

СОВМЕЩЕНИЕ СОБЫТИЙНОЙ И ПОШАГОВОЙ СХЕМ ДИСКРЕТНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.О. Щирый

Представлена общая концепция системы имитационного моделирования, совмещающей две схемы дискретного имитационного моделирования: событийную и пошаговую. Пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность процесса моделирования, а дискретно-событийная схема лишена ограничений пошаговой схемы в части взаимодействия автономных асинхронных процессов. Для совмещения преимуществ обеих схем предлагается их совместное использование: фрагменты системы, не требующие асинхронности, описываются в пошаговой схеме, а все прочие – в событийной. В качестве примера системы, реализующей описанную концепцию, приводится отечественная система автоматизированного проектирования радиолокационных станций.

Ключевые слова: имитационное моделирование; дискретно-событийное имитационное моделирование; пошаговая схема имитационного моделирования.

В процессе разработки и проектирования сложных технических систем (СТС) неизменно возникают вопросы выбора принципов и порядка организации взаимодействия составных частей системы. Сложность самой развиваемой системы, большая вариативность и неопределенность окружающей обстановки 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 натурных испытаний. Однако дороговизна подобных испытаний, и тем более невозможность проведения натурных испытаний в ряде случаев, заставляют искать другие решения.

Вообще, мы имеем дело с некоторой СТС, процесс функционирования которой представляет собой совокупность взаимовлияющих процессов, "отягощенную" стохастическими неопределенностями различных параметров, как внутренних, так и внешних (входных). Если нас интересует какой-нибудь обобщенный показатель функционирования этой системы и мы хотим его максимизировать, то можно попытаться поставить, например, общую задачу линейного программирования. Для этого нужно знать линейную зависимость обобщенного показателя от управляемых переменных (целевую функцию), а также уметь выразить все взаимосвязи между переменными в форме линейных ограничений. Очевидно, что зачастую не удастся обосновать не только линейный характер зависимости, но и вообще неясно, как влияет тот или иной входной параметр на обобщенный показатель и влияет ли вообще. Действительно, влияние данного параметра (входного воздействия) на исследуемый показатель может "передаваться" через цепь случайных событий, причем результат может качественно меняться в зависимости от того, какая конкретная цепочка событий реализуется в данном наблюдении. Если же законы распределения указанных случайных событий сложны, а сами события нельзя считать независимыми, то попытки "свернуть" эти законы и получить обычную математическую модель становятся чисто умозрительными. В таких условиях достаточно естественным первым шагом исследования является построение математической и/или алгоритмической модели, которая "буквально" воспроизводит случайную последовательность событий, реализующуюся в моделируемой системе. На каждом шаге одного такого воспроизведения (к данному моменту времени имитационного эксперимента) должна учитываться уже полученная часть цепочки событий и законы, по которым может реализоваться очередное событие.

Наиболее приспособленными для разработки, отладки и оценки эффективности СТС без проведения натурных испытаний являются модели имитационного типа. Имитационное моделирование используется как универсальный метод для обоснования решений в условиях неопределенности и для учета трудноформализуемых факторов. Имитационное моделирование также находит широчайшее применение в экономике, логистике, строительстве, энергетике [1-3], агропромышленном комплексе [4], моделировании боевых действий и систем вооружений и военной техники [1,5-8], в научных исследованиях и др.[9-12]. Поэтому возникает необходимость разработки систем имитационного моделирования (если недостаточно функционала готовых программных продуктов для имитационного моделирования). Такая потребность возникла, например, при создании [13-18] отечественной системы автоматизированного проектирования (САПР) радиолокационных станций (РЛС).

Общая концепция совмещения двух схем моделирования. Оговоримся, что в данной работе предполагается блочно-ориентированная структуризация моделируемого процесса [1,3].

В результате протекания процесса моделирования СТС происходят события, переводящие систему из одного состояния в другое в определенные моменты времени. Учет категории времени позволяет рассматривать поведение или динамику системы в рамках некоторого интервала времени $[t_i, t_n] < T$. Множество моментов времени изменения состояния системы конечно и может быть описано выражением: $T = \langle t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n \rangle$, где t_i – i -ый момент времени изменения состояния системы.

Известны дискретно-событийная и пошаговая схемы имитационного моделирования. При событийной схеме имитационного моделирования «блоки» («частные модели», «агенты») сами определяют

дальнейшую величину продвижения модельного времени. В пошаговой схеме модельное время квантуется с шагом Δt и на каждом шаге проверяются условия изменения состояния системы.

Пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность реализации процесса моделирования, в ней удобно моделировать алгоритмы обработки данных (например, сигналов) и составные части устройств и/или технических систем; для пошаговой схемы возможно создания схемы (графа), определяющей взаимосвязи блоков не только по передаваемым данным, но и по последовательности взаимодействия. Однако, в пошаговой схеме невозможно корректное моделирование параллельных процессов, а также взаимодействия автономных асинхронных процессов. Указанных ограничений лишена дискретно-событийная схема, однако ввиду неопределенности порядка взаимодействия асинхронных агентов, общая схема имитационной модели не обладает такой наглядностью как в случае пошаговой схемы (особенно в случае имитационных моделей состоящих из большого числа взаимодействующих частей); в дискретно-событийной схеме невозможно задать схему порядка взаимодействия блоков, а возможно (и даже необходимо) задать только схему связи блоков по данным.

В дискретно-событийной схеме ведется динамическая очередь задач ("календарь"), управляемая диспетчером имитационного моделирования (ДИМ), который определяет порядок передачи управления между вычислительными блоками (агентами, частными моделями – в других терминах). Это делается для синхронизации "модельного времени", в условиях, когда вычислительные блоки "шагают" по времени исходя из своей внутренней логики, временными интервалами произвольного размера.

В пошаговой схеме передача управления между вычислительными блоками происходит последовательно, в соответствии с заданным графом связей между блоками.

Общей проблематике построения систем имитационного моделирования по дискретно-событийной схеме, и, в частности, синхронизации модельного времени (консервативный и оптимистический подходы) посвящены работы [9-12], здесь отметим лишь, что здесь используется подход, в указанных работах именуемый консервативным. В очереди задач могут регистрироваться события разных типов (каждому типу событий соответствует свой обработчик). Каждое событие, помещаемое в очередь задач, регистрируется на определенное модельное время.

Поэтому предлагается концепция совмещения двух схем дискретного имитационного моделирования: событийной и пошаговой, для совмещения преимуществ обеих схем. Их совместное использование на стадии создания моделей предлагается по такой схеме: фрагменты системы, не требующие асинхронности, описываются в пошаговой схеме, а все прочие – в событийной. Блок событийной модели внутри может содержать модель созданную из блоков по пошаговой схеме. При этом на стадии реализации самой системы реализуются два планировщика: «высокоуровневый» дискретно-событийный диспетчер и «низкоуровневый» пошаговый. Дискретно-событийный диспетчер взаимодействует с пошаговым планировщиком каждый раз, когда рассчитывает очередной событийный блок.

Пример реализации в САПР РЛС. Предлагаемая концепция совмещения двух схем дискретного моделирования предложена автором (и реализована под его руководством) в ходе участия в опытно-конструкторской работе (ОКР) САПР РЛС, проводимой АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» в 2016-2021 гг. Специфика разрабатываемой САПР в наибольшей степени выражена в функциональных возможностях имитационного моделирования боевых действий, необходимых для проектирования изделий с учетом требований к РЛС, конкретных условий боевого применения, характеристик средств воздушно-космического нападения (СВКН), фоноцелевой обстановки (ФЦО). Важнейшим направлением применения разрабатываемой САПР является обоснование облика проектируемых РЛС и радиолокационных систем по результатам проведения комплексного имитационного моделирования процесса их функционирования в ходе отражения удара СВКН.

В разрабатываемую САПР РЛС закладывается концепция многоуровневого ведения проектирования РЛС с применением данной САПР.

1. Системный уровень: размещение на картах местности РЛС, компонентов радиолокационных (РЛ) комплексов, целей, а также маршрутов их движения, источников помех с заданием типов. Компоненты выбираются из существующих библиотек готовых изделий, образцов (шаблонов), а также из компонентов, создаваемых на следующих (нижних) уровнях проектирования. Позволяет оценить эффективность работы группировки РЛ средств по фиксированному набору целей с учетом местности и внешних воздействий в условиях применения конкретных средств воздушно-космического нападения (СВКН) и воздушно-космической обороны (СВКО).

2. Структурный уровень: создание структуры РЛС из готовых образцов составных частей (приемник, передатчик, антенно-фидерные устройства, опорно-поворотные устройства, и т.д.). На этом уровне проводится исследование возможности создания и оценка показателей эффективности работы РЛС, состоящей из различных составляющих для выполнения конкретной задачи в фиксированных условиях; обоснование оптимального состава РЛС. А в перспективе и функционально-стоимостной анализ различных проектных решений.

3. Логический уровень: варьирование алгоритмов цифровой обработки информации (первичной, вторичной, третичной) с целью обеспечения оптимального их сочетания по выбранным критериям эффективности. Выбор и обоснование оптимального алгоритма управления РЛС, типов и параметров используемых сигналов. Содержит компоненты и инструменты разработчика алгоритмов обработки радиолокационной информации, цифровой обработки сигналов и управления режимами работы РЛС.

4. Схемотехнический уровень: создание принципиальных схем блоков аналоговой и цифровой обработки сигналов, устройств управления РЛС, приемных и передающих модулей, генераторов сигналов, блоков питания и т. п.

5. Конструктивно-технологический уровень: создание 3D-моделей и чертежей конструктивных элементов; разработка рабочей конструкторской документации (РКД).

Отметим, что уровни проектирования следует отличать от этапов проектирования, хотя для каждого из этапов можно выделить один или несколько уровней наиболее актуальных на данном этапе [16,17].

Реализация поддержки 4 и 5 уровней проектирования осуществляется путем интеграции с существующим программным обеспечением схемотехнического и конструкторско-технологического моделирования и проектирования. Поддержка уровней проектирования с 1 по 3 реализована в ходе выполнения ОКР САПР РЛС.

Различия моделирований на системном и структурном уровнях заключаются в следующем. Системный уровень предназначен для анализа результатов моделирования, и ориентирован на оптимизацию размещения РЛС, объединение их в комплексы и системы с разветвлённой иерархией командных пунктов, отработку различных вариантов воздушного нападения, построение траекторий и оснащения объектов на радиосцене. На системном уровне задаются координаты стояния, тип РЛС (роль в группе), количество и координаты антенн, их тип, а также система управления из связанных командных пунктов и средств объединения РЛС в комплексы и системы. Решаются задачи анализа эффективности объединения РЛС в комплексы и системы, эффективности взаимодействия внутри группы. Настройка расположения РЛС, траекторий объектов наблюдения. Эффективность использования разнесённых антенн с учётом подстилающей поверхности, климатических особенностей сценария и пр. На системном уровне производится выбор типов моделирования явлений распространения и рассеяния сигнала из списка подготовленных моделей. Внутри типов моделей рассеяния-распространения реализуются версии и редакции. Выбор конкретной модели с указанием версии и редакции производится средствами «центра управления» перед началом численного эксперимента.

Структурный уровень моделирования – это набор программных средств и средств анализа результатов моделирования, ориентированный на оптимизацию параметров приёмных и передающих трактов РЛС, модулей управления антеннами и антенными решетками, управления модуляцией зондирующего сигнала (ЗС). Предполагается, что облик оптимизируемой РЛС и требования к её техническим параметрам определены на системном уровне, а структурный используется для поиска наилучших технических решений для достижения указанных требований. Решаются задачи анализа эффективности работы конкретных технических элементов приёмных и передающих трактов, использования антенн с заданной геометрией и системой управления, ЗС с заданными режимами модуляции и пр. Предполагается, что в САПР будет создана база готовых элементов приёмных и передающих трактов РЛС, антенн и пр. Это позволит проводить сравнение компоновок РЛС на базе готовых модулей, производство которых освоено, а также исследовать вопросы необходимости разработки новых образцов указанной техники. На структурном уровне РЛС представлена набором компонентов – программных модулей и связей между ними. Поведение РЛС на структурном уровне контролирует блок управления режимами работы (УРР). Модель РЛС на структурном уровне выполненную в виде графа потоков данных, можно отображать, создавать и оперативной корректировать визуальными средствами редактора. Настройки режимов работы такой модели возможны путём задания фактических параметров работы её элементов, а также путём глубокой перекомпоновки в редакторе. Структурные модели РЛС могут использоваться для решения задач системного уровня без ограничений. На обоих уровнях моделирования расчёт работы РЛС происходит одинаково, только на системном уровне внутренняя структура станции скрыта от пользователя, реализуя механизм инкапсуляции. Также на этом уровне содержатся компоненты и инструменты разработчика алгоритмов обработки радиолокационной информации, цифровой обработки сигналов и управления режимами работы РЛС.

На логическом уровне моделируются, например, потери при распространении сигнала в среде, рассеяние на целях и другие аспекты ФЦО. Конкретная алгоритмическая реализация РЛС (задаваемая с использованием структурного редактора из имеющихся в библиотеке этого редактора блоков) запрашивает через ДИМ результаты работы модулей ФЦО.

Антенны (передающие или приёмные) представлены и на системном уровне, и на структурном. На радиосцене имеется возможность разместить отдельно передающие, приёмные антенны на соответствующих позициях. В структурном редакторе блоки антенн используются как интерфейс на системный уровень, через них передаются данные о сигналах из модели РЛС и внутрь модели РЛС. Данные в приёмные антенны поступают целиком за период работы приёмника (период следования сигнала). В тот момент, когда посчитаны все сигналы от всех целей и постановщиков активных помех за период работы приёмника, вызывается событие окончания приёма для соответствующей РЛС. Вывод результатов работы РЛС – отметок и телеметрии – производится через блок обмена данными, который присутствует в структурном редакторе. Таким образом, модель РЛС связана через технологические блоки структурного редактора: «Передающая антенна», «Приёмная антенна» и «Обмен данными». Таким образом, пользователю предоставляется возможность отладки схемы РЛС на упрощённой ФЦО (структурный уровень), и возможность включения РЛС в состав моделируемых объектов радиосцены на системном уровне.

На структурном уровне расчёт прохождения сигнала через большинство внутренних компонентов РЛС выполняет расчётчик структурного уровня, не связанный с диспетчером имитационного моделирования. Благодаря такому решению имеется возможность промоделировать отдельно взятую цепочку блоков, не затрагивая ФЦО и другие РЛС на системном уровне. По сути, внутри этого уровня реализована пошаговая схема имитационного моделирования (а в целом имитационное моделирование осуществляется по дискретно-событийной схеме).

На системном уровне расчётом и взаимодействием объектов имитационного моделирования управляет ДИМ.

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

В общем виде: ДИМ «подготовит» сигнал, с учетом ФЦО, и вызовет модель РЛС на выполнение в момент окончания работы приёмника этой РЛС, указанный в заявке на излучение. В момент окончания работы приёмника РЛС ДИМ проверяет информацию на наличие новых заявок на излучение и размещает на временной шкале очереди событий следующие моменты окончания приема. Сигнал в момент окончания работы приёмника РЛС подготавливается ДИМ с учетом событий (если такие были) объекта имитационного моделирования «фоноцелевая обстановка».

Таким образом, процесс работы РЛС заключается в обработке и передаче поступающих по цепочке данных:

1) Из интерфейса приёмной антенны ОКО сигнала за период обработки поступают в блок диаграммообразования, далее в приёмник, далее в блок цифровой обработки сигналов (ЦОС), первичной обработки радиолокационной информации (ПОИ), вторичной и третичной обработки информации (ВОИ/ТОИ). Контрольные точки с замерами положения обнаруженных объектов и данные телеметрии поступают в блок обмена данными с диспетчером.

2) Параллельно выполняется цепочка формирования ЗС – передатчик – интерфейс передающей антенны. А также цепочка помехового канала.

Блок управления режимами работы РЛС (УРР) устанавливает параметры работы компонентов РЛС, а также формирует заявку на передачу и приём.

Таким образом, в разрабатываемой САПР реализуется поддержка двух схем имитационного моделирования: на системном и структурном уровнях – по дискретно-событийной схеме, а на логическом уровне – по пошаговой схеме. Пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность, в ней удобно моделировать алгоритмы обработки, составные части РЛС, и даже некоторые несложные виды РЛС. Однако, в ней невозможно корректное моделирование, например, РЛС с параллельной обработкой сигналов на разных частотах. Тем более в ней крайне ограничены возможности для моделирования группировок войск и боевых действий. Поэтому совместное использование двух схем имитационного моделирования позволяет получить преимущества обеих.

Заключение. Таким образом, представлена общая концепция системы имитационного моделирования, совмещающей две схемы дискретного имитационного моделирования: событийную и пошаговую. Пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность реализации процесса моделирования, в ней удобно моделировать алгоритмы обработки данных (сигналов) и составные части устройств и/или технических систем. Однако, в пошаговой схеме невозможно корректное моделирование взаимодействия автономных асинхронных процессов. Указанных ограничений лишена дискретно-событийная схема, однако ввиду неопределенности порядка взаимодействия асинхронных агентов, общая схема имитационной модели не обладает такой наглядностью как в случае пошаговой схемы (особенно в случае имитационных моделей, состоящих из большого числа взаимодействующих частей). Для совмещения преимуществ обеих схем предлагается их совместное использование: фрагменты системы, не требующие асинхронности, описываются в пошаговой схеме, а все прочие – в событийной. Поэтому реализуются два планировщика: «высокоуровневый» дискретно-событийный диспетчер и «низкоуровневый» пошаговый. Дискретно-событийный диспетчер взаимодействует с пошаговым планировщиком каждый раз, когда рассчитывает очередной событийный блок.

В качестве примера системы, реализующей совмещение двух указанных схем имитационного моделирования, приводится отечественная САПР РЛС, где на системном и структурном уровнях проектирования модели описываются по дискретно-событийной схеме, а на логическом уровне – по схеме пошаговой.

Список литературы

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: Пер. с англ. / Под ред. Е.К. Масловского. М.: Мир, 1978. 418 с.
2. Имитационное моделирование: учебное пособие / сост. Д.В. Арясова, М.А. Аханова, С.В. Овчинникова. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. 186 с.

3. Лычкина Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2022. 254 с.
4. Худякова Е.В., Липатов А.А. Имитационное моделирование процессов и систем в АПК: учебник. М.: ИКЦ «Колос-с», 2021. 256 с.
5. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Созинова П.А., д-ра техн. наук, проф. Глушкова И.Н. Тверь, 2013. 528 с.
6. Tolk, A. Engineering Principles of Combat Modeling and Distributed Simulation. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. 2012. 936 p.
7. Коновальчик А.П., Щирый А.О. Универсальная программная платформа для имитационного моделирования боевых действий // Вопросы радиоэлектроники. 2019, №3. С.22-26.
8. Плаксенко О.А., Щирый А.О. Имитационная модель командного пункта системы предупреждения о ракетном нападении в составе системы моделирования боевых действий // Труды восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). СПб, 2017. С. 507-512.
9. David R. Jefferson, Peter D. Barnes Jr. Virtual time III: Unification of conservative and optimistic synchronization in parallel discrete event simulation // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. P. 786-797.
10. Richard M. Fujimoto, Rajive L. Bagrodia, Randal E. Bryant, K. Mani Chandy, David R. Jefferson, Jayadev Misra, David M. Nicol, Brian W. Unger. Parallel discrete event simulation: The making of a field // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. P. 262-291.
11. Fujimoto Richard M. Parallel and distributed simulation systems / Wiley-Interscience publication, 2000. 320 p.
12. Бродский Ю.И. Распределенное имитационное моделирование сложных систем. М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2010. 156 с.
13. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Концепция многоуровневого проектирования РЛС в разрабатываемой САПР РЛС полного сквозного цикла // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т.17. № 4. С. 889-892.
14. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Функции имитации боевых действий в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №3. С. 30-34.
15. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2019, Т.11, №1. С. 4-11.
16. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О., Арутюнян А.А. Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР // Вестник воздушно-космической обороны. 2020. № 4 (28). С. 111-118.
17. Арутюнян А.А., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О. Уровни и этапы проектирования и исследования перспективных радиолокационных станций в отечественной специализированной САПР // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2022. №5. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.5.3.
18. 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.

Щирый Андрей Олегович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник АО «НИПК «НИИДАР», доцент, andreyschiry@gmail.com, Россия, Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

COMBINING AN EVENT-BASED AND STEP-BY-STEP SCHEME DISCRETE SIMULATION MODELING

A.O. Schiry

The general concept of the simulation modeling system combining two discrete simulation schemes: event-based and step-by-step. The step-by-step scheme has such advantages as simplicity and visibility of the modeling process, and the discrete-event scheme lacks the limitations of the step-by-step scheme in terms of the interaction of autonomous asynchronous processes. To combine the advantages of both schemes, their joint use is proposed: fragments of the system that do not require asynchrony are described in a step-by-step scheme, and all others are described in an event-based one. As an example of a system implementing the described concept, the Russian system of automated design of radar stations is given.

Key words: simulation, discrete-event simulation, step-by-step simulation.

Schiry Andrey Olegovich, candidate of technical sciences, scientist, NIIDAR, docent, andreyschiry@gmail.com, Russia, Moscow, Timiryazev RGAU-MSHA