

域间多径路由条件下的运营商收益问题分析

李 丹^{1,2} 汪斌强¹ 尹 婷³ 马海龙¹

(国家数字交换系统工程技术研究中心(NDSC) 郑州 450002)¹
(河南陆军预备役高射炮兵师 郑州 450000)² (河南省军区 郑州 450000)³

摘 要 部署域间多径路由是一个复杂的问题,而运营商由此产生的收益变化将直接关系到域间多径路由方案是否会被运营商接受并推广。从用户效用的角度出发,建立了运营商收益的优化模型,并对比了单一路径及多可达路径下运营商收益的变化情况以及各相关因素之间的影响关系。理论及仿真结果表明,采用多可达路径将给运营商带来更大的利润空间,并可为更多的用户和时延敏感类业务提供服务支撑。

关键词 用户效用,域间多径路由,运营商收益

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Analysis of Profit for Internet Service Provider Based on Multipath Inter-domain Routing

LI Dan^{1,2} WANG Bin-qiang¹ YIN Ting³ MA Hai-long¹

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)¹

(Henan Antiaircraft Artillery Reserve-duty Division, Zhengzhou 450000, China)²

(Henan Provincial Military Command Areas, Zhengzhou 450000, China)³

Abstract The multipath inter-domain routing is a complex topic, but profits of Internet Service Provider(ISP) are one of the most important factors for the prospect. We established an optimization model for profit of ISP based on the user's utilities. Then, the incensement of profit from single-path routing to multipath routing and the impact of relevant factors were analyzed. Through theoretical analysis and simulation experiments, we found that ISP can acquire more profit when multipath routing was deployed. Moreover, it can offer better service for more users and delay sensitive traffics.

Keywords User utility, Multipath inter-domain routing, Profit of ISP

1 引言

随着 Internet 的高速发展,自治域之间呈现出越来越紧密的连接关系。文献[1]分析了北美 Tier-1 骨干网中 17 个边界路由器中的路由表,并指出只有 16% 的目的 IP 前缀仅存在一条可用路由,且 60% 以上的自治域(AS)拥有多于一条的 IP 前缀;文献[2]分析了近 300 万 AS 对,并指出仅有 5% 的 AS 对只存在一条可用路径;文献[3]通过分析,发现约 92.8% 以上的 AS 存在 Multi-homing 的连接方式。尽管种种研究均表明 AS 间的连接关系趋于丰富,但对其使用却差强人意。BGP 单一路径选路的方式使得去往同一目的前缀的流量均沿同一路径进行转发,一旦下游节点或链路发生故障,在故障点上游节点路由计算重新收敛前,源、目的网络间就无法保持正常通信,域间路由的可靠性也就无法得到根本保障。同时,由于 BGP 缺乏对流量工程的显式支持,特定网络间的各类型业务流量交换仅能通过单一路径承载。当链路发生拥塞时,经过该链路转发的业务流均会受到不同程度的影响。

针对 BGP 单一路径选路所暴露出的种种问题,域间多径路由逐渐成为当前国内外研究的一个新的热点。虽然文献

[4-6]提出了地址分离或隧道等技术来支持域间路由的可扩展性,并提出了不同的域间路由机制,然而域间路由的最后实现仍然无法回避策略路由这一基本原则。执行域间多径路由是否可以带来令人满意的收益,能够带来多少收益,成为其是否可以真正得到实际部署的前提问题之一。本文没有选择性指标作为分析依据,而是从经济学的角度引入了用户效用的概念并从运营商收益的角度分析了单/多径路由策略,阐述了相关因素之间的影响关系。

2 基于流量特征的用户效用建模与分析

在经济学领域中,通常使用用户效用的概念,来定量表示用户对获得的服务所期望支付的货币度量或者对获得的服务的满意程度。而效用函数则指的是在没有外在的控制者时,用户采取某项行动产生的用户效用。自从 Shenker^[7]首次从用户效用的角度讨论 IP 网络的业务类型分类开始,关于流量特征与网络中用户效用的相关研究层出不穷。若假定容量为 C 的链路承载的用户流均为同一业务类型,则用户效用完全可以通过用户获得的带宽情况来近似表示^[7]。

针对当前 Internet 中的主要用户业务类型,本文将其归

到稿日期:2009-07-30 返修日期:2009-09-30 本文受 973 国家重点基金项目(2007CB307102)资助。

李 丹(1980—),男,博士生,主要研究方向为域间路由等,E-mail:rocket0623@sina.com;汪斌强(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带信息网络;尹 婷(1974—),女,研究生,主要研究方向为宽带信息网络;马海龙(1980—),男,讲师,主要研究方向为宽带信息网络等。

结为3大类:1)时延敏感类业务,如VoIP、流媒体、在线游戏等UDP业务类型。该类业务通常存在最小编码率,当用户获得的网络带宽低于该编码率时,用户效用陡降为零;反之,用户效用值将随着用户获得网络带宽的增长而呈现出S类型曲线特征。本文将该类业务记为类型1,且采用Logistic模型来建立时延敏感类业务的用户效用函数^[8];2)具有传统拥塞控制机制的TCP类业务,亦称为TCP弹性流。该类业务能够较好地适应网络拥塞等情况,可以针对QoS需求产生较好的弹性变化,用户获得网络带宽的多少不会直接导致应用失效。该类业务的效用函数呈现出对数函数曲线特征^[8-11]。本文将该类业务记为类型2;3)交互式TCP业务。该类业务采用TCP传输层协议,但是对报文时延却有确定要求。例如Web服务中,用户无法忍受长时间的等待;Telnet服务中,RTT过大,使得通信双方无法保持正常的连接状态等。因此,该类业务的效用函数曲线与TCP弹性流效用函数曲线类似,但存在最小可容忍的带宽需求。当需求无法得到满足时,用户效用为零。本文将该类业务记为类型3。

若假定第*i*类业务类型的用户获得的带宽为 b_i ,而效用函数记为 $u_i(b_i)$,则用户的效用函数可以表示为:

$$u_i(b_i) = \begin{cases} V_i \cdot \frac{1}{1 + (1/\epsilon - 1)e^{-2\ln(1/\epsilon - 1) \cdot b_i / \max(b_i)}} & (i=1) \\ V_i \cdot \frac{\ln(b_i)}{\ln(\max(b_i) + 1)} & (i=2) \\ V_i \cdot \frac{\ln(b_i / \min(b_i))}{\ln(\max(b_i) / \min(b_i))} \cdot \frac{\text{sgn}(b_i - \min(b_i)) + 1}{2} & (i=3) \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_i 为第*i*类用户可获得的最大效用; $\max(b_i)$ 为第*i*类业务的最大网络带宽需求; $\min(b_i)$ 为第*i*类业务的最小网络带宽需求; ϵ 为时延敏感性因子, ϵ 越小,用户类型就越接近实时业务。

上式虽然考虑了用户对于获得的带宽的满意程度,但仅仅反映了带宽对用户自身效用的影响,忽略了由于用户自身带宽需求的增长增加了链路发生拥塞的可能,从而给链路上承载的其他用户流带来不利影响。对此,我们决定引入惩罚函数,对容易造成网络拥塞的外部效应征收额外费用 $P(b)$,使得用户得到的带宽越大,相对应支付的费用也就越高。本文对惩罚函数进行如下定义:

$$P(b_i) = V_i \cdot \frac{\text{sgn}(b_i - C/N) + 1}{2} \cdot \left(\frac{b_i}{\max(b_i)}\right)^x \quad (2)$$

这样一来,当用户获得的带宽不足 C/N 时,惩罚值随带宽增加呈线性增长;超过 C/N 后,则视为恶意带宽抢占,其惩罚函数值将呈指数级增长,以确保运营商为各业务类型提供服务的公平性。

3 基于用户效用的运营商最优收益分析

根据本文定义的用户效用函数,在此着重对运营商收益的最优化问题进行建模,并分别对单一路径和多可达路径条件下的运营商最优收益进行量化对比分析。考虑到用户效用是对业务得到服务满意程度和愿意支付的费用表征,因此可以理解为用户效用越高,运营商得到的收益也就越多。使用用户效用可以反映运营商的收益情况。

同时,从运营商的角度来说,其收益主要由用户效用以及

为其用户提供服务的成本共同组成。一般来说,基础设施投资成本按照固定价格进行收取,而本地与邻居运营商之间的单位流量支出成本结算则与其达成的商业协议关系有关。根据运营商间商业协议关系,其结算方式可以大致分为互不结算方式、多边结算方式和双边协商结算几种。考虑到互补结算方式下,本地运营商与邻居运营商不产生流量费用,而其他两种结算方式下的运营商成本均与用户产生的流量大小呈正比关系,且无论怎样,用户支付的费用必定大于运营商提供服务的成本价格,所以即使考虑运营商成本因素,用户收益的多少仍可以反映出运营商收益变化的趋势。因此,在建立运营商收益优化模型时,忽略结算方式带来的运营商成本因素是可行的。

3.1 单一路径条件下的运营商收益分析

在传统BGP路由单一路径选路的机制下,本地与特定子网的流量交换仅能通过单一的自治域出入口完成。假设本地运营商同时为*N*个用户提供服务,且产生的业务流均通过同一链路*l*转发至相同的下一跳,则在特定时刻点*t*上,本地运营商的收益可以表示为:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N \cdot p_i} (u_i(b_{i,j}(t)) - P(b_{i,j}(t))) \quad (3)$$

而一个计费周期*T*内运营商对链路*l*的总收益可以表示为:

$$I_l = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N \cdot p_i} (u_i(b_{i,j}(t)) - P(b_{i,j}(t))) \right) dt \quad (4)$$

式中, p_i 为链路中使用类型为*i*的用户所占据的比例; $b_{i,j}$ 为用户类型为*i*的第*j*个用户获得的网络带宽。

考虑到用户的收益将同时由用户类型所占市场份额、用户数量和用户获得的网络带宽共同决定,运营商的最优收益可以表示为式(5)所示的非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \text{Maximum } I_l &= \int_0^T \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N \cdot p_i} (u_i(b_{i,j}(t)) - P(b_{i,j}(t))) \right) dt \\ \text{Subject } &\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N \cdot p_i} b_{i,j}(t) \leq C \\ &\sum_{i=1}^3 p_i = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

一般说来,即使使用同一业务类型的不同用户也可能会因为个体差异而获得不同的带宽,因此本文认为分析运营商最优收益时,针对用户业务类型的平均带宽进行分析,较之采用随机产生的某个时间点上或时间段内的各个用户的带宽更能体现一般性。

假设 $\bar{b}_i$ 为第*i*类业务在计费周期*T*内的平均带宽, $\bar{I}_l$ 为运营商在链路*l*上的平均收益,则运营商收益的最优化问题可以等价于:

$$\begin{aligned} \text{Maximum } \bar{I}_l &= \sum_{i=1}^3 N \cdot p_i \cdot (u_i(\bar{b}_i) - P(\bar{b}_i)) \\ \text{Subject to } &N \cdot \sum_{i=1}^3 p_i \cdot \bar{b}_i \leq C \end{aligned} \quad (6)$$

定理1 在用户数量、链路总带宽及各类业务类型所占市场份额确定的条件下,运营商收益的最优化问题可以通过著名的Lagrange乘子理论进行求解。

证明:

根据运营商收益的优化模型,可以首先得到运营商收益函数的Lagrange函数:

$$L(\bar{b}, \lambda) = \sum_{i=1}^3 N \cdot p_i \cdot (u_i(\bar{b}_i) - P(\bar{b}_i)) - \lambda \cdot \left(\sum_{i=1}^3 p_i \cdot \right.$$

$$\bar{B}_i - C/N)$$

式中, λ 为 Lagrange 乘子。

若假定最优条件下的带宽分配方案为 $\bar{B}^* = (\bar{B}_1, \bar{B}_2, \bar{B}_3)$, 则根据 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)必要条件的要求, 运营商达到最优收益时, 必存在非负的 Lagrange 乘子 λ , 且满足:

$$\begin{cases} \text{grad}(\sum_{i=1}^3 N \cdot p_i \cdot (u_i(\bar{B}_i) - P(\bar{B}_i)) - \lambda \cdot (\sum_{i=1}^3 p_i \cdot \bar{B}_i - C/N)) = 0 \\ \partial L / \partial \lambda = 0 \end{cases}$$

即:

$$\begin{cases} u'_i(\bar{B}_i) - P'(\bar{B}_i) - \lambda = 0 \\ \sum_{i=1}^3 p_i \cdot \bar{B}_i - C/N = 0 \end{cases} \quad (7)$$

然而, 如图 1 所示, 不同用户类型的效用函数具有不同的分布特征, 这使得其一阶偏导数也各不相同。在特定的 Lagrange 乘子 λ^* 与 ISP 最优收益条件下可能同时存在两组带宽分配方案。我们选取两组带宽方案中产生较高运营商收益的一组作为 ISP 最优收益问题的全局最优解, 而另一组将按照局部最优解做舍弃处理。此外, 由于时延敏感类用户效用函数的一阶偏导数类似“钟型”, 当 λ^* 超越其最大值范围时, 时延敏感类用户将无法获取最优的带宽分配结果, 而运营商也将无法取得最优收益结果。除此以外, 当式(7)所示的 KKT 必要条件可以得到满足时, 运营商收益优化问题的最优解必然存在。证明完毕。

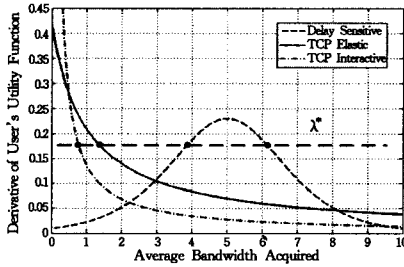


图 1 用户效用函数的一阶偏导数

考虑到 TCP 弹性流和具有时延要求的 TCP 流的效用函数及一阶偏导数具有相似的分布特征, 且两类业务的单位用户的平均带宽需求相对较小, 因此我们进一步假设:

$$\sum_{i=1}^3 p_i = 1, p_2 = p_3 = (1 - p_1) / 2$$

同时, 为了便于求解, 对式(7)中变量个数进行缩减, 并将其写为如下形式:

$$\sum_{i=1}^3 p_i \cdot \text{profit}_i^{-1}(\lambda) = C/N \quad (8)$$

式中, $\text{profit}_i(\bar{B}_i) = u'_i(\bar{B}_i) - P'(\bar{B}_i)$

当链路带宽为确定值时, 式(8)中的变量缩减为 λ , p_i 和 N 。这样, 最优条件下用户获得的平均带宽、用户数量以及时延敏感类业务所占市场份额三者之间的相互影响关系可以表达如下:

$$\sum_{i=2}^3 p_i \cdot \text{profit}_i^{-1}(\lambda) + p_1 \cdot \text{profit}_1^{-1}(\lambda) = C/N \quad (9)$$

3.2 多可达路径条件下的运营商收益分析

从直观角度上来说, 由于单一路径条件下的链路的带宽有限, 因此随着用户数量及特定类型用户所占市场份额的不断增加, 势必会对运营商的收益造成一定的影响。而多可达

路径条件下, 域间链路的带宽可以通过多可达路由机制得到潜在的增强。运营商由此得到的收益提升程度, 将是本节分析的重点。

单一路径条件下, BGP 选路反映的是商业协议关系下的最优策略路由。然而, 当本地运营商希望同时使用多条可达路径时, 势必要与邻居运营商发生新的商业协议关系。当且仅当使用新的转发路径所产生的开销小于从用户获得的收益时, 该可达路径才可能被运营商接受和部署。由于篇幅有限, 运营商间如何进行互协商, 以及本地 AS 如何选择恰当的路径执行多径路由下的流量分割, 本文不做重点研究。在此仅分析多可达路径已知条件下的运营商收益问题。

假设本地运营商获得去往特定子网的多可达路径的累计可用带宽为 ΔC , 则运营商收益的最优化问题的约束条件可变为:

$$\begin{cases} \sum_{i=2}^3 p_i \cdot \text{profit}_i^{-1}(\lambda) + p_1 \cdot \text{profit}_1^{-1}(\lambda) = \frac{(C + \Delta C)}{N} \\ \sum_{i=1}^3 p_i = 1 \end{cases}$$

而潜在的带宽增加给最优条件下的时延敏感类业务的市场份额以及用户数量带来的影响可以分别计算得到:

$$\Delta p_1 = \frac{\Delta C}{N \cdot \text{profit}_1^{-1}(\lambda)}$$

$$\Delta N = \frac{\Delta C}{p_1 \cdot \text{profit}_1^{-1}(\lambda) + p_2 \cdot \text{profit}_2^{-1}(\lambda) + p_1 \cdot \text{profit}_2^{-1}(\lambda)}$$

如果假设当前最优路径可用条件下用户数量为确定值 N , 则运营商最优收益条件下, 使用多可达路径可以容纳的时延敏感类业务所占市场份额较之单一路径条件的增长比例可以表示为:

$$\text{Ratio}_p = \frac{\Delta C \cdot 2 \cdot (2 \cdot \text{profit}_1^{-1}(\lambda) - \text{profit}_2^{-1}(\lambda) - \text{profit}_3^{-1}(\lambda))}{\text{profit}_1^{-1}(\lambda) \cdot (2C - N \cdot \text{profit}_2^{-1}(\lambda) + \text{profit}_3^{-1}(\lambda))}$$

若使用时延敏感类业务的市场份额为确定值, 则多可达路径较之单一路径条件, 运营商最优收益下可容纳的用户数量增长比例为:

$$\text{Ratio}_N = \frac{\Delta C}{C}$$

4 仿真实验

为了更加清晰地描述本文对运营商收益最优化问题的解决方案及效果, 采用 Matlab 作为仿真平台, 分别对单一路径及多可达路径条件下的运营商最优收益及各因素间的影响关系进行了定量分析和仿真评估。考虑到运营商收益最优条件下 3 类用户业务的平均带宽可以通过唯一变量 λ 确定, 我们决定将其与使用时延敏感类业务的用户所占市场份额及用户总数共同作为仿真输入参数, 进行仿真实验及分析。

首先, 设定单个用户条件下 3 类业务类型的最大带宽为典型值。其中, 时延敏感类业务和 TCP 弹性流业务的平均最大带宽为 10M, 有时延要求的 TCP 业务类型的平均最大单宽为 10M, 最小带宽需求为 64k。同时, 考虑到公平性, 我们假定各类用户类型具有相同的最大效用值, 即 $V_1 = V_2 = V_3 = 1$ 。

图 2(a) 为采用 Matlab 仿真得到的单一路径条件下用户数量、时延敏感类用户所占市场份额以及运营商最大收益之间关系的三维仿真图。其中, 运营商收益较大的结果对应的是全局最优解。图 2(b) 为用户数量与运营商最优收益之间的二维关系图, 图 2(c) 为时延敏感类用户所占市场份额与运

营商最优收益之间的二维关系图,图 2(d)为时延敏感类用户所占市场份额与用户数量之间的二维关系图。

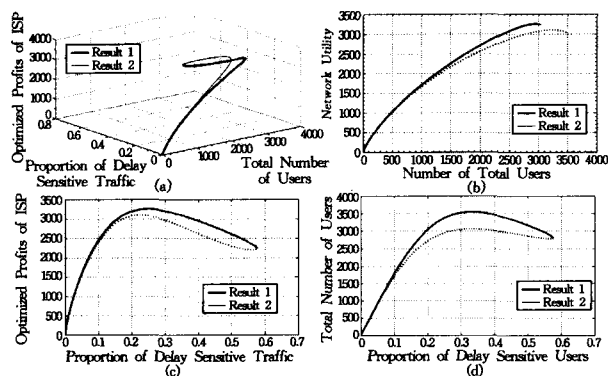


图 2 单一路径条件下的运营商收益分析结果

通过对单一路径条件下 ISP 最优收益影响因素的分析,可以发现 ISP 收益并非与用户总数呈严格的单调递增关系。当用户总数增加至一定程度后,运营商收益开始递减。若用户数量继续增加,则运营商无法获得最优收益。同样,若用户数量为确定值,则随着时延敏感类业务类型所占市场份额的逐渐升高,运营商最优收益将逐渐接近其峰值。达到峰值后,市场份额的继续增加将导致 ISP 最优收益的下降,直至运营商最终丧失最优解。由于时延敏感类业务的平均带宽相对较大,其比例的增长也可以看作是链路总带宽的逐步增加,因此该部分可以近似地看作网络拥塞程度对运营商最优收益的影响。图 2(d)给出了运营商收益保持最优状态时时延敏感类业务类型所占市场份额与用户数量之间的关系。从中可以看出,当时延敏感类业务比例超过特定值以后,为了保持最优收益,运营商需要采取接入控制等手段,减少链路中的用户数量,方可维持其收益的最优解。也就是说,若运营商需保持最优收益,则要采取特定措施来减少链路中时延敏感类业务对于带宽的过度消耗,从而避免丧失网络拥塞所导致的最优收益。

图 3 为本地运营商与邻居运营商经过协商后获得的多条可达路径的累计可用带宽分别为 1G、5G 和 10G 条件下,最优收益与时延敏感类业务用户所占的市场份额之间的影响关系图,以及运营商最优收益与用户总量的关系图。从图 3 中可以清楚地看到,若运营商可以获得多条可达路径,则其可用带宽总量与其获得的收益呈单调递增函数关系。同时,由于运营商获得了更多的可用带宽,网络拥塞发生的可能将大大降低,运营商收益最优条件下将能够容纳更多的用户数量,其收益值也相应地获得了明显的增长。

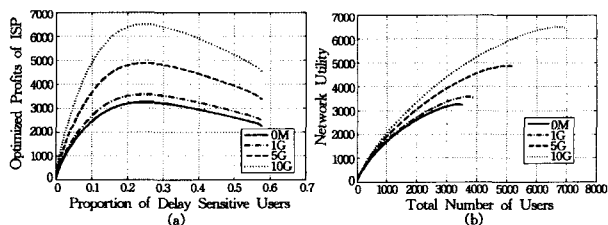


图 3 多可达路径条件下的运营商收益分析结果

结束语 虽然维护多可达路径将引入额外的处理和存储开销,但是该问题在可扩展性良好的域间路由体系结构和新

型的域间路由机制下仍可以很好地得到解决^[2,4,12-15],而由此得到的网络传输性能提升显而易见。本文从效用的角度,分析并对比了运营商收益在单/多路径路由策略下的最优收益情况,并证明了通过 Lagrange 乘法求解该问题的可行性。理论与仿真结果均显示,采用多可达路径将给运营商带来更大的利润空间,并可以为更多的用户和时延敏感类业务提供服务支撑。由于篇幅有限,运营商之间如何根据彼此的商业协议关系选取较优的路径执行多径流量分割,将是现在乃至今后研究的重点问题。

参考文献

- [1] Xia J, Gao L. On the evaluation of AS relationship inferences[C]// Proceedings of GLOBECOM. 2004, 3: 1373-1377
- [2] Xu Wen, Rexford J. MIRO: Multi-path Interdomain Routing[C]// Proceedings of SIGCOMM. 2006: 171-182
- [3] Vasudevan V, Andersen D G, Zhang Hui. Understanding the AS-level Path Disjointness Provided by Multi-homing [R]. CMU-CS-07-141. CMU CS, 2007
- [4] He Jiayue, Rexford J. Toward internet-wide multipath routing [J]. Network, IEEE, 2008, 22(2): 16-21
- [5] Wang Yi, Avramopoulos I, Rexford J. Morpheus: making routing programmable[C]// Proceedings of the 2007 SIGCOMM Workshop on Internet Network Management. 2007: 285-286
- [6] Saucez D, Donnet B, Iannone L, et al. Interdomain traffic engineering in a locator/identifier separation context[C]// Internet Network Management Workshop. 2008: 1-6
- [7] Shenker S. Fundamental Design Issues for the Future Internet [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(7): 1176-1188
- [8] Shi Lei, Liu Changbin, Liu Bin. Network Utility Maximization for Triple-play Services[J]. Computer Communications, 2008, 31(10)
- [9] Banks J, Dragan V, et al. Chaos: A Mathematical Introduction [M]. Cambridge University Press, 2003
- [10] Kunniyur S, Srikant R. End-to-End Congestion Control Schemes: Utility Functions, Random Losses and ECN Marks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 689-702
- [11] Lagoa C M, Che H. Adaptive Control Algorithms for Decentralized Optimal Traffic Engineering in the Internet[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 415-428
- [12] Subramanian L, Caesar M, Cheng Tien Ee, et al. HLP: A Next Generation Inter-domain Routing Protocol[C]// Proceedings of the 2005 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2005: 13-24
- [13] Farinacci D, Fuller V, Oran D. Locator / Id separation protocol (LISP)[S]. Internet Draft, Jan. 2007
- [14] Nordmark E, Bagnulo M. Shim6: level 3 multihoming shim protocol for IPv6[S]. Internet Draft, Oct. 2007
- [15] Atkinson R. ILNP Concept of Operations[S]. Internet Draft, June 2008