

## 基于效用最大化的网络跨层映射\*

李世勇<sup>1,2+</sup>, 杨冬<sup>3</sup>, 秦雅娟<sup>3</sup>, 张宏科<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(燕山大学 经济管理学院, 河北 秦皇岛 066004)

<sup>2</sup>(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

<sup>3</sup>(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

### Network Cross-Layer Mapping Based on Utility Maximization

LI Shi-Yong<sup>1,2+</sup>, YANG Dong<sup>3</sup>, QIN Ya-Juan<sup>3</sup>, ZHANG Hong-Ke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

<sup>2</sup>(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

<sup>3</sup>(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

+ Corresponding author: E-mail: shiyongli@yahoo.cn

Li SY, Yang D, Qin YJ, Zhang HK. Network cross-layer mapping based on utility maximization. *Journal of Software*, 2011, 22(8): 1855-1871. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3894.htm>

**Abstract:** This paper gives the models for cross-layer mapping from services at the application-layer to multiple connections at the transport-layer then to multiple paths at the network-layer based on network utility maximization (NUM). This paper also presents the objective of cross-layer mapping from services to paths via connections, which is to allocate the path capacity of users, so that the aggregated utility of users can be globally maximized. For the mapping model, in order to achieve the optimum, a distributed algorithm is proposed which is asymptotically stable, and the equilibrium point is optimum. Simulation results verify the convergence of the proposed algorithm. Security and reliability of the mapping are also analyzed theoretically. The probabilities with which a service can be successfully completed are obtained when there are interceptions and distributed attacks in networks. Simulation examples are finally given to show the high security and reliability of the multi-to-multi mapping.

**Key words:** next generation Internet; network utility maximization (NUM); multi-connection; multi-path; mapping

**摘要:** 基于网络效用最大化的思想研究了网络跨层映射,给出了应用层的服务映射到传输层的多个连接再映射到网络层的多条路径的多对多映射的数学模型,指出了映射的目标就是合理地为源端用户分配路径传输能力,从而使用户的聚合效用达到最优.针对该映射模型,为了得到各个用户的最优带宽分配,提出了一种分布式算法.该算法是渐进稳定的,且平衡点就是映射模型的最优点.仿真结果验证了算法的收敛性.另外,理论分析了映射机制的安全性和可靠性,分别给出了当网络中存在侦听和分布式攻击时,服务能够成功完成的概率.仿真结果表明,多对多映射确实提高了数据传输的安全性和可靠性.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60833002, 60974018); 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB307100); 国家高技术研究发展计划(863)(2007AA01Z202); 长江学者与创新团队发展计划(IRT0707); 111 项目(B08002)

收稿时间: 2009-04-20; 修改时间: 2009-10-22; 定稿时间: 2010-05-18

关键词: 下一代互联网;网络效用最大化;多连接;多路径;映射

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

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,信息交互的方式越来越复杂,服务层的数据分割、传输层的多连接、网络层的多路径等技术已经出现,并广泛应用于网络中.对于应用层,由于互联网承载的网络服务日益多样化,网络服务的内容日趋复杂,一次复杂的网络服务可以分割成多个逻辑上相互独立的部分,从而提高了服务完成的鲁棒性和灵活性;对于传输层,由于一次服务可分割成多个独立的子服务块,传输层需要为一次服务提供多条连接,利用多连接并行地传输数据,从而支持了服务的灵活分割,提高了传输的吞吐量,增强了传输的可靠性;对于网络层,各种网络接入技术的出现,为通信两端多路径的建立提供了网络接入支持,形成了并行的端到端多路径通信.因此,互联网分层内部正在发生重大变化,其中重要的两个就是端到端并行多连接和多路径技术.

传输层利用并行多连接来传输数据,可以极大地提高上层应用的吞吐量,减少应用完成的时间,提高应用完成的效率.而网络层端到端多路径技术的兴起,主要得益于接入技术的多样化以及接入设备成本的不断降低.随着网络用户的不断增加,各种网络接入方式和接入技术不断涌现.比如,对于无线用户,可以通过 GPRS,3G 进行广域网接入;通过 Ricochet 进行城域网接入;通过 IEEE 802.11、HiperLAN、蓝牙、红外等进行局域网接入;有线用户可以通过 ISDN 接入、ADSL 接入、CableMODEM 接入、光纤接入等多种技术接入互联网.另一方面,随着各种接入设备价格的逐渐下降,一台主机上有多块网络接入设备越来越平常.因此,同一主机就具有多宿(multihoming)的特点,这为通信两端并行多路径的建立提供了接入支持.目前,一个广泛应用的技术是利用端到端并行多路径技术来为同一个应用提供服务支持,提高传输效率和服务完成的可靠性.

由于多连接多路径技术可以明显地提高传输的吞吐量和带宽的利用率,而且可以实现数据传输的较高的安全性和可靠性,因此成为下一代互联网研究的一个重要内容.本文分析了多连接多路径技术在网络体系中的应用,基于网络效用最大化的思想研究了网络的跨层映射,给出了从服务到多连接和从多连接到多路径映射的数学描述,指出了应用层的服务通过多连接再映射到多路径所要实现的目标,就是通过合理有效地选择连接与路径并分配路径带宽,实现应用层的聚合效用达到最优.同时,理论分析了利用多连接多路径进行数据传输的安全性和可靠性,分别针对安全性和可靠性给出了服务能够成功完成的概率.

本文第 1 节介绍现有的多连接和多路径技术,并简要介绍网络效用最大化的研究进展.第 2 节给出从服务到多连接和从多连接到多路径映射的数学描述.第 3 节提出基于网络效用最大化的网络跨层映射模型,并给出各层所对应的映射参数.第 4 节提出一种分布式算法,可以实现映射模型的最优点,即请求服务的各用户获得的最优带宽分配.第 5 节分析从服务经连接到路径的多对多映射的安全性和可靠性.第 6 节给出仿真结果,验证算法的收敛性,分析映射的安全性和可靠性.第 7 节总结全文.

## 1 相关工作

### 1.1 多连接多路径

应用层可以利用数据分割技术将各个应用的数据分割成多个相互独立的部分,利用源端和目的端的多个套接口,实现传输层的并行多连接传输,然后再利用通信双方之间的多条并行路径实现网络层的并行多路径传输.因此,从应用到连接和从连接到路径的映射都是多对多的.

近几年来,利用并行多连接来传输数据已经出现在多种场景和应用中,如 Netscape<sup>[1]</sup>,Storage Resource Broker(SRB)<sup>[2]</sup>,Internet-2 Distributed Storage Initiative(I2-DSI)<sup>[3]</sup>.在这些应用中,通过修改 TCP,允许用户利用多个 TCP 连接传输数据,从而降低了应用完成的时间,提高了数据传输的吞吐量,改善了系统的性能.在高带宽网络中,文献[4]设计了一个支持多连接的函数库(psockets),将同一应用的数据进行分割,然后再利用多个 TCP 连接传输.相对于单 TCP 连接,此设计明显提高了吞吐量,增强了网络的性能.文献[5]利用多个并行的 TCP 套接口,

建立并行的连接来传输数据,从而提高了服务完成的效率,改善了网络性能。

上述工作主要是从实验和仿真的角度研究了多连接传输的性能。在传输层利用多连接技术进行数据传输的理论分析方面,文献[6]讨论了多连接传输提高网络性能的特征和意义,分析了如何最优选择并行多连接的数目,从而在避免网络拥塞的前提下使 TCP 吞吐量达到最大。文献[7]分析和解释了相对于单连接来说,多 TCP 连接之所以能够提高网络性能的原因。文献[8]分析了多 TCP 连接对网络整体性能的影响,指出利用多连接传输数据可以极大地提高吞吐量,但同时可能会增加尽力而为业务的丢包。

由于利用多连接传输数据能够明显提高网络的传输性能,因此在下一代互联网架构和协议的设计中备受关注。文献[9]在一体化网络中利用标识映射设计了多连接管理(multiple connection management protocol,简称 MCMP)协议,提高了服务层服务完成的效率,很好地支持了普适服务对网络带宽的较高要求。文献[10]以提供普适服务为目标,通过多连接抽象表示服务多样化、多路径抽象表示接入多样化,提出了满足新一代网络要求的传输层架构,并且给出了多连接数据传输的理论性能分析。

利用并行多路径来实现上层应用数据包的路由,能够大幅度提高上层应用完成的效率。并行多路径技术的应用,在很大程度上得益于接入技术的多样化和接入成本的不断降低。现在,一个主机拥有多个独立的接入设备已经很普遍,因此,具有多个接入设备的同一个主机就可以通过多种方式接入到互联网。一体化网络架构<sup>[9]</sup>中,每个源端利用了多个接入设备,从而实现了并行多路径传输和路由。pTCP<sup>[11]</sup>实现了传输层的数据分割,同时探测可用路径并实现网络拥塞控制,利用探测到的多条路径传输数据。mTCP<sup>[12]</sup>解决了多路径传输带来的乱序问题,实现了在重叠网 RON<sup>[13]</sup>上的并行多路径传输。SCTP<sup>[14]</sup>可以在具有多家地址的主机间实现并行多路径传输,但标准的 SCTP 协议只是使用多路径中的某一条来传输数据,其余路径仅作为备用。通过修改 SCTP 的发送端机制,文献[15]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。而通过修改 SCTP 数据包的格式,文献[16]引入了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,实现了并行多路径传输。LS-SCTP<sup>[17]</sup>协议可以在通信两端动态地添加一些新的可用路径,也实现了并行多路径传输。W-PR-SCTP<sup>[18]</sup>协议利用多条并行路径为实时业务传输数据,从而较好地满足了实时业务对带宽的较高要求。对于多路径路由的性能,文献[19]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、鲁棒性和实现负载均衡。

## 1.2 网络效用最大化

近年来,利用网络效用最大化(network utility maximization,简称 NUM)的思想研究和设计网络体系架构与协议成了一个重要的研究方向。文献[20]首次提出了网络效用最大化模型,该模型已经被广泛应用在有线和无线网络的资源分配、协议分析和设计中。文献[21]从该模型的对偶问题(dual problem)角度进行了考虑,利用最优化理论中的梯度算法设计了一种源-链路端算法。该算法能够收敛到模型的全局最优点,即各个源端的最优带宽分配。文献[22]对文献[21]提出的链路端算法进行了改进,设计了一种著名的主动队列管理(active queue management,简称 AQM)算法 REM(random exponential marking)。基于 NUM 模型,文献[23]从原-对偶问题(primal-dual problem)的角度分析了 TCP/AQM,将 TCP 源端算法作为原问题,而将 AQM 链路端算法作为对偶问题,得到了几个著名的效用函数,为基于 NUM 理论框架分析网络协议与架构提供了重要的研究方法。在 NUM 模型的基础上,文献[24]分析了当源端速率和路由都是动态变化时的 TCP/IP 跨层优化问题,指出了模型平衡点与路由之间的关系。上述研究均是基于 NUM 理论来研究现有网络协议的。文献[25]给出了 NUM 模型的分解方法,指出 NUM 模型可以分解为多个子模块,而每个子模块均可以看作各层的资源分配问题,为基于 NUM 框架设计网络协议和架构提供了理论支持。文献[26]对 NUM 框架的研究进行了综述,提出网络分层其实就是 NUM 优化问题的分解,分别从垂直分解和水平分解两方面对基于 NUM 框架的网络协议和架构分析进行了系统性的阐述,形成了利用 NUM 来分析和设计网络协议和网络架构的系统性理论,对今后网络协议和网络架构的分析、设计和优化具有重要的指导意义。基于 NUM 的设计思想,文献[27]考虑了多跳无线网络中的拥塞控制、接入控制和能量控制,利用 NUM 框架提出了无线网络跨层优化问题,给出了无线网络协议的跨层设计框架,并提出了一种跨层的分布式算法。

上述研究内容都是基于 NUM 的思想分析单连接或单路径情形下的网络协议和架构.本文研究了多连接多路径情形下的网络架构,分析了此时层层之间的映射关系,提出了从服务经连接到路径的映射模型,从理论上指出了跨层映射应该满足的目标;同时设计了一种分布式算法,该算法能够收敛到映射模型的最优点,即请求服务的各个源端用户的最优带宽分配.

## 2 网络跨层映射

网络在完成一次服务时,若建立一个连接进行数据传输,那么实际上是从服务到连接的一对一简单映射关系.而下一代网络中随着服务数量的快速增长、服务分割技术的出现、端到端多连接和多路径技术的应用,各层之间交互的信息会比较多,所以各层之间的映射会更多的以多对一、一对多和多对多的复杂映射为主.如一个服务通过数据分割技术成为几个独立的子服务,而每个子服务的数据均可以通过多个连接多条路径进行传输,这样就提高了服务完成的效率和带宽的利用率,增强了传输的安全性和可靠性.这里将一次服务的成功完成看成是两次映射过程,即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.下面给出这两次多对多映射的数学描述以及映射所要实现的目标.

### 2.1 服务到连接的映射

下一代网络中,服务的形式将多样化,服务的内容也将复杂化.多连接多路径技术将满足用户不断增长的服务需求,实现请求服务的用户的满意度.假设应用层需要完成的服务的集合为  $S$ ,其元素是网络中的各个服务.连接的集合为  $C$ ,其元素是网络中可以为服务建立的各个连接.从一个服务到多个连接的映射意味着某个服务  $s \in S$  需要由多个连接  $c \in C$  完成,即服务请求者和提供者建立多个连接来完成该服务;从多个服务到多个连接的多对多映射意味着每个服务  $s \in S$  需要由多个连接  $c \in C$  完成.

服务到连接的多对多映射可以用映射矩阵  $A=(a_{sc})_{S \times C}$  表示,元素  $a_{sc} \in \{0,1\}$  代表服务  $s$  是否利用连接  $c$  传输数据,或者说连接  $c$  是否支持服务  $s$ .若  $a_{sc}=1$ ,则服务  $s$  利用连接  $c$  传输数据;否则, $a_{sc}=0$ ,服务  $s$  不利用连接  $c$  传输数据.

### 2.2 连接到路径的映射

每个连接可以选择 1 条或者多条路径来进行路由,因此从连接到路径的映射也存在着多种映射关系.假设路径的集合是  $P$ ,其元素是网络中可以为连接提供路由支持的各条路径.从 1 个连接到多条路径的一对多映射意味着某个连接  $c \in C$  在多条路径  $p \in P$  上路由,这提高了数据传输速率和效率;从多个连接到 1 条路径的多对一映射意味着多个连接  $c \in C$  在一条路径  $p \in P$  上路由,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  $p \in P$  完成路由,可以认为是上述两种映射的综合.

连接到路径的多对多映射可以用映射矩阵  $B=(b_{cp})_{C \times P}$  表示,元素  $b_{cp} \in \{0,1\}$  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  $c$ .若  $b_{cp}=1$ ,则连接  $c$  利用路径  $p$  传输数据;否则, $b_{cp}=0$ ,连接  $c$  不利用路径  $p$  传输数据.

因此,从服务经连接到路径的映射矩阵为  $C=AB=(c_{sp})_{S \times P}$ ,其中,元素  $c_{sp} = \sum_c a_{sc} b_{cp}$  代表服务  $s$  是否选择路径  $p$  以及选择该路径的权重. $c_{sp}$  越大,说明服务  $s$  选择路径  $p$  的权重就越大,其在路径  $p$  获得的带宽的比重也就越大.这里,假设同一个服务使用的多条路径相互之间是链路分离(link-disjoint)的,但是不同服务使用的路径相互之间可能会共享一些相同的链路,不妨假设共享的都是路径上的瓶颈链路.

用户在请求某服务时,总是想使自己的满意度达到最大,但是从整个网络的角度考虑,映射的目标是使得所有请求服务的用户满意度之和达到最优.所以,从服务到连接的映射就是如何为服务合理选择连接的过程;从连接到路径的映射就是如何为服务选择路径,从而最优分配路径带宽的过程;而最关键的映射目标是在带宽约束下实现网络中所有请求服务的用户的满意度之和达到全局最优.

### 3 基于效用最优化的映射模型

从应用层的角度考虑,如何为服务合理而有效地分配网络带宽,是映射的主要内容.用户在请求得到一个服务时,获得不同的带宽就会有不同的满意度,而映射的目标则是要使得所有用户的满意度之和达到最大.用户的满意度可以用效用函数(utility function)来描述.

#### 3.1 效用函数

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.假设网络中的每个用户只请求获得 1 个服务,获得服务  $s$  的用户不妨也用符号  $s$  表示要获得服务  $s$  的网络用户,当该源端用户获得的服务带宽为  $y_s$  时,其效用函数为  $U_s(y_s)$ .这里选取效用函数  $U_s(y_s)=w_s \log y_s$ ,其中,  $w_s$  是用户为获得该服务而愿意提供的支付(willingness-to-pay).该效用函数被广泛应用于有线和无线网络中的网络资源分配和相应的算法设计中<sup>[20,21,26]</sup>,实现了竞争网络资源的各用户间的比例公平性(proportional fairness)<sup>[20]</sup>.当然,为了实现用户之间的其他公平性,还可以选择其他的效用函数,如负指数型的效用函数  $U_s(y_s)=-w_s/y_s$ .

#### 3.2 映射模型

令  $S(p)$  是使用某条路径  $p$  的所有服务的集合,也可以说是使用某条路径  $p$  的所有用户的集合(这里,用户与其请求的服务是相对应的).  $P(s)$  是某个服务(或请求该服务的用户)  $s$  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(用户)  $s$  使用了路径  $p$ ,或者该路径  $p$  为服务(用户)  $s$  提供路由支持.

某服务从建立连接到选路完成,经过了两次多对多的映射:服务到连接的映射和连接到路径的映射.假设服务(用户)  $s$  在路径  $p$  上获得的带宽分配为  $x_{sp}$ ,而服务(用户)  $s$  获得的总的带宽为  $y_s$ ,则  $y_s = \sum_{p:p \in P(s)} x_{sp}$ .同时,每条路径  $p$  都有各自的最大传输能力  $C_p$ ,  $C_p$  与该路径上瓶颈链路的带宽有关,可以认为是路径上所有瓶颈链路带宽的最小值.所以,该路径  $p$  为各个服务分配的带宽之和不超过该路径的最大传输能力  $C_p$ ,即  $\sum_{s:s \in S(p)} x_{sp} \leq C_p$ .映射的目标就是通过合理选择路径、最优分配各个路径的带宽,从而使得所有请求服务的源端用户的效用之和达到最优,即下列的非线性优化问题  $P$ .

$$P: \begin{cases} \max & \sum_s U_s(y_s) \\ \text{subject to} & \sum_{p:p \in P(s)} x_{sp} = y_s \\ & \sum_{s:s \in S(p)} x_{sp} \leq C_p \\ \text{over} & x_{sp} \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

对于映射模型(1),可以得到如下定理:

**定理 1.** 从服务到路径的映射模型  $P$  是一个凸规划问题,对于各个服务(用户)存在唯一的最优带宽分配  $\{y_s^*, s \in S\}$ ,但各个服务(用户)在每条路径上的最优带宽分配  $\{x_{sp}^*, s \in S, p \in P\}$  并不唯一.

由非线性规划理论<sup>[28]</sup>可以得到,源端用户的效用函数  $U_s(y_s)$  均是凹函数(concave function),而约束条件是线性的,即约束域是凸集.该优化问题的目标函数是凹函数而约束域是凸集,则该优化问题是一个凸规划问题,存在最优解  $\{y_s^*, s \in S\}$ ,并且由于效用函数关于变量  $y_s$  是严格凹的,则该最优解  $\{y_s^*, s \in S\}$  是唯一的.但是由于  $y_s^* = \sum_{p:p \in P(s)} x_{sp}^*$ ,即源端在各个路径上的不同带宽分配  $x_{sp}^*$  之和可能会得到相同的带宽分配  $y_s^*$ ,所以每个服务(用户)在各条路径上获得的最优带宽分配并不唯一,可能会存在多种形式.

#### 3.3 模型分析

本节将分析映射模型  $P$ ,得到该映射模型的最优点,也就是源端用户在路径上的最优带宽分配.

优化问题(1)的拉格朗日函数为

$$\bar{L}(x, y; \lambda, \mu) = \sum_s U_s(y_s) + \sum_s \lambda_s \left( \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} - y_s \right) + \sum_p \mu_p \left( C_p - \sum_{s: s \in S(p)} x_{sp} - \delta_p^2 \right) \quad (2)$$

其中,  $\lambda_s, \mu_p$  是拉格朗日因子,  $\delta_p$  是松弛因子. 类似于文献[20,21], 拉格朗日因子可以理解为用户单位资源时支付或者收取的价格(price), 则  $\lambda_s$  可以理解为用户  $s$  为获得每单位资源而支付的价格,  $\mu_p$  可以理解为用户  $p$  为提供每单位资源而收取的价格. 求解拉格朗日函数(2)就可以得到映射模型(1)的最优解.

拉格朗日函数(2)可以写成

$$\bar{L}(x, y; \lambda, \mu) = \sum_s (U_s(y_s) - \lambda_s y_s) + \sum_p \sum_{s: s \in S(p)} x_{sp} (\lambda_s - \mu_p) + \sum_p \mu_p (C_p - \delta_p^2) \quad (3)$$

因此, 上述拉格朗日函数最大值的问题可以分解为表 1 中列出的 3 个子问题.

Table 1 Sub-Problems

表 1 子问题

USER	RATE	PATH
$\max U_s(y_s) - \lambda_s y_s, \text{ over } y_s \geq 0$	$\max x_{sp} (\lambda_s - \mu_p), \text{ over } x_{sp} \geq 0$	$\max \mu_p (C_p - \delta_p^2), \text{ over } \mu_p \geq 0$

可以从经济学的角度阐述上述 3 个子问题的意义.

子问题 USER 中, 由于网络中各个源端用户都是自私的, 都想使自己的效用达到最大, 而效用依赖于它获得的带宽分配  $y_s$ . 同时, 用户在获得相应的带宽分配时, 要支付其使用该带宽的费用. 由于  $\lambda_s$  是用户  $s$  支付的每单位带宽的价格, 于是  $\lambda_s y_s$  就是该用户支付的其使用的所有带宽的费用(cost), 而  $U_s(y_s) - \lambda_s y_s$  也就是用户获得的效益(profit), 反映了用户获得的效用和付出的成本之间的关系.

子问题 RATE 将服务或用户与路径联系起来, 决定了用户在路径上的传输速率与价格.  $x_{sp} \mu_p$  是路径  $p$  为用户  $s$  提供带宽  $x_{sp}$  时收取的费用,  $x_{sp} \lambda_s$  是用户  $s$  为获得路径  $p$  提供的带宽  $x_{sp}$  而支付的费用, 二者的关系其实就是路径  $p$  和用户  $s$  之间的一个博弈. 网络的目标是使该博弈达到平衡, 即差值  $x_{sp} \mu_p - x_{sp} \lambda_s$  最小(后面分析可以得到, 映射模型达到最优时满足  $\mu_p = \lambda_s$ ).

子问题 PATH 中, 松弛因子  $\delta_p^2$  可以理解为用户  $p$  上的剩余带宽, 则  $C_p - \delta_p^2$  就是已经分配给各个用户使用的路径带宽. 由于  $\mu_p$  是路径  $p$  收取的价格, 则  $\mu_p (C_p - \delta_p^2)$  其实就是路径  $p$  获得的效益.

令  $\partial \bar{L} / \partial \delta_p = -2\mu_p \delta_p = 0$ , 则  $\mu_p = 0$  或者  $\delta_p = 0$ . 若  $\mu_p = 0$ , 则有关路径  $p$  的不等式约束就是不积极约束(inactive constraint), 因此可以省略; 若  $\delta_p = 0$ , 则有关路径  $p$  的不等式约束就是积极约束(active constraint). 映射模型中, 各用户在获得服务时总是想充分利用路径的传输能力而使自己的效用达到最大, 因此, 只要有 1 个请求服务的用户使用该路径, 它就会充分使用该路径带宽, 则有关该路径的不等式约束就是积极的. 在后面的分析中, 不妨假设  $\delta_p = 0, \forall p \in P$ .

将效用函数  $U_s(y_s) = w_s \log y_s$  带入拉格朗日函数(2)中, 可以得到  $\partial \bar{L} / \partial y_s = w_s / y_s - \lambda_s = 0$ , 则  $y_s = w_s / \lambda_s$ , 并带入公式(2)中, 得到:

$$\tilde{L}(x, y; \lambda, \mu) = \sum_s \left( w_s \log \frac{w_s}{\lambda_s} - w_s + \lambda_s \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} \right) + \sum_p \mu_p \left( C_p - \sum_{s: s \in S(p)} x_{sp} \right) \quad (4)$$

令  $\partial \tilde{L} / \partial \lambda_s = -w_s / \lambda_s + \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} = 0$ , 则

$$\lambda_s = w_s / \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} \quad (5)$$

将公式(5)带入公式(4), 得到:

$$L(x; \mu) = \sum_s w_s \log \left( \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} \right) + \sum_p \mu_p \left( C_p - \sum_{s: s \in S(p)} x_{sp} \right) \quad (6)$$

若  $x_{sp} \neq 0$ , 令  $\partial L / \partial x_{sp} = w_s / \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} - \mu_p = 0$ , 则

$$\mu_p = w_s / \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} \quad (7)$$

因此,通过分析各条路径收取的价格和各个源端用户支付的价格,可以得到如下定理:

**定理 2.** 在映射模型的最优点,请求服务的用户利用多条路径传输时,各条路径的价格是相等的,而且它们就等于用户支付的价格,即如果存在  $p, q \in P(s), p \neq q$ , 则  $\mu_p = \mu_q = \lambda_s$ .

事实上,由公式(5)、公式(7)可以得到,在映射模型的最优点,如果  $p, q \in P(s)$  且  $p \neq q$ , 由于  $x_{sp} > 0, x_{sq} > 0$ , 则下式成立:  $\mu_p = \mu_q = w_s / \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} = \lambda_s$ . 因此,该定理成立.

可以构建一个由集合  $P$  和  $S$  组成的简单图,节点  $s \in S$  代表一个源端用户,节点间的边  $p \in P$  代表两个用户请求服务时使用了共同路径  $p$ , 并在该路径上获得了非零最优带宽分配.若该图是连通的,那么  $\forall p \in P$ , 有  $\mu_p = \mu$ , 且  $\forall s \in S$ , 有  $\lambda_s = \lambda$ ; 若该图不是连通的,那么该图可以划分成几个独立的子图,每个子图都是连通的,并且在第  $k (\geq 1)$  个连通的子图中,  $\forall p \in P_k, \mu_p = \mu_k$ , 且  $\forall s \in S_k, \lambda_s = \lambda_k$ . 所以,根据各个子图的连通性,可以将整个网络划分成几个独立的域,在每个单独的域中,各条路径的价格都是相等的.为简单起见,假设整个图是连通的,因此在最优带宽分配处,所有路径的价格都是相等的.事实上,如果整个图不是连通的,那么它可以被划分成多个独立的子图,下列的分析方法可在各个单独的子图中独立进行.

因此,拉格朗日函数(6)可以写成

$$L(x; \mu) = \sum_s w_s \log \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} + \sum_p \mu_p C_p - \sum_s \sum_{p: p \in P(s)} \mu_p x_{sp} = \sum_s \left( w_s \log \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} - \mu \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} \right) + \mu \sum_p C_p \quad (8)$$

将公式(7)带入公式(8),可以得到:

$$L(x; \mu) = \sum_s \left( w_s \log \frac{w_s}{\mu} - w_s \right) + \mu \sum_p C_p \quad (9)$$

令  $\partial L / \partial \mu = 0$ , 则

$$\mu = \sum_s w_s / \sum_p C_p \quad (10)$$

由公式(7)得到:

$$y_s = \sum_{p: p \in P(s)} x_{sp} = w_s / \mu = w_s \sum_p C_p / \sum_s w_s \quad (11)$$

同时,由公式(5)得到:

$$\lambda_s = \lambda = \mu \quad (12)$$

由公式(10)、公式(11)可以看出,请求服务的源端用户获得的最优带宽分配和它的支付  $w_s$  与所有源端的支付之和的比重是相关的,即  $w_s / \sum_s w_s$ . 因此,各用户获得的最优带宽分配是满足比例公平性的.从经济学的角度来讲,这是符合实际情况的,用户支付的成本越高,它获得的带宽就越大,它的满意度也就越高.由公式(11)还可以看出,各个用户得到的总的最优带宽分配是唯一的,正如定理 1 所阐述的那样.

### 3.4 协议栈与映射参数

由上述映射关系和映射模型得出:应用层的目标是使得用户的聚合效用达到最优;传输层的目标是建立多条连接,进行速率控制和拥塞控制,调整源端的传输速率;网络层的目标是选择合适的多条并行路径进行路由,在传输层的配合下分配路径带宽.各层协议与其对应的映射参数如图 1 所示,这里没有考虑链路层.

传输层根据应用层要实现的效用目标进行速率控制,在网络层提供的多条路径上传输数据,通过源端用户支付的价格  $\lambda_s$  和路径收取的价格  $\mu_p$  调整用户在各个可用路径上的传输速率.最终,在充分利用路径传输能力的前提下实现应用层的聚合效用达到最优.因此,上述各层之间的映射过程若从控制论的角度考虑,则应用层要实现的效用目标可以看作是系统输入,而传输层和网络层的源端速率控制和路径带宽分配过程可以看作是一个反馈控制系统,而请求服务的用户的最优带宽分配和实现的网络最大效用可以认为是当系统达到平衡态时的输出.如图 2 所示.

当然,利用上述的 3 个子问题,也可以从效益的角度考虑和阐述映射关系和映射模型.服务层的目标是,各个用户在获得服务时使得自己的效益达到最优,即它获得的效用与付出的成本之差达到最优.传输层的目标是,根

据用户支付给路径的价格和路径对用户收取的价格来调整其传输速率,最终达到网络的平衡点,即用户支付的价格和路径收取的价格相等.网络层的目标是,为上层的应用提供路径支持并分配路径带宽,并对使用路径的应用收取一定的费用,使各条路径的效益都达到最优.本文只从网络效用的角度来分析网络的跨层映射,基于网络效益的角度分析跨层映射就不作详细论述了.

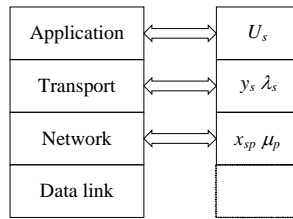


Fig.1 Protocol stack and mapping parameters

图 1 协议栈与映射参数

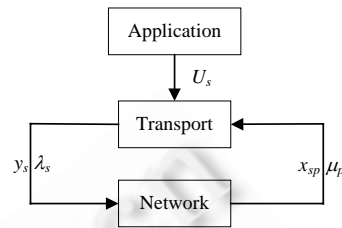


Fig.2 Closed-Loop control structure for mapping

图 2 映射的闭环控制结构

文献[9]提出了一种网络体系架构——一体化网络,如图 3 所示.该网络架构是一种标识网络,克服了现有互联网地址具有的双重属性,实现了网络地址和身份的分离,各层之间的映射通过标识间的转换来完成,很好地支持了服务的迁移性、源端的移动性,同时增强了数据传输的安全性和可靠性.该网络架构设计了服务标识解析映射,实现了从服务层中虚拟服务模块的各个服务到虚拟连接模块的多个连接的多对多映射;同时,设计了连接标识解析映射,实现了从虚拟连接模块的多个连接到网通层的多条并行路径的多对多映射.所以,该网络可以为同一个服务建立多个连接,并利用多条并行路径来传输数据.本文并不讨论该架构中标识之间和模块之间的具体映射法则,仅从网络效用最优的角度考虑和得到该架构中各个模块和映射参数之间的关系,如图 4 所示.

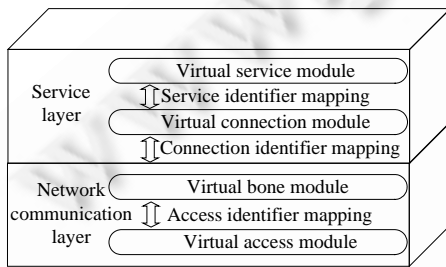


Fig.3 Universal network architecture

图 3 一体化网络架构

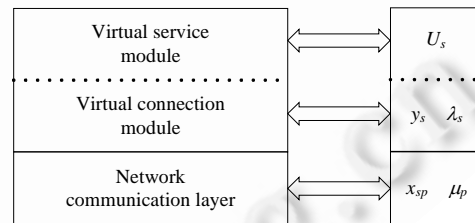


Fig.4 Modules and mapping parameters

图 4 模块和映射参数

与图 1 类似,在映射的过程中,虚拟服务模块的目标是实现各个服务的聚合效用达到最优,虚拟连接模块的目标是利用标识映射建立多个连接,支持虚拟服务模块中各个服务的数据传输;然后,网通层为服务层中的各个服务提供多条并行路径,在虚拟连接模块的配合下为各个服务最优地分配路径带宽,从而实现网络效用最优化.这对文献[11]提出的一体化网络架构如何为服务分配路径带宽、满足网络效用最优化,从而进一步优化该架构提供了一定的理论指导.

## 4 映射算法

### 4.1 分布式算法

上节已经从效用最大化的角度得到了利用多连接多路径传输的网络跨层映射模型,并且得到了该映射模型的最优带宽分配.为了能够在分布式环境中实现该最优带宽分配,本节提出了下述的分布式算法:



$$\frac{d}{dt}x_{sp}(t) = \kappa x_{sp}(t) \left( \lambda_s(t) - \frac{\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t) \lambda_r(t)}{C_p} \right)_{x_{sp}(t) - \varepsilon}^+ \quad (13)$$

$$\lambda_s(t) = \frac{w_s}{\max \left\{ \eta, \sum_{p:P(s)} x_{sp}(t) \right\}} \quad (14)$$

其中,  $\kappa > 0$  是算法的迭代步长;  $\varepsilon > 0, \eta > 0$  是非常小的正常数; 函数  $a = (b)_c^+$  表示当  $c > 0$  时,  $a = b$ , 当  $c = 0$  时,  $a = \max(0, b)$ . 所以, 源端用户的传输速率不会低于界值  $\varepsilon$ , 而支付的价格也不会高于界值  $w_s/\eta$ . 这在用户探测可用带宽时非常重要, 使传输速率不会一直停留在零点.

在该算法中,  $\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t) \lambda_r(t) / C_p$  可以理解为用户支付给路径  $p$  的平均价格, 源端用户  $s$  通过调整自己的速率以接近于该价格. 用户  $s$  在路径  $p$  上的传输速率  $x_{sp}(t)$  与该用户的支付价格  $\lambda_s(t)$  有关, 还与使用该路径的其他用户的传输速率  $x_{rp}(t)$  和支付价格  $\lambda_r(t)$  有关. 由于这些信息仅仅与该路径相关而与其他路径无关, 因此, 算法利用的仅仅是一些局部信息, 而不是网络的全部信息, 所以算法是一种分布式算法.

## 4.2 稳定性

分析上述分布式算法, 可以得到如下定理:

**定理 3.** 算法(13)、算法(14)的平衡点  $(y^*, \lambda^*)$  就是映射模型的全局最优点(10)~全局最优点(12).

该定理的详细证明见附录 1.

因此, 当算法达到平衡点时, 就得到了映射模型的最优点, 即各个源端用户的最优带宽分配. 利用 Lyapunov 稳定性理论分析该算法所对应的动态系统及上述的平衡点, 可以得到如下定理:

**定理 4.** 对于算法(13)、算法(14)所对应的动态系统, 平衡点  $(y^*, \lambda^*)$  是全局渐进稳定的.

该定理的证明较为复杂, 详细过程见附录 2.

由该定理可以得出, 给定任何初始条件后, 算法 1 代表的动态系统总能稳定到平衡点, 而该平衡点就是请求服务的各用户的最优带宽分配. 因此, 该分布式算法在任何初始条件下都是收敛的.

## 4.3 实现

上面给出的是算法的连续形式, 实际上, 在具体的网络实现中, 算法的实现是以离散形式进行的. 映射算法的具体实现步骤可以归结如下:

- (1) 源端用户请求服务时, 利用多连接多路径技术, 在通信双方之间建立多条并行路径.
- (2) 各个用户初始化各自的传输速率  $x_{sp}(t)$  和支付给其所使用路径的价格  $\lambda_s(t)$ .
- (3) 路径  $p$  上的路由器计算该路径的  $\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t) \lambda_r(t) / C_p$ , 并将结果反馈给使用给路径的各用户.
- (4) 各个用户根据速率算法(13)调整各自的速率, 得到新的传输速率  $x_{sp}(t+1)$ .
- (5) 各个用户根据价格算法(14)更新需要支付的价格  $\lambda_s(t+1)$ .
- (6) 重复步骤(4)、步骤(5), 直到得到平衡点.

通过各路径上路路由器的配合, 该算法实现了映射模型的最优带宽分配. 该算法也可以作为端到端并行多路径的流量控制算法, 实现并行多路径上的最优流量分配.

## 5 映射的性能分析

网络中请求服务的各用户经过映射后, 利用多条并行路径来传输数据, 从而完成其所需要的服务. 可以说, 路径的冗余在一定程度上提高了映射的安全性和可靠性. 本节将分析这种从服务到路径的多对多映射的安全性和可靠性, 并给出相应的安全性和可靠性模型.

## 5.1 安全性

安全性涉及面较广,这里仅考虑当网络中存在窃听或篡改等行为时,在多条路径上传输的某服务的数据信息受到的影响.各用户在获得服务时,源端和目的端利用数据分割技术将数据分布到多条并行路径上,利用多路径传输技术完成该服务的数据传输.假设当窃听者仅窃听或截获了其中部分路径上的数据时,并不能完全获得该服务的完整数据信息.因为对该窃听者来说,通过局部数据信息来得到服务的全部相关信息的开销是很大的;而当窃听者同时窃听或截取了某用户使用的所有路径上同时传输的数据信息时,不妨假设它能够将获得该服务的相关数据信息.

假设网络中可以为用户提供数据传输的路径共  $n$  条,某用户  $s$  使用多连接多路径进行数据传输,经过映射后,该用户使用的路径数为  $m(\leq n)$  条.网络中的窃听者窃听或截获了所有路径中的  $k(\leq n)$  条,则窃听者能够成功获得该服务相关机密信息的概率为

$$P(n, k, m) = \begin{cases} C_k^m / C_n^m, & k \geq m \\ 0, & k < m \end{cases} \quad (15)$$

用户在获得服务的过程中,信息不能被成功窃取的概率为  $P_s = 1 - P(n, k, m)$ .

当  $k < m$  时,窃听者不会得到用户使用的所有路径上的数据,因此,成功获取完整信息的概率也就为 0.

当  $k \geq m$  时,由于  $n \geq k$ ,则  $P(n, k, m+1)/P(n, k, m) = (k-m)/(n-m) = 1 - (n-k)/(n-m) \leq 1$ .因此,当用户使用的路径数增加时,窃听者获得完整信息的概率就要降低.也就是说,适当增加用户使用的路径数将会降低数据信息泄露的概率,提高数据传输的安全性.同时,  $P(n, k, m)/P(n, k-1, m) = k/(k-m) = 1 + m/(k-m) > 1$ ,则随着窃听者窃听到的路径数的增加,它获得完整数据信息的概率也就增加.或者说,若采取合理而有效的手段降低被窃听到的路径数目,则能增强数据传输的安全性.而且由于  $n \geq m$ ,则  $P(n, k, m)/P(n-1, k, m) = (n-m)/n = 1 - m/n \leq 1$ .所以,随着网络中可用路径数的增加,窃听者能够获取某服务完整数据信息的概率就要降低.也就是说,适当增加网络中可用的路径数将会降低数据信息泄露的概率,提高数据传输的安全性.

因此,经过从服务到路径的多对多映射后,各用户利用多条并行路径传输数据,这在一定程度上提高了数据传输的安全性.

## 5.2 可靠性

当网络中的一些核心设备受到网络攻击时,例如分布式 DoS 攻击,源端用户使用的部分路径可能会断掉.本节分析部分路径出现故障时多路径传输的可靠性、得到服务能够成功完成的概率.假设路径发生故障而断掉后,暂时不能传输数据,但经过一定恢复时间后又可以继续为服务传输数据.

网络中可以为服务提供数据传输的路径共有  $n$  条,经过映射后,某用户  $s$  使用的路径数为  $m(\leq n)$  条.由于攻击(如 DDoS 攻击)等破坏因素的存在,网络所能提供的  $n$  条路径中可能会有  $k(\leq n)$  条断掉.对于某条路径,破坏持续一段时间  $D_a$  后,该路径就断掉了,但是针对该路径的破坏停止一段时间  $D_r$  后,该路径又可以为服务提供数据传输,即该路径又恢复了可以传输数据的能力.针对 TCP 连接中存在的 DoS 攻击问题,文献[29]假设数据包的请求时间是一个指数型随机变量,正常和攻击数据包的到达过程都服从泊松分布.因此,本文也假设破坏路径的攻击行为中,  $D_a$  和  $D_r$  都是指数型随机变量,参数分别为  $\lambda$  和  $\mu$ .令  $\pi_i = \Pr[A(t)=i]$ ,即时刻  $t$  正在遭受攻击而要发生故障的路径数为  $A(t)=i$  条的概率,图 5 为其状态转移图.如果  $m$  条路径

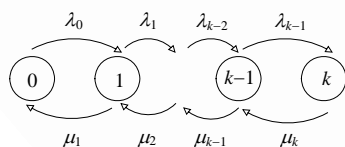


Fig.5 State transition diagram

图 5 状态转移图

中恰好有  $l(\leq k)$  条是为用户  $s$  服务的路径,则该用户将利用  $m(\leq n)$  条中剩余的可用路径继续传输数据,直到完成该服务为止.而这些剩余的可用路径包括未断掉的路径,还可能包括受到攻击但刚刚恢复的部分路径.

网络中攻击或者故障的发生大都是分布式的,如 DDoS 攻击;而路径的恢复可能是集中式的,即故障路径逐条恢复,也可能是分布式的,即现有各条故障路径均可能恢复.若故障的到达是分布式的,则从状态  $i$  到状态  $i+1$  的故障到达率是  $\lambda_i = (k-i)\lambda$ ,即每一个现有可用路径都可能断掉.当路径恢复是集中式完成时,从状态  $i$  到状态  $i-1$

的恢复到达率是 $\mu_i=\mu$ ;当路径恢复是分布式完成时,恢复到达率是 $\mu_i=i\mu$ .令 $\rho=\lambda/\mu$ ,分别考虑这两种情形,得到 $\pi_i=\Pr[A(t)=i]$ 的具体表达式,见表 2.

**Table 2** Probability  $\pi_i=\Pr[A(t)=i]$

**表 2** 概率 $\pi_i=\Pr[A(t)=i]$

	Centralized recovery ( $\mu_i=\mu$ )	Distributed recovery ( $\mu_i=i\mu$ )
Distributed attack ( $\lambda_i=(k-i)\lambda$ )	$\pi_i = \frac{\frac{k!}{(k-i)!}\rho^i}{\sum_{j=0}^k \frac{k!}{(k-j)!}\rho^j} = \frac{\rho^i}{\sum_{j=0}^k \frac{\rho^j}{(k-j)!}}$	$\pi_i = \frac{\frac{k!}{i!(k-i)!}\rho^i}{\sum_{j=0}^k \frac{k!}{j!(k-j)!}\rho^j} = \frac{\rho^i}{\sum_{j=0}^k \frac{\rho^j}{j!(k-j)!}}$

因此,当路径具有一定恢复能力时,服务能够成功完成的概率为

$$P_r = \sum_{i=0}^k \pi_i (1 - P(n+i-k, i, m)) \tag{16}$$

其中,

$$P(n+i-k, i, m) = \begin{cases} C_i^m / C_{n+i-k}^m, & i \geq m \\ 0, & i < m \end{cases} \tag{17}$$

由公式(16)、公式(17)可以看出,用户在获得服务时利用多路径进行数据传输,能够成功完成的概率 $P_r$ 与该用户使用的路径数 $m$ 、网络中要发生故障的路径数 $k$ 、网络中攻击强度或者故障率 $\rho$ 有关.

当 $k$ 和 $\rho$ 一定时,由于 $k \leq n$ ,即发生故障的路径数 $k$ 不会超过总的可用路径数 $n$ ,则

$$\frac{P(n+i-k, i, m+1)}{P(n+i-k, i, m)} = \frac{i-m}{n-k+i-m} = 1 - \frac{n-k}{n-k+i-m} \leq 1.$$

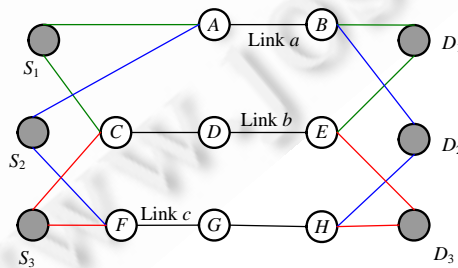
所以, $P(n+i-k, i, m)$ 随着 $m$ 的增加是递减的,这也就意味着 $P_r$ 随着 $m$ 的增加是递增的.因此,当源端用户使用的路径数目增加时,其数据传输的可靠性也就得到了提高.

类似地,理论分析还可以得到,当网络中发生故障的路径数 $k$ 减少时,或者故障率 $\rho$ 降低时,服务能够成功完成的概率 $P_r$ 都是增加的.因此,多对多映射在一定程度上提高了服务完成的可靠性.

## 6 仿 真

### 6.1 分布式算法

考虑如图 6 所示的网络,每个源端用户请求一个服务,映射后使用两条并行的路径传输数据.在该网络中,共有 3 条可用的并行路径,每条路径的传输能力都受到该路径上瓶颈链路的制约.假设瓶颈链路 $a, b, c$ 的带宽分别为 2Mbps,4Mbps,3Mbps,则路径 $A \rightarrow B, C \rightarrow D \rightarrow E, F \rightarrow G \rightarrow H$ 的传输能力分别为 $C_1=2\text{Mbps}, C_2=4\text{Mbps}, C_3=3\text{Mbps}$ .源端用户的效用函数分别为 $U_1(y_1)=\log y_1, U_2(y_2)=3\log y_2, U_3(y_3)=2\log y_3$ .分布式算法中, $\kappa=0.5, \varepsilon=0.01, \eta=0.02$ .



**Fig.6** Network topology: three users and three paths

**图 6** 网络拓扑:3 个用户,3 条路径

利用算法得到的最优带宽分配见表 3,由数学优化软件 LINGO 得到的该优化问题的最优解也列在表 3 中.由表 3 可以看出,该算法收敛到映射模型的最优解,而且各用户的总的最优带宽分配是唯一的;但在各条路径的具体带宽分配并不唯一,正如定理 1 所阐述的那样.

Table 3 Optimum of the mapping model

表 3 映射模型的最优值

	Variable					
	$x_{11}^*$	$x_{12}^*$	$x_{21}^*$	$x_{23}^*$	$x_{32}^*$	$x_{33}^*$
Our algorithm	0.003 5	1.496 5	1.996 5	2.503 5	2.503 5	0.496 5
LINGO	0.446 3	1.033 7	1.533 7	2.966 3	2.966 3	0.033 7

	Variable					
	$y_1^*$	$y_2^*$	$y_3^*$	$\lambda_1^*$	$\lambda_2^*$	$\lambda_3^*$
Our algorithm	1.500 0	4.500 0	3.000 0	0.666 7	0.666 7	0.666 7
LINGO	1.500 0	4.500 0	3.000 0	0.666 7	0.666 7	0.666 7

该算法的仿真结果如图 7 所示,其中,图 7(a)是用户 1 在路径 1 和路径 2 上的最优带宽分配,图 7(b)是用户 2 在路径 1 和路径 3 上的最优带宽分配,图 7(c)是用户 3 在路径 2 和路径 3 上的最优带宽分配,图 7(d)是各个用户支付的最优价格.可以看出,该算法是收敛的,并且当收敛到映射模型的最优点时,用户 1~用户 3 支付给路径的最优价格是相等的,均等于他们使用的路径所收取的最优价格,这与理论分析结果是完全吻合的.

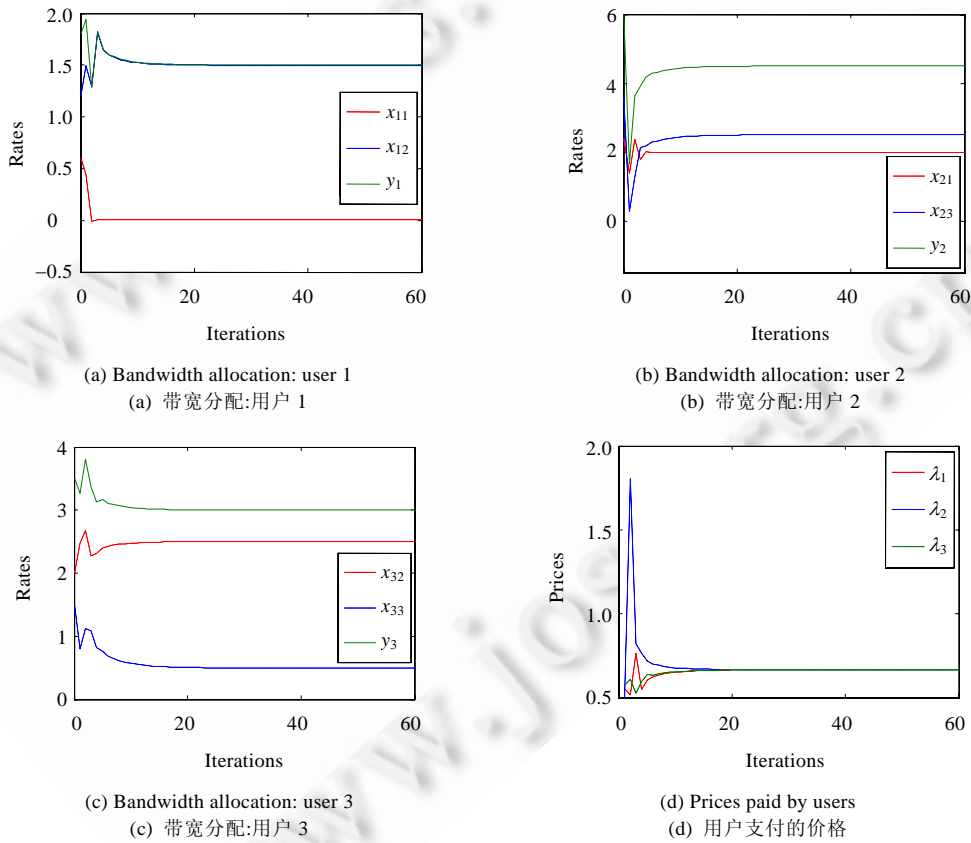


Fig.7 Simulation results of the algorithm

图 7 算法的仿真结果

### 6.2 安全性

针对安全性,如图 8(a)所示,由于用户的数据在多路径上并行传输,当可用路径数  $n$  和被侦听路径数  $k$  一定,而增加用户实际使用的路径数  $m$  时,数据信息成功发送的概率就会增加,即数据信息的安全性就会提高。

如图 8(b)所示,当网络中可用的路径数  $n$  和用户使用的路径数  $m$  一定,而增加网络中被侦听的路径数  $k$  时,在路径上传输的数据信息的安全性就要降低.换句话说,如果能够采取有效手段降低网络中被侦听的路径数,信息被成功窃取破解的概率就会降低,数据信息的安全性就会提高。

类似地,如图 8(c)所示,当网络中用户实际使用的路径数  $m$  和被侦听的路径数  $k$  一定,而增加网络中的可用路径数  $n$  时,数据信息成功发送的概率就会增加,数据信息的安全性也就得到了提高。

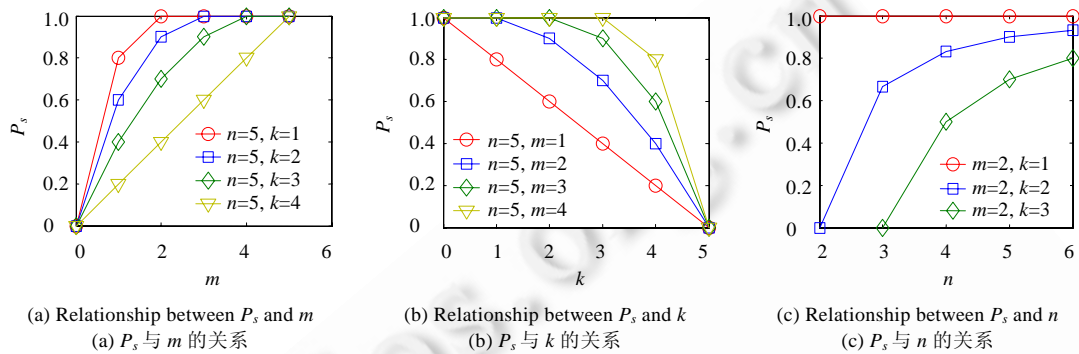


Fig.8 Security analysis

图 8 安全性分析

由上述分析可知,在从服务经连接到路径的映射过程中,如果增加源端用户使用的路径数  $m$ ,或采取有效手段降低被侦听的路径数  $k$ ,或增加网络可以提供的可用路径数  $n$ ,那么数据信息的安全性都将会得到较大的提高。

### 6.3 可靠性

当网络中的核心设备受到 DDoS 攻击时,路径断掉事件的到达就是分布式的.而源端用户探测到有路径不再可用,可能过一段时间后路径逐条恢复;也可能用户之间协同合作探测到有路径不再可用,过段时间后路径以分布式的形式恢复.首先分析路径以集中式的形式恢复时,并行多路径传输的可靠性。

#### 6.3.1 分布式攻击,集中式恢复

如图 9(a)所示,当网络中可用路径数  $n$ 、用户使用的路径数  $m$ 、发生故障的路径数  $k$  一定时,随着故障到达率  $\rho$  的增加,服务能够成功完成的概率就会降低,这意味着数据传输的可靠性降低。

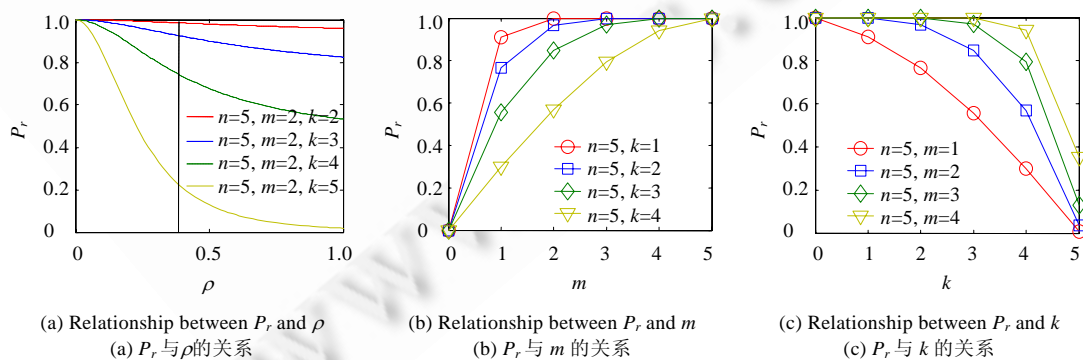


Fig.9 Reliability analysis: distributed attack, centralized recovery

图 9 可靠性分析:分布式攻击,集中式恢复

假设路径故障到达率 $\rho=0.8$ ,分析服务成功完成的概率与用户使用的路径数 $m$ 、发生故障的路径数 $k$ 之间的关系,如图9(b)所示,当故障到达率 $\rho$ 、网络中可用路径数 $n$ 、发生故障的路径数 $k$ 一定时,随着用户使用的路径数 $m$ 的增加,服务能够成功完成的概率就会增加,因此,数据传输的可靠性得到了提高。

类似地,如图9(c)所示,当故障到达率 $\rho$ 、网络中可用路径数 $n$ 、用户使用的路径数 $m$ 一定时,随着发生故障的路径数 $k$ 的增加,服务能够成功完成的概率就会降低,因此,数据传输的可靠性就会降低。

所以,如果在网络中采取较好的安全措施,降低攻击或故障到达率 $\rho$ ,或尽量增加用户使用的路径数 $m$ ,或采取有效的故障诊断机制,及时发现发生故障的路径,从而降低发生故障的路径数 $k$ ,那么数据传输的可靠性都将会得到提高。

### 6.3.2 分布式攻击,分布式恢复

本节分析发生故障的路径以分布式形式恢复时,服务利用并行多路径来传输数据的可靠性。

如图10(a)所示,当 $n,m,k$ 一定时,随着故障率 $\rho$ 的增加,服务能够成功完成的概率就会下降,数据传输的可靠性就会降低。但与集中式恢复情形相比,分布式恢复情形在相同网络条件下的可靠性明显要高于前者,如当 $n=5, m=2, k=4, \rho=0.4$ 时,集中式恢复情形下服务能够成功完成的概率是 $P_r=0.7337$ ,而分布式恢复情形下的概率是 $P_r=0.8794$ 。

假设故障到达率 $\rho=0.8$ ,分别分析 $P_r$ 与 $m,k$ 的关系。如图10(b)所示,当 $\rho,n,k$ 一定时,随着用户使用的路径数 $m$ 的增加,服务能够成功完成的概率就会增加,数据传输的可靠性就会提高。类似地,在相同的条件下,故障路径分布式恢复情形下的可靠性明显要高于集中式恢复情形下的可靠性。同时,如图10(c)所示,当 $\rho,n,m$ 均一定时,随着发生故障的路径数 $k$ 的增加,服务能够成功完成的概率就会下降,数据传输的可靠性就会降低。

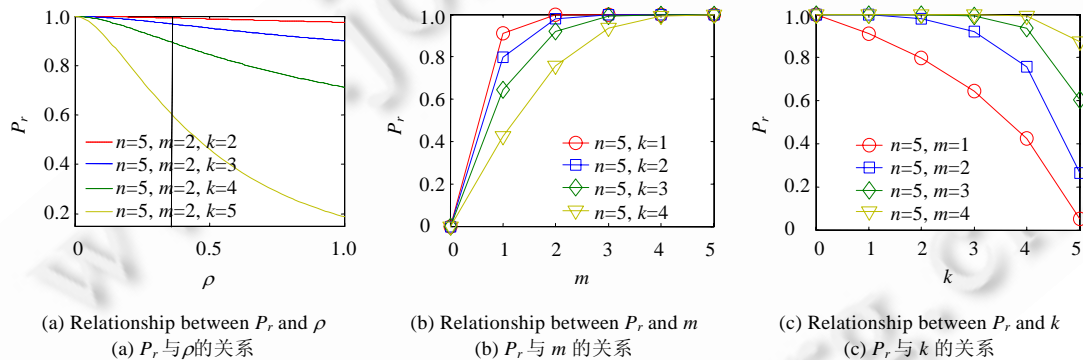


Fig.10 Reliability analysis: distributed attack, distributed recovery

图10 可靠性分析:分布式攻击,分布式恢复

由上述分析和仿真结果可知,在相同的网络条件下,故障路径以分布式恢复情形下的可靠性明显要好于集中式恢复情形下的可靠性。因此,如果在网络中采取较好的安全和故障诊断机制,源端用户之间协同合作,及时发现发生故障的路径,降低攻击或故障到达率,减少发生故障的路径数,同时网络以分布式形式恢复发生故障的路径,那么用户利用并行多路径传输数据时的可靠性都将会得到提高。

## 7 结束语

在下一代互联网中,应用层数据分割、传输层多连接和网络层多路径技术的出现,提高了数据传输的吞吐量和带宽的利用率,而且增强了网络数据传输的安全性和可靠性。本文首先回顾了多连接多路径技术,基于网络效用最大化的思想给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描述,得到了多路径网络跨层映射的数学模型。该映射模型的目标就是合理地为用户选择路径并分配路径带宽,从而使得请求服务的源端用户的聚合效用达到最优。对于该映射模型,得到了各个用户的最优带宽分配。该最优带宽分配和用户



的支付费用与所有用户的支付费用之和的比重相关.为了能够在分布式环境中得到该最优带宽分配,本文设计了一种分布式算法.该算法的动态系统是全局渐进稳定的,且平衡点就是映射模型的最优带宽分配.仿真结果验证了该算法的有效性和收敛性.针对这种多对多的网络跨层映射,分别从安全性和可靠性的角度分析了映射的性能.理论分析和仿真结果均表明,经过映射后,用户利用多路径进行数据传输提高了数据传输的安全性和可靠性.

#### References:

- [1] Cohen E, Kaplan H, Oldham J. Managing TCP connections under persistent HTTP. *Computer Networks*, 1999,31(11):1709–1723. [doi: 10.1016/S1389-1286(99)00018-3]
- [2] Baru C, Moore R, Rajasekar A, Wan M. The SDSC storage resource broker. In: *Proc. of the Conf. on the IBM Centre for Advanced Studies on Collaborative Research (CASCON)*. Toronto: IBM Press, 1998.
- [3] Simco G. Internet 2 distributed storage infrastructure. *The Internet and Higher Education*, 2003,6(1):91–95. [doi: 10.1016/S1096-7516(02)00168-9]
- [4] Sivakumar H, Bailey S, Grossman RL. Pockets: The case for application-level network striping for data intensive applications using high speed wide area networks. In: *Proc. of the ACM/IEEE Super Computing*. Dallas: IEEE Press, 2000. 38–43. [doi: <http://dx.doi.org/10.1109/SC.2000.10040>]
- [5] Eggert L, Heidemann J, Touch J. Effects of ensemble-TCP. *ACM Computer Communication Review*, 2000,30(1):15–29. [doi: 10.1145/505688.505691]
- [6] Hacker TJ, Athey BD, Noble B. The end-to-end performance effects of parallel TCP sockets on a lossy wide-area network. In: *Proc. of the Int'l Parallel and Distributed Processing Symp.* Fort Lauderdale: IEEE Press, 2002. 434–443. [doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IPDPS.2002.1015527>]
- [7] Lee J, Gunter D, Tierney B, Allcock B, Bester J, Bresnahan J, Tuecke S. Applied techniques for high bandwidth data transfers across wide area networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP)*. Beijing: Science Press, 2001. 428–431.
- [8] Floyd S, Fall K. Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1999,7(4): 458–472. [doi: 10.1109/90.793002]
- [9] Zhang HK, Su W. Fundamental research on the architecture of new network—Universal network and pervasive services. *Acta Electronica Sinica*, 2007,35(4):593–598 (in Chinese with English abstract).
- [10] Yang D, Li SY, Wang B, Zhang HK. New transport layer architecture for pervasive services. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(3):359–370 (in Chinese with English abstract).
- [11] Hsieh HY, Sivakumar R. A transport layer approach for achieving aggregate bandwidths on multi-homed mobile hosts. *Wireless Networks*, 2005,11(1-2):99–114. [doi: 10.1007/s11276-004-4749-6]
- [12] Zhang M, Lai JW, Krishnamurthy A, Peterson L, Wang R. A transport layer approach for improving end-to-end performance and robustness using redundant paths. In: *Proc. of the USENIX Annual Technical Conf.* Boston: USENIX Association, 2004. 99–112.
- [13] Andersen D, Balakrishnan H, Kaashoek M, Morris R. Resilient overlay networks. In: *Proc. of the 18th ACM Symp. Operating System Principles (SOSP)*. Banff: ACM Press, 2001. 131–145. [doi: <http://dx.doi.org/10.1145/502059.502048>]
- [14] Stewart R, Xie Q, Morneault K, Sharp C. Stream control transmission protocol (SCTP). RFC 2960, 2000. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2960.txt>
- [15] Iyengar JR, Amer PD, Stewart R. Concurrent multipath transfer using SCTP multihoming over independent end-to-end paths. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2006,14(5):951–964. [doi: 10.1109/TNET.2006.882843]
- [16] Al AAE, Saadawi T, Lee M. A transport layer load-sharing mechanism for mobile wireless hosts. In: *Proc. of the IEEE Annual Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW)*. Orlando: IEEE Press, 2004. 87–91.
- [17] Al AAE, Saadawi T, Lee M. LS-SCTP: A bandwidth aggregation technique for stream control transmission protocol. *Computer Communications*, 2004,27(10):1012–1024. [doi: 10.1016/j.comcom.2004.01.021]
- [18] Fiore M, Casetti C, Galante G. Concurrent multipath communication for real-time traffic. *Computer Communications*, 2007,30(17): 3307–3320. [doi: 10.1016/j.comcom.2006.12.016]

- [19] He JY, Rexford J. Toward Internet-wide multipath routing. *IEEE Network*, 2008,22(2):16–21. [doi: 10.1109/MNET.2008.4476066]
- [20] Kelly FP, Maulloo AK, Tan DKH. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research Society*, 1998,49(3):237–252. [doi: 10.2307/3010473]
- [21] Low SH, Lapsley DE. Optimization flow control, I: Basic algorithm and convergence. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1999, 7(6):861–874. [doi: 10.1109/90.811451]
- [22] Athuraliya S, Low SH, Li VH, Yin QH. REM: Active queue management. *IEEE Network*, 2001,15(3):48–53. [doi: 10.1109/65.923940]
- [23] Low SH. A duality model of TCP and queue management algorithms. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003,11(4):525–536. [doi: 10.1109/TNET.2003.815297]
- [24] Wang JT, Li L, Low SH, Doyle JC. Cross-Layer optimization in TCP/IP networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005,13(3): 582–595. [doi: 10.1109/TNET.2005.850219]
- [25] Palomar DP, Chiang M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006,24(8):1439–1451. [doi: 10.1109/JSAC.2006.879350]
- [26] Chiang M, Low SH, Calderbank AR, Doyle JC. Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures. *Proc. of the IEEE*, 2007,95(1):255–312. [doi: 10.1109/JPROC.2006.887322]
- [27] Long CN, Li B, Zhang Q, Zhao B, Yang B, Guan XP. The end-to-end rate control in multiple-hop wireless networks: Cross-Layer formulation and optimal allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(4):719–731. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080513]
- [28] Bertsekas DP. *Nonlinear Programming*. 2nd ed., Belmont: Athena Scientific, 1999. 173–186.
- [29] Wang Y, Lin C, Li QL, Fang YG. A queueing analysis for the denial of service (DoS) attacks in computer networks. *Computer Networks*, 2007,51(12):3564–3573. [doi: 10.1016/j.comnet.2007.02.011]
- [30] Boyce WE, DiPrima RC. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. 8th ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 536–546.

#### 附中文参考文献:

- [9] 张宏科,苏伟.新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务.电子学报,2007,35(4):593–598.
- [10] 杨冬,李世勇,王博,张宏科.支持普适服务的新一代网络传输层架构.计算机学报,2009,32(3):359–370.

#### 附录 1. 定理 3 的证明

令算法(13)为 0 并考虑算法(14),则可以得到算法的平衡点:

$$\lambda_s^* = \sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}^* \lambda_r^* / C_p, \lambda_s^* = w_s / \sum_{p:p \in P(s)} x_{sp}^*$$

则  $C_p = \sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}^* \lambda_r^* / \lambda_s^*$ . 所以,

$$\sum_p C_p = \sum_p \frac{\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}^* \lambda_r^*}{\lambda_s^*} = \frac{y_s^*}{w_s} \sum_r \sum_{p:p \in P(r)} x_{rp}^* \lambda_r^* = \frac{y_s^*}{w_s} \sum_r \lambda_r^* \sum_{p:p \in P(r)} x_{rp}^* = \frac{y_s^*}{w_s} \sum_r w_r^*$$

因此,  $y_s^* = w_s \sum_p C_p / \sum_r w_r$ , 而且  $\lambda_s^* = w_s / y_s^* = \sum_r w_r / \sum_p C_p$ , 所以算法(13)、算法(14)的平衡点就是映射模型的最优点.

#### 附录 2. 定理 4 的证明

选取 Lyapunov 函数:

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) = \sum_{s \in S} \int_{y_s(t)}^{y_s^*} \left( \frac{w_s}{v} - \lambda^* \right) dv + \sum_{p \in P} \lambda^* (C_p - \xi_p(t)),$$



其中,  $\xi_p(t) = \sum_{s:s \in S(p)} x_{sp}(t)$ . 只要  $y_s(t), y_s^* > 0$ , 则该函数的前半部分:

$$V_1(t) = \sum_{s \in S} w_s (\log y_s^* - \log y_s(t)) - \lambda^*(y_s^* - y_s(t)) = \sum_{s \in S} -w_s \log \frac{y_s(t)}{y_s^*} - w_s + \frac{y_s(t)}{y_s^*} w_s = \sum_{s \in S} w_s \left( \frac{y_s(t)}{y_s^*} - 1 - \log \frac{y_s(t)}{y_s^*} \right) \geq 0.$$

当且仅当  $y_s(t) = y_s^*$  时,  $V_1(t) = 0$ ; 同时, 由于  $\xi_p(t) = \sum_{s:s \in S(p)} x_{sp}(t) \leq C_p$ , 则函数的后半部分  $V_2(t) \geq 0$ . 所以, Lyapunov 函

数  $V(t) \geq 0$ , 当且仅当  $y_s(t) = y_s^*, \xi_p(t) = \sum_{s:s \in S(p)} x_{sp}(t) = C_p$  时,  $V(t) = 0$ .

将 Lyapunov 函数  $V(t)$  沿着动态系统(13)、动态系统(14)代表的轨迹方程取导数, 则

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= \sum_{s \in S} \frac{\partial V(t)}{\partial y_s(t)} \frac{dy_s(t)}{dt} + \sum_{p \in P} \frac{\partial V(t)}{\partial \xi_p(t)} \frac{d\xi_p(t)}{dt} = \sum_{s \in S} \left( \frac{w_s}{y_s(t)} - \lambda^* \right) \sum_{p:p \in P(s)} \frac{dx_{sp}(t)}{dt} - \sum_{p \in P} \lambda^* \sum_{s:s \in S(p)} \frac{dx_{sp}(t)}{dt} \\ &= \sum_{s \in S} -(\lambda_s(t) - \lambda^*) \sum_{p:p \in P(s)} \frac{dx_{sp}(t)}{dt} - \sum_{s \in S} \sum_{p:p \in P(s)} \lambda^* \frac{dx_{sp}(t)}{dt} = - \sum_{s \in S} \sum_{p:p \in P(s)} \kappa \lambda_s(t) x_{sp}(t) \left( \lambda_s(t) - \frac{\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t) \lambda_r(t)}{C_p} \right) \\ &= -\kappa \sum_{s \in S} \sum_{p:p \in P(s)} \lambda_s^2(t) x_{sp}(t) \left( 1 - \frac{x_{sp}(t)}{C_p} \right) + \kappa \sum_{p \in P} \sum_{s:s \in S(p)} \frac{1}{C_p} \sum_{r:r \in S(p) \setminus \{s\}} \lambda_s(t) x_{sp}(t) \lambda_r(t) x_{rp}(t). \end{aligned}$$

在上式的前半部分添加  $\kappa \sum_{s \in S} \sum_{p:p \in P(s)} \lambda_s^2(t) x_{sp}(t) \frac{1}{C_p} \sum_{r:r \in S(p) \setminus \{s\}} x_{rp}(t)$ , 而在后半部分再减去该部分, 则

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= -\kappa \sum_{s \in S} \sum_{p:p \in P(s)} \lambda_s^2(t) x_{sp}(t) \left( 1 - \frac{\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t)}{C_p} \right) + \kappa \sum_{p \in P} \sum_{s:s \in S(p)} \frac{1}{C_p} \sum_{r:r \in S(p) \setminus \{s\}} (\lambda_s(t) x_{sp}(t) \lambda_r(t) x_{rp}(t) - \lambda_s^2(t) x_{sp}(t) x_{rp}(t)) \\ &= -\kappa \sum_{s \in S} \sum_{p:p \in P(s)} \lambda_s^2(t) x_{sp}(t) \left( 1 - \frac{\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t)}{C_p} \right) - \kappa \sum_{p \in P} \sum_{s:s \in S(p)} \sum_{r:r \in S(p) \setminus \{s\}} \frac{x_{sp}(t) x_{rp}(t)}{2C_p} (\lambda_s(t) - \lambda_r(t))^2. \end{aligned}$$

由于  $\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t) \leq C_p$ , 所以  $dV(t)/dt \leq 0$ . 当且仅当  $\sum_{r:r \in S(p)} x_{rp}(t) = C_p, \lambda_s(t) = \lambda_r(t)$  时, 即在平衡点(12)处,  $dV(t)/dt = 0$ . 因此, 利用 Lyapunov 稳定性理论<sup>[30]</sup>, 分布式算法(13)、算法(14)的平衡点是渐进稳定的.



李世勇(1982—), 男, 山东德州人, 博士, 讲师, 主要研究领域为下一代互联网理论, 网络资源分配, 排队论.



秦雅娟(1963—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为下一代互联网理论, 宽带无线通信.



杨冬(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为分布式网络理论与技术, 下一代互联网网络服务架构体系.



张宏科(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为下一代互联网理论与关键技术.