

Т.А. Ким, А.А. Сотников, И.А. Розанов

МЕТОДИКА ВАЛИДАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МНОГОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Аннотация. В статье рассматривается методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы. Актуальность исследования обусловлена возрастающей потребностью в точных и надежных моделях для анализа сложных данных, таких как радиолокационные, гидролокационные, медицинские и другие сигналы. Предлагаемая методика валидации включает в себя использование статистических методов, сравнительных анализов и визуализаций. Предложен комплексный подход, который помогает выявить сильные и слабые стороны имитационной модели. Результаты применения методики обсуждаются в контексте повышения доверия к имитационному моделированию и улучшения качества анализа данных.

Ключевые слова: имитационное моделирование, валидация, многомерные сигналы, адекватность, радиолокация, гидролокация.

T.A. Kim, A.A. Sotnikov, I.A. Rozanov

METHODOLOGY FOR VALIDATING SIMULATION MODELS OF MULTIDIMENSIONAL SIGNALS OF VARIOUS NATURES

Abstract. This article discusses the methodology for validating simulation models of multidimensional signals of various natures. The relevance of the research is determined by the increasing need for accurate and reliable models for analyzing complex data such as radar, sonar, medical, and other signals. The proposed validation methodology includes the use of statistical methods, comparative analyses, and visualizations. The authors present a comprehensive approach that helps identify the strengths and weaknesses of the simulation model. The results of applying the methodology are discussed in the context of enhancing trust in simulation modeling and improving the quality of data analysis.

Keywords: simulation modeling, validation, multidimensional signals, adequacy, radar, scan sonar.

Введение

В современном мире числа и сложные данные становятся основой для принятия решений в различных областях науки и техники. Одним из ключевых инструментов, позволяющих работать с такими данными, являются имитационные модели. Особенно это актуально для многомерных сигналов различной природы, таких как радиолокационные, гидролокационные, медицинские и другие типы сигналов. Обобщенная схема алгоритма действий при имитационном моделировании представлена Рисунке 1.

Адекватность и точность таких моделей играет критически важную роль в обеспечении качества и надежности анализа данных. С их помощью исследуются сложные системы, где традиционные аналитические методы оказываются неэффективными. Результаты исследования имитационной модели должны позволять делать достоверные выводы о самом объекте изучения. Эта достоверность обеспечивается таким важным свойством модели, как **адекватность**.

© Ким Т.А., Сотников А.А., Розанов И.А., 2024

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-11-00049, <https://rscf.ru/project/22-11-00049/>

Ким Тамара Александровна

инженер, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва. Сфера научных интересов: имитационное моделирование, цифровая обработка сигналов, HIL-тестирование. Автор более 20 опубликованных научных работ. ORCID: 0000-0002-0770-8218, SPIN-код: 5243-9323, AuthorID: 984188, ScopusID: 58490329000. Электронный адрес: kimta@bmstu.ru

Сотников Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва. Сфера научных интересов: имитационное моделирование, цифровая обработка сигналов. Автор более 30 опубликованных научных работ. ORCID: 0000-0002-5204-7551, SPIN-код: 1754-5370, AuthorID: 905909, ScopusID: 57527212100. Электронный адрес: sotnikov@bmstu.ru

Розанов Иван Александрович

программист, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва. Сфера научных интересов: искусственный интеллект, автоматизация производства. Автор более 10 опубликованных научных работ. ORCID: 0000-0002-1145-277X, SPIN-код: 4006-5790, AuthorID: 1153489, ScopusID: 57245014800. Электронный адрес: inanr@tovenda.ru



Рисунок 1. Основные этапы имитационного моделирования

Источник: рисунки выполнены авторами.

Не менее значимым этапом является процесс проверки имитационной модели. Проверка имитационной модели делится на две основные части: правильность трансляции модели на язык вычислительной машины (верификация) и проверка соответствия разработанной модели исследуемой системе или процессам (валидация). В ходе верификации проводятся тесты, в ходе которых модель должна продемонстрировать определенные реакции на задаваемые входные воздействия.

Валидация, в свою очередь, является важным этапом подтверждения ее достоверности и соответствия реальным условиям. Валидация имитационной модели служит гарантом того, что она не только корректно воспроизводит сигналы и взаимодействует с внешними системами, но и делает это в рамках строгих временных и функциональных ограничений.

Среди существующих исследований в области имитации многомерных сигналов можно найти множество теоретических и практических работ [1–7], посвященных созданию имитационных моделей сигналов, применению их в различных системах и анализу их характеристик. Однако, несмотря на обширные исследования в данной области, по нашему мнению, на текущий момент не существует единообразной и четко сформулированной методики валидации таких имитационных систем, особенно в контексте работы в реальном времени и взаимодействия с системами управления.

Причины отсутствия унифицированной методики валидации

Специфика каждой имитационной модели. В зависимости от целей, которые преследует имитационная модель, параметры валидации могут значительно различаться. Модели, ориентированные на генерацию сигналов, например, для радиолокационных систем, имеют свои уникальные требования по сравнению с моделями гидролокации или медицинских систем. Следовательно, единой методики, которая могла бы подойти для всех типов систем, не существует.

Особенности работы в режиме реального времени. Большинство имитационных моделей не ориентировано на строгие требования реального времени, где важнейшую роль играют временные параметры, такие как задержка передачи данных и время отклика. Это усложняет применение универсальных подходов к валидации.

Отсутствие фокусировки на взаимодействии с внешними системами. В существующих работах большинство методов валидации сосредоточено на внутренней точности модели (точность воспроизведения сигнала, соответствие параметрам). Однако практически не уделяется внимания валидации взаимодействия имитационной системы с внешними системами управления, где важно учитывать циклограмму работы и синхронизацию данных.

Необходимость разработки собственной методики

Существует острая необходимость в разработке уникальной методики валидации имитационной модели многомерных сигналов, которая бы охватывала следующие ключевые аспекты.

1. Оценка адекватности модели в реальных условиях эксплуатации. Валидация должна включать проверку точности воспроизведения сигналов, задержек и временных характеристик системы.

2. Работа в режиме реального времени. Разработанная методика должна учитывать строгие требования к минимальным задержкам, стабильности времени отклика и производительности системы при различных нагрузках.

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

3. Взаимодействие с внешними системами. Методика должна обеспечивать проверку корректного взаимодействия имитационной модели с системами управления, включая соблюдение временных ограничений циклограммы и синхронизацию сигналов.

4. Масштабируемость системы. Увеличение числа обрабатываемых сигналов и проверка работы системы под высокой нагрузкой также должны быть частью методики.

Цель данной статьи – разработка и обоснование новой методики валидации имитационной модели многомерных сигналов, учитывающей требования к адекватности, точности, масштабируемости и режиму реального времени. Предложенная комплексная методика включает в себя использование статистических тестов, сравнительных анализов и визуализаций.

Предлагаемая методика валидации направлена на обеспечение точности и надежности результатов для имитационных моделей независимо от типа моделируемого сигнала. Тем не менее для демонстрации применения методики в данной работе основной акцент будет сделан на радиолокационных и гидролокационных сигналах как на ярких примерах сложных многоуровневых сигналов, широко используемых в различных практических областях. Это позволит глубже рассмотреть основные этапы и принципы валидации, описываемые в предлагаемой методике. Также для проверки этой методики были проведены эксперименты с использованием программного комплекса имитационного моделирования многомерных сигналов, основой которого стала обобщенная имитационная модель многомерных процессов активной локации в режиме реального времени [8], разработанная авторами данной статьи.

Структурная схема разработанной имитационной модели

В основе активной локации лежит физический процесс распространения волны зондирующего сигнала в физической среде и ее отражение от объекта локации и других неоднородностей среды распространения волн. Характер распространения волны определяется скоростью и законом распространения волны.

Первичная обработка отраженных сигналов приемным устройством локатора позволяет определить такие параметры объекта локации, как дальность, радиальная составляющая взаимной скорости сближения, угловые координаты. Дальнейшее наблюдение за параметрами объекта локации и их анализ позволяют определить взаимное ускорение, форму объекта локации и траекторию его движения, а в завершение и решить задачу классификации.

Факторами, усложняющими обработку принятого отраженного сигнала, являются: снижение его энергетических характеристик вследствие его распространения в физической среде; искажение формы; сложность обнаружения «полезного» сигнала на фоне ложных отражений от прочих неоднородностей физической среды – помех и собственных шумов приемного канала локатора.

Схема обобщенной имитационной модели процессов активной локации представлена на Рисунке 2.

На рисунок вынесены следующие обозначения:

- P_{LS} – вектор параметров зондирующего сигнала (LOCATOR SIGNAL);
- P_{NS} – вектор параметров сигналов активных помех (NOISE SIGNAL);
- P_L – вектор параметров локатора;
- P_{Ni} – вектор параметров источников активных помех;

- P_M – вектор параметров физической среды распространения волн;
- P_O – вектор параметров неоднородности физической среды распространения волн;
- Φ_L – оператор преобразования зондирующего сигнала локатором;
- Φ_{Nj} – оператор преобразования сигналов активных помех;
- Φ_M – оператор преобразования сигналов при прохождении физической среды распространения волны (затухание, зашумление);
- Φ_O – оператор преобразования сигналов при отражении зондирующего сигнала от неоднородностей (объект локации, границы физических сред распространения волны и др.).

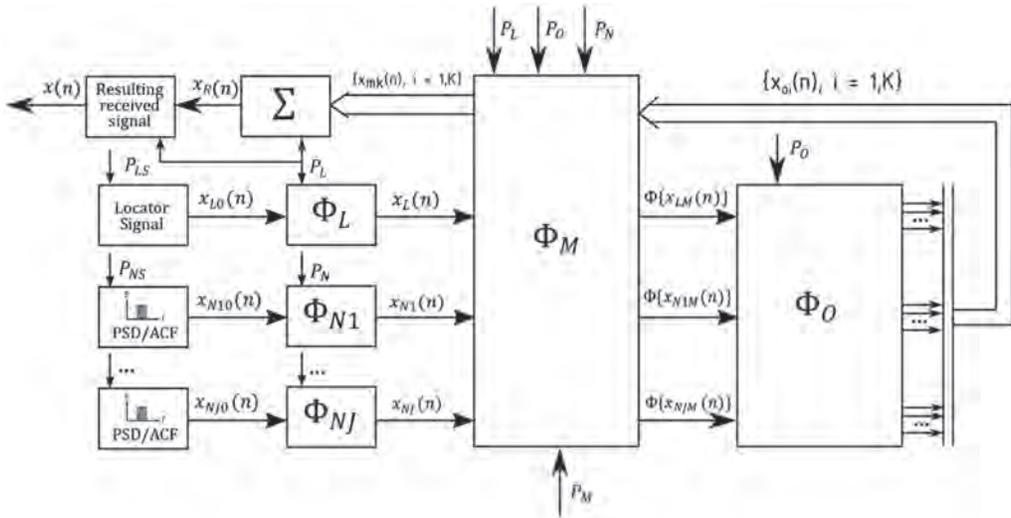


Рисунок 2. Структурная схема обобщенной имитационной модели процессов активной локации

Активными источниками в модели активной локации являются зондирующий сигнал (как правило, единственный) и несколько помех. Зондирующий сигнал выбирается исходя из предъявленных к локационной задаче требований и задается во временной форме для корректного учета фазы при дальнейшей обработке результирующего имитированного сигнала с учетом вектора параметра зондирующего сигнала P_{LS} . Активные помехи в целях оптимизации объема вычислений модели формируются спектрально-корреляционным методом в соответствии с заданной функцией спектральной плотности мощности (далее – ФСПМ) или автокорреляционной функцией (далее – АКФ) [9], определяемыми вектором параметров P_{NS} .

Операторы $\Phi_L, \Phi_{N1}, \dots, \Phi_{Nj}$ с учетом векторов параметров локатора и источников активных помех позволяют учесть физические параметры источников сигналов. Так, например, такой параметр источника сигнала, как скорость перемещения, определяет необходимость преобразования частоты сигнала в соответствии с принципами эффекта Доплера. Другим примером вектора параметра P_L для преобразования Φ_L может служить количество каналов многоканального излучателя локатора и вектор фазовых задержек, формирующий за счет заданной разности фаз различных каналов требуемую диаграмму направленности излучаемого сигнала.

 Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

Оператор Φ_M позволяет учесть преобразования сигнала при распространении в физической среде волн. Так, для радиолокации такое преобразование заключается в затухании сигнала, изменения соотношения сигнал-шум путем аддитивного добавления нормального гауссова шума. Для гидролокации преобразование дополнительно усложняется рассеянием, поглощением, преломлением звуковых волн в водной среде. Кроме того, возникает необходимость учета скорости распространения волн в зависимости от таких факторов, как соленость, температура, давление (глубина). Параметры среды в модели задаются вектором параметров P_M .

Оператор Φ_O позволяет получить отраженные сигналы из исходных – зондирующего и сигналов активных помех. При этом количество полученных отраженных сигналов зависит от количества отражателей – неоднородностей физической среды. Количество и свойства отражателей задаются вектором параметров P_O . К сожалению, отражателем может являться не только объект локации или его часть, но и «ложные» отражатели, затрудняющие обработку принимаемого сигнала. Примером таких неоднородностей являются пузырьки воздуха, растворенного в воде, водная поверхность, рельеф дна в гидролокации или местные предметы на земле и водная гладь для радиолокации.

Множество сигналов, полученных переотражением от неоднородностей физической среды и преобразованных с учетом изменений, связанных с распространением волны в физической среде, подлежат суммированию в точке приемной антенны.

Заключительным преобразованием Φ_R результирующего имитированного сигнала $x(n)$ является изменение сигнала в приемном тракте локатора (внутренние шумы, диаграмма направленности многоканального локатора и другие параметры, определенные вектором параметров локатора P_L).

Методика валидации

Цель валидации имитационной модели многомерных сигналов – подтверждение, что имитационная модель достоверно воспроизводит и прогнозирует характеристики сигналов в условиях, приближенных к реальным.

Методика валидации включает в себя следующие ключевые этапы.

Этап 1. Определение критериальных показателей и методов их выявления

Для успешной валидации было необходимо установить набор критериальных показателей для оценки обеспечения требований, сформулированных на этапе разработки имитационной модели:

- 1) минимизация трудоемкости программной реализации и модификации;
- 2) обеспечение масштабируемости;
- 3) обеспечение режима реального времени имитации сигналов;
- 4) обеспечение точности имитации сигналов;
- 5) обеспечение адекватности.

На данном этапе стало очевидно, что подтверждение обеспечения требований требует индивидуального подхода. Невозможно применять один-единственный метод для охвата всех проверок, поскольку различные аспекты модели могут быть лучше оцениваемы с помощью специализированных инструментов или методов.

Этап 2. Сбор и подготовка данных (проведение экспериментов)

Этот этап не менее важен. Для валидации необходимы как обучающие, так и тестовые наборы данных, которые должны представлять собой разнообразные примеры много-

мерных сигналов. Важно обеспечить репрезентативность данных для различных условий. В зависимости от того, какое именно требование проверялось, применялся свой способ сбора и подготовки данных.

Программный комплекс имитации многомерных сигналов был реализован на базе модульной контрольно-измерительной платформы NI PXI, включающий в себя набор различных аппаратных модулей, позволяющих формировать и принимать различные цифровые и аналоговые сигналы с различными характеристиками. Для сбора данных для обеспечения требований 2, 4 было достаточно только контрольно-измерительной платформы NI PXI.

Для сбора данных для обеспечения требований 3, 5 была применена схема взаимодействия, которая включала в себя реальные системы управления радиолокационным и гидролокационным комплексом (см. Рисунок 3).

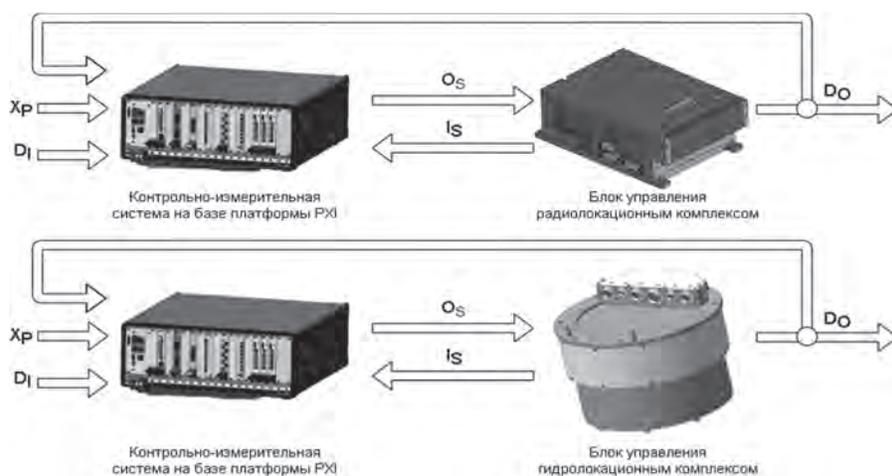


Рисунок 3. Схема взаимодействия контрольно-измерительной системы на базе платформы PXI с блоками управления радио- или гидролокационным комплексом

На рисунке 3 присутствуют следующее обозначения: X_p – вектор входных параметров системы имитационного моделирования, D_1 – вектор входных параметров объекта моделирования (параметры имитированных сигналов), O_s – вектор выходных сигналов системы имитационного моделирования, I_s – вектор входных сигналов системы имитационного моделирования, D_0 – вектор выходных параметров объекта моделирования.

Этап 3. Сравнительный анализ результатов

Для схемы сбора данных, ориентированной на использование исключительно контрольно-измерительной аппаратуры NI PXI, был предусмотрен графический способ анализа данных. Этот способ включал в себя построение графиков, на которых отображается зависимость выбранного критериального показателя (свой для каждого требования) от влияющего на него фактора.

Для схемы сбора данных с реальными блоками управления был разработан другой подход. Рассматриваемые блоки управления взаимодействуют с реальными локаторами, обрабатывая отраженные сигналы для определения различных характеристик целей и получения информации об окружающей среде – воздушной для радиолокационного комплекса и водной для гидролокационного комплекса.

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

В ходе своей работы блоки управления способны создавать файлы регистрации, которые содержат следующие ключевые данные:

- *временные метки* – информация о времени и дате, когда данные были собраны или обработаны;
- *сигналы* – «сырые» данные о переданных и принятых многократно обработанных сигналах, включая амплитуду, частоту, фазу, спектр, длительность;
- *обработанные данные* – результаты обработки сигналов, такие как скорость, расстояние до цели и угол отклонения;
- *параметры среды* – данные о внешних условиях;
- *коды ошибок* – информация о любых ошибках или сбоях, которые произошли в процессе передачи или обработки данных;
- *статистическая информация* – данные о качестве сигнала, например, отношение сигнал-шум (SNR) или количество помех.

Программная система имитационного моделирования многомерных сигналов также имеет функционал, позволяющий вести журналы регистрации данных с такими же ключевыми данными.

Это позволило применить схему сравнительного анализа данных, представленную на Рисунке 4.

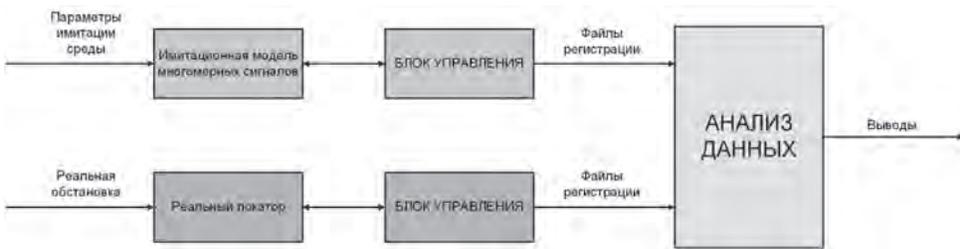


Рисунок 4. Схема сравнительного анализа данных

3.1. Обеспечение минимизации трудоемкости программной реализации, модификации

Данное требование трудно поддается количественной и объективной оценке, поскольку время и ресурсы, необходимые для изменения программных компонентов, зависят как от навыков разработчиков, так и от субъективного восприятия каждого отдельного человека. Однако хочется отметить, что в процессе разработки программной системы была применена архитектура на основе микросервисов. Каждый микросервис представляет собой отдельный модуль, который отвечает за конкретную функциональность. Это позволяет команде работать над разными компонентами независимо, что ускоряет процесс разработки и упрощает сопровождение и тестирование системы.

3.2. Обеспечение масштабируемости

Цель данной проверки – проверка способности программной системы поддерживать работу при увеличении числа одновременно имитируемых сигналов и масштабируемость системы при росте объемов и сложности сигналов.

3.2.1 Критериальные показатели

Производительность системы. Оценка времени отклика и задержек при увеличении числа одновременно обрабатываемых сигналов. Система должна обеспечивать минимальные задержки (не более 10 мс) при увеличении числа генерируемых сигналов.

Использование аппаратных ресурсов. Система должна оставаться в допустимых пределах без превышения критических значений для CPU, RAM и пропускной способности каналов NIPXI.

Корректность обработки сигналов. Проверка, насколько точно сигналы сохраняют свои характеристики (амплитуда, частота, фаза, спектр, соотношение сигнал-шум) при увеличении объема и сложности. Ключевые параметры сигналов (амплитуда, частота, фаза) не должны изменяться при увеличении нагрузки.

Устойчивость системы к высокой нагрузке. Оценка того, как система справляется с экстремальными сценариями, когда число генерируемых сигналов и их сложность значительно превышают средние значения (сигналы, необходимые для взаимодействия с блоками управления). Система должна сохранять стабильную работу при экстремальных сценариях.

3.2.2. Этапы эксперимента и сбор данных

Для сбора данных и проведения экспериментов применялась схема с использованием только контрольно-измерительной аппаратуры NIPXI.

Подготовка системы. Первоначальная настройка была выполнена для минимального количества сигналов (2–5), что позволило создать базовую линию для оценки производительности.

Генерация сигналов и нагрузка. Тестирование проводилось с постепенным увеличением числа одновременно генерируемых и обрабатываемых сигналов от 2 до 50.

Для каждого этапа была оценена производительность системы с помощью замеров следующих параметров:

- *время отклика* – интервал между моментом подачи сигнала и его полной обработкой системой;
- *загрузка процессора* – процент использования процессорных ресурсов системы PXI при увеличении нагрузки;
- *задержка обработки* – время, необходимое для передачи и обработки сигнала, включая моменты переключения между процессами.

Проведение эксперимента

На первом этапе было сгенерировано минимальное количество сигналов (2–5), при этом все параметры (время отклика, загрузка процессора, задержки) измерялись для получения начальных данных.

Затем количество генерируемых сигналов было увеличено до 10, 20, 25 и 30, и производительность системы оценивалась при этих уровнях нагрузки. Особое внимание уделялось производительности системы при 25–30 сигналах, поскольку это количество сигналов представляло наивысшую эффективность системы без значительных потерь в производительности.

Далее количество генерируемых сигналов увеличилось до 40 и 50 сигналов, что позволило проверить пределы системы и выявить рост времени отклика и задержек при высокой нагрузке.

3.2.3. Анализ данных

Для каждого этапа эксперимента были собраны данные по времени отклика, загрузке процессора и задержке обработки (см. Рисунок 5, а–в). Графики были построены на основе собранных данных, чтобы визуализировать зависимости этих параметров от числа генерируемых сигналов.

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

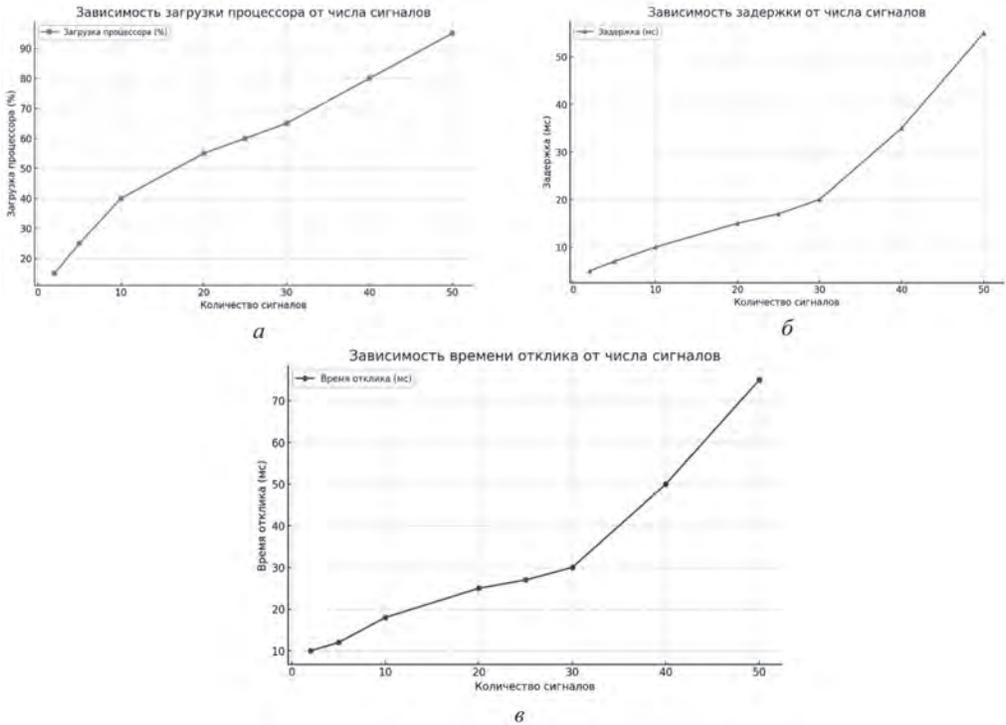


Рисунок 5. Графики зависимости критериальных показателей обеспечения масштабируемости от количества сигналов

Время отклика оставалось приемлемым (около 10 мс) при обработке до 25–30 сигналов, что свидетельствовало о высокой эффективности системы. При увеличении числа сигналов до 40–50 время отклика возросло в 2 раза.

Загрузка процессора постепенно росла по мере увеличения количества сигналов, достигая предельных значений при одновременной генерации 50 сигналов. В диапазоне от 25 до 30 сигналов программная система имитации сигналов работала устойчиво и продуктивно, при этом работа осуществлялась без предельной нагрузки на процессор.

Время задержки обработки (при обработке до 30 сигналов) оставалось в пределах 5–7 мс, однако с дальнейшим увеличением числа генерируемых сигналов данное значение возросло до 20 мс.

3.2.4. Выводы по обеспечению масштабируемости

Эксперимент продемонстрировал, что система имитации многомерных сигналов на базе NI PXI и LabVIEW способна эффективно работать с количеством сигналов до 30, после чего время отклика, загрузка процессора и задержки заметно возрастают, что указывает на возникновение ограничений в производительности системы. Эти данные помогут оптимизировать работу системы при высоких нагрузках и использовать ее в сценариях, требующих обработки большого объема сигналов.

3.3. Обеспечение режима реального времени имитации сигналов

Целью данной проверки было удостовериться, что при взаимодействии с реальными системами управления разработанная нами программная система имитации сигналов не

только формирует необходимые сигналы, но и выдает их в строго определенные моменты времени, согласно рабочим циклограммам.

3.3.1. Критериальные показатели

Точность выдачи сигнала. Отклонение времени формирования сигналов от указанного в циклограмме. Должно быть минимальным (в пределах микросекунд).

Последовательность сигналов. Все сигналы должны быть сгенерированы в правильной последовательности, без пропусков или лишних сигналов.

3.3.2. Методы контроля синхронизации:

Тайм-коды. В программе была реализована функция записи тайм-кодов для каждого сформированного сигнала с занесением в файл-лог. Сравнение этих временных меток с циклограммой позволило точно оценить, насколько система соответствует заданным временным требованиям.

Осциллограф или логический анализатор. Подключение внешнего оборудования для отслеживания сигналов во времени и проверки их соответствия циклограмме.

3.3.3. Этапы эксперимента и сбор данных

Шаг 1. Подготовка к эксперименту

Программная система имитации была настроена в соответствии с предоставленной циклограммой. В циклограмме были указаны точные временные моменты, когда необходимо формировать сигналы или получить данные от системы управления локатором. Эти временные метки задавали основу для тестирования.

Шаг 2. Генерация и контроль сигналов по циклограмме

Программная система имитации начала формировать сигналы в соответствии с временными интервалами, заданными циклограммой. С каждой итерацией события записывались точные временные метки фактического формирования сигналов и сохранялись для анализа.

Шаг 3. Сбор данных о синхронизации

Помимо записи фактического времени формирования сигналов, параллельно фиксировались временные метки, когда реальные сигналы были получены системой управления локатором.

Шаг 4. Оценка временных отклонений

Данные о времени фактического формирования сигналов имитационной системой сравнивались с запланированными временными метками из циклограммы. Основной целью было выявить отклонения и оценить, насколько точно система придерживается временных интервалов. В рамках этого показателя было задано максимальное допустимое отклонение, составляющее 5 мс.

Шаг 5. Анализ синхронизации с реальной системой

Анализировалась разница между фактическим временем формирования сигналов и временем, когда реальные системы фиксировали поступление этих сигналов. Это дало представление о точности синхронизации имитационной системы с реальной системой управления локатором. В рамках этого анализа было задано максимально допустимое отклонение, составляющее 1 мс.

3.3.4. Анализ данных

Для анализа данных были построены два графика – график отклонений сигналов от циклограммы (см. Рисунок 6, а, б) и график синхронизации с реальной системой (см. Рисунок 7). Первый отображает разницу между заданным и фактическим временем пода-

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

чи сигнала для каждой фазы циклограммы, второй – сравнивает время подачи сигналов программной системой и время, зафиксированное в лог-файлах на реальных системах управления.

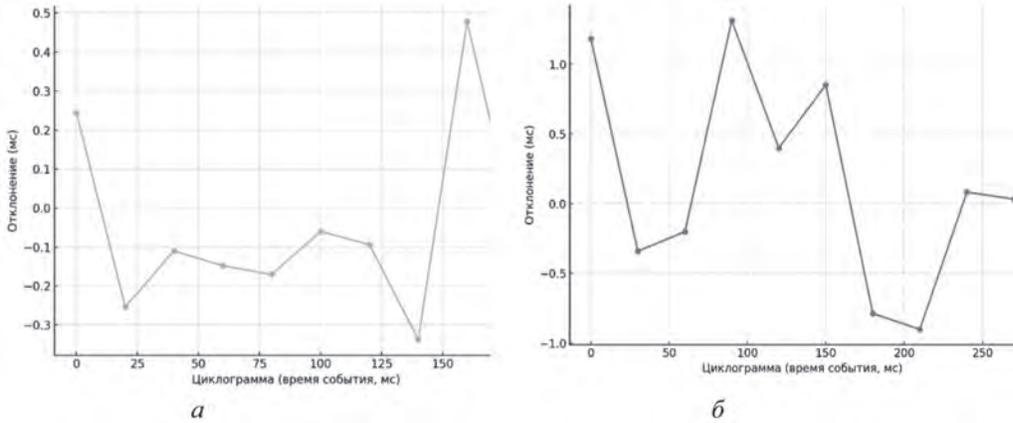


Рисунок 6. График отклонений формирования сигналов программной системой от циклограммы: *а* – для системы управления радиолокатором; *б* – для системы управления гидролокатором

Графики демонстрируют различие между фактическим временем формирования сигналов и временными метками, указанными в циклограмме. На Рисунке 6, *а* построен график, иллюстрирующий, что отклонения времени формирования сигнала составляют не более 0,5 мс, на Рисунке 6, *б* – не более 0,8 мс. Такие отклонения минимальны и не превышали допустимые пределы.

График на Рисунке 7 сравнивает фактическое время подачи сигналов имитационной системой и время получения этих сигналов реальной системой управления локатором. Разница составляет не более 0,2 мс (см. Рисунок 7, *а*) и 0,3 мс (см. Рисунок 7, *б*), что говорит о высокой степени синхронизации между системами. Временные отклонения находятся в допустимых пределах и не превышают их.

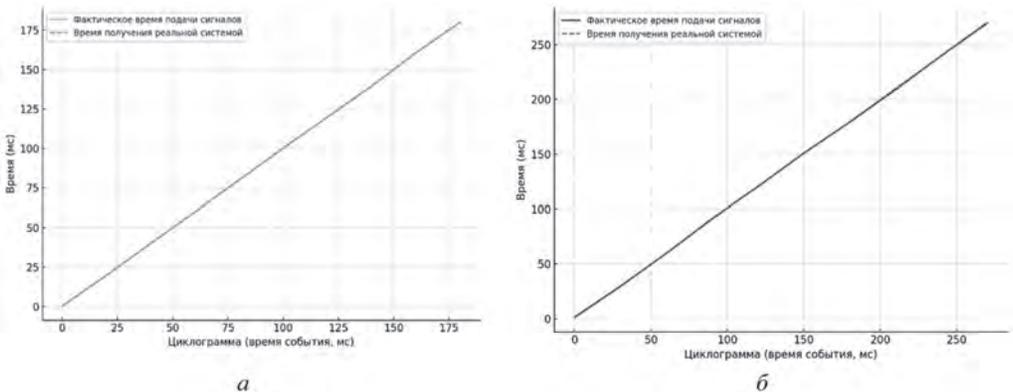


Рисунок 7. График синхронизации с реальной системой: *а* – для системы управления радиолокатором; *б* – для системы управления гидролокатором

3.3.5. Вывод по обеспечению режима реального времени

Этот эксперимент подтвердил, что программная система имитации может работать в условиях реального времени и эффективно взаимодействовать с системами управления локаторами, соблюдая циклограмму и поддерживая точную синхронизацию сигналов.

3.4. Обеспечение точности имитации сигналов

Поскольку использование стандартных сигналов помех может быть недостаточно точным и не всегда отражает сложность реальных условий работы систем, было необходимо реализовать свой метод имитации сигналов активных помех. Для имитации сигналов активных помех был разработан спектрально-корреляционный метод [9], который состоит из двух основных этапов: формирование сигнала в классическом или обобщенном базисе (например, Уолша, Хартли, Пэли и др.) и создание случайного спектра, что и представляет собой непосредственную имитацию. Каждая новая имитация сигнала порождает уникальную реализацию, что позволяет анализировать широкий спектр вариаций сигналов. Графически процесс имитации сигналов активных помех изображен на Рисунке 8.



Рисунок 8. Алгоритм имитации сигналов спектрально-корреляционным методом

Не менее важным стал вопрос о том, как оценить точность имитации получаемых сигналов.

Цель данной проверки – оценка точности имитации сигнала путем сравнения автокорреляционных функций смоделированных сигналов с эталонной теоретической АКФ.

3.4.1. Критериальные показатели

Точность АКФ вычисляется как погрешность между теоретической и экспериментальной (алгоритмической) АКФ.

В свою очередь,

- *алгоритмическая АКФ* позволяет оценить точность первого этапа имитации, то есть формирования спектра;
- *экспериментальная АКФ* характеризует точность конкретных реализаций сигналов;
- *усредненная АКФ* дает интегральную оценку точности алгоритма имитации.

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

3.4.2. Метод оценки точности имитации сигналов

Шаг 1. Определение эталонной теоретической АКФ (R_T)

Теоретическая АКФ задается аналитически и служит эталоном для оценки качества сигналов, сгенерированных имитационной моделью.

Шаг 2. Вычисление алгоритмической АКФ (R_A)

Алгоритмическая АКФ вычисляется после первого этапа моделирования сигнала, где формируется базовый спектр, и используется для оценки точности первой фазы имитации.

Шаг 3. Вычисление экспериментальной АКФ ($R_{\text{э}}$)

Экспериментальная АКФ рассчитывается для каждой новой реализации сигнала на втором этапе моделирования после формирования случайного спектра по формуле

$$R_{\text{э}}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=0}^{N-m-1} y(i)y(i+m), m \in [0, N), \quad (1)$$

где N – количество отсчетов сигнала; m – значение сдвига; $y(i)$ – симитированный сигнал; $y(i+m)$ – сдвинутая копия симитированного сигнала, показывает соответствие конкретной реализации сигнала теоретическим характеристикам.

Шаг 4. Усреднение экспериментальных АКФ

Для получения более точной оценки алгоритма имитации экспериментальные АКФ усредняются по набору реализаций.

Шаг 5. Сравнение АКФ

Сравнение теоретической, алгоритмической и экспериментальной АКФ позволяет выявить погрешности моделирования.

Схема оценки точности алгоритмов имитации показана на Рисунке 9.



Рисунок 9. Схема оценки точности алгоритмов имитации

Погрешность алгоритмической и экспериментальной АКФ относительно теоретической АКФ вычисляется по следующим формулам:

$$\varepsilon_A = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \frac{|R_A(m) - R_T(m)|}{R_T(m)}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{э}} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \frac{|R_{\text{э}}(m) - R_T(m)|}{R_T(m)}. \quad (3)$$

Поскольку АКФ симметричны относительно начала координат, их построение выполняется на положительном полуинтервале длиной $\frac{N}{2}$.

3.4.3. Анализ данных

Оценка точности была выполнена путем сравнения графиков АКФ и на основании вычисления погрешностей (по формулам (2) и (3)). На Рисунке 10, *a–д* показан один из примеров, полученных при анализе сигналов для АКФ с ФСПМ заданной формы. На рисунке графики приведены для пяти вариантов N (число отсчетов). Здесь и далее экспериментальная АКФ приводится в усреднении по 100 реализациям сигнала.

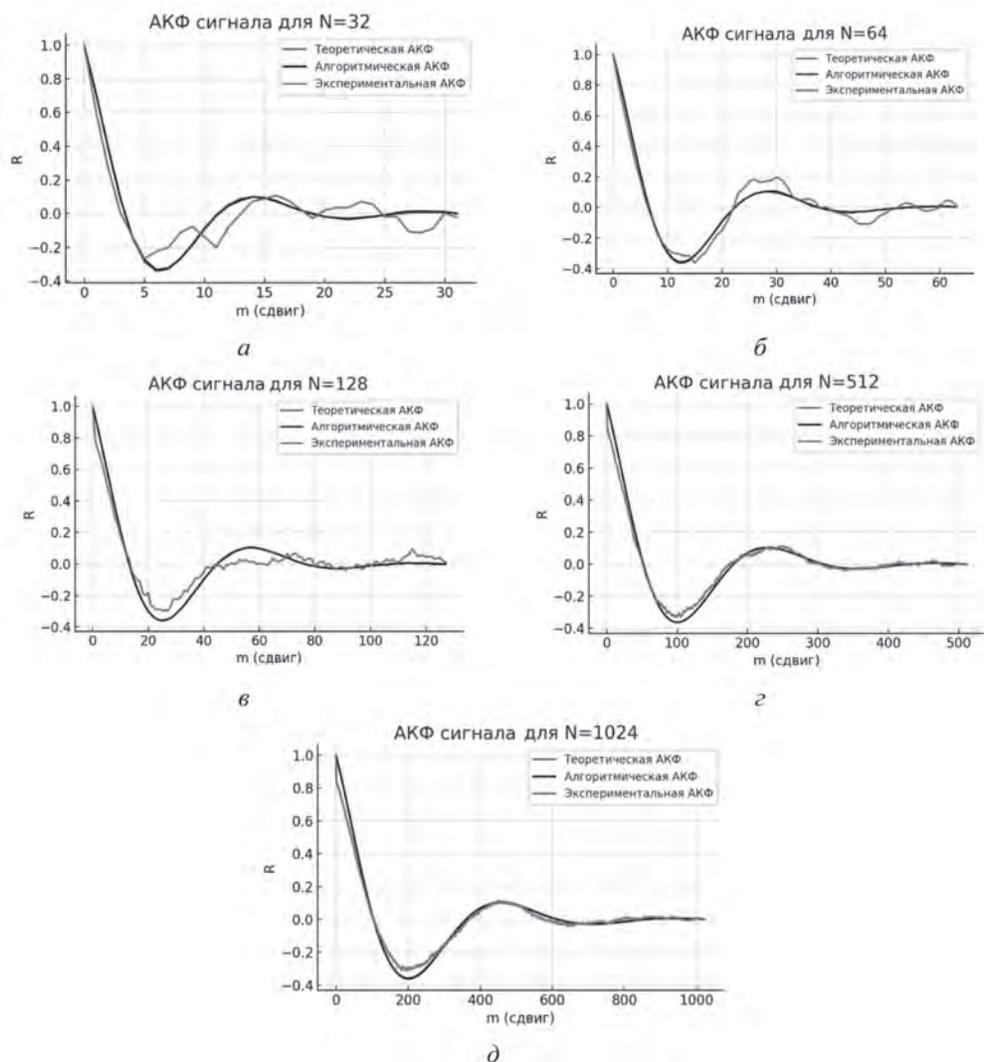


Рисунок 10. АКФ сигнала с ФСПМ заданной формы:
a – $N = 32$; *б* – $N = 64$; *в* – $N = 128$; *г* – $N = 512$; *д* – $N = 1024$

Результаты показали, что алгоритмическая АКФ практически совпадает с теоретической, что свидетельствует о высоком качестве спектрального моделирования. Экспериментальная АКФ имеет более хаотичный характер, но при этом приближена к теоретической, что подтверждает точность конкретных реализаций сигнала.

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

Расчеты относительных погрешностей (формулы (2) и (3)) подтвердили, что с увеличением числа отсчетов точность алгоритмов возрастает. Погрешность экспериментальной АКФ не превышает 10 %, что означает практическую допустимость.

3.4.4. Вывод по обеспечению точности

Метод оценки точности имитации сигналов показал, что используемые алгоритмы обладают высокой точностью, а погрешность не превышает 10 %. Это позволяет использовать имитационные сигналы в широком спектре прикладных задач, включая моделирование активных помех в реальных условиях.

3.5. Обеспечение адекватности

Адекватность имитационной модели определяется в процессе ее верификации и валидации, демонстрируя, насколько точно смоделированные данные соответствуют наблюдаемым данным из реальной системы.

Цель данной проверки – оценить, насколько адекватно имитационная модель воспроизводит сигналы и взаимодействует с системой управления, соответствуя поведению реальной системы, такой как радиолокационная или гидролокационная установка.

3.5.1. Критериальные показатели

Точность воспроизведения характеристик сигналов. Проверялись такие параметры, как амплитуда, частота, фаза и спектральные характеристики сигналов.

Соответствие обработанных данных. Включали скорость, расстояние до цели и угол отклонения.

Качество сигнала. Соотношение сигнал/шум (SNR) и количество помех.

Ошибки и сбои. Анализировалось наличие кодов ошибок и сбойных состояний для выявления различий в устойчивости систем.

3.5.2. Проведение эксперимента и сбор статистических данных

Эксперимент для оценки адекватности был направлен на анализ работы блоков управления в условиях, имитирующих радиолокационную и гидролокационную обстановку.

Этап 1. Система управления подключается к реальной радиолокационной (гидролокационной) установке для взаимодействия с реальными сигналами, при этом в лог-файле фиксируются ключевые параметры: амплитуда, частота, фаза, угол отклонения и другие параметры целей.

Этап 2. Та же система управления подключается к контрольно-измерительной аппаратуре на базе NIPXI с имитационной моделью. Для имитации реальных условий были заданы параметры радиолокационной и гидролокационной моделей, включая те же цели, среду и помехи, что и для реального локатора. Блок управления обрабатывал сигналы и также создавал файлы регистрации.

3.5.3. Собираемые данные

Лог-файлы от взаимодействия с реальной системой и после взаимодействия с имитационной моделью собираются для последующего анализа.

3.5.4. Анализ данных

Для оценки адекватности использовался дисперсионный анализ (ANOVA). Этот метод позволяет выявить статистически значимые различия между средними значениями групп данных, полученных от реального локатора и имитационной модели. Это помогает количественно определить, находятся ли различия в пределах допустимой погрешности или модель требует доработки. В качестве групп данных для ANOVA анализируются амплитуда, частота, фаза и другие ключевые параметры сигналов.

Метод статистического анализа ANOVA предполагал выполнение следующих шагов.

Шаг 1. Формулирование гипотезы

Нулевая гипотеза (H₀) – результаты имитационной модели соответствуют реальным данным (модель адекватна).

Альтернативная гипотеза (H₁) – результаты имитационной модели не соответствуют реальным данным (модель неадекватна).

Шаг 2. Выбор условий

Нужно выбрать несколько сценариев, учитывающих разные аспекты **гидролокации**:

- *типы целей*, различающиеся по размеру, форме и материалу;
- *разные уровни шумов и помех*, например, структурированные помехи (от других объектов, судов) и случайные шумы;
- *влияние внешней среды* – изменение температуры воды, солености, наличие реверберации.

Для радиолокации:

- *разные типы целей* – размер, форма, материал;
- *вариации уровня шумов и помех*, например, разные типы помех и их интенсивность;
- *изменения в условиях внешней среды* – погода, атмосферные условия.

Шаг 3. Сбор данных

Сбор данных, полученных при взаимодействии блока управления с реальным локатором и имитационной моделью

Шаг 4. Проведение анализа

Для проведения анализа применялся программный метод. Для этого был написан скрипт на языке программирования Python, пример которого представлен ниже.

```
import numpy as np
from scipy import stats
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
# Примерные данные: реальные данные и данные имитационной модели для
разных характеристик
data = {
    'Amplitude': {
        'Real': np.array([]), # реальные данные
        'Simulated': np.array([]) # имитационные данные
    },
    'Frequency': {
        'Real': np.array([]), # реальные данные
        'Simulated': np.array([]) # имитационные данные
    },
    'Phase': {
        'Real': np.array([]), # реальные данные
        'Simulated': np.array([]) # имитационные данные
    },
    # Также сюда могут быть добавлены любые другие характеристики
    # в зависимости от рассматриваемой имитационной модели
}

# Результаты ANOVA и визуализация для каждого параметра
for param, values in data.items():
    real_data = values['Real']
    simulated_data = values['Simulated']
```

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

```

# Выполнение ANOVA
f_statistic, p_value = stats.f_oneway(real_data, simulated_data)

# Вывод результатов
print(f'Параметр: {param}')
print(f'F-статистика: {f_statistic}, p-значение: {p_value}')

# Визуализация данных
plt.figure(figsize=(6, 4))
plt.boxplot([real_data, simulated_data], labels=['Real', 'Simulated'])
plt.title(f'Сравнение реальных и моделируемых данных: {param}')
plt.ylabel('Значение')
plt.show()

# Интерпретация результатов
alpha = 0.05
if p_value < alpha:
    print(f'Для {param} отклоняем нулевую гипотезу, модель неадекватна.\n")
else:
    print(f'Для {param} не отклоняем нулевую гипотезу, модель адекватна.\n")

```

Шаг 5. Интерпретация результатов

F-статистика – показывает отношение дисперсий между группами и внутри групп. Чем выше значение, тем больше различий между группами.

Если $P < 0,05$, то нулевая гипотеза (об отсутствии статистически значимых различий между группами) отклоняется, что может указывать на то, что модель формирует параметр, не соответствующий реальным характеристикам, и требует дополнительного анализа.

Если $P \geq 0,05$, то нулевая гипотеза не отклоняется, что указывает на отсутствие статистически значимых различий между группами и предварительное соответствие параметра модели реальным характеристикам.

3.5.5. Результаты

Для каждого параметра были построены графики типа `boxplot` и гистограммы для визуального сравнения реальных и симитированных данных.

На Рисунке 11 представлены примеры графиков, иллюстрирующих такие параметры, как расстояние до цели, скорость и угол отклонения. В связи с тем, что эти графики имеют схожую форму, мы ограничились демонстрацией лишь части из полученных результатов для более компактного и наглядного представления.

Гистограммы позволили оценить форму и распределение данных. Ширина столбцов указывает на интервалы значений, а высота – на количество данных, попадающих в каждый интервал. Далее сравниваются формы гистограмм. В случае схожести распределения данных можно делать вывод, что имитационная модель точно воспроизводит распределение параметра (как представлено на Рисунке 11).

Графики `boxplot` показывают, как данные распределены по определенному параметру и выделяют ключевые характеристики:

Центральная линия (медиана) – это центральное значение, которое разделяет данные на две равные части. Важно сравнивать медианы реальной системы и имитационной модели. Если они совпадают или близки, то это хороший признак.

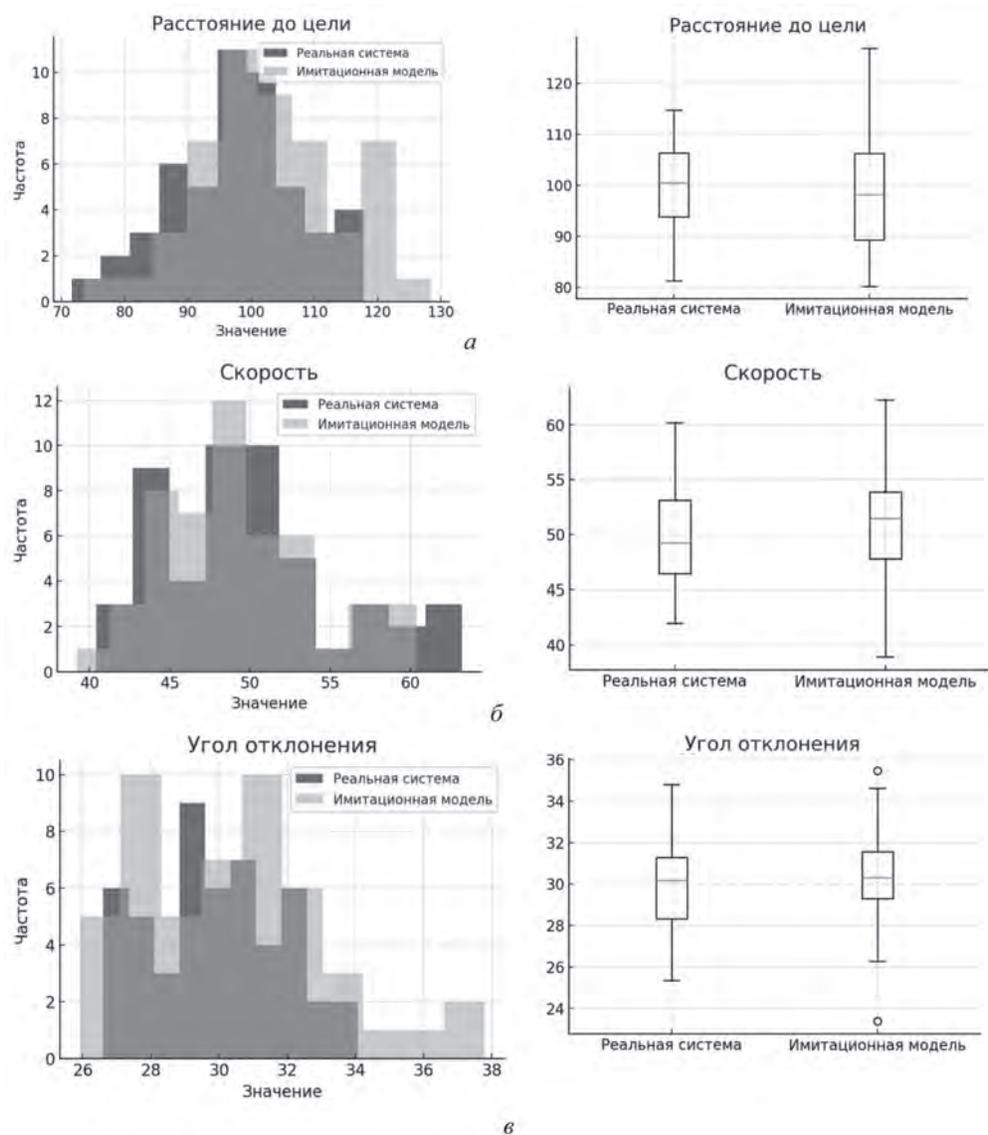


Рисунок 11. Результаты ANOVA-анализа в виде гистограмм и boxplot:

а – расстояние до цели (F -статистика 0,08; P -значение 0,7832);

б – скорость (F -статистика 1,30; P -значение 0,2567);

в – угол отклонения (F -статистика 0,77; P -значение 0,7832)

Ящик (межквартильный диапазон) – отображает диапазон, в котором находится центральная половина данных (от 25-го до 75-го процента). Это важная зона для оценки разброса данных. Если размеры ящиков схожи, это указывает на сходство вариаций данных.

Усы (экстремальные значения) – показывают минимальные и максимальные значения данных, за пределами которых могут находиться выбросы (отдаленные значения).

Методика валидации имитационной модели многомерных сигналов различной природы

Выбросы (точки за пределами усов) – указывают на значительное отклонение от основной массы данных.

На этих *boxplot*-графиках для параметров скорости, угла отклонения и расстояния до цели представлены данные, для которых не наблюдается статистически значимых различий между реальной системой и имитационной моделью. Медианы и разброс значений между реальными данными и имитацией практически совпадают, что свидетельствует о высокой точности модели при воспроизведении этих параметров.

3.5.6. Вывод по обеспечению адекватности

В ходе эксперимента были проанализированы ключевые параметры. Построенные гистограммы и *boxplot*-графики показали, что распределения данных при взаимодействии блоков управления с реальной системой и имитационной моделью близки по каждому из параметров.

Кроме того, результаты ANOVA анализа подтвердили отсутствие статистически значимых различий для всех рассматриваемых параметров (P -значение $> 0,05$). Это указывает на высокую точность воспроизведения имитационной моделью основных характеристик реальной системы. Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что имитационная модель адекватно отражает поведение реальной системы.

Заключение

В статье представлена разработанная методика валидации имитационной модели многомерных сигналов, которая позволяет проводить всестороннюю оценку ее адекватности, соответствия режиму реального времени, масштабируемости и точности. Каждая из этих ключевых характеристик была детально рассмотрена, и для каждой были сформулированы критерии, которым должна соответствовать имитационная модель.

Описанная методика учитывает множество аспектов, связанных как с внутренней структурой модели, так и с ее взаимодействием с внешними системами управления. В статье также приводились примеры экспериментов, демонстрирующих результаты тестирования имитационной модели на соответствие каждому критерию. Эти эксперименты показали, что предложенная методика позволяет эффективно выявлять узкие места и зоны для улучшений в работе модели, обеспечивая точность воспроизведения сигналов и стабильность при увеличении числа генерируемых сигналов.

Актуальность разработанной методики подчеркнута отсутствием в исследованиях целостных подходов, которые охватывали бы все необходимые параметры для успешной валидации имитационных моделей. В этой связи предложенная методика заполняет данный пробел и представляет собой инструмент, который можно адаптировать для широкого спектра задач и систем.

Результаты проведенных экспериментов подтвердили, что система, прошедшая валидацию по данной методике, может быть использована в реальных условиях, обеспечивая высокую точность, соответствие режиму реального времени, масштабируемость и адекватность. Внедрение этой методики позволит значительно повысить надежность и устойчивость имитационных систем в критически важных приложениях, где точность и адекватность являются решающими факторами.

Таким образом, предложенная методика может применяться как универсальный инструмент для валидации имитационных моделей, что обеспечивает комплексное тестирование моделей и способствует повышению доверия к имитационному моделированию и его дальнейшему использованию для оптимизации работы реальных систем.

Литература

1. Дорозко В.М. Имитационная модель радиолокационного эхо-сигнала // Дальневосточный математический журнал. 2001. Т. 2. № 1. С. 98–113. EDN EQVMJF.
2. Богданова А.Ю., Теплянских Д.И., Выдрин В.А. Проведение валидации и верификации на примере имитационной модели телефонной станции // Россия молодая : Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года / Отв. ред. К.С. Костиков. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. С. 316051–316058. EDN FHVGYO
3. Бабкин Е.А., Разиньков В.В. Верификация событийных имитационных моделей // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2012. №4 (24). С. 95–105. EDN PLFQNJ. URL: https://api-mag.kursksu.ru/api/v1/get_pdf/762 (дата обращения: 25.10.2024).
4. Sony M., Marriapan V. A Methodological Approach to Assessment and Reporting of the Model Adequacy in Simulation Studies // International Journal of Operations Research and Information Systems (IJORIS). 2021. Vol. 12. No. 4. P. 1–17. DOI: 10.4018/IJORIS.20211001.0a2
5. Atamturktur S., Stevens G.N., Brown D.A. Empirically Improving Model Adequacy in Scientific Computing. In: Barthorpe R., Platz R., Lopez I., Moaveni B., Papadimitriou C. (Eds) *Model Validation and Uncertainty Quantification*. Vol. 3. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham, 2017. P. 363–369. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54858-6_37
6. Tedeschi L.O. Assessment of the adequacy of mathematical models // Agricultural Systems. 2006. Vol. 89. No. 2-3. P. 225–247. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.11.004
7. Sargent R.G. Verification and validation of simulation models // Journal of Simulation. 2013. Vol. 7. No. 1. P. 12–24. DOI: <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>
8. Sotnikov A., Kim T., Rozanov I. A generalized multidimensional signal simulation model in an active locator receiver // 2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro, June 06–10, 2023. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/MECO58584.2023.10154902. P. 1–7.
9. Сотников А.А., Ким Т.А. Спектрально-корреляционный метод имитационного моделирования отраженного сигнала в приемном канале локатора на фоне узкополосных помех // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA – 2023 : Доклады XXV Международной конференции, Москва, 29–31 марта 2023 г. М. : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. С. 275–280. EDN JLABSS.

References

1. Dorozhko V.M. (2001) Radar echo-signal imitating model. *Far Eastern Mathematical Journal*. Vol. 2. No. 1. Pp. 98–113. (In Russian).
2. Bogdanova A.Yu., Teplyanskih D.I., Vydrin V.A. (2021) Validation and verification using a telephone station simulation. In: Kostikov K.S. (Ed) *Rossiya molodaya* [Young Russia] : Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Kemerovo, April 20–23, 2021. Kemerovo : Kuzbass State Technical University Publ. Pp. 316051–316058. (In Russian).
3. Babkin E.A., Razin'kov V.V. (2012) Verification of event simulation models. *Uchenye zapiski. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Electronic scientific journal of Kursk State University]. No. 4 (24). Pp. 95–105. URL: https://api-mag.kursksu.ru/api/v1/get_pdf/762 (accessed 25.10.2024) (In Russian).

4. Sony M., Marriapan V. (2021) A Methodological Approach to Assessment and Reporting of the Model Adequacy in Simulation Studies. *International Journal of Operations Research and Information Systems (IJORIS)*. Vol. 12. No. 4. Pp. 1–17. DOI: 10.4018/IJORIS.20211001.0a2
5. Atamturktur S., Stevens G.N., Brown D.A. (2017). Empirically Improving Model Adequacy in Scientific Computing. In: Barthorpe R., Platz R., Lopez I., Moaveni B., Papadimitriou C. (Eds) *Model Validation and Uncertainty Quantification*. Vol. 3. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. Pp. 363–369. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54858-6_37
6. Tedeschi L.O. (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*. Vol. 89. No. 2-3. Pp. 225–247. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.11.004
7. Sargent R.G. (2013) Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*. Vol. 7. No. 1. P. 12–24. DOI: <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>
8. Sotnikov A., Kim T., Rozanov I. (2023) A generalized multidimensional signal simulation model in an active locator receiver. In: *2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. Budva, Montenegro, June 06–10, 2023. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/MECO58584.2023.10154902
9. Sotnikov A.A., Kim T.A. (2023) A spectral-correlation method for simulation of a reflected signal with narrow-band interference in the reception channel of a radar. In: *Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye DSPA – 2023* [Digital signal processing and its application, DSPA – 2023] : Proceedings of the XXV International conference, Moscow, March 29–31, 2023. Moscow : Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications Publ. Pp. 275–280. (In Russian).