

浙江工业大学

硕士学位论文

移动Ad Hoc网络的DSR路由协议研究

姓名：陈迪

申请学位级别：硕士

专业：通信与信息系统

指导教师：孟利民

20081110

移动 Ad Hoc 网络的 DSR 路由协议研究

摘 要

Ad Hoc 网络是指由一组带有无线通信收发装置的移动节点组成的一个多跳、自组织、无中心节点网络。随着 Ad Hoc 网络中节点的快速移动,网络拓扑结构将会不断变化,因而传统的用于 Internet 的路由协议不能适用于 Ad Hoc 网络的需要,必须采用合适的路由算法以解决 Ad Hoc 网络中的路由选择问题。因此路由协议是现阶段移动 Ad Hoc 网络研究的热点领域。

本文首先介绍了 Ad Hoc 网络的概念、特点和关键技术等,指出了目前面临的挑战,特别是路由技术方面。其次介绍了 Ad Hoc 网络中当前主要的一些路由协议,简要分析了各自的原理和特点,比较了部分协议的性能。然后详细地介绍了 Ad Hoc 网络中的源路由协议(DSR),深刻分析了 DSR 路由协议的工作原理,路由搜索过程以及路由维护过程,提出了 DSR 路由协议的不足之处。

针对 DSR 路由协议的缺点,本文提出了能够提供 QOS 保障的改进型 DSR 多目标规划路由模型。在多目标规划模型中,主要考虑了链路稳定性和路由时延这两类 QOS 参数。通过节点所处的位置、移动速度以及移动角度计算路由链路的稳定性因子和路由的动态时延,将以上 QOS 参数指标加以综合,建立路由评价函数,并以此作为路由选择的指标。

最后构建了两种规模的网络,针对不同的网络环境对 DSR 路由协议与多目标规划路由模型进行仿真,对比两种路由协议下找到的路由。仿真结果表明:基于 DSR 的多目标规划路由模型可以适应不同的场合,并有效的提供 QOS 保障。

关键词: Ad Hoc 网络, DSR 路由协议, QOS

RESEARCH ON DSR ROUTING PROTOCOL IN MOBILE AD HOC NETWORK

ABSTRACT

Ad Hoc networks composed of mobile nodes with wireless communication device are typically characterized by their multi-hop, temporary and un-center nodes. With the nodes in Ad Hoc networks moving fast, the topologies of Ad Hoc networks are constantly changing. The traditional routing protocols used in Internet can not adapt to the need of Ad Hoc networks. Adaptive routing algorithms must be designed to solve the routing question in Ad Hoc networks. They aroused more and more researchers' attentions and become one of hot fields.

This thesis summarizes the concepts, characteristics and difficulties of Ad Hoc networks at first. My research is focus on Ad Hoc routing problems. The Ad Hoc routing protocols can be classed into two types on the basis of the ways of finding routing paths, which are proactive routing and reactive routing protocols. My research mainly analyses one prominent on-demand routing protocols: Dynamic Source routing protocol (DSR), and design a detailed MATLAB simulation model for DSR protocol.

This thesis puts forward a new protocol, which can provide QOS guarantee. The protocol chooses the QOS routing path based on dynamic delay restriction, link stability factor and min hops. In the model, it examines the changes of the current delay and predicts the delay in the future based on the dynamic delay prediction algorithm, and predicts the valid routing time due to the mobile information of the moving nodes. The new protocol chooses the routing path based on the above conditions so as to provide good QOS performance.

Key Words: ad hoc networks, dynamic source routing protocol, QOS

浙江工业大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果；也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本授权书。

2、不保密 ☐。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

第 1 章 绪 论

1.1 Ad Hoc 网络概述

近年来,无线通信网络的发展非常迅速,这主要源于个人业务需求不断增长的缘故,如对无线通信的范围、业务种类及质量的需求等。而连接世界各地、可共享现有信息资源的因特网(Internet)的崛起,各国更是极大刺激了无线通信的发展。无线通信网络由于能快速、灵活、方便地支持用户的移动性而成为个人通信和 Internet 发展的方向,目前几乎所有的通信系统都与无线通信方式有关,比如蜂窝系统、卫星通信系统、无线局域网/广域网(WLAN/WAN)、寻呼系统、无线 ATM、分组无线网等。而对无线和移动通信的相关研究是目前通信领域的研究热点。

传统意义上对无线通信网络的研究仅限于一跳无线网络,需预先架设网络基础设施。如蜂窝移动通信系统,需预先建设基站、网络子系统等,移动设备通过基站和有线网络,实现与其它移动设备之间的通信。移动设备只需与基站之间实现一跳无线通信,即可实现与网络中其它移动设备及固定用户之间的互联互通。与基于网络基础设施的移动一跳无线网相对应,还有一种网络无需预先铺设网络基础设施即可实现移动设备之间的通信。网络没有固定的中转基站或路由器,所有移动用户都能自由移动,并以动态的拓扑方式组网。因移动用户的无线覆盖范围有限,要求每个移动用户借助中间移动用户的中继,通过多跳方式实现与其无线覆盖范围之外的移动用户的通信。因此,网络中的每个移动设备需具备路由的功能。由于网络的拓扑结构不断变化,移动用户须能发现、保持到网络其他用户的路由,这就是无线移动自组织网络,也称作 Ad Hoc 网络。Ad Hoc 网络技术研究是当前无线通信技术研究的热点和重点。

Ad Hoc 网络是一种没有固定网络设施支持的移动网络,网络中的节点通常是由一组带有无线收发装置的移动终端构成。Ad Hoc 网络最初应用于军事领域,对它的研究起源于对分组无线网在军事通信中的应用。在 1972 年,由美国的 DARPA 资助该项目的研究,其后,又在 1983 年和 1994 年进行了抗毁可适应网络 SURAN(Survivable Adaptive Network)和全国移动信息系统 GIOMO(Global Mobile Information System)项目的研究。随着该技术的不断发展,Ad Hoc 网络在民用环境下也得到了应用[1]。

在 Ad Hoc 网络中,当两个移动终端距离较近时,即都在彼此的通信覆盖范围内,它

们可以直接进行通信。但是如果是两个相距较远的终端要进行通信, 由于移动终端的通信覆盖范围有限, 就无法直接通信了, 需要通过它们之间的其它终端转发才能实现通信。因此在 Ad Hoc 网络中, 每个移动终端除了作为主机, 还需兼备路由器的功能, 担负着寻找路由和转发报文的工作。在 Ad Hoc 网络中, 终端间的路由通常由多个网段(跳)组成, 数据通过多个终端的转发才能到达目的地, 所以又称 Ad Hoc 网络为多跳无线网络。

Ad Hoc 网络采用分组交换机制, 因此可以看作是移动通信和计算机网络的结合。在 Internet 中, 还有一种技术也支持移动网络, 即移动 IP。在移动 IP 网络中, 移动主机可以通过无线链路或固定有线网络等方式接入网络, 完成注册后就可以进行通信。与 Ad Hoc 网络不同, 在移动 IP 网络中, 移动主机必须通过基站等固定设施的支持才能进行通信, 在基站和基站之间均为有线网络, 仍然是使用 Internet 的传统路由协议。而 Ad Hoc 网络则不需要这些设施的支持。此外, 在移动 IP 网络中的移动主机只作为通信终端, 不具备路由功能。当主机在移动 IP 网络中切换时并不改变网络拓扑结构, 而 Ad Hoc 网络中主机的移动将会导致拓扑结构的改变[2]。

Ad Hoc 网络作为一种新的组网方式, 具有以下特点:

(1) 无中心和自组织性: Ad Hoc 网络采用无中心结构, 网络中所有节点的地位都是平等的, 没有绝对的控制中心, 各结点通过分层的网络协议和分布式算法协调彼此的行为, 结点可以随时加入和离开网络, 任意节点的故障不会影响整个网络的运行。与有中心网络相比, Ad Hoc 网络具有很强的抗毁性。无中心和自组织的特点使得 Ad Hoc 网络可以实现快速自动组网[3]。

(2) 多跳路由: 由于结点发射功率的限制, 结点的覆盖范围是有限的。当要与覆盖范围之外的结点进行通信时, 需要中间结点的转发, 即需要经过多跳。与普通网络中的多跳不同, Ad Hoc 网络中的多跳路由是由普通结点共同完成的, 而不是由专用的路由设备完成的。反过来, 如果可以使用多跳路由, 结点的发射功率可以很低, 从而达到节省电能延长电池工作时间的目的。

(3) 动态变化的网络拓扑: Ad Hoc 网络中, 移动终端能够以任意可能的速度和移动模式移动, 他们之间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化, 而且变化的方式和速度都能以预测。在网络拓扑图中, 这些变化主要体现在结点和链路的数量及分布的变化, 对于常规网络而言, 网络拓扑结构是相对稳定的, 因此需要开发专门的路由协议以适应这种动态拓扑网络的需要。

(4) 有限的无线传输带宽: Ad Hoc 网络中主机之间通信均采用无线传输技术, 由于无线信道本身的特点, 它所能提供的网络带宽相对于有线信道要低得多, 并且无线信道的质

量较差。考虑到竞争共享无线信道产生的冲突、信号衰减、噪音和信道之间干扰等因素，移动终端获得的实际带宽远远小于理论上的最大带宽，并且会随时间动态地发生变化。在 Ad Hoc 网络中，节点的发送功率受限，一个节点的发送，只有其一跳相邻节点可以听到，而此范围之外的其他节点察觉不到。这一个特征一方面提高了信道的空间复用度，另一方面使得报文的冲突与节点所处的地理位置相关。此外，地形或发射功率等因素使得 Ad Hoc 网络中可能存在单向无线信道。

(5) 移动终端的局限性：移动终端具有携带方便、轻便灵巧等优点，但也存在其固有的缺陷，如能源受限、内存较小、CPU 处理能力较低和成本较高等，从而给设计开发和推广应用带来了一定的难度，移动节点一般依靠电池供电，因此如何高效地使用节点的电能和延长节点的工作时间是 Ad Hoc 网络中需要考虑的一个十分突出的问题。

(6) 安全性差：Ad Hoc 网络是一种特殊的无线移动网络，由于采用无线信道、有限电源、分布式控制等技术，它比固定网络更加容易受到被动窃听、主动入侵、拒绝服务、剥夺“睡眠”等网络攻击。另外，Ad Hoc 网络由节点自身充当路由器，不存在命名服务器和目录服务器等网络设施，也不存在网络边界的概念。这也就使得 Ad Hoc 网络中的安全问题非常复杂，传统网络中的许多安全策略和机制将不再适用。因此，信道加密、抗干扰、用户认证、密钥管理、访问控制和其它安全措施都需要特别考虑。

(7) 生存周期短：Ad Hoc 网络一般主要用于临时的通信需求，相对于有线网络，它的生存时间一般比较短。

1.2 Ad Hoc 网络路由协议研究现状

目前 Internet 中使用的路由协议主要是基于距离矢量的路由协议和基于链路状态的路由协议。这两类协议都是针对固定网络而设计的，由于 Ad Hoc 网络自身的特点，使得传统的 Internet 路由协议并不适用于 Ad Hoc 网络，主要表现在以下几方面：

(1) 有限的无线信道带宽：与固定网络相比，由于节点的移动性，Ad Hoc 网络的拓扑变化要频繁得多，为了能够尽快、尽量精确地反映网络拓扑的变化，就需要更加频繁的在节点间交互控制报文，而由于有限的无线信道带宽，要求路由协议在节点间交互的信息应尽量少，以减小路由协议的开销，提高信道的效率[4]。

(2) 动态的网络拓扑结构：网络拓扑结构的动态变化是自组网最显著的特点，若在自组网中直接运行常规路由协议，当拓扑结构变化后，常规路由协议需要花费很长的时间和较大的代价才能达到收敛状态。

(3)单向信道的存在：常规路由协议通常认为底层的通信信道是双向的，但在自织网中由于发射功率或地理位置等相互的影响可能存在单向信道，它为常规协议带来了严重的影响[5]。

(4)移动终端的能源控制：移动终端的能源控制问题也是自组织网路由协议中应该考虑的，因为移动终端的能源通常是有限的，这就要求路由协议算法简单有效，能够尽量节省能源，而常规的路由协议则没有上述的限制。

由于移动 Ad Hoc 网络本身特殊的拓扑结构，所以其路由问题就显得尤为重要，路由方案的好坏直接关系到整个网络性能的优劣。对移动 Ad Hoc 路由协议的研究已经成为无线通信的热点之一，对路由方法的讨论也越来越深入，并且已从不同的角度提出了多种针对 Ad Hoc 网络的路由协议，他们都有着自己的特点，适用于不同的应用环境。目前大致可以将它们分为主动路由协议、被动路由协议，混合路由协议及全球定位系统 GPS 辅助的路由协议。

主动路由协议目前主要有 DSDV(Destination Sequenced Distance Vector)、WRP(Wireless Routing Protocol)和 CGSR(Cluster Head-Gateway Switch Routing)等，该类协议每个节点维护一张包含到达其它节点的路由信息的路由表，并根据网络拓扑的变化随时更新路由表，这张路由表可以准确地反映网络的拓扑结构。源节点一旦要发送报文，可以立即获得到达目的节点的路由。因此这种路由协议的时延较小；但是路由协议的开销较大[6]。

被动路由协议目前主要有 DSR(Dynamic Source Routing)、AODV(Ad Hoc On Demand Distance Vector)、TORA(Temporary Ordered Routing Algorithm)和 ABR(Associatively Based Routing)等，该类协议中节点不需要维护及时准确的路由信息，当需要发送数据时才发起路由查找过程。与主动路由协议相比，按需路由协议的开销较小，但是报文传送的时延较大。

混合式路由协议，是结合了以上两种路由协议的优缺点，即在局部范围内使用主动路由协议，维护准确的路由信息，可以缩小路由控制消息传播的范围。当目标节点较远时，通过按需路由协议查找发现路由，这样既可以减少路由协议的开销，时延特性也得到了改善。但是要实施混合式路由也面临着很多困难，如局部范围的确定和维护，主动和按需路由协议的合理选择等。目前该类协议主要有 ZRP(Zone Routing Protocol)、CEDAR(Core Extraction Distance Ad Hoc Routing)等[7]。

GPS 辅助的路由协议。随着 GPS 技术的发展，在移动节点中实现低成本的 GPS 接收机成为可能，结点就可以知道自己的地理位置，基于此，许多研究者提出了利用位置信息的

路由协议, 这种类型的协议具有更好的可扩展性及对网络变化更好的适应性。现在已提出的基于位置的路由协议主要有 DREAM(Distance Routing Effect Algorithm For Mobility)、LAR(Location Aided Routing), GLS (Grid Location Service), GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)等[8]。

这些路由协议都是基于不同的出发点和机制, 针对每一种路由协议的特点, 研究者们也在不同的角度(如带宽、能量、链路稳定度等)做了相应的一些优化研究, 但到目前为止还没有各方面性能都表现比较好的 Ad Hoc 路由协议。

1.3 本文的工作

Ad Hoc 网络研究是无线研究领域中的一个重要方面, 其中路由协议的研究则是 Ad Hoc 网络设计和实现的关键和难点。本章综述了 Ad Hoc 网络的概念, 特点, 研究热点和现状, 介绍了本文的研究重点即路由问题的研究问题和现状。

其中路由协议的分析和仿真是研究 Ad Hoc 路由协议的前提和基础, 面对众多研究者提出来的按需路由算法, 我们只是通过分析和仿真的方法来评价甚至改进这些协议, 为新的协议提出提供理论的基础。但是面对如此众多的协议, 我们不可能也不必要把所有的协议都拿来建立仿真模型进行分析, 在路由协议研究现状中我们介绍过按需路由的起源和发展, 现在提出的多数按需路由算法都是继承了动态源路由(DSR)协议。因此有必要对 DSR 协议的路由机制以及它的性能进行深入分析研究, 以便做更进一步的研究和改进。同时, 我们还提出到对于基于多目标规划模型的 Ad Hoc 网络路由算法。

本文的主要研究对象是 Ad Hoc 网络的路由协议。为此, 本文首先介绍了 Ad Hoc 网络的基本概念以及特点; 其次对 Ad Hoc 网络中的路由问题进行了描述, 罗列出了 Ad Hoc 网络中现有的路由协议并进行了总体介绍; 接着我们详细介绍了 DSR 源路由策略、路由发现过程以及路由维持过程。本文的主要部分是对 Ad Hoc 网络中的动态源路由协议进行深入研究, 针对源路由算法不能提供 QoS 保障的缺点, 建立了基于 DSR 的多目标规划数学模型, 并建立仿真模型, 验证两者在性能上的差异。

本文的组织如下:

第一章: Ad Hoc 网络概述, 介绍 Ad Hoc 网络的产生背景、特点, 以及所面临的问题。介绍本文的主要工作。

第二章: Ad Hoc 路由协议分析, 指出 Ad Hoc 路由协议的设计需要, 重点介绍几类典型的 Ad Hoc 路由协议, 并对他们分别进行了横向与纵向的比较。

第三章: DSR 路由协议研究, 介绍了 DSR 路由协议的工作原理, 包括路由搜索策略以

及路由维护策略，并分析了 DSR 路由协议的不足之处。

第四章：基于 QOS 约束的 DSR 路由模型，针对 DSR 协议中存在的不足之处，建立了多目标规划数学模型，综合考虑链路稳定性、动态时延等 QOS 参数，确定路由选择评价体系。

第五章：网络仿真，使用 MATLAB 软件，建立不同规模、不同场景的网络仿真模型，分别用 DSR 路由协议与多目标规划路由协议进行仿真。针对结果分析两种协议在各方面的性能。

第六章：结论与展望，进行总结及对以后的研究工作进行展望。

第 2 章 移动 Ad Hoc 网络路由技术研究

2.1 Ad Hoc 无线自组网

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。

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,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[9]。

(1)物理层: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。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: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。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。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。

(4)传输层：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/IP 进行改造，使之适应无线环境。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。

(5)应用层：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 目前路由协议存在的主要问题

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。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。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。

传统的路由算法如 RIP(选路信息协议)和 OSPF(开放最短路径优先协议)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, 或发生网络拥塞的缘故, 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。

2.3 Ad Hoc 路由协议要求

移动 Ad Hoc 网络的最大的一个特点就是没有基础设施, 事先不需要任何的架设、布线、安放基站等措施。整个网络只由移动节点组成, 当网络中的一部分节点撤出该网络、有新的节点加入该网络或者网络中的节点变化了自己的位置时, 网络中各个节点可以按照 MAC 层的媒体接入协议与网络层的路由协议等发现网络的变化, 生成了新的网络拓扑, 这也就要求每个节点都必须要有路由的功能, 能够发现和识别相邻节点, 转发其它节点发来的数据, 并能与其它节点交换路由信息。由于 Ad Hoc 网络拓扑结构的动态变化, 而且这种变化是随机的, 因而两节点之间传输数据建立起来的路由并不像有线网络中那样一成不变, 而是随时可能断开, 同时新的路由又可能会随时生成。因为整个路由上某一个或几个节点可能已经离开, 并且移动到了一个新的位置, 当建立起来的路由已经不可用时, 必须有一种方法来快速而准确的找到新的中继点来代替原来的节点, 即找到一条新的路由来继续传输数据, 这也就对路由协议提出了更高的要求[10]。

目前在 Internet 中常用的路由协议(例如 RIP 和 OSPF)是为有线固定网络而设计的, 而 Ad Hoc 网络结构则是动态变化的, 如果直接将这些常规路由协议用在 Ad Hoc 网络中, 不但会花很大的代价重新建立路由, 而且协议状态将始终处于不收敛状态。另外, 由于 Ad Hoc 本身的特点也决定了传统的路由协议不适用于 Ad Hoc 网络, 如果直接将传统路由协议应用于 Ad Hoc 网络, 仅周期性的控制信息将占用大量的无线信道资源, 降低系统效率, 同时复杂计算使得 CPU 始终处于很高的负载下, 消耗了大量的能源。其中在 RIP 中还会遇到无穷计数和临时环路等问题, 算法收敛速度慢, 可见, 必须设计新的路由协议以适应 Ad

Hoc 网络的需要。

Ad Hoc 网络路由选择算法应该尽量满足以下几个特性：

(1) 快速性：是指查找路由的时间要尽可能的短，以减少引入的额外时延；

(2) 正确性：是指路由协议要能够适应网络拓扑结构的变化，提供准确的路由信息；

(3) 稳健性：是指网络在面临局部故障或超负荷时依然能经过其它路由进行分组转发，而不造成分组的丢失或虚电路的中断；

(4) 最优性与公平性：某些旨在提高性能的机制给相邻站点之间的分组交换的优先级别，可能要高于给相距较远的站点之间的分组交换的优先级别，这样获得了较大的平均吞吐量但却有失公平性，因此在他们之间存在一个折中的问题；

(5) 高效性：是指在路由选择中尽量提供最佳路由，维护路由的控制信息应尽量少，以降低路由协议的开销，另外路由协议应根据网络的拥塞状况和业务的类型选择路由，避免拥塞并提供 QOS 保证；

(6) 可扩展性：指路由协议要能够适应网络规模增长的需要。

2.4 Ad Hoc 路由协议分类

由于 Ad Hoc 网具有主机能源受限和动态拓扑等特点，这使得常规路由协议都无法在该环境下正常工作。同时，由于路由协议是影响网络性能的一个重要因素，目前对 Ad Hoc 网络的研究主要集中在对其路由协议的研究。

已有的常规路由协议周期性地路由更新消耗大量的网络带宽和节点能源，路由建立更新过程对拓扑变化的收敛比较慢，不能适合 Ad Hoc 网络的要求。理想的 Ad Hoc 网络的路由协议应该满足以下要求：

(1) 收敛快速：由于网络拓扑结构动态变化，路由协议应该尽可能快地为连接请求提供最新的路由信息。这就要求路由算法收敛要迅速。

(2) 提供无环路由：利用路由算法得到的路径不应该含有回路。数据包在有回路的路径上传播会造成带宽和能量等资源的大量浪费。当然，可以使用生存时间在一定程度上解决这个问题，但为了取得更好的通信性能，需要更加结构化的考虑周到的方案。

(3) 控制管理开销小：为了执行特定的功能，Ad Hoc 路由协议都需要使用一些控制信息，由于这些控制都是要占用一定带宽资源的，因此，如果控制信息的量太大，将会影响网络的通信性能。特别是在无线网中，带宽资源十分有限，因此，如何降低控制头部信息的数据量是在设计移动 Ad Hoc 路由协议时需要考虑的一个重要因素。

(4) 对终端性能无过高要求：必须尽可能缩短发射时间和减少发射的数据量，以节约能源。

(5) 支持单向信道：在无线网中，有很多因素导致链路的单向特性，这些因素包括信号的发射能力、信号间的干扰状况等。因此，移动 Ad Hoc 路由协议应当具备识别和利用单向链路的能力。

路由机制必须适应网络三个不断变化的基本特征：移动节点的总体密度，节点到节点的拓扑，网络的使用模式。

到目前为止，人们已经设计出多种适合在自组织网环境下使用的路由协议。根据其特性，可以分为许多类别。例如，根据发现路由的驱动模式的不同，可以分为表驱动路由协议和按需路由协议；根据网络拓扑结构的差异，又可以将它们分为平面结构的路由协议和分簇路由协议。图 2-1 中包括了一些主要的不同类别的路由协议[11]。下面介绍几类主要的路由协议。

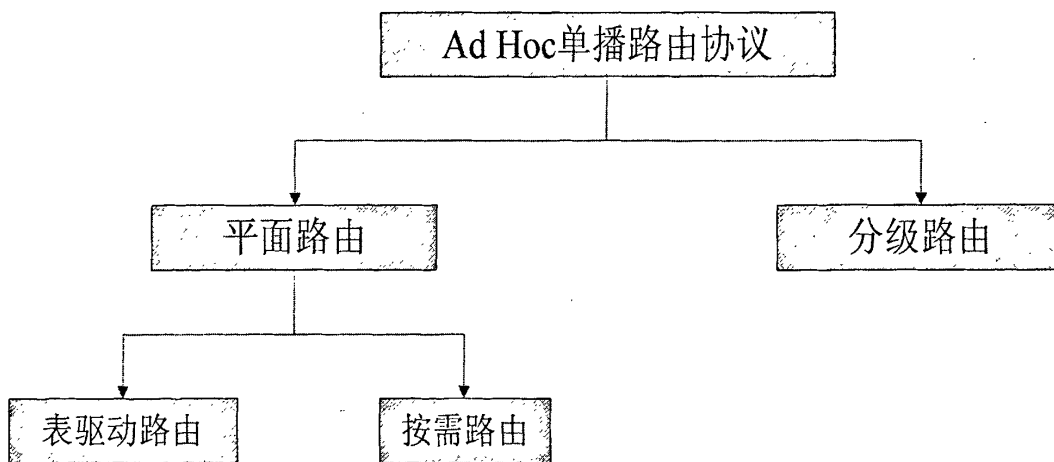


图 2-1 Ad Hoc 路由协议分类示意图

2.4.1 表驱动路由协议简介

表驱动路由协议又称为主动式的路由协议。该类协议的路由发现策略与传统路由协议较相似，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，节点还必须维护去往全网所有节点的路由，即当网络拓扑结构发生变化时，节点通过交互信息来更新路由表，使所有路由信息保持一致。目前比较常见的表驱动协议有 DSDV, WRP 等[12]。

DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) 是由传统的 Bellman-Ford 路由选择

算法经过改良而发展出来的,相比 RIP 协议,加入了序列号机制,从而解决了“路由环路”和“计数到无穷”的问题。主要的设计思想是:在节点维护的路由表中,每个表项均包含有相关的序列号信息,用以识别路由的新旧,作为路由更新和分组转发的依据。协议使用了两类更新报文,即“完全转存”和“递增更新”报文。各节点使用这些报文,周期性的向周围的邻居通告其当前的路由表情况。如果发现链路断开等情况时,则使用事件驱动的方式发送相应的报文,这样就能及时更新路由信息。

DSDV 的优点是原理及操作相对简单,利用目的地序号消除了路由环路,加快了收敛速度。缺点是周期性的广播报文增大了网络开销,不适应快速变化的网络。

WRP(Wireless Routing Protocol)是由路径发现算法 PFA 经过改进而来的,与 DSDV 的差别主要是所需要路由表以及更新方式不同。每个节点需要维护四张表,包括距离表、路由表、链路费用表和消息重发表。节点之间使用 UPDATE 报文来通告路由变化更新情况。在路由的寻找过程中,利用了去往目标节点的路径长度和相应路径的倒数第二跳节点信息来加速路由协议收敛速度,从而有效的防止路由环路。

2.4.2 按需路由协议简介

按需路由协议又称为反应式的路由协议。与前面的主动式相比,节点并不是通过周期性的交换报文来维护网络路由,而是采用一种被动式的方法。仅当节点有数据要发送时,才激活路由发现机制,开始发送请求报文,寻找所需路由信息。当前具有代表性的按需路由协议有 DSR 和 AODV[13]。

DSR(Dynamic Source Routing)是卡耐基梅隆大学的 David B. Johnson 教授在 1996 年时提出的一种按需路由协议,是基于源路由方式的。当节点需要发送数据时,就启动路由发现过程,开始向外发送路由请求,其它节点收到后,按照一定的准则,判断后决定是转发还是回复。在请求的过程中,转发的中间节点都会将该节点的信息加入到报文中,当目的节点收到后,就能从报文中提取出完整的路径信息,即该路径上经过的所有中间节点。通常情况下,目的节点再沿着这个路径反向的将回复报文发给源节点,当源节点收到回复报文后,就完成了路由发现的过程。

DSR 是一个简单而有效的路由协议,特别为 Ad Hoc 网络中的移动节点所设计。在该算法中,由源节点决定分组转发的完整的节点序列,并将这个路由记录在分组头中。“源路由”的使用有效地避免了环路的出现和转发分组的中间节点路由信息的更新。在路由出错的时候,路由表中的相应记录将被删除;而在发现新路由时,将向路由表添加新的记录。

此协议由两种主要的机制组成：路由发现和路由维护。当源节点有分组要发送到某个目的端时，首先查询自己的路由表以确定是否具有到达该目的端的路由。如果存在，则使用这条路由来发送分组；否则，广播一个记录了源节点地址、目的节点地址和唯一标识号的 RREQ 进行路由发现。接收到此分组的中间节点检查自己的路由表中是否有能够到达目的端的路径，如果没有，则将自己的地址添加到分组的路由记录中并转发该 RREQ。目的节点或存有能够到达指定目的节点路由的中间节点收到 RREQ 后，会做出路由应答 RREP。目的节点直接翻转 RREQ 的路由记录作为 RREP 的路由记录；中间节点则需要将到达目的节点的路由记录添加到 RREQ 中的路由记录之后再翻转作为 RREP 的路由记录。路由维护是通过使用路由错误分组和确认来进行的，前者是在数据链路层传输失败时产生的，而后者是用于检查路由链路操作的正确性。

DSR 的主要优点在于：报文种类较少，协议处理相比其它按需路由协议较容易实现。因采用源路由方式，中间节点不用维护去往网络中所有节点的路由信息，可以有效避免出现路由环路。使用缓存技术减少了路由发现的开销；一次路由发现过程可以产生多条到达目的节点的路由，有助于路由选择。DSR 的缺点在于：每个分组的头部都需要携带完整的路由信息，数据包的额外开销较大；由于路由被缓存，过期路由会影响路由选择的准确性，每个路由报文中都需要携带路径信息，造成协议开销较大，不适合网络直径大的网络。

AODV(Ad Hoc On Demanded Distance Vector Algorithm)是在 DSDV 协议基础上改进而来的，采用与 DSR 协议类似的按需路由机制，因此可以看作是二者的结合。在 AODV 中，路由表信息是依赖于中间节点来建立和维护的，即类似于 DSDV 中的路由表，路由报文中不带有源路由的信息。采用超时删除路由的机制，并周期性的更新。通过使用目的节点序列号的方式，有效的防止了环路产生和过时路由信息[14]。

AODV 的路由发现也采用洪泛的方式，由反向路由的建立和前向路由的建立两部分组成。当源节点发出路由请求报文后，中间节点接收并转发的同时，记录其中的上游节点地址、请求 ID 等相关信息，以形成反向路由。同样，当目的节点收到请求报文后，采用类似的方式将响应报文发给源节点，并在此过程中形成前向路由。

2.4.3 分簇路由协议简介

Ad Hoc 网规模增加，平面路由方案就会因链接和处理开销的增大而变得不适用。解决办法之一便是采用分级路由方案以获得可扩展的有效路由。

区域路由协议 ZRP 就是典型的分级路由协议。它是一种利用集群结构、混合使用主动

驱动和按需路由策略的 Ad Hoc 网络路由协议。在 ZRP 中, 集群被称作域。为了综合利用按需路由和主动驱动路由的各自优点, ZRP 按照一定的规则将网络划分为不同的区域, 在区域内部采用基于表驱动的路由方式, 保证节点能够实时掌握区域内所有其他节点的路由信息; 在区域间则采用按需驱动的路由方式, 通过边界节点间的路由发现过程最终完成源节点和目的节点间的路由发现。由于拓扑更新过程仅在较小的区域范围内进行, 一方面有效的减少了拓扑更新过程对网络资源的耗费, 同时也加快了路由发现的过程, 提高了系统的响应速度。

ZRP 的性能很大程度上由区域半径参数值决定。通常, 小的区域半径适合在移动速度快的节点组成的密集网络中使用; 大的区域半径适合在移动速度慢的节点组成的稀疏网络中使用。

2.5 QOS 路由协议

Ad Hoc 网络一方面作为自治系统, 有自身特殊的路由协议和网络管理机制; 另一方面作为 Internet 在无线和移动范畴的扩展和延伸, 它又必须能够提供到 Internet 的无缝的接入机制。当前 Internet 已经可以在一定程度上保证综合业务传输的服务质量(Quality of Service)。近年来随着多媒体应用的普及和对 Ad Hoc 网络商业应用需求, 在 Ad Hoc 网络上传输多媒体也逐渐提上日程, 并且希望能像固定的有线网络一样为不同业务提供一定的 QOS 保证。但是与固定的有线网络不同, 在 Ad Hoc 网络中提供服务质量保证将面临许多不同于有线网络的新问题和挑战, 解决 QOS 问题显得更为困难。而路由协议作为 Ad Hoc 网络中的重要组成部分, 对于提供服务质量保证起着至关重要的作用。有线网络中 QOS 路由主要研究在源节点和目的节点的找一条满足资源要求的路径, 但在 Ad Hoc 网络中节点的移动性导致频繁的路由失效, 为在 Ad Hoc 网络中提供 QOS 必须尽力减少路由失败给传输质量带来的影响。而目前的 Ad Hoc 网络各种路由协议并不能很好的达到这个要求, 因此目前 Ad Hoc 网络路由协议距离实际应用的要求还存在一定的距离。

2.6 路由协议小结

Ad Hoc 网络路由协议多是由传统的距离矢量协议和链路状态路由协议发展而来。为了适应网络拓扑的变化, 首先出现的是周期更新的路由协议(Proactive)。如 DSDV 源于距离矢量路由协议, 在这种路由协议中, 每个节点维护一张包含到达其它节点的路由信息的路由表。当检测到网络拓扑结构发生变化时, 节点在网络中发送更新消息, 收到更新消息

的节点将更新自己的路由表，以维护一致的、及时的、准确的路由信息，所以路由表可以准确地反映网络的拓扑结构。源节点一旦要发送报文，可以立即获得到达目的节点的路由。因此这种路由协议的时延较小，但是路由协议的开销较大，占用无线信道时间长。基于此，出现了按需更新的路由协议(Re-active or On-demand)，如 DSR, AODV 等，它是一种当需要发送数据时才查找路由的路由算法。在这种路由协议中，节点不需要维护及时准确的路由信息，当需要向目的节点发送报文时，源节点才在网络中发起路由查找过程，找到相应的路由。与周期式路由协议相比，按需更新路由协议的开销较小，但是数据报传送的时延较大。因此在 Ad hoc 网络中单纯采用周期更新或按需更新路由协议都不能完全解决路由问题，特别是在网络规模不断扩大的时候这两种类型的路由协议就显的力不从心了。因此，又有人把这周期更新路由和按需更新相结合，出现了混合路由协议，如 ZRP，这种路由协议适合较大规模的 Ad Hoc 网络，在局部范围内使用周期更新路由协议，维护准确的路由信息，并可缩小路由控制消息传播的范围，当目标节点较远时，通过查找发现路由，这样既可以减少路由协议的开销，时延特性也得到了改善。由此可见，应用结合周期更新和按需更新路由协议优点的混合式路由协议是一种较好的折衷方案，是以后 Ad Hoc。网络路由协议的发展方向[15]。

第 3 章 DSR 路由协议简介

3.1 DSR 源路由协议概述

Ad Hoc 网络是一种典型的无线多跳网络, 该网络没有任何集中的控制单元, 所以也被称为无基础设施网络 (Infrastructure less Network)。Ad Hoc 网络的路由功能是由移动主机来执行的, 因此路由器的位置是移动的; Ad Hoc 网络有限的能源也不可能提供复杂的路由功能。网络拓扑结构的动态变化性也很大程度的影响了各种协议的可扩展性。这些问题使 Ad Hoc 网络的路由算法成为了当前研究的一个热点。目前国内外的科研人员对 Ad Hoc 网络进行了大量的研究工作, 很多路由算法已经被提出来。其中 DSR (Dynamic Source Routing) 作为一种反应式的路由协议, 很多方面适应了 Ad Hoc 网络的特点, 是一种很有前景的 Ad Hoc 路由协议[16]。

动态源路由协议 (Dynamic Source Routing Protocol, DSR), 简称 DSR 协议是一种典型的按需更新反应式路由协议, 它使用源路由而不是逐跳路由的算法, 数据分组头部携带了到达目的节点的完整路由, 收到分组的移动节点根据分组携带的路由信息转发分组。协议运作包括两个部分: 路由发现 (Route Discovery) 和路由维持 (Route Maintained)。路由发现使网络内的任一节点能够动态地找到到达网络内其节点的路由; 路由维持负责实时监测正在使用的路由是否有效。

动态源路由协议是一种专用于 Ad Hoc 网络的一种简单而高效的路由协议。DSR 协议的开销很小, 并且能够对网络的变化做出迅速的反映。DSR 协议主要包括两个过程: 路由搜索和路由维持。路由搜索: 当节点 S 向节点 D 发送数据时, 它首先检查缓存是否存在未过期的到目的节点的路由, 如果存在, 则直接使用可用的路由, 否则启动路由搜索过程。路由维持: 当节点 S 向节点 D 发送报文时, 如果网络拓扑发生了变化, 导致节点 S 到节点 D 源路由中的某条链路已经失效了, 路由维持机制能够及时的探测到这种情况, 并且将这一情况及时的报告给节点 S。这样节点 S 就能够重新采用另一条路由或者启动路由搜索过程来获得一条新路由。

在 DSR 协议中, 路由搜索和路由维持是以纯粹的“按需”的方式工作的。不同于其它的路由协议, DSR 协议本身完全不要求发送任何形式的路由报文。由于 DSR 不发送任何周期性的路由报文, 所以当网络中所有的节点都近似静止并且相互通信的节点都具备到达彼

此的路由的情况下，DSR 协议没有任何的路由开销。

当网络的拓扑变化时，DSR 协议仅仅会因为当前正在使用的路由发生变化而产生一定的路由开销。在运行 DSR 协议的过程中，节点进行一次路由搜索可能会获得到达一个终点节点的多条路径。由于对多径路由的支持，当到达一个终点节点的路由发生错误时，就可以立即尝试到达此节点其它的路由。这样就使得协议对路由的变化有较快的反映能力。多径路由能力也减少了由于每次路由发生错误时都要启动路由搜索过程所带来的开销。使用 DSR 协议时，发送报文的节点可以选择和控制它发出的数据包的路由，这样可以有效的避免出现路由环路的现象，因为数据包的路由是在发送之前由发送节点决定的，发送节点可以在路由选择的时候避免环路的出现。

网络中一个节点如果想和别的节点通信，那么它必须和别的节点运行同样的路由协议。特别是每个节点都能够为网络中其它节点转发数据包。网络中每个节点都可以作为路由器，定义网络的直径为任意两节点之间传递一个数据包可能需要的最大的跳数。

当数据包在无线网络中传输时，它可能会丢失或者与其它的数据包发生冲突，网络中必须保证能够检查出发生冲突的数据包，并且能够将这样的数据包丢弃。网络中的节点可以随时自由移动，甚至持续的移动。但是考虑到数据包在网络层中的延时和底层硬件的传输范围等因素，节点不能移动过快，必须保持一个适当的速度。DSR 协议可以承受网络中节点以很快的速度持续的移动，但是这个速度不能过快，如果节点移动的速度太快了，每个单独的数据包就只能通过洪泛的方式传输了。

网络接口采用混杂接收模式。这种模式下，网络硬件接口将接收到的所有数据包向上传递给驱动软件，而不是根据终端地址进行过滤。这种硬件接口广播网络包括无线网络中已经相当普遍了，虽然这种处理在协议中并不是必不可少。但是通过这种处理方法，可以优化协议。虽然这样必然导致 CPU 开销的增加，但是本文认为网络速度在现在或者以后的 Ad Hoc 网络系统中是最终要的制约因素。况且协议的一部分可以在硬件上直接实现，就可以避免协议造成的 CPU 的开销。

3.2 DSR 数据结构

DSR 协议使用一个结构特殊的 DSR 头来携带控制信息，这个 DSR 头可以被任何已经存在的其它分组携带。DSR 头开始部分是一个固定尺寸的结构体，其后跟随若干个携带 DSR 选项信息的 DSR 选项结构体。整个 DSR 头的结束由包含在开始部分固定结构体中的头部长度的控制。DSR 头可以被插入到如 IP 分组的 IP 头和任何的传输层协议头之间，DSR 分组

结构见图 3-1[17]。

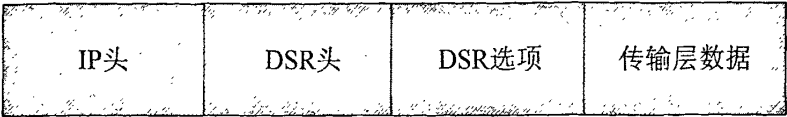


图 3-1 DSR 分组结构

图 3-2 是 DSR 头的结构示意图，其中 Next Header 占 8 比特字节，标识了跟随在 DSR 头后面的 DSR 分组选项类型；Reserved 项的值置为 0 或者忽略；Payload Length 表示 DSR 头的长度，定义了 DSR 头中所有项目的总长；OPTIONS 为可变长度区。

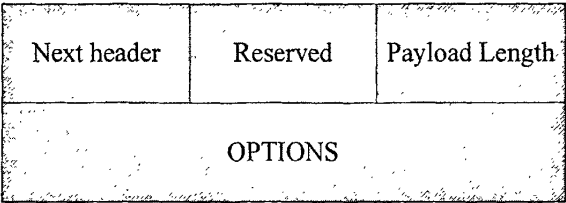


图 3-2 DSR 头的结构示意图

紧跟在 DSR 头后面的 DSR 选项根据需要分了很多类型，分别为路由发现项(Route Request)、路由应答项(Route Reply)、路由错误应答项(Route Error Packet)。请求确认项 (Acknowledgment)、确认项(Acknowledgment Packet)等，根据 DSR 选项的定义，DSR 的分组可以分为路由发现分组、路由应答分组、路由错误应答分组、请求确认分组、确认分组等。

在 DSR 协议中，所有的路由信息都保存到节点的路由缓存当中。网络中的每个节点都维护着自己的路由缓存，每当节点获得新的链路信息时，就将这个信息保存在路由缓存之中。节点获得新的链路信息的方式有很多，当节点接收到路由请求报文，路由应答报文以及普通数据包都可能获得新的链路信息。同样，当节点获得链路断开的信息时，也可以从路由缓存中删除断开的链路。

每当节点获得新的链路信息，并且将信息保存在节点的路由缓存当中后，它都应当检查一下发送缓存。如果在路由缓存中能找到到达发送缓存中的某个数据包的目的节点的路由，那么就应用这条路由将这些数据包发送出去，并且从发送缓存中删除这个数据包。

DSR 协议中的路由缓存支持到达同一个目标节点的多条路由，在查找到达某个目的节点的路由的过程中以目的节点的地址作为索引。在 DSR 协议的具体实现中，可以采用任何合适的策略和算法来查找路由缓存，从查找到的路由中选择“最佳”的路由。例如，节点

可以选择到达目的节点最短的路由，也可以选出若干条到达目的节点的路由，用这些路由交替的发送到达这个目的节点的数据包。为了对节点中的路由缓存进行有效的管理，在 DSR 协议的实现中，路由缓存通常采用下面介绍的两种组织方式进行管理。

路径缓存：在 DSR 协议中，路由应答报文返回了一条从源节点到达目的节点的一条完整的路径。通过将这些完整的路径分别存储起来，就可以建立起这种“路径缓存”的组织形式。路径缓存的组织方式在具体实现上很简单，并且相对容易保证所有的路由都不会包含环路。路径缓存的搜索也很简单，只需要以目的节点为索引，逐条地搜索路由缓存中的每个条路由就可以了。

链路缓存：在这种缓存组织方式中，路由缓存是通过图的方式存储的。每个节点维护了一个它所了解的网络拓扑结构的图(在 DSR 协议中一个节点了解的网络拓扑结构一般情况下是不完整的)。当这个节点通过接收路由应答报文或者其它方式获得路由信息时，它把这些信息(包括节点和链路信息)添加到路由缓存中。

在链路缓存中查找一条到达目的节点的路由的搜索方法通常是比较复杂的，可能会占用更多 CPU 的执行时间。相对于路径缓存，链路缓存的功能更加强大一些。因为它能够有效地利用节点所了解的全部的网络拓扑信息。举例来说，采用链路缓存的方式在许多情况下能将通过各种方式获取的路由组合在一起，形成一条新的路由。这一点路径缓存确做不到这一点，因为路径缓存中的每条路由都是分开存储的。

路由缓存中的每条路由对应一个定时器，如果一条路由在一定时间内没有应用，那么就应当将这条路由删除。在具体实现时，可以采用任何合适的方法确定每条路由的超时时间。

在节点的发送缓存中存储了由于暂时没有到达目的节点的路由而没有发送出去的数据包。每个数据包对应一个定时器，这个数据包在发送缓存中保存了一定时间后，如果路由缓存中还是没有到达这个数据包的目的节点的路由，那么就将这个数据包从发送缓存中删除。发送缓存的空间是有限的，所以在采用了 FIFO 队列的方式对路由缓存中的数据包进行管理。所有的数据包按照进入发送缓存的时间排列在发送缓存中。如果发送缓存已经满了，而且又要有新的数据包要进入发送缓存，那么就删除队列中位置在前面的数据包，即使这个数据包的定时器还没有超时。通过这种方法可以有效地抑制发送缓存的溢出。

3.3 DSR 源路由算法描述

3.3.1 DSR 路由搜索机制

动态源路由协议是一种专用于 Ad Hoc 网络的一种简单而高效的路由协议。DSR 协议的开销很小,并且能够对网络的变化做出迅速的反映。DSR 协议主要包括两个过程:路由搜索和路由维护[18]。

路由搜索:当节点 S 向节点 D 发送数据时,它首先检查缓存是否存在未过期的到目的节点的路由,如果存在,则直接使用可用的路由,否则启动路由搜索过程。

当源节点要向目标节点发送一个数据包的时候,源节点将到达目的节点的源路由地址序列放在数据包的包头之中,一般情况下,发送节点可以在以前获得的路由缓存中得到适当的源路由。如果没有发现到达目的节点的路由,那么发送节点将会启动路由搜索过程获得到达目的节点的路由。例如,在图 3-3 中,节点 A 想获得到达节点 E 的路由,节点 A 发起的路由请求过程将会按照下面的过程来进行。首先,节点 A 广播一条“路由请求报文”,在节点 A 的无线传输范围之内的节点都能够接收到这条报文。节点 B 收到了这条路由请求报文。每条路由请求报文中包括了源节点的地址和目的节点的地址。另外还包含了一个由源节点指定独特的路由请求 ID。路由请求报文中还包含了转发过这条路由请求报文的节点的地址序列。当一个节点接收到了这条路由请求报文之后,如果这个节点就是目的节点,那么它向源节点返回一条路由应答报文。路由应答报文中包含了路由请求报文中的地址序列。当源节点接收到了路由应答报文之后,它将获得的路由存储在路由缓存之中。用来发送到达目的节点的报文。

如果这个节点最近接收过这个源节点发出的具有相同的地址和路由请求 ID 的路由请求报文,或者是这个节点的地址已经在这个路由请求报文之中了,那么就丢弃这条路由请求报文,不作任何其它处理。

否则,这个节点就将自己的地址添加到这条路由请求报文的地址序列里,并且继续广播这条报文。在这个例子中,节点 B 接收到这条路由请求报文之后,继续广播这条路由请求报文,然后节点 C 接收到这条路由请求报文,继续这样做,直到这条报文到达节点 E。节点 E 接收到这条路由请求报文之后,向节点 A 返回一条路由应答报文[19]。

当发送节点启动路由搜索过程的时候,发送节点在本机的缓存保存了一份待发送数据包(引发路由请求报文的数据包),这个缓存被叫做“发送缓存”。这个缓存中存放了一些由于没有到达目的节点的源路由而没有被发送出去的数据包。每个数据包对应一个定时

器，当定时器超时的时候，就将这个数据包丢弃。为了保证发送缓存不被溢出，通常采用 FIFO 队列作为辅助。如果队列满了，那么即使有的数据包的定时器还没有超时，这个数据包也会被丢弃。

当节点的路由缓存中有数据包时，这个节点应该间歇性的向这个数据包的终点地址发送路由请求。然而，针对同一个地址的路由请求必须是有限制的，因为这个目的节点在当前可能是不可到达的。在特殊情况下，由于无线传输范围的限制和网络中节点的移动，网络可能在某段时间内分割成了若干个部分。所以有时候根本找不到到达数据包目的节点的路由。由于不同网络之间节点的移动模式以及节点密度的不同，网络被分割的现象在一些网络中可能只是偶尔出现，在另一些网络中也可那会经常出现。

如果网络已经被分割，并且源节点和目的节点分别在被分割的不同的子网之中。那么发起新的路由搜索过程会在源节点所在的子网中产生大量的无效的路由请求报文。为了减少这种情况的路由搜索导致的路由开销，源节点应该采取指数退避算法来限制路由请求报文的发报频率。当向一个目的节点发送了一条新的路由请求报文之后，下一次发送路由请求报文的间隔应该是这次间隔的一倍，依次类推。如果源节点要向某目的节点发送普通数据包的频率超过了对这个节点发起路由请求的频率，那么发往这个目的节点的这些数据包应该被缓存起来。直到收到路由应答报文为止。在路由搜索过程的间隔超时之前，不允许再次向同一个目的节点发送路由请求报文。

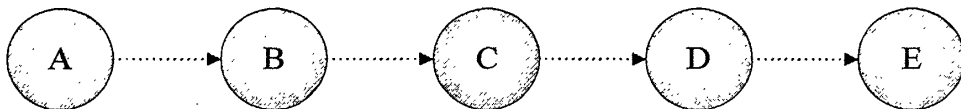


图 3-3 路由搜索过程

3.3.2 DSR 路由维持机制

当使用一条源路由发出或者转发一个数据包时，每个传输这个数据包的节点负责确认数据包从这个节点传输到下一跳节点的链路的有效性。如图 3-4 所示，节点 A 应用经过中间 B, C, D 的源路由向节点 E 发送一个数据包。这种情况下，节点 A 负责 A 到 B 的链路，节点 B 负责 B 到 C 的链路，节点 C 负责 C 到 D 的链路，节点 D 负责 D 到 E 的链路。

通过一种逐跳的确认机制可以保证链路的可用性。在无线网络中，通常情况下，这种确认机制不会带来任何的开销。在使用标准的 MAC 层协议的情况下，数据链路层的确认帧就可以完成对链路的确认。在混杂模式下，可以用“被动确认”的方式，也不会带来任何

确认开销。例如在图 3-4 中, 当节点 B 转发了一个节点 A 到节点 E 的数据包后, 它将这个数据包缓存起来, 节点 C 如果接收到了这个数据包后, 继续向 D 转发, 这时候 B 就可以收到这个数据包, 并且与缓存起来的数据包对比, 如果相同, 那么就可以确认从节点 B 到节点 C 的链路是可用的[19]。

如果网络中无法实现内在的确认机制, 那么传输数据包的节点可以发起一个 DSR 协议本身的确认请求。收到这个确认请求的下一跳节点向发出这个请求的上一跳节点返回一个确认应答报文。如果两个节点之间的链路是双向链路, 那么就直接将这个确认应答返回给上一跳节点。如果两个节点之间的链路是单向链路, 那么收到确认请求报文的节点就在路由缓存中查找一条到达上一跳节点的路由, 用这条路由返回确认应答报文。当一个节点从它的邻居节点收到了一条确认应答报文之后, 这个节点在一段时间内将不向这个邻居节点发送确认请求报文。这段时间的选择取决于网络中节点的移动模式和无线传输范围。

DSR 协议中每个确认请求对应一个定时器, 如果一个节点发出一个确认请求报文, 在定时器超时时间内没有确认应答报文返回, 那么这个节点将重新向这个邻居节点发起一个确认请求。当然, 确认请求报文重传的次数应该是有限的, 在协议的实现中, 应该根据具体的情况, 确定一个确认请求的最大的重传次数。确认请求可以作为一个单独的数据包来发送, 也可以在捎带的普通的数据报文中发送。

当一个节点向它的邻居节点发送的确认请求报文达到最大重传次数后, 如果还是没有确认应答报文返回, 那么这个节点就认为它和邻居节点之间的链路已经“断开”了。这个节点应该向所有通过这条链路传递数据包的节点发送一条路由错误报文。在图 3-4 的例子中, 节点 C 在向节点 D 多次发出确认请求报文后, 如果没有收到从 D 返回的确认应答报文, 那么节点 C 将向节点 A(以及所有通过节点 C 到节点 D 的链路发送数据包的节点)返回一条路由错误报文。节点 A 接收到了这条路由错误报文之后, 从路由缓存中删除这条断开链路。对于因为这条断开链路而丢失并且需要重传的数据包交给上层协议来处理。对于节点 A 的发送缓存中需要向节点 E 发送的其它数据包, 如果路由缓存中存在到达节点 E 的其他路由, 那么这些数据包就通过这条路由发送给节点 E。否则节点 A 应该对节点 E 启动新的路由搜索过程。

当拯救一个数据包时, 必须在数据包中维护一个计数来限制数据包被拯救的次数, 这样可以防止数据包被无止境的被拯救下去。否则, 这个数据包可能陷入一个路由环路中。因为如果没有次数限制, 一个节点可能会不停重复的拯救某个数据包, 并且某些节点之间可能会重复的彼此代替数据包中的路由。作为一个中间节点, 通过路由维护的方法检测到

了传输这个数据包的下一跳链路已经断开，这个节点也应该向这个数据包的源节点发送一条路由错误报文，通知源节点从这个节点开始的下一跳已经断开了。并且这个节点应该在拯救这个数据包之前向源节点发送路由错误报文。

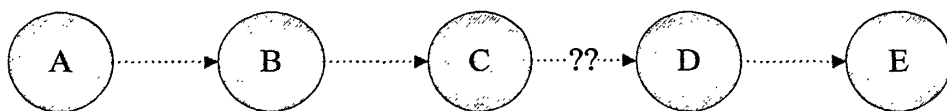


图 3-4 路由维护过程

3.3.3 DSR 路由搜索其他机制

当一个节点在转发一条报文或者监听到一条报文时，它可以从这条报文中提取有用的路由信息存储到自己的路由缓存之中。路由信息的有效性取决于物理媒质的方向性特征以及 MAC 层协议的特点。这主要包括三种可能性：

网络中的链路经常只能工作在单向的状态下，网络中应用的 MAC 层协议能够在单向的链路状态下工作。网络中的链路有时会临时的工作在单向链路状态下，但是这种单向性的约束不是持久的，几乎所有的链路在物理上都是双向的。并且，网络中的 MAC 层协议可以在单向链路下工作。网络中的 MAC 层协议只能工作在双向链路状态下。例如，在 802.11 协议中发送方需要从接收方返回链路层确认，并且需要发送方和接收方交换 RTS 和 CTS 报文。所以它只能工作在双向链路状态下。

在上面所描述的第一种情况下，普通数据包的源路由信息，路由请求报文中的路由记录，以及路由应答报文中的路由信息都可以被这条报文“前进”方向上的所有节点所获取。无论这个数据包是一个目的地址为这个节点的数据包，或者是一个广播包，还是这个节点通过混杂模式监听到的数据包，这个节点都应该将接收到的数据包中的有用的路由信息提取出来，放在节点的路由缓存之中。但是需要注意的是，因为链路是单向工作的，所以报文中的反向的链路是不应该被缓存起来的。

在第二种情况下，网络中的链路有时会临时的工作在单向链路状态下。此外，如果有节点 X 监听(通过混杂接收模式)到了一个 C 正在传输的从节点 A 到节点 E 的数据包，节点 X 也应该将所有的链路缓存起来，包括从节点 X 到节点 C 的链路。

在最后一种情况下，MAC 层协议本身要求链路是双向的，所以前后两个方向上的链路都应该被缓存。但是有一种情况是例外的，如果报文中包含路由应答选项，并且路由应答选项中的地址序列不包含这个节点的地址，那么就不应该保存这个地址序列中的链路信

息。

当一个节点接收到了一条路由请求报文，并且这个节点不是这条路由请求报文的目标节点。这个节点将会查看自己的路由缓存，搜索到达目标节点的路由。

如果找到了到达目标节点的路由，那么这个节点将向源节点发送一条路由应答报文，并且不继续广播这条路由请求报文。这个节点将路由请求报文中的地址记录和从这个节点搜索出来从这个节点到目标节点的路由连接起来，作为路由应答报文的地址序列。然后将这条路由应答报文发送给源节点。

3.4 DSR 协议所存在的缺陷

相对于周期更新的路由协议，由于没有周期性的广播信息，DSR 协议的协议开销比较小，而且分组投递率高，较适合较大规模的网络，但是 DSR 协议的网络延迟比较大。相对于其它按需更新式路由协议，DSR 协议还是具有较高的分组投递率和较低的协议开销，这得益于 DSR 使用缓存技术和混杂接收方式侦听机制。由于 DSR 协议是按需更新式路由协议，所以，网络节点的移动速度和网络分组发送率的大小都会对 DSR 协议性能产生比较大的影响。在相同分组发送率的情况下，移动节点速度越快，网络拓扑结构变化就越快，路由信息的更新需求也相应的大，因此，协议开销将随着网络中移动节点速度的增加而增加；若在节点移动速度相同的情况下，网络的分组发送率越低，DSR 通过分组交换获得的路由信息相应减小，路由缓存的更新更多需要路由发现来完成，因此，低分组发送率同样增加协议开销。所以，随着节点移动速度的增加和分组发送率的降低，DSR 协议的性能也会随之降低。因此，虽然 DSR 协议相对于众多路由协议有比较良好的表现，但是还不能真正适应 Ad Hoc 网络在实际中的应用，同样的，这一方面表明 Ad Hoc 网络对于路由协议的要求很高，另一方面也表明，DSR 还是不够完善，待改进之处还是很多的。

按需机制和侦听：DSR 是一种典型的按需路由算法，只有在移动节点需要寻找路由时才发送路由发现分组，在等待路由发现的路由应答分组才能将数据分组转发出去。因此按需机制对于快速的网络拓扑变化之应变就显得慢了。如果数据分组发送率比较高，可以依赖侦听机制通过处理数据分组获得路由信息来及时更新路由缓存，如果数据分组发送率比较低，路由缓存就不能得到及时的更新，更多的就依赖路由发现机制。同样，移动节点移动速度较快的情况下，通过路由发现和侦听进行更新路由缓存的速度将跟不上网络拓扑变化的速度，特别是通过侦听获得的路由信息更多的是过期陈旧的，通过这些路由信息转发分组，会造成分组转发失败以及较大的网络延迟，还会产生大量错误分组，增加网络开销

[20]。

另外, DSR 协议具有分组开销过大的缺点。由于采用了源路由机制, 每个被转发的数据分组携带了额外的路由信息开销, 整个分组占用的资源比一般的分组占用的资源大, 移动节点在发送和转发这种分组时会产生额外的开销, 这个额外的开销增加了无线带宽的利用率, 增加了每个分组延迟时间。

基于跳数: DSR 协议目前还是基于最小跳数的路由协议。基于最小跳数意味着同样转发一个分组占用最少的移动节点资源和处理时间, 使得分组转发更具效率。但有时候必须考虑这样的问题: 在某些区域内移动节点比较稀少, 由于节点之间距离较远, 节点之间容易移动出彼此的无线覆盖范围, 基于最小跳数的 DSR 路由更容易失效。另一方面, 移动节点转发数据分组时, 都以跳数最小的路由为优先, 在区域节点比较稀少的情况下, 会同时有很多节点向同一节点转发分组, 这将造成冲突[21]。

路由缓存的策略: 路由缓存是 DSR 协议的重要组成部分。路由缓存策略的优劣将直接影响到分组投递率、分组平均延迟等等的网络参数。大致上, 路由缓存策略分为缓存容量、缓存超时和缓存结构三个部分。缓存容量的选择会影响到路由信息的完整性和路由的查找时间, 并不是路由缓存容量越大越好, 理论上来分析, 过大的缓存容量会增加路由查找的时间从而降低路由协议的性能。DSR 协议的路由缓存容量问题还是一个有待研究的问题。路由超时: 规定一个超时时间, 路由信息从插入到路由缓存中删除, 同时路由信息的被使用将延长该路由信息的超时时间, 超时时间是一个比较难以确定的参数, 应该在不同的情况下采用不同的超时策略, 目前来看, 还没有一个比较好的超时策略, 在很多的研究中, 仅仅设定了一个固定值来进行仿真研究。路由的缓存结构, 目前的 DSR 协议路由缓存结构采用的是路式缓存, 路式缓存中存放了从该节点到达目的节点的完整路径, 使用路式缓存的优点是实现简单, 能够在最大程度上保证每条路径中不存在重复节点, 而且路由缓存的查找和其它操作相对比较简单。但是使用路式缓存有无法利用已有的路由信息构造潜在的其它路由信息, 路由缓存结构还有一种叫做链式缓存, 链式缓存能够利用已有的路由信息构造潜在的其它路由信息, 但从链式缓存查找和操作比较复杂, 每使用一条路由必须先经过计算取得最优解, 势必占用移动节点更多能源和系统资源。但是链式缓存的优点是明显的, 将是路由缓存结构的发展方向。

3.5 DSR 协议小结

DSR 协议是源路由协议, 具备源路由的优点; 保证路由无环路; 不要求转发分组的中

间节点存储路由信息；允许节点侦听数据分组，缓存路由信息。DSR 协议的路由控制开销有两类：来自路由建立和路由维护的开销以及业务分组中的源路由分组头的开销。当网络规模较大转发数据分组的节点较多而数据分组较小时，源路由分组头的开销问题就更突出。DSR 协议的其他优点：节点仅需要维护与之通信的节点的路由，减少了协议开销；使用路由缓存技术减少了路由建立的开销；支持到目的节点的多跳路径；另外，DSR 协议还能正确地计算出非双向链路的路由。

第 4 章 基于 QOS 的 DSR 路由数学模型

4.1 数学模型描述

DSR 协议是一种按需的路由协议,可以有效的降低网络由于路由更新所带来的网络开销;通过仿真验证,DSR 协议具有适应性强,性能高的特点;IETF 已经给出了 DSR 协议的草案,DSR 协议将具有很好的应用前景。虽然 DSR 协议相对于其他现存的协议具有很多的优点,但通过仔细的分析,发现它也存在一些不足之处[22]。

DSR 协议利用的是基于最小跳数的选路准则。DSR 是一种源路由协议,使用 DSR 协议的每个节点都拥有一个路由表,在路由表中存储了到每个目的节点多条路由。当某个节点需要向其目的节点发送数据包时,它会首先检查自己的路由表,看看其中是否已经拥有到次目的节点的路由。如果没有,则启动路由发现机制;如果有,则按照某种选路准则选择一条最优的路由进行使用。最小跳数准则就是 DSR 协议默认的选路准则即从路由表中选择一条到目的节点的,跳数最小的路由进行使用。此准则的出发点是降低数据包的端到端的延时,降低数据包传输占用无线信道的时间,提高有限信道的利用率。但是,由于 Ad Hoc 网络的自身特点,并考虑到网络的 QOS 性能,最小跳数准则并不是一个很好的选路准则。第一,虽然最小跳数选路准则理论上可以降低数据包传输的延时,更有效的利用有限的带宽,但是在实际的 Ad Hoc 网络中,由于节点的移动性,并且因为 DSR 协议是一个按需的路由协议,路由的更新并不是即时的,所以最小跳数的路由不一定是最新,最稳定的,并且很有可能是过时的路由。因此,由于不稳定,甚至过时路由导致数据包的重发,路由重选或者路由发现过程等过程所带来的网络开销,数据包传输的延时,并不能很好的实现最小跳数选路准则的初衷。第二,从保证网络的 QOS 出发,数据传输的稳定性,远比微小的 ETE 延时的差异重要得多。因此,如何在不增加网络开销的前提下,以可以接受的网络延时为代价,选择出最稳定的路由的难题便提了出来。

由于移动性和资源有限性,在 Ad Hoc 网络中 QOS 路由一直是重要的问题,许多的学者也进行了长期的研究。但是许多的 QOS 也是针对某一个方面展开研究的。针对这种情况,我们提出了一种新的按需的提供 QOS 服务的路由协议,它被称为基于 QOS 的多目标规划 DSR 协议,它以 DSR 协议为基础,利用节点所处位置,计算链路稳定状态以及链路时延以提高路由可靠性的一种 Ad Hoc 网络路由协议[23]。

基于 QOS 的多目标规划 DSR 协议是一种按需源路由协议，它的基本机制与 DSR 协议较为相似。最大不同之处在于多目标规划协议针对 Ad Hoc 网络中容易出现链路失效导致网络性能下降的情况，网络时延长等缺点改进路由发现、路由维护策略，以提高路由的可靠性以及路由协议对网络移动性的适应能力。下面我们将对多目标规划协议分为三个主要的方面进行介绍。

4.2 网络稳定性分析

对于 Ad Hoc 网络来讲，由于网络拓扑结构的动态性，找到一条到达目的节点的最稳定的路由，对于保证网络的 QOS 服务是很重要的。因此，在选择路由时，如果能够知道路由表中每条路由的相对生存时间，那么，那条拥有最大生存时间的路由也就是在接下来的时间段内最稳定的路由，利用它就可以提供最好的 QOS 服务。（注：路由的生存时间是指某条路由有效的时间，即路由中的各个相邻节点能够保持链接，不运动出相互传输的最大有效距离的时间）。在 Ad Hoc 网络中，随着节点的移动，网络的拓扑结构会不断变化，当两个相邻节点间的距离大到一定程度时，发送端的信号将不能被接收端正确地接收，两个节点间的路由链路断开，此时两个节点间的距离即为最大有效距离。当路由链路失效时，必须重新发现新的路由。在这一过程中，会不可避免地出现路由时延增大、分组丢失地现象。为了解决这个问题，可以基于链路稳定因子算法（也可称最长生存时间算法）来选择路由。在 Ad Hoc 网络中，移动节点可以通过 GPS 或其他装置得到自己地位置和运动速度等信息，并每隔一定时间地时钟周期更新这些参数。设两个相邻节点为 i 和 j ，两个节点的坐标分别为 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) ，运动速度为 v_i 和 v_j 。将运动速度分解为 x 轴和 y 轴方向的分量，即节点 i 的运动速度为 (v_{ix}, v_{iy}) ，节点 j 的运动速度为 (v_{jx}, v_{jy}) ，则经过 t 时间后，节点 i 的坐标为 $(x_i + tv_{ix}, y_i + tv_{iy})$ ，节点 j 的坐标为 $(x_j + tv_{jx}, y_j + tv_{jy})$ 。

设 r 为两个节点间无线通信的最大有效距离，则根据已知两个节点坐标，当两个节点间的距离达到最大有效距离 r 时，有：

$$((x_i + tv_{ix}) - (x_j + tv_{jx}))^2 + ((y_i + tv_{iy}) - (y_j + tv_{jy}))^2 = r^2 \quad (4-1)$$

从此方程组可以解得 t ，令 t 为链路稳定因子，代表路由链路的稳定性。那么这个 t 就表示两个节点路由的最大有效时间，即在 t 时间后两个相邻节点间的距离会超过有效通信范围的最大值，路由链路将会失效。此 t 值也说明了两个节点间链路的稳定性， t 值越大，表示链路有效时间越长，链路的稳定性也越高。基于这个 t 值来选择路由，将获得比传统路由算法更大的路由稳定性，减少因路由由链路断开而导致重新寻找路由频率，减少路

由开销, 增加分组传输的可靠性, 提高网络的分组投递率, 降低时延[24]。

接下来, 我们可以利用以上的算法, 计算出一条路由中每两个相邻节点间链路的生存时间 $\text{time}[i]$, 在这一组 $\text{time}[i]$ 值中取最小值 $\text{Min}[\text{time}[i]]$, 则这个最小值就是此路由的最大生存时间 T_{\max} , 也就是说在接下来的 T_{\max} 时间间隔内, 此路由的各个相邻节点可以保持正常通信, T_{\max} 是可以利用本路由实现源节点和目的节点有效通信的最大时间。例如: 图 4-1 中, 源节点为 A, 目的节点为 E, 建立的路由为 A-B-C-D-E。A-B 链路的有效时间为 10 个单位, B-C 链路的有效单位为 9 个单位, C-D 链路的有效单位为 12 个单位, D-E 链路的有效时间为 13 个单位。运用链路稳定算法可知, A-E 之间路由的生存时间为 9 个单位, 即 9 个时间单位后, 此条路由将失效, 将要重新寻找路由。

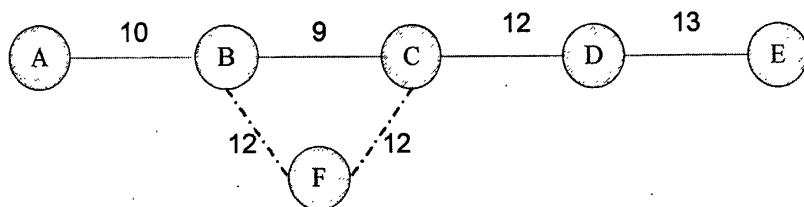


图 4-1 链路生存时间图

分析: 以上的链路稳定路由算法可以引起以下两个方面的分析: 1. 在计算一条链路每两个相邻节点间链路的生存时间 $\text{time}[i]$ 时可以发现。当 $\text{time}[j]=T_{\max}$, 此时的链路 j 为瓶颈链路, 在图 4-1 中的瓶颈链路为 B-C, 当此条链路的生存时间发生改变时将会影响整条路由的稳定性。2. 当某两个节点成为瓶颈节点时, 我们可以在其邻近节点搜寻是否可以找到替换节点, 使得稳定性得到提高。例如, 在上图中, 将路由改变为 A-B-F-C-D-E。这样可以将链路的有效时间提高到 10 时间单位。如果新的路由跳数不变或者少于旧的路由则替代旧的路由, 若新节点的跳数增加, 必须在有效时间和最小跳数上折中处理。

4.3 动态时延估计

在 Ad Hoc 网络中, 从源节点 A 发送数据包到目的节点 D, 各条链路在某时刻的时延在图 4-2 所示。如果采用 DSR 路由协议, 则会选择路由 A-B-C-D, 因为这条路由的跳数是整个网络中最小的, 源节点通过三跳路由可以到达目的节点。但是在一些对时延要求非常高的场合, 这样的路由方案并非为最优选择策略。在一些视频会议中, 希望网络时延越小越好。在路由 A-B-C-D 中, 时延为 55 个单位; 而 A-E-F-C-D 这条路由的跳数为 4 跳, 但是在动态时延仅为 50 个单位, 因此在一些时延要求较高的场合, 这条路由应该更加合适[25]。

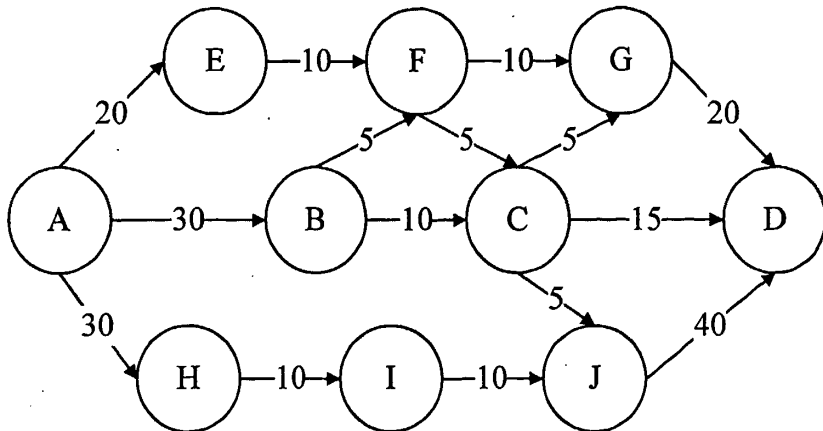


图 4-2 动态时延图

可以在路由发现和路由维护两个阶段加入动态时延约束的 QOS 路由算法。动态时延是评判无线传感器网络路由的一个重要指标,时延的大小很大程度上是由传输距离与中间节点处理数据包的时间决定的。对于一条有 n 个中间节点路由,此 n 个中间节点的坐标为 $(x_i, y_i) i = 1, 2, \dots, n$, 源节点的坐标为 (x_0, y_0) , 目的节点为 (x_{n+1}, y_{n+1}) , 则从源节点到目的节点的时延 D 可以表示为:

$$D = k_1 \sum_{i=0}^n \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} + k_2 n \quad (4-2)$$

其中, k_1 表示在传输路径上的时延因子, k_2 表示在节点处理上的时延因子。这两个数据都可以通过对已有数据进行拟合得到。

通过上述两个方面的分析,我们已经深入的了解了优化函数的两个指标:稳定性指标和动态时延指标。我们下面的工作就是综合两个指标得到新的 DSR 多目标规划模型。

4.4 多目标数学模型

在通常的路由协议中是没有考虑 QOS 参数的,因此在某些对 QOS 参数有一定要求的应用中,路由协议效率可能比较低。其实可对现有的路由算法进行改进,比如每个节点在其路由表中增加相应的 QOS 信息,当进行路由发现时,节点计算相应的 QOS 参数值,最后可找到具有最佳 QOS 参数值的路径。通过这种带有 QOS 信息的路由,进行有效的控制,能防止网络过载,或降低网络中数据传输时延,并保持负载均衡[26]。

QOS 参数一般可分为可加性参数,可乘性参数和最小化参数共 3 种类型:可加性参数,

在此协议中，动态时延就属于此种参数；可乘性参数；最小化参数，在此协议中的稳定性指标就属于此中参数。

为了使 DSR 协议能够支持 QOS 路由，怎样评价一条路由的优劣，关键是设计一个综合评价指标。该指标应该能反映被选路由的性能，也是作为选择路由的指标。在改进的 DSR 协议中，发现和维护进程中使用了三个度量。他们分别是：路由稳定性指标 $W(P)$ ，动态时延指标 $D(P)$ 。动态时延指标值越小，性能越高，对此我们进行倒数处理；稳定性指标值越高，性能越高。我们定义了综合评价指标：

$$C(P) = w_1 \times D(P) + \frac{w_2}{W(P)} \quad (4-3)$$

$C(P)$ 代表选择路由 P 后的综合评价。其中 w_1, w_2 为各个指标的权重。由综合评价指标可知，若源节点、目的节点对之间存在多条路径， P_1, P_2, \dots, P_N 。如果 $C(P_i) > C(P_j)$ ，那么我们将取路由 P_j 作为路由。

4.5 协议描述

改进的协议应用了在 DSR 路由协议中的源路由机制，并对 DSR 协议进行了扩展，在路由发现和路由维护中加入了 QOS 特征，即链路稳定因子和动态时延约束。改进协议主要分为两个部分：路由发现和路由维护。路由发现过程用于帮助源节点获得到达目的节点的路由，路由维护过程用于监测维护当前及将来路由链路的可用情况[27]。

4.5.1 路由发现策略

基于 QOS 的 DSR 路由协议模型的路由发现过程与 DSR 的相似，是在 DSR 的原有机制上扩展了链路状态预测、动态时延等模块。扩展的目的是为了在路由发现过程中针对 DSR 路由协议不能提供 QOS 服务保障的缺陷，加以改进为不同的场景需求提供不同的服务。综合考虑 QOS 参数中的稳定性参数、动态时延参数等，建立多目标规划模型形成路由代价指标为 Cost 值。

基于 QOS 的 DSR 路由协议模型的路由请求发送与 DSR 的基本相同，在源节点要向目的节点发送数据时，首先查找路由缓存中是否存在达到目的节点的路由，如果不存在，则产生一个路由请求分组。路由的建立通过广播路由请求分组进行。在确定一定时期内未收到过该路由请求后，判断链路代价是否小于规定的链路代价，这里的链路代价即前面提到的

链路状态 Cost 值。如果链路代价小于规定的链路代价,说明该链路非常不可靠,使用该链路的路由可能付出较高的代价(如链路不稳定或者时延较长),因此应该丢弃该路由请求。否则,节点对该路由请求中记录的路由生命期进行更新。

这个过程对 DSR 中使用的路由发现过程进行了扩展。在路由请求分组中增加了新域:时延、时间戳和链路稳定因子以及计算链路稳定因子所需要的节点的位置和运动速度等信息。在路由缓存中增加了新的属性:链路稳定因子和时延约束值。当某一源节点要向某一目标节点发送数据时,过程如下:

(1)源节点 S 首先检查它的路由缓存。如果有满足 Qos 约束的到达目的节点的可行路径,则源节点在可行路径中根据综合评价函数选择最佳路径发送数据分组。如果在路由缓存区中没有可行路径,则节点将启动路由发现过程,发现路由请求分组。

(2)源节点 S 广播对目的节点 D 的路由请求,请求分组里包含请求时延、链路稳定因子参数,及本节点的位置、速度和运动方向等信息。

(3)当其它节点接收到路由请求分组时,如果它不是路由发现的目标,则节点首先将收到的路由请求与它以前收到的路由请求进行比较,检查它们是否是由同一个发起者发出的具有相同请求标识和目标地址的请求,如果是说明收到的是重复请求分组,则删除此重复分组,否则检查时延约束。

(4)中间节点检查时延请求是否满足。如果不满足,则丢弃此分组。如果满足,则说明沿此节点方向为可行路径。再计算路由的综合评价指标。

(5)当路由分组请求到达目的节点后,目的节点将得到满足本次时延请求的所有可行路径,然后向源节点发送路由响应分组,路由响应分组里包含路由路径的综合评价指标。

(6)源节点 S 收到能到达目的节点 D 的各条可行路径后,计算各条路由的时延值,然后保存在路由缓存里,每个缓存条目都有相应的链路稳定因子和传输时延值。

(7)源节点 S 在满足本次时延请求的可行路径中选择最佳路径作为数据分组使用的路由,开始发送数据分组。

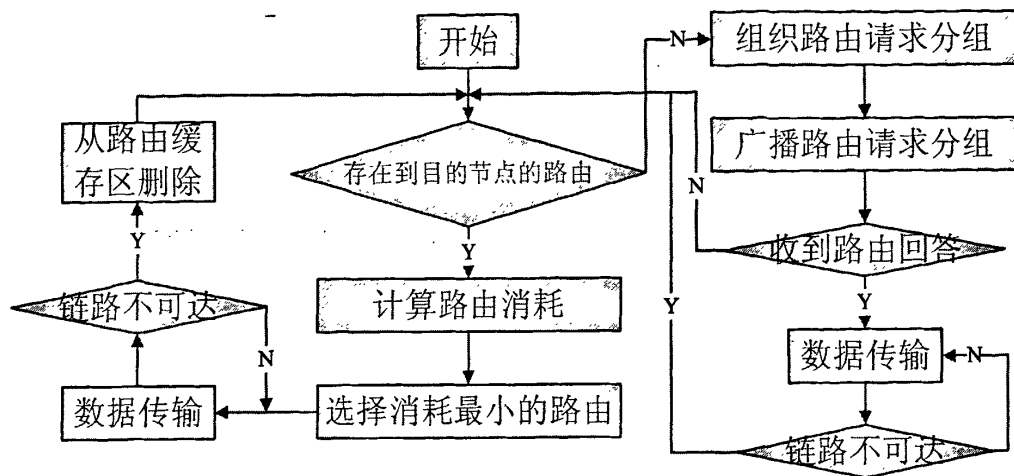


图 4-2 路由发现算法图

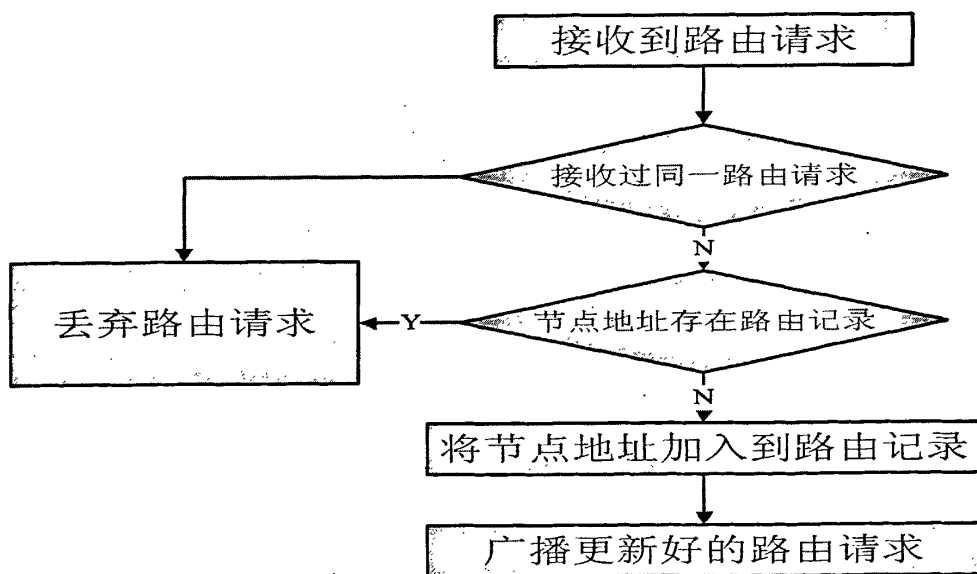


图 4-3 中间节点算法图

4.5.2 路由维护策略

原有 DSR 协议的路由维护是一种被动式的维护过程，只是在某一段链路完全失效，分组不能被发送到下一跳节点的情况下，由失效链路的前驱节点向业务源节点发送路由错误分组通知当前的路由失效，然后源节点再重新查找路由缓存或是重新进行路由发现。这种完全滞后的被动维护机制很容易对网络的数据传输造成严重的影响，尤其是对 TCP 业务。

由于整个维护过程是在路由完全失效后进行的,这时数据分组已经无法进行传送,上层的 TCP 协议不得不将自己的发送窗口减小,直到路由协议找到新的路由进行传输时,才能逐渐增大自己发送窗口,这一点对于 TCP 业务的吞吐率、延迟等都会产生很大的影响,从而大大降低整个网络的性能。为了能够增强网络的稳定性,达到提高网络性能的目的,我们采用了一种新的路由维护机制,其主要思想就是当路由上的某一条链路进入危险期时,主动进行路由维护,由发现危险链路的节点向业务源节点发送路由警告,通知源节点寻找新的路由来替换当前路由。这样就可以提前进行路由切换,减少路由失效的次数,从而在很大程度上避免由于路由失效造成的不良影响。

在路由维护阶段,协议监测路由链路的稳定性变化,过程如下:

(1)源节点获得到达目的节点的可行路径后,按照此路由发送数据分组。

(2)中间节点收到数据分组后,检查稳定性约束是否满足,如果不满足,则在转发数据分组后向源节点发送路由错误分组,通知源节点现在的稳定性请求不能得到满足。如果满足现在的时延约束,再转(3)。

(3)中间节点根据计算稳定性约束是否满足,如果不能得到满足,则向源节点发送一个路由错误分组,使源节点重新选择一条满足稳定性的新路径作为可行路径。如果满足稳定性约束则继续向下游节点转发数据分组。

(4)当源节点收到路由错误分组时,会从自己的路由缓存中删除相应的路径。然后源节点从路由缓存区中寻找能到达目的节点的别的可行路径,如果存在则再可行路径中选出新的最佳路径来发送分组,否则源节点将启动到目标的一个新的路由发现过程。

主动式路由维护算法的主要目的在于改进 DSR 协议中完全滞后的被动维护机制,降低由于路由失效造成得网络性能方面的损失,提高路由协议在应对网络频繁变化方面的能力。这样改进了原有的滞后维护动作,将整个维护过程提前到当前路由进入危险状态但又未完全失效的时期进行,可以在较大程度上减少了路由失效的次数,降低了路由失效对网络性能方面的影响,对提高路由协议的可靠性也是有所帮助的。

4.6 协议小结

针对 DSR 协议可用带宽低和失效频繁的缺点,我们改进了 DSR 路由协议,提出了新的路由协议算法。新的算法中,我们将 DSR 中最短路径的选择标准转换成最小消耗。其中最小消耗指标综合考虑了端到端传输的时延指标、链路稳定性指标、最小路径指标。针对不同的 Ad Hoc 场景,可以调整各个指标的权重,以符合各种场景的需求。但是其中还有许

多可以改进的因素，本章提出的多目标规划模型只考虑了两个 QoS 参数，但在实际的环境中，可以针对不同的情况，考虑更多的 QoS 参数。不过过多的参数会使计算的复杂度提高，因此往往 QoS 路由协议都是和分簇路由协议结合使用。因为在分簇网络中，可以降低参加 QoS 计算的节点数从而减少计算的复杂度。另外在多目标规划模型中，将多个单目标整合成一个多目标公式时，我们采用了简单的线性叠加，这只是多目标求解方法中的一种，可以采取其他的形式进行计算。

第 5 章 网络仿真分析

5.1 小规模网络的路由算法仿真

为了进一步比较 DSR 协议与多目标路由协议的性能,我们构建了的 MATLAB 仿真环境。有 5 个标号为 1 至 5 的节点在 1km 的正方形空间内无规则运动,一跳的最远距离为 500m。当有业务从节点 1 需要传递到节点 5 时,此时两两节点间的距离、动态时延和生存时间如下表所示。这些数值都是通过 MATLAB 仿真程序计算得到。

表 5-1 某时刻两两节点间的距离(单位: m)

节点坐标	1	2	3	4	5
1	0	120	100	220	493
2	120	0	88	300	439
3	100	88	0	420	210
4	220	300	420	0	342
5	493	439	210	342	0

表 5-2 某时刻两两节点间的动态时延(单位: ms)

节点标号	1	2	3	4	5
1	0	29	82	10	102
2	29	0	23	53	43
3	82	23	0	43	20
4	10	53	43	0	23
5	72	43	20	23	0

表 5-3 某时刻两两节点间的生存时间(单位: min)

节点标号	1	2	3	4	5
1		1.6415	0.6123	2.003	1.101
2	1.6415		3.8175	4.0968	3.9886
3	0.6123	3.8175		0.5566	0.9
4	2.003	4.0968	0.5566		1.8
5	1.101	3.9886	0.9	1.8	

运行 DSR 协议,可以得到最终的路由为 1-5,此路由跳数是最少的,但是此时的动态时延为指标为 102ms,对于国际会议等对于时延指标十分严格的场合时不适用的。因此,运用多目标规划模型,加重时间延迟的权重,重新搜索路由,得到新的路由 1-4-5,当加重稳定性时延的权重,重新搜索路由,得到新的路由 1-3-5。

5.2 大规模网络的路由算法仿真

5.2.1 网络连通性分析

为了进一步比较 DSR 协议与多目标路由协议的性能差异,本文构建了不同的仿真环境。有 100 个标号为 1 至 100 的节点在 10km 的正方形空间内无规则运动,一跳的最远距离为 1000m。节点的初始位置如图 5-1 所示。

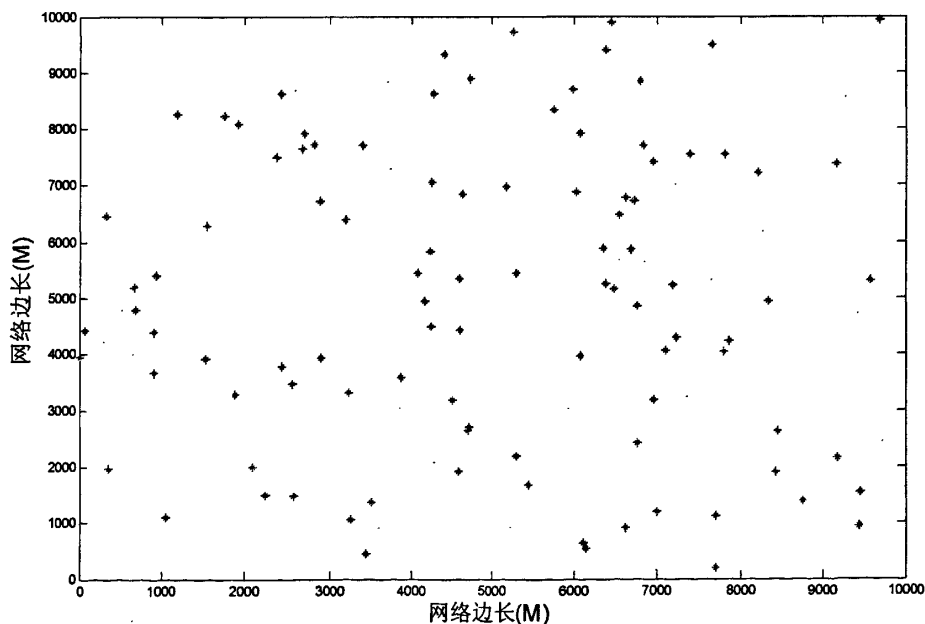


图5-1 初始节点位置分布图

为了分析网络性能,仿真时采用时间离散化,仿真了 500 个时间单位。在任意时刻,节点的坐标可以通过前一时刻的节点坐标以及速度确定。在任意时刻节点的坐标,以及两节点间的距离可以由以下两公式确定[28]。

$$\begin{cases} x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \cos \theta_i(t) \\ y_i(t) = y_i(t-1) + v_i(t) \sin \theta_i(t) \end{cases} \quad (5-1)$$

$$l_{ij}(t) = \sqrt{(x_j(t) - x_i(t))^2 + (y_j(t) - y_i(t))^2} \quad (5-2)$$

我们定义了节点连通性矩阵 $D(t) = (d_{ij}(t))_{N \times N}$ ，其中元素为二值元素。如果元素为“1”，表示两点间可以之间通信，如果元素为“0”，表示两点间不能之间通信。

$$d_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & l_{ij}(t) \leq R \\ 0 & l_{ij}(t) > R \end{cases} \quad (5-3)$$

我们用 $D^{(i)}(t)$ 表示矩阵 $D(t)$ 的 i 次方，因此我们可以定义网络连通矩阵 $D'(t)$ 。

$$D'(t) = \sum_{i=1}^{\infty} D^{(i)}(t) \quad (5-4)$$

如果其中元素为“0”，表示两点间无法通过有限中间节点进行通信。反之，如果 $D_{mn}^{(i)}(t)$ 为“1”，表示节点 m 和节点 n 经过 i 跳可以进行通信。

对网络初始的连通性能进行仿真，仿真图如 5-2 所示。在设定一跳范围为 1000m 的条件下，有 718 对节点可以两点间直接通信，有 262 对节点需要通过一个中间节点进行通信，有 272 对节点需要通过两个中间节点才能进行通信；在设定一跳范围为 1500m 的条件下，情况得到较大改善，有 1718 对节点可以直接通信，有 1330 对节点需要通过一个中间节点进行通信，有 1624 个节点需要通过两个中间节点才能够进行通信。

5.2.2 路由算法仿真

在网络仿真进行到100个单位时间时，我们三种网络环境进行仿真，比较路由选择策略的性能。此时路由请求到来，节点1和节点2之间需要建立路由，进行通信。首先计算出可以与节点1、节点2进行通信，并可能作为中间转发点的节点，如图5-3所示。

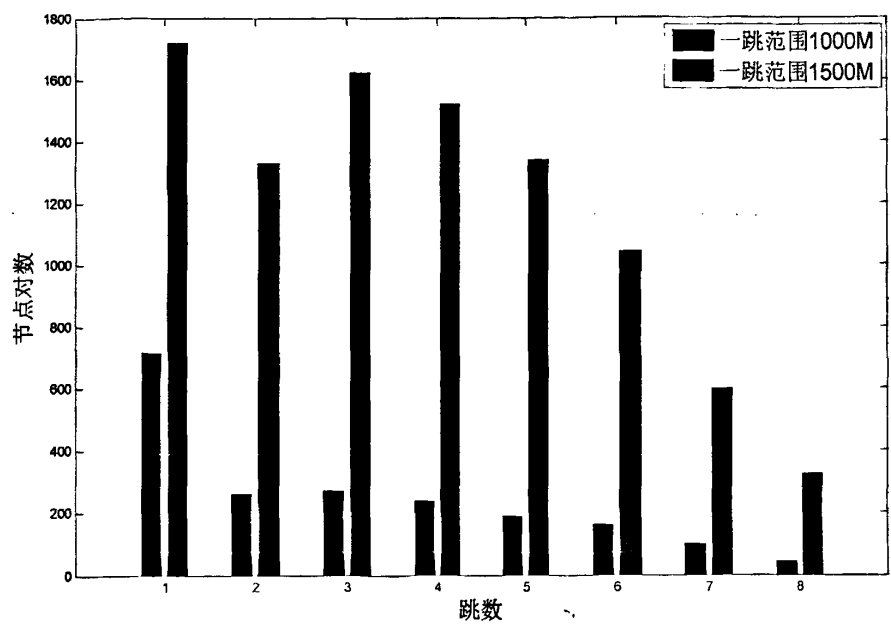


图5-2 初始网络连通性分析图

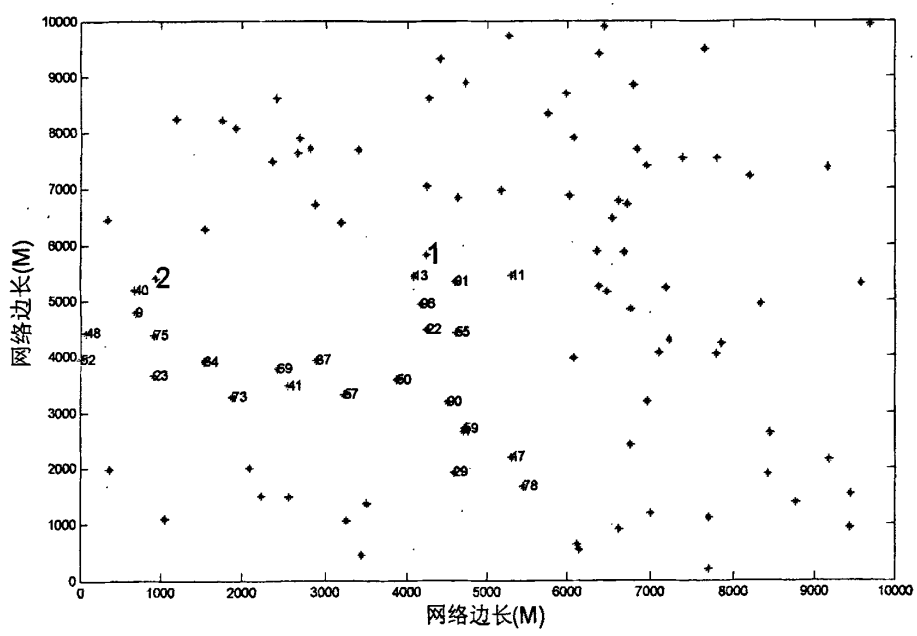


图5-3 网络分析图

运行DSR协议，即在选择路由的过程中采用最小跳数为指标。可以得到最终的路由为1-96-22-50-57-69-64-75-9-2，此时跳数最小仅为9跳，如图5-4所示。

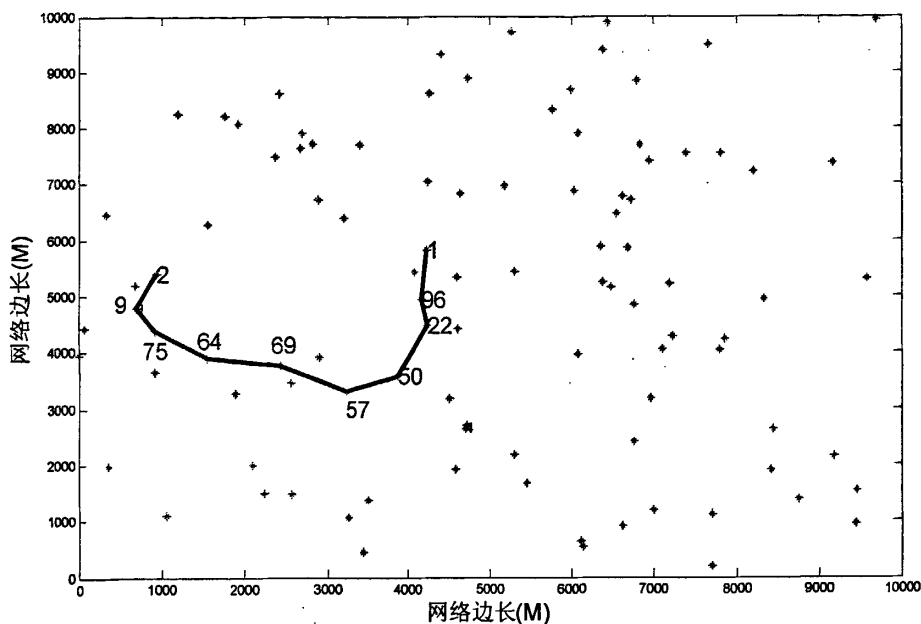


图5-4 DSR路由算法仿真图

采用基于DSR的多目标规划协议，在考虑QOS参数的基础上重新进行路由搜索。在多目标规划的公式中，将时延的权重定为“1”，将稳定性指标权重定为“0”。重新进行路由搜索，得到的路由为1-13-22-50-57-37-69-64-75-9-2，仿真图如5-5所示，此时的跳数为10跳。虽然此路由比DSR搜索得到的路由跳数更少，但是它能够得到最短时间延迟。

通过对于前面搜索得到的路由进行分析，发现节点为57与节点69之间的链路最不稳定，为整条路由的瓶颈链路。为了克服这个缺点，设定稳定性指标为“1”，将时延的权重定为“0”。重新进行路由搜索，得到路由为1-13-96-22-50-57-37-69-75-64-23-75-9-2，仿真图如5-6所示。

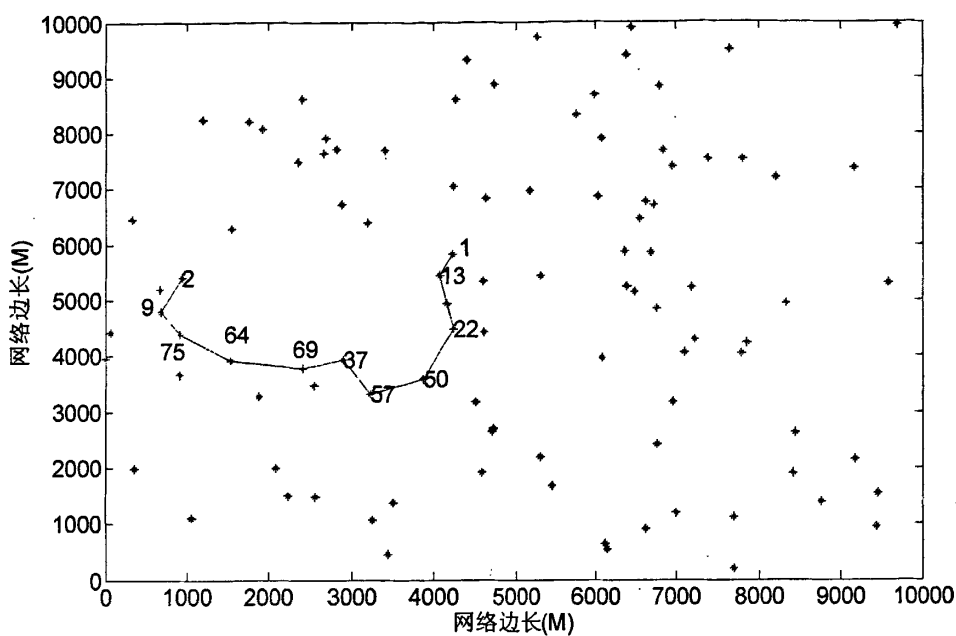


图5-5 最短时延算法仿真图

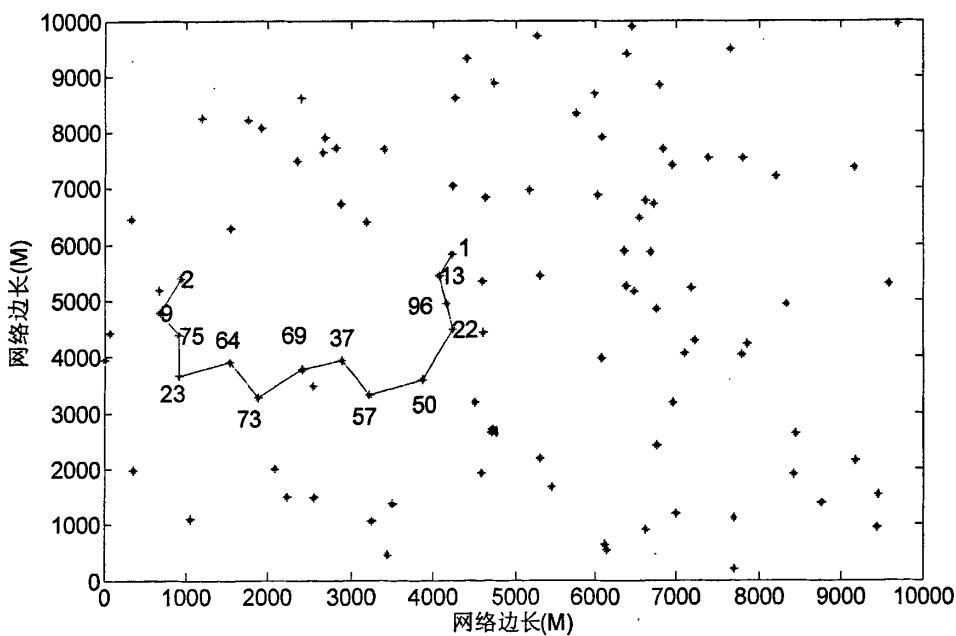


图5-6 最稳定性路由算法仿真图

由此可见,针对不同的业务量和不同环境的要求,我们需要设定不同的权重加以适应。这样可以使得网络达到最佳的效果,最大量的满足用户的需求。

5.3 仿真小结

由此可见,针对不同的业务量和不同环境的要求,我们需要设定不同的权重加以适应。这样可以使得网络达到最佳的效果,最大量的满足用户的需求。在基于 DSR 的多目标规划数学模型中,还需要考虑如何科学地确定权重。因为不同的权重,代表着不同决策者对不同 QOS 方面的看重程度,而且不同指标之间存在着数量级的差异,因此在权重确定时,首先需要对数据进行初始化处理,消除数量上的差异。在上述的多目标规划数学模型中,只表现了两个 QOS 参数指标,但是在实际的应用环境中,可以进行相应扩充。多目标规划的形式有很多,线性叠加只是其中的一种,决策者可以针对不同的应用环境加以改进。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

Ad Hoc 网络的 DSR 协议存在控制开销大, 链路失效的误判次数偏多、控制包传播延迟较长等缺点, 这导致它在传输业务过程中提供的可用带宽偏低、路由失效频繁、重新路由发现时间偏长, 使得上层业务丢包率偏高、延迟偏大。因而, DSR 协议对带宽和实时性要求都很高的实时多媒体业务的支持较差, 不适合传输实时业务。

为了让 DSR 协议能高更好的支持实时多媒体业务的传输, 我们对 DSR 协议进行了改进。针对 DSR 协议可用带宽低和失效频繁的缺点, 我们改进了 DSR 路由协议, 提出了新的路由协议算法。新的算法中, 我们将 DSR 中最短路径的选择标准转换成最小消耗。其中最小消耗指标综合考虑了端到端传输的时延指标、链路稳定性指标、最小路径指标。针对不同的 Ad Hoc 场景, 可以调整各个指标的权重, 以符合各种场景的需求。

由于资源的缺乏, 我们所进行的所有性能评价仿真规模都不大。针对多目标规划数学模型, 目标函数的建立还有待考虑。

Ad Hoc 网络无需基础设施而能自动组网, 是下一代网络的重要组成部分, 具有光明的应用前景。在 Ad Hoc 网络重的路由协议已经有了一些进展, 但是随着在 Ad Hoc 网络的迅速发展, 需要为多媒体和实时业务等应用提供 QOS 服务质量保证。而 QOS 路由协议则是提供 QOS 保障的关键。本文对 Ad Hoc 网络中的 QOS 路由协议进行了深入研究, 提出了能够提供 QOS 保障的路由协议。但是为了更好的提供服务质量保证, 还有可以进一步深入研究和改善的地方, 主要包括:

针对当前 Ad Hoc 网络状况的具体情况, 如何将这些 QOS 路由算法应用到实际当中, 在实际的 Ad Hoc 网络中实现, 这是值得继续研究的问题。将 QOS 路由算法与网络模型中其它各层的 QOS 算法相结合, 这样可以提供更好的 QOS 保证, 这也是可以进一步深入研究的问题。

6.2 展望

Ad Hoc 网络是一种全新的信息获取和信息处理、传输技术, 通常包含大量的可自组织成多跳无线网络的节点, 具有组网快捷、灵活, 且不受有线网络约束的优点, 可用于紧急

搜索、灾难救助、军事、医疗等环境中，具有广泛的应用前景。路由协议是 Ad Hoc 网络层的核心技术。在 Ad Hoc 网络中，节点能量有限，因此路由协议需要高效利用能量，同时传感器网络节点数目往往很大，节点只能获取局部拓扑结构信息，路由协议要能在网络信息的基础上选择合适的路径。

由于 Ad Hoc 网络节点的数目很大，通过平面路由协议寻找能够 QoS 保障的路由属于 Nondeterministic Polynomial-time hard(NP-hard) 问题。在这种情况下，很多学者提出了使用进化路由搜索算法来解决 NP-hard 问题，其中典型的有遗传算法、神经网络等。但是这些进化算法(如遗传算法)在实现搜索的过程中需要定义适应度函数、交叉变异准则等，具有较强的主观性并且可移植性不强。一般多目标规划模型在大型网络中搜寻能够提供 QoS 保障的路由是不可行的。我们可以通过动态聚类的方式以降低网络的计算量。

参 考 文 献

- [1] 张远, 刘洛琨, 郭虹, 卢欣. 移动自组网中的 Qos 保障及解决思路. 数据通信 2004(6):36-40.
- [2] 王英健, 武永华, 姚尹雄. 移动 Ad Hoc 网络的 Qos 保障技术综述. 计算机应用研究. 2004(4):36-40.
- [3] 徐彬辉, 周克琴. Ad Hoc 网络研究. 中国数据通信, 2002(7):66-70.
- [4] 全武, 宋瀚涛, 江宇红. Ad Hoc 无线网络及其路由选择协议. 计算机应用, 2002(6):26-28.
- [5] 马贺荣, 孙学斌. 无线 Ad Hoc 网络及其路由协议. 电信网技术, 2003(11):9-11.
- [6] 李云, 赵为粮, 隆克平, 吴诗其. 无线 Ad Hoc 网络支持 Qos 的研究进展与展望. 软件学报, 2004(12):1885-1893.
- [7] D.H.Conserver, A.M.Michelson, A.H.Levesque. Quality of Service Support in Mobile ad-hoc IP Networks.IEEE 1999
- [8] Frodigh, Johansson and Larsson. Wireless ad hoc networking-The art of networking without a network. Ericsson Review No.4,2000.
- [9] Jubin and Tornow, The DARPA Packet Radio Network Protocols, Proceedings of the IEEE Special Issue on Packet Radio Network, January 1987.
- [10] Freebersyner and Leiner. A DoD Perspective on Mobile Ad Hoc Networks. In C.E. Perkins(editor), Ad Hoc Networking, Addison Wesley, December 2000.
- [11] Leiner, Ruth and Sastry. Goals and Challenges of the DARPA GloMo Program. IEEE Personal Communications, December 1996.
- [12] Sousa S, Silvester JA. Spreading code protocols for distributed spread-spectrum packet radio networks. IEEE Transactions on Communications, 1998, 36(3):272-281.
- [13] Wu HK, Chuang PH. Dynamic Qos allocation for multimedia ad hoc wireless networks. ACM Baltzer Mobile Network and Applications, 2001, 6(4):377-384.
- [14] David B.Jobnson, David A. Maltz, Yih-Chun Hu. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks(DSR). Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-10.txt. 19 July 2004.
- [15] S.Murthy and J.J.Garcia-Luna-Aceves. An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks. ACM Mobile Networks and Applications Journal. Oct. 1996.
- [16] C.E.Perkins and P.Bhagwat. Highly dynamic destination sequenced distance-vector routing(DSDV) for mobile computers. ACM Computer Communications Review. Oct. 1994.
- [17] C-C Chiang, M. Gerla, and L. Zhang. Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel. Proceedings of IEEE SICON'97. Apr.1997
- [18] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. 略与网络模拟, 人民邮电出版社.2003 年 1 月第一版
- [19] 郑少仁, 王海涛, 赵志峰等. Ad Hoc 网络技术. 人民邮电出版社.2005 年 1 月第一版
- [20] 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.
- [21] 郭晓峰, 陈跃泉, 陈贵海. 一种累计多路径的移动自组网络路由策略, 软件学报, 2004
- [22] 袁博. “Ad Hoc 网络多路径路由研究”, 浙江大学 2005 级硕士学位论文.
- [23] 方旭明, 何蓉等. 短距离无线与移动通信网络. 人民邮电出版社.2004 年 8 月第一版

- [24] D.H.Conserver, A.M.Michelson, A.H.Levesque. Quality of Service Support in Mobile ad-hoc IP Networks.IEEE 1999
- [25] Frodigh, Johansson and Larsson. Wireless ad hoc networking-The art of networking without a network. Ericsson Review No.4,2000.
- [26] Jubin and Tornow, The DARPA Packet Radio Network Protocols, Proceedings of the IEEE Special Issue on Packet Radio Network, January 1987.
- [27] Freebersyner and Leiner. A DoD Perspective on Mobile Ad Hoc Networks. In C.E. Perkins(editor), Ad Hoc Networking, Addison Wesley, December 2000.
- [28] Leiner, Ruth and Sastry. Goals and Challenges of the DARPA GloMo Program. IEEE Personal Communications, December 1996.

附 录

附录 1 网络模型连通性程序

```
clc
clear
Z=10000*rand(2,100);
x=Z(1,:);
y=Z(2,:);
R=1000;
for i=1:length(x);
    for j=1:length(y);
        if (((x(i)-x(j)).^2+(y(i)-y(j)).^2)>R^2))
            L(i,j)=0;
        else
            L(i,j)=1;
        end
    end
end
l=L;
for i=1:8;
    l=l*L;
    for k=1:length(x)*length(y)
        if l(k)>=1
            l(k)=1;
        else
            l(k)=0;
        end
    end
end
```

```
A(i)=sum(sum(1));  
end  
for i=2:8;  
    B(i)=A(i)-A(i-1);  
end  
B(1)=A(1);  
Bar(B)
```

附录 2 节点移动程序

```
t=1:500;  
d=zeros(length(t),2,100);  
d(1,1,:)=10000*rand(1,100);  
d(1,2,:)=10000*rand(1,100);  
vmax=20;  
lmax=1000;  
for i=1:length(t);  
    for j=1:100;  
        vx(i,j)=vmax*rand(1,1);  
    end  
end  
for i=1:length(t);  
    for j=1:100;  
        vy(i,j)=sqrt(vmax^2-vx(i,j).^2);  
    end  
end  
for i=2:length(t);  
    for j=1:100;  
        d(i,1,j)=d(i-1,1,j)+vx(i,j);  
        d(i,2,j)=d(i-1,2,j)+vy(i,j);  
    end  
end
```

```

end
p=zeros(length(t),100,100);
for i=1:length(t);
    for j=1:100;
        for k=1:100;
            if sqrt((d(i,1,j)-d(i,1,k)).^2+(d(i,2,j)-d(i,2,k)).^2)<=500;
                p(i,j,k)=sqrt((d(i,1,j)-d(i,1,k)).^2+(d(i,2,j)-d(i,2,k)).^2);
            else
                p(i,j,k)=inf;
            end
        end
    end
end
end
end

```

附录 3 最短路径程序

```

clc
clear
for i=1:length(x);
    for j=1:length(y);
        if (((x(i)-x(j)).^2+(y(i)-y(j)).^2)>R^2))
            L(i,j)=inf;
        else
            L(i,j)=1;
        end
    end
end
end
D=L;
n=length(x);
Path=zeros(n,n);
for i=1:n

```

```

for j=1:n
    if D(i, j)~=inf
        Path(i, j)=j;
    end
end
end
for k=1:n
    for i=1:n
        for j=1:n
            if D(i, k)+D(k, j)<D(i, j)
                D(i, j)=D(i, k)+D(k, j);
                Path(i, j)=Path(i, k);
            end
        end
    end
end
end
end

```

附录 4 稳定性计算程序

```

T=zeros(length(t), 100, 100);
for i=1:length(t);
    for j=1:100;
        for k=1:100;
            T(i, j, k)=(sqrt(((vx(i, j)-vx(i, k))^2+(vy(i, j)-vy(i, k))^2)*lmax^2-((vx(i, j)-vx(i, k))*(d(i, 2, j)-d(i, 2, k))-(d(i, 1, j)-d(i, 1, k))*(vy(i, j)-vy(i, k)))^2)-((d(i, 1, j)-d(i, 1, k))*(vx(i, j)-vx(i, k))+(d(i, 2, j)-d(i, 2, k))*(vy(i, j)-vy(i, k)))))./((vx(i, j)-vx(i, k)).^2+(vy(i, j)-vy(i, k)).^2));
        end
    end
end
end

```

附录 4 多目标程序

MODEL:

SETS:

CITY / 1, 2, 3, 4, 5/:U;

LINK(CITY,CITY) |&1 # LT # &2 :DIST, Time, Deay, x;

ENDSETS

DATA:

Deay=29, 82, 10, 102,

23, 53, 43,

43, 20,

23;

Time=1.6415, 0.6123, 2.003, 1.101,

3.8175, 4.0968, 3.9886,

0.5566, 0.9,

1.8;

DIST=120, 100, 220, 493

88, 300, 439

420, 210

342;

ENDDATA

N=@SIZE(CITY);

MIN=0.6*@SUM(LINK:DIST*X)-200*@min(Link:Time*X)+20*@sum(LINK:Deay*X);

@FOR(CITY(I) | I #NE# 1 #AND# I #NE#

N:@SUM(LINK(I, J):X(I, J))=@SUM(LINK(J, I):X(J, I));

@SUM(LINK(I, J) | I #EQ# 1:X(I, J))=1;

@FOR(LINK:@BIN(X));

END

致 谢

首先深深感谢导师孟利民教授。在漫长的论文设计中，她自始至终都给予了我细致的关怀和指导，从课题选择、方案制定、工作实施到论文的修改，无不渗透着她的心血，倾注了大量的时间和精力帮助我顺利完成学业。在论文期间，孟老师在诸多方面给予了我极大的帮助，为我的研究提出了许多宝贵的建议，为我以后的工作帮助极大。孟老师渊博的知识、卓越的才智和严谨的治学态度，使我终生难忘，更重要的是，她教授了我做人的深刻道理，使我受益终生。值此论文完成之际，谨向导师致以最崇高的敬意和最诚挚的感谢。

同时，还要感谢我的同学和亲人。在整个论文的完成过程中，他们给予了我巨大的帮助。没有他们的支持，我不可能能够顺利完成研究生的学习和工作。这次的毕业论文还得到了院里各级领导和老师的关心，对此也表示由衷地感谢。

最后，衷心感谢为评审本文而付出辛勤劳动的各位专家和老师。

攻读学位期间参加的科研项目和成果

参加的科研项目

- [1] 国家自然科学基金：名称（项目编号），

录用和发表的论文

- [1] 按论文发表的时间顺序，列齐本人在攻读学位期间发表或已录用的学术论文清单（格式参照参考文献的写法），作者单位必须是浙江工业大学。对论文的盲审版本，须删去作者名。
- [2] 投稿的论文不在此列。

专利

- [1]