

现代 IP 网络 QoS 路由技术^{*}

QoS Routing Technologies in Modern IP Networks

邹玲 石坚

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉430074)

Abstract The paper has discussed the international hotspots and difficulties in the field of routing technologies according to the trends of network development and characteristics of different types of network. It also gives the analysis of key technologies of QoS routing in modern IP networks and presents its several research aspects in integrated networks in the future.

Keywords Modern IP networks, QoS routing technologies

1. 引言

无线通信和个人通信系统的发展,使网络的接入方式多样化。未来的互联网络将由固定网络(有线网)、基础结构移动网络(如蜂窝无线网)和非基础结构无线网络(如 Ad Hoc 网,简称自组网)组成的综合网络发展^[1]。为保证此综合服务系统端到端的服务质量(QoS),实现用户的“无缝”通信,是未来综合网络一个具有挑战性的领域,其中解决不同类型网络的 QoS 路由问题以及异构网络间路由互操作性问题是一个研究重点。近年来,国内外学者在有线网 QoS 路由方面做了大量的工作,而涉及无线/移动网方面的论文很少。本文将将以 QoS 路由算法为主线,根据有线网和无线网中存在的问题,阐述 QoS 路由技术发展的方向。

2. 网络 QoS 路由定义与描述

一般地, QoS 路由的主要目的有两个:(1)满足每一个准入连接的 QoS 需求;(2)优化网络的资源利用率,使得整体利用率最高。为研究和评价不同 QoS 路由技术的性能,必须首先分析路由协议与 QoS 测度的关系。

2.1 QoS 路由与测度的关系

网络路由算法的性能与选定的路由测度是密切相关的,路由测度是 QoS 路由收集状态信息和进行路径计算的一个十分重要的依据,它必须能够准确地表达网络的基本特征,并且测度或测度组合不能使路由计算的复杂度过大。由于 IP 网

络是逐级跳的(hop by hop),因此测度的基本粒度是链路测度,而 QoS 合约通常是端到端的,即它的测度是基于路径的,从链路测度与路径测度的函数关系上可以把测度参数分为3种类型:凹面性、可加性和可乘性。在 QoS 路由的研究领域,路由算法即是选择优化一个或多个测度的路由,并且测度的性质随着 QoS 要求的不同,不再如传统路由协议采用的跳数、链路代价等只是可加性的,如丢失率是可乘性的,而带宽是凹面性(或极值性的)。定理证明^[2,3],当单播 QoS 路由算法要在计算路径的算法中同时考虑两个(或多个以上)可加性或乘积性测度时,问题等价于划分问题,是 NP 完全的。对于组播 QoS 路由算法,上述结论依然成立,当希望以某种代价来约束算法所产生的生成树时,还会遇到同样为 NP 完全的 Steiner 树问题。因此如何将线性无关的多种测度有机的结合在一起,构造单一的决策测度(函数),是解决 QoS 路由的方法之一。

2.2 网络状态的收集与维护^[4]

QoS 路由器有两个任务,一个就是收集并不断刷新网络的状态信息,另一项就是在收集的状态基础之上寻找新的连接请求的可行路径。第一个任务解决的好坏直接影响到路由算法的性能。目前,国内外学者按照路由计算的方法以及维护状态信息的技术,通常将路由划分为源路由算法(Source Routing)、分布式路由算法和分级路由算法(Hierarchical Routing),三类算法的特点如表1所示。

表1 三类路由算法的比较

	优点	缺点
源路由算法	集中计算路由,简单,容易实现、调试和升级;无须分布式状态存储、死锁检测等。	存储在每个节点的全局网络状态刷新频繁,导致网络负荷增加,影响算法的扩展性;因忽略消息的传播延时等而只能提供非精确状态,可能导致 QoS 路由选择失败;计算负荷量大。
分布式路由算法	分布式路由计算,使路由响应时间缩短,多路径的并行计算增加算法的成功率;算法扩展性好。	基于全局状态的分布式算法与源路由有类似问题,基于局部状态的分布式算法增加了消息复杂度;无法获得详尽的网络拓扑和链路状态,算法设计较难;容易导致环路。
分层路由算法	网络节点逻辑分层,每个节点所维护的状态信息为源路由所维护的状态信息的对数,扩展性很好,具有源路由和分布式路由的优点	由于每层逻辑节点(或实际节点)的汇聚信息引入了不确定性,导致路由选择可能失败。当 QoS 限制条件更多时,引起算法更加复杂。

^{*}国家自然科学基金资助项目(60172077)、高等学校骨干教师资助计划和武汉青年晨光计划(20015005038)资助项目。

2.3 QoS 路由协商

QoS 协商指通信方与服务系统之间达成一个或多个 QoS 合约的机制。在实际网络运行中,当 QoS 路由算法无法成功地为一个新的会话连接找到一条可行路径,这时通信双方会进行 QoS 协商,以便于为应用服务提供“松散”的 QoS 保证,若协商失败,则拒绝此次新的连接的加入。通过协商的过程,使得发送者和接收者能够“学习”路径的特征并选择合适的参数,返回 QoS 的上界;而且资源预留前的协商活动可避免已被终止的会话的不必要的资源预留和开销;同时多点协议可以使源算法发现路径的层次性和接收者的能力,有利于选择层次编码。由于 RSVP 协议是周期性地刷新预留状态,并且是由接收者发起,使得它比较适合 QoS 协商。

3. 有线网 QoS 路由所面临的问题

3.1 综合 QoS 测度函数的确定

目前,在基本的有线网路由选择算法中,当多个 QoS 测度是相互独立时,多受限 QoS 路由问题已被证明是 NP 完全问题,要解决这类问题的关键在于如何针对相应问题的特殊性寻求其特定 NP 完全问题的可行解。目前,国内外学者通常采用“顺序筛选法”进行求解^[5-7],即首先将 QoS 测度按一定顺序排列,这种顺序反映了不同 QoS 测度的重要性。此类方法存在算法设计复杂、计算复杂度较高等缺点。我们提出的一种“综合测度法”^[4],通过设计一种既能很好地反映各种服务性能要求,又能使计算不致过于繁琐的路由算法的评价测度函数,从而避免或化解 NP 完全性问题,通过采用先进的优化搜索方法求解 QoS 路由问题的最优或近优解。

3.2 优化算法的选择

为解决 QoS 路由的优化求解问题,常采用的方法有:启发式算法、神经网络、遗传算法和蚁群算法等。启发式策略有很多种,包括贪心策略、方向策略、区域策略和层次策略等^[8]。结合使用多种启发式策略可以有效提高路由算法的效率。基于神经网络的路由方案可在有限时间内找到满意解^[9],但是由于能量函数参数较多,各参数之间相互耦合,参数之间难以整合,以及强制输出连续可导,因此导致梯度下降,逼近方法的准确性受到影响。遗传算法可用于解决多约束条件下的 QoS 路由问题^[10]。由于遗传算法原理简单,鲁棒性强,易于分布式处理^[11],可以使 QoS 路由计算相对简单和有效,但遗传算法本身所具有的随机化搜索特性,极易引起个体“早熟”,导致局部最优^[10-12],另外,遗传操作不易控制,容易得到无效解^[13]。由于尚未出现能实际应用的 QoS 路由算法,而且对路由协议的支持方面考虑很少,因此研究高效率、高质量的 QoS 路由算法,并将路由协议与算法有机地结合,是目前国际上研究的热点和难点之一。

3.3 QoS 路由与“尽力传输”的融合

在实际网络中如何解决 QoS 流量与“尽力而为”流量间平衡地传输是当今网络中面临的问题。QoS 路由一般是面向连接的,通过资源预留等提供某种确保的服务,网络首先应满足信息的 QoS 性能,而“尽力而为”流量是无连接的,因此其性能不但受到当前共享资源状态的影响,而且由于资源预留等 QoS 保证机制的采用也会受到影响;前者的目的是要尽量满足每个连接的 QoS 请求,使呼叫的阻塞率最低,同时优化网络资源利用率,后者则关注公平性和降低平均响应时间;而提供全网吞吐量和降低路由开销是这两种方式的共同目标。因此如何合理地分配网络资源,满足不同 QoS 流量的需求,

使网络资源充分有效、公平地使用,是值得研究的问题。

4. 无线/移动 QoS 路由技术分析与讨论

目前,虽然国际上已研究了多种无线/移动网路由技术,但研究成果还大多仅适用于“尽力”传输,不能为多媒体业务提供 QoS 保证。有关 Ad hoc 网的 QoS 保证的研究才刚刚开始,特别是有关 QoS 组播路由算法的论文则为数不多。在有线网路由机制中,经常将单播通信技术作为组播通信的基础,而在许多类型的移动网络中,基于其本身具有的广播能力,实际上更适合组播通信而非单播通信,因此单独考虑组播通信技术的解决方案会有效得多。

无线网路由技术核心内容包括:(1)在 QoS 敏感的蜂窝网络中,如何利用有限的带宽,快速有效地优化路由;(2)如何解决 Ad-hoc 等非基础结构无线网的 QoS 路由问题。

4.1 具有基础结构的移动网 QoS 路由技术

在蜂窝无线网中,利用有限的网络资源,快速有效地重新建立和优化路由,对于降低移动用户连接的阻塞率至关重要。在移动 IP 的 QoS 路由问题中,研究的焦点是如何解决移动节点与基站的组播路由通信问题。

在移动 IP 协议中^[14],常采用根据源的地理位置改变其 IP 地址的方法,不断重新计算生成源路由的组播树。这种机制比较适合离散移动的信源,而无法应付连续移动所带来的组播树频繁计算的负荷,因此可考虑采用组共享树加以改善。当移动用户为组播信宿时,可通过扩展 IPv4 和 IPv6 处理组播通信的问题^[14-15]。由于信宿的移动容易造成数据丢失,而基站的缓冲区有限,基站在处理连续移动用户的数据丢失时显得有些力不从心,影响 QoS 性能,因此,移动节点的越区切换处理是关键。另外,为优化路由,可采用绑定缓存技术消除三角路由问题,但在通信主机的绑定缓存刷新之前,IP 包的转发仍要通过主代理,因此如何更好地解决三角路由问题仍是一个研究热点。

4.2 Ad-hoc 网络路由协议^[16,17]

针对 Ad-hoc 网络,国外学者重点研究在网络拓扑变化的动态环境中,针对“尽力型”流量,如何获得高度可用的最短路径,已有的单播路由协议分两类:表驱动路由协议和需求路由协议(On-demand Routing Protocols),前者每个节点都保留着整个网络的最新路由信息,后者则在网络节点有分组发送时,才在信源生成信源到信宿的路由。在自组网的组播路由协议中,用于自组网的组播路由算法有两种:一种仍沿用共享树的概念,如 AMRoute 协议(Ad hoc Multicast Routing)和 AMRIS 协议(Ad hoc Multicast Routing Protocol Utilizing Increasing id-numberS),另一种就是采用“网络”的方法,以利用更多的路由信息,提高系统的可靠性和数据传输性能,如 ODMRP 协议(On-Demand Multicast Routing Protocol)和 CAMP 协议(Core-Assisted Mesh Protocol)。这些组播路由协议还只能支持“尽力传输”。目前,有关自组网路由协议的 RFC 标准还没有正式公布,亟待研究与发展新的网络路由协议并开发新的 QoS 路由算法,推动自组网在现实中的广泛应用。

4.3 Ad-hoc 网络 QoS 路由算法

当今,用于自组网的组播路由算法有两种^[1]:一种仍沿用共享树的概念,另一种则采用扩散(flooding)机制,以利用更多的路由信息,提高系统的可靠性和数据传输性能。文[18]扩展了 PIM 稀疏路由模型的组播路由方案,采用共享树的方

式,并结合共享树和源树实现路由的自适应性。但这种技术仍依赖路由器中维护的网络状态,因此并不适应移动的无限制性。文[19]采用每个网络节点只保留局部状态信息而避免非精确状态问题,通过利用扩散(flooding)方式收集局部状态信息找到一条可行路径,但是扩散法势必引起网络负荷急剧增大,如 DSR^[20]和 ABR^[21]等算法就因采用扩散法而导致了大量路由分组的产生。它们都不提供 QoS 保证。Chen 和 Gerla^[22]提出一种满足带宽限制的自组网单播路由算法,克服了以往自组网路由算法只能支持“尽力而为”流量传送的问题,但它的全局网络状态模型,没有考虑网络信息的非精确性,而且只考虑最短路径,没有采用多路径路由策略,不能适用于自组网 QoS。

目前性能超群的自组网单播路由算法是 DIR 和 TBP^[23],前者采用基于局部精确状态的扩散法方式,后者则基于非精确状态的分布式路由算法。但这两种算法都只是解决单播 QoS 路由问题,不能应用于组播路由的优化选择。另外它们也只能支持“软 QoS”。

5 现代 IP 网 QoS 路由技术的发展趋势

5.1 适合无线/移动网的 QoS 路由模型

由于网络动态性、路由信息的聚合、隐藏信息和近似计算,造成网络的状态信息的非精确性,引起路由计算的不精确性。基于 QoS 路由选择算法设计的一个趋势是,越来越多的研究者意识到基于 QoS 路由选择自身的非精确特性。

在自组网通信中,对于网络路由问题的描述,目前多采用两种模型^[23]:基于局部精确状态的路由模型和基于全局非精确状态的路由模型。前者是指只依赖于每个节点内所保存的局部状态,通过收集中间节点的最新局部状态(或相邻节点)寻找满足延时、带宽等 QoS 限制条件的路由;后者则通过估计网络 QoS 全局状态修改前后的变化,建立全局预测函数,然后根据链路的 QoS 参数要求,采用各种受限路由算法求出最佳路由。

文[4]在分析现有自组网路由协议和算法的基础上,根据自组网的动态特性和本地广播特性,结合“综合测度”思想,提出了一种基于网络局部状态信息的分布式单播 QoS 路由算法和组播路由算法,它们具有较强的路由自愈功能。

5.2 智能 QoS 路由技术

5.2.1 QoS 路由与位置预测的关系 根据预测得到的信息来决定移动站点未来的位置和网络接入点,是进行 QoS 控制、降低系统开销、提高系统连接质量和效率的强有力的手段,同时可降低 QoS 路由的非精确度。目前主要的研究内容包括:(1)根据站点的移动性和入呼叫频率进行位置刷新的动态管理机制,可采用基于时间、移动和距离的方法判别位置刷新时间;(2)根据移动站点所在的地形地貌、逗留时间和附近小区的分布,确定移动的方向和连接的时间,这对随机性较弱、有规律移动的站点是行之有效的。(3)利用 GPS 和 ITS 定位系统,对于象 Ad-hoc 网等,其站点的移动是任意的(速度、方向等),跟踪每个站点的行踪资源将消耗很大,而且预测的信息不够准确。采用 GPS 和 ITS 定位系统,可预测两个移动点的连接终止时间,配合完成正确的路由选择。我们融合了贪心策略、方向策略、区域策略、“综合测度法”思想^[4],运用分支定界原理和 GPS 领域所取得的成果,提出了一类基于空间顺序关系的 Ad-hoc 网单播 QoS 路由算法,极大地降低了算法的复杂度,提高了网络资源的利用率。

5.2.2 QoS 路由的自愈性^[4] 在无线/移动网中,由于网络的拓扑具有动态的特性,导致已建立的路径可能在任何时候被中断,因此如何维护和动态重建路由对于保证 QoS 传输同样是至关重要的,这也是 QoS 路由自愈能力的一个重要体现。通过周期性地自适应调整能够容忍一定程度的网络拓扑变化,更重要的是,当一个路径被中断时,通过路由的自愈性能够迅速、有效地建立新的路径,以满足 QoS 的需要;另外,由于路由的选择与某一时刻的有效网络资源密切相关,网络状态也会随着网络拓扑的改变而发生局部或全局变化,造成最初所选择的优化路由不再是最优的,甚至可能成为拥塞路径,采用周期性的重路由机制可以帮助平衡网络流量,提高网络资源的利用率,特别是在资源十分贫乏的无线/移动网络环境中,更是具有非常重要的现实意义;而重路由算法的开销和对网络性能的影响也是值得研究的领域。

5.2.3 “软 QoS”路由问题与切换控制 “软 QoS”路由问题,即指由于无线/移动网络动态的特性,使得在切换处理时路径被中断,或者在网络分割的瞬间,只能提供尽力传输,而不支持 QoS 性能。目前,多数路由算法也只能提供“软 QoS”路由策略,如果考虑采用切换控制技术并依靠自适应速率和音频视频压缩编码等多媒体应用技术,可改善网络的 QoS 特性,弥补路由算法的不足。

5.3 综合网络的 QoS 路由问题

在综合网络的路由问题上,国际上的研究也才刚刚开始,在这一领域首先应解决移动/无线网络的路由问题,相对稳定的移动网络与高度动态变化的网络采用的路由技术是不同的,因此区分移动网络的类型,根据不同网络的配置和参数选择不同的路由技术是非常有意义的。另一个研究的重点是设计包含有线与无线网络在内的综合 QoS 路由机制,为各种用户提供组播通信的“无缝”连接,这包括,设计移动网与有线网络的网关,Ad-hoc 网与有线网络的网关,以及不同路由机制的自适应交换技术等内容。后两者是研究的关键,特别是 Ad-hoc 网与有线网络的传输速度差距很大,这为不同组播路由算法与协议的互连设置了非常大的障碍,一个重要的解决方式是在网关中为分组分配缓冲区以匹配不同速率的信息传输。总之,对于移动站点的有限容量与需求的冲突以及如何解决多种路由机制的交换,这涉及到移动主机如何发现网络的变化、动态选择并下载新的路由协议等研究领域,也是一个研究重点。

总结 路由选择问题是网络层的核心问题。为满足未来综合网络用户的“无缝”接入,保证多媒体通信业务的 QoS 要求,研究具有高效率、高质量的路由技术,是目前国际上研究的热点和难点。本文根据网络发展趋势和不同类型网络的特征,分别讨论了 QoS 路由技术研究领域的关键内容,阐述了研究健壮而有效的 QoS 路由技术,实现用户的“无缝”漫游是当前路由技术研究领域的难点和方向之一。

参考文献

- 1 Obraczka K, Tsudik G. Multicast routing issues in ad hoc networks. In: Proc. of IEEE ICUPC, Oct. 1998
- 2 Chen S, Nahrstedt K. On Finding Multi-Constrained Paths. IEEE International Conference on Communications, June 1998
- 3 Ma Q, Steenkiste P. Quality-of-Service Routing with Performance Guarantees. In: Proc. of the 4th International IFIP Workshop on Quality of Service, May 1997

(下转第74页)

之后不久就由于她本身的疾病而去世。另外一个在1997年7月做完了这个植入手术,现在正等候神经在电极处的增长。第三个病人是一位53岁的男人由于中脑中风而瘫痪。他植入电极的时间已超过一年。他已经学会了命令光标来选择字母和拼写消息。首先这个男子通过想像他的手动而获得成功。但现在他只须想光标本身而让它动。

不过迄今为止这个装置还仅仅对一个病人做了试验。尽管 Kennedy 和其他人都相信来自神经的直接记录最终将证明要比 EEG 驱动的装置优越。然而它们首先要战胜外科手术的风险。在此之前它们还有相当长的路要走。然而, Kennedy 断言,他的电极移植术肯定要比 EEG 好得多。他认为, EEG 的病人一分钟只能拼三个字母,而他的病人肯定会比这做得好。不过不可能做到10倍于此。

使大脑神经来驱动假肢术的腿将要求更多的电极,而不能仅仅移植入少量电极而已。现在这方面的研制工作在进行中。马里兰州贝蒂斯塔市的国家神经失调和中风研究所的神经假肢术项目主任 William Heetderks 说:“如果这一技术可以推广到从100或200个神经来进行信息的记录,这将是我们将看到的前进的一大步。”

以上介绍的两种技术无疑是朝着由思维驱动行动的有益步骤。但它们都像是进行一个黑箱设计,即在不了解神经所携带信息的情况下让神经进行工作。电子大脑摄影术所记录的不可能是整个大脑的信息,而仅仅是假定的同指挥行动最有关联的信息。由于它固定在某个头皮位置,不可能随便移动,这就决定了它只能用来驱动某个模式的行动。如果要驱动另一种行动,那就或者要重新安装另一个电子大脑摄影装置,或者要把这个装置移动位置。在任一种情况下都不容易实现。

电极移植术的问题首先当然是手术安全问题,因为没有安全保证谁都不愿冒这个风险。在保证安全之后,另一个问题才是要移植多少数量的电极。上面所说的100或200,仅仅是一种预测,并无多大根据说这样多就够或者还不够。主要是要解决大规模移植的问题。至于数量多少可能和需要控制的行动有关。这又是涉及理论的问题。

另外一个障碍是如何加入感知反馈的问题,即把从接触一个物体的压力告知假肢术。不过有人认为这个问题不难解

决。而要解决的是获取足够的信息来控制细小的动作。但对于这个问题也有异议。有人说即便动作粗糙一点,但是能够抓取饭匙,自己喂自己,那就很好了,因为对瘫痪病人来说这就前进了一大步。

所以归根结蒂我们的问题还是大脑如何工作,而这个问题的实质是神经的分布和编码。为了获得信息,作者基于上述方法,提出进行如下的试验。如像图1那样,桌上放上一块糖,先让受试者想像自己不要这块糖,由电子大脑摄像摄下全息大脑的像。然后再让受试者想像要这块糖,并且要伸手去拿糖,这时再照下全息大脑的像。针对各种不同情况照下受试者在两种相反心理下大脑的全息像,由此找出大脑在每种情况下的变化,再来对它们进行分析。这样或许可以找出大脑的一点信息编码的端倪。同时根据变化的神经的数量和部位确定需要移植的电极的数量和位置。这就可使电极移植建立在更有根据的基础上。总的想法是,要把今后的研究重点放在获取大脑的实际信息上,并对它进行破译。

结束语 既然神经科学已经证明,大脑有直接控制假肢术的潜力,那么我们就可以有信心,即工程界就一定能把这一天带过来。如果是这样,那我们也可以确信,科学的进展一定会使瘫痪病人的生活得到一些改善。问题是这种改善能达到什么程度。如果有一天人类真能破译自己大脑的信息,那么瘫痪病人所能获得的改善就将是根本性的,否则我们所能实现的改善总是很有限的。不过即便那样,对于瘫痪病人也许已是福音了。有人甚至说,在此以前,这还是15年乃至20年以后的事,但现在很有可能在5至10年后我们就可以初步实现自己的目标了。

参 考 文 献

- Bordogna J. The 21st Century Engineer. IEEE Spectrum. January 2001. 17
- 苏运霖. 人工智能的战略方向. 计算机科学, 1996, (5): 244~28
- Barinaga M. Turning Thought Into Actions. Science. 1999. 29: 888~890
- Wickelgren I. The Cerebellum: The Brain's Engine of Agility. Science. 1998. 11: 1588~1590
- Perkins C. IP mobility support. Internet Request for Comments RFC 2002
- Johnson D, Perkins C. Mobility support in Ipv6. Work in progress, draft-IETF-IPV6-02. txt, Nov. 1996
- Lee S J. Routing and Multicasting Strategies in Wireless Mobile Ad hoc Networks. [Ph. d dissertation]. Computer Science Department, University of California. 2000
- 石坚, 董天临, 石冰心, 赵尔敦. 现代 Ad hoc 网的移动 IP 路由技术. 计算机科学, 2001, 28(5): 37~41
- Chiang C C, Gerla M, Zhang L. Shared tree wireless network multicast. Proc. IEEE ICCCN'97, Sept. 1997
- Carlberg K, Crowcroft J. Building Shared Trees Using a One-to-Many Joining Mechanism. Computer Communication Review, 1997 (Jan.): 5~11
- Johnson D B, Maltz D a. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Network. Mobile Computing. T. Imielinski and H. Korth, Eds., Lulwer, 1996. 152~181
- Toh C-K. Associativity-Based Routing for Ad-Hoc Mobile Networks. Wireless Personal Communications, 1997(4): 103~139
- Chen T, Gerla M, Tsai J T. QoS Routing Performance in a Multihop. Wireless Networks. IEEE ICUPC'97, 1997
- Chen S. Routing Support For Providing Guaranteed End-to-End Quality-of-Service. [Ph. D dissertation]. Engineering College of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign. 1999
- 石坚. 现代无线网 QoS 路由技术的研究. [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学研究生院, 2001
- Wang Z, Crowcroft J. QoS Routing for Supporting Resource Reservation. JSAC, Sept. 1996
- Kompella V P, Pasquale J C, Polyzos G C. Multicasting for Multimedia Communication. IEEE Trans. on Networking, 1993, 1(3): 286~292
- Youngsok Lee, Yongjun IM, Kyesang Lee, et al. A Bandwidth and Delay Constrained Minimum Cost Multicast Routing Algorithm. ICONIN-11, Taipei, Jan. 1997
- Papadimitriou C H, Steiglitz K. Combinatorial Optimization Algorithms and Complexity. Printice-Hall Inc. 1982
- Gelenbe E, Ghanwani A, Srinivason V. Improved Neural Heuristics for Multicast Routing. IEEE JSAC, 1997, 15(2): 147~155
- 石坚, 邹玲, 董天临. 遗传算法在组播路由选择中的应用. 电子学报, 2000, 28(5): 88~89
- Sun Q. Routing for Supporting Real-Time Applications in High-Speed Networks. [Ph. D dissertation]. the Institute of Operating Systems and Computer Networks, Technical University of Braunschweig, Feb. 1999
- 陈国良, 王熙法, 庄镇贤, 等. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996
- 石坚, 邹玲, 董天临. 基于延迟敏感的组播路由遗传算法的研究. 计算机科学, 2000, 27(11): 25~28