



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН

Абрау-2024 • Труды конференции



Труды XXVI Всероссийской научной конференции

Научный сервис в сети Интернет

А.О.Щирый

**Основанный на онтологиях подход к
распределенному агентному
моделированию в приложении к
радиотехническим системам**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Щирый А.О. Основанный на онтологиях подход к распределенному агентному моделированию в приложении к радиотехническим системам // Научный сервис в сети Интернет: труды XXVI Всероссийской научной конференции (23-25 сентября 2024 г., онлайн). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2024. — С. 280-292.

<https://doi.org/10.20948/abrau-2024-12>

<https://keldysh.ru/abrau/2024/theses/12.pdf>

Видеозапись выступления

Основанный на онтологиях подход к распределенному агентному моделированию в приложении к радиотехническим системам

А.О. Щирый¹²

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова, Москва*

² *Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва*

Аннотация. Основанный на онтологиях подход к многоагентному моделированию предполагает реализацию моделирующей системы посредством создания онтологий. Примером целостной реализации такого подхода к агентному моделированию является стандарт IEEE 1516 Standard for Modeling and Simulation High Level Architecture. Данная работа посвящена распределенной многоагентной моделирующей системе, предназначенной для моделирования сложных радиотехнических систем (особенно радиолокационных систем), её актуальность обусловлена необходимостью замены части натурных испытаний радиотехнических систем имитационными экспериментами. Мотивация перехода на стандарт IEEE 1516 для «тяжелой» многоагентной моделирующей системы, кроме прочего, состоит в обеспечении масштабируемости, открытости и многократного повторного использования разработанных агентных моделей, что совершенно логично делать на основе существующего хорошо проработанного и апробированного стандарта, устанавливающего правила взаимодействия моделей и разработки программных интерфейсов. Приводятся общие принципы построения и архитектура моделирующей системы. Показаны основные требования к агентам, их роль и место в комплексной моделирующей системе, особое место среди агентов занимает имитатор фоно-целевой обстановки. Обсуждается также возможность совмещения двух схем имитационного моделирования: дискретно-событийной и пошаговой. Дело в том, что пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность, в ней удобно моделировать алгоритмы обработки, составные части радиотехнических систем. Однако, в ней невозможно реализовать истинную автономность и асинхронность агентов. Совмещение двух схем моделирования позволяет объединить их достоинства.

Ключевые слова: многоагентное моделирование, имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, онтологии, радиотехнические системы, загоризонтные радиолокационные станции

An ontology driven approach for distributed multi-agent-based modeling as applied to the radio-technical systems

A.O. Schiriy¹²

¹ *Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation RAN
named N.V. Pushkov, Moscow*

² *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow*

Abstract. The ontology-based approach to multi-agent modeling involves the implementation of a modeling system through the creation of ontologies. An example of a holistic implementation of an ontology-based approach to agent-based modeling is the IEEE 1516 Standard for Modeling and Simulation High Level Architecture. The work is devoted to a multi-agent modeling system designed for modeling complex radio engineering systems (especially radar systems), its relevance is due to the need to replace part of the field tests of radio engineering systems with simulation experiments. The motivation for switching to the IEEE 1516 standard for a "heavy" multi-agent modeling system, among other things, is to ensure scalability, openness and multiple reuse of the developed agent models, which is completely logical to do based on the existing well-developed and proven standard that establishes rules for the interaction of models and the development of software interfaces. The general principles of construction and architecture of the modeling system are given. The basic requirements for the main modeling agents, their role and place in the complex modeling system are shown, a special place among which is occupied by the simulator of the background-target environment. The possibility of combining two simulation schemes is also discussed: discrete-event and step-by-step. The fact is that the step-by-step scheme has advantages such as simplicity and clarity, it is convenient to model processing algorithms, components of radio engineering systems. However, it is impossible to implement true autonomy and asynchrony of agents in it. Combining two modeling schemes allows you to combine their advantages.

Keywords: multi-agent modeling, simulation, discrete event modeling, ontologies, radio-technical systems, over-the-horizon radars

Введение

Агентное моделирование – метод имитационного моделирования, в основе которого лежат многоагентные системы (МАС), состоящие из автономных интеллектуальных агентов (ИА) [1]. Основной мотивацией применения агентного моделирования является потенциальная возможность естественного отображения в модельном мире автономных объектов (субъектов) реального мира (обладающих «интеллектом»),

«волей», целеполаганием, и т.п). Заметим, что МАС могут быть не только модельного назначения [2], но здесь такие МАС не затрагиваются.

В свою очередь, основанный на онтологиях подход к агентному моделированию (Ontology Driven Agent Based Approach, или Multi-Agent Systems Based on Ontologies) [3-7] предполагает реализацию МАС посредством создания онтологий. Онтологии [8] предоставляют формальные средства для описания концепций, категорий, сущностей и их свойств, а также взаимосвязей внутри предметной области; кроме того, онтологии позволяют описывать логику взаимодействия сущностей в терминах дескрипционной логики. Разработаны различные языки описания онтологий, например Web Ontology Language (OWL); онтологии выраженные на этих языках доступны для машинной обработки [9].

Примером целостной реализации основанного на онтологиях подхода к агентному моделированию является стандарт IEEE 1516 Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) – стандарт архитектуры высокого уровня для моделирования и имитации [10,11]. В терминологии IEEE-1516 распределенная моделирующая система, совместно выполняющая общий сценарий, именуется федерацией. Каждая федерация должна иметь свою объектную модель Federation Object Model (FOM), задающую описание и взаимосвязи классов всех потенциально возможных в данной федерации объектов. FOM должна быть документирована в соответствии с шаблоном Object Model Template (OMT), описанным стандартом IEEE-1516.2-2010. Аналогично, каждый федерат должен иметь свою объектную модель Simulation object model (SOM), документированную в соответствии с OMT HLA. FOM – описывает все возможные типы данных, которыми могут обмениваться федераты в процессе выполнения федерации. SOM – описывает типы данных, необходимые (на прием и/или передачу) конкретному федерату. Требования обмена данными между федератами должны быть определены в FOM. Эти FOM и SOM являются не чем иным как онтологиями.

1. Актуальность моделирования радиотехнических систем

При осуществлении комплексного проектирования сложных радиотехнических систем (РТС), в частности, радиолокационных станций (РЛС), требуется решать задачи выбора и оптимизации проектных параметров, в т. ч. антенных систем, приемо-передающих трактов, алгоритмов и устройств цифрового формирования и обработки сигналов, а также РТС в целом.

При разработке РТС декаметрового (ДКМ) диапазона, таких как системы коротковолновой (КВ) радиосвязи и загоризонтной (ЗГ) радиолокации, основанных на способности КВ многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности [12-14], важнейшей задачей для обеспечения корректного функционирования таких РТС является адаптация

к ионосферным условиям, для чего в составе этих РТС включается РТС частотного обеспечения (ЧО), состоящая из аппаратуры радиозондирования ионосферы и анализатора загруженности радиоканала. При этом возможна адаптация РТС ДКМ диапазона по рабочей частоте, мощности излучения, скорости передачи информации (в более продвинутых случаях возможна компенсация амплитудно-частотной характеристики ДКМ радиоканала [15,16]). Также и наземная инфраструктура ГЛОНАСС включает в себя средства автоматической диагностики состояния ионосферы. Аппаратура радиозондирования ионосферы, как правило, обеспечивает диагностику в режимах вертикального зондирования и наклонного зондирования ионосферы [17,18]. В случае ЗГ радиолокационных станций (РЛС) обязателен также режим возвратно-наклонного зондирования.

При этом отработку и отладку новых моделей ионосферы и алгоритмов адаптации необходимо производить с учетом условий и режимов функционирования РТС, что особенно актуально в случае ЗГ РЛС. Сложность самой РТС, большая вариативность и неопределенность фоно-целевой обстановки (ФЦО) приводят к невозможности произвести аналитическое сравнение всех возможных вариантов архитектуры системы в целом по всем ее параметрам и сделать ее однозначный рациональный выбор. Традиционным выходом в такой ситуации было проведение множества натуральных испытаний. Однако дороговизна, и тем более невозможность проведения натуральных испытаний в ряде случаев заставляет искать другие решения. Наиболее приспособленными для оценки эффективности сложных систем без проведения натуральных испытаний являются модели имитационного типа. Имитационное моделирование используется как универсальный метод для обоснования решений в условиях неопределенности и для учета трудно формализуемых факторов. Поэтому имитационное моделирование используется как для отработки новых методов и алгоритмов, так и для проверки достигнутых тактико-технических характеристик (ТТХ), то есть во втором случае выступает как этап предварительных испытаний. И делается это посредством имитации различных вариантов оперативной, фоно-целевой, и геофизической обстановки, в различных режимах работы РЛС, при наличии или отсутствии помехового противодействия, с учетом сценариев действий сил и средств в периоды мирного времени, в периоды оперативного развертывания, в периоды ведения боевых действий [19-24]. В случае РТС связного назначения, будут нужны не все перечисленные компоненты моделирующей системы, однако вопросы радиоэлектронной борьбы также требуют задания сценариев и имитации различных вариантов геофизической обстановки.

2. Архитектура моделирующей системы

С алгоритмической и программно-архитектурной точки зрения система имитационного моделирования состоит из диспетчера моделирования (и других «системных» частей, таких как визуализатор и редактор боевых сценариев), и имитационных моделей агентного типа, представляющих сущности моделируемой области, среди которых особое место занимает имитатор ФЦО. Функции диспетчера моделирования: чтение сценария, созданного пользователем и содержащего архитектуру исследуемой конфигурации сил и средств; загрузка и инициализация имитационных моделей (в том числе имитатора ФЦО); запуск сценария на счет, управление имитационными моделями в процессе моделирования и мониторинг хода его исполнения.

Описанная многоагентная система работает по дискретно-событийной схеме, для реализации которой программно ведется динамическая очередь задач ("календарь" – в других терминах), управляемая диспетчером имитационного моделирования (ДИМ), который определяет порядок передачи управления между вычислительными блоками (агентами, частными моделями).

Событиями очереди задач могут быть как события, относящиеся к РТС (начало и конец излучения импульса, конец приёма сигнала от импульса и др.), так и события, относящиеся к ФЦО (например, раз в 2 секунды может быть запланирована проверка состояния цели, с возможностью изменения поведения цели и пересчёта её траектории полёта), равно как и события других моделей.

ДИМ предназначен для осуществления и мониторинга процесса имитационного эксперимента на основе заданного сценария. ДИМ реализует дискретно-событийный вид имитационного моделирования. В дискретно-событийном моделировании функционирование системы представляется в виде хронологической последовательности событий. Событие происходит в определённый момент модельного времени и знаменует изменения состояния системы. Входными данными для ДИМ является сценарий имитационного эксперимента. В сценарии содержится информация о моделируемых объектах, среды, в которой они расположены и параметры процесса проведения имитационного моделирования.

Сценарий ДИМ формируется на основе параметров, заданных пользователем.

В процессе моделирования происходит логирование (сохранение в файлы) состояний системы в целом и атрибутов отдельных агентов. Полученные лог-файлы являются предметом дальнейшего рассмотрения и анализа. По результатам моделирования оцениваются боевые возможности, боевая эффективность, делается вывод о достигнутых ТТХ.

3. Основные агенты («частные модели»)

Онтологический подход предполагает прежде всего выделение понятий (сущностей) и их свойств (атрибутов); в данном случае все выделенные сущности рассматриваются также как интеллектуальные агенты. Выделение сущностей имеет много общего с задачей декомпозиции при проектировании архитектуры программной системы, например в парадигме объектно-ориентированного программирования (ООП), однако имеются и отличия. Основные отличия используемого онтологического подхода (конкретно даже в рамках технологии HLA) от ООП заключаются в следующем:

- в ООП сущность рассматривается с разных точек зрения, в HLA только с точки зрения особенностей при информационном обмене;
- в ООП сущности описываются как данными, так и методами, в HLA только данными;
- в ООП рассматривается как внутренние свойства сущности, так и внешние, в HLA – только внешние;
- в ООП предполагается, что объекты взаимодействуют непосредственно (хотя это зависит от более конкретной парадигмы и много чего еще), в HLA они могут взаимодействовать только посредством вызова соответствующих служб RTI (RTI, Run-Time Infrastructure – это программная среда, обеспечивающая выполнение сервисов HLA и согласованную работу федератов в составе федерации).

Физически все онтологии реализуются в формате ОМТ, как было сказано выше; здесь же приведем их словесные описания.

Как уже было сказано, важнейшим агентом нашей МАС является имитатор ФЦО. При имитации ФЦО происходит формирование траекторий целей различных типов. Рассматриваются воздушные и надводные цели. Воздушные цели делятся на два основных класса – баллистические и аэродинамические. При моделировании надводных целей необходимо также иметь модель волнений водной поверхности.

Другими агентами могут быть конкретные РТС (например, РЛС конкретного вида) или их составные части, а также их окружение. Например, моделирование работы РЛС происходит путем моделирования управления режимами работы РЛС, преобразований сигналов в выходных трактах и передающих антеннах, преобразований сигналов в приемных антеннах и входных трактах, первичной, вторичной и возможно (в случае работы в составе группировок) третичной обработки радиолокационной информации. Моделируются также потери при распространении сигнала в среде, рассеяние на целях и другие аспекты ФЦО; в случае с РТС ДКМ диапазона также повышенное внимание уделяется учёту многолучевого распространения радиоволн [24], рассеяния на ионосферных неоднородностях, интерференционным эффектам, а также отсутствию прохождения радиосигнала в определенных условиях. Также моделируется

логика работы блока адаптации РТС к геофизической обстановке (блок адаптации не обязательно может иметь отдельное представление, иногда его удобнее реализовать внутри блоков управления режимами РТС).

В так называемый «нулевой момент времени» производится инициализация всех объектов имитационного моделирования. Одним из обязательных результатов работы методов инициализации должно быть время следующего вызова модели на расчет (первый запланированный приём сигнала). Это время записывается в очередь системных сообщений.

События ИА «фоноцелевая обстановка» возникают независимо от событий объектов имитационного моделирования РТС и могут устанавливаться на временной шкале очереди событий в любой момент.

Возможна реализации пошаговой схемы имитационного моделирования внутри частных моделей (агентов) дискретно-событийной схемы [25]. Благодаря такому решению имеется возможность промоделировать отдельно взятую цепочку блоков, не затрагивая ФЦО и другие РТС. Пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность, в ней удобно моделировать алгоритмы обработки, составные части РТС, и даже некоторые несложные виды РТС. Однако, в ней невозможно реализовать истинную автономность и асинхронность ИА.

Таким образом, реализована поддержка двух схем имитационного моделирования: дискретно-событийной и пошаговой; функционируют два диспетчера: высокоуровневый дискретно-событийный и низкоуровневый пошаговый. Дискретно-событийный диспетчер взаимодействует с пошаговым каждый раз, когда рассчитывает очередной событийный блок одного из двух верхних уровней [25].

4. Реализация МАС на основе стандарта HLA

Как правило, Федерация состоит из одного управляющего федерата (ведущего) и федератов ИА (ведомых).

Управляющий федерат осуществляет управление всем процессом функционирования федерации:

- раздает исходные данные всем ведомым федератам;
- переводит федерацию из одного состояния в другое.

Ведомые федераты:

- получают исходные данные;
- осуществляют инициализацию и сообщают всем остальным федератам необходимые им сведения о начальном состоянии экземпляров объектов ИА;
- выполняют пошаговое выполнение в соответствии с текущим состоянием федерации;
- обменивается результатами выполнения с другими ведомыми федератами.

Несколько ИА могут находиться в одном федерате, мотивами группирования ИА по федератам могут быть минимизация обмена данными между федератами – тогда несколько ИА могут быть объединены в один федерат (или напротив, если важно разграничить зоны ответственности разных соисполнителей-разработчиков ИА, возможно разделение на разные федераты даже семантически единого ИА); хотя конечно типична ситуация когда ИА представлен отдельным федератом.

Управляющий федерат согласует выполнение управляемых федератов, выдавая в явном виде команду на выполнение очередного шага выполнения. Согласование обеспечивается тем, что каждый из управляемых федератов независимо от других сообщает Управляющему федерату о завершении выполнения (и связанных с ним обменов данными) на указанном шаге. При этом команда на выполнение следующего шага выполнения выдается управляющим федератом только после того, как придет подтверждение от всех федератов-участников.

Заключение

Итак, представлены принципы и архитектура МАС, предназначенной для распределенного моделирования сложных РТС (особенно РЛС); МАС реализована по технологии HLA, воплощающей основанный на онтологиях подход к агентному моделированию. Мотивация перехода на HLA для «тяжелой» МАС, кроме прочего, состоит в обеспечении масштабируемости, открытости и многократного повторного использования разработанных агентных моделей, и логично это делать на основе существующего хорошо проработанного и апробированного стандарта, устанавливающего правила взаимодействия моделей и разработки программных интерфейсов.

В планах дальнейших работ – реализация новой МАС моделирования РТС, базирующейся на тех же принципах, но уже учебного назначения, поэтому реализованной не на основе «тяжелой» HLA, а на основе гораздо более «легковесного» фреймворка *OntologySim* [26].

Литература

1. Пантелеев М.Г., Жандаров В.В. Интеллектуальные агенты и многоагентные системы: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – 64 с. – ISBN 978-5-7629-0991-4.
2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с. – ISBN 5-8459-0887-6.
3. Artur Freitas, Rafael H. Bordini, Renata Vieira. Model-driven engineering of multi-agent systems based on ontologies // *Applied Ontology*, 2017, 12, pp.157–188. DOI 10.3233/AO-170182. URL: <https://smart-pucrs.github.io/publications/pdf/ao2017ArturFreitas.pdf>

4. Sofia Basilio Valente da Silva. *Ontology Driven Agent Based Model Approach*. Reykjavik University, 2023. URL: <https://skemman.is/bitstream/1946/44688/1/OntologyDrivenAgentBasedModelApproach.pdf>
5. Scott Christley, Xiaorong Xiang, Greg Madey. *An ontology for agent-based modeling and simulation*. University of Notre Dame, 2004. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7db660023a2734b826b6dde61f8c18e8ce146da8>
6. Poveda Geovanny, Schumann Rene. *An ontology-driven approach for modeling a multi-agent-based electricity market*. Published in *Proceedings of the 14th German Conference on Multiagent System Technologies (MATES 2016)*, Klagenfurt, Osterreich, 27-30 September 2016, 15 p. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-45889-2_3
7. Davide Calvaresi, Michael Schumacher, Jean-Paul Calbimonte. *Agent-based Modeling for Ontology-driven Analysis of Patient Trajectories* // *Journal of Medical Systems*, 2020, Volume 44, article number 158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-020-01620-8>. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10916-020-01620-8.pdf>
8. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. *Инженерия знаний. Модели и методы*. 3-е изд. – СПб: Изд-во "Лань", 2020. – 324 с.
9. Добров Б. В., Иванов В. В., Лукашевич Н. В., Соловьев В. Д. *Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения : учебное пособие*. – М.: Интернет Ун-т информ. технологий, 2009 . – 173 с.
10. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA): 1516-2010 (Framework and Rules); 1516.1-2010 (Federate Interface Specification); 1516.2-2010 (Object Model Template Specification) [Electronic resource]. URL: <https://standards.ieee.org/standard/1516-2010.html>
11. Алешин А.В., Безруков Г.В., Ваньков А.И., Вислоцкий А.И., Скуратовский А.Г. *Введение в HLA. Конспект лекций*. – М: ЗАО «НПП ИНТЕЛКЛАСТЕРСИСТЕМ», 2010. – 253 с.
12. Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Урядов В.П. *Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере*. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 286 с.
13. Giuseppe Fabrizio. *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*. McGraw-Hill Education, 2013.
14. Щирый А.О. *Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.12.04; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. – СПб., 2007. – 19 с.

15. A.O. Shiriy. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 5. 2002. pp.365-369. <https://doi.org/10.1109/apede.2002.1044964>
16. Колчев А.А., Щирый А.О., Недопекин А.Е. Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолоний: монография / Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2013. – 147 с. – ISBN 978-5-94808-762-7.
17. Щирый А.О. Архитектура программной части аппаратно-программного комплекса дистанционного наземного радиозондирования ионосферы // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2015. №18. – с.144-152.
18. Щирый А.О. Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. Т.14. №5. – с.170-173.
19. Коновальчик А.П., Щирый А.О. Универсальная программная платформа для имитационного моделирования боевых действий // Вопросы радиоэлектроники. – 2019, №3. – с.22-26.
20. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Реализация имитационного моделирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2018, № 21. с.290-293.
21. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2019, Т.11, №1. – с.4-11.
22. Коновальчик А.П., Щирый А.О. Имитационное моделирование РЛС в разрабатываемой САПР РЛС и перспективы его перевода на технологию HLA IEEE-1516 // Информационные системы и технологии. – 2022. №5 (133). – с.27-34.
23. Арутюнян А.А., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О. Уровни и этапы проектирования и исследования перспективных радиолокационных станций в отечественной специализированной САПР // Журнал радиоэлектроники. – 2022. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.3>
24. Щирый А.О. Комплексное имитационное моделирование в проектировании, разработке и отладке радиотехнических систем дециметрового диапазона // Сборник научных статей по материалам VI Междунар. научн.-практ. конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2022»), Москва.– М.: РТУ МИРЭА, 2022.– с.146-151.

25. Щирый А.О. Совмещение событийной и пошаговой схем дискретного имитационного моделирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022, Вып.12. – с.338-342. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-338-343.
26. May M.C., Kiefer L., Kuhnle A., Lanza G. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim // Applied Sciences, 2022, 12(3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>

References

1. Panteleev M.G., ZHandarov V.V. Intellektual'nye agenty i mnogoagentnye sistemy: Ucheb. posobie. – SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2009. – 64 p. – ISBN 978-5-7629-0991-4.
2. Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podhod, 2-e izd.: Per. s angl. – M.: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2006. – 1408 p. – ISBN 5-8459-0887-6.
3. Artur Freitas, Rafael H. Bordini, Renata Vieira. Model-driven engineering of multi-agent systems based on ontologies // Applied Ontology, 2017, 12, pp.157–188. DOI 10.3233/AO-170182. URL: <https://smart-pucrs.github.io/publications/pdf/ao2017ArturFreitas.pdf>
4. Sofia Basilio Valente da Silva. Ontology Driven Agent Based Model Approach. Reykjavik University, 2023. URL: <https://skemman.is/bitstream/1946/44688/1/OntologyDrivenAgentBasedModelApproach.pdf>
5. Scott Christley, Xiaorong Xiang, Greg Madey. An ontology for agent-based modeling and simulation. University of Notre Dame, 2004. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7db660023a2734b826b6dde61f8c18e8ce146da8>
6. Poveda Geovanny, Schumann Rene. An ontology-driven approach for modeling a multi-agent-based electricity market. Published in Proceedings of the 14th German Conference on Multiagent System Technologies (MATES 2016), Klagenfurt, Osterreich, 27-30 September 2016, 15 p. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-45889-2_3
7. Davide Calvaresi, Michael Schumacher, Jean-Paul Calbimonte. Agent-based Modeling for Ontology-driven Analysis of Patient Trajectories // Journal of Medical Systems, 2020, Volume 44, article number 158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-020-01620-8>. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10916-020-01620-8.pdf>
8. Gavrilova T.A., Kudryavcev D.V., Muromcev D.I. Inzheneriya znaniy. Modeli i metody. 3-e izd. – SPb: Izd-vo "Lan", 2020. – 324 p.

9. Dobrov B. V., Ivanov V. V., Lukashevich N. V., Solov'ev V. D. Ontologii i tezaury: modeli, instrumenty, prilozheniya : uchebnoe posobie. – M.: Internet Un-t inform. tekhnologij, 2009. – 173 p.
10. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA): 1516-2010 (Framework and Rules); 1516.1-2010 (Federate Interface Specification); 1516.2-2010 (Object Model Template Specification) [Electronic resource]. URL: <https://standards.ieee.org/standard/1516-2010.html>
11. Aleshin A.V., Bezrukov G.V., Van'kov A.I., Vislockij A.I., Skuratovskij A.G. Vvedenie v HLA. Konspekt lekcij. – M: ZAO «NPP INTELKLASTERSISTEM», 2010. – 253 p.
12. Filipp N.D., Blaunshtejn N.SH., Eruhimov L.M., Ivanov V.A., Uryadov V.P. Sovremennye metody issledovaniya dinamicheskikh processov v ionosfere. – Kishinev: SHTiinca, 1991. – 286 p.
13. Giuseppe Fabrizio. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw-Hill Education, 2013.
14. Schiriy A.O. Razrabotka i modelirovanie algoritmov avtomaticheskogo izmereniya harakteristik ionosfernykh korotkovolnovykh radiolinij: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: Spec. 05.12.04; Sankt-Peterburgskij gos. un-t telekommunikacij im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha. – SPb., 2007. – 19 p.
15. A.O. Shiriy. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 5. 2002. pp.365-369. <https://doi.org/10.1109/apede.2002.1044964>
16. Kolchev A.A., Schiriy A.O., Nedopekin A.E. Matematicheskie modeli i metodiki izmereniya AChH mnogoluchevykh ionosfernykh korotkovolnovykh radiolinij: monografija / Mar. gos. un-t. – Joshkar-Ola, 2013. – 147 p. – ISBN 978-5-94808-762-7.
17. Schiriy A.O. Arhitektura programmnoj chasti apparatno-programmnogo kompleksa distancionnogo nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery // Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemah. 2015. №18. pp.144-152.
18. Schiriy A.O. Razvitie sredstv avtomatizacii nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya. 2014. T.14. №5. pp.170-173.
19. Konoval'chik A.P., Schiriy A.O. Universal'naya programmная platforma dlya imitacionnogo modelirovaniya boevykh dejstvij // Voprosy radioelektroniki. – 2019, №3. – pp.22-26.
20. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Schiriy A.O. Realizaciya imitacionnogo modelirovaniya v razrabatyvaemoj otechestvennoj SAPR RLS polnogo skvoznogo cikla // Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemah. 2018, № 21. pp.290-293.

21. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Schiriy A.O. Obosnovanie oblika perspektivnyh radiolokacionnyh stancij posredstvom razrabatyvaemoj otechestvennoj sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya // Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli. – 2019, T.11, №1. – pp.4-11.
22. Konoval'chik A.P., Schiriy A.O. Imitacionnoe modelirovanie RLS v razrabatyvaemoj SAPR RLS i perspektivy ego perevoda na tekhnologiyu HLA IEEE-1516 // Informacionnye sistemy i tekhnologii. – 2022. №5 (133). – pp.27-34.
23. Arutyunyan A.A., Konopel'kin M.YU., Schiriy A.O. Urovni i etapy proektirovaniya i issledovaniya perspektivnyh radiolokacionnyh stancij v otechestvennoj specializirovannoj SAPR // ZHurnal radioelektroniki. – 2022. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.3>
24. Schiriy A.O. Kompleksnoe imitacionnoe modelirovanie v proektirovanii, razrabotke i otladke radiotekhnicheskikh sistem dekametrovogo diapazona // Sbornik nauchnyh statej po materialam VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya radiotekhnicheskikh i infokommunikacionnyh sistem» («Radioinfokom-2022»), Moskva. – M.: RTU MIREA, 2022. – pp.146-151.
25. Schiriy A.O. Sovmeshchenie sobytijnoj i poshagovoj skhem diskretnogo imitacionnogo modelirovaniya // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022, Vyp.12. – pp.338-342. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-338-343.
26. May M.C., Kiefer L., Kuhnle A., Lanza G. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim // Applied Sciences, 2022, 12(3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>