

无线电频谱拍卖与现代市场设计

——Paul Milgrom 2019 年南京讲座译介

俞宁 唐玉林 庞文哲*

2020 年诺贝尔经济学奖颁给了两位来自美国斯坦福大学的经济学家 Paul Milgrom 和 Robert Wilson，以表彰他们“改进了拍卖理论和发明了新拍卖形式”。其中最著名的案例是他们为美国联邦通讯委员会（FCC）设计无线电频谱拍卖的系列工作。Paul Milgrom 2019 年受邀在南京审计大学为“2019 博弈论国际会议暨第六届微观经济学研讨会”作主旨演讲“无线电频谱拍卖与现代市场设计”（Radio Spectrum Auctions & Modern Market Design），着重介绍了他近期在相关领域的工作。本文译介其主要内容。

Paul Milgrom 1948 年生于美国密歇根州底特律市，早年求学于斯坦福大学，获得统计学硕士和经济学博士学位，师从 Wilson。值得一提地，还有两位诺贝尔经济学奖获得者 Bengt Holmstrom 与 Alvin Roth 的博士导师也是 Wilson。Paul Milgrom 现任斯坦福大学经济系教授，早已当选美国国家科学院院士、美国国家文理学院院士，荣誉数不胜数。他在微观经济学多个重要领域做出了开创性的贡献，包括拍卖理论、市场设计、产业经济学、组织经济学、金融和博弈论等。截止到目前，他的论文 Google 学术搜索引用已超过十万。

Milgrom 在拍卖理论和市场设计方面享有盛誉。特别是，他对无线电频谱的分配做出了巨大贡献。1993 年，Milgrom, Wilson 和 McAfee 作为 FCC 的顾问设计了同步多轮拍卖来分配无线电频谱，并将其不断发展。相关工作可参考（McAfee 和 McMillan, 1996; Milgrom 等, 2006; Ausubel 和 Cramton, 2011）。2016 年，Milgrom 和 Segal 作为顾问设计的激励拍卖被 FCC 运用到广播电视频谱拍卖中（Milgrom 和 Segal, 2017）。2019 年，Milgrom 团队创新性地提出了利用 Fuel 竞标语言来解决组合拍卖中存在的问题（Milgrom 和 Bichler, 2020）。

1 无线电频谱拍卖中的挑战

无线电频谱是频率范围为 30Hz 到 300GHz 的电磁频谱，此频率范围内的电磁波（也被称为无线电波）被广泛运用于现代技术，尤其是电信领域。1990 年，美国等西方国家就已经开始普遍使用拍卖来分配无线电频谱资源。在拍卖过程中，由于无线电频谱的一些特征，其拍卖设计富有挑战性。

首先，频谱牌照（频谱的使用权）是异质的。标准经济学通常假设所有商品都是同质的。但是在美国实际分配频谱的过程中，这些频谱牌照会因所在的地理区域不同、覆盖的范围不同而不同。所以通过供给等于需求来找到市场出清价格并不是正确的分析框架。

* 俞宁，曾于 2015 年获斯坦福大学经济学博士学位，现任南京审计大学社会与经济研究院教授，作者电子邮箱：yu1266@gmail.com；唐玉林和庞文哲现为南京审计大学经济学院硕士生。本文系作者根据 Paul Milgrom 教授在南京审计大学“2019 博弈论国际会议暨第六届微观经济学研讨会”的发言整理而成。作者感谢国家自然科学基金面上项目（No. 72073072）、江苏特聘教授科研基金、深圳大数据研究院开放合作研究课题（No. 2019ORF01015）、国家自然科学基金重点项目（No. 72033004）的资助。

其次，不同牌照对于每个买方的价值不同。对于买方来说，每个牌照的价值还取决于其他牌照的价值，也就是说不同牌照之间存在着替代或者互补的关系。例如，一位竞标者想在特定的地区提供电话服务，对他来说也许这些频谱牌照是可以相互替代的；如果另一位竞标者想竞拍相同牌照以跨地区提供服务，那么这对牌照可能是互为补充的。

由此，在传统的拍卖机制下可能出现帕累托无效的结果。作为监管者，目标通常都是保证分配的结果是有效率的，但这些特征的存在可能导致并不存在一个市场出清价格。举例来说¹，假设存在两个竞标者 1 和 2，竞拍两种商品 A 和 B。竞标者 1 愿意为商品 A 或者 B 支付 10，愿意为商品 A 和 B 的组合支付 12；竞标者 2 愿意为商品 A 或 B 单独支付 0，但愿意为 A 和 B 的组合支付 15。这可能是出于以下情况：竞标者 1 是已经存在的通信服务提供商，他想获得一个牌照（A 或 B）来扩大他的服务能力。竞标者 2 是一个行业新进入者，他需要同时获得两个牌照（A 和 B）才能建立有利可图的通信服务，这时商品 A 和 B 是互补的。

Buyer	Value of A	Value of B	Value of AB
1	10	10	12
2	0	0	15

表 1 竞标者 1 和 2 的偏好（本表来自于 Milgrom 演讲幻灯片）

为得到有效的市场结果，需要最大化牌照 A 和 B 的价值，也就是说应该让竞标者 2 同时拍下 A 和 B。但是当试图为 A 和 B 设置单独的价格时，为满足竞标者 2 会同时拍下 A 和 B 且竞标者 1 不会拍下 A 或 B，价格必须同时满足不等式：

$$pA + pB \leq 15 \quad (1)$$

$$pA \geq 10, pB \geq 10 \quad (2)$$

显然（1）、（2）式无法同时成立，所以此时市场出清价格并不存在。这就要求对拍卖形式进行创新以获得有效结果。此外，在实际的拍卖设计中，还会遇到同频道干扰、复杂的买方偏好和计算困难等棘手问题。Milgrom 教授以他参与设计的激励拍卖和 C 频段提案为例，展示了他是如何通过拍卖形式的创新来解决这些困难的。

2 激励拍卖

卫星、无线电、移动电话和广播电视都被授权了不同的频谱，而随着移动互联网的发展，无线电频谱作为一种不可再生资源正变得匮乏。UHF 是频率范围为 300MHz 到 3GHz 的频段²，在这个频段下的发射天线很小，适用于便携设备。故 UHF 频段很适合无线宽带。激励拍卖的目的在于激励在 UHF 频段的广播电视公司出让其频谱使用权，以满足日益增长的无线行业对频谱的需求，提高国家的宽带服务能力并为政府创造收入。

2010 年，联邦通信委员会（FCC）在国家宽带计划中提出了拍卖的想法。国会在 2012

¹ 本例来自 Milgrom 演讲。

² 频段是人为规定的频率范围，如 UHF 频段是国际电信联盟规定的频率范围为 300MHz 到 3GHz 的频段，VHF 则为 30MHz 到 300MHz。

年授权了 FCC。接下来的几年中，在顾问团队的参与下，FCC 勾勒出了首个激励拍卖方案。此双向拍卖始于 2015 年底，FCC 从广播电视公司购买频谱牌照然后出售给无线宽带公司。

整个过程包含三个相互关联的部分：第一是逆向拍卖（Reverse Clock Auction）。广播电视公司将自愿决定是否将其频谱权利出售给 FCC，并通过向下竞价以出让其频谱使用权。第二，正向时钟拍卖（Forward Clock Auction）。无线电宽带提供商将向上竞价购买频谱使用权。第三，重新打包规划（Repacking）。未出让频谱使用权的广播电视公司可以选择让电视台共享 UHF 频段或迁移到 VHF 频段并获得一笔赔偿金。当将电视台分配至新的频道³时，为避免同频道干扰，所有未被拍卖的频谱都会被强制性重新打包规划。

2.1 激励拍卖中的挑战

与以前的双向拍卖相比，激励拍卖的三个技术特征使其更具挑战性。

第一，双向拍卖的项目存在异质性。无线宽带牌照和广播电视牌照在功率限制、覆盖区域、带宽、抗干扰方面都是不同的。此外拍卖方还需要考虑平衡效率、成本及预算约束，这使得定价和确定买卖牌照的数量都极其困难。

第二，在分配频谱时，需要考虑同频道干扰的问题。根据美国联邦通信委员会 OET 公告 69 号（FCC, 2004）中对于电视台信号覆盖和干扰的评估方法，将美国像素化为 1000 万个单元，每个大约一平方千米。如图 1，对于每个电视台，我们需要弄清每个像素的信号强度，然后对于任意给定的分配方案，确定何时电视台之间会出现干扰。FCC 制定了一条规则：在新的分配方案下，任何正在广播的电视台都有权获得不超过其现有客户 0.5% 的干扰，即如果任何一对电视台之间的干扰量低于 0.5%，则是可以接受的。

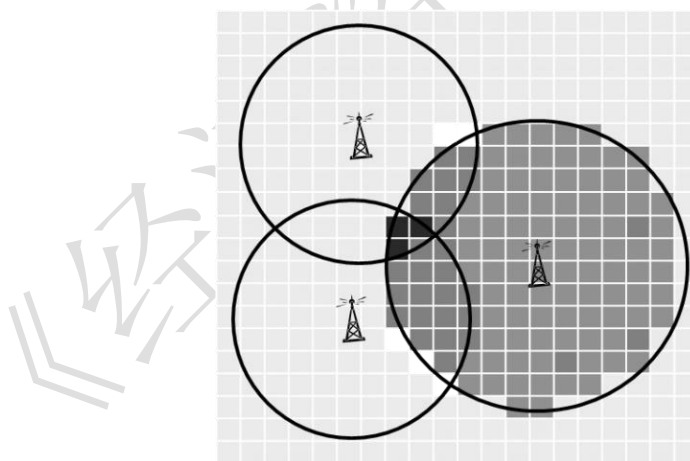


图 1 电视信号的覆盖与干扰示例（本图来自于 Milgrom 演讲幻灯片）

然后，可以得到这样一个图表：此图中的每个节点都代表一个电视台的位置，连接每两个节点的每条线表示不可能在不产生干扰的情况下将两个站点分配给同一频道。任意一个电视台（位于图中央的节点）所受的同频道干扰如下图 2 所示。

³ 在广播中，频道是由主管机构分配的特定无线电频率，用于无线电台或电视频道的播出。

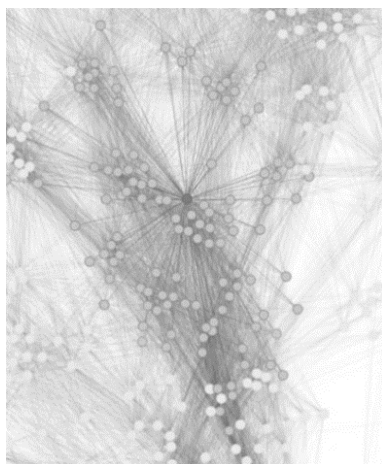


图 2 同频道干扰图示（本图来自于 Milgrom 演讲幻灯片）

结果是，在美国东部和南部，表示干扰的连线非常密集，而在西海岸的干扰连线几乎是分开的。图 3 显示了大约 3000 个电视台、130000 个同频干扰约束。

如果有一种方法可以在不互相干扰的情况下为这些电视台分配频道，那么一组电视台可以全部保持在播出状态。如果存在干扰，则无法分配相同的频道。这种情况下的频谱分配问题类似于图着色问题³，是一个 NP 完全问题。它意味着随着问题所涉及的电视台数量越来越多，解决问题的时间将成指数增长，这时的频谱分配就是复杂且难以解决的。

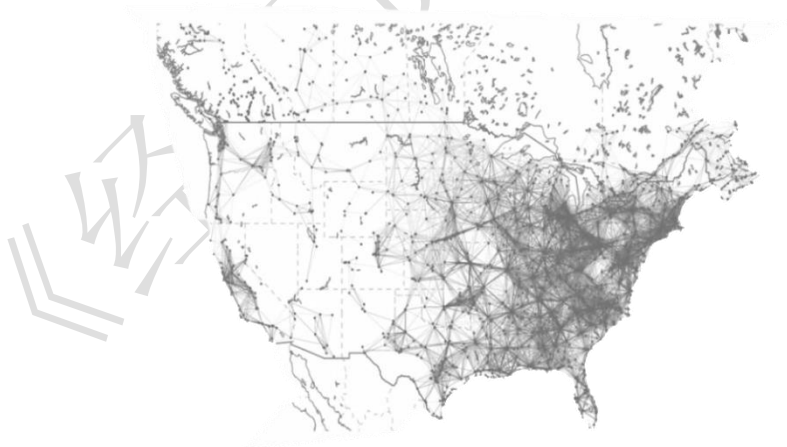


图 3 全境⁴范围内的同频道干扰图示（本图来自于 Milgrom 演讲幻灯片）

第三，拍卖项目的估价是未知的，需要从广播电视公司获取有关信息。在 FCC 最开始采用的维克里拍卖中，不仅计算十分复杂，也需要竞拍者对政府机构的拍卖程序有足够的信任（Milgrom 和 Ausubel, 2004）。

³ 图着色问题：如果有一个图并且有一组颜色，是否可以为图中的每个节点分配一种颜色使得不会有两个相连的节点颜色是相同的？这里的问题是：可以为每个电视台分配一个频道，以使没有两个相连的电视台在同一频道上吗？

⁴ 加拿大已同意参与频谱重新规划，以回收频谱供无线宽带使用并协调跨界干扰。

2.2 激励拍卖的经济学设计

1.1.1 反向时钟拍卖 (Reverse Clock Auction)。

反向时钟拍卖可以确定广播电视公司愿意出让频谱的价格。FCC 提供的价格从高价开始逐轮下降,在每轮中每位竞标者都要选择接受报价或者退出竞拍,每轮中选择放弃出让的竞标者将退出并不再参加下一轮拍卖。若已经没有合适的频谱可以分配给接受上一轮报价的广播电视公司,则报价停止下降。为确保交易是自愿的,FCC 初始的频谱回收目标与广播电视公司的选择是一致的。

具体来说,每一轮拍卖都会进行可行性检查,以分析在不造成干扰的情况下将拍卖中广播电视台分配至给定频段的可行性。如果在不造成干扰的情况下,电视台无法继续在原频段播出,则拍卖的报价无法继续降低,而此时回收频谱的数量就是 FCC 的初始目标。如前文提到,可行性检查是一个 NP 完全问题,Milgrom 教授通过与计算机科学家合作,开发出了专门的算法,有望在几秒钟内解决多达 99% 的潜在可行性检查问题 (Frechette 等, 2015)。如果在一定的时间无法得到结果,则视为不可行,即不能降低给此竞标者的报价。

反向时钟拍卖有多种好处:它是防策略 (strategy-proof) 的;大大减少了计算负担;可以通过灵活的设计以满足成本最小化目标和预算约束;存在市场出清价格;避免赢家诅咒等等 (Milgrom 和 Segal, 2015)。

1.1.2 正向时钟拍卖 (Forward Clock Auction)

正向时钟拍卖决定无线宽带提供商为购买频谱所需要支付的价格。FCC 从一个低价开始逐轮向上叫价,每轮中竞标者都要选择是否接受当前价格,选择不接受的竞标者将退出并不再参加下一轮拍卖。当竞标者对频谱牌照的需求大于供给(供给是反向拍卖中确定的)时,报价停止上升。

Milgrom 和 Segal (2015) 指出:正向时钟拍卖相比于 FCC 过去采用的同步多轮拍卖,大大节省了时间。

1.1.3 协调出清规则 (Coordination Clearing Rule)

协调出清规则将确定最终回收的频谱牌照数量。为使得购买和出售的牌照满足拍卖停止条件,FCC 在设计中使用一系列递减的频谱回收目标。

在反向拍卖和正向拍卖结束后,将检查是否满足拍卖停止条件:FCC 净收入(正向拍卖收入减去反向拍卖支出)是否足够高,或者是否满足 FCC 确定的某个额外条件,这个额外条件可能取决于回收的频谱数量或正向拍卖中的平均价格。若满足条件,至此拍卖结束。否则,将降低反向拍卖中回收频谱数量目标,以对正向拍卖中的项目进行调整。而因为更多的竞争,竞拍价格在反向拍卖中继续下降,在正向拍卖中将继续上升,直到停止条件达成。

作为 FCC 顾问团队的一员,Milgrom 教授和计算机科学家通力合作,运用巧妙、严谨的经济学设计解决了 FCC 激励拍卖带来的非寻常挑战,为美国无线宽带基础设施建设做出了巨大贡献。

3 C 频段提案一组合拍卖中的 FUEL 竞价语言

在无线电频谱拍卖中，竞标者的实际偏好是十分复杂的，组合拍卖在存在复杂的竞标者偏好下分配多个项目的情况中有着广泛应用。2019 年中期，美国的多家公司（这些公司主要业务为为商业电视提供卫星下行链路）共同提议使用一种名为 FUEL（Flexible Use and Efficient Licensing）的新型组合拍卖设计对其 C 频段频谱权利进行私下出售⁵。这种设计旨在克服通信和计算复杂性问题。

3.1 组合拍卖中的难题

我们熟知的经济学理论关注具有凸偏好和约束的特殊情况，很容易通过计算找到使得效用最大化的买卖价格，当没有这样的结构并且资源不可分割时，往往会选择使用 XOR 竞标语言的组合拍卖，其中竞标者可以简单地枚举出其所有可能的购买组合，拍卖方据此解决组合优化问题，以找出使得总出价最大化的分配。此类竞标方法曾被应用于无线电频谱拍卖（Bichler 和 Goeree, 2017）。但是随着分配的物品数量增大，基于 XOR 的拍卖方法变得不切实际，原因包括两个方面，第一是通信的复杂性问题（Nisan 和 Segal, 2006），比如说在 C 频段提案中，在 406 个地区分别需要 0—14 个牌照意味着竞标者要考虑 15^{406} 种不同的组合；第二是如此大规模的组合优化问题是难以计算的。为了解决计算问题，拍卖方会限制竞标者所提交的 XOR 竞标数量，而竞标缺失问题又会导致巨大的效率损失（Bichler 等, 2014）。

为了解决 XOR 竞标的低效性，FUEL（Flexible Use and Efficient Licensing）应运而生，在美国 C 频段提案中，Milgrom 教授团队创新性地使用了此种竞标语言。

3.2 FUEL 的主要创新—竞标组（Big group）

FUEL 的主要创新之处在于每个竞标者都可以构建名为竞标组（Big group）的竞标集合。每个竞标组均基于单一的“全有或全无”的组合出价（Base bid），这个组合被称作基本组（Base package），其对应的价格为基本价格（Base Price）。同时，竞标者在基本组的基础上进行调整，增加或减少自己需求的牌照：增加牌照时，竞标者将在基本价基础上提高价格；相应地，减少牌照时，竞标者将降低价格。调整后组合的隐含出价（Implied bid）等于基本价加上增加项的价格并减去减少项的价格。在 C 频段提案中，对于拍卖中 406 个地区分别有 14 种的牌照，且在每个地区的 14 种牌照是同质的。于是，竞标组用 5685 种调整可以表示出 15^{406} 种组合。并且，任何价格调整都通过地区进行汇总，以获得所有调整后的组合出价（即隐含出价）。这大大减少了通信和计算的复杂性问题（Milgrom, 2019）。

举例来说⁶。假设有 8 个地区，每个地区可分配 6 种同质的牌照。竞标者 1 愿意支付 2600 在所有地区各买三个牌照，这是他的基本组。然后，他表示愿意在基本组的基础上，增加或减少自己竞拍牌照的数量，相应地在基本出价基础上多付或少付一定的价格。他的竞标组就如表所示：

⁵ 2020 年 2 月，FCC 决定驳回对 C 频段频谱进行私人拍卖的提案，所以 FUEL 设计并未被采用。

⁶ 此例来自 Milgrom 的演讲

Bidder 1 Base price:2600								
#	Area	0	1	2	3	4	5	6
1	Dallas				Base bid	300	500	600
2	Houston				Base bid	300	450	
3	Austin				Base bid	300	450	
4	San Antonio				Base bid	100		
5	Loving			-200	Base bid			
6	King		-300	-200	Base bid			
7	Kenedy	-250	-200	-100	Base bid			
8	McMullen	-300	-250	-100	Base bid			

表 2 竞标者 1 的竞标组 (Big group) (本表来自于 Milgrom 演讲幻灯片)

可见, FUEL 竞标语言为竞标者提供了一种直观而紧凑的方式来描述其估价, 而且能有效地解决 XOR 语言竞标缺失问题。

3.3 FUEL 如何分配牌照和定价

依据 FCC 进行的其他拍卖, 中标者的确定和竞标者需要支付的价格是分开计算的。首先, FUEL 会决定中标的竞标组。在此基础上, 就可以使用 VCG 支付规则 (VCG Payment Rule)⁷ 来计算竞标者需要支付的价格 (Day 和 Milgrom, 2008; Goetzendorf 等, 2015)。

举例来说⁸, 如果竞标者的需求组合是固定的, 比如说有 10 单位物品, 存在三位竞标者。竞标者 1 为 8 单位该物品出价 8000, 竞标者 2 为 3 单位该物品出价 3000, 竞标者 3 为 10 单位物品出价 16000。显然是竞标者 3 中标。他所需要支付的价格不是其出价 16000, 而是由除他之外的最佳组合 (竞标者 1 竞得 8 单位物品) 的出价决定的, 也就是 8000。

如果竞标者可在基本组的基础上调整自己的组合, 假设他愿意为少买 1 单位物品少付 300, 那么除中标者外的最优组合变成了: 竞标者 1 竞得 8 单位物品, 竞标者 2 竞得 2 单位物品。于是, 竞标者需要支付 10700。显然, 这个定价是更有竞争力、更有效率的。

4 结语

1991 年, 与 Paul Milgrom 师出同门的 Alvin Roth (Roth 在 2012 年获得诺贝尔经济学奖) 被问及经济学在未来的世纪中将如何变化时, 他说道: “从长远来看, 我们 (经济学家) 成功的真正考验不仅在于我们对影响经济互动的一般原理理解得有多深, 还在于我们如何将

⁷ VCG 支付规则中, 中标者需支付的价格是由除他之外其他竞标者竞拍该项目的最佳组合出价决定的。

⁸ 本例来自 Milgrom 演讲

这些知识运用到微观经济工程的实际问题。”自 1996 年以来，诺贝尔经济学奖已四次垂青于“市场设计（Market Design）”领域的经济学家，Paul Milgrom 正是其中之一。他不仅仅在经济学理论方面建树颇丰，更是经济学家中使用经济理论解决现实问题的杰出代表。

此次诺奖的颁发，具有重要的现实意义。对于政策制定者所面临的问题：如何调动市场积极性，如何通过市场设计来发现稀缺资源的价值并将其分配至更需要它的人手中，Milgrom 的工作具有启发作用。Milgrom 同时也引领所有经济学人见贤思齐，以一种工程形式追求经济学，使经济学理论巧妙融合于现实生活。

参考文献：

- McAfee, P., McMillan, J., 1996, Analyzing the airwaves auction, *The Journal of Economic Perspectives* 10(1), 159-175.
- Milgrom, P., 2004, *Putting Auction Theory to Work*, Cambridge University Press.
- Ausubel, L., Cramton, P., Milgrom, P., 2006, The clock-proxy auction: A practical combinatorial auction design, *Combinatorial Auctions*, MIT Press.
- Ausubel, L., Cramton, P., 2011, Activity rules for the combinatorial clock auction, Discussion Paper, University of Maryland.
- Federal Communication Commission, 2004, Longley-rice methodology for evaluating TV coverage and interference, OET Bulletin No. 69.
- Milgrom, P., Segal, L., 2017, Designing the US incentive auction, *Handbook of Spectrum Auction Design*, Cambridge University Press.
- Milgrom, P., 2017, *Discovering Prices: Auction Design in Markets with Complex Constraints*, Columbia University Press.
- Bichler, M., Milgrom, P., Schwarz, G., 2020, Taming the communication and computation complexity of combinatorial auctions: The FUEL bid language, Working Paper, Stanford University.
- Ausubel, L., Milgrom, P., 2004, The lovely but lonely vickrey auction, Discussion Paper, Stanford University.
- Frechette, A., Newman, N., Leyton-Brown, K., 2015, Solving the station repacking problem, *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, AAAI Press.
- Milgrom, P., Segal, L., 2015, Deferred-acceptance auctions and radio spectrum reallocation, Working Paper, Stanford University.
- Milgrom, P., Segal, L., 2020, Clock auctions and radio spectrum reallocation, *Journal of Political Economy* 128, 1-31.
- Bichler, M., Goeree, J., 2017, *Handbook of Spectrum Auction Design*, Cambridge University Press.
- Nisan, N., Segal, I., 2006, The communication requirements of efficient allocations and supporting prices, *Journal of Economic Theory* 129(1), 192-224.
- Bichler, M., Goeree, J., Mayer, S., Shabalin, P., 2014, Spectrum auction design: Simple auctions for complex sales, *Telecommunications Policy* 38(7), 613-622.
- Milgrom, P., 2019, FUEL for 5G: Flexible use and efficient licensing, Working Paper, Stanford University.

Day, R., Milgrom, P., 2008, Core-selecting package auctions, *International Journal of Game Theory* 36(3-4), 393–407.

Goetzendorff, A., Bichler, M., Shabalin, P., Day, R., 2015, Compact bid languages and core pricing in large multi-item auctions, *Management Science* 61(7), 1684–1703.

《经济资料译丛》