

# 基于网络效用最大化的一体化网络 服务层映射模型

李世勇,秦雅娟,张宏科

(北京交通大学电子信息工程学院下一代互联网互联设备国家工程实验室,北京 100044)

**摘要:** 端到端多连接多路径技术能够极大地提高传输的吞吐量,增强数据传输的安全性和可靠性,因此得到了很多学者的关注.一体化网络中提出了从服务到连接和从连接到路径的映射机制,实现了并行多连接多路径的数据传输.本文研究了一体化网络服务层的映射机制,基于网络效用最大化思想,给出了从服务到连接和从连接到路径的多对多映射的数学模型.服务经连接到路径的映射过程就是如何合理有效地将路径带宽分配给各个服务,从而使得所有服务的效用之和达到最优.当网络中同时存在弹性服务与非弹性服务时,给出了映射模型的一般形式,确保了非弹性服务能够获得一定的服务质量.

**关键词:** 一体化网络;多连接;多路径;映射;效用

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0282-08

## Mapping Model for the Service Layer of Universal Network Based on Network Utility Maximization

LI Shi-yong, QIN Ya-juan, ZHANG Hong-ke

(National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Interconnection Devices,  
School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Technologies of end-to-end multi-connection and multi-path transmission have gained a lot of researchers' attention since they can improve throughput and promote security and reliability in data transmission. In the Universal Network, mapping mechanisms are presented from service to connection and from connection to path, so that data transmission with concurrent multi-connection and multi-path is also realized. This paper analyzes the mapping mechanism for the service layer of the Universal Network, and proposes the mathematical models for multi-to-multi mappings from service to connection and from connection to path based on network utility maximization. Mapping from service to path via connection is indeed how to allocate the path capacity to all services so that the aggregated utility of all services is globally optimized. General mapping models are also presented when there are inelastic services as well as elastic services in the network, so that the inelastic services can be guaranteed with certain QoS.

**Key words:** universal network; multi-connection; multi-path; mapping; utility

### 1 引言

网络技术的不断发展促使人们对各种各样服务的需求也飞速增长.为了完成一次服务,网络各个层需要维护的信息量越来越多,信息交互的方式也越来越复杂.一次复杂的服务往往经过分割与整合后成为多个逻辑上相互独立的部分,这样提高了服务的鲁棒性和灵活性,满足了用户不断增长的服务需求;由于一次服务分割成了多个不同数据类型的子服务块,因此传输层需要

为一次服务提供多条连接,利用多连接数据传输技术支持服务的灵活分割和整合,从而提高了数据传输的效率和吞吐量;而且,多种网络接入方式和接入技术的应用使得通信主机具有了多家乡的特点,这也就使得通信主机可以利用多条路径并行传输数据,从而很好地支持了服务的分割与整合以及通信主机间多连接的建立,增强了数据传输的可靠性和安全性.

并行多连接传输可以极大地提高应用的吞吐量和  
服务完成的效率.文献[1]设计实现了一个支持多连接

的函数库,该函数库可以实现应用数据分割,然后再基于多个 TCP 连接进行传输,与单 TCP 连接传输相比明显提高了数据传输效率.文献[2]通过修改 TCP 实现了并行 TCP 套接口,使得传输性能获得了很大提高.文献[3]实现了基于四个 TCP 连接传输数据的 Netscape 浏览器,提高了数据传输性能.文献[4]分析解释了多 TCP 连接可以提高网络性能的原因.文献[5~7]提出了一种新的网络体系架构——一体化网络,在网络的服务层设计中提出了服务标识解析映射,实现了从服务到连接的多对多映射,利用多连接传输机制提高了数据传输的效率和吞吐量.

接入技术的多样化以及接入设备成本的不断降低使得端到端多路径并行传输成为了现实.目前,端到端多路径并行传输技术已经被广泛应用于数据传输中,从而提高了传输效率和可靠性.文献[6]在一体化网络架构中,提出对服务层的连接来说,网通层可抽象为仅仅是提供一条交换路径,在此基础上,提出了从服务层的连接到网通层的路径的连接标识解析映射,实现了数据在多条路径上的并行传输.文献[8]从资源预留的角度分析了多路径传输的性能,通过与单路径路由比较得出多路径路由能极大地降低连接建立时间,提高网络传输性能.文献[9]提出了 pTCP,实现了传输层数据分割,然后再基于多路径传输.文献[10]提出了 mTCP,通过修改 TCP 解决了多路径传输带来的数据包乱序问题,实现了在覆盖网上的多路径并行传输.文献[11]通过修改 SCTP 的发送端机制,引入了一个可以跨路径记录数据包顺序的序号,实现了并行多路径传输.文献[12]通过修改 SCTP 数据包的格式,引入一个记录路径内数据包顺序的序号,将 SCTP 的拥塞控制从面向关联扩展到面向路径,实现了基于 SCTP 的并行多路径传输.文献[13]指出在互联网范围内应用多路径技术能够提高数据传输的安全性、鲁棒性,并且可以实现负载均衡.

因此,多连接多路径技术能提高传输的吞吐量和带宽的利用率,增强数据传输的可靠性和安全性,成为下一代网络体系架构研究的重要内容<sup>[5~7]</sup>.本文研究了文献[6]提出的一体化网络服务层的服务标识解析映射和连接标识解析映射,基于网络效用最大化思想,提出了从服务到连接的多对多映射和从连接到路径的多对多映射的数学模型,指出了从服务经连接到路径的映射目标,即为服务合理选择路径并分配路径带宽,实现网络中所有服务的聚合效用达到最优.针对网络中普遍存在的非弹性服务,本文还给出了具有一定 QoS 保证的映射模型,确保了非弹性服务能够获得一定的服务质量.

## 2 一体化网络架构

### 2.1 网络架构

在总结了现有互联网四层体系架构和 OSI 七层体系架构的基础上,文献[5~7]提出一种新的网络体系架构,该一体化网络架构由服务层和网通层组成.服务层可分为虚拟服务模块和虚拟连接模块;网通层可分为虚拟接入模块和虚拟骨干模块,如图 1 所示.服务层完成各种服务的统一描述和管理,实现服务的普适化.网通层为多元化的网络接入提供平台,为数据、语音、视频等服务提供一体化的网络通信平台,从而有效地支持了普适服务.

服务层定义了服务标识和连接标识,并引入了从服务到连接的服务标识解析映射,实现了从一个服务到多条连接的映射,提高了服务完成的效率;同时,引入了从连接到路径的连接标识解析映射,实现了多条连接到多条路径的映射,提高了路径的利用率,增强了数据传输的安全性和可靠性.网通层定义了接入标识和路由标识,并引入了从接入到路由的接入标识解析映射,支持现有各种子网和终端的接入,从而实现了多元化的网络接入,很好地支持了服务层的普适服务,而且接入标识解析映射还很好地支持了网络的安全性,提高了整个网络的性能.



图1 一体化网络体系架构(来自文献[5])

### 2.2 标识

服务标识定义了一种统一的服务描述形式,实现了对服务的统一管理.文献[6]根据用户可感知 QoS 和服务本身 QoS 提出了一种服务标识的构思和设计原则.这里仅仅给出服务标识的一般设计形式.假设服务标识的集合为  $SID = \{SID_1, SID_2, \dots, SID_s\}$ , 其中  $SID_s$  是服务  $s$  的服务标识.定义服务标识  $SID_s = \phi(a_1(s), a_2(s), \dots, a_k(s))$ , 其中  $a_i(s)$  是服务  $s$  的第  $i$  个属性,  $\phi(\cdot)$  是服务标识生成函数.例如,可以定义下列形式的服务标识:  $SID_s = \phi(s, QoS, rate, \dots)$ . 该服务标识的前三个参数分别是服务类别  $s$ , 服务应满足的 QoS 级别, 服务应满足的数据流大小  $rate$ . 当然,该服务可能还有其他的一些属性,如服务应满足的最低时延等等,这里就

不一一列出了。

连接标识用于为服务建立连接与传输数据. 文献[6]给出了连接标识的一般形式. 假设连接标识的集合为  $CID = \{CID_1, CID_2, \dots, CID_c\}$ , 其中  $CID_c$  是连接  $c$  的连接标识. 定义  $CID_c = \phi(b_1(c), b_2(c), \dots, b_m(c))$ , 其中  $b_m(c)$  是连接  $c$  的第  $m$  个属性,  $\phi$  是连接标识生成函数. 例如, 可以定义下列的一种连接标识形式:  $CID_c = \varphi(h, l, SID_i, k, \dots)$ . 该连接标识的前四个参数分别是客户端  $h$ , 服务器端  $l$ , 服务标识  $SID_i$ , 可以建立的连接数目  $k$ . 该连接标识意味着要完成服务标识为  $SID_i$  的服务  $i$ , 而在客户端  $h$  和服务器端  $l$  之间建立  $k$  条连接. 服务  $i$  的属性信息可以通过服务标识  $SID_i$  传递给连接标识  $CID_c$ . 当然该连接标识的定义还可以包括一些其他的属性.

交换路由标识用于在网通层进行选路和路由, 形成用于通信的路径. 假设交换路由标识的集合为  $RID = \{RID_1, RID_2, \dots, RID_r\}$ , 其中  $RID_r$  是路由  $r$  的交换路由标识. 定义  $RID_r = \theta(d_1(r), d_2(r), \dots, d_n(r))$ , 其中  $d_n(r)$  是路由  $r$  的第  $n$  个属性,  $\theta$  是交换路由标识生成函数. 例如, 可以定义下列形式的交换路由标识:  $RID_r = \theta(a_h, a_l, CID_j, \dots)$ . 该路由标识的前三个参数分别是客户端的接入方式  $a_h$ , 服务器端的接入方式  $a_l$ , 要完成的连接标识为  $CID_j$  的连接  $j$ . 客户端  $h$  (服务器端  $l$ ) 由于接入方式  $a_h$  ( $a_l$ ) 的不同可以在客户端和服务器端之间形成多条并行路径, 从而实现并行多路径传输. 当然该交换路由标识的定义也可以包括一些其他的属性. 由交换路由标识的定义可以得出, 当接入方式  $a_h$  和  $a_l$  代表的是主机时, 该路由标识可以完成由连接到路由的映射, 而当接入方式  $a_h$  和  $a_l$  代表的是子网时, 该路由标识可以完成由子网到骨干网路由的映射. 因此, 网通层可以为多元化的网络接入提供统一的平台, 实现一体化的网络接入环境. 本文仅研究接入方式均是主机的情形, 经过连接标识到交换路由标识的连接标识解析映射后, 在通信主机之间形成了多条并行路径.

### 2.3 映射

这里主要介绍两种解析映射: 服务标识解析映射和连接标识解析映射. 服务标识解析映射完成从服务到连接的映射, 可以将一个服务映射到多条连接上, 形成一对多的映射, 提高服务完成的效率. 在服务标识  $SID_s$  和连接标识  $CID_c$  的定义中, 服务  $s$  可以通过从服务标识  $SID_s$  到连接标识  $CID_c$  的映射, 将服务需要满足的一些属性信息映射到连接上, 使得建立的连接支持该服务所要求的属性.

连接标识解析映射完成从连接到路由的映射, 可以将多个连接映射到多个路由上, 形成多条并行路径,

增强数据传输的安全性和可靠性. 在连接标识  $CID_c$  和交换路由标识  $RID_r$  的定义中, 连接  $c$  可以通过从连接标识  $CID_c$  到交换路由标识  $RID_r$  的映射, 将连接需要满足的一些属性映射到该路由上, 从而将服务层某服务需要满足的属性信息映射到网通层的路由上, 比如服务应该满足的 QoS, 应该保证的最低带宽等, 这样在数据传输过程中, 网通层就支持了服务层的普适服务. 本文将基于网络效用最优化的思想建立这两次映射的数学模型, 并提出具有一定 QoS 保证的映射模型.

## 3 服务到连接的映射模型

### 3.1 映射关系

某服务利用服务分割技术后, 形成多个应用流, 这些应用流经由服务到连接的服务标识解析映射后, 在通信两端之间形成了多个连接流来传输数据. 服务映射到连接后的连接数目  $k$  可以在连接标识  $CID_c$  的定义中得到.

文献[6]在一体化网络服务层的设计中给出了从服务到连接的多对多映射关系. 各个服务的应用流经过流分类后, 形成各种类型的数据流, 而服务的这些数据流经过服务标识解析映射之后, 形成了多个连接流, 不同类型的数据流可以经由不同的连接流进行传输. 从服务到连接的多对多映射实现了一个服务可以由多个连接来完成, 提高了服务效率; 同时, 经过流分类后, 同一个连接流传输的是同一种类型的数据, 因此一个连接也支持了多种服务, 提高了连接的利用率.

一体化网络在服务层中引入了虚拟服务模块和虚拟连接模块. 假设服务层需要完成的服务的集合为  $S$ , 其元素是各个服务  $s$ . 连接的集合为  $C$ , 其元素是可以为所有服务建立的各个连接  $c$ . 从一个服务到多个连接的映射意味着某服务  $s \in S$  需要由多个连接  $c \in C$  完成, 即服务提供者同时提供多个连接完成该服务; 从多个服务到多个连接的多对多映射意味着每个服务  $s$  都由多个连接  $c$  完成, 每个连接  $c$  为多个服务  $s$  传输数据, 因为各个服务经过流分类后, 不同类型的数据流经由不同的连接传输. 令  $S(c)$  是使用某条连接  $c$  的所有服务的集合,  $C(s)$  是某个服务  $s$  使用的所有连接的集合. 因此  $s \in S(c)$  当且仅当  $c \in C(s)$ , 即服务  $s$  利用连接  $c$  来传输数据.

### 3.2 效用函数

网络中的各个服务都有各自的效用函数<sup>[14,15]</sup>. 效用函数描述了用户对于所获得的某种服务在一定服务带宽下的满意度, 是关于所获得的服务带宽的单调递增函数, 当获得的服务带宽为零时, 该服务的效用为零, 即服务的满意度为零. 令服务  $s \in S$  的效用函数为  $U_s(x)$ , 其中  $x$  是服务  $s$  所获得的服务带宽. 根据各个服

务效用函数的不同,所有服务大体上可以分为两类:弹性服务和非弹性服务<sup>[16]</sup>。弹性服务是一些传统的数据服务,如电子邮件服务,这类服务对应的效用函数是单调递增的凹函数。非弹性服务是一些流媒体业务,这类服务对时延和带宽比较敏感,如多媒体服务。当获得的带宽低于某界值时,该类服务的 QoS 将会出现剧烈抖动,以至于用户对该服务达到了不能忍受的程度。该类服务对应的效用函数是类似于 S 形的单调递增函数,当获得的带宽小于一个界值时,函数是凸函数;而当大于该界值时,函数就是凹函数,如图 2 所示。

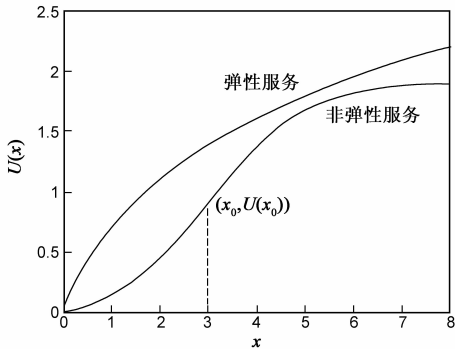


图2 弹性服务和非弹性服务的效用函数

### 3.3 映射模型

网络中所有服务都想最大化自己的效用,使得自己的满意度达到最优,而从整个网络服务层的角度考虑,就是要使得所有服务的效用之和达到最优。所以,虚拟服务模块的目标其实就是最大化所有服务的效用之和(或者说,聚合效用),即  $\max \sum_s U_s(z_s)$ , 其中  $z_s$  是服务  $s$  的数据流大小。

经过服务标识解析映射后,服务的数据流进行了流分类,形成了多个连接流进行传输,每个连接都可能传输某服务的部分数据,若服务  $s$  经过映射后在连接  $c$  上获得的流量为  $x_{sc}$ ,则一定满足  $z_s = \sum_{c: c \in C(s)} x_{sc}$ 。基于网络效用最大化思想<sup>[17]</sup>,从服务到连接的映射目标其实就是如何合理地将服务的数据流经过流分类后,映射到各个连接上进行数据传输,从而使得所有服务的效用函数之和达到最优。

表 1 服务标识解析映射模型

	$\Phi$ 虚拟服务模块 $\rightarrow$ 虚拟连接模块
模型	$S1: \max \sum_s U_s(z_s) \xrightarrow{\Phi} C1: s. t. \sum_{c: c \in C(s)} x_{sc} = z_s$ $\text{over } x_{sc} \geq 0$

因此,从网络中数据流角度得到从服务到连接的服务标识解析映射模型具有表 1 所述形式:其中  $\Phi$  就是从虚拟服务模块到虚拟连接模块的映射函数,该函

数实现了从服务到各个连接的流量分配。

## 4 连接到路径的映射模型

### 4.1 映射关系

服务层中各个服务经服务标识解析映射后映射到多条连接上,利用多连接来传输数据;而连接经连接标识解析映射后映射到多条路径上,利用并行多路径来传输服务的数据。

文献[6]指出,对服务层的连接来说,下层的网通层可抽象为仅提供一条交换选路,因此连接标识解析映射主要是多对一映射和多对多映射。经由多对多的连接标识解析映射,可形成多条端到端的并行路径,实现一个连接选择多条路径进行数据传输,从而提高数据传输效率;同时,多个连接也可选择同一条路径进行数据传输,从而提高该路径的利用率。

假设网络中路径的集合是  $P$ ,其元素是网通层可以为连接提供路由的各条路径  $p$ 。从一个连接到多条路径的一对多映射意味着某个连接  $c \in C$  选择多条路径  $p \in P$  来完成数据传输,这样提高了数据传输速率和效率,如有线、无线等多种通信方式形成的多条路径同时传输数据;从多个连接到一条路径的多对一映射意味着多个连接  $c \in C$  选择一条路径  $p \in P$  来完成数据传输,这样提高了该路径的利用率;从多个连接到多个路径的多对多映射意味着多个连接  $c \in C$  由多条路径  $p \in P$  完成,提高了数据传输的效率和路径的利用率,增强了数据传输的可靠性和安全性。

### 4.2 路径选择

服务的数据流经过流分类后,形成各个连接的数据流,这些连接流映射成路径数据流后在网通层进行传输。数据流从连接到路径的多对多映射可以用映射矩阵  $A = (a_{cp})_{C \times P}$  来表示,矩阵元素  $a_{cp} \in \{0, 1\}$  代表连接  $c$  是否利用路径  $p$  传输数据,或者说路径  $p$  是否支持连接  $c$  的路由。若  $a_{cp} = 1$ ,则连接  $c$  利用路径  $p$  传输数据;否则  $a_{cp} = 0$ ,则连接  $c$  不利用路径  $p$  传输数据。因此,当从连接到路径的连接标识解析映射是多对一时,有  $\sum_c a_{cp} \geq 1$ ;而当从连接到路径的连接标识解析映射是一对多时,有  $\sum_p a_{cp} \geq 1$ 。

假设服务  $s$  在路径  $p$  上获得的带宽分配为  $y_{sp}$ ,则当从连接到路径的映射是多对一时,满足  $y_{sp} = \sum_c x_{sc} a_{cp}$ ,而当从连接到路径的映射是一对多时,满足  $x_{sc} = \sum_p a_{cp} y_{sp}$ ,其中  $x_{sc}$  是服务  $s$  经过分流之后在连接  $c$  上的数据流大小。

通过服务标识解析映射,服务的数据流映射成连接流;再通过连接标识解析映射,连接流映射成路径

流.因此,经过上述两次映射后,服务的数据流要选择合适的路径进行传输.令  $S(p)$  是使用路径  $p$  的所有服务的集合,  $P(s)$  是服务  $s$  使用的所有路径的集合.因此,  $s \in S(p)$  当且仅当  $p \in P(s)$ , 即服务  $s$  使用路径  $p$  来路由并传输数据.

### 4.3 映射模型

从连接到路径的映射其实就是通过将连接映射到各条路径,有效地为服务分配路径带宽,从而使得虚拟服务模块的所有服务满足一定的满意度.路径的传输能力受到该路径上瓶颈链路的带宽限制,这里定义某条路径的带宽就是该条路径上瓶颈链路的带宽,也就是该条路径上所有链路带宽的最小值.在映射的过程中,所有服务在路径  $p$  上获得带宽分配之和不能超过该路径的带宽,即  $\sum_{s: s \in S(p)} y_{sp} \leq C_p$ ; 同时,某服务经过两次解析映射后,在各条路径上得到的带宽分配之和应该等于其数据流大小,即  $\sum_{p: p \in P(s)} y_{sp} = z_s$ , 这里  $z_s$  是服务  $s$  的数据流大小,也就是该服务获得的总的服务带宽.经过服务标识解析映射和连接标识解析映射后,从服务到路径的映射目标就是合理选择有效路径并为服务分配路径带宽,从而使得所有服务的聚合效用达到最优.

因此,从连接到路径的连接标识解析映射模型具有表 2 所示形式:

表 2 连接标识解析映射模型

		虚拟连接模块 $\xrightarrow{\Psi}$ 网通层
模型		$\max \sum_s U_s(z_s)$
	$C1: \text{s.t.}$	$\sum_{c: c \in C(s)} x_{sc} = z_s$
	$\text{over}$	$x_{sc} \geq 0$
		$\xrightarrow{\Psi} R1: \sum_{p: p \in P(s)} y_{sp} = z_s$
		$\sum_{s: s \in S(p)} y_{sp} \leq C_p$
	$\text{over}$	$y_{sp} \geq 0$

其中  $\Psi$  就是从虚拟连接模块到网通层的映射函数,该函数实现了为各个连接选择路由,并为服务分配路径的传输能力.

表 3 服务层到网通层的映射

		服务层 $\xrightarrow{\Psi\Phi}$ 网通层
模型		$\max \sum_s U_s(z_s)$
	$S1: \text{max}$	$\sum_s U_s(z_s)$
	$\xrightarrow{\Psi\Phi} R1: \text{s.t.}$	$\sum_{p: p \in P(s)} y_{sp} = z_s$
		$\sum_{s: s \in S(p)} y_{sp} \leq C_p$
	$\text{over}$	$y_{sp} \geq 0$

由于一体化网络分为服务层和网通层,所以若从整个一体化网络的两层网络架构考虑层间映射的话,可以将服务层中的服务标识解析映射和连接标识解析

映射看成是一次聚合映射,该映射就是在网通层中选择路径,并且为服务层的各个服务分配传输带宽,从而使得服务层所有服务的聚合效用达到最优.因此,从服务层到网通层的映射具有表 3 所述形式,其中  $\Psi\Phi$  是从服务层到网通层的映射函数,可以认为是服务层的上述两次映射的复合映射函数.

## 5 具有 QoS 保证的映射模型

针对上述的映射模型,即优化问题  $R1$ ,分析该优化问题可得到映射的最优带宽分配.由于网络中的服务分为弹性服务和非弹性服务,因此需要分两种情况讨论上述的映射模型.

### 5.1 弹性服务

弹性服务的效用函数都是单调递增的凹函数,这类服务对带宽和时延的要求不是很敏感,当所获得的带宽逐渐降低时,这类服务的 QoS 是逐渐降低的,不会产生剧烈的抖动.对于这类服务,可以得到下列定理:

**定理 1** 当网络中所有服务都是弹性服务时,从服务到路径的映射模型是一个凸规划问题,映射模型的目标函数存在最优值,各个服务存在最优带宽分配  $\{z_s^*, s \in S\}$ , 但服务在各条路径上的最优带宽分配  $\{y_{sp}^*, s \in S, p \in P\}$  并不唯一.

证明:各个服务  $s$  均是弹性服务时,效用函数  $U_s(z_s)$  是凹函数,则目标函数  $\sum_s U_s(z_s)$  关于变量  $z_s$  的 Hessian 矩阵是负定的.模型的约束条件是线性的,则约束域是凸集.所以优化问题  $R1$  中目标函数是凹函数而约束域是凸集,由非线性规划理论<sup>[18]</sup>得到,该优化问题是一个凸规划问题,映射模型的目标函数存在最优值,各个服务存在最优解  $\{z_s^*, s \in S\}$ . 由于  $z_s^* = \sum_{p: p \in P(s)} y_{sp}^*$ , 则每个服务在各条路径上获得的最优带宽分配可能会存在多种形式.

### 5.2 非弹性服务

非弹性服务的效用函数虽然都是单调递增的,但不是严格的凹函数,当获得的带宽较小时是凸函数,而当获得的带宽较大时是凹函数.这类服务对带宽和时延比较敏感,当获得的带宽逐渐降低到某个界值之后,这类服务的 QoS 发生剧烈抖动.这也就说明了为什么当多媒体业务获得的带宽较小时,服务的 QoS 抖动比较厉害,达到了用户很难忍受的地步.而且,当服务中既有弹性服务也有非弹性服务时,目标函数中既有凹函数也有凸函数而且还可能有更一般的效用函数,优化问题  $R1$  就是一个非凸规划问题,这样问题就变得比较难以处理,全局最优解难以得到.

针对这种情形,一体化网络在映射过程中可以利用服务标识中的服务类别来判断非弹性服务,并在路

径上预留部分服务带宽,从而保证该类服务的 QoS. 首先,在服务标识解析映射中,当服务是非弹性服务时,则映射后建立的多条连接应该能够使该服务的数据流大小满足一定的界值;而在连接标识解析映射中,该服务应该满足的数据流值映射到交换路由标识. 因此接入交换路由器和广义交换路由器在路由标识中首先检查服务的类别,若是非弹性服务则在该服务所要使用的路径上,对该类服务预留出部分带宽,以保证该类服务能获得一定的 QoS. 具体过程为,对于服务标识  $SID_s = \phi(s, QoS, rate, \dots)$ ,若服务类别  $s$  是非弹性服务,那么该服务的 QoS 应满足一定的级别,而且,应该要保证该服务的数据流大小不低于  $rate$ ,即该服务的最低服务带宽. 服务  $s$  的属性信息通过服务标识  $SID_s$  映射到连接标识  $CID_c$ ,然后再映射到交换路由标识  $RID_r$ ,因此在该服务所使用的所有路径上都可以得到相应的该服务属性信息,从而使得该类服务能够获得相应的 QoS 保证.

对于非弹性服务,当  $z_s < z_{s0}$  时,服务的效用函数是凸函数;而当  $z_s > z_{s0}$  时,函数是凹函数. 因此,对于非弹性服务,应该保证其获得的服务带宽值不低于  $z_{s0}$ ,如果路径带宽满足不了该要求,那么该服务的 QoS 将会受到很大影响. 这样,当网络中既有弹性服务,也有非弹性服务时,在相应的服务标识解析映射模型和连接标识解析映射模型中,即优化问题 C1 和 R1,需要增加下述约束条件:  $z_s \geq z_{s0}$ .

因此,当网络中既有弹性服务也有非弹性服务时,服务具有一定 QoS 保证的服务标识解析映射模型具有表 4 所述形式,其中  $\Phi$  是从虚拟服务模块到虚拟连接模块的映射函数,当服务是弹性服务时,  $z_{s0} = 0$ ,而当服务是非弹性服务时,  $z_{s0} > 0$ .

表 4 具有 QoS 保证的服务标识解析映射模型

	虚拟服务模块 $\xrightarrow{\Phi}$ 虚拟连接模块	
模型	$S2: \max \sum_s U_s(z_s)$ $s.t. \quad z_s \geq z_{s0}$	$R2: \max \sum_s U_s(z_s)$ $s.t. \quad \sum_{c: c \in C(s)} x_{sc} = z_s$ $z_s \geq z_{s0}$ $over \quad x_{sc} \geq 0$

同时,服务具有一定 QoS 保证的连接标识解析映射模型具有表 5 述形式,其中  $\Psi$  就是从虚拟连接模块到网通层的映射函数.

因此,当服务  $s$  完成由服务标识  $SID_s$  到连接标识  $CID_c$  的服务标识解析映射时,服务  $s$  在建立的多条连接上的数据流之和  $rate$  应不低于  $z_{s0}$  (弹性服务  $z_{s0} = 0$ , 非弹性服务  $z_{s0} > 0$ );而当完成从连接标识  $CID_c$  到路由

标识  $RID_r$  的连接标识解析映射时,在该服务使用到的各条路径上预留出了一定的带宽,从而保证该服务获得的总带宽分配不低于  $z_{s0}$ ,确保了服务能够达到一定的满意度.

表 5 具有 QoS 保证的连接标识解析映射模型

	虚拟连接模块 $\xrightarrow{\Psi}$ 网通层	
模型	$C2: \max \sum_s U_s(z_s)$ $s.t. \quad \sum_{c: c \in C(s)} x_{sc} = z_s$ $z_s \geq z_{s0}$ $over \quad x_{sc} \geq 0$	$R2: \max \sum_s U_s(z_s)$ $s.t. \quad \sum_{p: p \in P(s)} y_{sp} = z_s$ $\sum_{s: s \in S(p)} y_{sp} \leq C_p$ $z_s \geq z_{s0}$ $over \quad y_{sp} \geq 0$

当网络中既有弹性服务又有非弹性服务时,对于具有一定 QoS 保证的上述映射模型,可以得到下述定理:

**定理 2** 当网络中既有弹性服务又有非弹性服务时,若在服务到路径的映射中对非弹性服务给予一定的带宽保障,使得非弹性服务的数据流满足  $z_s \geq z_{s0}$ ,优化问题 R2 也是一个凸规划问题,若该映射模型存在可行解,则模型的目标函数存在最优值,各个服务存在最优带宽分配  $\{z_s^*, s \in S\}$ ,但服务在各条路径上的最优带宽分配  $\{y_{sp}^*, s \in S, p \in P\}$  并不唯一.

证明:在优化问题 R2 中,对于非弹性服务,有约束条件  $z_s \geq z_{s0}$ ,则此时非弹性服务的效用函数就是一个凹函数. 因此,所有服务的效用函数均为凹函数,则目标函数关于变量  $z_s$  的 Hessian 矩阵也是负定的;同时,约束条件是线性的,约束域是凸集,则此时问题 R2 也是一个凸规划问题. 因此,如果该问题存在可行解的话,那么问题 R2 的目标函数的最优值和模型的最优解都是存在的,而且服务在各条路径上得到的最优的带宽分配  $\{y_{sp}^*, s \in S, p \in P\}$  并不唯一.

优化问题 R2 存在可行解,意味着各个非弹性服务所使用的路径带宽之和不低于该非弹性服务应满足的最低保证带宽,即  $\sum_{p: p \in P(s)} C_p \geq z_{s0}$ ,而且网络中能够为非弹性服务提供数据传输的各条并行路径的带宽之和应不低于所有非弹性服务的最低要求带宽之和,即  $\sum_p C_p \geq \sum_s z_{s0}$ . 这样,对于所有的非弹性服务都能保证其获得最低限度的带宽,从而保证该类服务能够获得一定的 QoS,达到一定的满意度. 这为一体化网络在从服务层到网通层的映射时,如何确保非弹性服务,如多媒体服务,获得一定的服务质量与满意度提供了理论支持,对一体化网络的 QoS 设计与优化具有很好的指导意义.

## 6 数值例子

网络中所有服务经过服务标识解析映射和连接标

识解析映射后,服务的数据流映射成为多条路径上的数据流.简单起见,假设网络中每台主机拥有两个接入设备,在两个通信主机之间形成了两条并行的通信路径,而两主机间需要完成三个服务,如图3所示.此时,三个服务经过映射后就利用两条路径传输数据.路径1的瓶颈链路的带宽是10Mbps,而路径2的瓶颈链路的带宽是8Mbps.

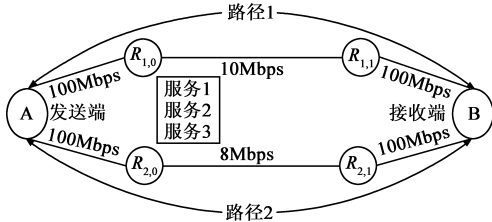


图3 三个服务到两条路径的映射

## 6.1 弹性服务

当服务都是弹性服务时,服务的效用函数都是凹函数,这里选取下列效用函数<sup>[15,16,19]</sup>:

$$U_s(z_s) = \begin{cases} \log(z_s + 1) & \text{if } \nu = 0 \\ -\frac{1}{(z_s + 1)^\nu} + 1 & \text{if } \nu \neq 0 \end{cases}$$

其中  $\nu > 0$  是服务  $s$  的参数,不同的弹性服务具有不同的参数值.假设服务1、服务2、服务3的效用函数分别为  $U_1(z_1) = \log(z_1 + 1)$ 、 $U_2(z_2) = -\frac{1}{(z_2 + 1)} + 1$ 、 $U_3(z_3) = -\frac{1}{(z_3 + 1)^2} + 1$ .此时所有服务的效用函数均满足  $U_s(0) = 0$ .

该映射中,所有服务都是弹性服务,因此各个服务都可以在路径上得到最优的带宽分配,映射的目标函数也得到了最优值.各个服务在路径上的最优带宽分配如表6所示.

表6 服务在路径上的带宽分配(Mbps)

	路径1带宽	路径2带宽	总计	效用
服务1	6.9257	6.2590	13.1847	2.6522
服务2	1.7171	1.0504	2.7675	0.7346
服务3	1.3572	0.6905	2.0477	0.8923
总计	10	8	18	4.2791

## 6.2 弹性服务和非弹性服务

当网络中存在非弹性服务时,这些非弹性服务的效用函数是S形的,选取下列的效用函数<sup>[15,16]</sup>:

$$U_s(z_s) = \frac{1}{1 + e^{-(z_s - \alpha_s)}} - \frac{1}{1 + e^{\alpha_s}}$$

其中  $\alpha_s > 0$  是服务  $s$  的参数,不同服务质量要求的非弹性服务具有不同的参数值.假设服务1是弹性服务,效用函数为  $U_1(z_1) = \log(z_1 + 1)$ ;服务2和服务3均是非弹性服务,效用函数分别为  $U_2(z_2) = \frac{1}{(1 + e^{-(z_2 - 2)})} -$

$\frac{1}{(1 + e^2)}$ 、 $U_3(z_3) = \frac{1}{(1 + e^{-(z_3 - 4)})} - \frac{1}{(1 + e^4)}$ .此时,  $z_{20} = 2$ ,  $z_{30} = 4$ ,  $C_1 = 10$ ,  $C_2 = 8$ ,满足充分性条件  $\sum_{p, p \in P(s)} C_p \geq z_{s0}$  与  $\sum_p C_p \geq \sum_s z_{s0}$ ,映射模型存在可行解.

在该映射模型中,既有弹性服务又有非弹性服务,但对非弹性服务保证了一定的最低带宽值,使得服务能够获得一定的带宽保证,满足一定的满意度.该模型存在可行解,映射后各个服务的最优带宽是存在的,而且目标函数的最优值也可以得到.各个服务在路径上的最优带宽分配如表7所示.

表7 服务在路径上的带宽分配(Mbps)

	路径1带宽	路径2带宽	总计	效用
服务1	4.3920	3.7254	8.1174	2.2102
服务2	2.3041	1.6374	3.9415	0.7553
服务3	3.3039	2.6372	5.9411	0.8565
总计	10	8	18	3.8220

## 7 结论

一体化网络服务层的设计中引入了虚拟服务模块和虚拟连接模块,提出了从服务到连接再到路径的多对多映射,实现了多连接多路径数据传输.本文研究了一体化网络中的服务标识解析映射和连接标识解析映射,基于网络效用最大化的思想,给出了从服务到连接和从连接到路径的多对多映射的数学模型.虚拟服务模块的所有服务经由虚拟连接模块映射到网通层的多条路径上,该过程其实就是如何为服务优化选路并分配路径带宽,从而使得所有服务的聚合效用达到最优.网络中的服务分为弹性服务和非弹性服务,本文还给出了这两类服务同时存在时服务具有一定QoS保证的映射模型.该模型对于一体化网络体系架构中非弹性服务的QoS保证提供了重要的理论支持,对整个服务层的下一步设计和优化具有一定的指导意义.

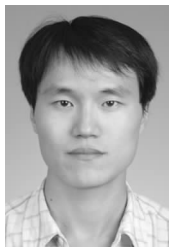
下一步工作将基于网络效用最大化的思想设计与实现分布式的映射算法,并将算法应用到一体化网络的具体环境中.

### 参考文献:

- [1] H Sivakumar, S Bailey, R L Grossman. PSockets: The case for application-level network striping for data intensive applications using high speed wide area networks[A]. In Proceedings of the ACM/IEEE Super Computing[C]. Dallas, USA: IEEE Computer Society, 2000. 38 - 38.
- [2] L Eggert, J Heidemann, J Touch. Effects of ensemble-TCP[J]. ACM Computer Communication Review, 2000, 30(1): 15 - 29.

- [3] E Cohen, H Kaplan, J Oldham. Managing TCP connections under persistent HTTP [J]. Computer Networks, 1999, 31 (11): 1709 – 1723.
- [4] I Lee, D Gunter, B Tierney. Applied techniques for high bandwidth data transfers across wide area networks [A]. In Proceedings of the International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics [C]. Beijing, China: Science Press, 2001. 428 – 431.
- [5] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务 [J]. 电子学报, 2007, 35(4): 593 – 598.  
Zhang Hongke, Su Wei. Fundamental research on the architecture of new network-universal network and pervasive services [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 593-598. (in Chinese)
- [6] 杨冬, 周华春, 张宏科. 基于一体化网络的普适服务研究 [J]. 电子学报, 2007, 35(4): 607 – 613.  
Yang Dong, Zhou Huachun, Zhang Hongke. Research on pervasive services based on universal network [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 607 – 613. (in Chinese)
- [7] 董平, 秦雅娟, 张宏科. 支持普适服务的一体化网络研究 [J]. 电子学报, 2007, 35(4): 599 – 606.  
Dong Ping, Qin Yajuan, Zhang Hongke. Research on universal network supporting pervasive services [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 599 – 606. (in Chinese)
- [8] I Cidon, R Rom, Y Shavitt. Analysis of multi-path routing [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(6): 885 – 896.
- [9] H Y Hsieh, P Sivakumar. A transport layer approach for achieving aggregate bandwidths on multi-homed mobile hosts [J]. Wireless Networks, 2005, 11(1-2): 99 – 114.
- [10] M Zhang, J Lai, A Krishnamurthy, L Peterson, R Wang. A transport layer approach for improving end-to-end performance and robustness using redundant paths [A]. In Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference [C]. Boston, USA: USENIX Association, 2004. 99 – 112.
- [11] J R Iyengar, P Amer, R Stewart. Concurrent multipath transfer using SCTP multihoming over independent end-to-end paths [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(5): 951 – 964.
- [12] A A EI, T Saadawi, M Lee. A transport layer load-sharing mechanism for mobile wireless hosts [A]. In Proceedings of the Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops [C]. Orlando, USA: IEEE Computer Society, 2004. 87 – 91.
- [13] J He, J Rexford. Toward internet-wide multipath routing [J]. IEEE Network, 2008, 22(2): 16 – 21.
- [14] S Shenker. Fundamental design issues for the future Internet [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(7): 1176 – 1188.
- [15] L Shi, C Liu, B Liu. Network utility maximization for triple-play services [J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2257 – 2269.
- [16] J W Lee, R R Mazumdar, N B Shroff. Non-convex optimization and rate control for multi-class services in the Internet [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(4): 827 – 840.
- [17] S H Low, D E Lapsley. Optimization flow control, I: basic algorithm and convergence [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(6): 861 – 874.
- [18] D Bertsekas. Nonlinear programming [M]. 2nd Edition. Nashua, USA: Athena Scientific, 1999.
- [19] S Kunniyur, R Srikant. End-to-end congestion control schemes: utility functions, random losses and ECN marks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 689 – 702.

#### 作者简介:



**李世勇** 男, 1982 生于山东, 北京交通大学博士研究生, 主要研究方向为下一代互联网体系架构、网络资源分配和排队论。

E-mail: shiyongli@yahoo.cn



**秦雅娟** 女, 1963 生于吉林, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代互联网理论和宽带无线通信等。



**张宏科** 男, 1957 生于山西, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代互联网理论、普适服务理论、传感器网络理论和移动 IP 理论与应用等。