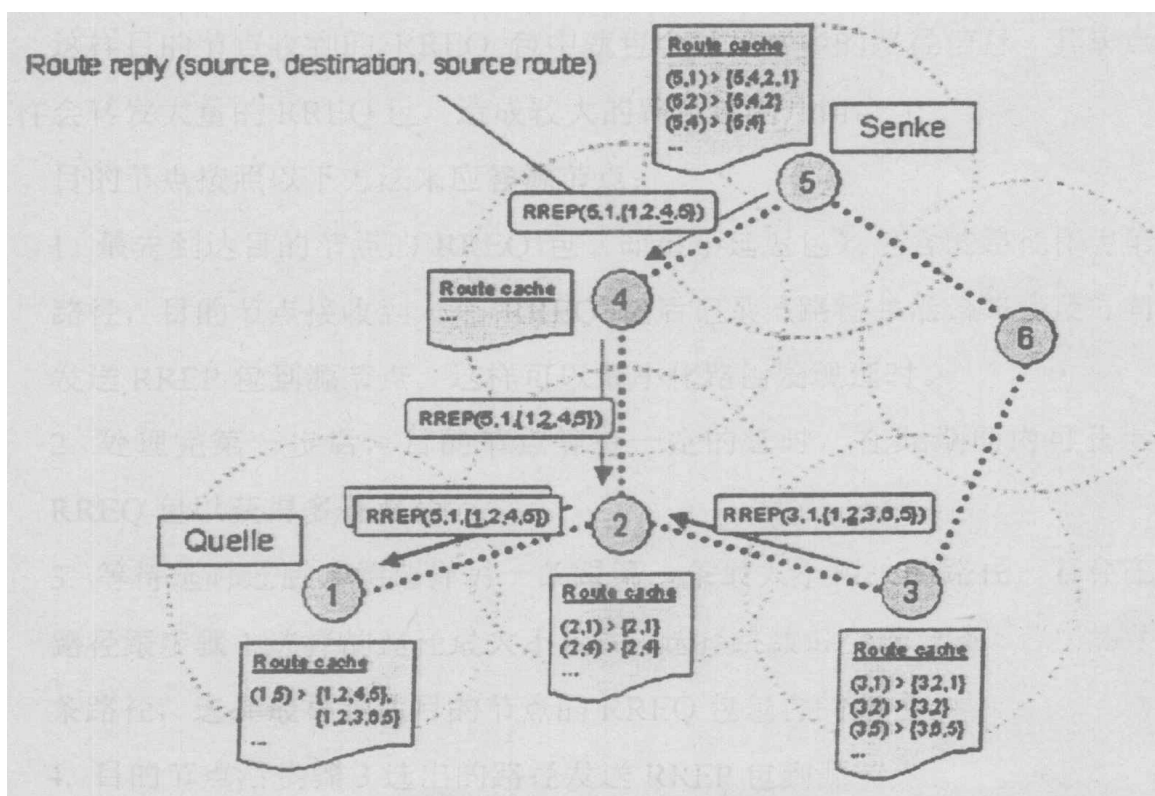


图 3.5 路由应答包传播

3.2.2 DSR 路由维护

只有当路由在使用时才进行维护,当路径中的某个节点发现数据分组无法发送到下一个节点时,就向源节点发送一个RERR(路由出错包)分组,RERR包含故障链路两端的节点地址,转发RERR分组的节点都将路由缓存中经过此故障链路的路由项删除。

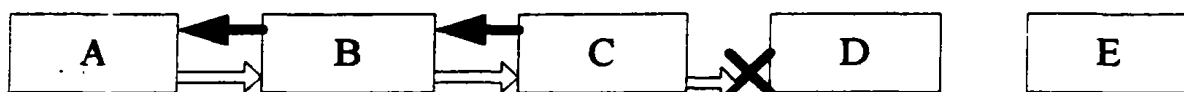


图3.6 路由维护

如图3.6,节点A使用源路由A-B-C-D-E发送数据包到E。如果节点C不能发送数据包到节点D,则节点C发起一个路由出错包RERR到源节点A,此RERR包含出错链路C-D。节点A收到RERR包后删除缓存内包含C-D链路的路由,如果A还有其他到路径到E,就使用其它路径继续发送数据包到E,否则A将发起一次新的路由请求。

3.2.3 DSR 协议的优化

1) 路由的侦听 (overhearing)

通过侦听,移动节点能“无意”接收收到很多分组,尽管这些分组和本节点并没有任何关系,但处理这些分组的时候,本节点可以从中获取路由信息来更新本节点的路由缓存以备后用,DSR协议通过节点间的分组交换获取有效路由信息,可以降低路由发现分组发送率,降低协议开销。

节点的侦听不仅仅局限于RREQ分组,只要通过本节点传输的分组,都可以提取路由信息来更新路由缓存。如图3.7所示,当节点B转发A到D的数据分组时,可把分组的源路由信息包含到其缓存中。

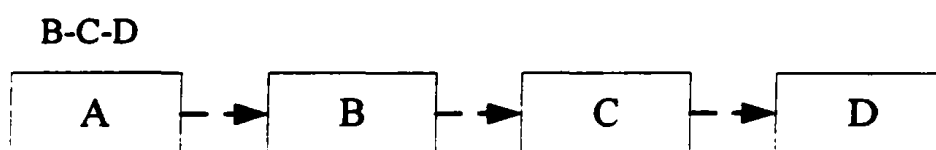


图3.7 路由的侦听

2) 短路由的主动报告

中间节点在转发分组时,可以发现到比源路由短的路径,从而可主动报告给

源节点。

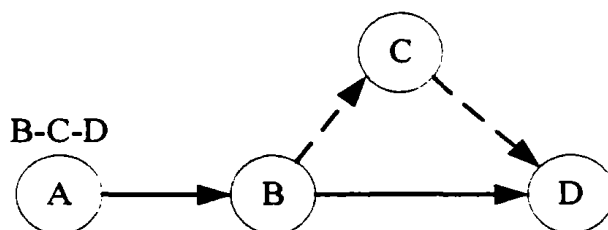


图3.8 短路由的主动报告

如图3.8节点A发送一个源路由为A-B-C-D的分组到目的节点D，B在转发此分组时，将该分组的源路由和B的缓存路由进行比较发现，发现有从B到D更短的路由B-D，B转发完分组后，主动发送“短路由”到源节点A，使源节点的后续分组沿新的短路由传输。

3) 自动路由缩短机制

在节点密度较大的网络区域内，移动节点能够接收到一些这样的分组：分组不是发往本节点的，但分组中路由信息显示，它还需要经过其它的节点才到达本节点，再经过本节点再转发出去。本节点可推测该分组是“忽略”了多个中间节点提前到达本节点，这意味着稍后的时间里，源节点可以用更加短的路由转发分组，本节点便给源节点发送一个主动路由应答分组(Gratuitous Route Reply)，使源节点采用更短的路由转发分组。路由自动缩短机制使协议占用最少的移动节点资源和处理时间。

3.2.4 选择 DSR 协议的原因

Josh Broch, David A. Maltz等人通过大量的仿真实验对四种Ad hoc网络路由协议的性能进行了比较和分析[44]。这四种协议是:DSDV、TORA、DSR、AODV，其中既包括表驱动协议，也有按需路由协议。其仿真的Ad hoc环境是50个移动主机，在不同的移动频率和移动速度下对上述四种协议进行比较。他们得出的结论是：每一种协议都可以在某些情况下工作得很好，而在另一些情况下有各自的缺陷。DSDV的性能很规律：当节点的移动频率低且速度慢时，DSDV几乎成功传送了所有的数据包；而当节点的移动频率和速度增大时，DSDV协议不能汇聚。TORA从路由开销方面来讲是实验的各种协议中最差的，但是当数据源为10到20个(即网络处于轻载状态)时，TORA也成功传送了90%以上的数据包。当数据源增加到30个(即网络处于重载状态)后，网络无法应付路由协议所带来的通

讯量开销,这时有很大比例的数据包被丢弃(drop)。尽管DSR因使用源路由而增加了路由协议开销的字节数,但是它仍然在实验中所尝试的各种移动频率和移动速度场景中具有非常好的性能。AODV在各种移动频率和移动速度场景中的性能与DSR几乎一样好,同时又实现了降低路由字节开销的目标,但是它要求发送大量的路由信息包,所以当节点移动频繁快速时AODV实际上比DSR产生了更多的路由开销。

DSR 协议中,源主机确定地知道它有哪些可以到达目标主机的路径,可以自由地从中选择合适的路径来发送数据包。这就使在 DSR 上的多路径路由比基于逐跳的(hop-by-hop)路由协议上的多路径路由更为简单,且免除了路径上各节点为保持对多径的一致认知而需要进行的额外通信和计算。正是 DSR 本身的优秀性能表现以及源路由的特征使我们决定选择 DSR 进行扩展,在 Ad hoc 网络中实现独立多径路由。扩展后的独立多径路由协议称为 SIMR (Simple Independent Multi-path Source Routing, 简单独立多路径源路由)。

3.3 Ad hoc 多路径路由

相对于单路径协议而言,多路路由协议在容错、路由可靠性、QoS路由等方面有很多优势。因此,为了进一步提高Ad hoc网络的路由质量,多路路由问题逐渐成为了这几年的研究热点。

3.3.1 多路径相关概念

一、多路径路由定义

多路径路由模型为任意一对节点同时提供多条可用的路径,并允许节点主机(或应用程序)选择如何使用这些路径。多径路由算法为节点间提供多条路径,并确保发往其中一条路径的数据经由该路径到达目的地。多径路由网络是其中的路由器执行多径路由算法的网络。

二、多路径路由的使用

管理多条路径的网络协议层必须能够有效地使用多条路径,以改善服务质量。Intenet上,适宜管理多条路径的网络协议层可以是网络层或应用层。比如可以由应用程序甚至用户亲自决定使用哪些路径、如何使用;也可以由网络层透明地替用户选择路径的使用方法。究竟由哪个层次来管理多路径的使用,涉及到灵

活性、性能、软件工程之间的折衷。

使用模式说明了多路径如何被使用，有两种基本的使用模式：

- 1、同时使用多条路径。
- 2、先使用主路径，主路径失效后再使用其它替换路径。

称前一种方法为同时多径，后一种为替换多径。

三、多路径路由特点

- 1、可以为不同的服务质量提供不同的路径。
- 2、可以为同一种类型的服务提供多条路径，经聚集实现更高的服务质量。
- 3、由于主机对路径有自主的使用权，它可以通过探测各路径的状况(比如丢包率)猜测网络的拥塞程度，据此调整对各路径的使用，从而在得到优质服务的同时也提高了网络的利用率。因此，多路的正确使用还可以提高网络的利用率。

四、路径规格

为在节点之间计算路径，必须根据路径的用途规定路径的特性。例如，为了得到最大的端到端吞吐量，就必须规定路径的特性是：在任意节点对之间的多条路径的聚合吞吐量最大。而为了得到最小的端到端延迟，就必须规定路径的特性是：任何时刻，任意节点对之间都存在至少一条具有最小延迟的路径。路径规格(path specification)规定了特定路径集合的特性。路径计算算法计算出符合路径规格所规定的特性的路径集。

3.3.2 多路径路由的分类

多路路由根据节点的相关性可以分为如下三类[29]：

一、 节点不相关多路径路由 (Node-Disjoint)

节点不相关路由，也可以称为完全不相关路由，路由之间没有共用的节点或者链路，如图3.9所示，信源信宿对S和D之间的路径SXD, SYD, SZD是三条节点不相关路由。

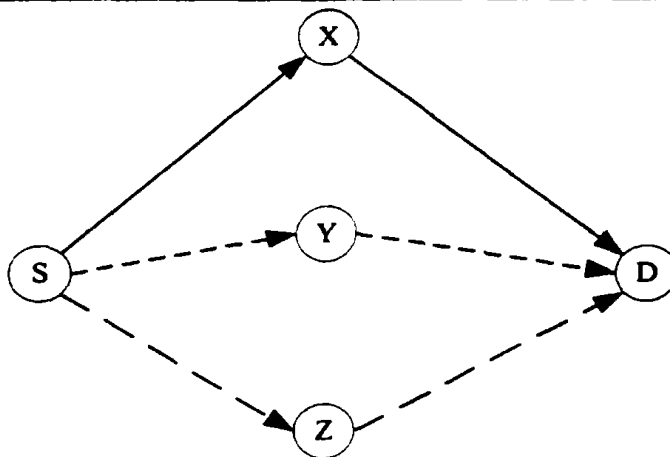


图 3.9 节点不相关路径示意图

二、 链路不相关多路径路由 (Link-Disjoint)

链路不相关的路由之间没有共用的链路，但是可能有共用的节点，如图 3.10 所示，信源信宿对 S 和 D 之间的路径 SYD, SXYZD 是链路不相关路由，节点 Y 为共用节点。

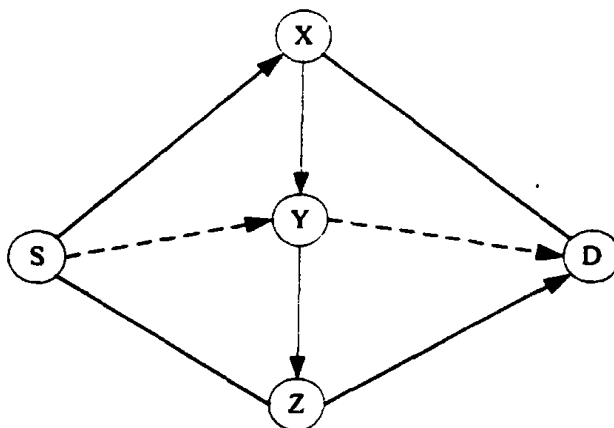


图 3.10 链路不相关路径示意图

三、 相关多路径路由 (Node-Disjoint)

相关路由之间既有共用的节点，也有共用的链路，如下图 3.11 所示，信源信宿对 S 和 D 之间的路径 SXD, SXYD 是相关路由，节点 X 为共用节点，SX 为共用链路。

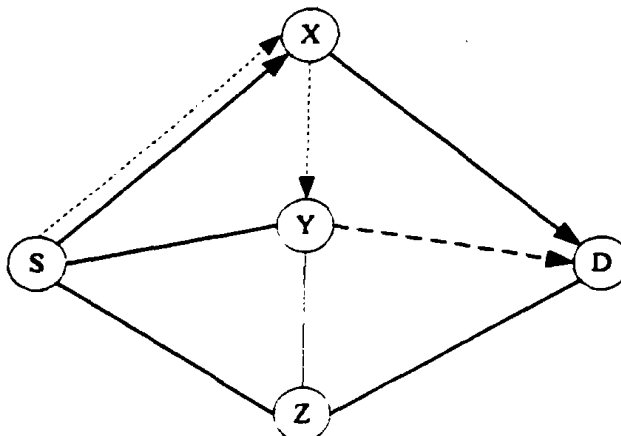


图 3.11 相关路径示意图

相关路由同不相关路由相比，它所占用的资源要少，因为它既有共享的链路又有共享的节点，因此资源是共享的。并且同等的网络分布密度下，相关路由的搜索要容易的多，因为不相关路由的搜索其约束性要强的多。但是正是因为相关路由有共享的节点或者链路，其容错能力就差很多。在上述三种路由类型中，节点不相关路由的容错能力最强，链路不相关路由的容错能力次之，相关路由的容错能力最差。在链路不相关多路径路由中，如果共享的节点由于移动等原因发生中断的话，那么该节点所连接的所有路径便都失败了，而节点不相关路由由于链路的独立性，则不会产生连锁反应。一般在网络分布密度相对较大的情况下，采用节点不相关多路路由，但在节点密度相对稀疏的网络环境中，会采用链路不相关多路路由。一般相关多路路由是不宜采用的。我们将在 3.3.4 节，从稳定性方面就节点不相关路径（独立路径）和相关路径（非独立路径）作一个分析。

3.3.3 多路径路由的优点

基本路由协议都采用了单路径方式传送数据，路由开销和网络延迟较大，负载较大时会引起网络拥塞。而多路径方法可以较好的解决这些问题，多路径路由算法与单路径相比具有以下优势：

- 1) 能加快传输速度，减少延时。在多条路径之间分配资源进行传输，其传输性能明显优于单路径。
- 2) 防止断裂，增加稳定度。单路径中如果断裂，传输将失败，必须重新进行路由发现，多路径算法中当有路径断裂时，其他路径可以照常传输，可以将资源重新分配给稳定的路径而不是重新进行路由发现。
- 3) 有利于负载均衡。单路径的缺点是很容易造成一条路径的使用过密，过于拥塞，而多路径的算法却可以有效的解决这一问题，能使负载平均分布。
- 4) 减少对带宽的要求。资源在多条路径之间分配，能有效的减少对带宽的限制。

3.3.4 多路径的稳定性分析

Ad hoc网络的路径稳定性同许多因素有关，比如说无线信道的干扰[30]，地理位置的影响，节点的移动性[31]等。在本节的稳定性分析中，不考虑其他因素，

只考虑节点的移动性以及路径相关性对路径稳定所产生的影响。

Ad hoc 中路径断裂的主要原因是由于节点的移动性以及链路的拥塞造成的。本文主要从节点的移动性来进行分析，图 3.12 中假设多路径 MP_0 由路径 $P(A_0A_1 \cdots A_m)$ 和路径 $P(B_0B_1 \cdots B_n)$ 组成。多路径 MP_1 由路径 $P(C_0C_1 \cdots C_m)$ 和路径 $P(D_0D_1 \cdots D_n)$ 组成，可以看出多路径 MP_0 和 MP_1 不同点是 MP_0 中两条路径 $P(A_0A_1 \cdots A_m)$ 和 $P(B_0B_1 \cdots B_n)$ 完全独立，没有相同的中间节点，而 MP_1 中的两条路径 $P(C_0C_1 \cdots C_m)$ 和 $P(D_0D_1 \cdots D_n)$ 有一个公共的中间节点（节点 C_1 和 D_1 为同一节点）。现在就以这两种形式的多路径 MP_0 和 MP_1 进行稳定性的分析。

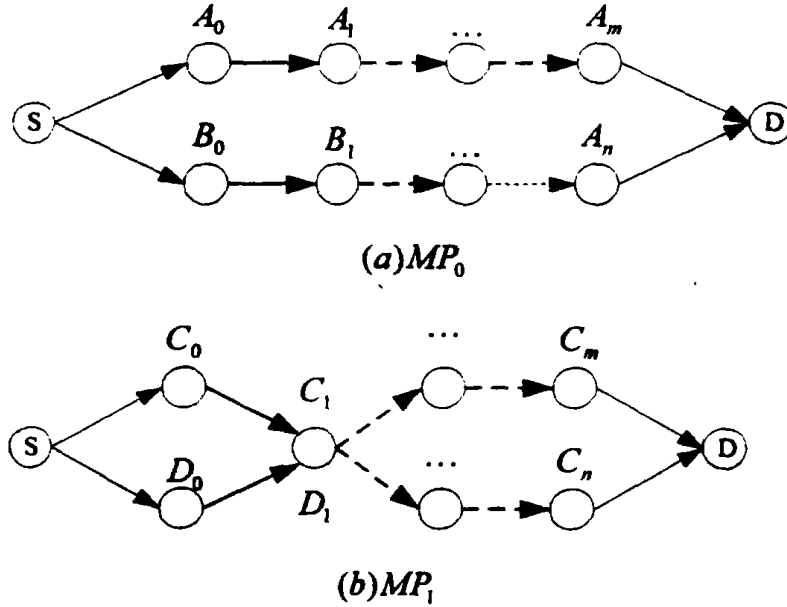


图 3.12 两种形式多路径

为了分析的通用性做出如下假设：网络中每个节点在单位时间内移动的概率相等为 p ，则对于一个路径 $P(A_0A_1A_2 \cdots A_k)$

其路径断裂出错的概率为： $P_{break} = 1 - (1 - p)^k$

其路径保持稳定的概率为： $P_{stability} = (1 - p)^k$

对于一个多路径，我们定义为 MP_i ，其包含两条路径，其中 i 是两条路径中相同节点的个数。其中第一条路径的跳数为 m ，第二条路径的跳数为 n 。

让 $i=0$ ，可得到多路径 MP_0 ，包含路径 $P(A_0A_1A_2 \cdots A_m)$ 和路径 $P(B_0B_1B_2 \cdots B_n)$ ，这两条路径没有相同的中间节点。

让 $i=1$ ，可得到多路径 MP_1 ，包含路径 $P(C_1C_2C_3 \cdots C_m)$ 和路径

$P(D_1 D_2 D_3 \cdots D_n)$, 这两条路径只有一个公共的中间节点 C_1 (D_1)。

对于多路径 MP_i 的稳定性, 我们分别从下面两方面考虑:

- 1) 多路径 MP_i 包含的两条路径中有路径断裂的概率。
- 2) 多路径 MP_i 包含的两条路径都断裂的概率。

首先探讨第一种情况, 定义 $p_0(MP_i)$ 为 MP_i 中有路径断裂的概率。

当 $i = 0$

$$\begin{aligned} p_0(MP_0) &= P[P_{break}(A_0 A_1 A_2 \cdots A_m) \cup P_{break}(B_0 B_1 B_2 \cdots B_n)] \\ &= 1 - P[P_{stability}(A_0 A_1 A_2 \cdots A_m) \cap P_{stability}(B_0 B_1 B_2 \cdots B_n)] \\ &= 1 - (1 - p)^{m+n} \end{aligned} \quad (3-1)$$

当 $i = 1$

$$\begin{aligned} p_0(MP_1) &= P[P_{break}(C_0 C_1 C_2 \cdots C_m) \cup P_{break}(D_0 D_1 D_2 \cdots D_n)] \\ &= 1 - P[P_{stability}(C_0 C_1 C_2 \cdots C_m) \cap P_{stability}(D_0 D_1 D_2 \cdots D_n)] \\ &= 1 - (1 - p)^{m+n-1} \end{aligned} \quad (3-2)$$

当 $i = k$

$$\begin{aligned} p_0(MP_k) &= P[P_{break}(E_0 E_1 E_2 \cdots E_m) \cup P_{break}(F_0 F_1 F_2 \cdots F_n)] \\ &= 1 - P[P_{stability}(E_0 E_1 E_2 \cdots E_m) \cap P_{stability}(F_0 F_1 F_2 \cdots F_n)] \\ &= 1 - (1 - p)^{m+n-k} \end{aligned} \quad (3-3)$$

由此我们可以得到如下关系式:

$$p_0(MP_0) \geq p_0(MP_1) \geq \cdots \geq p_0(MP_k) \geq \cdots, k > 1 > 0, k \leq \min(m, n) \quad (3-4)$$

现在探讨第二种情况, 定义 $p_1(MP_i)$ 为 MP_i 中两条路径都断裂的概率。

当 $i = 0$

$$\begin{aligned} p_1(MP_0) &= P[P_{break}(A_0 A_1 A_2 \cdots A_n) \cap P_{break}(B_0 B_1 B_2 \cdots B_m)] \\ &= [1 - (1 - p)^n][1 - (1 - p)^m] \end{aligned} \quad (3-5)$$

当 $i = 1$

$$\begin{aligned} p_1(MP_1) &= P[P_{break}(C_0 C_1 C_2 \cdots C_n) \cap P_{break}(D_0 D_1 D_2 \cdots D_m)] \\ &= [1 - (1 - p)^{n-1}][1 - (1 - p)^{m-1}] + p \end{aligned} \quad (3-6)$$

让 $q = 1 - p$

$$\begin{aligned}
 & p_1(MP_1) - p_1(MP_0) \\
 &= p - (1-p)^{n-1} - (1-p)^{m-1} + (1-p)^{m+n-2} + (1-p)^m + (1-p)^n - (1-p)^{m+n} \\
 &= 1 - q - q^{n-1}(1-q) - q^{m-1}(1-q) + q^{n-1}q^{m-1}(1-q^2) \\
 &= (1-q)[1 - q^{n-1} - q^{m-1} + (1+q)q^{n-1}q^{m-1}] \\
 &\geq (1-q)(1 - q^{n-1} - q^{m-1} + q^{n-1}q^{m-1}) \\
 &= (1-q)(1 - q^{m-1})(1 - q^{n-1}) \\
 &\geq 0
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

$$\text{由(3-7)可得 } p_1(MP_1) \geq p_1(MP_0) \tag{3-8}$$

当 $i = 2$

$$\begin{aligned}
 p_1(MP_2) &= p[P_{break}(E_0E_1E_2 \cdots E_n) \cap P_{break}(F_0F_1F_2 \cdots F_m)] \\
 &= [1 - (1-p)^{n-2}][1 - (1-p)^{m-2}] + 2p
 \end{aligned}$$

由(3-8)式 $p_1(MP_1) \geq p_1(MP_0)$, 即

$$[1 - (1-p)^{n-1}][1 - (1-p)^{m-1}] + p \geq [1 - (1-p)^n][1 - (1-p)^m]$$

可得

$$[1 - (1-p)^{n-2}][1 - (1-p)^{m-2}] + p \geq [1 - (1-p)^{n-1}][1 - (1-p)^{m-1}]$$

即

$$\begin{aligned}
 p_1(MP_2) &\geq [1 - (1-p)^{n-1}][1 - (1-p)^{m-1}] + p \\
 &= p_1(MP_1)
 \end{aligned} \tag{3-9}$$

同理, 我们可得

$$\cdots \geq p_1(MP_k) \geq \cdots \geq p_1(MP_1) \geq p_1(MP_0), k > 1 > 0, k \leq \min(m, n) \tag{3-10}$$

通过以上理论分析, 由(3-4)和(3-10)我们可以得出以下两个结论:

- 若多路径中各路径的公共节点越多 (即路径相关性越大), 有路径断裂的概率就越小, 所有路径都断裂的概率高;
- 多路径中得各路径的公共节点越少 (即路径相关性越小), 所有路径都断裂的概率就越小, 有路径断裂的概率就越高;

将以上分析结果与多路径路由发起策略结合分析, 多路径路由中存在两种路由发起策略, 即重新路由策略:

- ◆ 策略1 当有路径断裂时, 源节点就发起新的路由请求;
- ◆ 策略2 当所有路径断裂时, 源节点发起新的路由请求;

我们可以看到, 使用策略1, 要想保持路径的良好稳定性, 就必须要求各个路径有尽量多的公共节点, 极限情况就是各个路径合为一条路径; 所以在稳定性

方面,策略1不适合多路径路由。使用策略2,要想保持路径的稳定性,各个路径的公共节点越少越好,最好的情况是除了源节点和目的节点外没有任何其他公共节点(即独立多路径),这样多路径会有较好的稳定性。

由以上分析我们可以得出这样的结论:使用多路径路由,独立多路径的稳定性要比非独立多路径稳定性要好。

基于以上的稳定性理论分析,第四章在 DSR 的基础上提出一种建立独立多路径路由的 SIMR 路由方案。

3.4 典型的多路径源路由协议

目前的多路径路由一般都是在单路径路由(如DSR和AODV)的基础上扩展而来的。基于AODV进行改进得到的多路径路由算法有AOMDV[32]和AODV-BR[33]等。AOMDV对AODV进行了改进以得到多条路径,AODV-BR建立了一个网状结构以提供可替代的路由。基于DSR的多路径协议有MSR[34][35]和SMR[36],在MSR的基础上,[37][38]提出了另外一种多路径路由算法,称为RSR(Redundant Source Routing)专门探讨TCP在Ad hoc网络中的稳定性。除此之外还有很多关于多路径的研究[39][40]。多路径路由具有很多的优点,但另一方面维护多条路径需要更多的路由表空间和路由计算开销。但一些DSR的特性可以减少多路由这方面的缺点。首先,源路由非常灵活,信息可以按照指定任意路径转发,这使得分配负载到多条路径变得非常容易而不需要中间节点的路由选择计算。其次,按需源路由特性极大的减少了路由所需的存储空间。以上DSR的特性正是我们选取DSR作为多路径研究的原因。下面两节介绍两种在DSR基础上扩展的源路径多路由协议MSR和SMR。

3.4.1 多路径源路由 MSR(Multipath Source Routing Algorithm)

MSR(Multipath Source Routing Algorithm)是一种在 DSR 的基础上扩展的多路径源路由算法,它继承了 DSR 的优点,通过一种探测机制动态的获得每条路径的延迟信息,更新无效路径。同时在[41]中对如何在多路径上进行负载分配来获得最小延时作了一定的分析。然而 MSR 有一定的缺点,在负载分配时它假设多路径完全独立,而在路由发现时它并没有实现路径的完全独立,而只是试图找出一种最大的脱节多路径,同时也增加了计算复杂度。

MSR 的包转发和负载分配机制:

MSR 使用源路由, 因此中间节点除了按照包头中指定的路径转发数据包外不对数据包作任何处理。MSR 保留了 DSR 的路由发现机制, 每一个发现的路由被存储在路由缓存中并分配一个唯一的索引号, 源节点从路由缓存中选择出多路径。因此在路由发现机制上, MSR 对 DSR 未作任何改进, 只是源节点对 DSR 发现的多路径进行了选择。对于 MSR, 源节点必须完成负载分配的工作。在负载分配时, MSR 使用权重循环均衡策略 (weighted-round-robin), 根据每个路径的传输数据的能力, 给每个路径分配不同的权值, 使其能够接受相应的权值数的负载。在 MSR 中, 一个包含多路径信息的特殊的表被建立, 其结构如下:

```
struct mul_dest
{
    int index;
    ID Dest;
    float Delay;
    float Weight;
    ...
};
```

Dest 是一个路径的目的节点。Index 是在节点的路由缓存内具有同一个目的节点的路径的当前序列号。Delay 是当前的 RTT(Round-Trip Time)估计值。Weight 是一个负载分配权值, 是在一个路径上每次连续发送的数据包的数量。MSR 选用的权值计算公式为:

$$W_i^j = \min_j \left(\left[\frac{d_{\max}^j}{d_i^j} \right], U \right) * R \quad (3-11)$$

根据公式(3-11)选择加权系数 W_i^j (j 是指目标节点, i 是指通向 j 的第 i 条路径)。这里, d_{\max}^j 通向同一个目标节点 j 的所有路径中的最大延迟, d_i^j 是第 i 条路径的延迟, R 是控制着在路由路径之间调度切换频率的因子, R 值越大多路径之间的调度切换频率越低, 搜索和在路径表中定位路径所用的处理消耗越少。参数 U 是一个界值, 保证 W_i^j 的值不会太大。为了实现负载均衡, MSR 引入了探针机制, 探针机制也是 DSR 路由维护机制的一种加强措施, 在[42]中提到, 可以在数据包头中加入一个标志位, 使得节点可以发送数据包到下一跳节点来请求

一个显式的确认。但这种探针机制如只用来探测链路的有效性，并不是很高效的。因此，在 MSR 中，探针机制主要有两重作用：一是获得路径的延迟状态，即探测上述结构中的 Delay 值；二是获得活动路径的有效性。

3.4.2 分裂多路径路由算法 SMR(Split Multipath Routing)

SMR 采用与 DSR 相似的路由发现机制（通过 RREQ 和 RREP 的循环），但做了一些改进：当源节点需要发送数据到目的节点而没有源路由时，它用洪泛的方式发送路由请求包（RREQ），请求包通过不同的路径到达目的节点，目的节点根据所获得的路径选择最大脱节多路径并发送应答包 RREP 包到源节点。为了让目的节点获得从源节点到目的节点的尽量多的路径，中间节点缓存内不管有无到目的节点的路径都不允许发送 RREP 包。如果中间节点象 DSR 一样发送应答包到源节点，目的节点就不能获得中间节点所转发的路由信息，从而不能有效的选择出多路径给源节点。

中间节点对 RREQ 请求包的转发基于以下两点：

1. 中间节点转发第一次收到的 RREQ 包。
2. 中间节点转发以后收到的路径不同于第一条路径并且路径长度小于等于第一条路径的 RREQ 包。

这样目的节点收到的 RREQ 包中就包含了足够多的路径信息。其缺点就是这样会转发大量的 RREQ 包，造成较大的路由控制开销。

目的节点按照以下方法来应答源节点：

1. 最先到达目的节点的 RREQ 包（即最小延迟包）包含的路径作为第一条路径，目的节点接收到一个 RREQ 包后记录该路径并沿该路径反方向立即发送 RREP 包到源节点。这样可以最小化路由发现延时。
2. 处理完第一步后，目的节点等待一定的延时，在此期间内可获得多个 RREQ 包以获得多条路径。
3. 等待延时过后开始选择另一条跟第一条最大不相关的路径。若存在多条路径跟步骤 1 选择的路径最大不相关，选择跳数最少的一条。若仍然存在多条路径，选择最早到达目的节点的 RREQ 包包含的路径。
4. 目的节点沿步骤 3 选出的路径发送 RREP 包到源节点。

注意以上方法选择的两条多路径长度不一定相同。

SMR 负载分配:

在负载分配方面, SMR采用了简单的逐包发送的方法, 即在一条路径上发送一个数据包, 然后在另一条路径上发送下一个数据包, 如此循环。采用这种方式是因为在多种网络里其表现良好, 而其他一些负载分配方法需要获得网络参数如可用带宽等, 这在Ad hoc网络中较难实现, 而且源节点负载分配计算方法也比较复杂。如在[43]中, 提出在已得到多条路径, 并已知每条路径的失败率的前提下, 通过给每个数据包根据一个线性关系附加冗余信息, 然后根据每条路径的失败率, 将每个数据包拆分成小包到各条路径上, 以争取在目的节点可以重组原始信息的可能性最大。该算法要求实时得到每条路径的失败率, 这在Ad hoc网络中是比较难得到的。

SMR 路由维护:

路由维护方面路由出错包 RERR 的产生发送与 DSR 相同, 但源节点对待 RERR 包却有两种不同的处理策略:

1. 多路径中任何一条路径出错时, 发起一个新的路由请求 RREQ。
2. 多路径中所有路径都出错时才发起新的路由请求。

以上两种处理方法各有优点, 第一种方法能确保在数据传输过程中一直使用多路径传输, 缺点是比第二种方法使用较多的 RREQ 请求包, 但路由健壮性上要好。

第四章 基于 DSR 的多路径源路由协议的分析与改进

从以上介绍的多路由算法可以看出, 由于 DSR、AODV 等对 Ad hoc 网络的适应性, 目前 Ad hoc 网络中的多路由算法多数是对原有的单播算法, 特别是 DSR, AODV 算法的改进。在基于 DSR 基础上寻找多路由的很多算法是利用中间节点接收到的重复的 RREQ 来获得多路径信息, 但是在减少控制包, 多路径的稳定性方面值得研究和改进。本论文也主要是在这个方向做了较多的工作, 提出了一种新的基于 DSR 的独立多路径路由发现机制。

4.1 最优路径数目确定

在相关的多路路由文献中, 一般只是确定如何发现多路路由, 但是对路由的数目却没有明确的选择。实际上, 并不是路数越多效果会越好, 因为搜索到路径越多, 路由开销也会相应的增加, 因此路径数目的选择有个相对的最优值, 文中通过仿真来确定路由数目的最优值。

在多路路由中, 假设信源 S 和信宿 D 之间的路由, 其有 $k-1$ 个中间节点, 包含 k 条无线链路。设定 L_i 为路由中第 i 条链路。其生命值设为 X_{L_i} , 这里假设了 X_{L_i}

($i=1, 2, \dots, k-1$) 为独立同分布的指数变量, 设其概率密度为 $f(t) = \frac{1}{l} e^{-\frac{t}{l}}$,

其均值为 l 。只要整条路径中的任一链路发生中断, 则该条路由便失败了, 设该条路由的生命值为 P , 有 k 条无线链路组成, 随机变量 X_P 通过下式表示:

$$X_P = \min(X_{L_1}, X_{L_2}, \dots, X_{L_k}) \quad (4-1)$$

由概率知识, 可知道 X_P 也是为服从指数分布的一个随机变量 $f_{X_P}(t) = \frac{k}{l} e^{-\frac{kt}{l}}$, 其均值为 $\frac{l}{k}$ 。根据上述链路失败行为的假设, 下面把多路路由技术中两个路由发现过程的时间间隔作为统计量。

假设信源 S 到信宿 D 有 N 条路由。其中第一条记为 P_1 , 剩下的 $N-1$ 条分别记为 P_2, P_3, \dots, P_N , 路由 P_i 的长度记为 k_i , 设定一个随机变量 T , 在 T 时间之

后, 没有路由可用, 则

$$T = \max\{X_{P_1}, X_{P_2}, \dots, X_{P_N}\} \quad (4-2)$$

T 表示两个成功的路由发现之间的时间。考虑 N 个独立同分布的指数分布变量, $X_{P_1}, X_{P_2}, \dots, X_{P_N}$, 其中 X_{P_i} 的概率密度分布函数为:

$$f_{X_{P_i}}(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (\lambda_i = \frac{k_i}{l}, i=1, 2, \dots, N) \quad (4-3)$$

其中 k_i 为路径 P_i 的跳数, 即该路径无线链路的条数。由于 X_{P_i} 的分布是相互独立的。因此, T 的累积分布函数, $F_T(t)$ 的分布为:

$$\begin{aligned} F_T(t) &= P[T \leq t] \\ &= P[\max\{X_{P_1}, X_{P_2}, \dots, X_{P_N}\} \leq t] \\ &= P[(X_{P_1} \leq t) \cap (X_{P_2} \leq t) \cap \dots \cap (X_{P_N} \leq t)] \\ &= \prod_{i=1}^N F_{X_{P_i}}(t) \end{aligned} \quad (4-4)$$

由 (4-3) 式可得 $F_{X_{P_i}}(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$, 将其代入 (4-4) 中, 对 (4-4) 的两边同时对 t 求导, 由此便可以得到 T 的概率密度分布函数, 下面是其表达式:

$$\begin{aligned} f_T(t) &= \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t})(1 - e^{-\lambda_3 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_N t}) \\ &\quad + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_3 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_N t}) \\ &\quad \dots \\ &\quad + \lambda_N e^{-\lambda_N t} (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_{N-1} t}) \end{aligned} \quad (4-5)$$

根据 (4-5) 式, 来求 T 的期望值 $E(T)$

$$E(T) = \int_0^{+\infty} t f_T(t) dt \quad (4-6)$$

当然该值的结果同 λ_i 值相关, 即同 k_i 相关。例如当 $N = 2$, 可以求出 T 的期望值为:

$$E(T) = \int_0^{+\infty} t \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + t \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} (1 - e^{-\lambda_1 t}) dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2)}$$

下面我们对 $E(T)$ 进行计算分析, 考虑三种跳数比较有规律的情况下, 来考察路径的数目同路由发现时间的期望值 $E(T)$ 之间的关系, 然后通过实验来确定最优的路径数目。

➤ 情况1: 假设信源 S 和信宿 D 之间有 N 条路径, 且其路径的长度均相等。这是假设的“最好”的情况, N 条不相关最短路径存在于给定的信源信宿对之

间。即：

$$k_1 = k_2 = \dots k_N = k;$$

- 情况2：假设信源 S 和信宿 D 之间的 N 条路径，其长度是递增的，且每条路径的长度增1，设定最初的路径是最短的一条，即：

$$k_1 = k, k_2 = k + 1, \dots, k_N = k + N - 1;$$

- 情况3：假设信源 S 和信宿 D 之间的 N 条路径，其长度是递增的，且每条路径的长度增2，设定最初的路径是最短的一条，即：

$$k_1 = k, k_2 = k + 2, \dots, k_N = k + 2(N - 1);$$

由于 l 为常量，在实验过程中设定为1，设定最短路径长度 k 为3，取 N 值范围为1至7，实验结果如下图4.1所示：

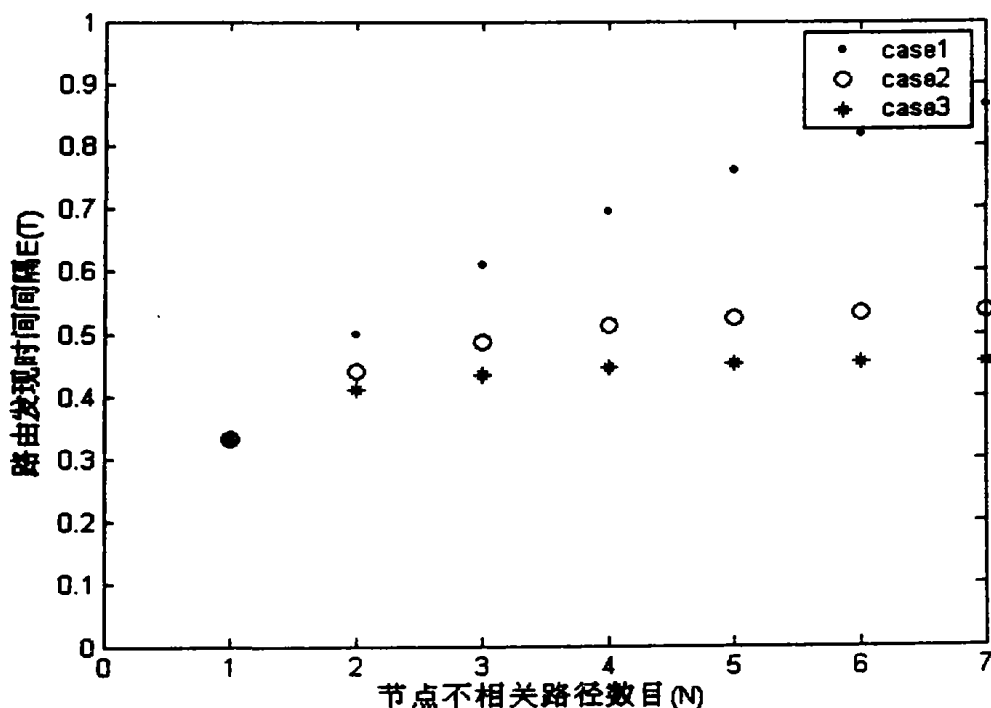


图4.1 实验结果

从图4.1中可以得出如下结论：

- ✧ 随着 N 值的增大，即随着多路路数的增加，路由发现的间隔时间 T 的期望值 $E(T)$ 也随着增加，而且所有 N 条不相关路径的长度即跳数相等的情况下，路由发现间隔时间的增长最明显；
- ✧ 但是，当 $N > 3$ 时，情况2和情况3的曲线可以看出，这种增长的趋势已经很缓慢，由于情况1比较具有特殊性，因此选取多路路由时，一般取3条就足够了。

✧ 结合实际情况，多路路由的数目还同节点的分布密度有着很大的关系。路径数目越多，自然搜索的难度也就上升。基于上述分析，从效率和开销折中考虑选取3条路径。

在其后对协议的实现中我们根据以上分析为参考，选取多路径条数为3。

4.2 SIMR 简单独立多路径算法的提出

当前很多对 Ad hoc 网络多路径的建模理论分析如[46][47][48]，尤其是针对负载分配，在多路径中实现最优化负载分配的一些研究，都是以独立多路径为模型分析的，因此一种独立多路径协议的实现就显得尤为重要了。而由于 Ad hoc 网络拓扑的未知性和动态性，寻找节点不相关的多路径路由且要有尽量小的开销，这并不是一件很容易的事情，通常寻找多路径与尽量小的路由开销是一对矛盾。本文在基于尽量小延迟与尽量小的路由开销的策略下寻找完全独立多路径，以此对 DSR 进行改进。

4.2.1 SIMR 路由发现

对于Ad hoc多路径路由要考虑以下两个问题：

- 1) 拓扑结构的获得，获得完整的网络拓扑结构或获得部分拓扑结构。
- 2) 如何从获得的拓扑结构中得到多路径（即多路径路由选择算法）。

当前的一些多路径算法都注重获得尽量多的网络拓扑信息如SMR，从而加大了RREQ包的转发数量。在完整的网络拓扑结构中选择多路径虽然能够选择出有效的多路径，但却增加了算法的复杂度，这对计算能力及能量有限的Ad hoc节点是一个不小的负担。

根据最小延时及路径稳定性方面的考虑，在DSR协议基础上提出的SIMR路由发现新方案过程如下：

通过按需路由的思想，当源节点需要发送数据而缓存内没有到目的节点的路径时，首先它广播一个路由请求，中间节点收到路由请求后转发此路由请求而不管它们有没有到目的节点的路由信息，也就是说即使中间节点有到目的节点的信息，该中间节点也不作出路由答复，随后收到的路由请求包将被丢弃。通过路由请求的扩散，目的节点会收到经过不同路径的路由请求，从而根据这些路由请求包提取出其中的路由信息，然后采用独立多路径算法从中选出所需的多条路径。

最后它将全部的路由信息封装，选择一条最短路径，通过反向路由向源节点作出路由应答。对DSR协议的改进体现在下面三点上：

- 1) 中间节点不管有无到目的节点的路由，都不应答请求包，只转发第一个收到的请求包。
- 2) 目的节点在收到第一个RREQ包后，产生RREP包发送给源节点。
- 3) 进行完上步后，目的节点等待其他的RREQ包，然后计算出其余的独立多路径，沿最短路径传给源节点。

根据第一点改进，通过目的点接收到的RREQ包我们可以得出类似如下结构的网络拓扑结构：

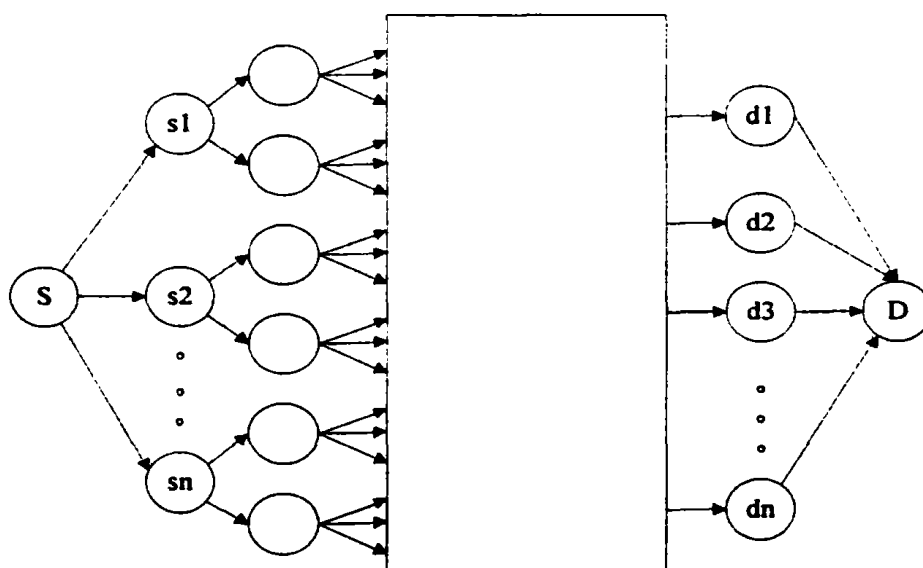


图 4.2 拓扑结构

如图4.2所示，源节点收到的RREQ包所包含的路径构成的拓扑图是发散的，也就是说除了目的地D节点以外，中间节点不可能出现如图4.3所示情况，即目的节点所接收的路径拓扑中，中间节点C不能有两个不同的输入路径。

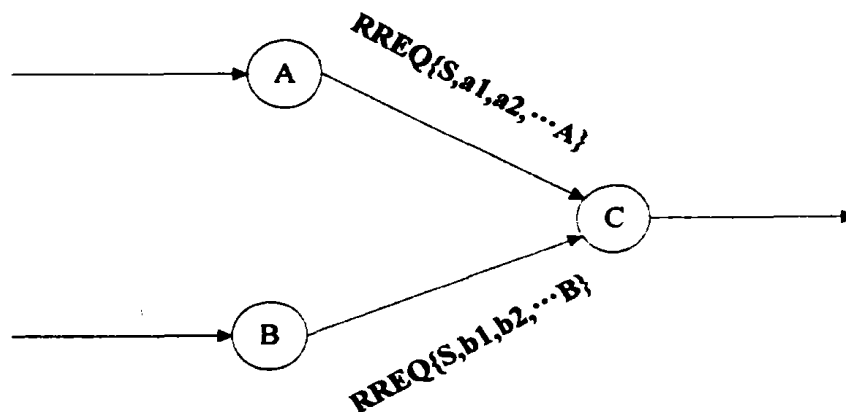


图 4.3

证明：假设目的节点最终收到的数据包中包含有这样两条路径信息：

$$\text{RREQ1 } \{S, a_1, a_2, \dots, A, C, \dots, D\}$$

$$\text{RREQ2 } \{S, b_1, b_2, \dots, B, C, \dots, D\}$$

这说明中间节点C先后转发了两个不同的RREQ包，这于我们改进的SIMR算法相冲突。所以通过中间节点C到达目的节点的路径应该是如图4.4所示：

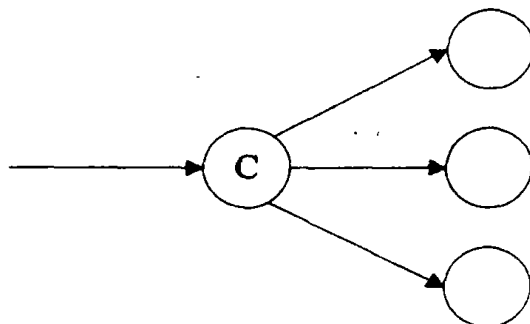


图 4.4

图4.4中经过节点C到达目的节点的3个RREQ包包含路径应如下：

$$\text{RREQ1 } \{S, a_1, a_2, \dots, C, d_1, d_2, d_3, \dots, D\}$$

$$\text{RREQ2 } \{S, a_1, a_2, \dots, C, e_1, e_2, e_3, \dots, D\}$$

$$\text{RREQ3 } \{S, a_1, a_2, \dots, C, f_1, f_2, f_3, \dots, D\}$$

中间节点C之前的路径是相同的，C之后到目的节点D之间的路径是不同的。

由以上分析我们还可得知，若目的节点D有n个直接相邻节点，则D最后最多只能收到n个RREQ包，在独立多路径前提下尽可能的减少了传递给目的节点的非独立路径，从而减轻了目的节点选择多路径的复杂度。

对目的节点对RREQ包的处理按以下操作：

目的节点收到第一个RREQ包，即从源节点到目的节点的最小延迟包后，为了减小源节点等待路由信息的延迟，立即发送第一个RREP包到源节点，此包包含第一个RREQ包的路径信息。然后设定一个等待时间 T ，同时设 N 为目的节点的邻居节点个数，在等待时间 T 内若接收到 N 条路径则结束等待，进行独立多路径的选择。目的节点的处理流程如图4.5所示：

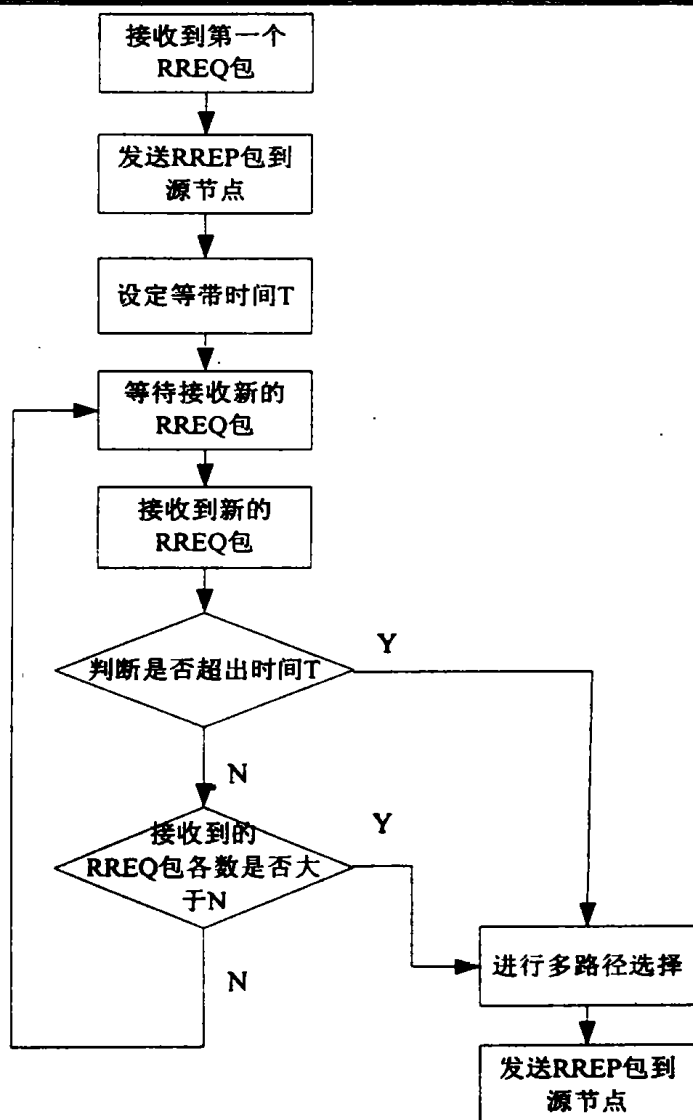


图4.5 目的节点处理流程

在SIMR中，由于存在多条路径，因此有些路径不是最短路径，这样DSR的自动路由缩短机制就会发送大量的路由主动应答分组（Gratuitous Route Reply）（见3.2.3节），占用大量的网络资源，因此在SIMR中我们取消了自动路由缩短机制这项功能。

4.2.2 SIMR 路由计算

路由计算就是指目的节点从所获得的网络拓扑信息来找到满足条件的多路径的过程。对于一般的独立多路径路由方案中，根据目的节点获得的路径信息可获得一个网络的大概拓扑结构，构成一个有向图 $G(V, E)$ ，其中 V 是图中顶点集合， E 是边的集合。对图中任意两点 S （源节点）和 D （目的节点），按照一定的参考标准在 S 和 D 之间寻找一个可行的完全独立多条路径集合 MP_0 （各路径之

间完全独立，即不包含相同的中间节点和链路)。具体采用如下方法来进行独立多路径的筛选。

假设我们需要在源节点 s 和目的节点 d 之间寻找一种独立多路径，可设为 MP_0 ，满足：

- $num(MP_0) \leq Path_{max}$ ； $Path_{max}$ 为设定的最大路径数（所有路径总和的上限），防止路径数过多；
- $hops(P) \leq Hops_{max}$ ； $Hops_{max}$ 为设定的跳数上限（每条路径的跳数上限），用来限制一些冗余路径；
- 任意路径 p_i 与 p_j 完全独立；

算法步骤如下：

初始化：

- 1) $MP_0 = \Phi$ ；
- 2) $Path_{max} = m$ ；
- 3) $Hops_{max} = n$ ；
- 4) $num(MP_0) = 0$ ；

在仿真实验中我们取 $m=3$ ， $n=7$ （见 4.1 节，最优路径数目确定）。

路径计算：

- 5) 得到当前的网络信息，构成有向图 $G(V, E)$ ；
- 6) 通过 Dijkstra 算法从有向图 G 寻找从 s 到 d 的最短路径；
- 7) 如果找到一条从 s 到 d 的最短路径，记做 P ，判断 $hops(P) \leq Hops_{max}$ 是否成立，若成立执行 $MP_0 = MP_0 \cup \{P\}$ ， $num(MP_0) = num(MP_0) + 1$ ，否则跳出；
- 8) 判断 $num(MP_0) \leq Path_{max}$ ，是否成立，若成立则继续执行，否则跳出；
- 9) 从图 G 中删除 P 的中间节点及与中间节点相关的链路，然后转到步骤 6；

通过以上路由计算方法，目的节点能够准确的找出所需的完全独立多路径。

但以上方法过于复杂，当独立路径数量较多时会耗费较多的时间造成路由发现延时过大。由于本文采用一种新的独立多路径的发现方法。所以在路由计算方面可以做一些改进。

由于目的节点最终收到的 RREQ 包所包含的路径是如下格式的并且都是独立多路径:

RREQ1 {S,a1,a2,...C,d1,d2,d3,...D}

RREQ2 {S,a1,a2,...C,e1,e2,e3,...D}

RREQ3 {S,a1,a2,...C,f1,f2,f3,...D}

因此我们可以使用下面的算法选择多路径:

设目的节点选择的独立多路径组合为 MP_0 , 满足:

- $num(MP_0) \leq Path_{max}$
- $hops(P) \leq Hops_{max}$
- p_i 与 p_j 完全独立

设目的节点收到的由 $S \rightarrow D$ 的路径集合为 S 。

初始化:

$MP_0 = \Phi$; $Path_{max} = m$; $Hops_{max} = n$; $num(MP_0) = 1$;

因为目的节点已经发送了一条最短路径, 所以初始化 $num(MP_0) = 1$ 。

路由计算:

- 1) 从路径集合 S 中找到具有最短相同跳数的一组路径, 设其为集合 T , 跳数为 n ;
 - 2) 若 $n > Hops_{max}$, 跳出, 完成独立多路径的选择计算, 否则进行下一步;
 - 3) 从 T 中选择一个最先到达目的节点 D 的路径作为一个最短路径记作 P ,
令 $num(MP_0) = num(MP_0) + 1$, $MP_0 = MP_0 \cup \{P\}$;
 - 4) 如果 $num(MP_0) > Path_{max}$, 跳出, 完成独立多路径的选择计算, 否则把集合 T 从 S 中删除, 进行下一步;
 - 5) 判断集合 S 中是否仍有路径, 若有跳转到步骤 (1), 否则结束;
- 其流程图如 4.6 所示。

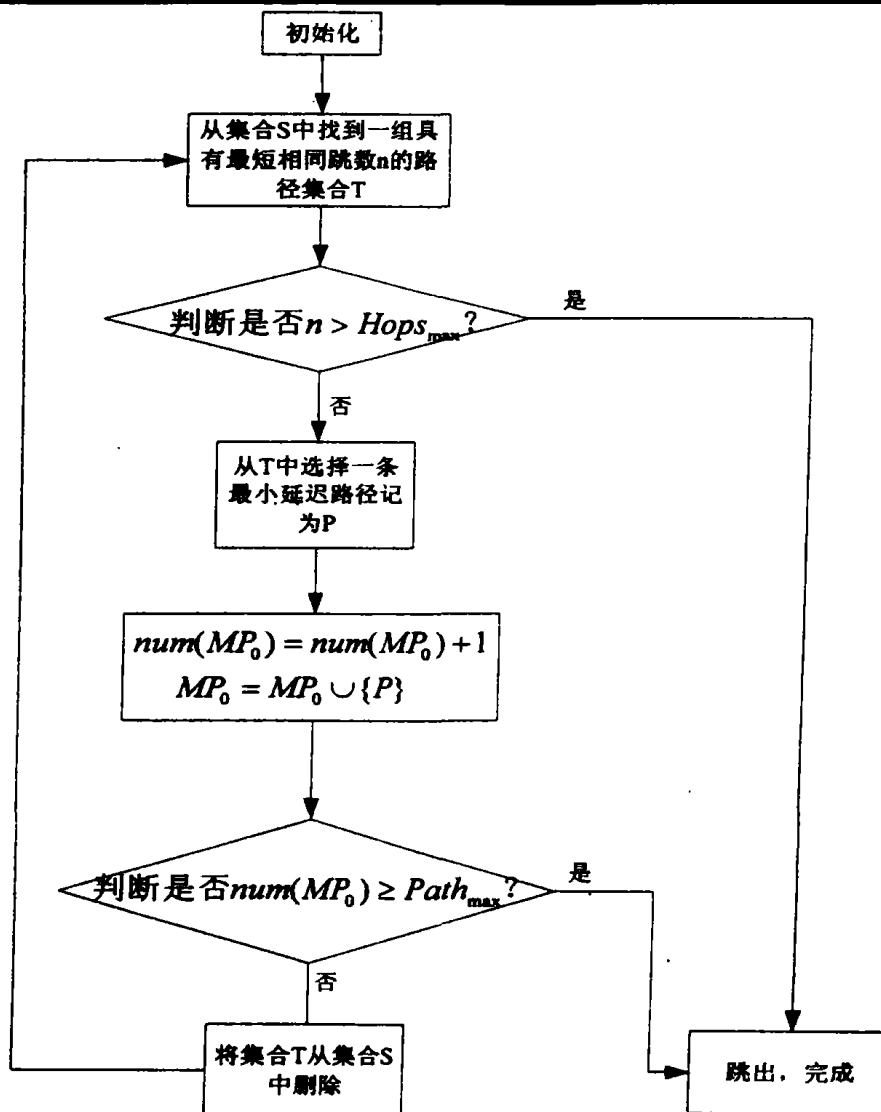


图 4.6 路由选择计算

以上路由选择算法省却了使用 Dijkstra 算法从有向图中选择最短路径的方法, 而且由于目的节点最多只从 n 条路径中选取独立多路径 (n 为目的节点的邻居节点个数), n 通常要远小于其他非独立多路径算法目的节点所获得的多路径数, 从而比基于有向图的多路径选择算法更易实现和快捷。

4.2.3 SIMR 业务分配策略

在找到多条路径之后, 如何将数据分组以更加有效的方式分配到路径中去, 充分利用网络资源, 这就是业务分配问题, 是整个系统中很重要的一个问题, 目的是为了在发生路径失败时能够提高对数据的保护, 同时提高网络的数据分发的效率。业务分配策略也就是处理数据如何在路径上分发的的问题:

当信源节点确定了到信宿节点的一系列路径之后, 便要开始向这些路径分发

数据。在业务分配中, 分配粒度(Allocation Granularity) [49]的选择是很重要的。分配粒度即规定分配每条路径上的最小信息单元。常用的分配粒度有三种:

一、每连接分配粒度 (Per-connections)

即对于某个连接, 其所有的业务都只分配给一条路径, 这是一种粗粒度分配, 对于传统的语音等业务, 在比较稳定的路径和负载相对较小的情况下, 还比较适合。但是在大数据量以及分组网络中, 这种分配的粒度太粗, 缺点很明显: 首先, 由于每个连接的数据流速率变化范围很宽, 它很难确保业务均匀的分配到多条路径中; 而且, 在这样的分配粒度下, 网络资源利用的效率取决于连接的相对周期值。尤其是对于Ad hoc这种移动性很强, 网络环境比较复杂的情况, 这种分配粒度是不足取的。

二、每流分配粒度 (Per-flow)

即对于每条路径, 路径上的最小信息单元为流, 所有属于同一数据流的分组都往相同路径上传。如果网络上的业务以流媒体为主, 其业务由许多相对弹性的数据流组成, 则这种分配粒度比较适合。虽然流水平的分配粒度要大于包水平, 但是流水水平的业务分配其最大的好处是可以降低接收端的无序现象。这正是包水平分配粒度所要解决的问题。

三、每包分配粒度 (Per-packet)

即所要处理的最小的信息单元为包。同上述两种分配粒度相比, 包水平的分配粒度的适用性更广, 对于大多数的数据网络均适用。尤其对于Ad hoc网络, 由于其较强的移动性和不稳定性, 因此较小的分配粒度更能适应这种网络不确定性。能以更加平滑的方式来输出数据。虽然每包分配粒度在接收端的数据分组会出现次序混乱的问题, 需要进行分组重构, 但是这可以通过分集编码(Diversity coding) [50]的方法给予解决。

在SIMR中我们采用比较简单的包分配粒度, 虽然包分配粒度(per-packet allocation)会出现乱序或重新排序问题, 但它在很多网络中却表现出良好的性能[49], 最重要的是其他的业务分配方式往往需要获得网络的一些实时信息如可获得带宽等, 这在网络拓扑变化快的Ad hoc网络中比较难获得。

具体在各个路径上的负载分配, 我们参考MSR的负载分配策略, 根据每个路径的传输数据的能力, 给每个路径分配不同的权值, 使其能够接受相应的权值数的负载。其权值计算公式如下, 公式意义在3.4.1节中已作过阐述。

$$W_i^j = \min_j \left(\left[\frac{d_{\max}^j}{d_i^j} \right], U \right) * R$$

在MSR中, 使用探针机制来获得RTT(环路延时)值, 但是由于SIMR在目的节点计算选择多路径, 除第一个最小延迟路径外, 其余一起由信宿节点返回源节点, 因此, 在权值分配公式中, 用于计算 d_i^j 的RTT(环路延时)值不是用信源产生RREQ到收到对应RREP包的时间差值, 而是采用目的节点接收到的RREQ包的时间值, 即用从源节点到目的节点的单向延时来代替整个环路延时。

假设要发送的某一个分组数据量为 X , 并且信源信宿之间有 n 条可用路径来传输分组。根据上文, 搜索到的 n 条路径均是节点不相关的, 即是相互独立的。每个路径要发送的数据量为:

$$x_i = \frac{W_i^j}{\sum_i W_i^j} \times X \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

其中 x_i 即为第 i 条路径所要发送的数据量。

4.2.4 SIMR 路由维护

路由维护采用与DSR相同的方法。通过将路由信息存在缓存中, 中间节点不需要维护路由信息, 源节点只有在没有可用的路径时才能进行新的路由发现, 并不是只要有路径断裂就重新发起新路由。

4.2.5 SIMR 协议问题分析

我们对DSR协议中间节点转发数据包策略的修改, 容易出现路径重叠问题, 使得我们不能有效的获得多条独立多路径。路径重叠问题如图4.7所示。目的节点D总共收到三条都经过中间节点C的路径。这样按照SIMR多路径选择算法, 只能求得一条多路径。下图所示情形容易出现在节点密度疏散的情况下。所以我们在SIMR的仿真实验中, 分别在节点密度较大和较小两种情况下进行分析。

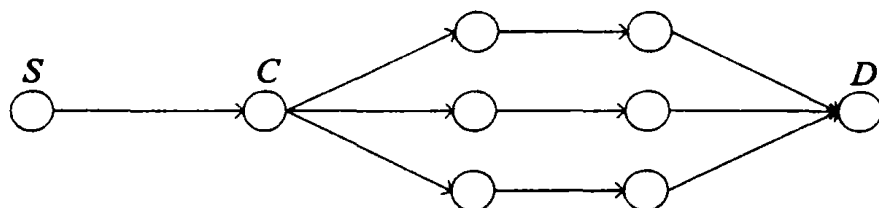


图 4.7 路径重叠问题

一般的多路径路由选择算法通过中间节点转发多个 RREQ 包来解决上图出现的路径重叠问题如 SMR 协议,但这也造成了 RREQ 包的传播过多,而且就节点独立多路径来说,在节点密度大的情况下,中间节点没有转发多个 RREQ 包的必要,这将在 4.3 章节的仿真结果中可以看出。

4.3 仿真实验及结果分析

4.3.1 NS 仿真模型

本文使用 NS2 仿真工具进行 Ad hoc 网络的模拟仿真。NS 是一个事件驱动 (event-driven) 的网络仿真软件,用于网络研究领域。它的仿真引擎具有可扩展性,用 C++ 编写。同时又使用了美国麻省理工学院的对象工具命令语言 (Object Tool Command Language, OTcl) 语言作为仿真程序的命令与配置借口。OTcl 语言是 Tcl (Tool Command Language) 语言的面向对象的版本。

NS 最初并不包含对无线网络的仿真功能,1998 年卡内基梅隆大学 (Carnegie Mellon University, CMU) 对其进行了扩展,增加了仿真无线网络的功能 [51]。CMU 对 NS 的扩展为仿真的物理层、链路层和网络层提供了新元件 (element)。如物理层的无线电传播模式 (radio propagation mode)、全向天线 (omni-directional antenna)、共享介质的网络接口 (shared media network interface), 数据链路层的 IEEE 802.11 (Distributed Coordination Function, DCF) MAC 协议、载波侦听多路接入 (carrier-sense multiple access, CSMA) MAC 协议、无线地址解析协议 (Address Resolution Protocol, ARP), 网络层的无线路由协议。此外还有专门用于生成随机脚本 (scenario) 的软件,脚本规定了移动节点的数量、移动和静止频率、移动速度、移动方向等。使用这些新元件,可以对无线子网、无线 LAN 或者 Ad hoc 无线网络进行细致精确的仿真。

1) 节点模型

在仿真环境中,网络的每个点都是一个独立实体,在平面运动,其位置和速度依时间变化,节点模型如图 4.8 所示,每个节点通过网络接口与公共信道相连 (公共信道代表一种频率或编码),可将每个分组送达网络中所有的点,网络接口根据传播模型判断它是否真的可以接收到该分组。

物理层定义了无线信道参数,这里的传播模型采用自由空间模型和 “Two

Ray Ground Reflection”模型相结合的方式对真实环境中无线传播作一种近似描述，近距离采用自由空间衰减 $\frac{1}{r^2}$ ，远距离采用两射线自由反射模式(Two Ray Ground Reflection)衰减 $\frac{1}{r^4}$ ；天线为全向天线；网络接口模拟了Lucent的WaveLAN直接序列扩频(DSSS)无线接口，通常传输速率为2Mb/s，通信距离为250米。

链路层采用IEEE 802.11 DCF作为MAC协议，802.11 DCF在相邻接点间进行单播(unicast)数据传输时，采用请求发送/清除发送(Ready To Send/Clear To Send, RTS/CTS)控制报文进行控制，数据正确接收后给出确认，即RTS/CTS/data/ACK的通信方式，这是一种虚拟的载波感应方式，以此来消除“隐藏终端问题”。数据广播仅使用物理的载波感应，不使用RTS/CTS，也不需要应答。ARP地址解析协议被用来解决IP地址到MAC地址的映射问题。

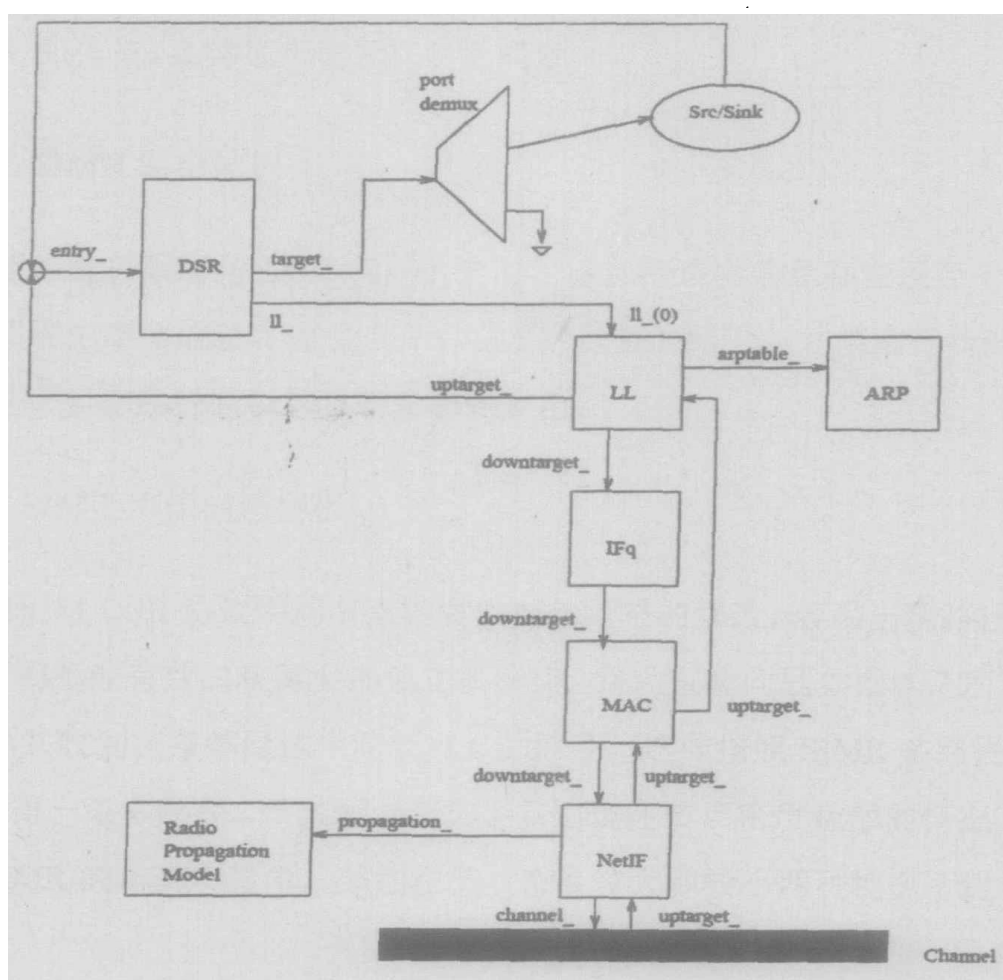


图4.8 NS中移动节点模型

2) 运动模型

节点的运动采用“Random Waypoint”模型，它的两个特征参数是暂停时间

(pause time)和节点最大运动速度(max_speed)。节点随机分布在一个给定的范围内,仿真开始后每个节点静止pause time秒,然后在限定范围内随机选取一个目的点,以0~max_speed之间某一个固定速度向目的点运动,到达后静止pause time秒,再次随机选取一个目的点,以同样的方式选取一个速度前进,如此周而复始,直至仿真结束。

3) 通信模型

实际应用中通常采用“传输控制协议”(Transport Control Protocol, TCP)作为传输协议,然而TCP的窗口机制可依据网络的负荷调整流量,造成同一个分组的发送时间和发送地点会因协议的不同而不同。为便于比较,这里选用“恒定比特流”(Constant Bit Rate, CBR)作为数据源,以“用户数据报协议”(User Datagram Protocol, UDP)方式进行传输。网络的负载通过调整通信数据源数量和分组的发送频率及大小决定。

4) 队列模型

这里队列包括网络层队列和链路层队列(即图4.8中的IFq),网络层的队列因算法的不同而选用不同的队列:链路层统一采用先入先出(First In First Out, FIFO)队列,最大为50个分组,路由分组在该队列中具有最高优先级,它会排在排队的其它分组前面发送。

4.3.2 统计参量的确定

在仿真中我们选择三个统计参量:端到端平均延时、数据包的传输率、路由协议开销。

一、端到端平均延时

平均端到端的延时是将所有从源节点到目的节点的包的延时进行平均。这其中包括列队时延和传播时延。

二、数据包的传输率

包的传输率是目的节点正确接收到的数据包的个数与源节点发送的数据包个数之比。

三、路由协议开销(控制包开销)

控制包是指路由协议产生的数据包(包括 RREQ, RREP, RERR 等),路由协议开销即整个数据传输过程中产生的控制包与全部数据包(数据包与路由协议

控制包) 的比。该统计量反应了网络协议的效率及对网络拥塞的影响。

4.3.3 仿真场景介绍

由于多路径路由相对于单路路由而言, 其发现的难度会增加, 另外我们的方案中需要发现的多路径路由类型为节点不相关类型, 从理论上分析在网络分布密度相对较大的场景下, SIMR 才会体现出较好的仿真结果。同时在 4.2.5 节中讲到, SIMR 算法在网络节点分布密度相对较低的场景下, 可能会出现路径重叠现象。因此我们的仿真分为节点高密度分布和节点低密度分布两种情况。

我们定义仿真场景如下:

- 仿真区域: 1000m×1000m 的正方形区域;
- 仿真节点: 节点分布高密度下, 50 个随机分布的节点组成无线 Ad hoc 网络。低密度分布下, 20 个随机分布的节点组成 Ad hoc 网络;
- 节点范围: 设定每个节点的传输功率覆盖范围为半径 250 米的圆形区域;
- 跳数限制: 在仿真中我们对大跳数作了限制, 设定最大跳数为 7。这是处于两个考虑, 一是超过 7 跳的路径其性能很差; 另外是为了避免搜索过程的长时间循环。

在我们的仿真中, 信道带宽是 2Mb/s, 仿真时间是 500 秒, 使用 IEEE 802.11 的 DCF 作为媒体接入控制协议。业务模型是固定比特速率业务 (CBR, Constant Bit Rate)。在网络中随机选取源节点与目的节点对, 其中的业务速率为每秒一个数据包。每个包的大小为 512 比特。节点在 0 到 20 米/秒随机选取一个速度运动。当这个节点到达目的地点后将停留一个休息时间, 然后再次运动。我们将休息时间设定为从 0 到 500 秒, 以考察不同的移动性对性能的影响。休息时间为 0 意味着不间断的运动, 休息时间为 500 秒意味着静止。

在 NS 中需要两个场景文件, 节点运动场景 (node movement scenario) 设计和网络流量场景 (traffic scenario) 设计。我们使用 ns 提供的两个场景生成文件 cbrgen.tcl 和 setdest 文件来生成这两个场景。

4.3.4 仿真数据比较分析

在 NS 中我们对 SIMR 和普通 DSR 多路径协议进行仿真比较。

一、节点高密度分布仿真:

节点高密度分布仿真中我们在 50 个节点中产生 40 个业务连接(流量场景)。业务类型为 cbr，节点每秒产生一个数据包，业务场景用下面代码生成：

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 50 -seed 1.0 -mc 40 -rate 1.0 > cbr-50-test
```

用 setdest 来产生若干个节点的运动场景文件，每个场景文件中节点运动速度为 0-20m/s，停顿时间分别为 0 秒（不停止），50 秒，100 秒，150 秒，200 秒，300 秒，400 秒，500 秒（停止，不运动）。场景产生脚本代码如下：

```
set outdir=mysetdest
set maxspeed=20
set numnodes=50
set maxx=1000
set maxy=1000
set simtime=500
foreach pt(0 50 100 150 200 300 400 500)
foreach scen (0 1 2)
time ./setdest -v 1 -n $numnodes -p $pt -M $maxspeed -t $simtime \
    -x $maxx -y $maxy \
    > $outdir/scen-{$maxx}x{$maxy}-{$numnodes}-{$pt}-{$maxspeed}-{$scen}
end
end
```

我们对 DSR 和 SIMR 分别进行仿真，并把仿真结果从数据发送率、平均时延、路由开销方面进行比较，具体比较数据图形如下：

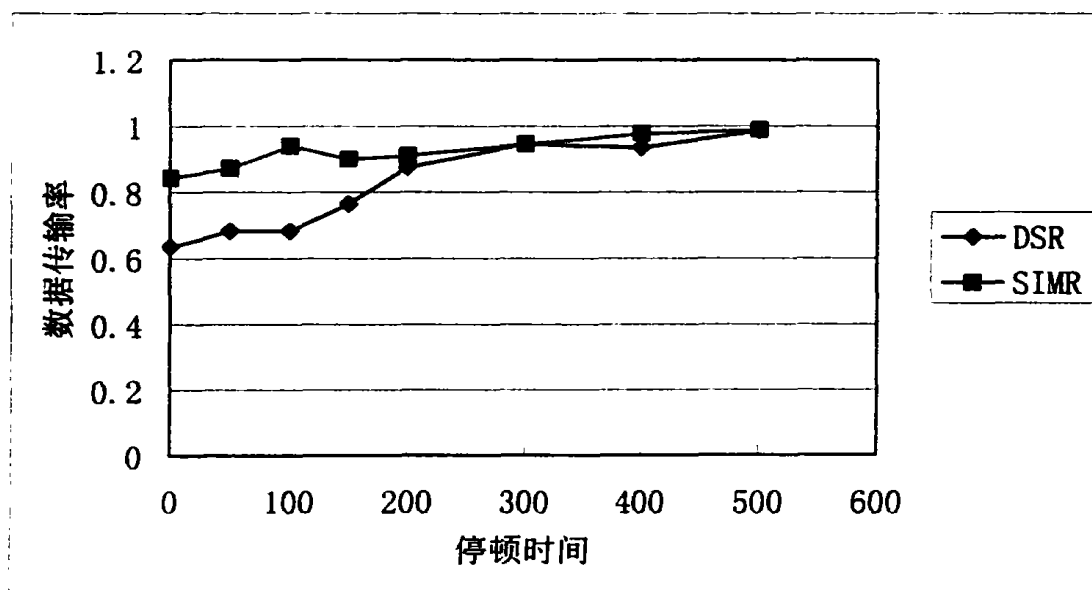


图 4.9 数据传输率

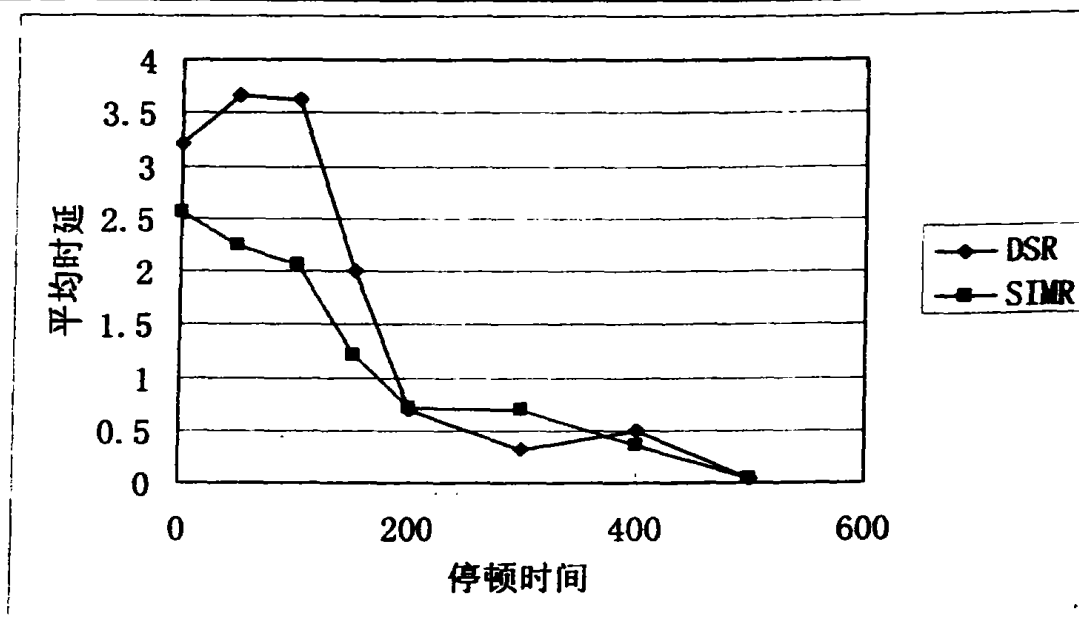


图 4.10 平均时延

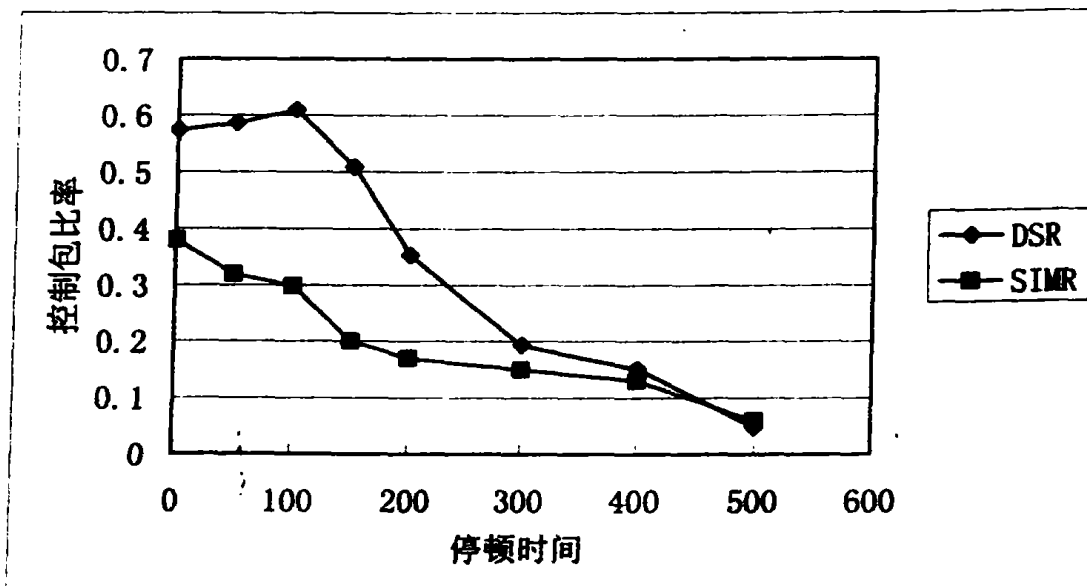


图 4.11 路由控制包开销

通过数据比较我们可以看出，在节点密度大的网络环境下，SIMR 协议在网络拓扑变化较快（节点停顿时间较短）时，SIMR 协议性能表现要比普通 DSR 多路径好。图 4.9 显示的是两个协议在不同停顿时间的情况下数据包的发送率，从图中看出 SIMR 优于普通 DSR 多路径，在网络移动性提高的情况下（节点暂停时间减少的情况下），DSR 的多路径是非独立多路径，很多路径由中间节点缓存得到，往往过时、失效，源节点需要耗费时间重新路由，从而导致普通 DSR 多路径协议产生丢包。而且由于非独立多路径的原因，一个节点的移动往往引起多条路径的断裂，而 DSR 在尝试所有路径后再重新发起路由，这使得重新路由

间隔时间较长，产生的延迟较大，结果如图 4.10 所示。SIMR 多路径是一种完全独立的，它的稳定性要好，从而在高移动性的情况下，它的表现要优于普通 DSR 多路径。由于 DSR 的中间节点只转发一个最先到达的 RREQ 包，极大的减少了 RREQ 包的传播，而且在高移动性的情况下，DSR 多路径的重新路由比 SIMR 要频繁，所以在高移动环境下，如图 4.11 所示，SIMR 的路由开销要小于 DSR 多路径。

以上数据图形都是对每个仿真场景求平均的结果。下面来单独看一下在高密度、节点移动性高（50 个节点，节点停顿时间为零，即节点一直保持运动）场景下的实时延时仿真数据图形。我们使用 tracegraph 工具对 ns 仿真形成的数据文件进行图形分析，结果如下图 4.12，4.13 所示。

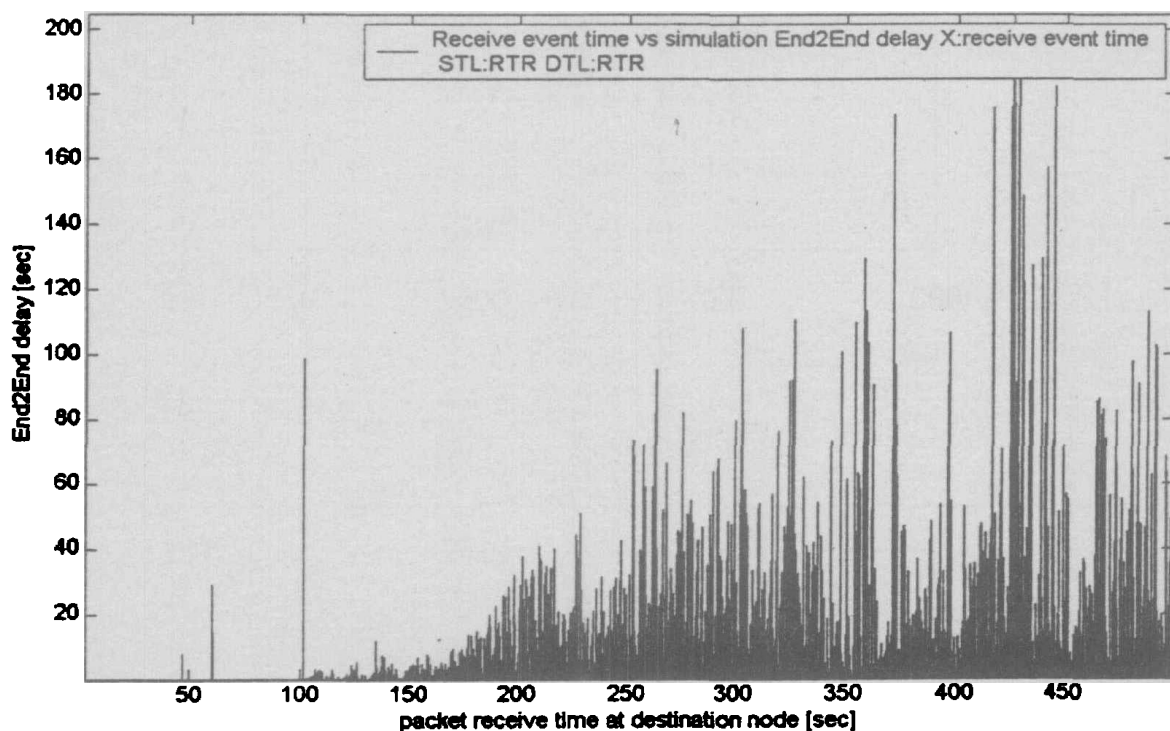


图 4.12 DSR 多路径延时

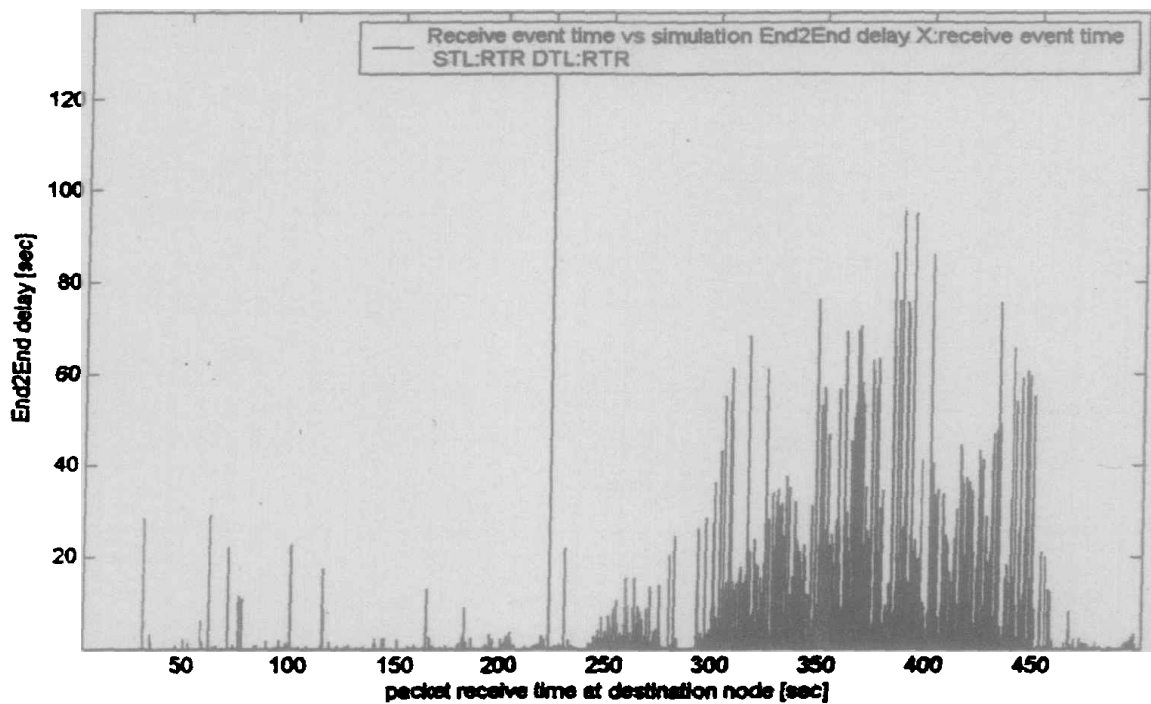


图 4.13 SIMR 独立多路径延时

图 4.12, 4.13 对两种协议的仿真使用同样的流量文件和运动场景文件。从图形中我们可以看出在仿真的 500 秒内, SIMR 在大部分时间内的实时延迟都要小于 DSR。从而证明 SIMR 在动态拓扑结构变化快的网络中较 DSR 多路径表现优异。

二、节点低密度分布仿真

节点低密度分布仿真中我们在 20 个节点中产生 10 个业务连接(流量场景)。业务类型为 cbr, 节点每秒产生一个数据包。业务场景用下面代码生成。

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 20 -seed 1.0 -mc 10 -rate 1.0 > cbr-20-test
```

用 setdest 来产生若干个节点的运动场景文件, 每个场景文件中节点运动速度为 0-20m/s, 停顿时间分别为 0 秒(不停止), 25 秒, 50 秒, 75 秒, 100 秒, 125 秒, 150 秒, 200 秒, 250 秒, 300 秒, 400 秒, 500 秒(停止, 不运动)。场景产生脚本代码如下:

```
set outdir=mysetdest
set maxspeed=20
set numnodes=20
set maxx=1000
set maxy=1000
```

```

set simtime=500
foreach pt(0 25 50 75 100 125 150 175 200 250 300 400 500)
foreach scen (0 1 2)
time ./setdest -v 1 -n $numnodes -p $pt -M $maxspeed -t $simtime \
    -x $maxx -y $maxy \
    > $outdir/scen-{$maxx}x{$maxy}-{$numnodes}-{$pt}-{$maxspeed}-{$scen}
end
end

```

仿真结果图形如下：

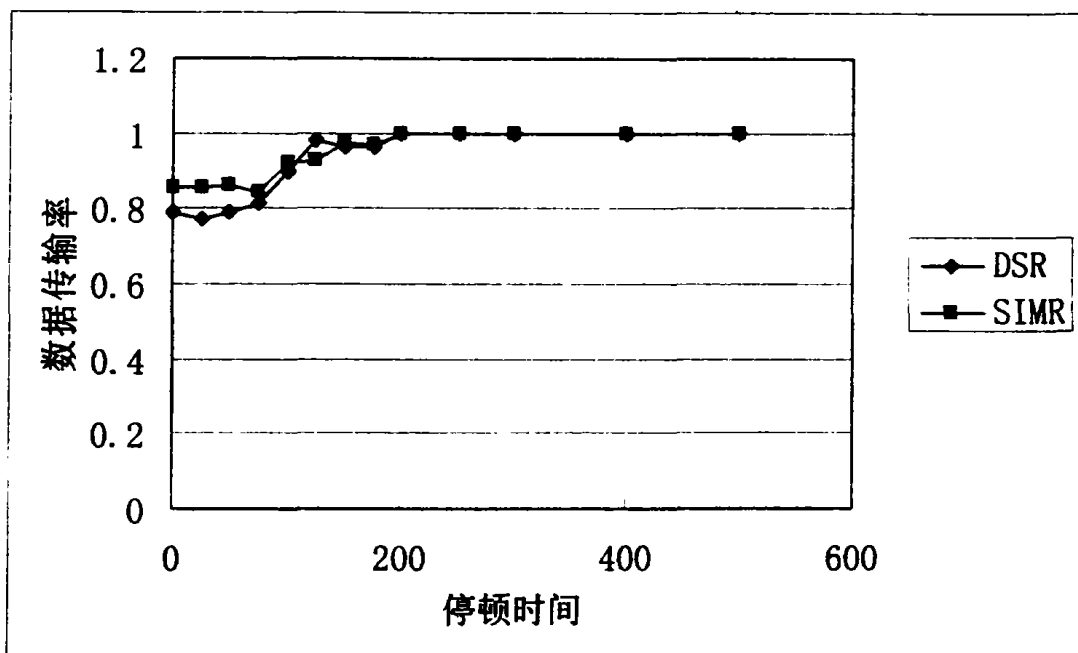


图 4.14 数据传输率

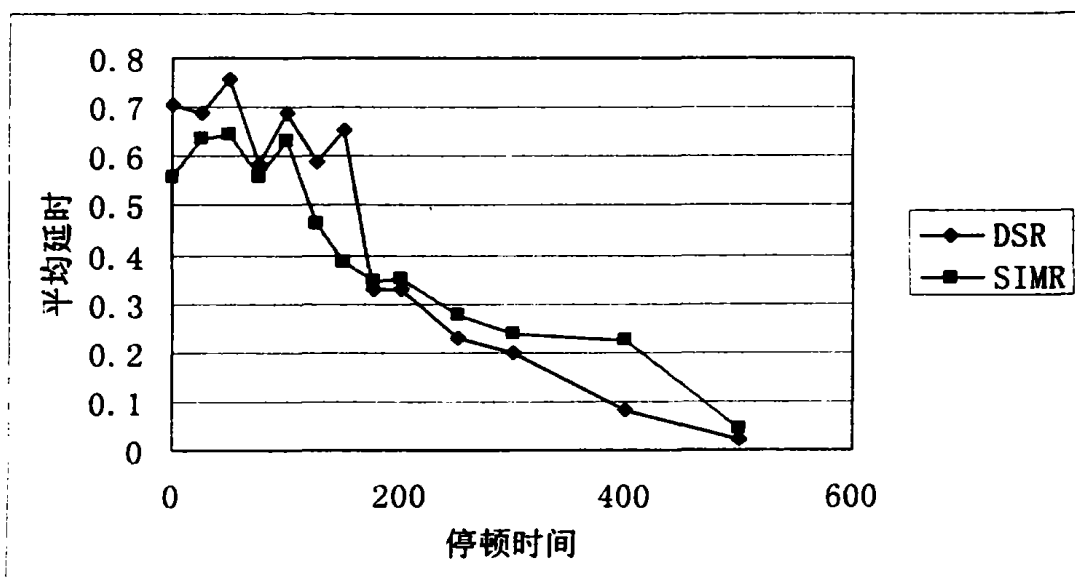


图 4.15 平均延时

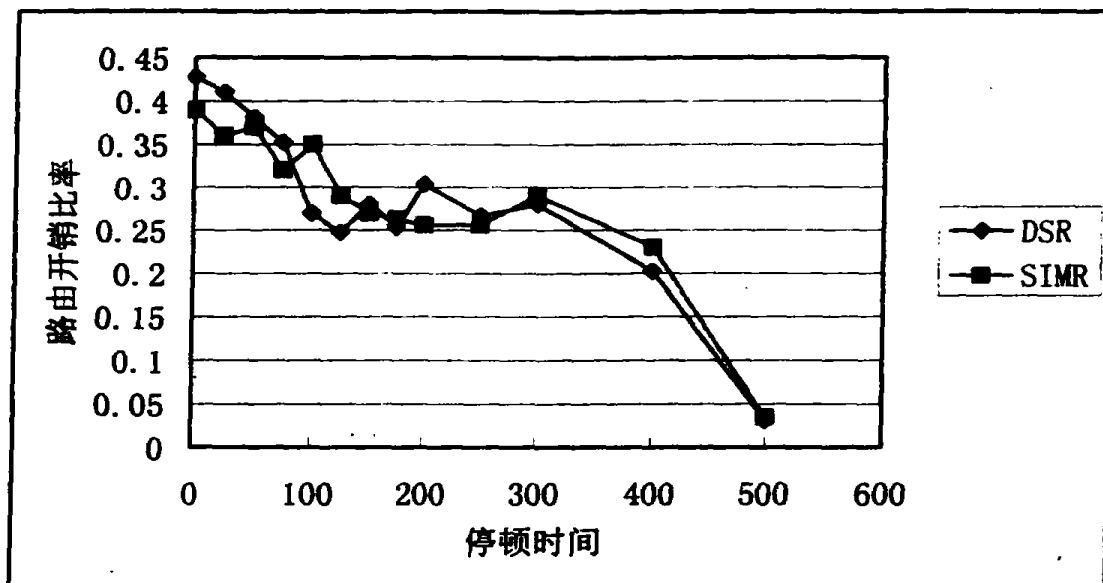


图 4.16 路由控制包开销

在节点分布密度较低的情况下，由于 SIMR 要选取独立多路径，这在有些情况下有时会形成只有一条路径的情况。从而在性能方面表现不如在高节点密度下的优异。如图 4.14 所示在节点停顿时间大于 100 秒后，SIMR 和 DSR 多路径都有很高的数据传输率，而停顿时间小于 100 秒时，SIMR 略优于 DSR。在平均时延方面，如图 4.15 所示当停顿时间大于 200 秒时，由于网路拓扑结构变化缓慢，DSR 非独立多路径由于某个节点移动而引起多条路径断裂的劣势就不是那么明显，从而 DSR 多路径在时延方面表现略优于 SIMR。在路由协议控制开销方面当网络变化缓慢（节点停顿时间较长时），由于 DSR 普通多路径维护的路径比 SIMR 要多，一条路径出错后，可供选择的其它路径多，所以在路由开销方面较 SIMR 略好一些。

通过对 SIMR 和 DSR 多路径在节点密度高和节点密度低的两种场景下的仿真我们可以看出，在高密度，网络拓扑变化快的条件下，SIMR 的性能要远好于 DSR 多路径。而在节点密度低，网络拓扑变化较慢的条件下，SIMR 仍能保持与 DSR 多路径相当的性能。

第五章 结论与展望

5.1 论文总结

本文在介绍分析Ad hoc网络特性,路由算法的基础上,提出了一种简单获取独立多路径的路由算法(SIMR),建立并利用多条完全独立路径。在我们的算法中,针对在以往源路由算法中源节点获得的多路径由于相关性而不够稳定的特点,提出了一种获得独立多路径的机制,并对节点如何对独立多路径的选取及处理作了分析。在SIMR,中间节点由于只转发一个路由请求包(RREQ),从而极大的减少了RREQ包在网络中的传播数量,降低了资源的消耗。从仿真结果可以看出新的路由策略在节点密度高,高移动性的条件下提高了数据包的传输率和降低了网络的平均延时。

5.2 下一步工作

SIMR 算法对路由发现过程及路由选择过程在 DSR 的基础上进行了改进,但所作的研究仍需进一步的深入和完善:

1. 在网络节点低密度下如何保持更好的性能值得进一步的研究。
2. 在得到多路径后,如何在多路径上有效的分配业务,以提供QoS保证,为不同的服务质量要求提供不同的路径,有待于进一步的研究。
3. 可以加入机制来获得每条路径的稳定时间、链路带宽资源等来更好的分配业务,提供QoS保证。

由于作者水平有限,论文中难免有错误和不妥之处,诚恳希望各位专家和学者不吝赐教,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1]徐彬辉,周克琴,“Ad hoc网络组网研究”, CHINA DATA COMMUNICATIONS, Jul. 2002, pp:66-70
- [2]张筱,张光昭,“无线特定网络—Ad hoc网络”, 广东通信技术, 2001年9月第21卷, pp:6-10
- [3] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std 802.11-Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 1999 edition
- [4] IETF, available via website <http://www.ietf.org>
- [5] MANET, available via website <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [6]S.Chakrabarti and A.Mishra, “QoS Issues in Ad Hoc Wireless Networks”, IEEE Communications Magazine, Feb.2001, pp:142-148
- [7] V.Bharghavan, A.Demers, S.Shenker, L.Zhang, Macaw. “A media access protocol for wireless LANs”, In ARRL/CARL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf. pp: 134-140, 1990
- [8]IEEE STD 802.11, WirelessLAN medium access control (MAC) and physically layer (PHY) specifications, 1999
- [9]Zhou L. D., Zrgmunt J. H., “Securing Ad hoc Networks”, IEEE Network, 1999. Volume: 13, Issue: 6, Nov.-Dec. pp:24-30
- [10]C.Hedrick, “Routing Information Protocol”, RFC 1058, June 1988
- [11]J. Moy, “OSPF specification,” RFC 1131, Oct. 1989
- [12]Elizabeth M. Royer, “A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks”, IEEE Personal Communications, April 1999, pp: 44-55
- [13]王金龙,王呈贵,吴启晖,龚玉萍. “Ad Hoc移动无线网络”. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [14] A.Iwata. “Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Ad Hoc Networks, August 1999
- [15]S.Murthy and J.J.Garcia-Luna-Aceves, “An Efficient Routing Protocol for

- Wireless Networks", ACM Mobile Networks and App.J., Special Issue on Routing in Mobile Communication Networks, Oct. 1996, pp:183-197
- [16] C.E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", comp.commun. Rev., Oct. 1994, pp.234-44
- [17] Tsu-Wei Chen and Gerla, M. "Global state routing: a new routing scheme for Ad-hoc wireless networks", Communications, 1998 IEEE International Conference on, Volume:1, 7-11
- [18] Guangyu Pei, Gerla, M, Tsu-Wei Chen, "Fisheye state routing: a routing scheme for Ad hoc wireless networks", 2000 IEEE International Conference on, Volume:1, Page(s): 70-74 Vol.1
- [19] C.-C. Chiang, "Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel", Proc. IEEE SICON'97, Apr. 1997, pp: 197-211
- [20] D. Johnson and D. Maltz, "Dynamic source Routing in Ad Hoc wireless networks", in Mobile Computing, T. Imielinski and H. Korth, editors, Kluwer Academic, 1996
- [21] 袁明, 张连芳, 舒炎泰. "Ad Hoc网络路由协议能量消耗分析". 计算机工程与应用, 2003(15)
- [22] 舒炎泰, 高德云, 王雷. "无线ad hoc网络中的多径源路由". 电子学报, 2002(2)
- [23] V.D. Park and M.S. Corson, "A Highly Adaptive Distributed Routing Protocol Algorithm for Mobile Wireless Networks", Proc. INFOCOM'97, Apr, 1997
- [24] C.E. Perkins and E.M. Royer, "ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing", proc. 2nd IEEE Wksp. Mobile Comp. Sys. And Apps, Feb.1999, pp:99-100
- [25] Charles Perkins, Elizabeth Royer, and Samir Dar. "Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing", <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-04.text>, Oct 1999. IETF Internet Draft(work in progress)
- [26] C-K. Toh, "A Novel Distributed Routing Protocol To Support Ad-Hoc Mobile Computing", Proc. 1996 IEEE 15th Annual Int'l. Phoenix Conf. Comp. Mar. 1996, pp:480-486
- [27] R. Dube et al., "Signal Stability based Adaptive Routing (SSA) for Ad-Hoc Mobile Networks", IEEE Pers. Commun., Feb. 1997, pp:36-45

- [28] E. M. Royer and C. K. Toh, "A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks", In: IEEE Personal Communications, pp:46-55, Apr, 1999
- [29] Stephen Mueller, Rose P. Tsang, Dipak Ghosal. "Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Challenges".2004
- [30]Ying-Hong Wang, Hung-Zu Lin, Shu-Min Chang. "Interfering-aware QoS Multipath Routing for Ad Hoc Wireless Network", IEEE AINA'04. 2004
- [31]Xuefei Li, Laurie Cuthbert. "Stable Node-Disjoint Multipath Routing with Low Overhead in Mobile Ad Hoc Networks", IEEE MASCOTS'04. 2004
- [32] Marina, M.K. and Das, S.R., "On-demand multipath distance vector routing in Ad Hoc networks", Network Protocols Ninth International Conference on ICNP 2001, 2001,pp:14-23
- [33]S.J. Lee and M. Gerla, "AODV-BR: Backup Routing in Ad Hoc networks", Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE, 2000, pp:1311 -1316,vol.3
- [34]Lei Wang, Yantai Shu, Miao Dong, Lianfang Zhang, "Adaptive Multipath Source Routing in Ad hoc Networks", IEEE ICC'98, Helsinki , Finland, June 2001.
- [35] Lei Wang, Lianfang Zhang,Yantai Shu and Miao Dong, "Multipath source routing in wireless Ad Hoc networks", Electrical and Computer Engineering, 2000 CanAdian Conference on, Volume: 1,2000, pp:479-483, vol.1.
- [36]Sung Ju lee, Mario Gerla, "Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks", ICC 2001, pp: 3201-3205, June 2005
- [37]L. Wang and C.Chen, "Redundant Source Routing in Ad hoc Networks", Internal Technical Document, ITD-03-44902G, Lucent Technologies, October 2003
- [38]C. Chen, L. Wang, L. Liu and W. Wu, "Simulation Study of TCP Behavior over Redundant Source Routing in Ad hoc Networks", in WCNC 2004, pp:1258-1263,March 2004
- [39]M.R.Pearlman, Z.J. Haas, P.Shilander and S.S.Tabrizi, "On the Impact of Alternate Path Routing for Load Balancing in Mobile Ad hoc Networks", in ACM MobiHoc 2000, pp:3-10,August 2000.
- [40]D.Ganesan,R.Govindan, S.Shenker and D.Estrin, "Highly-Resilient,Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks", in ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review,Vol.5,Issue

4, October 2001

- [41] Lianfang Zhang, Zenghua Zhao, Yantai Shu et, "Load Balancing of Multipath Source Routing in Ad Hoc Networks". IEEE, 2002
- [42] J. Broch, D. B. Johnson, and D. A. Maltz. "The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc works", <http://www.ietf.org/internetdrafts/draft-ietf-manet-dsr-03.txt>, June 1999
- [43] Tsirigos A.; Haas, Z. J., "Multipath routing in the presence of frequent topological changes," IEEE Communications Magazine, Volume, 39 Issue. 11, Nov. 2001, pp:132-138
- [44] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y -C. Hu, and J. Jetcheva. "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols", In Proc. of the ACM/IEEE MobiCom, October 1998, pp:85-97
- [45] Samir R. Das, Robert Castaneda, Jiangtao Yan, "Simulation-based performance evaluation of routing protocols for mobile ad hoc networks", in Proc. of IEEE the Seventh International Conference on Computer Communications and Networks OC3N'98 Oct. 1998
- [46] Zafar TaHa, Xian Liu, "A Model for Evaluating Multi-Route Routing in Ad Hoc Networks", Wireless Telecommunications Symposium, 2004, 14-15 May 2004, pp:149-153
- [47] Canfeng Chen, Weiling Wu, Zheng Li, "Multipath Routing Modeling in Ad Hoc Networks", Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on Volume 5, 16-20 May 2005 pp:2974-2978 Vol.5
- [48] P. P. Pham and S. Perreau, "Performance Analysis in Ad hoc Networks: Single-path Routing vs Multi-path Routing", in INFOCOM 2004, March 2004
- [49] P. Krishnan, and J. A. Silverster, "Choice of Allocation Granularity in Multipath Source Routing Scheme", Proceedings of IEEE INFOCOM'93, San Francisco, CA, Mar. 1993, pp:322-329
- [50] E. Ayanoglu, C. -L. I. R. D. Gitlin, and J. E. Mazo, "Issues in Packet Radio Network Design", Proceedings IEEE, 1987, 75(1): 6-20
- [51] The CMU Monarch Project's Wireless and Mobility Extensions to ns. The CMU Monarch Project, Snapshot Release 1.1.1, August 5, 1999

致 谢

首先特别感谢我尊敬的导师——陈曙副教授。在陈老师悉心指导下，本论文得以顺利完成。三年的研究生学习期间，陈老师无论在学习上还是在生活上都给了我莫大的关怀和帮助。同时陈老师渊博的学识、严谨的治学态度和谦和的为人品格深深的影响了我。在此，我谨向陈老师致以衷心的感谢和诚挚的敬意！

同时还要感谢计算机与网络技术研究所的陈涤教授、樊永华教授，他们的教导同样让我受益匪浅。

其次感谢李骐、郑辉、刘丽云、吴天柱、董国锋、邵常勇、徐蕾等计算机与网络技术研究所的同学，三年的研究生学习生活得到了他们的很多帮助。

再次感谢信息学院的老师和同学，感谢他们，使我度过了愉快的七年时光！向所有关心帮助过我的人们表示衷心的感谢！

朱伟

2006. 3. 25

攻读硕士期间参与的工程项目和发表的论文

参加导师主持的工程项目:

2004. 8-2005. 6 OMR(Optical Mark Reader)光标阅读机项目, 该系统通过山东省电子产品质量监督检验所鉴定。

发表的论文

- [1] 朱伟, 陈曙, 《基于DSP的多通道高速数据采集系统》, 信息技术与信息化, 2006年第1期
- [2] Liu Zhi, Zhu Wei. “A Parallel Image Processing System Based on DSP Arrays” in proceedings of DCABES 2004 Vol.2, 915-917, 2004

学位论文评阅及答辩情况表

论文评阅人	姓 名	专业技术职务	所 在 单 位	对论文总体评价*
	育 评			良好 B
	陈 涤	教授	山东大学	优秀 A
答辩委员会成员	姓 名	专业技术职务	所 在 单 位	备 注
	主席 赵捷	教授	山东师范大学	
	委 员	樊永华	教授	山东大学
		陈涤	教授	山东大学
		邢岳林	副教授	山东大学
		周卫东	副教授	山东大学
答辩委员会对论文的 总体评价*		A	答辩秘书 郑辉	答辩日期 2006.5.30
备注				

※ 优秀为“A”；良好为“B”；合格为“C”；不合格为“D”。