

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2017.06.020

# 网络服务提供商合作行为的演化博弈分析

张欣欣, 徐 恪, 钟宜峰, 苏 辉

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘 要:** 为了促进网络服务提供商之间的有效合作并合理分配资源,设计一种基于网络服务提供商之间连接关系的合作行为演化博弈方法,通过分析网络内容提供商与服务提供商之间的支付结构,得到服务提供商之间的连接策略,进而从有限理性的角度对所提方案进行综合经济效用分析,最后解释均衡结果,即在演化博弈过程中网络服务提供商之间的合作策略随关键变量如何变化.结果表明:当网络服务提供商群体处于稳定状态时,由很多利益偏好相似的小团体构成,成本控制和利润分配机制对群体的稳态有显著影响,政府或监管机构可以通过补贴或惩罚措施动态调配网络基础设施.

**关键词:** 网络服务提供商(ISPs);网络内容提供商(ICPs);演化博弈;合作行为;资源分配

中图分类号: TP 393

文献标志码:A

文章编号: 1008-973X(2017)06-1214-11

## Evolutionary game analysis on cooperative behaviors of internet service providers

ZHANG Xin-xin, XU Ke, ZHONG Yi-Feng, SU Hui

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** An evolutionary game scheme of connection relationships was designed based on cooperation behaviors in order to promote efficient cooperation among internet service providers (ISPs) and allocate network infrastructure resources reasonably. The connection strategies were conducted among ISP groups. Through analyzing the payment structure between stakeholders in the communication market like internet content providers (ICPs) and ISPs. Furthermore, a comprehensive economic utility analysis was proposed under the condition of limited rationality. Finally, the results demonstrate that when the group of ISPs is at evolutionary stable state (ESS), it is composed of small groups which share the same preference of interests. The control of costs and the allocation mechanism of profits have significant influence on the stable state of groups. The government could carry out measures like subsidy or punishment to reallocate network infrastructure resources dynamically.

**Key words:** internet service providers (ISPs); internet content providers (ICPs); evolutionary game; cooperative behavior; resource allocation

在实际的通信网络中,网络服务提供商(internet service providers, ISPs)通过正式和非正式的

关系广泛协作,合作模式一般是基于网络流的商业合同,这些网络流横跨全球路由系统中的各个自治

收稿日期: 2017-01-04.

浙江大学学报(工学版)网址: www.zjujournals.com/eng

基金项目: 国家自然科学基金项目(61170292,61472212);国家科技重大专项课题(2015ZX03003004);国家“973”重点基础研究发展规划基金资助项目(2012CB315803);国家“863”高技术研究发展计划基金资助项目(2013AA013302,2015AA015601);欧盟CROWN 基金项目(FP7-PEOPLE-2013-IRSES-610524).

作者简介: 张欣欣(1993—),女,硕士生,从事网络经济学研究. ORCID:0000-0002-0243-7842. E-mail: Zhangxin93@126.com  
通信联系人:徐恪,男,教授. ORCID:0000-0003-2587-8517. E-mail:xuke@mail.tsinghua.edu.cn.

网络.每个ISP都定期地优化其连接策略,来提高利润空间并提升用户满意度.然而,通过互联网向用户提供各种应用服务(over-the-top,OTT)使得ISP之间的连接关系变得越来越复杂.因为互联网中心正在向移动终端用户转移,为了给终端用户提供有效而丰富的内容服务,网络内容提供商(internet content providers,ICPs)需要从ISP处购买网络接入服务.事实上,尽管网络内容能够传递到用户,由于运营商之间合作不充分而导致的链路连接不畅,其满意度依然不能被满足.

与此同时,互联网中存在着数以千计的ISP,每个ISP都想要最大化自己的收益.目前大多数网络服务供应商都保持着物理上的连接,而实际中却由于相互之间合作机制不畅而发生阻塞.如果把通信市场看成整体,每个ISP都应该与同属性个体合作,一方面提高网络基础设施的有效利用率,一方面提高整体对于ICPs的议价能力.事实上,很多国家和地区的通信市场都呈多寡头竞争局面,缺乏有效的合作机制,个体逐利造成了大量资源的重复部署和不完全利用,更严重的是,有些ISP可能在路由和互联中采取自私行为,使得网络系统的整体性能退化.

基于以上情况,本文研究并提出通信网络中多方参与者的演化博弈机制<sup>[1]</sup>,讨论互联策略的动态变化过程,研究如何激励ISP自发采取与他人合作的策略,并提供给终端用户良好的网络服务体验.

大多数网络经济学的研究都采用经典博弈理论.均衡理论假设行为主体没有选择偏好并且完全理性,是一种非常严格的单调性.然而,演化博弈理论<sup>[2]</sup>允许更丰富的动态性,可以弥补经典博弈理论的不足.重复博弈理论<sup>[3]</sup>研究下述场景中可能发生的相互关系:a)现在的选择影响其他人的选择和自己未来的机会,并且b)需要把现有的选择考虑进去再做出选择.以下2种情况,只要有1种成立,基于自然选择的博弈就不成立:1)由于不能可靠评估现在的行为引发的未来间接结果导致b)不成立,最后只对当前直接结果做出回应;2)由于没有单独个体对他人产生明显的影响导致a)不成立,类似于竞争市场中对于标准价格的假设例证一样.

参照Friedman等<sup>[4]</sup>的定义,演化博弈分析得到的稳定状态满足3个主要特征:1)单调性:高支付策略代替低支付策略,即适者生存.2)惯性:种群根据环境实时改变行动,即演化而非革命.3)违背自然:参与者不会影响他人的选择,即自然选择.实际上,通信市场中的服务提供商和内容提供商两大群体在演化过程中,其个体行为便为有限理性.鉴于这样的

行为特征,采用自然选择的演化博弈理论作为分析方法.把博弈论和动态演化过程结合起来,假设种群集合中的个体通过模范、学习、突变或其他方式达到演化稳定平衡点.结果表明合作机制不仅有利于各演化阶段形成互助联盟,同时避免了网络资源的浪费,并且支持在现有的互联网之上提供区分服务.

很多网络通信领域的研究专注于网际间互联和网络定价模型.Richard等<sup>[5]</sup>研究了Shapley只在ISP利益分配中的应用以及结构拓扑下的Shapley解决方案,开发了动态编码程序来计算一般拓扑结构下的Shapley解.Bailey等<sup>[6-7]</sup>调研了现存的网际连接关系,把现有的模型和通信产业的模型进行了比较.非合作博弈<sup>[8]</sup>被用于模拟网络实体中的自私路由行为.派生于微观经济学,博弈论也被用于处理网络领域的定价问题和激励机制<sup>[9]</sup>.尽管定价机制能够用来鼓励独立的个体并提高社会福利,但传统的分析方法是静态并且有限理性的.正如苏辉等<sup>[10-11]</sup>关于ISP利益分配研究的博弈,张春燕等<sup>[12]</sup>针对多方网络服务费用的博弈,以及Varian等<sup>[13-14]</sup>针对灵活市场定价的博弈.实际上,动态定价有根据网络状况自动使用价格变化的优点,但研究者没有考虑实际应用中的网络拓扑行为.本文研究不同场景下的演化博弈过程,提出了一种基于运营商之间连接关系的动态演化博弈分析方法,不仅激励ISP之间充分合作,还能够最优化利用公共资源,对于ISP通过合作提出创新策略也是一大促进.

## 1 网络模型

Faratin等<sup>[5]</sup>按照功能把ISP分为3个类别:面向内容供应商的ISP、面向终端用户的ISP、承担传输功能的ISP.为了接入互联网,大部分ISP都必须向其他ISP支付流量传输费,而通常供应商所选策略与其经济利益密切相关.换一个角度来看,如果以一家网络运营商为分析粒度,该公司将包含以上全部3种类型,其本身又可以看作更细粒度的基本ISP联盟.

考虑到分析的合理性,在此提出3点假设.

**假设1** 由于终端个人用户一般从属于某个运营商,议价能力不强,使用状况相对稳定,因此运营商间的合作并非影响其资费收入中终端个人用户贡献部分的主要因素.假设每个ISP有固定规模且非弹性的终端个人用户,主要研究运营商间的合作对其资费收入中ICPs企业用户贡献部分随时间变动的的影响.

**假设2** 由于文章主要研究基于合作机制的演化博弈,不考虑价格战因素带来的影响.假设每家运营商向 ICP 采用统一的收费标准,当通过合作进一步提高链路质量后,运营商同等程度地提高 ICP 的收费标准.

**假设3** 为了把内容传递给所有的网络用户,每家 ICP 都必须与所有运营商保持连接.故这里假设存在  $M$  个 ISP 联盟和  $N$  个 ICP 联盟,以运营商集团为粒度,其内部的 ISPs 在拓扑结构上彼此全连接,每个 ISP 为  $N$  个 ICP 提供连接服务,每个 ICP 需要支付  $M$  倍网络服务费.

这里需要指出,参考 Friedman 等<sup>[3]</sup>所论述的演化博弈场景,由运营商个体构成的生态系统,其演化博弈过程包括:1)确定数量的 ISP 博弈主体,2)有限的策略集合,3)周期性的博弈阶段和动态调整过程.在演化过程中,高收益的策略组合将替代低收益,持续的动态变化将影响不同策略的收入.定义所研究的网络通信市场(生态系统)包含  $M$  个 ISP,由其中任意个体所组成的子集(种群)称为一个 ISP 联盟.每个联盟都可以看作能够为 ICP 提供独立接入服务的子网络.

文中主要变量及含义如下: $\alpha$  表示合作双方均投入建设,向其中一方付费的 ICP 数量占总体的比率; $\beta$  表示合作双方均投入建设,向其中另外一方付费的 ICP 数量占总体的比率; $\delta$  表示一方投入建设,一方不投入建设,向投入一方付费的 ICP 数量占总体的比率;链路状况系数定义为  $\theta$ ;初始连接状态下,对 ICP 的流量定价为  $P_0$ ;双方合作状态下,对 ICP 的流量定价为  $P(\theta)$ ;第  $x$  个内容提供商共计有

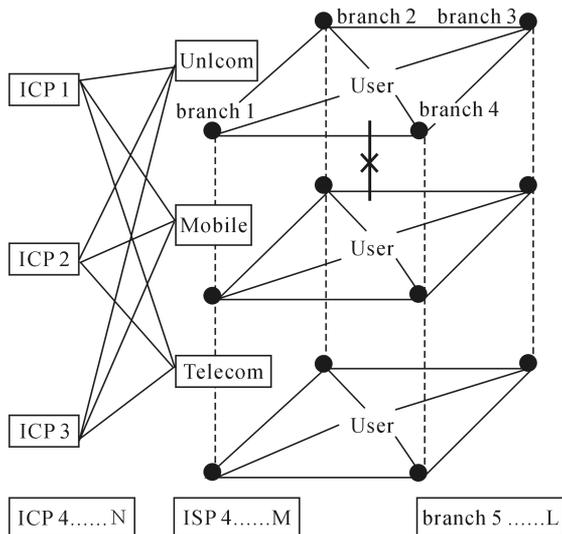


图1 不存在寡头间合作的网络通信市场

Fig.1 Telecom market without inter-oligach cooperation

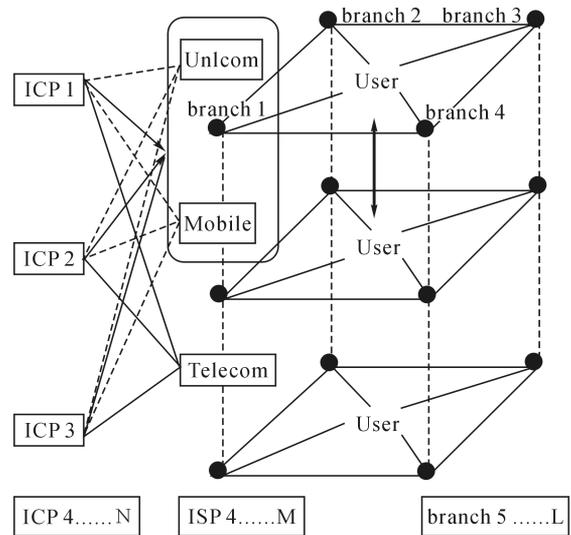


图2 存在寡头间合作的网络通信市场

Fig.2 Telecom market with inter-oligach cooperation

$N_x$  个应用,每个应用的平均占用带宽为  $\bar{B}$ ;初始定价下,ICP 需要付费的总带宽  $B_{CP}$ ;2 个 ISP 间链路带宽的最大承受能力  $L_{max}$ ;维护链路畅通所需要付出的单位维护成本  $C_{unit}$ ;维护链路畅通需要付出的总成本  $C_{total}$ .

### 1.1 ISP 支付函数

如上文所述,中国的三大网络服务供应商经营各种业务,尽管省级或地区级分公司独立运营,其财务营收依然以集团为单位,那么,以不同属性的利益集团为粒度,一家运营商的网络服务费收入由 ICP 企业用户和终端个人用户两部分组成.根据假设,个人用户规模固定,故  $R_{user}$  为常量.规定 ICP 的通信费也按照应用软件的使用流量来收取,通过绑定内容和流量来吸引锁定目标用户,即运营商根据不同的应用类型尝试差异化的定价结构, $R_{cp}$  为所有移动应用网络服务费的总和.

$$R_{total} = R_{user} + R_{cp} = R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} \theta) \quad (1)$$

运营商的成本包含诸多因素,例如基站的数量,用户的地理位置分布,电力消耗等.这里把成本分为固定成本  $C_F$  和可变成本  $C_V$  两部分, $C_F$  为运营商已经投入基础设施建设的沉没成本, $C_V$  随着 ISP 对链路管理维护投入力量的加大而增加.

$$C_{total} = C_F + C_V = C_0 + \theta \cdot L_{max} \cdot C_{unit}. \quad (2)$$

已知群体的收入和支出,可以得到其效用函数,计为  $U_{ISP}$ .

$$U_{ISP} = R_{total} - C_{total} = R_u + R_{cp} - C_0 - C_V \quad (3)$$

### 1.2 ICP 支付函数

网络内容运营商的收入由广告费、平台服务费、

金融业务等组成,除此之外,还与移动应用的商业模式相关,例如游戏、电商、合作佣金等.第一部分收入往往有固定合约,计为  $R_{cp0}$ ,后一部分收入取决于订阅内容的用户规模  $S_{user}$  与边际收益  $M_{profit}$ ,计为  $R_{cp1}$ .

$$R_{total} = R_{cp0} + R_{cp1} = R_{cp0} + S_{user} \cdot M_{profit}. \quad (4)$$

同理,ICP 的成本也来自很多方面,依然分为固定成本和可变成本两部分.  $C_F$  代表公司内部用于日常运营的开销,  $C_V$  代表付给 ISPs 的外部网络服务费.

$$C_{total} = C_F + C_V = C_F + \sum_{y=1}^m (N \cdot \bar{B} \cdot P_y). \quad (5)$$

已知 ICP 群体的收入和支出,可以得到其效用函数,计为  $U_{CP}$ .

$$U_{CP} = R_{total} - C_{total} = R_{cp0} + R_{cp1} - C_F - C_V. \quad (6)$$

### 1.3 支付矩阵

值得注意的是,没有必要假设博弈过程中的每个变量都对参与者构成共同知识,事实上,这些利益相关者也不需要知道自己的支付状况,此处的数值只用来定量比较动态博弈下的不同场景,并预测行为偏好.

把 ISP 联盟在不同策略下的效用函数放入支付矩阵,详细分析基于连接关系的合作行为如何为其带来益处.上文提到,ICP 通过 ISP 把网络内容传递给用户,这部分通信费用按移动应用的使用状况支付.另外,规定单位价格是实时链路状态的函数.

ISP 联盟中,竞争者的行动策略为“是否建立连接”,即是否选择合作.合作意味着博弈的双方维护并保证彼此间的链路畅通,不合作意味着联盟中的一方独立为彼此间链路负责.这里遵循的原则是,在

一段网络链路的两端,谁付出的建设成本更大,谁在共同利润中获得的收益更高.无论联盟中双方如何选择策略,假设在某个时间节点,生态系统中的其他行为主体都不参与联盟内的竞争,只观察市场的变化趋势,并且思考未来的行动.为了把内容传递给特定的终端用户,ICP 依然需要与其余的  $M-x$  个 ISP 建立连接,使用其提供的网络接入服务.

为了形象地描绘演化过程相位图,本文以种群中的 2 个 ISP 个体为例,模拟动态博弈过程.

**场景 1** 如果两者采取合作策略,ICP 通过合作双方中任何一个获得的用户量,便可以达到之前的 2 倍,因此 ICP 会倾向于和其中之一合作,向其付费并把两者看作一个联盟.联盟中的每个 ISP 可以对外宣布,能够保障链路质量并且作为联盟存在.毋庸置疑,网络服务费将会增加  $P(\theta)$ ,这部分共同利益在内部按照  $\alpha/(1-\alpha)$  的比例分配.相应地,合作双方也需要按照  $\beta/(1-\beta)$  的比例均摊费用,这里的  $\alpha$  和  $\beta$  呈正相关.

**场景 2** 如果 ISP1 选择合作并保障链路质量,但 ISP2 拒绝合作,主动合作的 ISP1 需要独立承担所有的维护成本,却需要与 ISP2 共同分配利润,因为即便 ISP2 不发起合作,也会被动地为主动发起方贡献用户量.在这种情况下,每个 ICP 有 2 种策略到达所有的用户.显然,它会倾向于选择 ISP1 而节省  $N\bar{B}P_0$  单位的费用.另外,假设  $P(\theta) < 2P_0$ ,若 ISP1 不采取措施增加单位服务费,ISP2 也不会改变其价格.ICP 群体中的每一个应该支付  $2N\bar{B}P_0$  给联盟作为一个整体.当 ISP1 采取主动合策略,对外

表 1 ISP 联盟的支付矩阵

Tab. 1 Payoff matrix of internet service provider(ISP) union

		ISP1	
		投入建设	不投入建设
ISP1	投入建设	$\left\{ \begin{array}{l} R_u + \alpha \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} P(\theta)) \\ - C_0 - \beta \theta L_{\max} C_{\text{unit}}, \\ R_u + (1 - \alpha) \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} P(\theta)) \\ - C_0 - (1 - \beta) \theta L_{\max} C_{\text{unit}} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} P_0) + \delta \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B} (P(\theta) - P_0)] \\ - C_0 - \theta L_{\max} C_{\text{unit}}, \\ R_u + (1 - \delta) \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B} (P(\theta) - P_0)] - C_0 \end{array} \right\}$
	不投入建设	$\left\{ \begin{array}{l} R_u + (1 - \delta) \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B} (P(\theta) - P_0)] - C_0, \\ R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} P_0) + \delta \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B} (P(\theta) - P)] \\ - C_0 - \theta L_{\max} C_{\text{unit}} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} P_0) - C_0, \\ R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} P_0) - C_0 \end{array} \right\}$

宣称其可以保证网络质量并提高收费标准, ICP 会理性地选择和 ISP1 合作, 一次性付款  $N\bar{B}P(\theta)$ . 为了使该问题有意义并保证商业合理性,  $N\bar{B}P(\theta)$  应该小于  $2N\bar{B}P_0$  并大于  $N\bar{B}P_0$ ,  $P(\theta)$  与链路状况  $\theta$  正相关. 显然, ICP 会倾向于选择第二种组合来使利润最大化.

**场景 3** 如果 ISP 之间不合作, 支付函数不改变.

## 2 演化稳定策略解决方案

定义  $x$  为 ISP 种群选择合作策略的数量占总体的比例, 这意味着联盟选择建立连接并保障链路质量, 相应地, 选择不合作策略的数量占 ISP 种群总数的比例为  $1-x$ . 如果以种群中的 2 个 ISP 为例, 模拟动态演化博弈过程, 则  $x$  表示 ISP1 选择合作策略的概率,  $1-x$  表示不合作的概率.

当 ISP1 选择不合作, 效用函数为

$$U_{1w} = y[R_u + (1-\delta) \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B}(P(\theta) - P_0)) - C_0] + (1-y)[R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B}P_0) - C_0] = R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B}P_0) - C_0 + y \sum_{x=1}^n \{N_x \bar{B}[(1-\delta)P(\theta) + (\delta-2)P_0]\}. \quad (8)$$

因此, 平均效用函数为

$$\bar{U}_1 = xU_{1r} + (1-x)U_{1w} = R_u + \sum_{x=1}^n (N_x \bar{B}P_0) - C_0 + y \sum_{x=1}^n \{N_x \bar{B}[(1-\delta)P(\theta) + (\delta-2)P_0]\} + x \left\{ y \left\{ \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}((\alpha-1)P(\theta) + P_0)] + (1-\beta)\theta L_{\max} C_{\text{unit}} \right\} + \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}\delta(P(\theta) - P_0)] - \theta L_{\max} C_{\text{unit}} \right\}. \quad (9)$$

ISP1 的复制动态方程可以从式(6)~(8)中推导得到. 群体选择进行建设投入策略的频率的相对调整速度和其支付超过平均支付的幅度成正比, 如果高于平均, 则增长率为正, 否则为负.

$$\frac{dx_1}{dt} = x(U_{1r} - \bar{U}_1) \\ \frac{dx}{dt} = x(1-x) \left\{ \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}\delta(P(\theta) - P_0)] - \theta L_{\max} C_{\text{unit}} - y \left\{ \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}((1-\alpha)P(\theta) - P_0)] - (1-\beta)\theta L_{\max} C_{\text{unit}} \right\} \right\}. \quad (10)$$

类似地, 得到 ISP2 的复制动态方程:

$$\frac{dy}{dx} = y(U_{2w} - \bar{U}_2) \\ \frac{dy}{dx} = y(1-y) \left\{ \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}\delta(P(\theta) - P_0)] - \theta L_{\max} C_{\text{unit}} - x \left\{ \sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}(\alpha P(\theta) - P_0)] - \beta\theta L_{\max} C_{\text{unit}} \right\} \right\}. \quad (11)$$

一般地, 把以上组合叫做复制动态系统.

为了便于定量分析, 定义一些中间变量如下:

$$x_D = \frac{\sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}\delta(P(\theta) - P_0)] - \theta L_{\max} C_{\text{unit}}}{\sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}(\alpha P(\theta) - P_0)] - \beta\theta L_{\max} C_{\text{unit}}} = \frac{L_{\max} \delta(P(\theta) - P_0) - \theta C_{\text{total}}}{L_{\max} (\alpha P(\theta) - P_0) - \beta\theta C_{\text{total}}}. \quad (12)$$

$$y_D = \frac{\sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}\delta(P(\theta) - P_0)] - \theta L_{\max} C_{\text{unit}}}{\sum_{x=1}^n [N_x \bar{B}((1-\alpha)P(\theta) - P_0)] - (1-\beta)\theta L_{\max} C_{\text{unit}}} = \frac{L_{\max} \delta(P(\theta) - P_0) - \theta C_{\text{total}}}{L_{\max} ((1-\alpha)P(\theta) - P_0) - (1-\beta)\theta C_{\text{total}}}. \quad (13)$$

定义  $u_{ij}$  为 ISP $j$  在场景  $i$  中的边际效益:

$$\left. \begin{aligned} u_{11} &= L_{\max} [\alpha P(\theta) - P_0] - \beta\theta C_{\text{total}}, \\ u_{12} &= L_{\max} [(1-\alpha)P(\theta) - P_0] - (1-\beta)\theta C_{\text{total}}, \\ u_{21} &= L_{\max} \delta(P(\theta) - P_0) - \theta C_{\text{total}}, \\ u_{22} &= L_{\max} [(1-\delta)(P(\theta) - P_0) - P_0]. \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

当 ISP1 和 ISP2 彼此间连接通畅, ICP 会将其当作一个整体. 一般地, 一个联盟整体的效用为  $L_{\max} P(\theta) - \theta C_{\text{total}}$ . 如上文假设,  $N\bar{B}P(\theta)$  应该介于  $N\bar{B}P_0$  和  $2N\bar{B}P_0$  之间, 该条件可表示为  $P(\theta) \in [P_0, 2P_0]$ .

可以观察到, 在前 2 种场景下, 联盟的边际收益相同, 可以表示为

$$u_{11} + u_{12} = u_{21} + u_{22} = L_{\max} [P(\theta) - 2P_0] - \beta\theta C_{\text{total}}. \quad (15)$$

**表 2** ISP 不合作与合作下的 ICP 支付情况

Tab. 2 Comparison of ICP's payment when ISPs choose to cooperate or not

ICP	ISP					
	ISP1	ISP2	ISP3	ISP4	...	ISPM
ICP 的支付 1	$N\bar{B}P(\theta)$	$N\bar{B}P_0$	$N\bar{B}P_0$	$N\bar{B}P_0$	...	$N\bar{B}P_0$
ICP 的支付 2	$N\bar{B}P(\theta)$	0	$N\bar{B}P(\theta)$	$N\bar{B}P(\theta)$	...	$N\bar{B}P(\theta)$

毫无疑问, 该效用函数(即联盟的边际效益)的数值必须不小于 0. 因此, 为了使演化博弈过程有意

义,假设  $u_{11}$  和  $u_{12}$  不能同时为负,意味着两者联盟中至少有一者利润为负.

**定理 1** 演化博弈均衡是一个策略组合,该组合对应动态复制方程中的稳定点,本系统的演化博弈稳态为  $(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)$ . 当  $u_{11} < u_{12} < 0, u_{12} < u_{21}$  或者  $0 < u_{21} < u_{11}, u_{21} < u_{12}$  时,  $(x_D, y_D)$  也是一个稳定状态. 显然地,对任意初始点  $(x(0), y(0)) \in [0, 1] \times [0, 1]$ , 有  $(x(f), y(f)) \in [0, 1] \times [0, 1]$ , 因此动态复制系统中的解曲线上任意一点  $(x, y)$  均对应着演化博弈的一个混合策略.

证明:根据推导出的复制动态方程,令  $dx/dt = 0, dy/dt = 0$ , 明显地,有 4 对坐标满足条件,分别为  $(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)$ . 如上文中定义的中间变量,  $x_D = u_{21}/u_{11}, y_D = u_{21}/u_{12}$ , 当  $u_{11} < u_{21} < 0, u_{12} < u_{21}$  或者  $0 < u_{21} < u_{11}, u_{21} < u_{12}$  时,上述条件等价于  $0 < x_D < 1, 0 < y_D < 1$ , 进而可以推导出  $dx/dt = 0, dy/dt = 0$ , 因此  $(x_D, y_D)$  也是一个合理的稳定状态.

复制动态系统的雅克比矩阵如下:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= (1-2x)\{B_{cp}\delta(P(\theta)-P_0)-\theta C_{total}-y\{B_{cp}[(1-\alpha)P(\theta)-P_0]-(1-\beta)\theta C_{total}\}\}, \\ a_{12} &= -x(1-x)\{B_{cp}[(1-\alpha)P(\theta)-P_0]-(1-\beta)\theta C_{total}\}, \\ a_{21} &= -y(1-y)\{B_{cp}[\alpha P(\theta)-P_0]-\beta\theta C_{total}\}, \\ a_{22} &= (1-2y)\{B_{cp}\delta(P(\theta)-P_0)-\theta C_{total}-x\{B_{cp}[\alpha P(\theta)-P_0]-\beta\theta C_{total}\}\}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

根据 Friedman 的理论<sup>[3]</sup>,通过动态复制方程得到的稳定点有可能不是系统的演化稳定策略(ESS),除非以下条件被满足:

- 1)  $a_{11} + a_{22} < 0$  (迹条件,记为  $\text{tr}J$ )
- 2)  $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} > 0$  (值条件,记为  $\det J$ )

为  $\det J$ )

动态复制方程的均衡点是稳定的,称为演化稳定策略. 根据前文定义的网络模型,雅克比矩阵的值和迹如下:

$$\det J = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = (1-2x)\{B_{cp}\delta(P(\theta)-P_0)-\theta C_{total}-y\{B_{cp}[(1-\alpha)P(\theta)-P_0]-(1-\beta)\theta C_{total}\}\} (1-2y)\{B_{cp}\delta(P(\theta)-P_0)-\theta C_{total}-x\{B_{cp}[\alpha P(\theta)-P_0]-\beta\theta C_{total}\}\} -$$

$$x(1-x)\{B_{cp}[(1-\alpha)P(\theta)-P_0]-(1-\beta)\theta C_{total}\}y(1-y)\{B_{cp}[\alpha P(\theta)-P_0]-\beta\theta C_{total}\}. \quad (18)$$

$$\text{tr}J = a_{11} + a_{22} = (1-2x)\{B_{cp}\delta(P(\theta)-P_0)-\theta C_{total}-y\{B_{cp}[(1-\alpha)P(\theta)-P_0]-(1-\beta)\theta C_{total}\}\} + (1-2y)\{B_{cp}\delta(P(\theta)-P_0)-\theta C_{total}-x\{B_{cp}[\alpha P(\theta)-P_0]-\beta\theta C_{total}\}\}. \quad (19)$$

**定理 2** 根据前面介绍的方法,可以把稳定点的坐标值代入  $\det J$  和  $\text{tr}J$ , 计算其正负,进一步判断哪些点是演化稳定状态.

当  $u_{11}$  为正,  $u_{12}$  为负时,

- 1) 如  $0 < u_{21} < u_{11}, 0 < x_D < 1, y_D < 0$ , ESS 为  $(1,0)$ ;
- 2) 如  $u_{21} > u_{11}, x_D > 1, y_D < 0$ , ESS 为  $(1,1)$ ;
- 3) 如  $u_{12} < u_{21} < 0, x_D < 0, 0 < y_D < 1$ , ESS 为  $(0,0)$ ;
- 4) 如  $u_{21} < u_{12}, x_D < 0, y_D > 1$ , ESS 为  $(0,0)$ .

当  $u_{11}$  为负,  $u_{12}$  为正时,

- 1) 如  $0 < u_{21} < u_{12}, x_D < 0, 0 < y_D < 1$ , ESS 为  $(0,1)$ ;
- 2) 如  $u_{21} > u_{12}, x_D < 0, y_D > 1$ , ESS 为  $(1,1)$ ;
- 3) 如  $u_{11} < u_{21} < 0, 0 < x_D < 1, y_D < 0$ , ESS 为  $(0,0)$ ;
- 4) 如  $u_{21} < u_{11}, x_D > 1, y_D < 0$ , ESS 为  $(0,0)$

当  $u_{11}$  和  $u_{12}$  都为负时,

- 1) 如  $u_{21} > 0, x_D < 0, y_D < 0$ , ESS 为  $(1,1)$ ;
- 2) 如  $u_{11} < u_{21} < 0, u_{12} < u_{21}, 0 < x_D < 1, 0 < y_D < 1$ , ESS 为  $(0,0), (1,1)$ ;
- 3) 如  $u_{11} < u_{21} < u_{12}, 0 < x_D < 1, y_D > 1$ , ESS 为  $(0,0)$ ;
- 4) 如  $u_{12} < u_{21} < u_{11}, x_D > 1, 0 < y_D < 1$ , ESS 为  $(0,0)$ ;
- 5) 如  $u_{21} < u_{11}, u_{21} < u_{12}, x_D > 1, y_D > 1$ , ESS 为  $(0,0)$ .

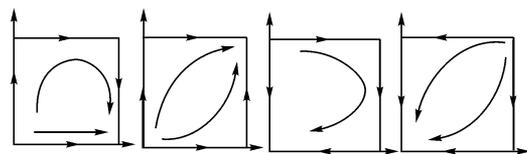


图 3 动态演化相位图 I

Fig. 3 Diagram of phase dynamic evolution I

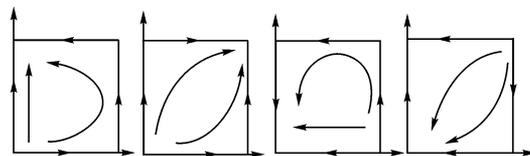


图 4 动态演化相位图 II

Fig. 4 Diagram of phase dynamic evolution II

表3 ESS 演化示例 1

Tab. 3 Example of ESS evolution 1

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	+	+	不稳定点
(0, 1)	+	-	鞍点
(1, 0)	-	+	稳定点
(1, 1)		-	鞍点
$(x_D, y_D)$	0	-	鞍点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	+	+	不稳定点
(0, 1)	+	-	鞍点
(1, 0)	-	-	鞍点
(1, 1)	-	+	稳定点
$(x_D, y_D)$	0	+	不稳定点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	+	+	稳定点
(0, 1)	+	-	不稳定点
(1, 0)	-	+	鞍点
(1, 1)		-	鞍点
$(x_D, y_D)$	0	-	鞍点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	+	+	稳定点
(0, 1)	+	-	鞍点
(1, 0)	-	+	鞍点
(1, 1)		-	不稳定点
$(x_D, y_D)$	0	-	不稳定点

表4 ESS 演化示例 2

Tab. 4 Example of ESS evolution 2

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	+	+	不稳定点
(0, 1)	-	+	稳定点
(1, 0)	+	-	鞍点
(1, 1)		-	鞍点
$(x_D, y_D)$	0	-	鞍点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	+	+	不稳定点
(0, 1)	-	-	鞍点
(1, 0)	+	-	鞍点
(1, 1)	-	+	稳定点
$(x_D, y_D)$	0	+	不稳定点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	-	+	稳定点
(0, 1)	-	-	鞍点
(1, 0)	+	+	不稳定点
(1, 1)		-	鞍点
$(x_D, y_D)$	0	-	鞍点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	-	+	稳定点
(0, 1)	-	-	鞍点
(1, 0)	+	-	鞍点
(1, 1)	+	+	不稳定点
$(x_D, y_D)$	0	+	不稳定点

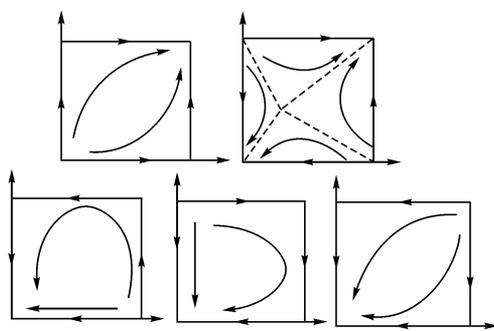


图5 动态演化相位图 3

Fig. 5 Diagram of phase dynamic evolution phase III

### 3 演化博弈过程分析

根据上文稳定状态的变化,可以得出不同场景下 ISP 个体之间如何演化博弈进而影响群体行为。

#### 3.1 联盟中的双方有盈有亏

如果一方主动合作一方搭便车,主动合作方亏

损,那么,由于总收益固定,和主动合作方相比,搭便车的一方一定更占优势,最终(0,0)是 ESS 点。

如果一方主动合作一方搭便车,主动合作方的盈利超过共同合作的最大盈利,主动方一定选择合作,由于总收益固定,为了不亏损更多,另一方倾向于选择合作,最终,(1,1)是 ESS 点。

如果一方主动合作一方搭便车,主动合作方盈利,但少于共同合作的最大盈利,主动合作方倾向于协作,但另一方搭便车亏损更少,最终(1,0)/(0,1)是 ESS 点。

#### 3.2 联盟中的双方均亏损

如果一方主动合作一方搭便车,主动合作方盈利,由于总收益固定,另一方选择搭便车亏损更多,最终,(1,1)是 ESS 点。

如果一方主动合作一方搭便车,主动合作方比双方合作时亏损更多,合作没有意义,最终(0,0)是 ESS。

如果一方主动合作一方搭便车,主动合作方确

表 5 ESS 演化示例 3

Tab. 5 Example of ESS evolution 3

坐标点	trJ	detJ	稳定性
坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	+	+	不稳定点
(0, 1)	+	-	鞍点
(1, 0)	+	-	鞍点
(1, 1)	-	+	稳定点
( $x_D, y_D$ )	0	-	鞍点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	-	+	稳定点
(0, 1)	+	+	不稳定点
(1, 0)	+	+	不稳定点
(1, 1)	-	+	稳定点
( $x_D, y_D$ )	0	-	鞍点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	-	+	稳定点
(0, 1)	+	-	鞍点
(1, 0)	+	+	不稳定点
(1, 1)	-	-	鞍点
( $x_D, y_D$ )	0	+	不稳定点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	-	+	稳定点
(0, 1)	+	+	不稳定点
(1, 0)	+	-	鞍点
(1, 1)	+	-	鞍点
( $x_D, y_D$ )	0	+	不稳定点

---

坐标点	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	-	+	稳定点
(0, 1)	+	-	鞍点
(1, 0)	+	-	鞍点
(1, 1)	+	+	不稳定点
( $x_D, y_D$ )	0	-	鞍点

定可以亏损更少,那么由于总收益固定,另一方搭便车确定亏损更多,双方有可能达成协作也有可能选择不合作。

### 3.3 联盟中的双方稳定状况不确定

如图 6 所示,演化博弈 OADC(面积  $S_1$ )可以收敛到点 O,最终选择不合作来达到稳定状态. 演化博弈 ADCB(面积  $S_2$ )可以收敛到点 B,最终选择合作来达到稳态. 尽管合作是帕累托最优结果,但 2 个 ISP 选择相同的策略都能达到演化稳定状态. 本节分析结果的概率及影响因素。

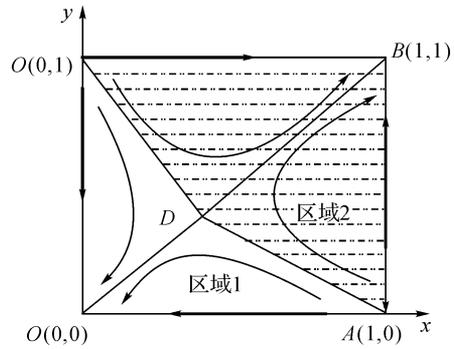


图 6 动态演化相位图 4

Fig. 6 Diagram of phase dynamic evolution phase IV

$$S_1 = S_{OADC} = S_{OAD} + S_{OCD} = \frac{1}{2} (x_D + y_D) = \frac{1}{2} \left( \frac{B_{cp} \delta (P(\theta) - P_0) - \theta C_{total}}{B_{cp} (\alpha P(\theta) - P_0) - \beta \theta C_{total}} + \frac{B_{cp} \delta (P(\theta) - P_0) - \theta C_{total}}{B_{cp} ((1-\alpha)P(\theta) - P_0) - (1-\beta)\theta C_{total}} \right). \quad (20)$$

定义  $T$  为投入产出比:

$$T = \frac{C_{total}}{B_{cp} P_0} = \frac{L_{max} C_{unit}}{\sum_{x=1}^n N_x \bar{B} P_0} \quad (21)$$

如上文假设,  $P(\theta) = -P_0 e^\theta + 2P_0$ , 当动态复制系统达到稳态时,可以得到趋势的概率:

$$S_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T}{\alpha(2-e^{-\theta}) + 1 - \beta \theta T} + \frac{\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T}{\alpha(2-e^{-\theta}) + e^{-\theta} - 1 + (1-\beta)\theta T} \right). \quad (22)$$

**定理 3** 投入产出比  $T$  小于固定值  $R$  时的情况。

当一方主动合作、一方搭便车,主动一方边际收益小于 0 时,双方合作下的一方获得收益越多,另一方获得收益越少,ESS 趋向(1,1)的概率越大. 即如果成本控制在一定比例之内,合作的双方得知,选择协作自己的收益有可能大于 0,为了增加自身收益,都会更加倾向于投入建设,保障链路质量。

当一方主动合作、一方搭便车,主动一方边际收益大于 0 时,双方合作下的一方获得收益越多,另一方获得收益越少,ESS 趋向(0,0)的概率越大. 即如果成本控制在一定比例之内,为了维持自身的收益不流向竞争对手,双方都会更倾向于不投入建设,保障链路质量。

证明:

$$S_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{-(2-e^{-\theta}) [\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T]}{[\alpha(2-e^{-\theta}) + 1 - \beta \theta T]^2} + \frac{(2-e^{-\theta}) [\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T]}{[\alpha(2-e^{-\theta}) + e^{-\theta} - 1 + (1-\beta)\theta T]^2} \right).$$

$$\theta > 0, 0 < -e^{-\theta} < 1, u_{21} = [\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T] B_{cp}.$$

令

$$\Delta = (-\beta\theta T + 1) - (e^{-\theta} - \beta\theta T + \theta T - 1) = 2 - e^{-\theta} - \theta T > 0$$

得到

$$T < \frac{2 - e^{-\theta}}{\theta}.$$

令

$$y = \frac{2 - e^{-\theta}}{\theta}, y' = \frac{e^{-\theta}\theta - (2 - \theta)}{\theta^2},$$

存在  $\theta_0$  使得  $\theta > \theta_0, y' > 0; \theta < \theta_0, y' < 0$ , 因此  $y$  在  $\theta_0$  处取极小值.

令  $T_0 = y|\theta_0$ , 并且当  $T < T_0, \Delta > 0$  时: 当  $u_{21} < 0, \partial S_1 / \partial \alpha < 0, S_1$  随着  $\alpha$  增加而减小; 当  $u_{21} > 0, \partial S_1 / \partial \alpha > 0, S_1$  随着  $\alpha$  增加而增加.

**定理 4** 投入产出比  $T$  小于固定值  $R$  时:

当一方主动合作、一方搭便车, 主动一方边际收益小于 0 时, 双方合作下的一方付出成本越多, 另一方付出成本越少, 双方趋向 (0, 0) 的概率越大.

即如果成本控制在一定比例之内, 即便付出成本也不能得到收益, 双方都会更倾向于不投入建设.

当一方主动合作、一方搭便车, 主动一方边际收益大于 0 时, 双方合作下的一方付出成本越多, 另一方付出成本越少, 双方趋向 (1, 1) 的概率越大.

即如果成本控制在一定比例之内, 合作双方得知, 自己付出成本越多, 得到收益可能越多, 为增加自身收益, 都会更加倾向于投入建设, 保障链路质量.

证明:

$$S_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T}{\alpha(2-e^{-\theta}) + 1 - \beta\theta T} + \frac{\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T}{\alpha(2-e^{-\theta}) + e^{-\theta} - 1 + (1-\beta)\theta T} \right],$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial \beta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\theta T [\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T]}{[\alpha(2-e^{-\theta}) + 1 - \beta\theta T]^2} + \frac{\theta T [\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T]}{[\alpha(2-e^{-\theta}) + e^{-\theta} - 1 + (1-\beta)\theta T]^2} \right\}.$$

当  $u_{21} < 0, \partial S_1 / \partial \beta > 0, S_1$  随着  $\beta$  增加而增加; 当  $u_{21} > 0, \partial S_1 / \partial \beta < 0, S_1$  随着  $\beta$  增加而减小.

**定理 5** 投入产出比  $T$  小于固定值  $R$  时:

当一方主动合作、一方搭便车, 主动一方获益越多, 搭便车一方获益越少, 双方趋向 (1, 1) 的概率越大. 即如果成本控制在一定比例之内, 主动合作的一方得知, 如果合作自己的收益有可能大于 0, 为了增加自身收益, 都会更加倾向于投入建设, 保障链路质量.

当一方主动合作、一方搭便车, 主动一方获益越多, 搭便车一方获益越少, 双方趋向 (1, 1) 的概率越大. 即如果成本控制在一定比例之内, 主动合作的一方得知, 如果合作自己的收益有可能大于 0, 为了增加自身收益, 都会更加倾向于投入建设, 保障链路质量.

证明:

$$S_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T}{\alpha(2-e^{-\theta}) + 1 - \beta\theta T} + \frac{\delta(1-e^{-\theta}) - \theta T}{\alpha(2-e^{-\theta}) + e^{-\theta} - 1 + (1-\beta)\theta T} \right],$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial \delta} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - e^{-\theta}}{\alpha(2-e^{-\theta}) + 1 - \beta\theta T} + \frac{1 - e^{-\theta}}{\alpha(2-e^{-\theta}) + e^{-\theta} - 1 + (1-\beta)\theta T} \right].$$

其中,  $\theta > 0, 1 < 1 - e^{-\theta} < 2$ . 令

$$\Delta = [\alpha(2 - e^{-\theta}) - \beta\theta T + 1] - [\alpha(2 - e^{-\theta}) + e^{-\theta} - \beta\theta T + \theta T - 1] = 2 - e^{-\theta} - \theta T > 0, \text{得到}$$

$$T < \frac{2 - e^{-\theta}}{\theta}, \text{let } y = \frac{2 - e^{-\theta}}{\theta}, y' = \frac{e^{-\theta}\theta - (2 - \theta)}{\theta^2},$$

存在  $\theta_0$  使得  $\theta > \theta_0, y' > 0; \theta < \theta_0, y' < 0$ ,  $y$  在  $\theta_0$  取极小值. 令  $T_0 = y|\theta_0$ , 有  $T < T_0, \Delta > 0, \partial S_1 / \partial \alpha < 0, S_1$  随着  $\alpha$  的增加而减小.

## 4 数值分析

从上述结论可以得到 (合作, 合作) 和 (不合作, 不合作) 这 2 个策略组合均是稳定的. 为了研究演化结果向哪个方向发展, 影响因素如何, 运用 Matlab 对系统进行数值模拟, 进一步分析不同合作场景下的收益分配机制、链路状况系数、投入产出比对于网络服务提供商和内容提供商合作的影响. 如图 7 所示, 博弈双方演化结果的趋势由区域 1、区域 2 的面积大小决定, 有 5 个参数影响  $S_1/S_2$  的大小, 分别是双方主动合作场景下的收益分, 配系数  $\alpha$  和成本分担系数  $\beta$ , 一方主动合作场景下的收益分配系数  $\delta$ , 链路状况系数  $\theta$ , 投入产出比  $T$ . 其中,

$$T = \frac{L_{\max} C_{\text{unit}}}{\sum_{x=1}^n (N_x \bar{B} P_0)}$$

根据现实情况和模型的假设条件: 设合作场景下网络内容提供商的应用数量取值  $N \in [1.0 \times 10^6, 2.0 \times 10^6]$ , 每个应用的平均占用带宽  $\bar{B} \in [2.0 \times 10^7, 3.0 \times 10^7]$ , 初始连接状态下, ICP 的每兆流量定价

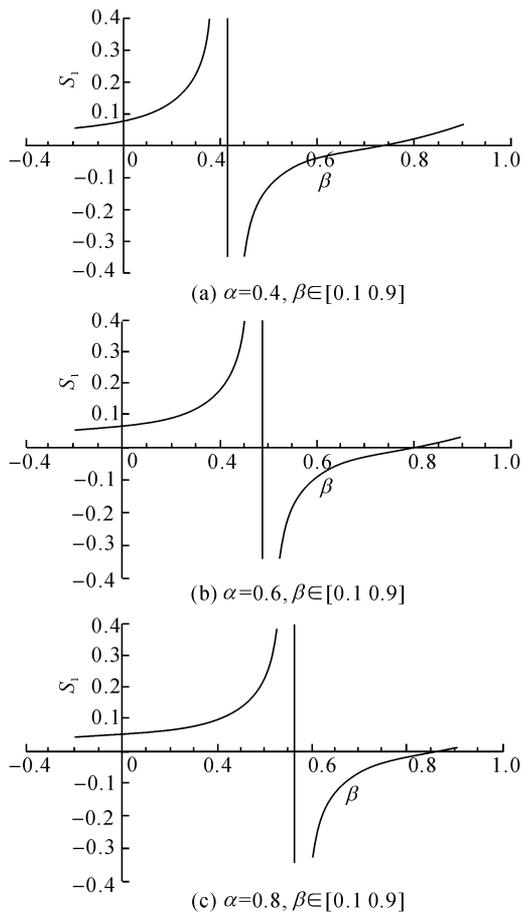


图 7 不同成本分配比例对合作概率的影响

Fig. 7 Influence of cost allocation on cooperation under different  $\alpha$  values

$P_0 \in [1, 2]$ 元, 2 个 ISP 间维护链路畅通所需要付出的总成本为  $[1.0 \times 10^7, 2.0 \times 10^7]$ 元. 同时, 当双方均投入建设时, 向其中一方付费的 ICP 数量占总体的比率  $\alpha \in [0.1, 0.9]$ , 一方维护建设的投入成本占总成本的比率  $\beta \in [0.1, 0.9]$ , 根据前提假设, 投入成本越大, 其分得利益也就越大. 假设一方投入建设而另一方不投入时, 向投入方付费的 CP 数量占总体比率  $\delta \in [0.1, 0.9]$ , 而链路状况系数  $\theta \in [0.1, 0.9]$ .

在对各因素进行具体的分析时, 需要给定相关参数的数值: ICP 提供的应用个数  $N = 1.5 \times 10^6$ , 每个应用的平均带宽  $\bar{B} = 2.5 \times 10^7$  M, 对于 ICP 的流量定价  $P_0 = 1.5$  元, 2 个 ISP 间维护链路畅通所需要付出的总成本为  $1.5 \times 10^7$  元, 所以投入产出比  $T = 0.27$ . 同时, 双方均投入建设时, 向其中一方付费的 ICP 数量占总体的比率  $\alpha = 0.4$ , 投入成本所占比重  $\beta = 0.4$ , 一方投入建设而另一方不投入时, 向

投入方付费的 CP 数量占总体比率  $\delta = 0.6$ , 链路状况系数  $\theta = 0.5$ .

#### 4.1 双方合作状态下的成本与收益

本节讨论双方合作状态下收益分配和成本分摊比例对合作的影响. 设收益分配系数  $\alpha$  在  $[0.1, 0.9]$  变化, 成本分担系数  $\beta$  在  $[0.1, 0.9]$  中变化, 可以得到成本收益对合作概率的影响.

当  $\alpha$  分别取 0.4, 0.6, 0.8 时,  $\beta$  在  $[0.1, 0.9]$  变化, 得到面积  $S_1$  与  $\beta$  的关系如图 7 所示. 在有效区域内,  $u_{21} < 0$ ,  $S_1$  随着  $\beta$  的增加而增加, 说明主动合作方付出成本越多, 双方趋向  $(0, 0)$  的概率越大, 与定理 4 一致.

当  $\beta$  分别取 0.4, 0.6, 0.8 时,  $\alpha$  在  $[0.1, 0.9]$  变化, 得到面积  $S_1$  与  $\alpha$  的关系如图 8 所示. 在有效区域内,  $u_{21} < 0$ ,  $S_1$  随着  $\alpha$  的增加而减小, 说明主动合作方付出成本越多, 双方趋向  $(1, 1)$  的概率越大, 与定理 3 一致.

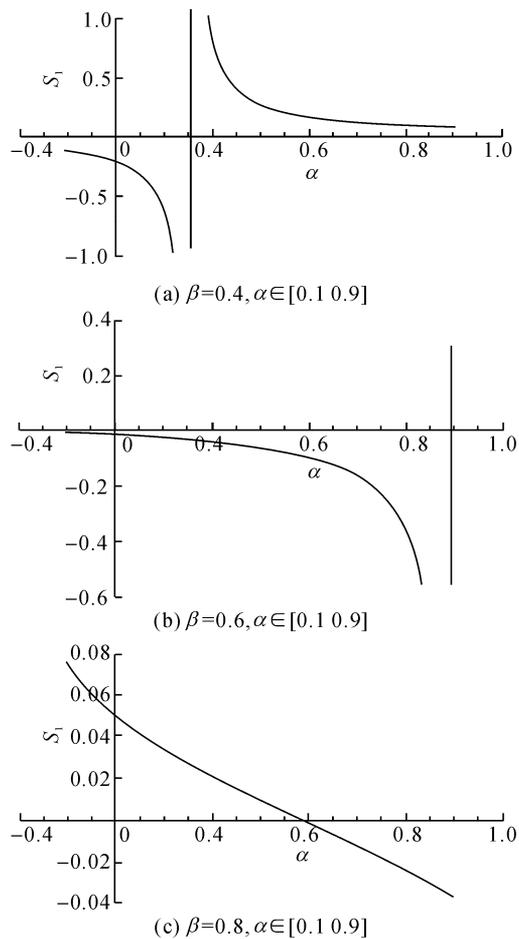


图 8 不同收益分配比例对合作概率的影响

Fig. 8 Influence of profit allocation on cooperation under different  $\beta$  values

#### 4.2 单方主动合作下的收益

本节讨论一方合作而另一方不合作状态下,收益分配比例对合作的影响.假设双方合作时,收益分配和成本分摊比率均为0.4,当一方不参与合作时,成本由主动合作方支付,当收益分配系数 $\delta$ 在区间 $[0.1, 0.9]$ 变化时,得到双方合作的概率,如图9所示. $S_1$ 随 $\delta$ 的增加而增加,主动合作方获益越多,搭便车一方获益越少,双方趋向(1,1)的概率越大.

#### 4.3 链路状况系数对合作的影响

假设双方合作时,收益分配比率 $\alpha$ 和成本分摊比率 $\beta$ 均为0.5,当一方不参与合作时,成本由主动合作方支付,收益分配系数 $\delta=0.9$ ,当链路状况系数 $\theta$ 在 $[0.1, 0.9]$ 变化时,得到双方合作的概率,如图10所示.在2种合作场景下,链路状况越好,双方趋向(1,1)的概率越大.

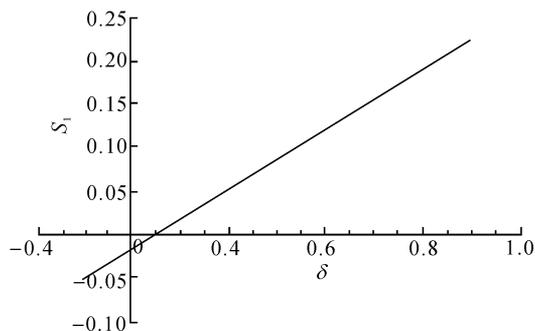


图9 收益分配对合作概率的影响

Fig. 9 Influence of profit allocation on cooperation

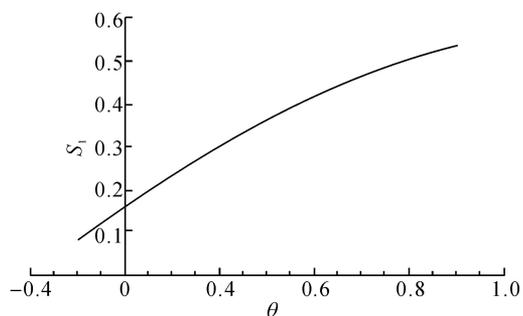


图10 链路状况对合作概率的影响

Fig. 10 Influence of link state on cooperation

## 5 结论

(1)当联盟中一方的经济效用由于其复杂的心理作用和利益偏好而产生盈亏时,ESS的概率发生明显波动.网络服务提供商群体在某个时刻达到ESS,将呈现偏好趋同的小团体局部稳定的分布状态.

(2)当投入产出比在一定范围内,ESS的概率会随主动合作一方边际收益的属性和成本收入的分配比率而发生线性变化.因此,成本控制 and 利润分配机制是形成合作的关键,宏观调控将改变运营商的选择.

(3)通过采取激励或惩罚措施,政府及监管机构可以推动运营商之间的合作,不仅有利于公共资源的有效合理配置,更重要是,督促和引导通信市场的各个主体把资金和资源投入到科技创新与内容服务中.

## 参考文献(References):

- [1] FRIEDMAN D. On economic applications of evolutionary game theory [J]. *Journal of Evolutionary Economics*, 1998, 8(1): 15 - 43.
- [2] FRIEDMAN D. Towards evolutionary game models of financial markets [J]. *Quantitative Finance*, 2001, 1(1): 177 - 185.
- [3] HOFBAUER J, SIGMUND K. Evolutionary game dynamics [J]. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 2003, 40(4): 479 - 519.
- [4] FARATIN P, CLARK D, BAUER S, et al. Complexity of Internet interconnections: technology, incentives and implications for policy [J/OL]. *The 35th Research Conference on Communication, Information and Internet Policy (TPRC)*, 2007. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2115242](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2115242).
- [5] MA R, CHIU D, LUI J, et al. On cooperative settlement between content, transit, and eyeball internet service providers [J]. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 2011, 19(3): 802 - 815.
- [6] BAILEY J P. The economics of Internet interconnection agreements [J]. *Internet Economics*, 1997, 35: 155-168.
- [7] HUSTON G. *ISP survival guide: strategies for running a competitive ISP* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [8] SHAKKOTTAI S, SRIKANT R. Economics of network pricing with multiple ISPs [J]. *IEEE/ACM Transactions On Networking*, 2006, 14(6): 1233 - 1245.
- [9] MA R T B, LEE S, LUI J, et al. Incentive and service differentiation in P2P networks: a game theoretic approach [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2006, 14(5): 978 - 991.
- [10] SU H, XU K, SHEN M, et al. Research on mobile data subsidy model and case study [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(4): 861 - 872.

(下转第1232页)