通过网络切片实现5G虚拟运营商的经济可行性

Erwin J. Sacoto-Cabrera[a, b], Luis Guijarro[a, *], Jose R. Vidal[a], Vicent Pla[a]

[a]巴伦西亚理工大学，西班牙[b]*GIHP4C*，昆卡校区萨莱西亚纳理工大学，厄瓜多尔

arXiv:2601.15103v1 [cs.NI] 21 Jan 2026

摘要

本文分析了在共用网络基础设施上由多个运营商提供服务的情形，这得益于5G网络切片技术。本文提出了网络运营商（拥有网络）和虚拟运营商（不拥有网络）可采用的两种商业模式。在一种名为策略性的商业模式中，网络运营商向其用户群提供服务，而虚拟运营商向其用户群提供服务，并按用户向网络运营商支付费用。在另一种名为垄断的商业模式中，网络运营商向两个用户群体提供服务。

本文通过一个同时涵盖系统和经济特征的模型分析这两种方案。就系统特征而言，网络切片采用区分处理器共享队列进行建模。就经济特征而言，激励通过用户效用和运营商收入进行建模；并采用博弈论对用户订阅决策与运营商定价决策之间的策略互动进行建模。研究表明，在这两种商业模式下，都可以为网络运营商提供适当的经济激励，使其同意为虚拟运营商的用户群提供服务（垄断模型），并允许虚拟运营商通过网络运营商的基础设施提供服务（策略模型）。从用户角度看，策略模型的订阅率高于垄断模型。

关键词：5G、网络切片、虚拟运营商、歧视性处理器共享、博弈论。

1. 引言

当前的移动网络架构采用相对单一的接入与传输框架，以承载各种服务，例如智能手机的移动流量、OTT内容、功能手机、数据卡以及嵌入式机器对机器设备所产生的流量。预计这种架构不够灵活、可扩展性不足，难以支持即将到来的5G网络；5G网络需要满足极为多样的用例，有时还对性能、可扩展性和可用性提出极高要求。此外，新网络服务的引入应当更加高效 [1]。在上述情形下，网络切片作为一种有效提升网络资源管理灵活性的方法，正日益受到重视。网络切片是由一组网络资源构成的，这些资源经过选择，以满足该切片所提供服务的需求。

在网络切片将在未来5G中实现的各种用例中，本文关注的是以下情形：网络切片将为新进入运营商提供相应机制，使其能够在现有运营商拥有的网络基础设施上运营虚拟网络。

本文分析了借助 5G 网络切片，使多个运营商能够通过共用网络基础设施提供服务的情况。更具体地说，其中一个运营商拥有该基础设施（下文称为网络运营商），而另一个则不拥有（下文称为虚拟运营商）。我们的

*通讯作者电子邮箱：ersacab@doctor.upv.es (Erwin J. Sacoto-Cabrera), lguijar@dcom.upv.es (LuisGuijarro), jrvidal@upv.es (Jose R. Vidal), vpla@upv.es (Vicent Pla)

假设是，可以向网络运营商提供适当的经济激励，使其同意虚拟运营商通过网络运营商的基础设施提供服务。

为检验上述假设，本文为网络运营商和虚拟运营商提出了两种商业模式，并通过经济模型对其进行分析。该模型刻画了用户效用、运营商收入，以及用户订阅决策与运营商定价决策之间的策略互动。

本文的主要贡献如下。

1. 通过区分处理器共享（DPS）队列，对两个运营商共用同一基础设施提供服务的情形进行建模；为运营商提出两种商业模式，并运用博弈论分析用户与各运营商之间的策略互动。2. 分析了每种商业模式下的均衡结果如何随最相关参数变化，这些参数包括用户对时延的敏感度、用户群服务优先级，以及虚拟运营商支付的每用户费用。3. 确定了商业模式可行的条件。

本文结构如下。下文将概述相关研究。第2节介绍所提出的商业模式，并说明将通过博弈论进行分析的经济模型。第3节开展基于博弈论的分析，得出策略互动的均衡结果。第 4 节讨论不同参数对均衡结果的影响。第5节总结主要结论，并指出一些未来的研究方向。

1.1. 相关研究

许多研究探讨了在一般设施上提供服务的经济可行性，其中该设施被建模为一个排队系统。这一研究目标和一般模型构成了我们工作的研究方法框架。在此不求面面俱到，仅列举三项重要研究。Naor [2] 的研究是最早分析排队系统中顾客策略行为的研究之一。Allon 和 Federgruen [3] 全面分析了在不同服务器容量成本和顾客需求建模假设下，服务器之间的价格与服务竞争。Hassin [4, 5] 的两本著作则对排队系统中用户和服务器理性行为的建模与分析进行了全面、最新的综述。

更具体地说，有些研究考察的服务是网络服务，因而基础设施就是网络。两项与我们工作密切相关的研究是 [6] 和 [7], ，它们与我们的工作一样，分析了如何通过共享基础设施向不同用户类别提供服务。在 [6], 中，网络为语音用户和数据用户提供服务差异化，并被建模为优先级队列。同样，在 [7], 中，网络被建模为 DPS 队列，这种队列为分析通过互联网提供区分服务（DiffServ）提供了所需的灵活性。然而，这两项研究的分析与我们的分析之间存在一个重要差异：在 [6] 和 [7], 中，只有一个运营商拥有并运营网络，因此无需考虑基础设施共享；而在本文中，则明确建模了两个运营商，其中一个拥有基础设施，因此可以研究基础设施共享问题。

作者此前分析了基础设施共享情景的经济可行性。在 [8],中，背景是认知无线电网络：主运营商拥有基础设施，而次级运营商可以机会性地接入该基础设施。通过优先级队列对各运营商用户所拥有的不同接入优先级进行建模。在 [9], 中，背景是提供人类型通信（HTC）和机器型通信（MTC）服务，其中HTC运营商拥有基础设施。基础设施同样通过优先级队列进行建模。最后，在 [10], 中，背景是共享频谱以提供移动通信服务，并对不同的频谱共享协议进行了比较评估。本研究超越了此前的三种情景，着眼于5G背景。5G网络中预想的用例和商业模式所需的灵活性，通过一种更现实、更复杂的网络模型得以体现，该模型基于DPS 队列。

表1：符号汇总

		Eq.	Page
平均分组系统时间	T_i	(1)	4
平均分组服务率	μ	-	3
个体平均分组速率	λ_d	-	3
NO的用户数	n_1	-	3
VO的用户数	n_2	-	3
虚拟运营商的优先级	γ	-	4
用户感知的服务质量	Q_i	(4)	4
用户对时延的敏感度	α_i	-	5
转换因子	c	-	5
用户效用	U_i	(5)	5
向运营商 i 用户群收取的价格	p_i	-	4
垄断商业模式下网络运营商的利润	Π_m	(7)	5
战略商业模式下运营商 i 的利润	Π_i	(8)	5

2. 模型描述

本文为网络运营商（NO，也称运营商 1）和虚拟运营商（VO，也称运营商 2）提出了两种商业模式。在这两种模式中，各运营商都有自己的用户群，因此用户之间不存在竞争。网络运营商运营网络基础设施，而虚拟运营商则不运营。因此，网络运营商的网络为两个用户群体提供服务。

每个用户群都会为其运营商带来收入。用户数量取决于其获得的服务质量（QoS）以及收取的价格。服务质量取决于网络容量以及运营商对该容量的分配方式；这两个方面均由外部设定。然而，价格由运营商制定。运营商制定价格以使其利润最大化。

两种商业模式的区别如下。

- 在第一种商业模式中，即垄断的商业模式，网络运营商为自己的用户群和虚拟运营商的用户群提供服务。

- 在第二种商业模式中，即策略性模式，每个运营商都为自己的用户群提供服务；此外，网络运营商还会从每位虚拟运营商的用户那里获得收入。

这两种商业模式将与基准情景进行比较。在该情景中，网络运营商为自己的用户群提供服务，由网络提供支持，且不向虚拟运营商的用户群提供服务。

本节对这些商业模式进行形式化定义，以便为分析奠定基础。首先，描述由网络基础设施提供服务的模型；其次，详细说明用户和运营商（网络运营商和虚拟运营商）的经济激励模型。

本文所用符号汇总见表1。

2.1. 系统模型

网络 为用户提供服务的 k 被建模为一个 M/M/1-DPS 队列，如图1所示 并在下文中加以说明。

用户被建模为相互独立的泊松分组源，每个源的分组生成率为λ_d，因此，每个运营商接收的分组泊松源的速率为 $\lambda_i = \lambda_d\, n_i$ （其中 n_i 是运营商 i 的用户数），两个源的总和也服从速率为 $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$的泊松分布。假设数据包的平均服务时间服从均值为$\frac{1}{\mu}$ 的指数分布。出于稳定性考虑，假设 $\lambda < \mu$。

将整个网络建模为单个 M/M/1 队列是一种简化，这是为了获得便于处理的表达式来计算网络用户的效用。此前已有研究采用过这种方法

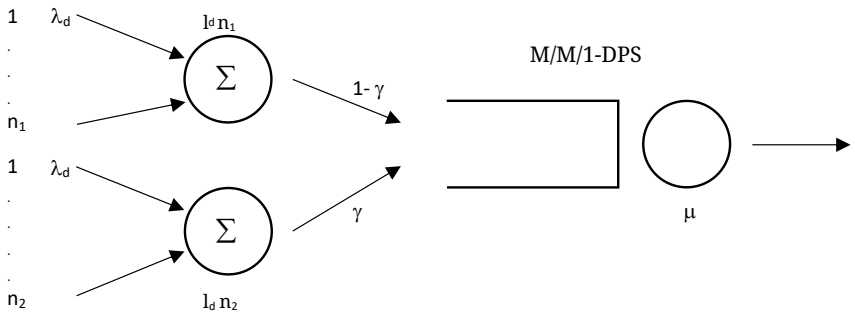


图 1：网络模型

，[6, 11, 7] 用于 DiffServ 范式下互联网服务经济分析的情境中。此外，为了模拟网络切片所实现的网络容量共享，本研究选择采用 DPS 服务规则。具体而言，该 DPS 队列管理两个优先级，每个用户群的数据包都以与其优先级成正比的瞬时速率获得服务。与优先级排队等较简单的服务规则相比，这一选择能够以更灵活的方式模拟不同用户类别之间服务优先级的分配。本研究在 [7], 中也采用了 DPS 建模，而在 [6]中则采用了优先级排队。DPS 队列的基本工作方式如下：如果有 n 个优先级为$x_1, x_2, \ldots, x_n$($x_i \leq 1$ 对于 $i = 1, ..., n$) 的顾客，那么顾客 i 将获得服务器容量的 $\frac{x_i}{\sum_{j=1}^{n} x_j}$ 份额

容量 [4]。在我们的模型中，两种优先级分别为 $x_1 = 1-\gamma$，适用于网络运营商的用户所发数据包；以及 $x_2 = \gamma$，适用于虚拟运营商的用户所发数据包，其中 $x_1 + x_2 = 1$ 且 $0 \leq \gamma \leq 1$。如上所述，DPS 是一种灵活的机制，可用于对共享资源的共享进行建模，这得益于参数 γ。M/M/1-DPS 队列中平均数据包服务时间 T_i 的闭式公式见 [4, 页。 86]

$$T_1 = \frac{1}{\mu - \lambda_d n_1 - \lambda_d n_2} \left(1 + \frac{\lambda_d n_2 (2\gamma - 1)}{\mu - (1-\gamma)\lambda_d n_1 - \gamma \lambda_d n_2}\right), \tag{1}$$

$$T_2 = \frac{1}{\mu - \lambda_d n_1 - \lambda_d n_2} \left(1 - \frac{\lambda_d n_1 (2\gamma - 1)}{\mu - (1-\gamma)\lambda_d n_1 - \gamma \lambda_d n_2}\right). \tag{2}$$

需要注意的是，如果每种优先级的顾客都以处理器共享的方式接受服务，那么抢占式恢复优先级排队就是 DPS 的一种特殊情形，因为 $\gamma = 0$ 会给予运营商 1 的用户严格优先级，而 $\gamma = 1$ 会给予运营商 2 的用户严格优先级 [7]。

在基准情景下，只有网络运营商的用户群获得服务，此时队列简化为 M/M/1-PS 队列，其平均数据包服务时间为

$$T_1 = \frac{1}{\mu - n_1 \lambda_d}. \tag{3}$$

2.2. 经济模型

用户希望获得运营商提供的通信服务。每位运营商 i 的用户为该服务支付订阅价格 p_i，并获得服务质量 Q_i。服务质量表达式表示为

$$Q_i \equiv c\, T_i^{-\alpha_i}, \qquad i = 1, 2, \tag{4}$$

其中， $c > 0$ 为转换因子， T_i 为平均分组系统时间，也称为时延。参数 α_i 表示运营商 i 的用户对时延的敏感度。对于给定的时延，较大的 α_i 意味着更差的服务质量。

用户获得的效用可表示为以货币单位计量的服务质量减去运营商针对该服务收取的价格：

$$U_i \equiv c\, T_i^{-\alpha_i} - p_i, \qquad i = 1, 2. \tag{5}$$

假设 $0 \leq \alpha_i \leq 1$，则效用是性能指标 $1/T_i$ 的凹函数，这在电信服务建模中是一个常见假设 [12]。

最后，用户效用值为零表示该用户未订阅此服务。用户效用表达式 (4) 和 (5) 先前已由 [6, 11] 以及作者在 [8, 9] 中采用。

对于运营商，利润定义为收入减去成本。具体而言，各运营商获得的收入和承担的成本取决于商业模式，如第 3 页所定义：

基准情景： 网络运营商向其自身用户群收取价格 p_1 。假设网络运营商不承担任何成本，则其利润为

$$\Pi_0 = n_1\, p_1. \tag{6}$$

垄断商业模式： 网络运营商向自己的用户群收取价格 p_1 ，并向虚拟运营商的用户群收取价格 p_2 。假设网络运营商不产生任何成本，则其利润为

$$\Pi_m = n_1\, p_1 + n_2\, p_2. \tag{7}$$

St战略商业模式： 网络运营商向自己的用户群收取价格 p_1 ，而虚拟运营商向自己的用户群收取价格 p_2 。此外，虚拟运营商还需为每位虚拟运营商的用户向网络运营商支付费用 δ 。除此之外，网络运营商和虚拟运营商均不产生任何成本。因此，双方的利润分别为

$$\Pi_1 = n_1\, p_1 + n_2\, \delta \tag{8}$$

$$\Pi_2 = n_2\, p_2 - n_2\, \delta. \tag{9}$$

为简化分析，假设运营商不产生任何成本，这不会损失一般性。关于运营成本，将其纳入分析并不会带来额外见解，因为运营成本不取决于服务价格，反而会使利润表达式不够明确。至于投资成本，则将其视为常数，因为网络运营商调整网络容量 μ 所需的时间尺度长于价格变化的时间尺度 [6, 9]。

2.3. 博弈模型

在这三种情景中，可以看出用户的订阅决策与运营商的定价决策之间存在策略互动。

基准情景：

- 网络运营商的用户订阅决策受网络运营商定价决策的影响。
- 网络运营商的利润取决于其用户的订阅决策。

垄断商业模式：

- 网络运营商用户和虚拟运营商用户的订阅决策会受到网络运营商定价决策的影响。

- 网络运营商用户的订阅决策取决于虚拟运营商用户的订阅决策，二者通过因子 Q_1相互关联。虚拟运营商用户的订阅决策则取决于网络运营商用户的订阅决策，二者通过 Q_2 因子相互关联。

- 网络运营商的利润取决于网络运营商用户和虚拟运营商用户的订阅决策。

战略商业模式：

- 网络运营商用户的订阅决策受网络运营商定价决策的影响。虚拟运营商用户的订阅决策则受虚拟运营商定价决策的影响。
- 网络运营商用户的订阅决策通过因子 Q_1 取决于虚拟运营商用户的订阅决策。虚拟运营商用户的订阅决策则通过 Q_2 因子取决于网络运营商用户的订阅决策。

- 虚拟运营商的利润取决于虚拟运营商用户的订阅决策。网络运营商的利润则取决于网络运营商用户和虚拟运营商用户的订阅决策。
- 网络运营商的利润受虚拟运营商定价决策的影响，这种影响通过虚拟运营商用户的订阅决策间接产生，反之亦然。

这些策略互动适合用博弈论进行分析。在基准情景中，参与者是用户群和网络运营商；在垄断情景中，参与者是两个用户群和网络运营商；在策略情景中，参与者则是两个用户群和两家运营商。激励是各用户群的效用以及各运营商的利润。

所提出的博弈模型是一个两阶段博弈，各情景的结构各不相同 :

基准情景： 第一阶段由一名参与者（网络运营商）构成，由其确定 p_1。第二阶段由其用户群构成，其中每位用户都会选择是否订阅。

垄断 式商业模式： 第一阶段由一名参与者（网络运营商）构成，由其确定 p_1 和 p_2。

战略商业模式： 第一阶段由两名参与者（网络运营商和虚拟运营商）构成，各自确定其服务价格。

在垄 断模型和策略模型中，第二阶段均由两个用户群体构成，其中
每位用户选择 是否订阅其运营商的服务。

博弈的解是每位参与者的均衡决策或策略。这里采用的均衡概念是纳什均衡：在其他参与者均采取均衡策略的前提下，没有参与者有动机偏离其均衡策略。

该两阶段博弈采用逆向归纳法求解 [13]。由于第二阶段的参与者在选择行动时已知第一阶段参与者的选择，因此在均衡中，第一阶段参与者会预判第二阶段参与者的选择。这为按以下方式求解两阶段博弈提供了依据：首先，在已知第一阶段参与者行动的情况下求解第二阶段的均衡；然后逆向求解第一阶段的均衡，并将第一阶段的最佳响应纳入考虑。均衡计算按以下顺序进行：首先是第二阶段，其次是第一阶段。

2.3.1. 第二阶段 - 用户订阅

在第二阶段，每位用户都会做出自己的订阅决策，试图最大化其从订阅运营商或不订阅中获得的效用。运营商 i 的用户群中的每位用户都会观察价格 p_i，并根据其从每种选择中获得的效用做出订阅决策：如果订阅，则效用为 U_i （见（5））；如果不订阅，则效用为 0。

假设用户数量足够多，来自运营商 i 用户群的一名用户所做的个人订阅决策，不会影响运营商 i用户群中其他用户的效用。在这些条件下，达到的均衡正是 Wardrop [14] 于1952年提出的、用于解决交通流

分配问题，也就是在交通网络中选择起点与终点之间路线的问题。具体而言，适用的是 Wardrop第一原则，其内容是：所有实际使用路线的行程时间都相等，且短于单辆车行驶任何未使用路线所需的时间。 基本上，在*Wardrop*均衡下，每位用户从其实际选择的方案中获得的效用，在各个备选方案之间趋于一致。这意味着，对于运营商 i 的用户群，要么（1） $U_i = 0$ （即订阅与不订阅的效用相等），且部分用户选择订阅、其他用户不订阅（$n_i^* \geq 0$）；要么（2） $U_i < 0$ ，且没有用户订阅（$n_i^* = 0$；即没有用户选择效用低于零的选项）。请注意，在条件（5）和（1）–（3）下，无法维持第三种情况（$U_i > 0$），因为 n_i 的增加会导致 T_i 增加，并最终趋于 $U_i = 0$。

对于基准情景，只能确定两种可能的情形：

- 情形 I:
$$U_1 = 0, \text{ and } n_1^* \geq 0. \tag{10}$$
- 情形 II:
$$U_1 < 0, \text{ and } n_1^* = 0. \tag{11}$$

Wher对于垄断型和战略型商业模式，可以确定四种可能的情形 ：

- 情形 I:
$$U_1 = 0, U_2 = 0, \text{ and } n_1^* \geq 0, \ n_2^* \geq 0. \tag{12}$$
- 情形 II:
$$U_1 = 0, U_2 < 0, \text{ and } n_1^* \geq 0, \ n_2^* = 0. \tag{13}$$
- 情形 III:
$$U_1 < 0, U_2 = 0, \text{ and } n_1^* = 0, \ n_2^* \geq 0. \tag{14}$$
- 情形 IV:
$$U_1 < 0, U_2 < 0, \text{ and } n_1^* = 0, \ n_2^* = 0. \tag{15}$$

如第3节所述，上述四种结果将 n_1^* 和 n_2^* 表示为 p_1 和 p_2的函数，即 $n_1^*(p_1, \ p_2)$和 $n_2^*(p_1, \ p_2)$。

2.3.2. 第一阶段 - 运营商定价决策

在基准情景下，网络运营商选择 p_1 以使其利润 Π_0最大化，该利润由式（6）给出。网络运营商预期用户订阅将达到式（10）–（11）所描述的均衡，因此 Π_0 将是 p_1的函数。利润最大化价格 p_1^* 为

$$p_1^* = \arg\max_{p_1} \ \Pi_0(p_1). \tag{16}$$

在垄断商业模式下，网络运营商选择 p_1 和 p_2 以使其利润Π_m最大化，该利润由式（7）给出。网络运营商预期用户订阅将达到式（12）–（15）所描述的均衡，因此 Π_m 将是 p_1 和 p_2的函数。利润最大化价格 p_1^* 和 p_2^* 为

$$\{p_1^*, p_2^*\} = \arg\max_{p_1, p_2} \ \Pi_m(p_1, p_2). \tag{17}$$

在战略商业模式中，每个运营商不仅了解第二阶段的用户订阅均衡及其利润函数，还了解另一运营商的理性行为。因此，每个运营商的利润最大化价格也取决于另一运营商的选择，即由最佳响应函数（BR）给出：

$$BR_1(p_2) = \arg\max_{p_1} \Pi_1(p_1, p_2), \tag{18}$$

$$BR_2(p_1) = \arg\max_{p_2} \Pi_2(p_1, p_2). \tag{19}$$

第一阶段的纳什均衡是一对价格 p_1^* 和 p_2^*，此时每个运营商都会预期第二阶段的均衡，并据此针对另一运营商的价格设定最优响应价格，即求解以下方程组：

$$p_1^* = BR_1(p_2^*), \tag{20}$$
$$p_2^* = BR_2(p_1^*). \tag{21}$$

3. 分析

本节首先通过解析方法求出三种情景下第二阶段的 Wardrop均衡。随后，给出基准情景下第一阶段的解。

*3.1. Wardrop*均衡：基准情景

将式（3）代入式（5），即可得到用户的效用：

$$U_1 = c \cdot (\mu - n_1 \cdot \lambda_d)^{\alpha_1} - p_1. \tag{22}$$

根据用户效用的这一表达式，将式（10）和（11）中所表达的 Wardrop均衡写成如下形式：

$$n_1^* = \begin{cases} \frac{\mu - \left(\frac{p_1}{c}\right)^{\frac{1}{\alpha_1}}}{\lambda_d} & \text{if } p_1 \le c\mu^{\alpha_1}, \\ 0 & \text{if } p_1 > c\mu^{\alpha_1}. \end{cases} \tag{23}$$

*3.2. Wardrop*均衡：垄断型与策略型商业模式

效用　　将式 (1) 和 (2) 代入式 (5)，即可得到每个用户群中用户的效用，从而得出　　g

$$U_1 = c\left(\frac{\mu - (1-\gamma)(\lambda_d n_1 + \lambda_d n_2)}{(\mu - \lambda_d n_1 - \lambda_d n_2)\left(\mu - (1-\gamma)\lambda_d n_1 - \gamma\lambda_d n_2\right)}\right)^{-\alpha_1} - p_1, \tag{24}$$

$$U_2 = c\left(\frac{\mu - \gamma\left(\lambda_d n_1 + \lambda_d n_2\right)}{(\mu - \lambda_d n_1 - \lambda_d n_2)\left(\mu - (1-\gamma)\lambda_d n_1 - \gamma\lambda_d n_2\right)}\right)^{-\alpha_2} - p_2. \tag{25}$$

根据用户效用的这些表达式，由式 (12)、(13) 和 (15) 表示的 Wardrop均衡可得以下具体形式：　　(14)

- 情形 I：由式 (12)、(24) 和 (25) 可得，

$$n_1^* = \frac{1}{\lambda_d}\left[\frac{1}{\gamma\widetilde{p}_2^{-\frac{1}{\alpha_2}} - (1-\gamma)\widetilde{p}_1^{-\frac{1}{\alpha_1}}} - \frac{\mu\widetilde{p}_2^{-\frac{1}{\alpha_2}}}{\gamma\widetilde{p}_1^{-\frac{1}{\alpha_1}} - (1-\gamma)\widetilde{p}_2^{-\frac{1}{\alpha_2}}}\right] \tag{26}$$

$$n_2^* = \frac{1}{\lambda_d}\left[\frac{\mu\widetilde{p}_1^{-\frac{1}{\alpha_1}}}{\gamma\widetilde{p}_1^{-\frac{1}{\alpha_1}} - (1-\gamma)\widetilde{p}_2^{-\frac{1}{\alpha_2}}} - \frac{1}{\gamma\widetilde{p}_2^{-\frac{1}{\alpha_2}} - (1-\gamma)\widetilde{p}_1^{-\frac{1}{\alpha_1}}}\right], \tag{27}$$

$$p_1 \le \widehat{p}_1(p_2), \tag{28}$$
$$p_2 \le \widehat{p}_2(p_1). \tag{29}$$

其中

$$\widetilde{p}_i \equiv \frac{p_i}{c}, \quad i = 1, 2, \tag{30}$$

$$\widehat{p}_2(p_1) \equiv c\left[\frac{(1-\gamma)\widetilde{p}_1^{\frac{1}{\alpha_1}}+\gamma\mu}{(1-\gamma)\mu\widetilde{p}_1^{-\frac{1}{\alpha_1}}+\gamma}\right]^{\alpha_2}, \tag{31}$$

$$\widehat{p}_1(p_2) \equiv c\left[\frac{\gamma\widetilde{p}_2^{\frac{1}{\alpha_2}}+(1-\gamma)\mu}{\gamma\mu\widetilde{p}_2^{-\frac{1}{\alpha_2}}+(1-\gamma)}\right]^{\alpha_1}. \tag{32}$$

• 情形 II：由公式（13）、（24）和（25）可得,

$$n_1^* = \frac{\mu-\widetilde{p}_1^{\frac{1}{\alpha_1}}}{\lambda_d}, \tag{33}$$

$$n_2^* = 0, \tag{34}$$

$$p_1 \le c\mu^{\alpha_1}, \tag{35}$$

$$p_2 > \widehat{p}_2(p_1). \tag{36}$$

• 情形 III：由 (14)、(24) 和 (25) 得：

$$n_1^* = 0, \tag{37}$$

$$n_2^* = \frac{\mu-\widetilde{p}_2^{\frac{1}{\alpha_2}}}{\lambda_d}, \tag{38}$$

$$p_2 \le c\mu^{\alpha_2}, \tag{39}$$

$$p_1 > \widehat{p}_1(p_2). \tag{40}$$

• 情形 IV：最后，由 (15)、(24) 和 (25) 得：

$$n_1^* = 0, \tag{41}$$

$$n_2^* = 0, \tag{42}$$

$$p_1 > c\mu^{\alpha_1}, \tag{43}$$

$$p_2 > c\mu^{\alpha_2}. \tag{44}$$

表 2 总结了上述 Wardrop 均衡表达式。

图 2、3、4 和 5 展示了在不同的 α_1、 α_2 和 γ组合下，(p_2， p_1) 平面中均衡情形的图形表示。在所有图中， $c=1$ 和 $\mu=1$ 包/秒，因此情形 IV 始终对应于 $p_1>1$ 和 $p_2>1$。

在所有图中，对于给定的 p_2，较低的 p_1 会使 n_2^* 降至零（情形 II）；随着 p_1 增加， n_2^* 最终会增加，而 n_1^* 则会减少，直至 n_1^* 达到零（情形 III）。对于给定的 p_1，情况也相反：当 p_2 从较低值开始增加时，变化方向相反。从情形 II 经由情形 I 转变至情形 III 的价格取决于参数 α_1、 α_2 和 γ。对于给定的 α_2， α_1 越高，导致转变至情形 III 的 p_1 就越低（例如，参见图 2 和图 3）。换言之，用户越敏感，使其拒绝订阅所需的最低价格就越低。 γ 影响情形 I 的“宽度”。 γ 越接近 $1/2$，情形 I 所在区域就越窄（例如，参见图 4 和图 5）。换句话说，优先级分布越不对称，能使两个运营商都获得非零订阅量的价格值范围就越宽。

上述描述的均衡情形今后将称为均衡区域。

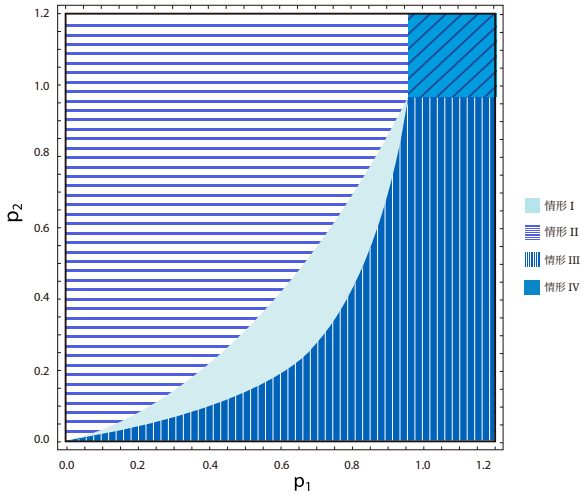


图 2: $\gamma = 1/10$ 和 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.8$的 Wardrop 均衡情形/区域

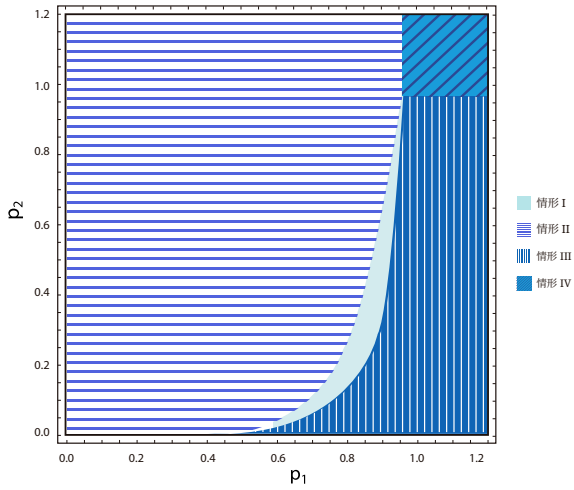


图 3: $\gamma = 1/10$ $\alpha_1 = 0.2$ 和 $\alpha_2 = 0.8$的 Wardrop 均衡情形/区域

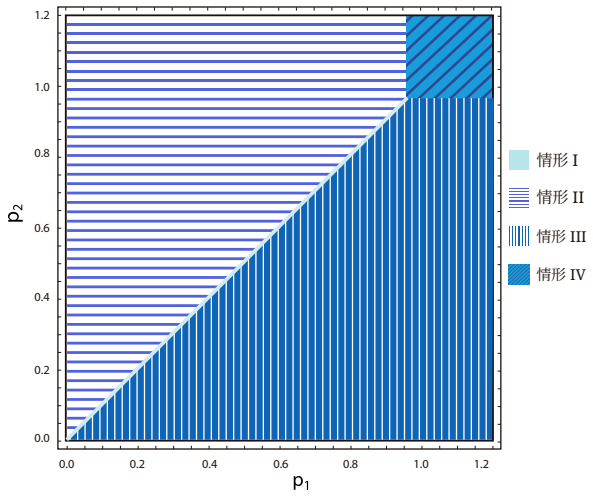


图 4： $\gamma = 1/2$ 和 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.8$的 Wardrop均衡情形/区域

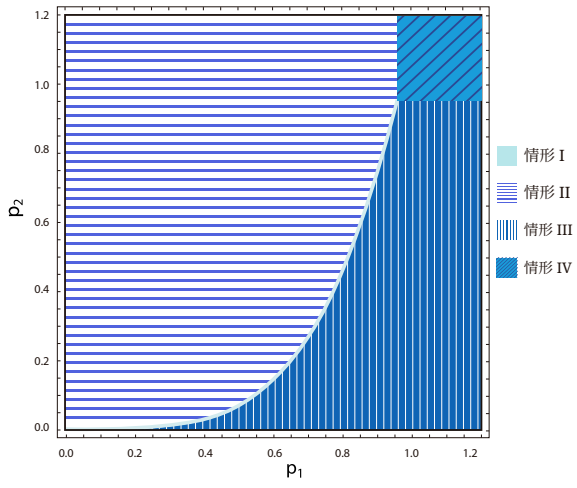


图 5：War drop均衡情形/区域： $\gamma = 1/2$、 $\alpha_1 = 0.2$ a 和 $\alpha_2 = 0.8$

表 2：用户订阅 Wardrop 均衡

Case	n_1^*	n_2^*	p_1	p_2
I	(26)	(27)	$p_1 \le \widehat{p}_1(p_2)$	$p_2 \le \widehat{p}_2(p_1)$
II	$\frac{\mu - \widetilde{p_1}^{\frac{1}{\alpha_1}}}{\lambda_d}$	0	$p_1 \le c\mu^{\alpha_1}$	$p_2 > \widehat{p}_2(p_1)$
III	0	$\frac{\mu - \widetilde{p_2}^{\frac{1}{\alpha_2}}}{\lambda_d}$	$p_1 > \widehat{p}_1(p_2)$	$p_2 \le c\mu^{\alpha_2}$
IV	0	0	$p_1 > c\mu^{\alpha_1}$	$p_2 > c\mu^{\alpha_2}$

3.3. 第一阶段分析

对于基准情景，根据式 (6)，并给定式 (23) 中针对 n_1^* 得到的 Wardrop均衡，网络运营商需要最大化的利润表达式如下：

$$\Pi_0(p_1) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda_d}\left[\mu - \left(\frac{p_1}{c}\right)^{\frac{1}{\alpha_1}}\right] p_1, & \text{if } p_1 \le c\mu_1^{\alpha}, \\ 0 & \text{if } p_1 > c\mu_1^{\alpha}. \end{cases} \tag{45}$$

满足式 (16) 的最优价格及最大利润为

$$p_1^* = c\left(\frac{\alpha_1}{1+\alpha_1}\mu\right)^{\alpha_1}, \tag{46}$$

$$\Pi_0^* = \Pi_0(p_1^*) = \frac{c}{\alpha_1 \lambda_d}\left(\frac{\alpha_1}{1+\alpha_1}\mu\right)^{1+\alpha_1}. \tag{47}$$

对于垄断型和策略型商业模式，第一阶段的解无法通过解析方法求得。这两种模式的第一阶段解将在第 4 节中，依据第 2.3.2 节所列的最大化问题，通过数值方法求得。

4. 结果与讨论

本节将计算垄断型商业模式（第 4.1 节）和策略型商业模式（第 4.2 节）中的价格、用户数量和运营商利润的数值。对于每种商业模式，均分析两种情形：两个用户群体具有相同时延敏感度的情形（$\alpha_1 = \alpha_2$），以及具有不同敏感度的情形（$\alpha_1 \neq \alpha_2$）。最后，在第 4.3 节中分析每种商业模式的可行性，即每种商业模式为网络运营商和虚拟运营商提供何种激励，使其相比基准情景处境更好。

除非另有说明，否则使用以下参数值：

- $c = 1$，这是价格和利润的归一化常数。
- $\mu = 1$ 包/秒。
- $\lambda_d = 0.01$ 包/秒，即比 μ低两个数量级，因此可以认为用户数量较多，从而证明Wardrop均衡中所采用的这一假设是合理的。

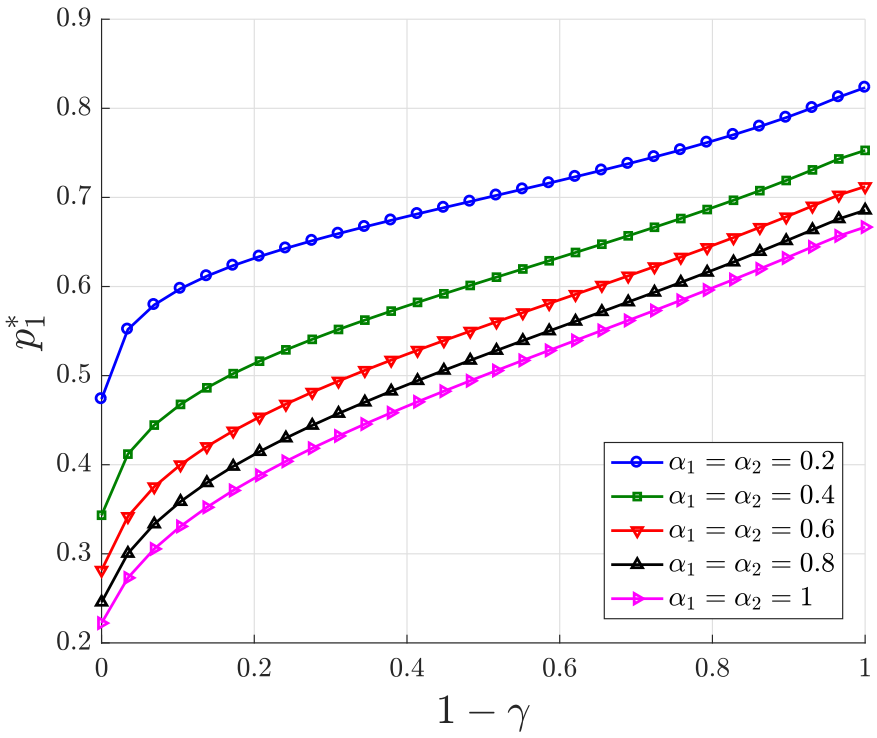


图 6：在不同的共同 α 取值下，价格 p_{1m}^* 与 $1-\gamma$ 的函数关系（垄断情形）

4.1. 垄断商业模式

本文介绍并讨论了垄断情景下的均衡：网络运营商负责运营网络，并向自己的用户群和虚拟运营商的用户群提供服务。网络运营商的用户群在使用网络容量时被赋予优先级 $1-\gamma$，而虚拟运营商的用户群被赋予优先级 γ。

首先讨论两个用户群体具有相同的时延敏感度（$\alpha_1=\alpha_2$）的情形，其次讨论两者的时延敏感度不同（$\alpha_1\neq\alpha_2$）的情形。

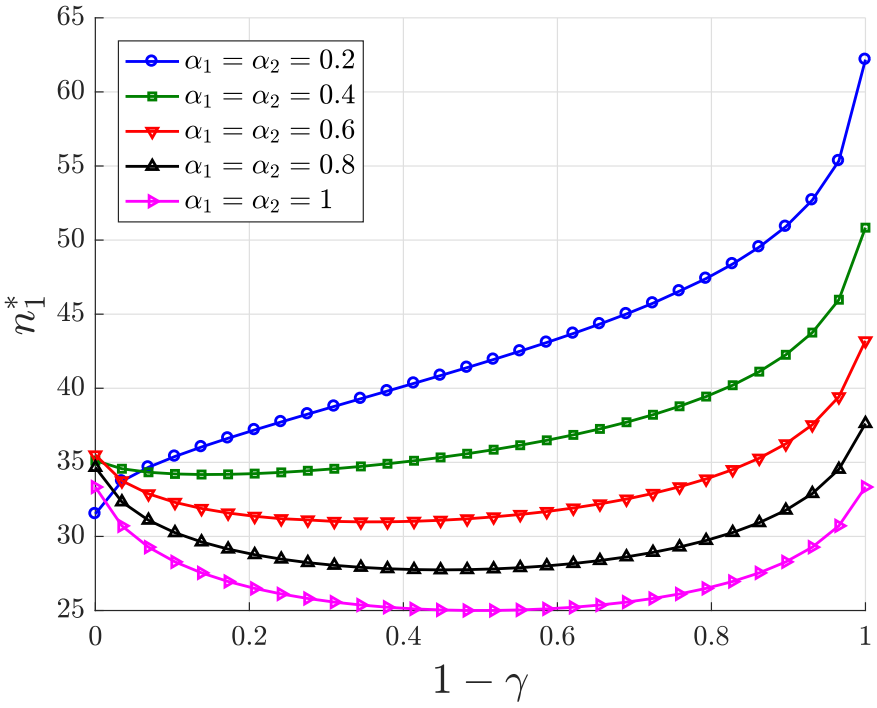
4.1.1. 具有相同敏感度的用户群

设定参数 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha=\{0.2,0.4,0.6,0.8,1\}$，并分析优先级 γ 对均衡的影响。

价格。图 6 展示了在均衡状态下，网络运营商向各用户群收取的价格 p_{1m}^* 如何随 $1-\gamma$（网络运营商的用户群优先级）变化，以及 α取不同值时的情况。由于对称性，该图也表示p_{2m}^* 如何随 γ （虚拟运营商的用户群优先级）变化。

可以看出，随着服务优先级的提高，服务的价格也会提高。此外，获得更高优先级支持服务的用户群，其价格也更高（请注意，如果 $1-\gamma\leq 1/2$则 $\gamma\geq 1/2$）。与这一观察一致，当 $\gamma=1/2$时，两个用户群的价格相同。最后，敏感度 α越高，网络运营商向用户设定的价格就越低。

用户数量。图7展示了在均衡状态下，网络运营商的用户数量 n_{1m}^* 随 $1-\gamma$（网络运营商的用户群优先级）变化的情况，图中比较了不同 α 值。由于对称性，该图也表示 n_{2m}^* 随 γ（虚拟运营商的用户群优先级）变化的情况。用户数量可衡量用户获得的总效益；需要注意的是，用户的均衡位于区域 I，此时 $U_1=U_2=0$（见图2和图3）。



Fig图 7: 不同公共 α 值下，用户数量n_{1m}^* 随 $1-\gamma$ 变化（垄断的 ）

可以区分出 n_{1m}^* 随 $1-\gamma$ 变化的两种不同趋势，具体取决于 α。对于敏感度较低的用户（即 α 值较低，例如 0.2），用户数量 n_{1m}^* 会随着其优先级（$1-\gamma$）的提高而增加。然而，对于敏感度较高的用户（即 $\alpha \geq 0.4$），用户数量 n_{1m}^* 会先减少，达到最低点后再增加；最低点的位置取决于 α：α 越高，产生最低点的优先级 $1-\gamma$ 也越高。观察价格和用户数量随服务优先级的变化可知，对于敏感度较低和较高的用户而言，高优先级带来的服务质量足够高，能够抵消较高的定价；而只有对于敏感度较高的用户，低优先级带来的价格也足够低，能够抵消其获得的较低服务质量。

关于敏感度，可以看出，对于高敏感度用户，敏感度 α 越高，用户数量越少。观察价格和用户数量随敏感度的变化情况可知，对于高敏感度用户，敏感度越高，服务质量越低，而较低的价格无法弥补这一点。对于低敏感度用户也适用这一结论，但优先级非常低时除外。

最后，图 8 展示了用户总数，即 $n_{1m}^* + n_{2m}^*$。当服务优先级等于 1 或 0 时，订阅率达到最大值。

结论是，当两个用户群体具有相同的敏感度时，对用户最有利的网络配置是将完全优先级赋予其中一个用户群体。

运营商利润。图 9 显示了在不同 α 取值下，网络运营商的利润随 γ （虚拟运营商用户群的优先级）的变化情况。

可以看出，两个用户群体的优先级差异越大（$|(1-\gamma)-\gamma| = 2|1/2-\gamma|$），网络运营商的利润就越高。这与以下事实一致：较高的 $1-\gamma$ 会带来较高的 p_{1m}^* 和较高的 n_{1m}^*，而较高的 γ 会带来较高的 p_{2m}^* 和较高的 n_{2m}^*。

结论是，当两个用户群体具有相同的敏感度时，对运营商而言，最有利的网络配置是将全部优先级分配给其中一个用户群体。这与从用户角度看最有利的配置一致。

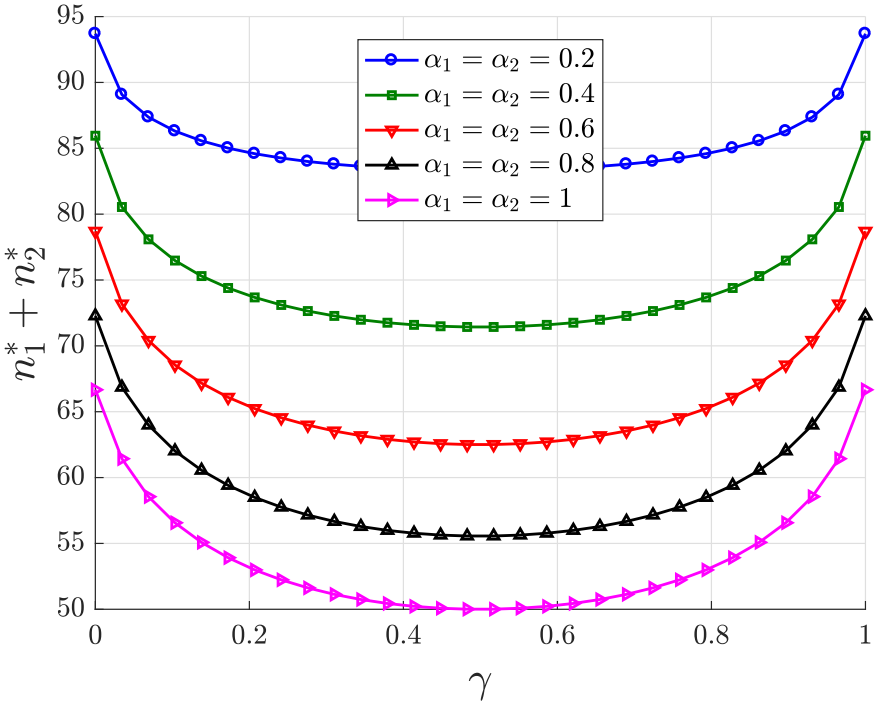


图 8：对于不同的公共 α 值（垄断的），用户数量总数随 γ 的变化

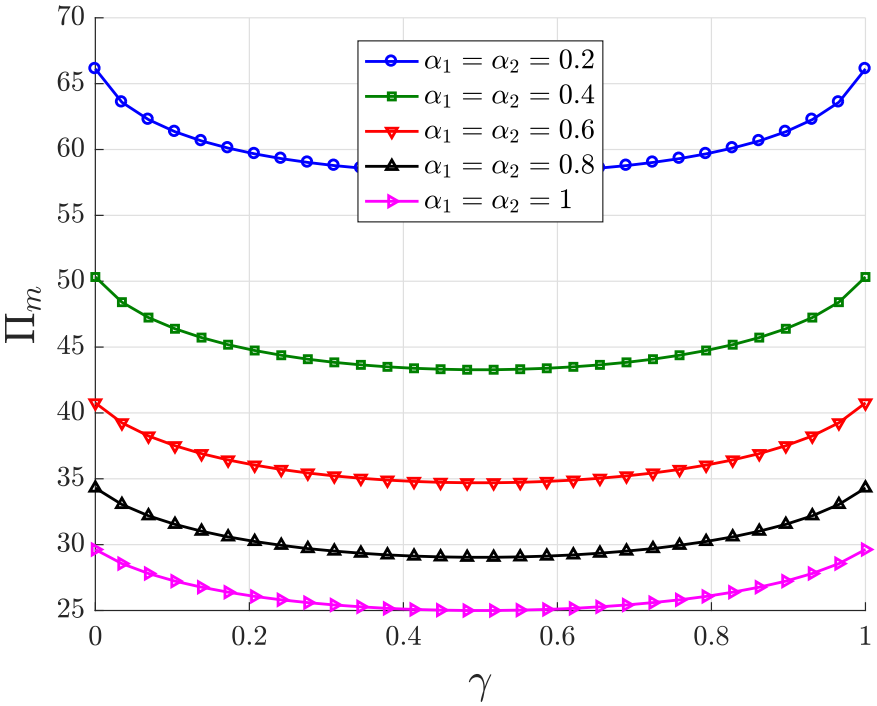


图 9：网络运营商的利润 Π_m^* 随 γ 的变化（对于不同的公共 α 值，垄断的）

4.1.2. 具有不同敏感度的用户群

设定参数 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$，并分析优先级 γ 对均衡的影响。

价格。图10和图11分别展示了网络运营商在均衡状态下，针对各用户群设定的价格 p^*_{1m} 和 p^*_{2m}；图中显示了这些价格随服务优先级变化的情况（图10中为 $1-\gamma$，图11中为 γ），并比较了不同 α_2取值下的结果。

可以看出，服务优先级越高，服务的定价也越高。此外，虚拟运营商用户敏感度的变化不仅会影响面向虚拟运营商用户设定的价格（图11），也会影响面向网络运营商用户设定的价格（图10）。事实上，在保持 α_1 不变的情况下，提高 α_2会导致 p^*_{1m} 上升（服务优先级较低时）或下降（服务优先级较高时）。此外，与敏感度相同的情形（图6）相比，还出现了一个定性且重要的差异：当 $\alpha_1 > \alpha_2$（当 $\alpha_1 < \alpha_2$）时，面向网络运营商用户设定的价格 p^*_{1m}（面向虚拟运营商用户设定的价格 p^*_{2m}）在 γ的一段中间取值范围内保持不变。

用户数量。图12和图13分别展示了均衡状态下，不同 α_2 取值时各用户群的用户数量 n^*_{1m} 和 n^*_{2m} 随服务优先级变化的情况（$1-\gamma$ 对应图12，γ 对应图13）。

可以看出，虚拟运营商用户的敏感度变化再次不仅影响虚拟运营商的用户数量（图 13），也影响网络运营商的用户数量（图 12）。实际上，在保持 α_1 不变的情况下，提高 α_2 会导致虚拟运营商的用户数量减少，而网络运营商的用户数量增加。这与虚拟运营商用户对时延变得更加敏感这一事实相符。

此外，与共同 α 的情形（图7）相比，还出现了两个定性且重要的差异：当 $\alpha_1 > \alpha_2$（当 $\alpha_1 < \alpha_2$）时，网络运营商的用户数量 n^*_{1m}（虚拟运营商的用户数量 n^*_{2m}）达到最大值，而 n^*_{2m}（n^*_{1m}）在一系列中间 γ 取值下降至零，并保持不变。这是因为当 $\alpha_1 > \alpha_2$ 时，均衡出现在区域 I 和区域II 的边界上（见图2和图3）；而当 $\alpha_1 < \alpha_2$ 时，均衡出现在区域 I 和区域III 的边界上。

最后，图 14 展示了用户总数，即 $n^*_{1m} + n^*_{2m}$。当 γ 等于 1 或 0 时，订阅率达到最大值。具体而言，当 $\alpha_1 > \alpha_2$ 时，$\gamma = 1$ 时订阅率达到最大值（即 VO 用户群的服务优先级最高）。当 $\alpha_1 < \alpha_2$ 时则反之。

结论是，当两个用户群体的敏感度不同时，对用户最有利的网络配置是将全部优先级分配给敏感度较低的用户群体。

运营商利润。图 15 展示了网络运营商利润如何随 γ（VO 的用户优先级）变化，以及不同 α_2取值下的情况。

可以看出，相近（但不一定相同）的优先级会导致利润最低。这与以下事实一致：γ 取中间值时，要么没有网络运营商的用户（图 12 中的 $\alpha_1 > \alpha_2$），要么没有 VO 的用户（图 13 中的 $\alpha_1 < \alpha_2$）。当 γ 等于 1 或 0 时，利润达到最大值。具体而言，当 $\alpha_1 > \alpha_2$ 时，$\gamma = 0$ 时利润达到最大值（即网络运营商用户群的服务优先级最高）。当 $\alpha_1 < \alpha_2$ 时则反之。

结论是，当两个用户群体的敏感度不同时，对运营商最有利的网络配置是将全部优先级给予敏感度较高的用户群体。这与从用户角度来看最有利的配置形成对比。

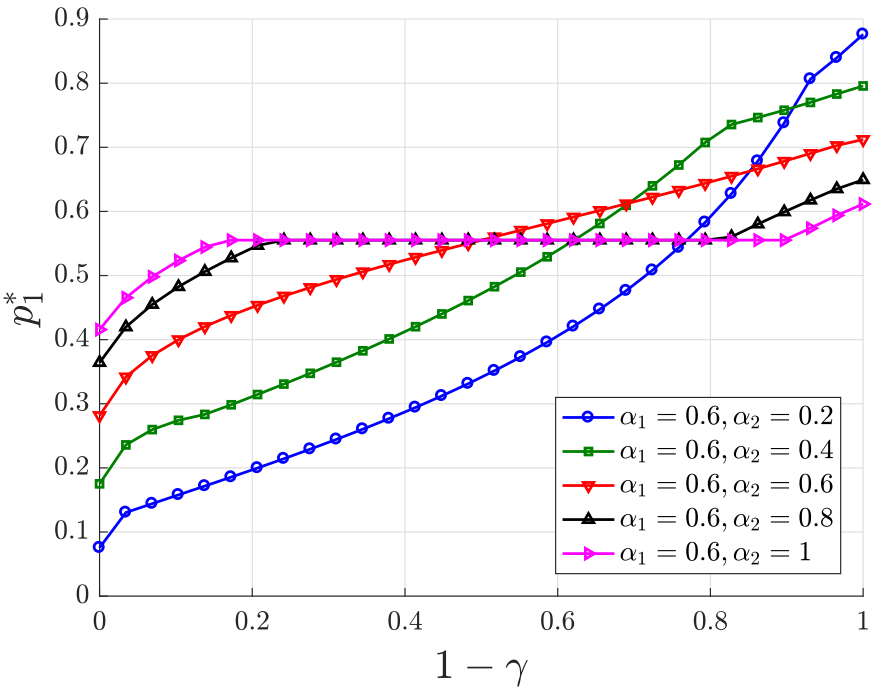


图 10：在不同的 α_1 和 α_2 值下，价格 p_{1m}^* 随 $1-\gamma$ 变化（垄断的）

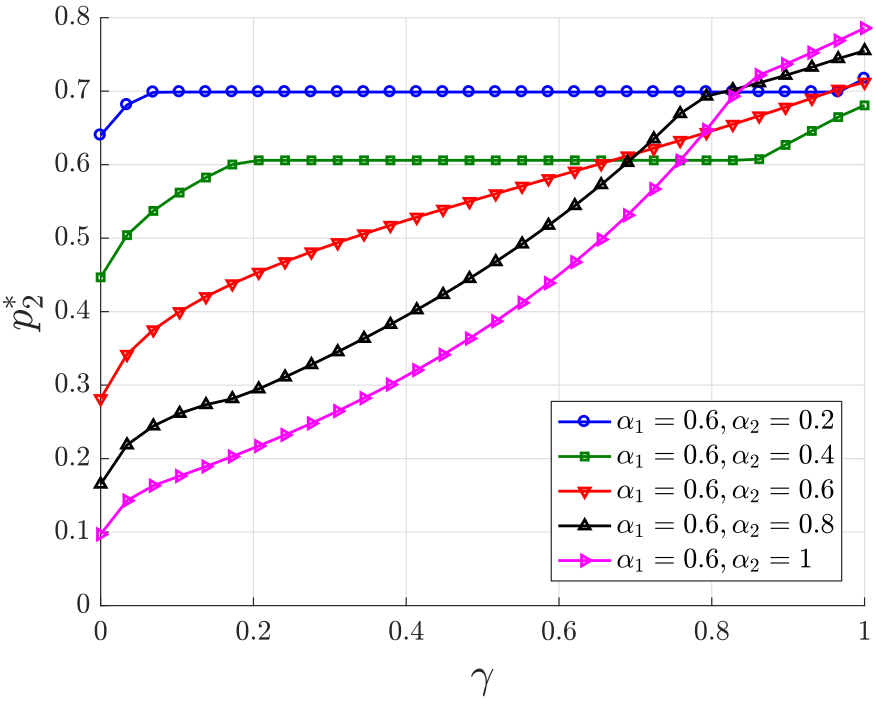


图 11：在不同的 α_1 和 α_2 值下，价格 p_{2m}^* 随 γ 变化（垄断的）

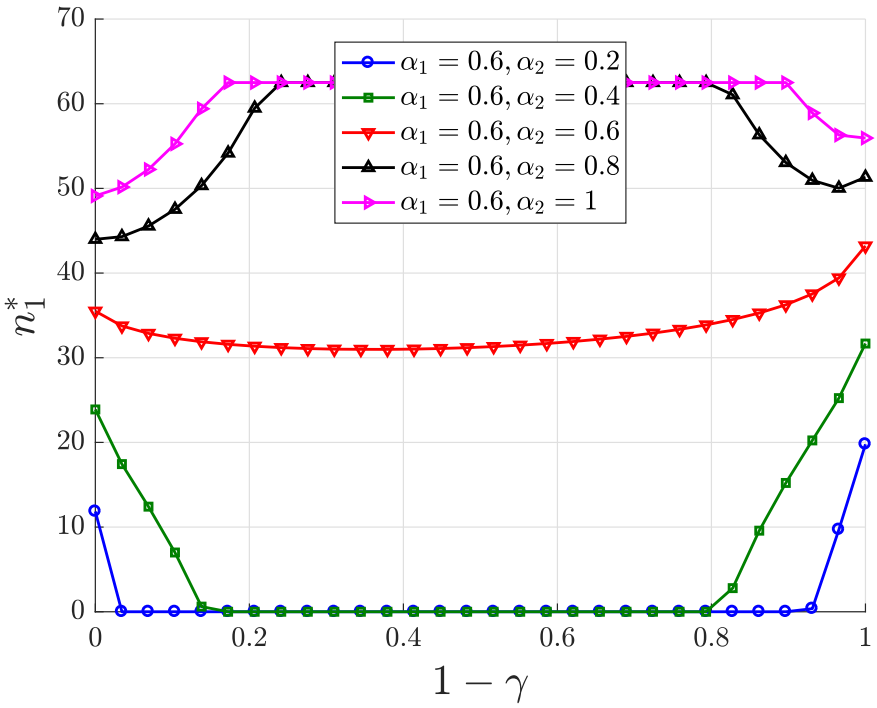


图 12：不同 α_1 和 α_2 取值下，用户数量 n_{1m}^* 随 $1-\gamma$ 变化的情况（垄断的）

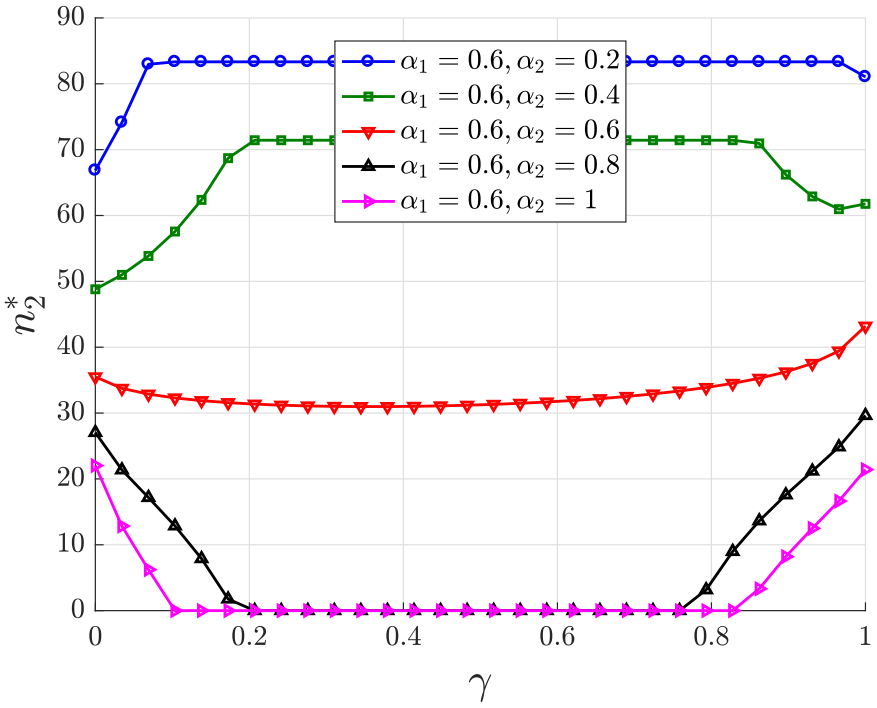


图 13：不同 α_1 和 α_2 取值下，用户数量 n_{2m}^* 随 γ 变化的情况（垄断的 ）

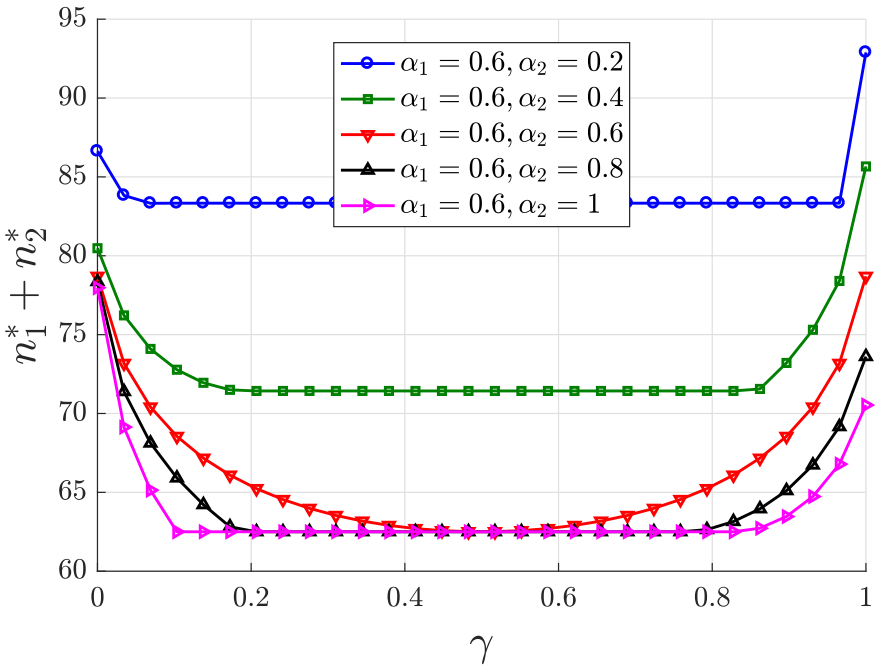


图14：不同 α_1 和 α_2 取值下，总用户数量与 γ 的关系（垄断的 ）

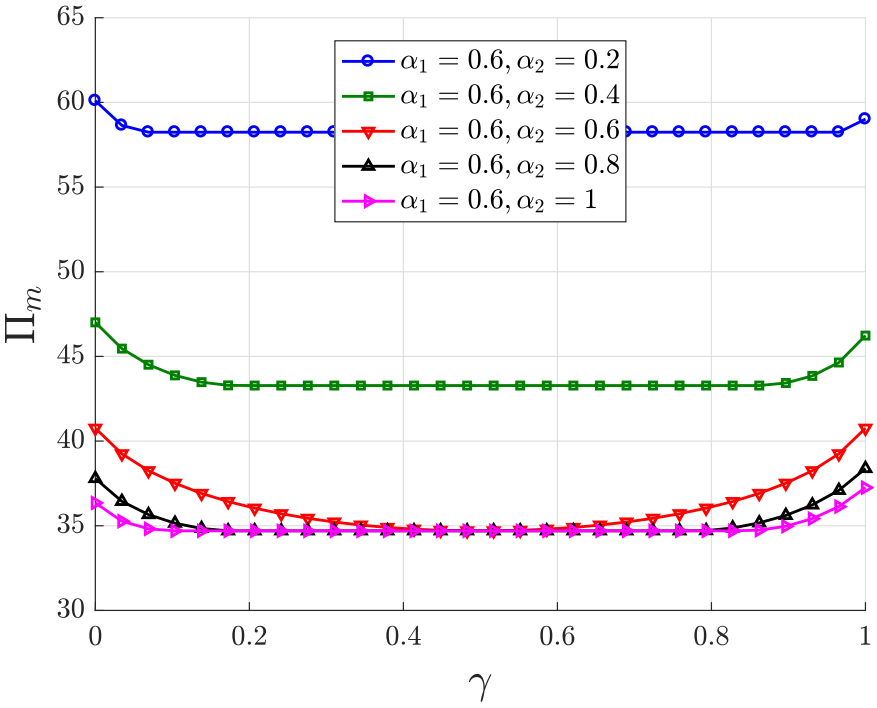


图 15：不同 α_1 和 α_2 取值下，网络运营商的利润 Π_m^* 与 γ 的关系（垄断的）

4.2. 战略商业模式

本文介绍并讨论战略情景下的均衡：网络运营商运营网络，并向自己的用户群提供服务；虚拟运营商则向自己的用户群提供服务。网络运营商的用户群在使用网络容量时被赋予优先级 $1-\gamma$，而虚拟运营商的用户群被赋予优先级 γ。最后，虚拟运营商为其每位用户向网络运营商支付费用 δ。

首先，讨论两个用户群体对时延具有相同敏感度的情形，即 $\alpha_1 = \alpha_2$；其次，讨论它们具有不同敏感度的情形，即 $\alpha_1 \neq \alpha_2$。

解读本节讨论的结果时，应注意两点。第一，策略组合 $\{p_1^*, p_2^*\} = \{0, 0\}$ 始终是一个纳什均衡，但之后不再明确提及，因为始终存在一个非零纳什均衡。第二，在某些参数配置下，存在连续统纳什均衡。具体而言，存在一些纳什均衡，其中 $p_1 \leq p_1^* \leq p_1$且 $p_2 \leq p_2^* \leq p_2$。在这些情况下，选择总利润 $\Pi_1^* + \Pi_2^*$ 达到最大的那个均衡。

4.2.1. 具有相同敏感度的用户群

设定参数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.6$，并分析费用 δ 对均衡的影响。选择 δ的取值，使网络运营商和虚拟运营商都能获得正利润。

价格。 图16和图17分别展示了均衡状态下，网络运营商为其用户群设定的价格 p_1^* 和虚拟运营商为其用户群设定的价格 p_2^*，这些价格是服务优先级的函数（图16中的$1-\gamma$ 和图17中的 γ），适用于 δ的不同取值。

可以看到，当优先级值高于某一阈值时，在一定范围内，优先级越高，服务价格也越高。网络运营商的优先级阈值与虚拟运营商的阈值不同。对于网络运营商，该阈值在0.5（当 $\delta = 0.05$时）和0.75（当 $\delta = 0.2$时）之间变化。对于虚拟运营商，该阈值是一个优先级区间，在此区间内价格趋于平缓；其范围在 $[0.1, 0.5]$（当 $\delta = 0.05$时）和 $[0.25, 0.5]$（当 $\delta = 0.2$时）之间变化。而低于该阈值时，优先级越低，服务价格反而越高。这种行为不同于垄断情景下观察到的行为，原因在于此处存在两个运营商之间的策略互动，而垄断情景中并不存在这种互动。还可以看到，获得更高优先级服务的用户群价格更高；与此一致，当 $\gamma = 1/2$时，两个用户群的价格相同。

关于 δ的影响，可以看出，δ 越高，两种价格也都越高。

用户数量。图18和图19分别展示了均衡状态下，网络运营商的用户数量 n_1^* 和虚拟运营商的用户数量n_2^*随服务优先级（图18中的$1-\gamma$ 和图19中的 γ）变化的情况，其中 δ取不同值。

可以看出，当优先级高于 $1/2$时，随着优先级提高，用户数量会从最大值开始下降。这与价格（例如图16中的 p_1^*）上涨的情况一致；价格上涨似乎产生了负面影响，而服务质量的改善并未抵消这一影响。增加 δ 会使 n_1^* 增加、 n_2^*减少，这与虚拟运营商应支付的每用户费用增加相一致。

另一方面，当优先级值低于 $1/2$ 时，用户数量会随着优先级的提高而减少，直到超过某个优先级阈值后骤降为零。δ 的影响是混合的，取决于优先级的数值。在低于 $1/2$ 但并非非常低的某一段优先级范围内，用户数量之所以为零，是因为另一家运营商用户群的价格相对较低且服务质量较高，同时自身用户群的服务质量相对较低，两者共同作用所致。请注意，在这一段优先级范围内，另一家运营商用户群的用户数量达到最大值。

最后，图 20 展示了用户总数量，即 $n_{1m}^* + n_{2m}^*$。当 γ 等于 $1/2$ 时，订阅率达到最大值，这与垄断商业模式得出的结果不同。

结论是，当两个用户群体具有相同的敏感度时，对用户最有利的网络配置是两个用户群体均等共享优先级。

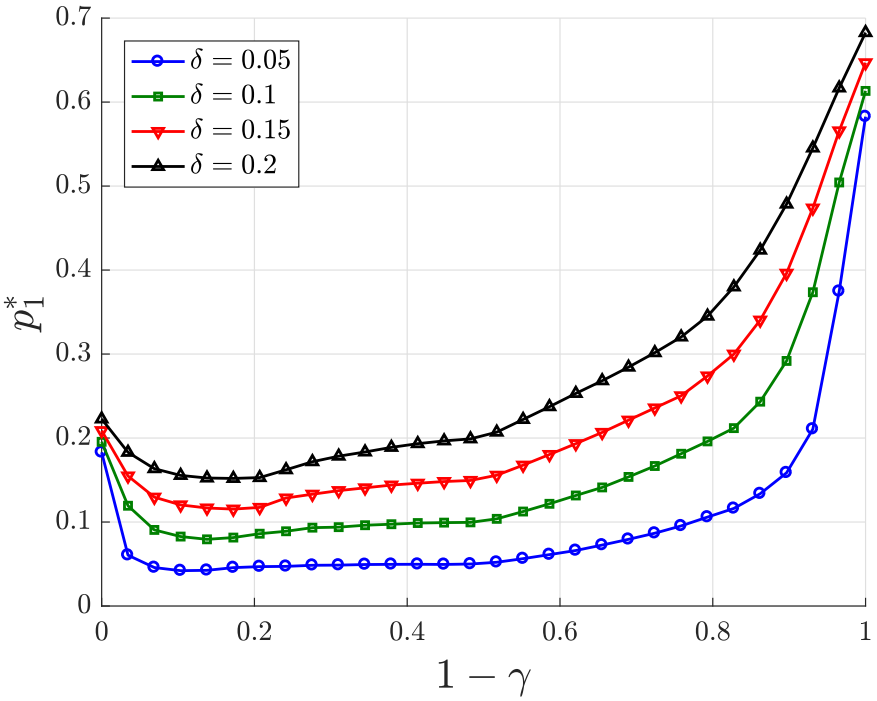


图 16：价格 p_1^* 与 $1-\gamma$ 的关系，适用于 δ 的不同取值（策略性）

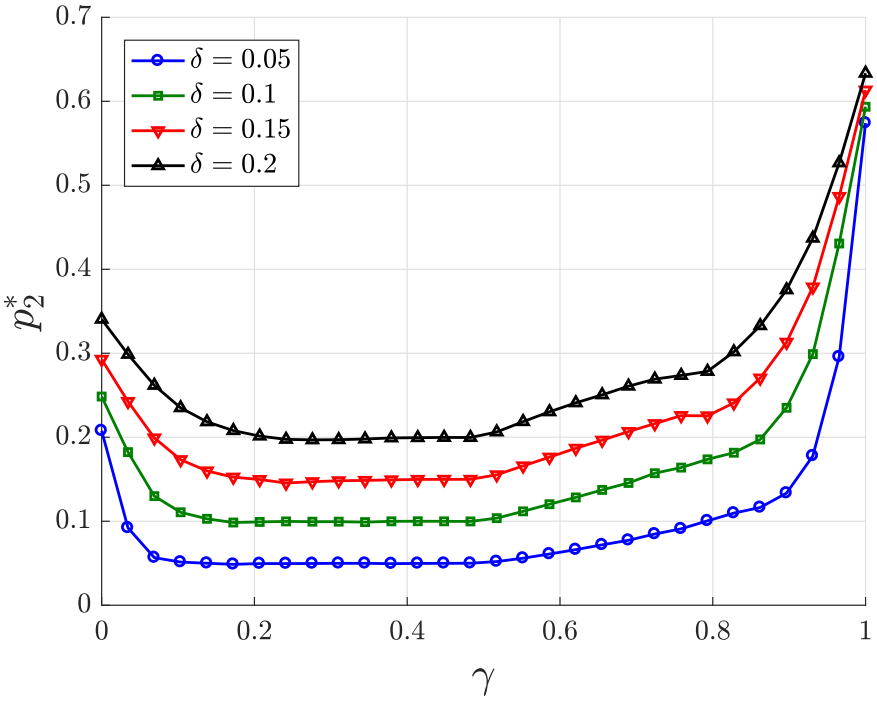


图 17：价格 p_2^* 与 γ 的关系，适用于 δ 的不同取值（策略性）

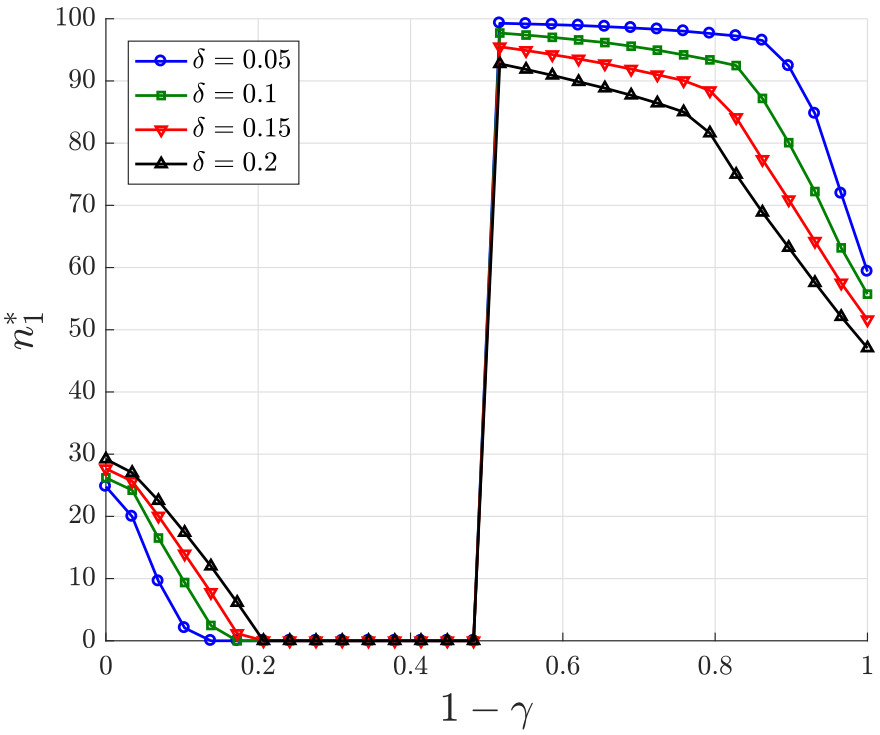


图 18：用户数量 n_1^* 随 $1-\gamma$ 变化的情况，不同 δ 取值下（策略性）

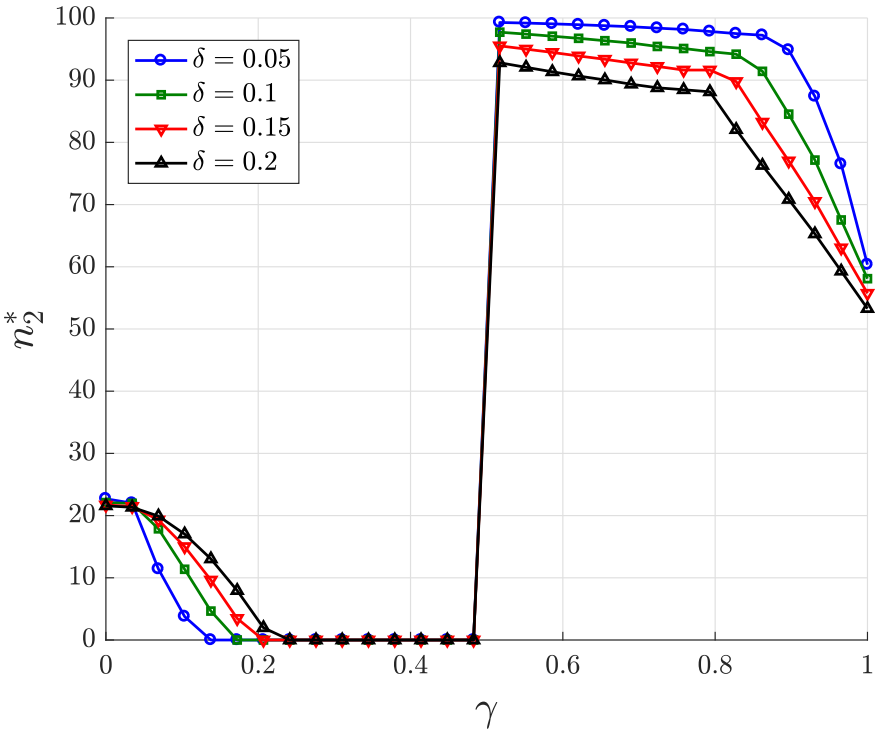


图 19：用户数量 n_2^* 随 γ 变化的情况，不同 δ 取值下（策略性）

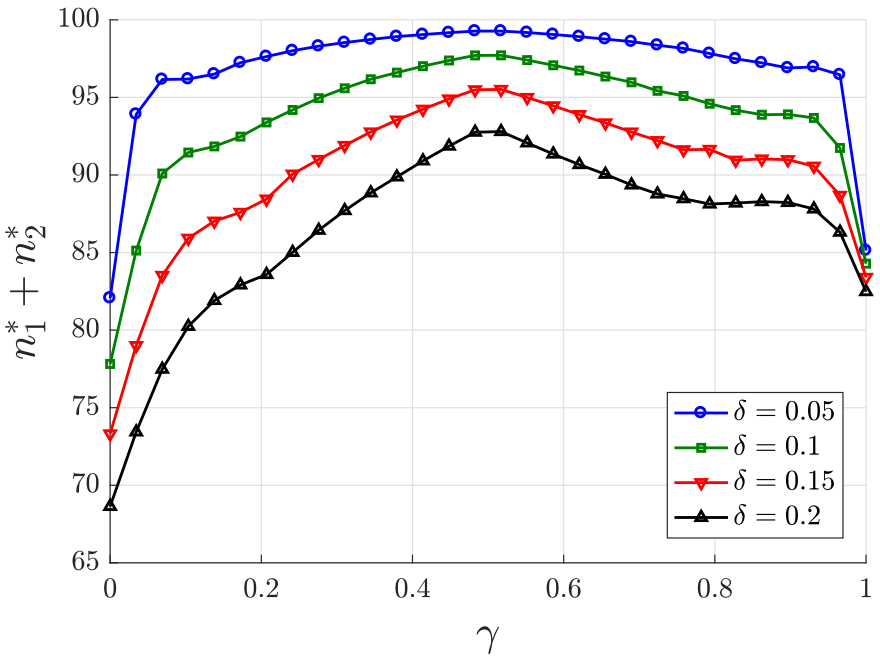


图20：不同 δ 取值下，总用户数量随 γ 的变化（策略性）

利润。 图21和图22分别展示了均衡时网络运营商的利润 Π_1^* 和虚拟运营商的利润 Π_2^*随服务优先级的变化情况（$1-\gamma$ 见图21， γ 见图22），并比较了不同 δ取值下的结果。

可以看出，优先级对利润的影响与其对价格的影响类似，即除优先级非常低的情况外，优先级越高，利润越高。用户数量对利润也有调节作用：当图19中的 n_2^* 为零时，图22中的利润 Π_2^* 为零。然而，当图18中的 n_1^* 为零时，图21中的利润 Π_1^* 并非为零，因为网络运营商还可从虚拟运营商的用户群中获得收入，而该用户群在图19中并非为零。

虚拟运营商向网络运营商支付的费用 δ 对利润 Π_1^* 的影响在图 21 中很明显： δ越高， Π_1^*就越高。对利润 Π_2^* 的影响（图 22）则不那么明显：只有在优先级较高时， δ越高， Π_2^*才越低。

结论是，对于具有相同敏感度的用户群，最有利于各运营商的网络配置，是将所有优先级都给予各自的用户群。这与从用户角度来看最有利的配置相矛盾。

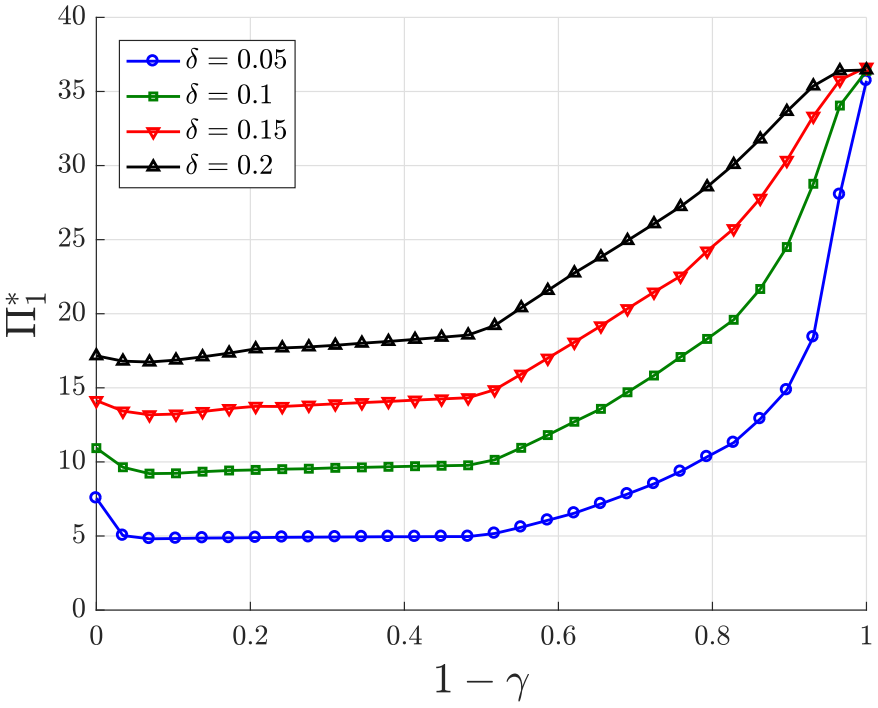


图 21：不同 δ（策略性）取值下，网络运营商的利润 Π_1^* 随 $1-\gamma$ 变化

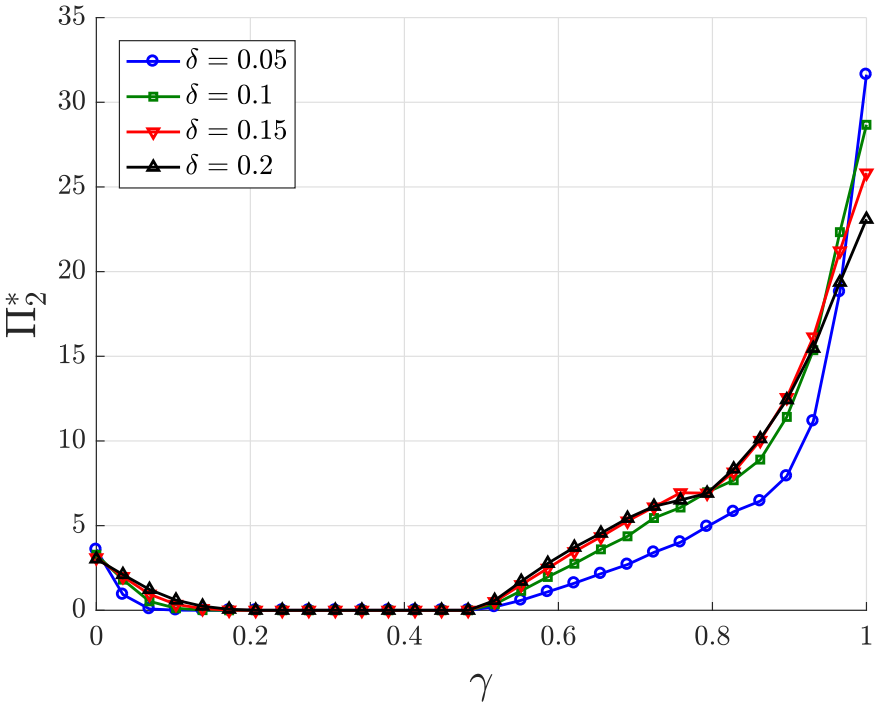


图 22：不同 δ（策略性）取值下，虚拟运营商的利润 Π_2^* 随 γ 变化

4.2.2. 具有不同敏感度的用户群

参数设为 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$，并分析优先级 γ 对均衡的影响。参数 δ 设为 0.15。

价格。图 23 和图 24 分别展示了均衡中网络运营商设定的价格 p_1^* 和虚拟运营商设定的价格 p_2^*，它们是服务优先级的函数（图 23 中为 $1-\gamma$，图 24 中为 γ），且对应不同的 α_2取值。

可以看出，只要$\alpha_2 \geq 0.4$，其情况与用户群具有相同敏感度的情形相似：当优先级取值趋近于 0 和 1 时，两种价格都会上升。

用户数量。图 25 和图 26 分别展示了均衡中网络运营商的用户数量 n_1^* 和虚拟运营商的用户数量 n_2^*，它们是服务优先级的函数（图 25 中为 $1-\gamma$，图 26 中为 γ），且对应不同的 α_2取值。

可以看出，n_1^*会从最小值骤然转变为最大值，这与两个用户群体具有相同敏感度时的情形相似。不过，最小值并不总是零。发生转变时的优先级取决于 α_2：α_2越高，转变优先级也越高。

最后，图 27 显示了用户总数，即 $n_{1m}^* + n_{2m}^*$。当 γ取中间值时，订阅率达到最大；在敏感度相同的情形下，这个值为 $1/2$ 。不过，这个中间值取决于 α_2：α_2越高，使订阅率达到最大的中间值也越高。

结论是，当两个用户群体的敏感度不同时，对用户而言最有利的网络配置是由两个用户群体共享优先级，并按照取决于敏感度差异程度的比例进行分配。

利润。图 图 28 和 29 分别展示了均衡状态下网络运营商的利润 Π_1^* 和虚拟运营商的利润 Π_2^*，作为服务优先级的函数（$1-\gamma$ 见图 28，γ 见图 29），针对不同的 α_2 值。

可以看出，优先级对利润的影响与敏感度相同的情形类似，也就是说，优先级越高，利润越高，但优先级极低时除外（网络运营商除外，$\alpha 2 = 1$ 且优先级较高时亦除外）。

此外，随着虚拟运营商的用户群敏感度相对提高，虚拟运营商的利润下降，而网络运营商的利润上升。

结论是，对于具有不同敏感度的用户群体而言，每个运营商最有利的网络配置都是将全部优先级分配给其自身用户群的配置；当用户群体具有相同敏感度时，所得出的结论也是如此。这一结论与从用户角度来看最有利的配置相矛盾。

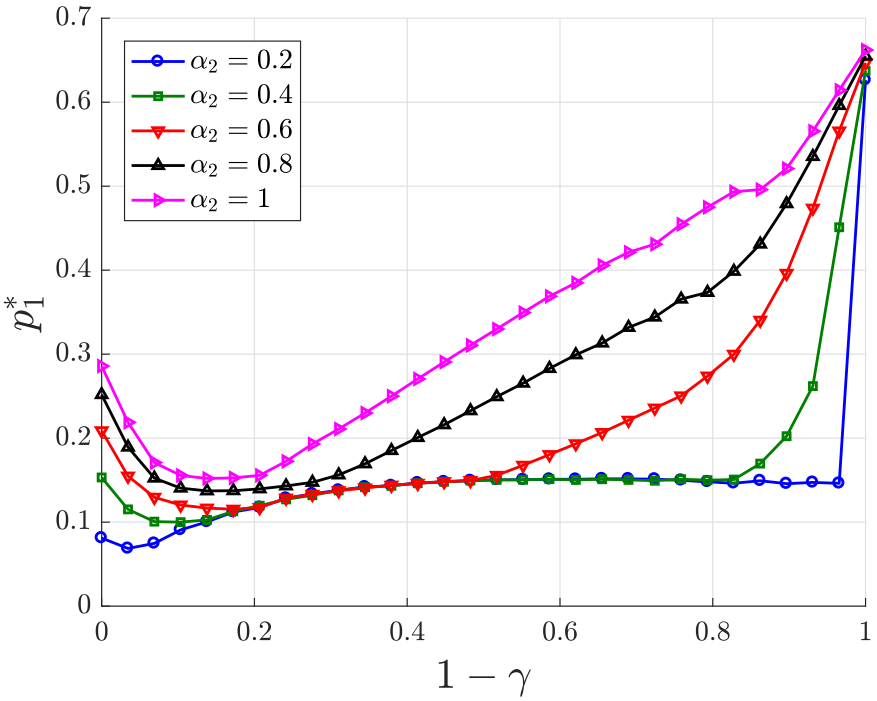


图23：价格 p_1^* 随 $1-\gamma$ 变化，针对 α_2 的不同取值（战略情景， $\alpha_1 = 0.6$， $\delta = 0.15$ ）

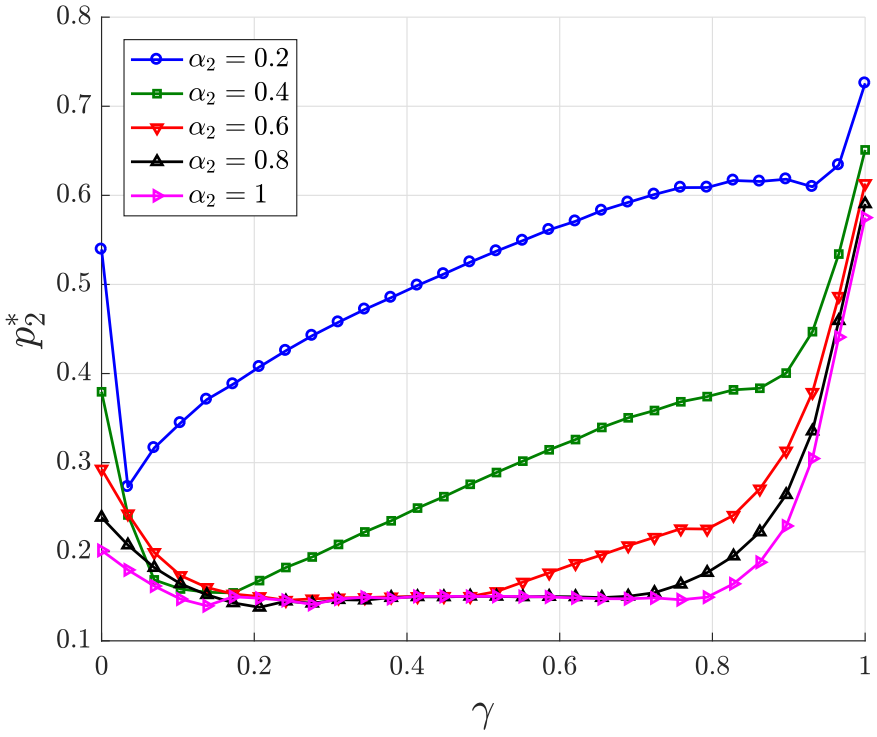


图24：价格 p_2^* 随 γ 变化，针对 α_2 的不同取值（战略情景， $\alpha_1 = 0.6$， $\delta = 0.15$）

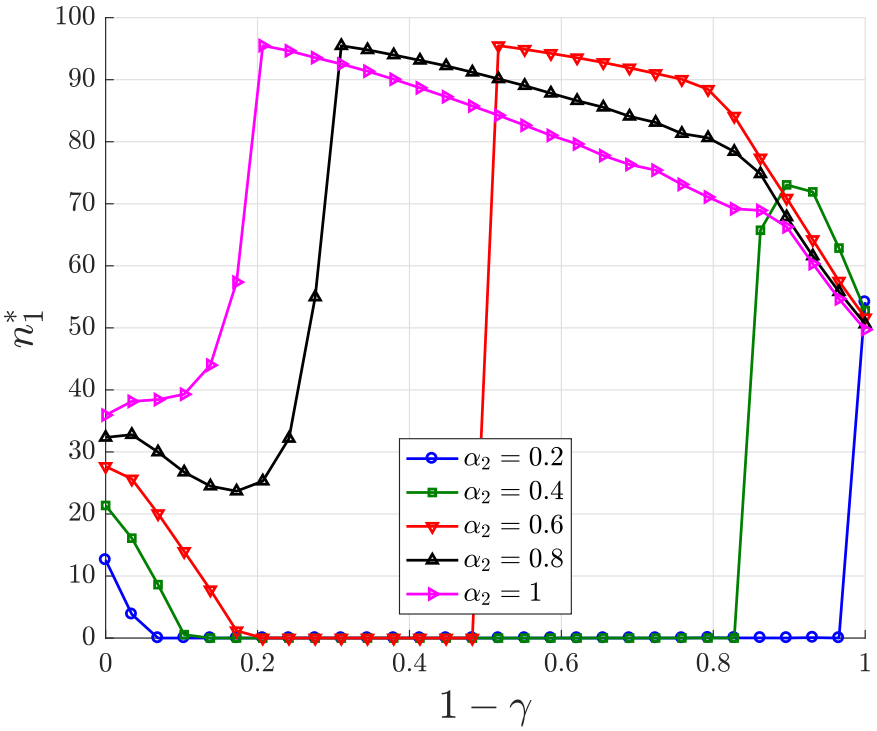


图 25：在不同 α_2 值下，用户数量 n_1^* 随 $1-\gamma$ 的变化（战略情景，$\alpha_1 = 0.6$，$\delta = 0.15$）

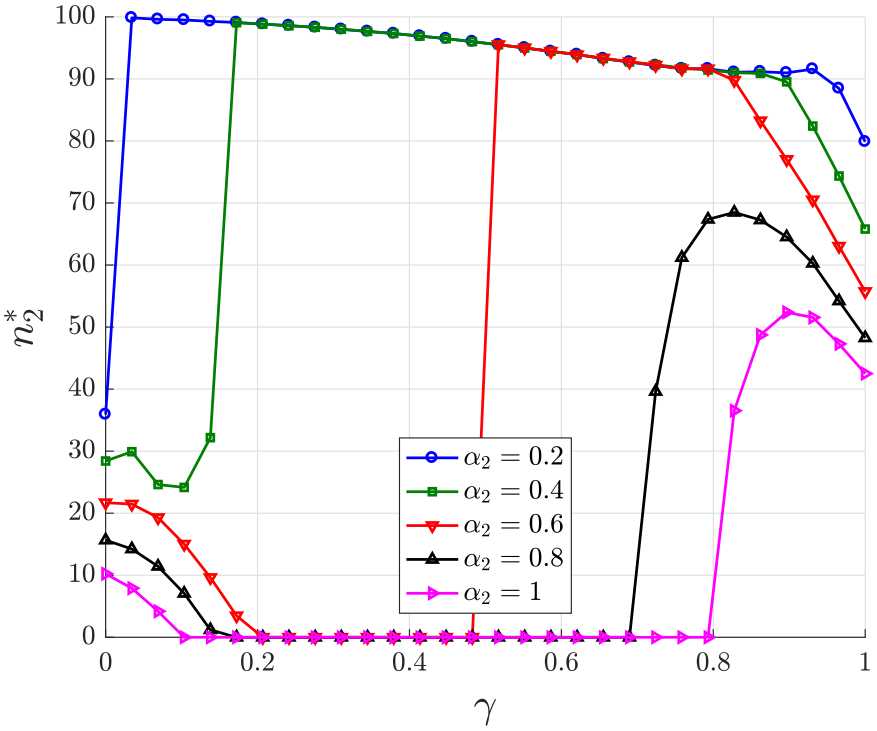


图 26：在不同 α_2 值下，用户数量 n_2^* 随 γ 的变化（战略情景，$\alpha_1 = 0.6$，$\delta = 0.15$）

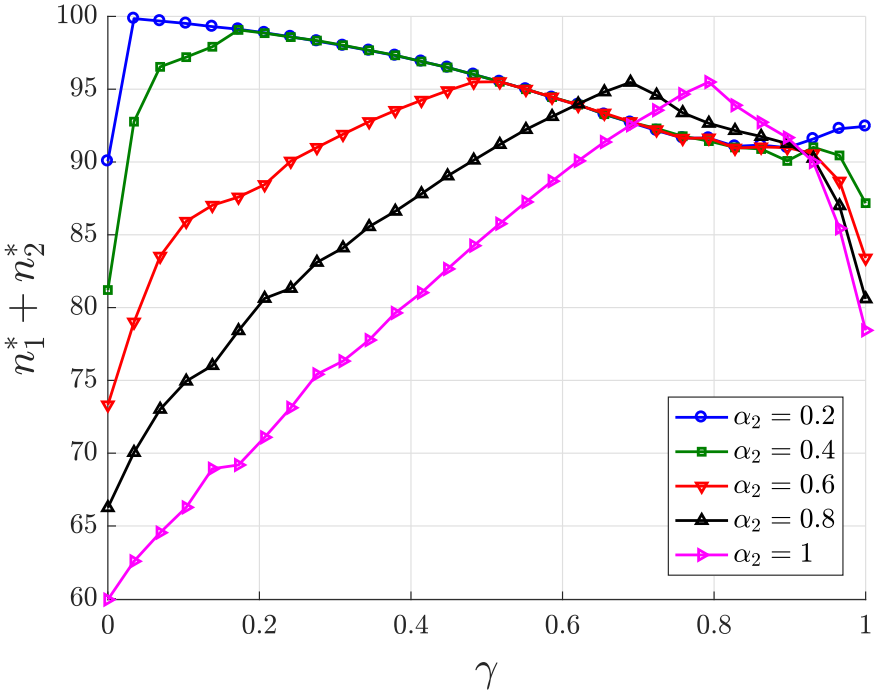


图 27：T otal number of subscribers as a function of γ for different values of α_2 (策略性情景, $\alpha_1 = 0.6, \delta = 0.1$ 5)

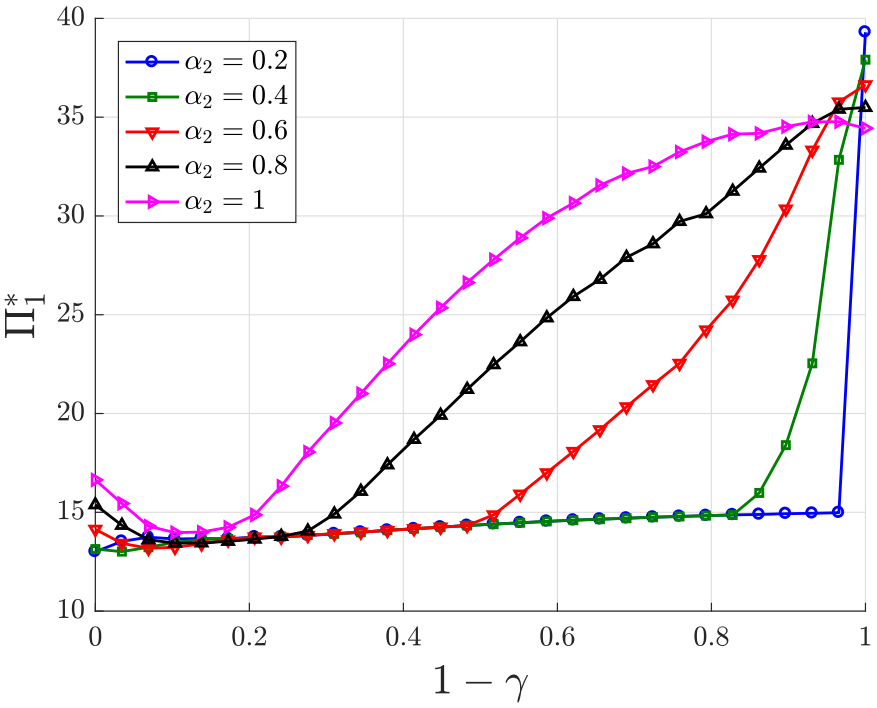


图 28：网络运营商的利润 Π_1^* as a function of $1 - \gamma$ for different values of δ (策略性)

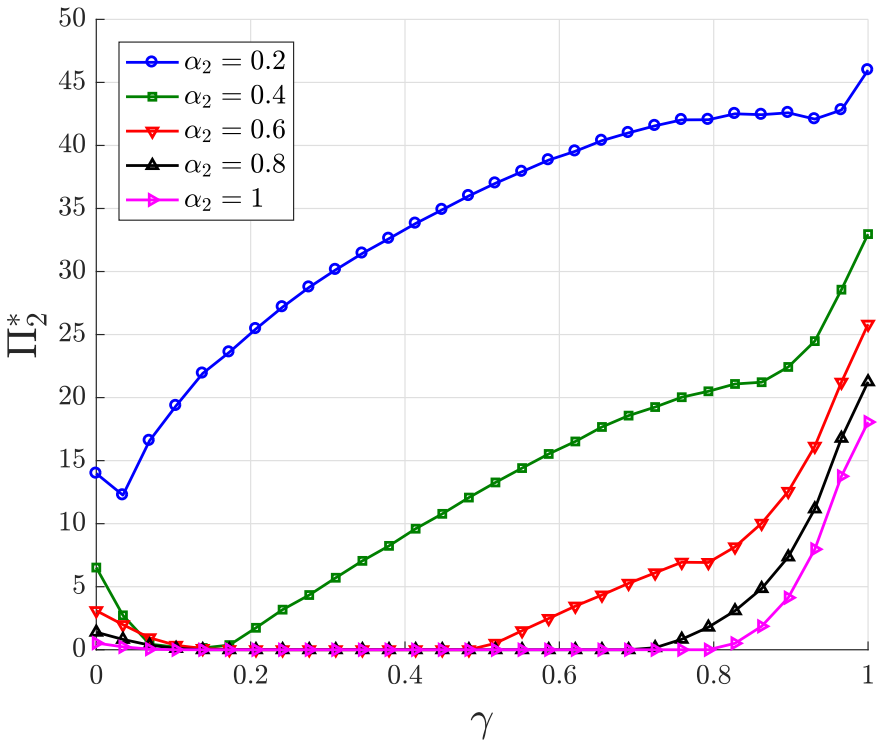


图29：不同 δ 值（策略性）下，VO 的利润 Π_2^* 随 γ 的变化

4.3. 商业模式可行性

本节将讨论第 2 节提出的商业模式在何种条件下可行，即能否为 NO 和 VO 双方提供激励。首先讨论垄断商业模式，然后讨论策略性商业模式。

4.3.1. 垄断商业模式

本文旨在寻找这样的条件：NO 有激励向 VO 的用户群提供服务，而 VO 也有激励让 NO 提供服务。

如果垄断情景下的利润 Π_m^* 大于或等于基准情景下的利润 Π_0^*，NO 就会同意向 VO 的用户群提供服务：

$$\Pi_m^* \geq \Pi_0^*. \tag{48}$$

只要自身处境不比基准情景更差，虚拟运营商就会同意由网络运营商向其用户群提供服务。由于在基准情景和垄断情景下，虚拟运营商都不提供服务，也没有任何收入，因此这一条件始终成立。

更现实的分析会要求虚拟运营商向网络运营商支付一笔一次性付款 $m > 0$，以使后者接受该协议。在这种情况下，条件 (48) 将变为

$$\Pi_m^* + m \geq \Pi_0^*, \tag{49}$$

该条件在以下情况下可行

$$\Pi_m^* > \Pi_0^*. \tag{50}$$

图30、图31和图32分别展示了当 VO 的用户群敏感度 α_2 等于 0.4、0.6 和 0.8 时，Π_m^* 随 γ 变化的情况。这三幅图中，NO 的用户群敏感度为 $\alpha_1 = 0.6$。值 Π_0^*

也以一条单一的水平线表示（与 α_2 无关；与 γ 无关）。战略商业模式的利润也有表示，但将在下一小节讨论。对于每个 γ 和 α_2，条件（50）均成立。然而，随着 α_2 增大，且 γ 接近 $1/2$，激励会变得更加稀缺；也就是说，VO 的用户群敏感度越高，且两个用户群所获得服务的优先级越相似，激励就越稀缺。

4.3.2. 战略商业模式

现在来探讨在什么条件下，网络运营商有动力默许虚拟运营商进入，而虚拟运营商有动力签订基础设施共享协议。

同样，如果战略情景下的利润 Π_1^* 大于或等于基准情景下的利润 Π_0^*，网络运营商就会默许虚拟运营商进入：

$$\Pi_1^* \geq \Pi_0^*. \tag{51}$$

如果战略情景下的利润 Π_2^* 大于或等于其不进入市场时的利润（假设为零），虚拟运营商就会进入市场并同意支付基础设施共享费用：

$$\Pi_2^* \geq 0. \tag{52}$$

如果不满足条件（51），虚拟运营商可以同意向网络运营商支付一次性款项 $m > 0$（除每用户费用 δ 外），以使后者默许其进入，即：

$$\Pi_1^* + m \geq \Pi_0^*. \tag{53}$$

但现在，条件（52）应改写为

$$\Pi_2^* - m \geq 0. \tag{54}$$

根据（53）和（54），若满足以下条件，即可保证支付一次性付款 m

$$\Pi_1^* + \Pi_2^* > \Pi_0^*. \tag{55}$$

图30、图31和图32还展示了不同 δ取值下的情况 $\Pi_1^* + \Pi_2^*$。只有当参数 α_2、 δ 和 γ取某些值时，才满足条件（55）。具体而言，

- 给定 α_2和 δ，当$\gamma \in [0, \gamma$处于一定范围内时，条件（55）成立：$\gamma \in [0, \gamma_{低}] \cup [\gamma_{高}, 1],$，也就是说，两个用户群体的优先级差异足够大。
- 对于某些 α_2 和 γ，当 δ足够高时，条件（55）成立，也就是说，虚拟运营商（VO）向网络运营商（NO）支付的费用足够高。
- 对于某些 δ 和 γ，当 α_2足够低时，条件（55）成立，也就是说，虚拟运营商（VO）的用户敏感度足够低。

结论是，两种商业模式都可行。垄断商业模式在所有参数设定下均可行；策略性商业模式则在以下情况下可行：优先级不同、进入者用户的敏感度不高，且费用较高。

以下对这两种商业模式进行比较。从利润的角度来看，图30–32表明，垄断商业模式为网络运营商和虚拟运营商提供的激励均强于策略性商业模式，因为 $\Pi_1 + \Pi_2 \leq \Pi_m$ 对于每种参数设定都是如此。这个结果显而易见，因为策略博弈总是会产生小于或等于最优结果的结果。

也可以从用户的角度比较这两种商业模式。更具体地说，可以比较每种商业模式所支持的用户数量。这一指标衡量了服务提供的效率。图33、34和35展示了 $n_1^* + n_2^*$ 在策略性商业模式（ δ取不同值时）和垄断商业模式下随 γ变化的情况。网络运营商的用户群的敏感度为 $\alpha_1 = 0.6$

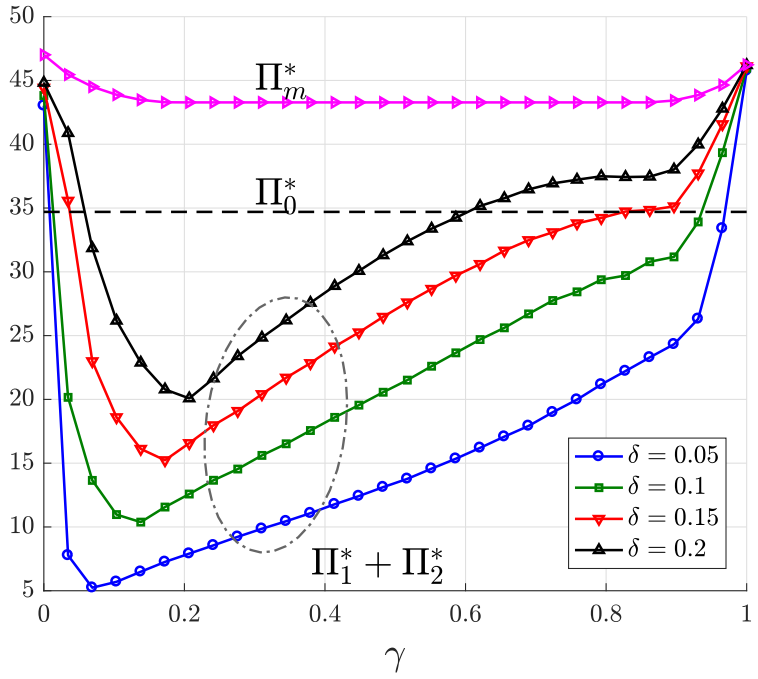


图30: $\Pi_1^* + \Pi_2^*$ 和 Π_m^* 是 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = 0.4$ 在不同 δ取值下关于 γ 的函数

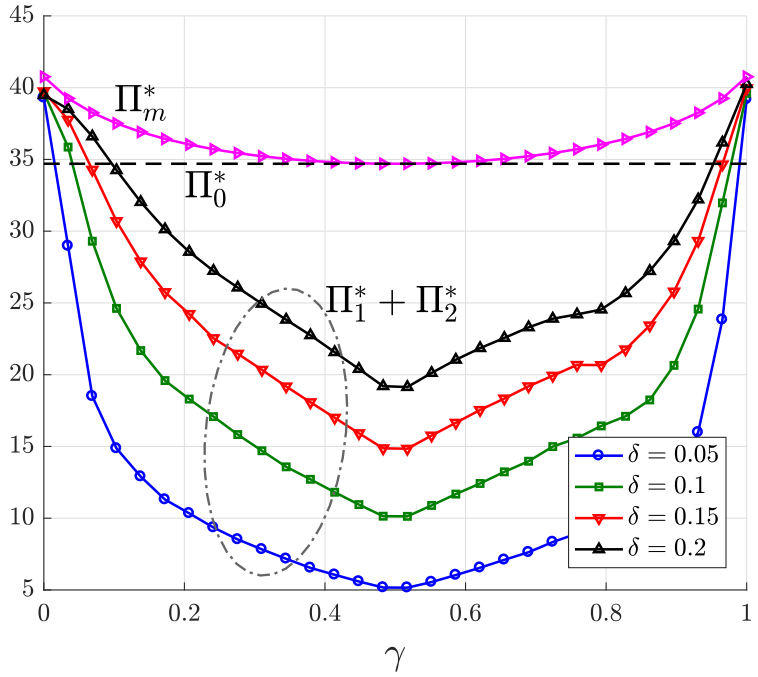


图31: $\Pi_1^* + \Pi_2^*$ 和Π_m^* 是 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = 0.6$ 在不同 δ取值下关于 γ 的函数

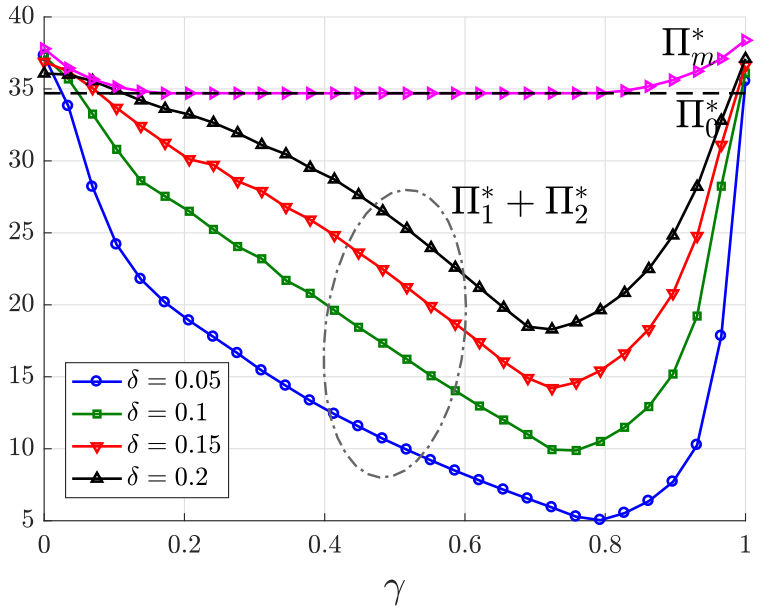


图 32: $\Pi_1^* + \Pi_2^*$ 和 Π_m^* 随 γ 变化的关系，其中 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = 0.8$ 取不同的 δ值

在这三幅图中，VO的用户群的敏感度 α_2 分别为 0.4（图 33）、0.6（图 34）和 0.8（图 35）。可以看出，当 γ 高于一个取决于 α_2 和 δ的阈值时，战略商业模式下的用户总数大于垄断模式下的用户总数。对于给定的 α_2， δ越高，阈值也越高。对于给定的 δ， α_2越高，阈值也越高。

因此可以说，从用户的角度来看，当新进入者用户群体的敏感度不高，和/或其服务优先级足够高，且VO支付的费用不太高时，战略商业模式更为理想。换句话说，在这种设置下，战略商业模式中的系统效率更高。

5. 结论与未来工作

我们提出了两种商业模式，通过共用网络基础设施为两个用户群体提供服务。网络资源根据优先级共享协议分配给这两个用户群体，该协议可通过网络切片来实现支持。在一种名为垄断的的商业模式中，网络运营商为两个用户群体提供服务。在另一种名为策略性的的商业模式中，网络运营商为其用户群提供服务，而虚拟运营商则为其用户群提供服务，并向网络运营商支付按用户收费的费用。

研究表明，两种商业模式都是可行的，因为与基准情景相比，它们都能为两家运营商提供激励；在基准情景下，只有网络运营商的用户群能够获得服务。垄断商业模式为运营商提供的激励强于战略商业模式，但从用户的角度来看，后者更可取，因为获得服务的用户数量更多。

这一结论为监管机构在存在现有网络运营商的市场中强制引入虚拟运营商提供了依据。

关于未来的研究方向，有三个尚待解决的问题值得一提。首先，在继续将 M/M/1-DPS 队列作为切片网络模型的同时，可以对新的商业模式进行建模和分析。例如，网络可以由批发网络运营商运营，也就是说，该运营商不向终端用户提供服务，而是向一组虚拟运营商提供容量。分析重点将是网络运营商与虚拟运营商之间的容量市场。其次，本文的分析涵盖了两种情景：一种是用户群体具有相同的敏感度，另一种则是它们

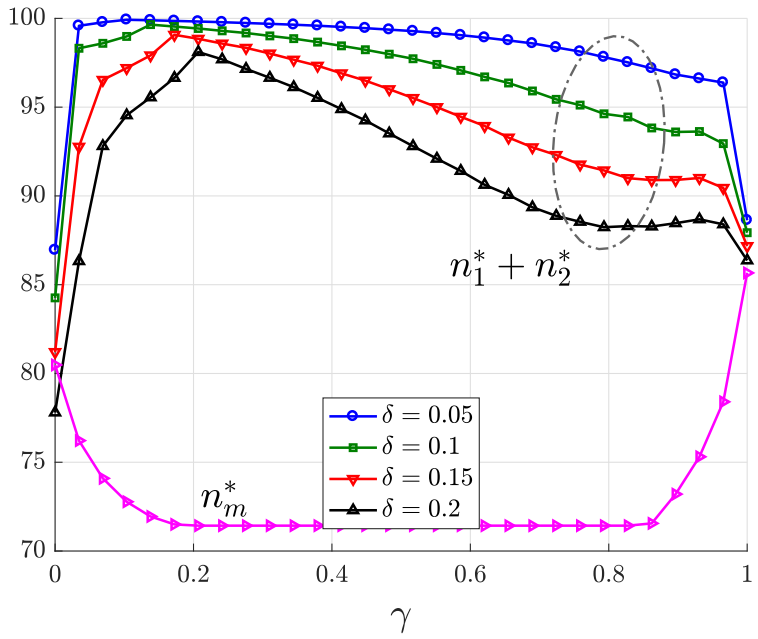


图 33：在策略性情景和垄断情景中，$n_1^* + n_2^*$ 随 γ 变化的函数关系，适用于 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = 0.4$ 以及 δ的不同取值

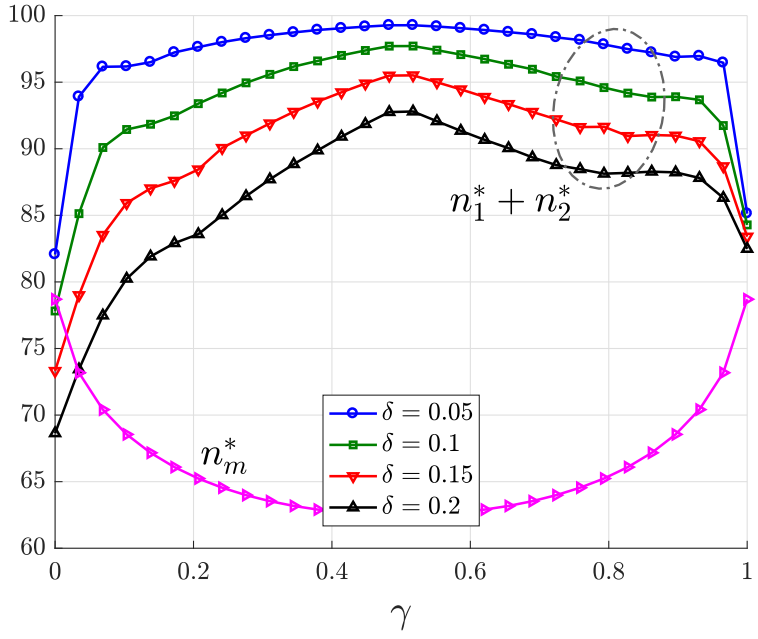


图 34：在策略性情景和垄断情景中，$n_1^* + n_2^*$ 随 γ 变化的函数关系，适用于 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = 0.6$ 以及 δ的不同取值

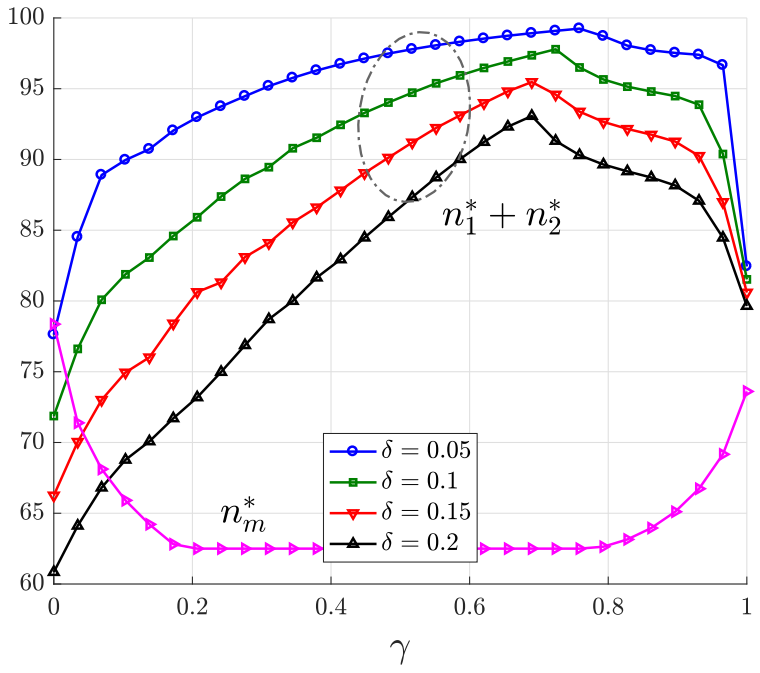


图 35： $n_1^* + n_2^*$ 在策略性和垄断情景下随 γ 变化的情况，针对 $\alpha_1 = 0.6$ 和 $\alpha_2 = 0.8$ 以及 δ的不同取值

敏感度各不相同。所有用户的效用表达式都相同。通过为每个用户群建立不同的效用表达式模型，可以更好地评估用户异质性。第三，文献中经常关注的一个问题是投资激励。事实上，如果能够简化均衡表达式，本文所做的分析可以进一步扩展，将网络运营商的投资决策纳入其中；网络运营商会预先考虑每种商业模式下两阶段定价博弈的均衡。

声明 利益声明、致谢、资金来源和作者贡献

利益声明：无。

作者感谢 Angel Sanchis-Cano 在本研究早期阶段给予的协助。

本研究得到了西班牙科学、创新与大学部（MCIU/AEI）和欧盟（FEDER/UE）通过资助项目 PGC2018-094151-B-I00 提供的支持，并部分得到了厄瓜多尔慈幼会理工大学为第一作者颁发的博士奖学金的支持。

E. Sacoto 参与了形式分析、方法论、调查研究和原稿撰写。L. Guijarro 参与了概念构思、调查研究、审阅与编辑、监督以及经费筹措。J.R. Vidal 参与了调查研究、数据整理、审阅与编辑以及可视化工作。V. Pla 参与了形式分析、审阅与编辑以及经费筹措。

参考文献

[1] NGMN联盟，《5G白皮书》，《下一代移动网络》白皮书（2015） .

[2] P. Naor，通过征收通行费调节队列长度，《计量经济学》：计量经济学会期刊（1969）15–24。

[3] G. Allon，A. Federgruen，具有通用排队设施的服务竞争，《运筹学》56 (4)（2008）827–849。[4] R. Hassin，M. Haviv，排队还是不排队：排队系统中的均衡行为，第59卷，Springer Science & Business Media，2003。[5] R. Hassin，《理性排队》，Chapman and Hall/CRC，2016。[6] M. Mandjes，异质服务需求下的定价策略，《计算机网络》42 (2)（2003）231–249。[7] Y. Hayel，B. Tuffin，区分处理器共享队列中异质服务的定价，载于：国际网络研究会议，Springer，2005，第816–827页。[8] L. Guijarro，V. Pla，B. Tuffin，认知无线电网络中机会接入下的进入博弈：优先队列模型，载于：2013年IFIP无线日（WD），IEEE，2013，第1–6页。[9] A. Sanchis-Cano，L. Guijarro，V. Pla，J. R. Vidal，共用网络基础设施上HTC和MTC服务提供的经济可行性，载于：2017年第14届IEEE年度消费者通信与网络会议（CCNC），IEEE，2017，第1044–1050页。[10] E. J. Sacoto-Cabrera，A. Sanchis-Cano，L. Guijarro，J. R. Vidal，V. Pla，5G网络频谱共享背景下运营商之间的策略互动，《无线通信与移动计算》2018（2018）。[11] Y. Hayel，D. Ros，B. Tuffin，低于尽力而为的服务：定价与调度，载于：2004年IEEE INFOCOM会议，第1卷，IEEE，2004。[12] P. Reichl，B. Tuffin，R. Schatz，服务质量感知中的对数定律：微观经济学与心理物理学及体验质量的交汇点，《电信系统》（2011）1–14。[13] M. Maschler，E. Solan，S. Zamir，《博弈论》，剑桥大学出版社，2013。[14] J. G. Wardrop，道路交通研究的若干理论问题，《土木工程师学会会刊》1 (3)（1952年）325–362。