

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ОБЪЕДИНЯЮЩИХ НЕСКОЛЬКО АГЕНТОВ¹

Жукова А.А., Каменев И.Г.

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,
Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д.44, кор.2
igekam@gmail.com, sasha.mymail@gmail.com

Аннотация: В статье рассматривается проблема автоматизации моделирования сложных систем на основе моделей агентов. Обсуждаются сложности, возникающие при описании агентских задач, их стыковке и исследовании. Обосновывается необходимость автоматизации проверок с обратной связью по возникающим ошибкам. Предлагается общий алгоритм автоматизации обработки агентских моделей.

Ключевые слова: экономическое моделирование, агентное моделирование, автоматизация моделирования, анализ размерностей, принятие решений.

Введение

Модели экономики требуют не только адекватного описания принятия решения агентами и взаимодействий агентов, но и технологических средств работы с моделью. Современные модели соединяют в себе описание нескольких агентов, поведение каждого из которых описывается условиями оптимальности или сценарием. Все вместе они составляют сложную систему нелинейных соотношений, которую трудно записать без ошибок математическими выражениями на бумаге или на компьютере [10]. Дополнительная трудность возникает, когда новые модели требуется создать в сжатые сроки, реализуя разные наборы предположений и с целью решения разных проблем, на решение которых ориентированы модели [3]. Текущие глобальные события, связанные с климатом и пандемией, поставили новые задачи перед моделированием. Стало очевидно, что без структурного моделирования не обойтись, так как масштабные шоки невозможно рассчитать по статистическим моделям наблюдавшихся исторических данных, не содержащих ничего сравнимого с этим шоками.

Трудности работы с моделью удастся преодолеть с помощью современных систем компьютерной алгебры, позволяющих автоматически повторить цикл выкладок после модификации модели:

- поддерживать моделирование на всех этапах, начиная с формальной записи модели и кончая представлением результатов расчетов;
- упрощать систему соотношений модели, сохраняя атрибуты уравнений и переменных;
- автоматически проверять корректность размерности переменных в соотношениях, что позволяет избежать ошибок и ошибочных расчетов из-за неправильной постановки задачи.

Однако существующие системы с указанными свойствами построены на коммерческих программных средствах, сильно ограничены жесткими предпосылками о характере модели [2]. Их инструменты предотвращения ошибок обеспечивают обратную связь лишь на уровне общей работоспособности модели, а не ее исправления. В связи с этим, представляется, что дальнейшее развитие методов автоматической обработки агентских моделей способно существенно расширить возможности оперативного построения новых моделей сложных систем, требующих детальной разработки микрообоснования принимаемых агентами решений.

1 Агентный принцип и агентские модели

Агентный принцип — одна из ключевых основ моделирования в социальных науках. В широком смысле он означает, что исследуемая система описывается через конкретных Лиц, Принимающих Решения (ЛПР), которые действуют в соответствии со своими ценностями и интересами. В этой трактовке практически любые социальные и большинство экологических моделей являются агентными. В узком смысле под агентскими моделями понимаются модели, в которых описывается непосредственно решение агента, т.е. выбор им некоторых управляемых переменных в соответствии с установленными им самим критериями. (этот выбор может быть полностью или ограниченно

¹ Исследование выполнено при частичной поддержке гранта РФФИ № 22-21-00746 «Модели, методы и комплексы программ для поддержки моделирования социально-экономических процессов с возможностью прогнозирования и сценарных расчетов»

рациональным исходя из предусмотренной в модели асимметрии информации).

Построение крупных агентных моделей связано с определенными сложностями, в связи с чем намного чаще можно встретить модели, описывающие одного-двух агентов и их взаимодействие, нежели сложные системы из большого количества агентских моделей. В моделях сложных систем часто можно увидеть, как полные агентские модели заменяются упрощенными функциями поведения, за которыми стоит микрообоснование с достаточно специфичными предпосылками. Известны сложности теоретического характера: например, сложности в формализации игрового взаимодействия, в котором агенты должны реагировать на прошлые и будущие решения друг друга, которые им приходится прогнозировать. Однако на практике построению крупных агентских моделей мешают не столько технические сложности, сколько большая трудоемкость построения и отработки агентских моделей, в особенности мульти-агентских моделей (в которых предусмотрено наличие нескольких типичных агентов с одной функцией, но разными типовыми характеристиками: например, богатые и бедные домохозяйства).

Предлагаемый доклад представляет собой попытку систематизации этих сложностей и требований к их преодолению. Доклад обобщает опыт использования программного комплекса «Экомод» [4, 8–10], автоматизирующего некоторые работы по построению агентских моделей, и некоторых других систем автоматизации моделирования.

В общем виде, логику построения агентной задачи можно описать так:

- Выбор ЛПР, критериев его выбора, факторов выбора и управлений.
- Формулировка условий (FOC, SOC) оптимальности выбора агента.
- Исследование агентной задачи.
- Получение функции поведения агента (значения управления, функций зависимости управления от различных факторов, функции реагирования агента).

2 Каноническая форма агентских моделей

Опыт построения агентских моделей, накопленный научной школой Отдела моделирования экономических систем Вычислительного Центра имени А.А. Дородницына РАН (ныне ФИЦ «Информатика и управление» РАН), позволил сформулировать ряд формальных требований, соблюдение которых позволяет автоматизировать обработку агентских моделей. Для этого необходимо, чтобы по форме представления данных компьютер мог различать математические и содержательные компоненты разного типа, включенные в модель.

Модель представляется в виде набора описаний поведения экономических агентов, а также набора описаний взаимодействий этих агентов [LINK]. Описания называют блоками модели, а блоки, в свою очередь, объединяются в единое целое системой материальных и финансовых балансов. Модель в канонической форме описывает кругооборот товаров и денег в экономике как результат взаимодействия экономических макроагентов. Модель (блок ЭА) макроагента основывается на выборе значений управляемых конкретным агентом переменных модели. Эти переменные называют планируемыми переменными агента. Как правило, это материальные или финансовые потоки. Внешние условия, факторы, влияющие на выбор агента, описывают информационные переменные (цены, обменный курс, процентная ставка, ставка налога). На выходе блок определяет выбор агента как расписание (стратегию) в зависимости от информационных переменных. Примером может быть спрос на товар в зависимости от цены и спрос на кредит в зависимости от ставки.

Планы агентов в зависимости от информационных переменных согласуются в блоках взаимодействия. Там же они определяют значения информационных переменных. Чтобы различать сходные величины разных агентов, плановые переменные агентов индексируются уникальными идентификаторами.

3 Сложности при описании конкретной агентной задачи

Соблюдение формальных требований к форме записи агентских моделей обеспечивает их автоматическую обработку, но не защищает от распространенных ошибок при их проектировании, автоматическое выявление и предотвращение которых способно радикально ускорить разработку многоагентной модели.

3.1 Анализ размерностей

Агентская задача может быть невырожденной (иметь оптимум, не являющийся краевым решением) лишь в том случае, когда некоторые зависимости в ней нелинейны. Соответственно, агентские задачи очень часто используют зависимости функции от факторов выбора со степенями

выше и ниже единицы. Однако при этом очень легко нарушается содержательный смысл задачи.

Так, например, затраты (размерность: денежные единицы) складываются из цены покупаемого товара (размерность ден. ед. за штуку), умноженной на количество товара (штуки). Однако квадратичная зависимость затрат от количества товара уже не может быть описана таким образом, т.к. количество товара возводится в квадрат вместе с его размерностью. Отсюда возникает большой класс ошибок моделирования, в конечном счете приводящий к состоянию, в котором одно уравнение объединяет две переменные с разными размерностями. Если при ручном решении человек может проигнорировать это противоречие (понятно, что «на самом деле имел в виду» разработчик модели), то автоматизированные вычисления при этом безнадежно ломаются.

3.2 Содержательная интерпретация переменных модели

Квалифицированный исследователь, как правило, способен различить переменные в ролях: (экзогенные) константы, управления ЛПП и переменные-функции, и корректно интерпретировать уравнения связи между управлениями. Однако в сложной агентской задаче достаточно легко упустить какую-то связь между управлениями. Тем более, средства автоматизации без специальных усилий по контролю не будут различать зависимые и независимые переменные, если зависимость прямо не задана им в момент выполняемой операции. Отсюда типичная ошибка агентного моделирования: неучет взаимосвязи между переменными. Особенно сложно эту ошибку предотвратить, когда взаимосвязь между переменными одного агента следует из задачи другого агента (что требует специальных проверок при автоматизации вычислений).

3.3 Технические коэффициенты и их содержательная интерпретация

Поскольку агентские модели описывают реальные факторы выбора, то в них не может быть «ничего не значащих» технических коэффициентов. Константы, используемые в агентской модели, могут быть или характеристиками внешней среды, или характеристиками самого агента (его эмоций, отношения ко времени, ценностей и интересов). Одновременно они же выполняют функцию восстановления размерности и функцию калибровки модели. Зачастую это приводит к содержательным противоречиям: например, размерность коэффициента может не соответствовать его содержательной интерпретации (что может указывать на необходимость ввести в качестве множителей дополнительные коэффициенты и продумать их интерпретацию).

4 Сложности стыковки задач разных агентов

4.1 Несовпадение номенклатуры переменных

Поскольку задача каждого агента исследуется самостоятельно, то практически невозможно заранее придумать систему названий переменных, которая бы полностью исключала дублирование. В особенности это касается технических коэффициентов, а также переменных с одинаковой сущностью и переменных-прогнозов. Например, часто бывает так, что переменная-управление в задаче одного агента прогнозируется другим агентом в его собственной задаче, причем прогноз не обязан быть точным. Отследить единство обозначений вручную очень тяжело, а очно совпадающие (или ошибочно различающиеся) переменные полностью нарушают логику решения задачи. Соответственно, для построения больших совместных агентных моделей нужна автоматическая проверка структуры использования переменных с одним названием или схожими названиями по разным агентским проблемам.

4.2 Незамкнутость взаимодействий

Другая распространенная ошибка агентного моделирования состоит в незамкнутости модели. Переменные, характеризующие взаимодействие агентов (потoki между ними, обмен информацией и т.д.) должны присутствовать в задачах как минимум двух агентов. Однако при написании агентских моделей по-отдельности очень часто оказывается, что это взаимодействие важно для одного агента и второстепенно для другого, и для второго оно описано недостаточно подробно, без необходимых переменных. Необходим автоматический анализ замкнутости взаимодействий. Для этого, однако, необходимо на программном уровне выделять переменные, описывающие взаимодействия, среди прочих переменных.

Специальную проблему представляют потери, когда имеющиеся у агентов ресурсы не используются и не обмениваются, а исчезают впустую: для соблюдения замкнутости модели, может потребоваться введение в нее специального фиктивного агента.

4.3 Неправильный учет комплексных взаимодействий

Некоторые взаимодействия описываются несколькими переменными. Например, торговля часто характеризуется двумя встречными потоками (благ и денег). Модели, описывающие обмен сигналами, могут потребовать еще большее количество переменных. Помимо того, что все эти переменные должны быть введены для всех взаимодействующих агентов, должны быть также корректно составлены все уравнения связи для всех агентов, в т.ч. меж-агентские. Эта работа не может быть автоматизирована, однако ее невозможно выполнять без серьезных ошибок в отсутствие автоматизированной поддержки управления переменными.

5 Многорежимность агентных задач и сложности их математической обработки

5.1 Множественные краевые решения

Практически все содержательные переменные и многие калибровочные коэффициенты в агентских задачах имеют ограничения на область допустимых значений. При исследовании выбора агента это означает большое количество краевых решений, ограничивающий основной режим модели. В функции Лагранжа это приводит к большому разнообразию условий дополняющей нежесткости. Ручное исследование каждого краевого режима (в котором одна или несколько переменных принимают краевые значения) крайне трудозатратно и потому редко выполняется. Автоматизация вычислений может позволить получить условия оптимальности для всех краевых решений без существенных затрат времени исследователя.

5.2 Множественные краевые решения

Еще более серьезная проблема краевых режимов возникает из-за того, что краевые решения одного агента могут приводить к вырождению задач других агентов или выходу их из основного режима в краевые. В статике эта проблема может быть решена через автоматическую стыковку краевых ограничений задач разных агентов и дальнейших содержательный анализ режимов их взаимодействия.

Однако в динамике это порождает серьезные теоретические сложности, т.к. целевые функции агентов часто содержат информацию о будущем системы. Найти аналитически оптимальное значение управлений в этом случае практически невозможно, т.к. целевая функция агента принимает разные формы при разных режимах модели. Решение этой проблемы в динамике требует еще более сложного аппарата автоматизации, который позволял бы автоматизировано рассматривать сценарии развития на основе выработанных сценариев взаимодействия.

6 Существующие технологии автоматической обработки и перспективы их развития

На сегодняшний день существуют несколько программных решений для автоматизированной обработки моделей (как общего характера, см. Wolfram Alfa [5–6], так и специализированные, см. Dolo [2]). Однако подавляющее большинство таких систем направлены на автоматизированную работу с моделью «как есть», а не на автоматизацию построения моделей. Используемая нами собственная разработка, система «Экомод», поддерживает некоторые базовые проверки и имеет простейший аппарат для интеграции моделей разных агентов, но базируется на не-свободной платформе Maple и не имеет специального интерфейса, рассчитанного на сторонних пользователей [4, 8–10]. Этим объясняется актуальность дальнейших работ по построению комплекса автоматизации агентного моделирования, который бы обладал следующими функциями (см. Рис. 1):

- автоматизации ввода и вывода данных в общепринятом математическом формате (LaTeX);
- перекрестной проверки системы переменных, информирования пользователя о совершенных в ней ошибках;
- сведения балансов модели, выявления проблем незамкнутости и несвязанности взаимодействий между агентами;
- предложения типовых исправлений для выявленных проблем;
- автоматизированного вывода условий оптимальности для основного режима и иных режимов взаимодействия агентов, вывода границ режимов.

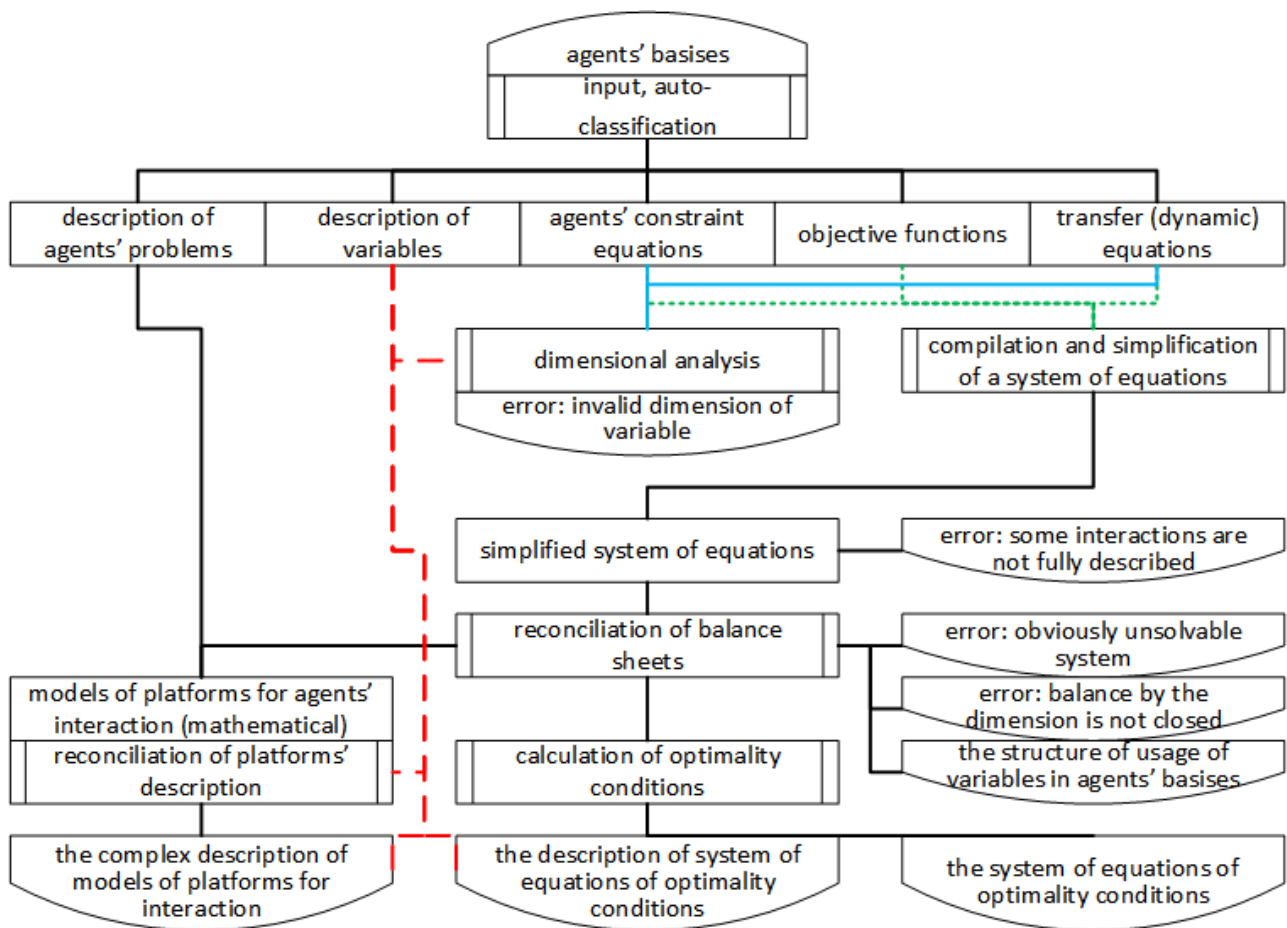


Рис. 1. Алгоритм автоматизированной обработки агентских моделей

Принципиальные особенности автоматизированной обработки агентских моделей таковы. Прежде всего, описания отдельных агентов, включающее как формулы, так и их содержательное описание, объединяются в единую базу. Среди них выявляются сущности, выполняющие разную роль в агентской модели: описания агентских задач, переменных, целевые функции, уравнения/неравенства связи и уравнения переноса. Далее производится анализ размерности и (независимо, параллельно) исследование условий оптимальности агентов и упрощение получившейся системы. На разных этапах необходимо выявлять различные ошибки, информировать о них разработчика модели и предлагать типичные решения.

Конечным результатом автоматизированной обработки является описание агентов и их взаимодействий в форме, аналогичной входным данным, но упрощенных, с исключенными избыточными переменными, объединенными балансами и т.д., а также с заменой целевых функций на условия оптимальности.

К сожалению, раскрытые в разделе 5 проблемы не позволяют создать систему, полностью автоматически исследующую условия оптимальности. Однако это ограничение может быть обойдено автоматическим исследованием частных режимов модели с исключенными переменными, краевые ограничения по которым соответствуют крайним решениям.

Заключение

Автоматизация работы над агентскими моделями позволяет создавать комплексные модели сложных систем, которые базируются не на статистических закономерностях, а на логике (ограниченно)-рационального выбора. Такие модели способны предсказывать принципиальные изменения в динамике социальных систем, связанные с их переходом в качественно иные режимы. Основным ограничением в развитии системных агентных моделей остается именно высокая вероятность возникновения ошибок в описании агентов, стремительно возрастающая при увеличении числа агентов. Автоматическое выявление и предотвращение типичных ошибок в системе индексации переменных, структуре балансов и т.д. позволяет сэкономить время при конструировании моделей. Опыт системы «Экомод» показал, что даже простой набор автоматических проверок

системы агентских моделей позволяет радикально сократить время работы над моделью. При построении сложных моделей следует исходить не из предположения о способности исследователя полностью правильно записать все агентские модели, а, напротив, из необходимости помогать ему устранять ошибки моделирования. Особенно большую пользу автоматизация проверок и первичной обработки может принести крупным командам, в которых разные исследователи работают над моделями разных агентов.

Литература

1. Zhukova A.A., Pospelov I.G. Modelling the system of agents in the presence of random moments of transactions // 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). – IEEE, 2020. – Vol. 1. – P. 1111–1116.
2. Maliar L., Maliar S., Winant P. Deep learning for solving dynamic economic models // Journal of Monetary Economics. Vol. 122. 2021. – P. 76–101.
3. Khokhlov M.A., Pospelov I.G., Pospelova L.Ya. Technology of development and implementation of realistic (country-specific) models of intertemporal equilibrium // International Journal of Computational Economics and Econometrics. – Vol. 4, 2014, issue 1-2. – P. 234–253.
4. Zavriev N.K., Pospelov I.G., Pospelova L.Ya. Investigation of economy mathematical models with system ECOMOD tools // Matem. Mod., vol. 15, 2003, issue 8. – P. 57–74.
5. Říhová V., Jilková E., Wossala J., Wolfram Alpha in mathematics and economics // International Days of Science, 2020, Vol. 156.
6. Wolfram Alpha: Computational Intelligence [Электронный ресурс] // URL: <https://www.wolframalpha.com/> (дата обращения: 8.08.2022).
7. Поспелов И.Г., Хохлов М.А. Метод проверки размерности для исследования моделей экономической динамики // Математическое моделирование, 2006. – Т. 18, № 10. – С.113–122.
8. Андреев М.Ю., Поспелов И.Г., Поспелова И.П., Хохлов М.А. Технология моделирования экономики и модель современной экономики России. – М.: МИФИ, 2007.
9. Петров А. А., Поспелов И. Г., Поспелова Л. Я. Система интеллектуальной компьютерной поддержки математического моделирования экономики ЭКОМОД. – М.: ВЦ РАН, 1996.
10. Поспелов И. Г., Поспелова И. И., Хохлов М. А., Шипулина Г. Е. Новые принципы и методы макроэкономического моделирования и модель современной экономики России. – М.: ВЦ РАН, 2006.