

Internet 上多限制条件下的 QoS 路由算法研究综述^{*}

Survey of Multi-constrained QoS Routing on Internet

王建新 彭革刚 陈建二

(中南大学信息技术研究所 长沙410083)

Abstract Multi-constrained Quality of Service (QoS) routing is to find a feasible path in network which satisfies multiple independent quality-of-service constraints. The problem is a main problem in QoS routing and is NP-hard. The researchers in the field have presented many algorithms to solve this problem. In this paper, the authors propose a mathematical model of multi-constrained QoS routing and introduce the properties of each algorithm for multi-constrained QoS routing. Finally the future directions of the work is presented.

Keywords Multi-constrained, QoS routing, Algorithm

1 引言

目前的 Internet 网络中,一个会话的数据分组可以通过不同的传输路径到达目的节点,而且不同任务分组公平地共享网络资源,例如,链路带宽、交换缓冲区等。这种结构不能支持多媒体数据和实时数据传输^[1]。多媒体业务需求的日益增长推动了现有多媒体应用的进一步发展,这也对新一代网络提出了新的要求^[2]。

服务质量(QoS, Quality of Services)的概念已经用于定量和定性描述服务的提供者和服务的接受者之间协商的服务性能。服务质量可以由一些特定的参数来描述,服务的提供者允许服务的使用者在建立连接时对各种服务参数指定希望的、可接受的最低限度值,有些参数还可以用于无连接的传输服务。服务的提供者根据网络服务的种类或它能够获得的服务来检查这些参数,决定能否提供所要求的服务。一些典型参数如下:网络带宽、传输延时、延时抖动、差错率等。在 Internet 上对网络服务质量的要求也越来越高,例如,视频会议、网络电话的实时和带宽要求,大数据量数据备份的完成时间要求等。如何在网络中实现多种服务质量是全世界通信领域竞相研究的重点课题^[3]。

QoS 的研究有多个方面,包括流量整形(traffic shaping)、包调度算法(packet scheduling)、路由算法(QoS routing)、资源预留(resource reservation)、接入控制(call admission control)等的研究。在 QoS 的早期研究中,主要的研究集中于网络节点机的调度策略、接入控制策略上,网络路由算法的研究一直被忽视。近几年的研究表明网络路由算法对实现网络保证质量的服务起到了非常关键的作用,同时网络路由算法也是平衡网络负载和充分利用网络资源的重要保证^[4]。

多限制条件下的 QoS 路由算法研究目标是找到一条满足所有独立限制条件的传输路径或满足所有独立限制条件下某个目标优化的传输路径^[5]。由于 QoS 的度量是实数或无边界的整数,因此这些问题都是 NP-Hard 的^[6,7]。由于在新一代网络路由算法中解决这一问题对实现网络 QoS 有十分重要

的意义,因此,目前多限制条件下的 QoS 路由算法研究成为热点问题。

本文提出了多限制条件下 QoS 路由问题的数学模型,并综述了多限制条件下的 QoS 路由算法研究成果,提出多限制条件下 QoS 路由算法研究的方向和重点。

2 多限制条件下的 QoS 路由问题模型

计算机网络模型可以用一个带权无向图 $G=(V, E)$ 描述,其中 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 是网络中的节点集合, $E=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 是网络中的链路集合。假设在网络的链路集合 E 的每条链路有 k 个权值,这里对每一条链路 $[i, j]$, $c_k(i, j)$ 是第 k 个权值在链路 $[i, j]$ 上的值。对于任意一个 QoS 请求 $R=(S, T, B_1, B_2, \dots, B_{k-1})$,其中 S 为源节点, T 为目的节点, B_i 为传输路径上第 i 个权值的限制条件, $i=1, 2, \dots, k-1$, 计算满足传输要求并优化第 k 个参数的传输路径的数学模型为:

$$\min \sum_{[i,j] \in E} c_k(i, j) \cdot x_{ij}$$

Subject to

$$\sum_{[S,j] \in E} x_{Sj} = 1 \quad \sum_{[j,S] \in E} x_{jS} = 0$$

$$\sum_{[i,T] \in E} x_{iT} = 1 \quad \sum_{[T,i] \in E} x_{Ti} = 0$$

For each $i \neq S, T$:

$$\sum_{[i,j] \in E} x_{ij} = \sum_{[j,i] \in E} x_{ji} = 1$$

$$\sum_{[i,j] \in E} x_{ij} \leq 1$$

For all edge $[i, j]$:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

$$F_1(x_{ij} \cdot c_1(i, j) | [i, j] \in E) \leq B_1$$

$$F_2(x_{ij} \cdot c_2(i, j) | [i, j] \in E) \leq B_2$$

⋮

$$F_{k-1}(x_{ij} \cdot c_{k-1}(i, j) | [i, j] \in E) \leq B_{k-1}$$

在大多数情况下,函数 F_1 是累加性的,如传输延时:

$$F_1(x_{ij} \cdot c_1(i, j) | [i, j] \in E) = \sum_{[i,j] \in E} x_{ij} \cdot c_1(i, j)$$

或者是极值性的,如传输路径的带宽:

^{*} 国家海外杰出青年自然科学基金(69928201)和教育部高等学校骨干教师资助计划(教科司[2000]143号)资助项目。王建新 博士,副教授,主要研究领域为 Internet 中的 QoS 问题、路由算法、网络性能评价。彭革刚 硕士研究生,主要研究领域为网络路由算法的优化及性能评价。陈建二 长江学者奖励计划特聘教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络理论与优化。

$$F_i(x_i, c_i(i, j) | [i, j] \in E) = \max\{x_i, c_i(i, j) | [i, j] \in E\}$$

当函数 F_i 是累加性、乘性或极值性时,整个问题就是一个线性规划问题。在一般情况下,如果 $k > 2$ 时,它是一个 NP 完全问题。

3. 多受限 QoS 路由算法的分类

目前,解决多限制条件下的 QoS 路由问题的算法大体上可分为启发式算法、近似算法和基于某种调度策略的算法这三类,如图1所示。启发式算法可以降低算法的时间复杂度,但不能保证在即使存在传输路径的条件下发现一条可行的传输路径。按照算法解决问题的类型,启发式算法进一步细分为受限最短路径(RSP)算法、延迟受限最小费用(DCLC)算法、多受限路径(MCP)算法以及多受限路径优化路径(MCOP)算

法。采用近似算法可以求最优化路径的近似解,但这类算法的时间复杂度往往比启发式算法高。近似算法又可分为多项式近似算法和伪多项式近似算法。两者的区别在于伪多项式近似算法的计算复杂度不仅仅同网络的大小有关,还取决于网络链路参数的大小。同样按照算法解决问题的类型,这两种算法都可进一步细分为 RSP、DCLC、MCP 和 MCOP。基于某种调度策略的多受限 QoS 路由算法能够较好地解决多受限 QoS 路由问题,但由于它要求某种特殊的调度策略如 VC (Virtual Clock)、WFQ (Weighted FairQueueing)、WF2Q (Worst-case Weighted Fair Queueing)、SCFQ (Self Clocked Fair Queueing)等,这使得在这类算法的使用上有一定的局限性。

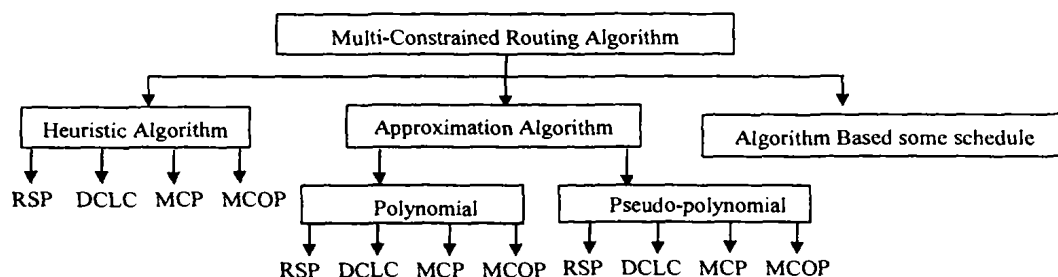


图1 多受限 QoS 路由算法的分类

3.1 启发式路由算法

考虑到在多个可加性参数中只有一个参数不是整数的情况下,MCP 问题能够在多项式时间内解决,Chen 和 Nahrstedt 提出了一个解决 MCP 问题的启发式算法^[8],算法首先通过产生一个新的加权函数 $newweight = \lceil \frac{newweight(u,v) \cdot x}{C} \rceil$ 将 NP 难的 MCP 问题转化为一个能够在多项式时间内求解的简单问题,其中, x 是一个给定的正整数, C 是加权参数对应的限制条件,然后利用改进的 Dijkstra 算法和 Bellman-Ford 算法来求解这个简单问题。当算法使用改进的 Dijkstra 算法时,算法的时间复杂度为 $O(x^2V)$;当使用改进的 Bellman-Ford 算法时,算法的时间复杂度为 $O(xVE)$,其中 V 是节点的集合, E 是链路的集合, x 是由算法给定的正整数。 x 的取值决定了算法的性能和开销, x 越大,算法的性能越好,同时也带来了更大的计算开销。

在文[9]中这种算法被扩展到 $K(K > 2)$ 个限制条件的情况,其时间复杂度为 $O(X_1^2, \dots, X_{K-1}^2 n^2)$ 或者 $O(x_1, \dots, x_{K-1} nm)$,其中 $X_1, \dots, X_{K-1}$ 是对于每个限制条件的一个可调节整数。

文[10]提出了两种用于解决 $k(k > 2)$ 个限制条件的启发式 QoS 路由算法,有限路径启发式算法和有限粒度启发式算法。这两种启发式算法的基本思想是:限制在每个节点所记录的最优路径数即 PATH 的大小来减少 RELAX 操作的时间和空间复杂度。通过限制 PATH 的大小,每个节点不能够记录所有最优路径,因此算法只能给出问题的近似解。这两种启发式算法的关键就在于如何限制每个节点的 PATH 大小同时又保持求解的效率。具体来说,有限的粒度启发式算法通过利用一些有限区间来近似化 QoS 参数(限制 QoS 参数的粒度),从而将 NP 难的多受限问题转化为一个能够在多项式时间内加以解决的简化问题。这个算法的一个最关键问题是决定每个节点所保留的路由表大小和算法求解效率之间的关

系。有限的路径启发式算法通过在每个节点只保留 X 条最优路径来保证多项式的时间复杂度。这个算法的关键问题是必须给 X 一个恰当的取值。两种算法都能够在多项式时间内解决多受限问题,但为了获得好的性能,有限粒度启发式算法需要比有限路径启发式算法更多的资源。

文[11]提出了先利用预先计算来简化网络拓扑,然后采用改进的宽度优先搜索算法和基于概率分布的随机策略寻找满足多个限制条件的传输路径。作者通过大量的模拟测试表明,该算法能够有效地寻找传输路径,但不能保证找到所有可行路径和所选路径的费用最少。

文[12]介绍了一种使用文[13]提出的第 k 最短路径算法来解决多于两个受限条件的 MCP 问题的方法,其时间复杂度为 $O(km \log(kn) + k'm)$,其中 k 是最短路径的条数。

文[14]提出了一个解决 MCOP 问题的基于随机策略的启发式算法。算法首先剪去所有不满足条件的链路,然后使用随机搜索的方法来找到一条可行路径。这种随机方法类似于宽度优先搜索,但与宽度优先搜索不同的是随机搜索方法不是按照宽度优先搜索的顺序来选择下一节点,而是在可能满足条件的节点中随机地选择,这种随机选择避免了盲目的搜索,提高了算法的性能。为了获得较好的网络资源利用率,算法在所有可行路径中选择跳数最少的路径。算法需要运行 Dijkstra 算法 $k+1$ 次(k 表示限制条件的个数),其时间复杂度为 $O(k^3)$ 。

文[15]提出了一种有效的多受限最优路径选择算法。虽然该算法在最坏情况下的时间复杂度仍然是指数级的,但是算法通过有效的优先队列策略和限界剪枝策略大大减少了搜索空间的大小,从而极大地提高了算法的性能,大量的模拟测试表明,在实际的网络中,该算法能够取得很好的性能。

在文[16]中 W. C. Lee 提出了一个简单的解决 DCLC 问题的回退路由启发式算法,首先计算关于第一个参数(如:费用)的最短路径,然后检查这条最短路径是否满足其它所有参

数。如果不满足,算法将计算关于下一参数的最短路径直到找到一条满足所有条件的路径。这个算法是非常简单的,同时它总是能够求出一个适当解。但是算法并不能保证一定找到问题的最优解。

在文[17]中 Salama 提出了一个解决 DCLC 问题的分布式启发算法,这个算法利用距离矢量协议在每个节点保留一个费用矢量和延迟矢量。算法通过从源节点开始向目的节点发送控制信息来构造一条延迟受限的路径。在当前已构造路径的任何一个端节点只有两条可选路径。其中一条是由费用矢量指定的最小费用路径上的链路(i,j),而另一条则是由延迟矢量指定的最小延迟路径上的链路(i,k)。当链路(i,j)的延迟加上节点j到目的节点的最小延迟仍然满足延迟限制时,链路(i,j)被优先选择。由于当控制信息交替选择最小费用路径和最小延迟路径时有可能出现路由环路,这个算法的关键就在于对路由环路的处理。算法采用一个类似于回溯的技术来处理路由环路。当控制信息访问一个节点两次出现路由环路时,算法将一直回溯到选择最小费用路径的节点,从该节点开始选择最小延迟路径后继续执行路由过程。

通过避免路由环路而不是象 Salama 算法先检测再移去路由环路,在文[18]中 Sun 和 Langendorfer 改进了最差情况下 Salama 算法的性能。算法同样通过发送控制信息来构造路由,控制信息沿着最小延迟路径的方向传递直到节点的最小费用路径的延迟满足延迟限制条件,然后从这一节点开始,控制信息沿着最小费用路径的方向传递直到目的节点。

在文[19]中 L. guo 提出了一个解决 DCLC 问题的启发式算法,这个算法首先根据网络状态引入一个新的费用限制条件,然后它利用 Chong 提出的一个第 k 最短路径算法^[21]来有效地搜索一条满足延迟限制和新的费用限制的路径。由于能够剪去不满足这两个限制条件的路径,该算法能够在一定程度上减小搜索空间。考虑到一个更严格的费用限制将可能有助于提高算法的求解效率和速度,L. guo 又提出了一个改进算法,该算法利用在文[20]中 Bolkh 和 Gutin 提出的第 k 最短路径算法来进一步提高算法的性能。

3.2 近似路由算法

在文[6]中 Jaffe 研究了 $K=2$ 的 MCP 问题,同时提出了一种直观的近似算法,这种算法基于最小化链路参数的一个线性复合函数。通过使用 Dijkstra 最短路径算法, Jaffe 的算法找到一条关于 $l(e) \stackrel{\text{def}}{=} \alpha w_1(p) + \beta w_2(p)$ 的最优路径,其中 $\alpha, \beta \in Z^+$ 。这个算法的关键是决定 α 和 β 的值使得求出的最优路径尽可能地满足各个限制条件。Jaffe 基于最小化目标函数 $f(p) = \max\{w_1(p), c_1\} + \max\{w_2(p), c_2\}$ 来给出两组 α 和 β 的取值。

文[21]提出的近似算法同样是基于最小化线性费用函数 $\alpha w_1(p) + \beta w_2(p)$,但该近似算法通过系统的搜索来给出适当的 α 和 β 值,这种搜索类似于拉格朗日松弛技术,所不同的是对拉格朗日问题的求解目的在于找到一个适当的拉格朗日乘数,而在该算法中是为了找到适当的 α 和 β 值。考虑到在拉格朗日问题中对拉格朗日乘数的搜索往往是通过枚举、线性规划等计算开销大的方法完成的, Korkmaz 提出了一个二分查找策略来搜索复合函数 $w_1(p) + kw_2(p)$ 或 $kw_1(p) + w_2(p)$ 中 k 的取值,同时指出这种二分查找能够保证在对数次运行 Dijkstra 最短路径的时间内完成。这个算法的关键就在于二分查找策略。通过使用一个层次版本的 Dijkstra 最短路径算法,算法在区间 $[1, B]$ 上完成一个二分查找,其中 B 是一个链

路参数最长路径的上界,即 $B = n \cdot \max\{w_i(e) | e \in E\}$,在算法第一阶段时 $j=2$,而在第二阶段 $j=1$ 。算法的时间复杂度为 $O(\log B(m+n \log n))$,空间复杂度为 $O(n)$ 。为了进一步提高算法的性能, Korkmaz 又提出了两个改进的算法,其中一个改进算法先给出了一些理论上的约束条件,然后它利用这些约束条件来求出最可能满足限制条件的一条可行路径。另一个算法则通过改变二分查找过程的线性特性来提高求解效率。

文[22]提出了时间复杂度为 $O(\log \log B(m(n/\epsilon) + \log \log B))$ 和 $O(m(n^2/\epsilon) \log(n/\epsilon))$ 的两个解决 RSP 问题的 ϵ 最优近似算法,其中 B 是解的上界(例如:最长路径)、 m 是链路数、 ϵ 表示求解的近似程度。这两个算法都通过基本的“舍入和缩放”技术来提高算法的性能。这种技术的基本思想是首先设计一种伪多项式的最优算法,这种最优算法的计算复杂度与延迟的最大值相对应。如果链路的延迟能够被“缩放”到一个足够小的范围,那么缩放后的问题能够在多项式时间内加以解决。然后把缩放问题的解“舍入”成最初的延迟。

文[23,24]在两个方面进一步改进了这两个算法。在时间复杂度方面,改进算法能够达到 $O(|E|n(\log \log(UB/LB) + 1/\epsilon))$,其中 UB 和 LB 是问题的上界和下界。在应用范围方面,改进算法适用于网络链路费用的任何取值情况。

当 $\epsilon \sim O(1)$ 时,尽管这些算法的时间复杂度是多项式的,但是它们仍然不能满足实际网络的需要。因此文[25]提出了一种新的具有良好扩展性的近似算法。为了降低计算复杂度,算法分别提出了基于速率量化和跳数量化的近似方案,这两个近似方案能够大大降低算法的计算开销同时获得较高的求解效率。为了提高网络资源利用率,算法提出了许多优化规则,算法运用这些优化规则来减少网络带宽的占用和平衡网络负载。这个算法的最大优点是利用了网络层次结构极大地提高了算法扩展性。随着网络规模的扩大,算法的计算复杂度能够收敛于标准的最短路径算法。

文[26]提出了一种 ϵ 近似算法,这个算法的最大特点是网络中链路的费用是链路延迟的函数。文[27]提出了一个受限的 Bellman-Ford(CBF)算法。CBF 算法主要完成一个宽度优先搜索,在搜索过程中算法按照链路延迟递增顺序来选择路径同时记录和更新在每个节点的最小费用路径。虽然算法能够给出 RSP 问题的精确解,但是算法的计算时间复杂度仍然是指数级的。

解决 RSP 问题的另外一种方法是寻找满足某一费用函数的第 k 最短路径,这样的费用函数往往是链路参数与给定限制条件值的一个复合函数^[28~30]。 k 的大小决定了这种方法的性能和计算开销,如果 k 较大,算法能够获得较好的性能但是同时也带来了巨大的计算开销。一种类似于第 k 最短路径的方法是隐式地列举出所有可行路径^[31],但这种算法所带来的计算开销也是巨大的。

3.3 基于某种调度策略的路由算法

在文[32]中 Ma 和 Steenkiste 指出当使用 WFQ^[33](加权公平队列)这类调度算法时,端到端的延迟、延迟抖动和缓冲区空间大小并不是相互独立的,它们是预约带宽、被选路径以及数据流特征的函数。因此寻找满足带宽、延迟、延迟抖动和缓冲区空间大小限制的可行路径这类 NP 难问题能够得以简化。充分考虑到这些参数之间的关系,使用一个扩展的 Bellman-Ford 算法和下面的长度函数(1)能够在多项式时间内求解多受限 QoS 路由问题。

$$d(e) = \begin{cases} \frac{y}{r} + \frac{L_{\max}}{r} + \frac{L_{\max}}{R(e)} + \text{prop}(e) & \text{当 } u=s \text{ 时} \\ \frac{L_{\max}}{r} + \frac{L_{\max}}{R(e)} + \text{prop}(e) & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $r(r \geq \sigma)$ 是预留带宽, $L_{\max}$ 是网络中最大分组大小, $R(e)$ 是链路 e 的容量, $\text{prop}(e)$ 是传播延时。为了满足延迟抖动的限制, BF 算法的最大循环次数为 $h_{\max} = \min(|V|-1, \lfloor \Delta_r - y/L_{\max} \rfloor)$, 为了满足缓冲区的限制, 链路 e 必须确保它的跳数 (即在 BF 算法中循环次数) 小于等于 $\lfloor f(e) - y/L_{\max} \rfloor$, 其中 $f(e)$ 表示链路 e 的缓冲区大小。

在文[25]中 Orda 提出了一个速率模型, 在这种模型中端到端的延迟可定义为 $d(p) = \sigma/r + (\sum_{i \in p} c_i)/r + \sum_{i \in p} d_i$, 其中 σ 是流的突发量, c_i 是数据包的最大长度, d_i 是链路的传输延迟, r 是路径 p 上的最小保证速率。这种速率模型的最大优点在于在网络资源方面, 端到端的延迟只与速率 r 有关。

结论 本文提出了多受限 QoS 路由问题的数学模型, 并着重介绍了在这个研究领域中的主要研究成果。正如上面所提到的, 在宽带集成网中 QoS 路由特别是多受限 QoS 路由是一个非常复杂的问题, 而且这一问题的研究有助于在新一代 Internet 中实现 QoS。通过本文对以上算法的分析和总结, 我们认为以下几个方向将是多限制条件下的 QoS 路由问题中值得研究的:

(1) 基于多限制条件的 Multicast 路由算法 随着基于 Multicast 的视频会议等多媒体应用的广泛出现, 基于多限制条件的 Multicast 路由算法的研究已经被证明是非常有价值的, 而且这一问题是 NP 难的, 目前尚缺乏有效的算法。

(2) 非精确网络状态信息下的 QoS 路由算法 随着网络规模和复杂度的增加, 网络参数的所有信息一般是不可得到的。事实上, 网络中的每一个节点都不可能拥有整个网络瞬时和详细的节点链路信息, 因此, 路由算法只能依靠部分或近似的网络状态信息去进行路由选择。大多数公布的路由算法需要每一个网络节点通过距离矢量协议或链路状态协议维护全局网络状态信息, 但在动态网络中全局状态信息本质上存在不精确性。在非精确网络状态信息下多限制条件的 QoS 路由算法是我们今后研究的重点问题之一。

(3) 结合全局和局部信息的分布式 QoS 路由算法 通过已知全局网络结构和局部的网络状态信息, 在网络传输节点计算网络传输路径的分布式 QoS 路由算法是我们将要研究的另一个重要问题。

参考文献

- Xiao Xi-Peng, Lionel Ni. Internet QoS: A Big Picture. IEEE Network Magazine, 1999(March/April): 8~18
- Zhang Zhi-Li. End-To-End support for Statistical Quality-of-Service Guarantees in Multimedia Networks: [Ph. D. thesis]. University of Massachusetts at Amherst, Amherst, MA, Feb. 1997
- Shaikh A. Efficient Dynamic Routing in Wide-Area Networks: [Ph. D. thesis]. University of Michigan, May 1999
- Nair R, Rajagopalan B, Sandick H. A Framework for QoS-based Routing in the Internet, RFC 2386, IETF, Aug. 1998
- Pornavalai C, Chakraborty G, Shiratori N. Routing with multiple QoS requirements for supporting multimedia applications. Journal of High Speed Networks, 1998
- Jaffe J M. Algorithms for Finding Paths with Multiple Constraints. Networks, 1984, 14: 95~116
- Goel A, et al. An Efficient Algorithm for Constraint-based Routing in Data Networks: [Technical Report, BL0112120-990616-11TM]. Bell Laboratories/Lucent Technologies, 1999
- Chen S, Nahrstedt K. On Finding Multi-Constrained Paths. IEEE

- ICC'98, June 1998
- Chen S, Nahrstedt K. On finding multi-constrained paths: [Tech. Report UIUCDCS-R-97-2026]. Dept. of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, Aug. 1997
- Yuan Xin, Liu Xingming. Heuristic Algorithms for Multi-Constrained Quality of Service Routing. IEEE INFOCOM 2001, Anchorage, Alaska, April 2001. 844~853
- Wang Jianxin, Wang Weiping, Chen JianEr, Chen Songqiao. A Randomized QoS Routing Algorithm on Networks with Inaccurate Link-State Information. In: the 16th World Computer Conf. (Intl. Conf. of Communication Technology), Beijing, Aug. 2000. 1617~1622
- Salama H F, Reeves D S, Viniotis Y. A Distributed Algorithm for Delay-Constrained Unicast Routing. IEEE INFOCOM'97, Japan, April 1997
- Sun Q, Langendorfer H. A New Distributed Routing Algorithm with End-to-End Delay Guarantee. Unpublished paper, 1997
- Korkmaz T, Krunz M. A randomized algorithm for finding a path subject to multiple QoS constraints. In: Proc. of the IEEE GLOBE-COM'99 Conference - Symposium on Global Internet: Application and Technology, Dec. 1999. 1694~1698
- Wang Jianxin, Peng Gegang, Chen JianEr. An algorithm of efficient multi-constrained optimal path selection in QoS routing: [Tech. Rep.]. Univ. of Central South 2001
- Neve D, Miegheem P V. A multiple quality of service routing algorithm for PNNI. In: Proc. of the ATM Workshop. IEEE, May 1998. 324~328
- Lee W C, et al. Multi-Criteria Routing subject to Resource and Performance Constraints. ATM Forum 94-0280, March 1994
- Chong E I, Maddila S, Morley S. On Finding Single-Source Single-Destination k Shortest Paths. In: Proc. Intl. Conf. on Computing and Information (ICCI) '95, Ontario, Canada, July 1995. 40~47
- Guo L, Matta I. Search space reduction in QoS routing. In: Proc. of the 19th IEEE Intl. Conf. on Distributed Computing Systems, IEEE, May 1999. 142~149
- Bolkh D, Gutin G. An Approximation Algorithm for Combinational Optimization Problems with two parameters, manuscript, 1995
- Korkmaz T, Krunz M, Tragoudas S. An efficient algorithm for finding a path subject to two additive constraints. In: Proc. of the ACM SIGMETRICS'00 Conf. June 2000. 318~327
- Hassin R. Approximation schemes for the restricted shortest path problem. Mathematics of Operations Research, 1992, 17(1): 36~42
- Lorenz D H, et al. Efficient QoS partition and routing of unicast and multicast, in IWQoS 2000, June 2000. 75~83
- Phillips C A. The network inhibition problem. In: Proc. of the 25th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC), May 1993. 776~785
- Orda A. Routing with end-to-end QoS guarantees in broadband networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(3): 365~374
- Ergun F, Sinha R, Zhang L. QoS routing with performance-dependent costs. In: Proc. of the INFOCOM 2000 Conf. IEEE, 2000. 137~146
- Widnyono R. The design and evaluation of routing algorithms for real-time channels: [Tech. Rep. TR-94-024]. University of California at Berkeley & International Computer Science Institute, June 1994
- Eppstein D. Finding the k shortest paths. In: Proc. of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE, Nov. 1994. 154~165
- Handler G Y, Zang I. A dual algorithm for the constrained shortest path problem. Networks, 1980(10): 293~310
- Skiscim C C, Golden B L. Solving k-shortest and constrained shortest path problems efficiently. Annals of Operations Research, 1989, 20(1-4): 249~282
- Aneja Y P, Aggarwal V, Nair K P K. Shortest chain subject to side constraints. Networks, 1983(13): 295~302
- Ma Q, Steenkiste P. Quality-of-Service Routing with Performance Guarantees. 4th International IFIP Workshop on Quality of Service, May 1997
- Bennett J, Zhang H. Hierarchical Packet Fair Queueing Algorithms. ACM SIGCOMM'96, Aug. 1996