

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К НЕЙРОЭВОЛЮЦИОННОМУ ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Коротеев М.В.

*Финансовый университет при правительстве РФ, г. Москва, Ленинградский пр-т, 49.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д. 65
MVKoroteev@fa.ru*

Аннотация: Рассматривается современное состояние методологических подходов к агентному моделированию экономических систем. Систематизированы критические наблюдения в отношении классических методов моделирования, выведены основные моменты, решение которых должны обеспечиваться новой методологией. Данное исследование может быть полезно специалистам в области машинного обучения, макроэкономического прогнозирования и эволюционных методов.

Ключевые слова: машинное обучение, имитационное моделирование, агентное моделирование, экономико-математические методы, эволюционное программирование, нейроэволюция.

Введение

Глобальная экономическая рецессия, последовавшая за мировым экономическим кризисом 2008 года по мнению исследователей, показала не только важность банковского и финансового сектора в развитии глобальной экономической системы, но и обнажила несовершенство стандартных экономико-теоретических моделей, не предсказавших ни возможность наступления такого кризиса, ни необходимые меры его преодоления [1]. Исследователи часто критикуют чрезмерную упрощенность стандартных моделей, не учитывающие гетерогенность рынков и юрисдикций, предположение о наличии устойчивого равновесного состояния и предпосылки рациональности действующих экономических агентов. Все эти особенности классических экономических моделей были наглядно показаны неадекватными реальным и значимым экономическим⁴⁷.

В связи с этим назрел вопрос о разработке нового методического подхода к моделированию крупномасштабных экономических систем, обладающих возможностью объяснять поведение экономических систем и акторов во время кризисных периодов. В последние годы значительно возрос интерес к агентному и имитационному моделированию экономических систем, в которых экономика в целом представлена как динамическая система взаимодействующих гетерогенных агентов с ограниченной рациональностью.

Большинство современных макроэкономических теорий формулируется как статистическое обобщение микроэкономических моделей с использованием численных агрегатов решений миллионов индивидуумов. Кроме того, общие равновесные модели базируются на гипотезе репрезентативного агента, то есть предпосылки о том, что все агенты в экономике равны в отношении своих предпочтений и характеристик. Это делает весьма затруднительным моделирование ситуаций, в которых существенную роль играет асимметрия информации.

Еще одним объектом критики стандартных моделей является их ориентация на агрегатные показатели, в частности, средние значения экономических характеристик. В то время как опыт последнего экономического кризиса показывает преобладают важность распределения числовых характеристик по совокупности акторов, в частности степень неравенства располагаемых доходов и накоплений⁴⁸.

Также гипотеза рационального агента приводит нас к тому, что модель имеет фундаментальное ограничение, заключающаяся в равных ожидаемых реакциях всех агентов при равенстве информации, которой они располагают. На практике агенты предполагаются располагающими одной и той же объективной моделью всей экономики в целом, исходя из которой они и принимают решения. Тем не менее опыт анализа финансовых рынков последних десятилетий⁴⁹ говорит о том что ожидания агентов не являются ни рациональными, ни равными. Агенты последовательно используют информацию неэффективно и таким образом формируют систему убеждений. Именно разница в

⁴⁷ *Economic Behaviour and Agent-Based Modelling M. Mueller and A. Pyka*

⁴⁸ *Krueger, D. & Perri, F. (2006), 'Does Income Inequality Lead to Consumption Inequality? Evidence and Theory', Review of Economic Studies, 73(1): 163-193.*

⁴⁹ *Thaler, R. (2000), 'From homo economicus to homo sapiens', The Journal of Economic Perspectives, 14(1): 133-141.*

убеждениях агентов приводит к наблюдаемой ситуации на финансовых рынках включая появление пузырей и обвалов рынка⁵⁰.

1 Критика классического подхода

Всё вышеперечисленное заставляет экономистов искать модели, учитывающие такие факторы как: асимметрия информации, стратегичность взаимодействий, формирование ожиданий на основе ограничение информации, взаимное обучение, социальные нормы, трансакционные издержки⁵¹, экстерналии, хищнические стратегии, кооперацию и возможность неудачной координации действий. Естественным решением вышеперечисленных проблем будет отход от гипотезы репрезентативных агентов и представление крупномасштабных экономических систем через гетерогенные характеристики и поведения агентов.

Вместе с этим при применении агентных моделей встаёт вопрос о том чем заменить главный руководящий принцип принятия решений. Если мы говорим о классической модели, то у нас есть принцип рациональности агента, который используется для принятия решений каждым действующим агентом. В случае если мы отказываемся от него, проблема определения правил поведения агентов становится гораздо более сложной. Существуют два главных подхода к решению этой проблемы. Первый заключается в создании агентов на основе правил доступных из результатов психологических исследований в области принятия решений. Это по сути предложения теоретического направления известного как поведенческая экономика.

Некоторые исследователи предлагают специальные методологии аппроксимации поведения агентов путем обучения специализированной нейронной сети на данных произведенных агентом в процессе своего существования [3]. Таким образом можно получить гораздо более вычислительно производительный аналог агента, позволяющий предсказать поведение агента с определенной степенью вероятности.

Поведение человека в экономической системе в таком смысле вполне аналогично процессу машинного обучения искусственной нейронной сети. Человек распознает шаблоны чтобы выстроить внутренний набор гипотез или модель внешнего мира. Обратная связь от него может усилить либо ослабить нашу веру в принятые гипотезы [2].

Обучение агента происходит в процессе принятия решения, которое, как отмечают исследователи, обычно базируется на одной наиболее вероятной модели. Остальные модели могут получать положительное или отрицательное подкрепление, однако не влияют на процесс принятия решений⁵².

2 Использование интеллектуальных агентов

Широко распространен подход, при котором инструментарий машинного обучения используется для построения адаптивных агентов. В таком случае имитационная среда предоставляет обратную связь каждому агенту виды набора переменных, которые используются для онлайн обучения внутренней модели агента. В свою очередь имитационное среда использует алгоритмы машинного обучения для поддержания внутренней модели агентов.

Два принципиально разных подхода к интегрированию механизмов машинного обучения в агентные модели основаны на использовании обучения с учителем либо обучения с подкреплением. В первом случае существует явное знание о том какое действие повлекло ту или иную реакцию, тогда как во втором случае это связь может быть менее явной.

К настоящему времени обозначаются наиболее перспективные математические методологии и инструментальные средства, применимые к построению систем эволюционного имитационного моделирования на базе гетерогенной системы интеллектуальных агентов. Набор инструментальных средств непосредственно вытекает из изменившихся требований к агентной системе:

- гетерогенность, то есть индивидуальность поведения каждого агента;
- интеллектуальность, то есть способность каждого агента исходить из своей собственной модели окружающей реальности, а не из заданного заранее набора правил;
- как следствие, наличие у агента памяти;
- взаимное обучение исходя из прошлого опыта взаимодействия агентов;

⁵⁰ Hommes, C. (2006), 'Heterogeneous agent models in economics and finance', *Handbook of computational economics*, 2: 1109-1186.

⁵¹ Tesfatsion, L. (2006), *Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory*, in L. Tesfatsion & K. Judd, ed., 'Handbook of Computational Economics', Elsevier, pp. 831-880.

⁵² Feldman, Julian. "Computer Simulation of Cognitive Processes," in Harold Borko, ed., *Computer applications in the behavioral sciences*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1962, pp. 336-59.

- наличие эволюционных механизмов усложнения и адаптации структуры агентов и модели в целом.

Эти требования подводят нас к мысли о применении систем машинного обучения в качестве решающего алгоритма внутренней модели агента. Как конкретный алгоритм, искусственные нейронные сети могут обеспечить как необходимую адаптивную гибкость (путем включения рекуррентных связей, ячеек с памятью), так и возможность работы в режиме частичного обучения и обучения с подкреплением и необходимую вычислительную оптимизацию, необходимую с учетом экспоненциального роста сложности подобных моделей [4]. В связи с этим, перед исследователями встает ряд проблем методического характера, а именно:

1. Реализация конкретного прозрачного и гибкого механизма интеграции алгоритмов машинного обучения модели и

2. Реализация механизма нейроэволюции с учетом частичного сохранения обучения при изменении архитектуры нейронной сети, то есть решение более сложной и комплексной задачи, нежели задача поиска архитектуры сети.

3. Поиск способа интеграции слабоформализованного общего руководящего принципа агентов, будь то требования рациональности, искусственного отбора или согласованности показателей модели с эмпирическими данными.

4. Интерпретируемость результатов моделирования в целом и поведения каждого индивидуального агента в частности.

В качестве обобщения можно сказать, что в настоящее время назревшая необходимость в создании новой методологии имитационного макроэкономического моделирования встречается с соответствующими ее запросам достижениями в области вычислительной теории агентного моделирования, машинного обучения и методиками выбора моделей. Имитационные модели имеют ряд преимуществ перед классическими, а именно:

1. Возможность получения более точных моделей.

2. Возможность моделирования крупных гетерогенных систем в состояниях, далеких от равновесных, например, предсказывать поведение экономики в период глубокого кризиса.

3. Возможность строить сценарные модели и тестировать адекватность экономических теорий и результативность регуляторных воздействий.

Вместе с этим, такие модели не лишены и сопутствующих потенциальных недостатков. Их четкая формулировка позволит более осознанно выбирать инструментальные средства для реализации таких моделей. Большинство исследователей в качестве недостатков выделяют:

1. Более высокую степень сложности таких моделей. Это выражается как в сложности построения, так и в вычислительной сложности расчета таких моделей.

2. Склонность к переобучению и потере адекватности модели.

3. Проблему интерпретируемости моделей [5].

В связи с этим мы предлагаем рассматривать подход к построению таких систем моделирования, основанный на следующей системе методических принципов:

1. Моделируемая система должна имитироваться как гетерогенный набор взаимодействующих интеллектуальных агентов.

2. Агент должен обладать способностью к обучению в результате собственных действий и должен строить множественные модели окружающей действительности в соответствии с принципом индуктивного обучения.

3. Агентная система должна иметь способность к эволюции под влиянием процесса обучения агентов и, как следствие, усложнения их взаимодействия. Вследствие этого система может не быть ограничена изначально заданными правилами.

Литература

1. *Mauro Napoletano, Jean-Luc Gaffard, Zakaria Babutsidze. Agent Based Models: A New Tool for Economic and Policy Analysis. 2012. hal-01070338*
2. *Brian Arthur. Inductive Reasoning and Bounded Rationality. The American Economic Review, Vol. 84, No. 2, Papers and Proceedings of the Hundred and Sixth Annual Meeting of the American Economic Association (May, 1994), pp. 406-411.*
3. *Sander van der Hooga. Deep Learning in (and of) Agent-Based Models: A Prospectus. June 21, 2017*
4. *Koroteev M. Hierarchical classification compared to one-vs-all classifier on one problem of multiclassification in socio-economic modeling and application of hierarchical classifiers. Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLS D 2018, 28 November 2018, Номер статьи 8551784*

СИСТЕМА МОДЕЛЕЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ КООПЕРАЦИИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СЕТЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Лосев А.А., Абдикеев Н.М., Гайдамака А.И.

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,

Россия, г. Москва, Ленинградский пр-кт, д. 49

ALosev@fa.ru, NAbdikееv@fa.ru, AIGajdamaka@fa.ru

Аннотация: Концепция конкурентоспособных цепочек добавленной стоимости в производственных системах, как институциональной структуры, функционирующей на сетевых принципах, послужила толчком к разработке системы моделей межотраслевой цифровой платформы по управлению и оптимизации кооперации высокотехнологичных сетевых производственных систем. В работе описаны пути интеграции в бизнес-процессы производственных систем имитационной и когнитивной моделей. Практической реализацией системы этих моделей выступает отдельный программный продукт – межотраслевая цифровая платформа для участников создания новых высокотехнологичных продуктов и их компонентов.

Ключевые слова: промышленность, отраслевая производственная система, информационно-коммуникационные технологии, имитационная модель, когнитивная модель, цифровая платформа, блокчейн, межотраслевые связи, высокотехнологичные изделия, диверсификация производства, инвестиции, логистика, сервисное обслуживание, производство комплектующих, производственные цепочки.

Введение

Развитие промышленности и производительных сил показало несостоятельность монопроизводств применительно к выпуску высокотехнологичной продукции. Следует понимать, что в современном мире любое высокотехнологичное изделие, будь то автомобиль или компьютер, это по сути скомплексированный (собранный) под неким брендом набор комплектующих от разных производителей, требующий высококвалифицированного сервисного обслуживания на всех этапах его жизненного цикла и отлаженной системы логистики. При этом значительная часть современных высокотехнологичных конкурентных продуктов все чаще создается на стыке различных, зачастую не взаимосвязанных, областей знаний, технологий, производств и т. д., что требует расширения и повышения эффективности производственной кооперации.

Как следствие, наблюдается закономерное нарастающее увеличение доли OEM продуктов и компаний на глобальном рынке высокотехнологичных изделий. Соответственно изменение структуры и динамики глобального рынка высокотехнологичных изделий характеризуется следующими трендами:

- переход к олигопольному состоянию в большинстве сегментов отрасли, продолжение консолидации ресурсов, в т. ч. путем создания СП;
- формирование поставщиков интеграторов 1 уровня;
- активное развитие производственных мощностей в развивающихся странах;
- переход к структуре пирамиды с широкой «юбкой» кооперации и структуре поставщиков нескольких уровней (см. рис. 1).

Помимо этого, у большинства инициаторов выпуска новых высокотехнологичных продуктов ключевым вопросом является не только поиск и подбор необходимых компонентов и комплектующих будущего изделия, а в первую очередь выстраивание эффективных коммуникаций между производителями, службами сервиса, логистами и инвесторами.