

QoS 路由选择:问题与解决方法综述

朱慧玲¹,杭大明¹,马正新¹,曹志刚¹,李安国²

(1. 清华大学电子工程系微波与数字国家重点实验室,北京 100084;2. 香港大学电机与电子工程系,香港)

摘 要: 保证服务质量的 QoS 路由(Quality of Service Routing)是网络中解决 QoS 问题的一项关键技术. QoS 路由的主要目标是为接入的业务选择满足服务质量要求的传输路径,同时保证整个网络资源的有效利用. 度量参数选择问题、寻路问题和路由信息不准确问题是 QoS 路由中的几个主要研究内容. 本文围绕这三个方面,介绍了 QoS 路由中的主要问题及相关的解决办法,并探讨了今后 QoS 路由可能的研究方向.

关键词: QoS 路由; 多度量参数选择; 寻路开销; 不准确的路由信息

中图分类号: TN915.05 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 01-0109-08

Quality of Service Routing: Problems and Solutions

ZHU Hui-ling¹, HANG Da-ming¹, MA Zheng-xin¹, CAO Zhi-gang¹, Victor, O. K. Li²

(1. State Key Lab. on Microwave & Digital Communications, Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Dept. of EEE, the Univ. of Hong Kong, China)

Abstract: QoS Routing is one of the key technologies to provide quality of service in future networks. The goals of QoS Routing are to select feasible paths that meet QoS constraints and to make efficient utilization of the network resource. Metrics selection, feasible paths search and node state information accuracy are three key issues in QoS Routing. On these three issues, this paper presents problems and solutions in QoS Routing, and discusses the possible future directions in the QoS routing area.

Key words: QoS routing; multiple metrics; overhead of paths search; inaccurate state information

1 引言

网络中,服务质量(QoS)的研究有三个主要的推动力.一是对 QoS 有严格要求业务的出现,如交互式实时多媒体业务、IP 电话等.二是通过 QoS 研究,有助于提高网络效率,降低网络成本.三是运营商可以通过 QoS 机制,按照不同用户对服务质量的不同要求,提供多种有区别的服务,提高用户的满意度,同时提高网络运营商的收益.因此,服务质量的研究重点是如何提高网络提供 QoS 保证的能力,而最终研究的目标是保证用户对 QoS 的要求.

目前的网络研究主要通过两个途径提高 QoS.一个途径是节点控制;另一个途径是整网或局部网络控制.节点控制在单节点或单链路完成,主要控制业务对单节点共享资源的占用,包括共享的链路、缓存区、处理器资源.节点控制主要的策略包括:业务流整形、业务调度、节点缓冲区管理.整网或局部网络控制通常通过对路由与信令的控制达到对业务流或业务连接在网络中传输的直接控制.因为路由直接关系到网络性能,所以 QoS 路由成为解决 QoS 问题的一项关键技术.

QoS 路由的主要目标是为接入的业务选择满足其服务质量要求的传输路径,同时保证网络资源的有效利用.一般路由选择过程由两个部分组成:一是为到达业务选择路径并发送

数据包的过程,本文称之为寻路过程;二是节点间路由信息的交互过程.与传统的尽力而为的路由过程相比,QoS 寻路过程涉及两个方面的问题:一是依据哪些度量参数作为寻路标准,这里简称为度量参数选择问题;另一个是在寻路标准设定后,如何找到满足业务需求的路径,并保证数据经由选定路径传输到目的节点,我们称之为寻路问题.路由信息交互过程中,由于链路传输延时的存在,每个节点获得的其他节点的状态信息总是具有一定的不准确性,这些不准确性将在一定程度上影响 QoS 路由算法的有效性.因此,路由信息不准确的问题,也是 QoS 路由中的一个主要问题.

从应用背景看,目前 QoS 路由的研究可以分为三个方面:单播路由(Unicast Routing),多播路由(Multicast Routing)和 Ad hoc 路由.而在这三方面的研究中度量参数选择问题、寻路问题和路由信息不准确问题是首要解决的基本问题,也是 QoS 路由中的研究重点.本文将着重围绕这三点探讨 QoS 路由中的相关问题及相应解决办法.

2 QoS 路由研究的主要困难点

QoS 路由研究中需要解决的主要难点包括:

(1) NP-Complete 问题:同时对两个以上相互独立的参数

提出要求时,这个问题就是一个 NP-Complete 的问题^[1]. 实时应用往往会对延时,延时抖动,带宽,丢失率,业务代价等多个参数同时提出性能要求. 例如,实时多媒体业务会对延时和延时抖动同时提出要求. 这些参数相互独立时,选择满足多个参数限制的路由就成为 NP-Complete 问题^[2]. NP-Complete 问题直接关系到路由算法的可实现性.

(2) 多业务并存:同时承载多种 QoS 要求不同的业务时,网络性能优化困难,扩展困难. 尤其是 QoS 和尽力而为 best-effort 业务独立共存时,很难确定最优的操作点^[3,4].

(3) 节点状态信息的存储量大:QoS 路由中,节点需要记录的状态参量将增多. 如果状态信息的存储量随网络节点个数的增加而指数性增加,将限制网络的扩展^[3,5].

(4) 信息不准确:传输负荷的抖动、新连接的加入/取消等都可能引起网络状态变化. 这些变化因素直接影响全网状态信息的准确性,同时也直接影响算法的性能^[6,7].

这几点中,第(1)、(2)点是度量参数选择所面临的,第(3)点在寻路过程中需要考虑,第(4)点是路由信息不准确中主要解决的问题.

3 度量参数选择问题

QoS 路由中算法复杂度关系到 QoS 路由算法的可实现性. 度量参数选择直接关系到算法复杂度问题. 合理解决多参数问题,在设计低复杂度的 QoS 路由算法中占有重要地位. 另外,网络支持的度量参数反映并影响路由选择算法的性能. 支持的度量参数越多,越能有效保证提供给接入业务的服务质量,但是路由选择算法复杂度增大,存在完全满足参数限制的路由的概率减小,业务接入率降低.

目前 QoS 路由算法涉及的度量参数包括:带宽、延时、延时抖动、丢失率和跳数. 根据运算规则,这些度量参数可以分为加性度量参数、乘性度量参数和凹性度量参数. 假设路径 P 包含 n 链路 l_1, l_2, \dots, l_n , $f(l_i)$ 是链路 l_i 的参数值, $f(P)$ 是路径 P 的参数值,各种度量参数特性定义如下:

$$\text{加性度量参数: } f(P) = \sum_{i=1}^n f(l_i)$$

$$\text{乘性度量参数: } f(P) = \prod_{i=1}^n f(l_i)$$

$$\text{凹性度量参数: } f(P) = \min_{i=1,2,\dots,n} f(l_i)$$

QoS 度量参数中,传输延时、跳数、代价属于加性度量参数,丢失率属于乘性度量参数,带宽属于凹性度量参数^[2].

根据度量参数的组合方式可以将路由选择算法分为单混合度量参数路由算法和多度量参数路由算法.

3.1 单混合度量参数路由算法

单混合度量参数通过一个参数来表现多个参数的特性. 一种简单可行的方法是以多个度量参数为变量构造函数,并以此函数值作为选路标准. 例如,同时对某一业务的传输路径 P 的延时 $D(P)$ 、带宽 $B(P)$ 和丢失率 $L(P)$ 提出要求. 为了简化问题,将这三个参数要求合并为 $F(P) = B(P) / [D(P) \times L(P)]$. 则在所有可能的业务传输路径中,选择具有最大 $F(P)$ 值的路径作为传输路径.

这种混合方法存在两方面问题. 一是,当多个运算规则不同的参数通过一个参数表现时,合成参数的运算规则可能难以确定;二是,难以保证所选路径的每个参数都满足要求^[2,8]. 如上例中, $D(P)$ 、 $B(P)$ 和 $L(P)$ 分别属于加性、凹性和乘性度量参数,三者运算规则不一致,很难合理设计混合函数 $F(P)$ 的运算规则, $F(P)$ 也无法完全反映路径的延时、带宽和丢失率特性. 在参数混合中虽然可以通过加权来反映对各个参数要求的严格程度(文[8]中通过参数定界的方式来优化参数的权值),但是参数与计算规则的选择往往缺乏依据. 因此在业务对多个参数有严格要求的情况下,按照这种方法选择的路径更适合作为一种辅助参考路径.

3.2 多度量参数路由算法

多度量参数是指路由选择中对支持的每个参数要求都加以考虑,由于存在 NP-Complete 问题^[2],因此多度量参数选择的一个主要问题是如何在基本满足 QoS 要求的前提下简化问题,降低算法设计的复杂度,保证算法的可实现性,目前降低算法复杂性的方法主要有以下几种:

3.2.1 选主度量参数 一般来说,不同业务对度量参数要求有所差别. 例如,实时图像业务的延时要求高于丢失率要求,压缩数据文件的传输的丢失率要求则高于延时要求. 选主度量参数方法根据业务对不同参数要求的差异性,从多个参数中选择一个主要的参数,首先依据此参数进行路由选择. 当有多条路径满足业务对该参数的限制时,再按照一定规则根据其余参数值从这些路径中选择出合适的路径. 选主度量参数的研究中常用的主要参数有延时、跳数和带宽^[2,9~12](此处的延时主要指传输时,即链路传输的固有延时). 下面列出这类方法中几种主要的选路方法^[13].

⊗ Widest-shortest path: 先选择传输延时或跳数最小的路径. 如果这种路径有多条,选取其中剩余带宽最大的作为传输路径. 如果仍有多条,从其中随机选取一条作为传输路径.

⊗ Shortest-widest path: 先选择剩余带宽最大的路径. 如果有多条,再从中选出传输延时或跳数最小的路径作为传输路径. 如果不止一条,则任意选取一条作为传输路径.

⊗ Dynamic-alternative path: 一种改进的 Widest-shortest 路由选择方法. 当没有合适的最短路径时,选择带宽最大,跳数比最短路径大 1 的路径. 当有多条这样的路径可选时,任意选择一条作为传输路径. 如果没有则拒绝该业务.

⊗ Shortest-dist(P, n): 选择距离值 $dist(P, n)$ 最小的路径

$P, dist(P, n) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^n}$, 其中 k 为路由 P 的跳数, r_i 是链路 i 可以分配给路径 P 的带宽, n 是一个调整参数.

基于以上参数选择的算法在拓扑和负荷不同时,有很大的性能差异^[9]. 网络的对称性和连通性越好,以传输延时为主要参数的算法 widest-shortest 性能越好,反之以带宽为主要参数的算法 shortest-widest 性能越优. n 取 1 的 shortest-dist($P, 1$) 对应的算法较好地均衡了最短路径和最大带宽这两个参数,对拓扑结构具有良好的适应性,并且性能超过了前两种相应算法. 业务负荷越重,以传输延时为主要参数的算法在业务阻塞率方面的性能越优. 因为负荷重时,可能找不到满足带宽要

求的路径,导致寻路失败,业务阻塞。

选主度量参数的参数选择方法简单易于实现。但是相关的路由算法一般仅考虑两个参数要求。当参数增多时,需要对参数选择的主次进行扩展。按照这种扩展,随着参数个数的增加,选择到完全满足要求的路由的概率随之减小,业务接入率逐渐减小,算法性能下降。

3.2.2 结合节点控制策略,使多个参数具有相关性 这是一种与整形或调度控制协同的路由选择方法。文[12, 14~16]将路由调度与基于速率的调度策略相结合,为经过节点控制的业务选择路由。基于速率的调度策略根据各个业务流输入速率大小按比例分配信道带宽,如加权公平排队 WFQ (Weighted Fair Queuing) 调度策略。经过节点控制业务在节点或网络中的某些特性有确定界和相关性。利用这些确定界及相关性可以降低路由算法的复杂度,提高算法可实现性。举例说明:设某个业务的一条传输路径 P 有 n 跳,第 i 条链路的容量为 C_i ,可以证明经过()漏桶整形和 WFQ 调度后,业务端到端的延时 D ,延时抖动 J 和第 h 跳所到达的节点缓冲区大小 B 的上界分别为^[17]

$$D(P, r,) = \frac{1}{r} + \frac{n \cdot L_{\max}}{r} + \sum_{i=1}^n \frac{L_{\max}}{C_i} + \sum_{i=1}^n \text{prop}_i$$

$$J(P, r,) = \frac{1}{r} + \frac{n \cdot L_{\max}}{r}$$

$$B(P, , h) = \frac{1}{r} + h \cdot L_{\max}$$

其中 $\frac{1}{r}$ 是漏桶令牌生成速率; L_{\max} 是漏桶深度; r 是路径 P 上为此业务预留的带宽(); L_{\max} 是业务传输的最大分组长度; prop_i 是第 i 跳的物理线路传输延时。可以看到,延时和延时抖动的上界都是预留带宽的函数。因此,选路时只需根据公式判定所选路径的带宽是否满足性能要求。这样多参数路由选择就可以简化为单参数要求的路由选择。

3.2.3 量化参数 按照一定的精度量化参数可以减小算法复杂度和路由信息的开销,并能够在一定程度上保证所选路由的可用概率^[12, 18]。例如,按 阶量化速率^[12]。设网络中各路径最大速率为 r^1, r^2, \dots, r^K 。以等级 $O(\log R)$ 将这些速率分成 $\log R$ 个等级,其中 $R = r^K / r^1$ 。如果链路 l 可提供速率 r_l 满足 $r^j \cdot j \leq r_l < r^{j+1}$,则该链路速率属于第 j 个等级。按照这种量化方法,可以减小算法复杂度,而所选路由的延时不大于实际最优路由的 $(1 + \frac{1}{j})$ 倍。

3.2.4 参数定界 文[19]通过构造函数,将其中无界的实值参数映射为有界的整数形参数,以解决同时对多个相互独立的参数提出要求时的 NP-Complete 问题。以代价函数为例,假设限定业务代价函数的最大值为 C ,可以取一个小整数 x ,构造函数 $\text{new-cost}(u, v) = \lceil \text{cost}(u, v) \cdot x / C \rceil$,式中 (u, v) 为节点 u, v 之间的链路,将所有在区间 $[0, C]$ 内的实数形代价函数值映射到整数区间 $[0, x]$,代价限制 C 则映射为 x ,代价值在区间 $(C,)$ 中的路径不可选。所以又可以映射为 $x + 1$ 。通过这种映射,可以把实值参数映射为以 $x + 1$ 为界的整型参数。当一个参数经过有界整数映射后,原先的代价限制转化为对新函数的限制。在多项式时间内可以找到满足新参数要求的路径,寻路时间与参数 x 有关,并且所选路径满足原先的参数

要求。

量化参数通过对参数量化分级,降低算法复杂度,其代价是路由的准确度,即按照这种方法寻找到的路径不一定是最优的。因此,量化级数与路由准确度之间存在折中。参数定界通过某种函数映射,将无界实值参数转化成有界整型,从而降低算法复杂度。参数定界将连续实参数转化为整数型参数。这与参数量化有类似之处,因此也存在寻路准确度问题。在前面的例子中, x 取值越大,准确度越高,而算法复杂度相应增大。

以上几种度量参数选择方法,可以混合使用。例如文[9]中,将基于速率的调度与选主度量参数结合进行路由选择。

度量参数选择中还需要考虑多种业务并存问题,即如何同时满足不同业务的服务质量要求。文[9]和[4]分别对此问题进行了研究。结果表明,各个算法在不同网络拓扑特性和业务特性下性能差别较大。而现有动态路由算法在业务动态变化时的特性都无法确知。从全网性能考虑,解决多业务并存问题还需要将路由与公平调度相结合。

4 寻路问题

度量参数选择提供了保证 QoS 的寻路规则。按照这些规则和获得的网络状态信息,就可以进行有 QoS 保证的寻路。寻路过程中需要考虑如何选择路径和确保业务沿路径发送。目前,路由选择的计算方法往往采用改进 Dijkstra 或改进 Bellman-Ford 的算法。诸多研究者根据参数选择的不同,改进方法不同,设计的算法复杂度也不相同^[2, 19~21]。本节重点探讨如何根据业务对度量参数要求,寻找到合适的路径,并保证业务能够沿所选路径发送。为了保证业务沿选定路径发送, QoS 寻路往往要付出一些额外开销。与尽力而为的路由选择相比,现有 QoS 路由算法的节点状态更新信令开销和选路的计算开销都要大些。在一些基于预约的路由算法中还可能引入建立链路的信令开销和延时开销。

路由选择可以由业务源节点单独完成,也可以由网络中的多个节点协同完成。由源节点完成的路由选择称为源路由,多个节点协同完成的为分布式路由。

4.1 源路由

源路由(source routing)的路由选择由业务接入节点(即源节点)完成。一般在源路由策略中,每个节点都需要保留全网状态信息,包括网络拓扑,到达其他节点的路径的度量参数值等。业务请求到达时,源节点根据网络状态信息和业务度量参数要求计算路径,如果存在合适的路径,则由源节点沿所选路径发送资源预约信令建立路径。

特点与问题:

源路由简单灵活,源端可以独立选择路由算法计算路由,不需要有多个节点协同进行路由选择,可以避免分布式路由中的死锁和环路等现象。在基于源的发送策略中,更容易设计出可实现的低复杂度寻路算法。源路由主要的问题是寻路开销大,状态信息准确性不高,网络扩展受限,这几个问题都与节点需要保留全网状态信息有关。

源路由的寻路开销包括:更新信令开销,路径计算开销,建立链路信令开销和预约延时开销。这些开销中,路由计算通

针对单个业务,因此节点处理器资源消耗大,状态更新信令向全网发送,因此信令开销随网络节点数的增加而增加,同时节点保留的整网节点状态量和路由计算量也会相应加大。以上因素使得扩展问题成为源路由的一个关键问题^[3]。另外,实际网络中,每个节点很难实时获得其他节点的状态信息,所以每个节点获得的全网状态信息都具有不准确性。这将导致所选路由的可靠性下降。如果所选路由不可用,则需要重新进行寻路,这将进一步加大算法开销。

文[22~25]探讨了通过预先计算路由的方法减小源路由的计算和预约延时开销。文[26]中也建议使用预计算路由。这种方法的思路是在业务到达前预先计算路由。预先计算路由主要涉及以下几个问题。

(1) 有效 QoS 路由与寻路开销间的折中问题,即何时发起预先计算;

(2) 如何预先计算和存储多条路径;

(3) 一个业务到达时,开销如何计算;

(4) 如何限制寻路和信令开销。

预先计算路由中,每个节点仍然需要保留整网状态信息,因此更新开销和不确定性问题仍然存在。为了减小节点状态信息存储量,人们提出了分层路由^[27~29]。分层路由是将多个节点汇集成一个组,多个组又可以汇集成更高层的组。通过汇集,整个网络可以建成一个分层型网络。分层网络结构如图 1 所示。网络中每个节点仅了解自己所属组的节点特性和其他汇集组的总体特性。寻路过程中,每个节点将其他汇集组看成为一个逻辑节点进行寻路。分层路由虽然可以减小节点信息更新和路由计算开销,但是,节点状态信息不准确性仍然存在。而且,汇集成组后,组外节点无法完全获知组内节点的状态信息,更加重了信息的不准确性^[3]。因此需要对汇集组的特性标识进行研究。

4.2 分布式路由

分布式路由(distributed routing)中,路由选择由多个节点协同完成。每个节点存有到所有目的节点的下一跳列表。当收到一个数据包时,路由由节点仅查表确定下一跳节点,然后发送数据包。这样,数据包经由每一个节点一跳接一跳前向发送。分布式路由的寻路一般是通过分布式地发送信令过程实现的^[3,20,21,30,31]。每个节点通过信令,了解本节点相应于到达某个目的节点的某种业务的前一级节点和后继节点。

特点与问题:

分布式路由的路由计算和信令发送过程一般是在业务到达前预先进行的^[9]。因此路由建立的响应比源路由快。文[30,

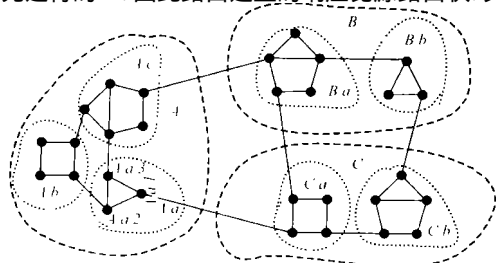


图 1 三级分层网络模型

31]提出的基于探测(probing)的分布式路由算法是一种典型的分布式 QoS 路由算法。这种算法的基本思想是沿多条路径为业务发送寻路探测包。算法中每个节点仅需保留部分网络状态信息,计算开销小。这里简单介绍选择探测算法^[30]。此算法中业务源节点为该业务沿多条路径发送寻路的探测包。接收到探测包的节点,向多个节点转发该探测包。每个探测包负责搜集所经路径的状态信息。目的节点收到探测包后,沿选定路由反向发送确认包。选定路径上每个节点通过收到的确认包获知该节点在所选路径上的下一跳节点。通过这个过程,各个节点间就建立了基于业务的前后联系。

基于探测包的算法不需要每个节点都保存全网状态信息,可以减小路由节点的状态存储量和节点计算开销,同时可以减小网络状态信息更新量,为网络扩展提供了良好的基础,因此得到了广泛关注。目前 QoS 路由中研究的比较多的蚂蚁路由算法^[32]就是一种由目的节点发起探测的探测寻路方法。基于探测包的分布式路由的主要开销是探测包开销。所选路径的可靠性越高、越接近最优路径,需要的探测包越多。但是探测包过多会加大网络负荷,降低网络效率。因此,寻路探测包的数量与网络效率的折中点是该算法中需要解决的一个主要问题。另外在不同的探测包发送方式下,寻找到最佳路径所耗费的探测包开销不同。因此,还需要考虑如何保证寻路过程在小探测开销下快速收敛到最佳路径。

分布式路由存在两个主要问题。一个是环路问题。网络中各个节点保留的其他节点状态信息不一致或者节点路由信息不准确,都可能引起环路^[20,33]。虽然,环路可以在数据包第二次到达同一节点时被检测到,但是环路的存在会引起非网络拥塞造成的业务延时。另外,业务在相同链路上的重复发送也会加重网络负荷,降低网络效率。另一个是多个路由节点的有效协同问题。文[34]中指出路由由节点间的协同对网络性能的提高很重要。如果路由由节点间不能很好地协同,对整个网络的性能、路由协议的动态特性及路由结构的扩展性都会有负面影响。

源路由与分布式路由的共同问题

表 1 比较了源路由和分布式路由。为了保证 QoS,源路由与分布式路由有时都可能进行资源预约。预约过程中,其他业务无法占用被预约了的空闲资源,造成资源利用率下降。如果预约过程中,某个节点资源不可得,预约失败,则已经预约的资源将完全浪费,也会降低链路利用率。文[35,36]针对这个问题提出软预约与硬预约相结合的方法。其基本思想是:处于软预约状态的资源不再被其他业务预约,但是仍然可以被其他业务使用。如果软预约状态的资源接收到反向确认信息,则转入硬预约状态,其他业务不可以再使用该资源。资源预约的主要缺点是会在一定程度上降低路径利用率。

网络扩展问题也是二者共同面对的一个问题。如何降低节点状态存储量,减小路由节点个数对节点状态信息的存储量的影响,削减路由开销是提高网络扩展性的关键点。

源路由与分布式路由中另一个重要问题:路由信息不准确会导致路由算法性能下降,难以为业务确定提供 QoS 保证。本文的第五部分将详细介绍有关此方面问题的研究。

表 1 源路由和分布式路由的比较

	寻路开销	开销量	节点保存的状态信息	状态信息不准确可能引起的主要问题
源路由	更新信令开销	大	保存整个网络中所有节点所选参数特性(如:带宽大小,链路延时)	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ 选路失败,重新寻路,开销增加 ⊗ 所选路径不是最优路径 ⊗ 网络扩展性降低
	计算路径开销	大		
	建立链路信令开销	较小		
	预约延时开销	大		
分布式路由	更新信令开销	较小	保存整个网络中所有节点所选参数特性或者仅保存相对于某个业务的下一跳节点	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ 节点间寻路协同性降低 ⊗ 引起环路
	计算路径开销	较小		
	建立链路的探测信令开销	大		
	预约延时开销	较小		

5 路由信息不准确问题

不准确的路由信息可能会使路由选择失败,重新进行路由计算和发送预约信令,从而增大网络开销和业务延时.分布式路由中,不准确的路由信息还可能导致环路.文[6,7,10,16,31,37~42]从不同角度探讨了如何减小路由信息不准确对 QoS 路由性能的影响,并提出了相应的解决方案.这些解决方案可以分为以下几类.

5.1 合理设计路由信息更新方法

路由信息的更新直接关系到每个节点保留信息的准确性.信息更新越频繁,节点获得的信息准确性越高,但同时引入的信息开销也越大.合理的路由信息更新策略能够有效均衡信息准确性与路由开销,同时也可以为路由算法性能与算法可实现性找到合适的折中点^[7,10,16,38~40].

5.1.1 更新方法的设计 更新方法的设计主要是设计何时触发状态更新.更新方法可分为基于时间变化和基于带宽变化两种.基于时间变化是指在某些时刻触发更新.基于带宽变化是指带宽变化到某些值时触发更新.以下是四种主要的更新机制^[38].

(1) 周期触发:基于时间变化的触发.每隔一个固定的时间就发送一次节点状态信息.

(2) 基于门限的触发:基于带宽变化的触发.当剩余带宽变化量 $|bw_i^0 - bw_i^1| / bw_i^0$ 超过某个门限时,就发送节点状态信息.这里,带宽是固定时间内的统计带宽.

(3) 分级触发:基于带宽变化的触发.这种方法将带宽按间隔划分成几个等级,即设定 n 个带宽门限 $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 且 $B_1 < \dots < B_n$.当链路剩余带宽从一个等级 $[B_j, B_{j+1})$ 跳至另外一个等级 $[B_k, B_{k+1})$ 时,触发节点状态信息的发送.其中,带宽间隔可以是均匀的,也可以是非均匀的^[38].

(4) 有时间控制的触发:在带宽变化触发方法的基础上,加入时间控制.周期触发可以看作是其中的一个特例.文[38]提出可以在机制(2)和(3)的基础上,限制两次连续触发的最小时间间隔,即设置钳制时间(*clamp down timer*),以适当减小状态信息的发送频率.

文[38]在不同业务和拓扑结构下比较了以上策略,并得出结论:不同业务特性和不同拓扑下各种触发机制的性能不同.

5.1.2 更新点对网络性能的影响和更新点的优化

文[10]详细地分析了周期更新和基于门限的更新中更新

周期和更新门限对接入成功(预约成功)率和传输成功率的影响.接入成功率是成功为到达业务选择到传输路径的概率.传输成功率指业务成功传输到目的节点的概率.文[10]通过仿真研究了网络拓扑结构,代价函数的量化对路由更新的影响,并得出以下结论.

⊗ 更新周期越大呼叫阻塞率越大.更新周期超过一定值后,呼叫阻塞率将超过静态路由的阻塞率.

⊗ 门限的改变对呼叫阻塞率的影响不大,但随门限值的增加,引起呼叫阻塞的原因逐渐由接入失败转变为传输失败.

⊗ 接入成功率和传输成功率间存在折中关系.

⊗ 连通性好的网络中,当接入失败逐渐转化为传输失败时,QoS 路由性能下降.

⊗ 连通性好的网络中,在一定的更新策略下,静态路由与动态 QoS 路由具有可比性.

⊗ 合理的量化等级可以减小状态存储量,简化计算,为网络扩展提供可能性.过细地量化代价函数对网络性能没有大的提高,而且在获得的链路状态信息不够准确时,反而会降低网络性能.

由于网络拓扑结构多种多样,业务类型和对 QoS 要求也各自不同,从理论上对更新问题进行研究还没有很好的方法.因此,目前对更新问题的研究主要是以仿真为主,并利用仿真结果为设计路由算法提供参考.

5.2 根据统计信息选路

5.2.1 概率选路 按照度量参数取值的概率选择一条具有最大可能性的路径,可以克服信息不准确为选路带来的影响^[6].概率选路从理论角度提出了一种削弱不准确对路由性能影响的方法.文[37]中给出了一种以带宽为主要参数的端到端概率寻路方法.这种方法将路径上的端到端的限制分解到该路径的各条链路上,以减小寻路算法的复杂度.当带宽服从一些特殊分布时(如均匀分布和负指数分布),这种分解限制的方法可以实现,但是对于复杂分布这种方法的可实现性仍然有待探讨.

5.2.2 选择多路由 许多研究表明通过多路径发送业务,或采用多备份路径可以平衡网络负荷,提高网络性能^[5,9,43,44,45].文[5,42]基于多路径策略,根据网络可用资源概率统计值,计算业务量在各个可选路径上的分配比例,并按照计算的比例决定业务数据包的传输路径.仿真结果表明,采用此方法可以有效减低状态信息不准确对路由算法性能的影响.

选择多路由时,同一业务的数据包分配在多条路径上发送.分配不当可能造成节点业务抖动,且可能出现环路.因此多路由算法中需要对网络稳定性和环路现象进行分析,以保证网络性能^[5].

以上几种不准确问题的解决方案中,合理设计路由信息更新方法是最直接的方案.信息更新点的选取与网络拓扑及 QoS 度量参数有关,如何设计一个通用的分析方法以适应不同网络特性和 QoS 参数,还是一个需要深入研究的问题.根据统计信息选路可以不受网络拓扑的限制,如何有效进行统计,获取这些参数将是一个关键问题.

6 总结与展望

实现复杂度高,多业务并存难以优化,网络扩展受节点存储量和路由开销的限制,节点状态信息不准确是 QoS 路由研究中需要解决的基本难点.本文从三个方面(度量参数选择、寻路和路由信息不准确)介绍了解决这些难点的方法.从各种性能比较上看,这些 QoS 路由算法在一定程度上改善了网络的服务质量,但是现有的研究还普遍存在以下几个主要问题.

(1) 缺乏路由模型,理论研究困难.由于网络拓扑和业务特性复杂多样,协议数学描述困难.因此,目前多数路由研究主要是针对某个问题设计启发式算法,而不是基于某种模型从理论上推导算法特性和性能.这种情况下,为了分析算法性能,往往需要大量仿真工作.由于缺乏理论支持,在不同的拓扑结构和业务特性下,算法性能可能差异较大,而且仿真得到的结果缺乏说服力.虽然文[46~48]尝试利用优化理论,建立状态方程和网络资源利用率函数并优化其取值,以确定各个业务在某条路径上可获得的带宽,并且分析了各个状态的稳定性.但是这种研究往往求解困难或需要简化很多网络特性,如文[46]中没有考虑链路延时,文[47,48]则要求业务源平稳或准平稳,因此结果难以直接用于实际网络.

(2) 优化目标不同,评估标准不一致.目前主要的优化目标包括代价和延时等加性参数.评估标准主要有:业务接入率、阻塞率、数据丢包率、带宽利用率、节点队列长度、代价、信令开销等.由于各个研究者解决的问题不同,优化目标往往不相同,评估标准也不一致,不利于比较不同算法的性能.因此制定出统一的路由性能评估对路由研究具有重要意义.

(3) 接入业务的变化对网络状态影响大.现有的 QoS 路由依据用户业务对服务质量的要求进行寻路,一旦存在满足要求的路径就会将业务接入.在业务接入时,没有考虑该业务的接入对网络状态有多大的改变.因此,可以说目前的 QoS 路由是基于服务质量要求的尽力而为的路由.在这种情况下,如果业务特性变化过快,网络状态急剧变化,网络效率、阻塞率等特性都会受到很大影响.因此,在今后的研究中网络的性能变化也应该作为业务接入的一个参考.

(4) 节点控制与路由过程脱离.网络为业务提供 QoS 服务时,节点控制和路由控制是相辅相成,缺一不可的.文[12,14~16]文中虽然将路由与节点控制结合在一起.但是他们都仅仅考虑了如何将控制后的具有某种特性的业务进行路由.而

没有考虑过在节点控制下应该采用什么样的路由策略,也没有考虑过在不同路由策略下应该采用什么样的节点控制,以更进一步优化网络的服务质量.

以上问题的解决对设计出高性能的路由算法,更好地满足业务对服务质量的要求,提高网络资源利用率,实现用户级 QoS 至关重要.因此以下方面可能成为未来 QoS 路由研究中的突破点.

(1) 基于理论模型的 QoS 路由算法研究.构建或借助现有的理论模型,设计路由算法.例如基于控制理论,分析如何优化业务的路由过程.在理论模型的基础上设计路由算法,有助于建立路由算法的数学模型,解析路由算法的性能.

(2) 统一评估标准的制定.统一的评估标准对路由算法研究和不同应用背景下路由策略的选取具有指导意义.在统一评估标准的研究中,首先应该考虑如何针对各种参数要求,公平地从不同角度比较路由算法的性能.

(3) 业务对节点状态影响的控制.通过控制,保证网络节点状态的相对稳定.这方面研究的主要目标是减小网络状态与业务相关性,避免网络特性因业务的突变而急剧变化.这主要涉及三个方面的研究.根据全网的状态,控制业务接入;节点间协同互控;状态信息的更新策略.

(4) 路由算法与节点控制的结合.路由算法与节点控制的良好匹配,有助于提高网络的服务质量.其中有几点需要深入研究.一是如何根据路由需要,设计节点控制策略;二是如何充分利用度量参数的相关性,合理设计路由策略,优化算法性能;三是设计合理的调度算法,使所选度量参数有界、相关;四是如何调整调度开销和路由选择开销的比例,优化总体开销.

在实际应用方面,一般对 QoS 路由的主要要求是:高效、低复杂度、可扩展、灵活适应不同网络拓扑和业务的环境.对于这些要求,本文所介绍的路由算法各有针对,各有优缺点.通过对各种算法的比较,我们认为在今后的 QoS 路由中,以下几项技术更具有发展潜力.

(1) 与节点控制相结合解决多度量参数问题的方法.这种方法通过对业务的预处理,界定参数、加大参数间的相关性,便于扩展参数个数,并且可以灵活区分业务类别,有助于设计低复杂度的有优先级保证的 QoS 路由算法,可以作为提高 QoS 路由算法,可以作为提高 QoS 路由性能的一个很好的途径.另外,作为 QoS 研究的两个主要方面,节点控制与路由控制的相互结合对 QoS 的实现具有重要意义.

(2) 从网络扩展考虑, QoS 路由中,分层式路由和分布式路由扩展性都优于源路由.二者的结合可能会成为未来寻路方式的关键点.

(3) 根据统计信息选择路径.本文作者在此方面进行了一定的研究^[42],结果表明,根据统计信息选择路径可以降低路由信息不准确对路由算法性能的影响,均衡网络负荷,提高网络效率.

从目前的应用看 QoS 路由技术还没完全进入应用市场.虽然社会与经济是两个重要因素,但是从算法研究到技术实现仍然需要大量细致而深入的工作.

参考文献:

- [1] M Garey ,D Johnson. Computers and Intractability :A Guide to the Theory of NP-Completeness [M]. New York :W. H. Freeman and Company ,1979. 38 - 50.
- [2] Zheng Wang ,Jon Crowcroft. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications ,1996 ,14(7) :1228 - 1234.
- [3] Shigang Chen ,Klara Nahrstedt. An overview of quality-of-service routing for the next generation high-speed networks :Problems and solutions [J]. IEEE Network Magazine ,1998 ,12(6) :64 - 79.
- [4] R J Sinivasankar ,S Ramanz ,et al. Some studies on the impact of dynamic traffic in a QoS-based dynamic routing environment [A]. ICC '2000[C]. New Orleans ,USA :ICC ,2000. 959 - 963.
- [5] Nelakuditi S ,Zhi-Li Zhang ,Tsang R P. Adaptive Proportional routing :a localized QoS routing approach [A]. INFOCOM 2000[C]. Tel-Aviv , Israel :INFOCOM ,2000. 1566 - 1575.
- [6] Guerin Roch ,Orda Ariel. QoS-based routing in networks with inaccurate information : Theory and algorithms [A]. INFOCOM '97 [C]. Kobe ,Japan :INFOCOM ,1997. 75 - 83.
- [7] Qingming Ma ,Peter Steenkiste. On path selection for traffic with bandwidth guarantees [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols[C]. Georgia ,USA :IEEE ,1997.
- [8] Alpar Juttner ,Balazs Szviatovszki ,Ildiko Mecs ,Zsolt Rajko. Lagrange relaxation based method for the QoS routing problem [A]. INFOCOM 2001 [C]. Alaska ,USA :INFOCOM ,2001.
- [9] Qingming Ma ,Peter Steenkiste ,Hui Zhang. Routing high-bandwidth traffic in max-min fair share networks [A]. Proceedings of ACM SIGCOMM 96 [C]. Stanford ,California ,USA :ACM ,1996. 206 - 217.
- [10] Anees Shaikh ,Jennifer Rexford ,Kang B Shin. Dynamics of quality-of-Service routing with inaccurate link-state information [R]. Technical Report CSE-TR-350-97 ,Computer Science and Engineering Division , Dept. of Electrical Engineering and Computer Science ,University of Michigan ,1997.
- [11] Shigang Chen ,Klara Nahrstedt. Maxmin fair routing in connection-oriented networks [A]. Proceedings of Euro-Parallel and Distributed Systems Conference (Euro-PDS '98) [C]. Vienna ,Austria :Euro-PDS ,1998. 163 - 168.
- [12] Ariel Orda. Routing with end to end QoS guarantees in broadband networks [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking ,1999 ,17(3) :365 - 374.
- [13] Qingming Ma ,Peter Steenkiste. Quality-of-service routing for traffic with performance guarantees [A]. The proceedings of IFIP Fifth International Workshop on Quality of Service [C]. New York :IFIP ,1997. 115 - 126.
- [14] Chotipat Pornavalai ,Goutam Chakraborty ,Norio Shiratori. QoS based routing algorithm in integrated services packet networks [R]. Technical Report ,97 - 1 - 006 ,The University of Aizu ,1997.
- [15] Qingming Ma ,Peter Steenkiste. Routing traffic with quality-of-service guarantees in integrated services networks [A]. Proceedings of Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV) [C]. New Hall College ,Cambridge ,UK :NOSSDAV ,1998.
- [16] Zhong Fan ,E S Lee. Multiple QoS constrained routing with inaccurate state information [J]. Electronics Letters ,1999 ,35(21) :1807 - 1808.
- [17] Hui Zhang. Service disciplines for guaranteed performance service in packet-switching networks [J]. Proceedings of the IEEE ,1995 ,83(10) :1374 - 1396.
- [18] Danny Raz ,Yuval Shavitt. Optimal partition of QoS requirements with discrete cost functions [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications ,2000 ,18(2) :2593 - 2601.
- [19] Shigang Chen ,Klara Nahrstedt. On finding multi-constrained paths [A]. ICC '98[C]. Georgia ,Atlanta ,USA :ICC ,1998.
- [20] Hussein F Salama ,Douglas S Reeves ,Yannis Viniotis. A distributed algorithm for delay-constrained unicast routing [A]. INFOCOM '97[C]. Kobe ,Japan :INFOCOM ,1997. 84 - 91.
- [21] D S Reeves ,H F Salama. A distributed algorithm for delay-constrained unicast routing [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking ,2000 ,8(2) :239 - 250.
- [22] Chotipat Pornavalai ,Goutam Chakraborty ,Norio Shiratori. QoS routing algorithms for pre-computed paths [A]. Proceedings of the International Conference on Computer Communications and Networks [C]. Las Vegas ,USA :ICCCN ,1997.
- [23] G Apostolopoulos ,S K Tripathi. On the effectiveness of path pre-computation in reducing the processing cost of on-demand QoS path computation [A]. Proceedings IEEE Symposium on Computers and Communication [C]. Greece :IEEE ,1998.
- [24] A Shaikh J Rexford ,K Shin. Efficient precomputation of quality-of-service routes [A]. NOSSDAV '98 [C]. Cambridge ,UK :NOSSDAV ,1998. 15 - 27.
- [25] Orda Ariel ,Sprintson Alexander. QoS routing :The precomputation perspective [A]. INFOCOM 2000[C]. Tel-Aviv ,Israel :INFOCOM ,2000. 128 - 136.
- [26] RFC2676. QoS Routing Mechanisms and OSPF Extensions[S].
- [27] M Montgomery ,G de Veciana. Hierarchical Source Routing through Clouds [A]. INFOCOM 98[C]. San Francisco ,USA :INFOCOM ,1998. 685 - 692.
- [28] Jochen Behrens ,J J Garcia-Luna-Aceves. Hierarchical routing using link vectors[A]. INFOCOM '98 [C]. San Francisco ,USA :INFOCOM ,1998. 702 - 710.
- [29] King-Shan Lui ,Klara Nahrstedt. Topology aggregation and routing in bandwidthdelay sensitive networks [A]. Globecom 2000 [C]. San Francisco ,USA :GLOBECOM ,2000. 410 - 414.
- [30] S Chen ,K Nahrstedt. Distributed quality-of-service routing in high-speed networks based on selective probing [A]. Proceedings of IEEE Conference on Local Computer Networks [C]. Boston :IEEE ,1998. 80 - 89.
- [31] S Chen ,K Nahrstedt. Distributed QoS routing with imprecise state information [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications and Networks [C]. Lafayette ,L. A. , USA :IEEE ,1998.
- [32] R Schoonderwoerd ,O Holland ,J Bruten ,L Rothkrantz. Ant-based load balancing in telecommunications networks [J]. Adaptive Behavior ,1996 ,5(2) :169 ~ 207/ HP Laboratories Technical Report 96 - 76 ,May ,1996.
- [33] Joao Luis Sobrinho. Algebra and algorithms for QoS path computation

- and hop-by-hop routing in the internet [A]. INFOCOM 2001 [C]. Alaska, USA, : INFOCOM, 2001.
- [34] Ramesh Govindan, Cengiz Alaettinoglu, et al. An architecture for stable, analyzable internet routing [J]. IEEE Network, 1999: 29 - 35.
- [35] Hung Keng Pung, Jun Song, Lillykutty Jacob. Fast and efficient flooding based QoS routing algorithm [A]. IEEE Conference on Computer Communication and Network [C]. Boston, USA: IEEE, 1999. 298 - 303.
- [36] Jun Song, Hung Keng PUNG, Lillykutty Jacob. A multi-constrained distributed QoS routing algorithm [A]. Proc. ICON2000 [C]. Singapore: National University of Singapore, 2000.
- [37] Dean H Lorenz, Ariel Orda. QoS Routing in networks with uncertain parameters [A]. INFOCOM '98 [C]. San Francisco: INFOCOM, 1998.
- [38] G Apostolopoulos, R Guerin, S Kamat, S Tripathi. Quality of service based routing: A performance perspective [A]. Proceedings of ACM SIGCOMM [C]. Vancouver, Canada: ACM, 1998.
- [39] G Apostolopoulos, R Guerin, S Kamat, S Tripathi. Improving QoS routing performance under inaccurate link State information [A]. Proceedings of the 16th International Teletraffic Congress (ITC '16) [C]. United Kingdom: ITC, 1999.
- [40] Anees A Shaikh. Efficient dynamic routing in wide-area networks [D]. USA: Computer Science and Engineering in The University of Michigan, 1999.
- [41] A Ariza, E Casilari, F Sandoval. QoS routing with outdated network knowledge [J]. Electronics Letters, 2000, 36(15): 1332 - 1334.
- [42] Zhu Huiling, Ma Zhengxin, Wang Yongqian, Cao Zhigang. Improving QoS routing with multi-path scheme under inaccurate link state information [A]. The International Conference on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences [C]. Tokyo, Japan: ICFECCS, 2002.
- [43] Peter B Key, Graham A Cope. Distributed dynamic routing schemes [J]. IEEE Communications Magazine, 1990: 54 - 64.
- [44] Israel Gidon, Raphael Rom. Multi-path routing combined with resource reservation [A]. INFOCOM '97 [C]. Kobe, Japan: INFOCOM, 1997. 92 - 100.
- [45] Guoliang Xue. Optimal multi-path end-to-end data transmission in networks [A]. ISCC '00 [C]. Antibes, France: ISCC, 2000.
- [46] Constantino Lagoa, Hao Che. Decentralized optimal traffic engineering in the internet [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2000, 30(5).
- [47] R G Gallager. A minimum delay routing algorithm using distributed computation [J]. IEEE Transactions on Communications, Jan., 1977, Comr-25(1): 73 - 84.
- [48] Adrain Segall. The modeling of adaptive routing in data-communication networks [J]. IEEE Transactions on Communications, Jan., 1977, Comr-25(1): 85 - 95.

作者简介:



朱慧玲 女, 1975 年生于江西泰和, 1997 年毕业于西安电子科技大学, 现为清华大学电子工程系博士研究生, 主要研究方向是 QoS 路由及算法实现。



杭大明 男, 1977 年生于安徽省马鞍山市, 1999 年毕业于清华大学电子工程系, 获学士学位, 现为清华大学电子工程系博士研究生, 主要研究方向是基于接入网的 IP QoS。