<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-10-18>

УДК 621.396.969, 004.94

Разработка цифрового двойника радиолокационной станции дальнего обнаружения

Д. А. Балакин, Е. В. Керский

Открытое акционерное общество «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”», Москва, Российская Федерация

В статье обсуждаются результаты разработки упрощенной верификационной модели (УВМ) РЛС дальнего обнаружения, которая является первым шагом к построению цифрового двойника. УВМ способствует общему пониманию принципов работы изделия, а также позволяет определить параметры управления аппаратурой и программным обеспечением. В статье показано, что с помощью УВМ можно отработать алгоритмы калибровки и фазировки передающего и приемного тракта по внешнему источнику, по контрольному сигналу. Также УВМ позволяет имитировать обработку сигналов от различных целей: самолетов или спутников. В статье представлена архитектура построения УВМ и ее интерфейс управления. Также УВМ позволяет сформировать исходные данные для разработки более сложных моделей.

Ключевые слова: цифровой двойник, упрощенная верификационная модель, радиоэлектронный комплекс, аналоговый приемо-передающий модуль, цифровой приемо-передающий модуль

Для цитирования: Балакин Д. А., Керский Е. В. Разработка цифрового двойника радиолокационной станции дальнего обнаружения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 1. С. 10–18. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-10-18>

For citation: Balakin D. A., Kersky E. V. Development of a digital twin for an early-warning radar system // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 1. P. 10–18. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-10-18>

Поступила 05.11.2019

Одобрена 10.02.2020

Опубликована 21.05.2020

Введение

Современные темпы развития отрасли требуют быстрого и точного прототипирования РЛС с целью повышения качества разработки. Эту задачу можно решить с помощью применения концепции цифрового двойника. Цифровой двойник – это бинарная модель, которая детально имитирует работу РЛС и ее составных частей. Разработка цифрового двойника РЛС является актуальной задачей, так как появляется возможность проверить как можно больше практических решений за минимальное время, а также подтвердить их правильность на этапе эскизного проектирования. Цифровой двойник должен обладать свойствами ситуационного моделирования и отвечать на основной вопрос: как изменяются основные тактико-технические характеристики (ТТХ) изделия в различных условиях функционирования. Например, как увидеть

изменение оценки угловых координат, если каждый приемный канал антенны будет расфазирован, или оценить деградацию алгоритма помехозащиты при нелинейности АЧХ приемника. Быстрые ответы на подобные вопросы существенно экономят время при принятии решений заказчиком, главным конструктором или разработчиком аппаратуры.

К тому же с помощью цифрового двойника можно отлаживать новые концепции управления РЛС и оперативно их внедрять в штатный режим работы. Кроме того, цифровой двойник позволяет верифицировать новые методы и алгоритмы цифровой обработки сигнала без присутствия на объекте испытаний, что существенно экономит время и трудозатраты. Также цифровой двойник позволяет многократно повторить различные эксперименты по помехозащите, по обнаружению и распознаванию сложных целей и многое другое.

Безусловно, разработка цифрового двойника РЛС дальнего обнаружения – сложный

© Балакин Д. А., Керский Е. В., 2020

и трудоемкий процесс, который по времени может быть сопоставим с процессом разработки натурной РЛС. Однако вышеперечисленные преимущества оправдывают потраченное время и затраты. В статье рассматривается упрощенная верификационная модель (УВМ), которая является начальным приближением к цифровому двойнику. Ключевым достоинством УВМ является то, что она отражает конструктивные и физические особенности аппаратной части разрабатываемой РЛС дальнего обнаружения. К конструктивным особенностям можно отнести: размер РЛС, общую структуру и вид антенного полотна, в частности тип излучателей и расстояние между ними, коммутацию аналоговых и цифровых приемо-передатчиков, метод формирования диаграмм направленности (применительно к данной модели – цифровой метод) и многое другое. Физические особенности – это параметры, которые определены в ТУ на аналоговые и цифровые приемо-передатчики: коэффициент передачи приемо-передающего канала, АЧХ и ФЧХ приемо-передающего тракта, коэффициент шума и другое. Разработка УВМ осуществлялась в пакете Matrix Laboratory (MATLAB). Благодаря проработанному математическому аппарату, MATLAB хорошо подходит для моделирования не только отдельных составных узлов РЛС, но и изделия в целом. В частности, пакет MATLAB включает в себя такие библиотеки, как Phased Array system toolbox, Antenna toolbox, DSP system toolbox и многие другие, которые способствуют быстрому и точному моделированию особенностей разрабатываемого изделия [1]. Также стоит отметить, что сам программный язык MATLAB стал средством общения между научным сообществом по всему миру [2].

Наибольший интерес, с точки зрения моделирования, вызывает утилита Simulink, которая является частью пакета MATLAB. Simulink позволяет осуществить моделирование изделия и его составных частей в наглядной форме. Это, в свою очередь, обеспечивает высокий уровень понимания общих принципов работы разрабатываемой РЛС.

Рассмотрим архитектуру построения УВМ.

Архитектура УВМ

Структурная схема УВМ представлена на рисунке 1.

Главным конструктивным элементом УВМ является антенный радиоэлектронный комплекс (РЭК) (внешний вид РЭК представлен на рис. 2б), состоящий как из аналоговых приемо-передающих модулей (АППМ), так и из цифровых приемо-передающих модулей (ЦППМ). По сути, РЭК является конструктивной единицей РЛС (рис. 2а). Набор из нескольких десятков или сотен РЭКов может имитировать полноценную РЛС. В связи с этим мы разработали на базе утилиты Simulink библиотечный блок РЭК (рис. 3), что позволяет его использовать совместно со стандартными блоками, предусмотренными в Simulink, например цель, среда, антенно-фидерное устройство (АФУ). В свою очередь, РЭК базируется на АППМ и ЦППМ, которые и определяют физические особенности работы станции. Они были выполнены также в виде библиотечных элементов (рис. 3).

Хочется отметить, что в одном РЭК находятся 64 АППМ и 32 ЦППМ, а применительно к полноценной РЛС их порядка нескольких тысяч. На функциональной схеме представлен вычислительный комплекс (ВК), который

Рис. 1. Функциональная схема модели РЛС из одного антенного РЭК в режиме работы по цели

Рис. 2. Внешний вид станции (а) и радиоэлектронного комплекса (б)

Рис. 3. Внешний вид библиотечных базовых блоков: а – РЭК, б – АППМ, в – ЦППМ

формирует команды управления составными элементами модели. Также ВК анализирует принятые команды состояния с целью функционального контроля изделия. Вычислительный комплекс – это абстрактный элемент модели, представляющий собой набор алгоритмов и методов анализа. В частности, ВК позволяет сформировать зондирующий сигнал, осуществить цифровую обработку принятого сигнала. Более подробно ВК будет рассмотрен далее. Помимо ВК и РЭК на функциональной схеме представлены блок АФУ, блок «среда распространения», блок «цель».

В рамках статьи эти блоки подробно рассматриваться не будут, так как они выполнены стандартными средствами утилиты Simulink. Однако нами была предусмотрена возможность интеграции собственных методов и алгоритмов, реализующих функционал блоков, для более детального учета разнообразных особенностей целей, среды и АФУ.

Для общего понимания принципов работы модели УВМ рассмотрим рисунки 4 и 5. На рисунке 4 представлена УВМ, реализованная средствами Simulink. Она соответствует канонической схеме [3], определенной в тео-

Рис. 4. Схема построения упрощенной верификационной модели

рии радиолокации. На рисунке 5 раскрыта схема РЭКа (приемо-передатчика, аппаратная часть РЭКа – подсистема 9) более подробно применительно к модели Simulink.

Генератор сигнала формирует зондирующий сигнал (ЗС) в двух поляризациях (таким образом, всего в модели 128 каналов: 64 горизонтальных и 64 вертикальных), причем вид

и параметры ЗС задаются как стандартными генераторами Simulink, так и с помощью ВК, где можно сформировать ЗС произвольного вида. Далее ЗС поступает в передающий тракт РЭКа через ЦППМ к АППМ (на рисунке 4 это передатчик). Распространение ЗС по линиям ЦППМ и АППМ обеспечивается подсистемой 6 рисунка 5. Подсистема 7 осуществляет дальнейшее распространение сигнала от передающего тракта РЭКа к блокам среда и цель (помеховая составляющая входит в состав блоков и модулей). Далее отраженный сигнал поступает на приемный тракт РЭКа (приемник на рисунке 4) от АППМ к ЦППМ. В свою очередь, распространение сигнала по приемному тракту РЭКа обеспечивает подсистема 5. Подсистема 8 осуществляет распространение отраженного сигнала для дальнейшего анализа с помощью ВК (обработка сигналов).

Рис. 5. Радиоэлектронный комплекс, разделенный подсистемами

На рисунке 5 показано 8 аналоговых блоков (соответствует 1) и 4 цифровых блока (соответствует 2). Отметим, что сигналы от двух аналоговых блоков поступают в один цифровой блок, аналогично выходы цифрового блока обеспечивают два аналоговых блока. В свою очередь, каждый из блоков содержит по 8 АППМ и ЦППМ, представленных на рисунке 3. Разработка дополнительных подсистем аналоговых и цифровых блоков обусловлена улучшением читабельности модели. Аналоговый приемо-передающий модуль выполняет следующие функции: фильтрацию, аттенюацию, предварительное усиление. Также в нем учитываются нелинейные элементы, шумовые эффекты. Цифровой приемо-передающий модуль обеспечивает цифро-аналоговое преобразование, аналого-цифровое преобразование, аттенюацию, преобразование частот, фильтрацию сигнала, многоскоростную обработку [4]. Также в ЦППМ реализованы алгоритмы компенсации задержек сигнала, которые могут возникнуть в приемо-передающем тракте. Вычисление задержек сигнала приемного и передающего тракта ФАР осуществляется по внешнему излучателю/приемнику и реализовано в вычислительном комплексе.

Распределение параметров управления каждым из АППМ и ЦППМ осуществляется с помощью подсистемы 3.

Смоделируем следующую ситуацию: от внешнего источника сигнала в РЭК через среду поступает ЗС. Из-за неидентичности длин кабелей или из-за рассинхронизации АЦП могут возникнуть случайные задержки на каждом из приемных каналов, что, в свою очередь, может повлиять на приемную диаграмму направленности. С помощью подобного режима работы можно симитировать ситуацию калибровки и фазировки станции (рис. 6а и б).

В УВМ предусмотрены различные методы расчета задержек сигнала. Рассмотрим их вкратце (во всех методах один из сигналов является опорным, относительно которого осуществляется расчет задержки):

- метод на основе расчета интеграла взаимной корреляции [5] (далее по тексту – корреляционный метод);
- метод на основе спектрального анализа осуществляет расчет спектров двух сигналов, далее находит номера фильтров, где спектры максимальные, и подставляет их в качестве индексов в расчет разности между фазовыми частотными характеристиками [5] (далее по тексту – спектральный метод);

Рис. 6. Результаты работы УВМ: а и в – приемный сигнал, б и г – диаграмма направленности

Рис. 7. Результаты работы модели: а – расчет задержки, б – расчет задержки в окрестности 25 канала; 1 – истинная задержка сигнала, 2 – рассчитанная задержка с помощью корреляционного метода, 3 – рассчитанная задержка с помощью спектрального метода, 4 – рассчитанная задержка с помощью метода Гильберта, 5 – рассчитанная задержка с помощью метода ЛЧМ; Ch – номер канала, T – задержка сигнала

Рис. 8. Матрица задержек

- метод на основе преобразования Гильберта осуществляет преобразование Гильберта над сигналами, далее рассчитывает фазу отношения между результатами преобразования [5] (далее по тексту – метод Гильберта);

- метод на основе свойств ЛЧМ сигнала осуществляет гетеродинирование между опорным сигналом и сигналом с задержкой, далее производит расчет спектра, где находит значение максимального фильтра, по значению которого производится расчет задержки сигнала (далее по тексту – метод ЛЧМ).

На рисунке 7 представлены результаты обработки вышеизложенными методами.

Из результатов работы модели можно сделать следующие выводы: корреляционный метод дает наибольшую погрешность вычисления задержки сигнала (рис. 7а, штрихпунктирная линия). Преимущество этого метода в простоте его реализации. Спектральный метод и метод Гильберта дают очень близкие

оценки задержки сигнала (рис. 7б), но эти методы не справляются с поставленной задачей, когда задержка сигнала становится больше целого периода сигнала. К тому же эти методы очень чувствительны к шумовым и помеховым составляющим. Метод на основе свойств ЛЧМ сигнала не имеет вышеизложенных недостатков, однако он более сложен в реализации.

Так как в роли ЗС выступает ЛЧМ сигнал, для дальнейшего анализа остановимся на методе ЛЧМ. После расчета задержек сигнала в приеме-передающем тракте необходимо произвести их компенсацию. Компенсация осуществляется в ЦППМ. Для этого была рассчитана матрица задержек (рис. 8).

Каждый столбец матрицы – это набор задержек сигнала на всех каналах, номер столбца – это относительно какого канала производится компенсация задержек. Таким образом, элементы выбранного столбца записываются в ЦППМ, где осуществляется компенсация

задержки сигнала. Результаты компенсации временных задержек представлены на рисунках 6в и г.

Далее рассмотрим структуру и интерфейс управления УВМ.

Структура и интерфейс управления УВМ

Разработанная упрощенная верификационная модель управляется с помощью специальной структуры – структуры управления. По сути, структура управления – это массив структур, где индексом является номер РЭК. В свою очередь, структура РЭК включает в себя следующие компоненты:

- массив структур управления АППМ, где каждая структура хранит собственные значения параметров управления одного АППМ, такие как коэффициент передачи, коэффициенты фильтров, АЧХ и т.п. Таким образом, в модели УВМ каждый АППМ может иметь свои параметры управления, что позволяет адаптировать модули к особенностям реальных АППМ, тем самым приближая УВМ к реальной РЛС;

- массив структур управления ЦППМ, так же как и в АППМ, можно отдельно управлять каждым ЦППМ, например регулировкой задержки сигнала приема/передачи, установкой коэффициентов цифровых фильтров, регулированием ширины полосы сигнала;

- структура цель, которая содержит параметры управления целью: ЭПР, дальность, скорость и т. п.;

- структура среда, которая содержит параметры управления средой распространения: коэффициент отражения от Земли, задержки, количество полос и т. п.

Далее рассмотрим интерфейс управления, который представлен на рисунке 9.

По сути, представленный интерфейс является оболочкой ВК. Как можно видеть, интерфейс управления имеет довольно обширный набор опций, которые позволяют задавать различные режимы отображения полученной информации выбором включения или отключения как АППМ, так и ЦППМ, и многое другое. Вкладка Model List вызывает свой интерфейс управления: формирование зондирующего сигнала, цели, среды, антенны, РЭК, АППМ и ЦППМ. Также предусмотрен режим работы по цели, где в качестве среды распространения и цели выступают стандартные блоки утилиты Simulink. В качестве примера рассмотрим следующую ситуацию: две цели с отличными ЭПР расположены на разных расстояниях. Первая цель находилась на расстоянии порядка 1000 м, другая – на 2000 м. Причем радиальная скорость у целей была разная. Обработка и отображение полученного сигнала осуществлялись стандартными блоками утилиты Simulink. Результат обработки представлен на рисунке 10.

Выводы

На начальном этапе разработки цифрового двойника РЛС была создана упрощенная ве-

Рис. 9. Внешний вид интерфейса управления УВМ

Рис. 10. Режим работы по цели

рификационная модель, в которой был смоделирован один антенный РЭК и его составные части: АППМ и ЦППМ. Модель цели, среды распространения радиоволн, АФУ использовалась из среды Simulink. Благодаря особенностям утилиты Simulink модель получилась наглядной и отражает конструктивные особенности проектируемого изделия. Управление моделью и отображение результатов ее работы осуществляются с помощью разработанного приложения на языке MATLAB. В связи с этим модель имеет гибкую структуру, что позволяет адаптировать каждый отдельный модуль под реальные характеристики разрабатываемого изделия. Были решены следующие задачи: дано общее понимание принципов работы изделия, определены параметры управления аппаратурой и программным обеспечением, отработан режим калибровки приемного и передающего тракта по внешнему калибровочному сигналу, отработан режим обнаружения цели.

Хочется отметить, что модель имеет незаконченный вид и в дальнейшем будет расширяться для выполнения других задач. Приоритетными направлениями развития модели являются: увеличение количества РЭК (увели-

чения размера антенны), задание уравнения движения цели, работа по сложным целям. Также нами рассматривается возможность проведения полунатурного моделирования, применение технологии SDR (англ. Software-defined radio).

Разработка модели идет параллельно с разработкой натурного РЭКа, поэтому дальнейшим направлением будет сравнение параметров, полученных при моделировании, с результатами испытания РЭК.

Список литературы

1. Bassem R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni. *MATLAB simulations for radar systems design*. 2004. 686 p.
2. Матюшев Ю. Ю. *Практика функционального моделирования в радиотехнике*: учеб. пособие. М., 2014. 188 с.
3. Леонов А. И., Васенов В. Н., Гайдук Ю. И. и др. *Моделирование в радиолокации*. М.: Советское радио, 1979. 264 с.
4. Витязев В. В., Зайцев А. А. *Основы многоскоростной обработки сигналов*: учеб. пособие. Ч. 1. Рязань, 2005. 124 с.
5. Гоноровский И. С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М., 2006. 719 с.

Об авторах

Балакин Дмитрий Александрович – инженер 1-й категории Открытого акционерного общества «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”», Москва, Российская Федерация. Область научных интересов: математическое моделирование в радиолокации, цифровая обработка сигналов, методы и алгоритмы диагностики состояния динамических систем.

Керский Евгений Викторович – начальник лаборатории Открытого акционерного общества «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”», Москва, Российская Федерация. Область научных интересов: математическое моделирование в радиолокации, объектно-ориентированное программирование, алгоритмы цифровой обработки.

Development of a digital twin for an early-warning radar system

Balakin D. A., Kersky E. V.

Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications (NIIDAR), OJSC, Moscow, Russian Federation

This article describes the development of a simplified verification model (SVM) for an early-warning radar system, which is the first step to building a digital twin for such a system. An SVM is useful for the understanding of the operating principles of a device, thus enabling the determination of its control parameters. It is demonstrated that an SVM can be used for the development of calibration and phasing algorithms for the transmitting and receiving paths with respect to an external source and a reference signal. In addition, an SVM can simulate the processing of signals from various targets, such as aircrafts or satellites. This article presents the architecture of the developed SVM and its control interface. SVMs can be used to generate source data for the development of more complex models.

Keywords: digital twin, simplified verification model, electronic complex, analogue transceiver module, digital transceiver module

Information about the authors

Balakin Dmitry Aleksandrovich – Engineer of the 1st category, Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications (NIIDAR), OJSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling in radar technologies, digital signal processing, methods and algorithms for the diagnostics of the state of dynamic systems.

Kersky Evgeny Viktorovich – Laboratory Head, Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications (NIIDAR), OJSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling in radar technologies, object-oriented programming, digital processing algorithms.