

А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, А. А. Иофин

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОКОЛА UDP И MATLAB В КАЧЕСТВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЯДРА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ РАС

A. S. Bokov, V. G. Vazhenin, V. V. Mukhin, A. A. Iofin

COMPLEX OF MODELING OF RADAR SIGNALS USING THE UDP PROTOCOL AND MATLAB AS A COMPUTING CORE

Аннотация. *Актуальность и цели.* Известно, что математическое моделирование позволяет разработчикам сравнивать и обоснованно выбирать параметры формирования и обработки сигналов различных систем, в том числе с учетом сочетания неидеальности технических средств и многообразия условий применения. Длительная история разработки и совершенствования радиолокационных станций (РЛС) привела к накоплению наукоемких математических моделей, разработанных с использованием часто несовместимых по коду программных модулей. В ряде случаев, например, при построении системной модели устройства или переводе моделей на новую вычислительную платформу, требуется организовать возможность совместной работы моделей в рамках единого программного комплекса. *Материалы и методы.* В статье рассмотрен программный комплекс, предназначенный для моделирования радиолокационных сигналов бортовых РЛС. При этом интерфейс пользователя, выбор параметров радиолокационной сцены и управление процессом моделирования реализованы на языке высокого уровня Delphi, а в качестве вычислительного ядра выбран MATLAB. Взаимодействие Windows-приложения пользователя с MATLAB выполняется по протоколу UDP по интерфейсу Ethernet, так что среда MATLAB физически может располагаться на удаленном сервере. Весь процесс моделирования радиосигналов поделен на пять последовательных шагов, на каждом из которых выполняется одна модель. От шага к шагу переменные сохраняются в рабочем пространстве MATLAB. *Выводы.* Такой способ построения программного комплекса позволил выполнить условия быстрой разработки функционального дружественного интерфейса пользователя, использования нескольких математических моделей с применением матричных вычислений и комплексных чисел, реализации быстрой коллективной разработки и доработки математических моделей комплекса без recompilation Windows-приложения пользователя. Приведены конкретные примеры моделирования радиосигналов и изображений с помощью предлагаемо-

Abstract. *Background.* It is known that mathematical modeling allows researchers to compare and reasonably choose the parameters of the formation and processing of signals of various systems, including taking into account the combination of non-ideal technical means and a variety of application conditions. The long history of the development and improvement of radar systems has led to the accumulation of high-tech mathematical models developed using often incompatible source codes. In some cases, for example, when customizing a system-level model of a device or transferring models to a new computing platform, it is necessary to organize the possibility of joint work of models within a common software complex. *Materials and methods.* The article considers a software complex aimed to simulate signals for airborne radars. At the same time, the user interface, the choice of parameters of the radar scene and the control of the modeling process are implemented in the high-level language Delphi, and MATLAB is chosen as the computational core. Interaction between a user's Windows-application and MATLAB is performed via UDP protocol over Ethernet, so the MATLAB environment can physically reside on a remote server. The whole process of modeling radio signals is divided into 5 consecutive steps, each of which carries out one model. Step by step, the variables are stored in the MATLAB workspace. *Conclusions.* This method of constructing the software package allowed us to fulfill the conditions for the rapid development of a functional friendly user interface, the use of several mathematical models using matrix calculations and complex numbers, the implementation of fast collaborative development and refinement of mathematical models of the software complex without recompiling the user's Windows-application. Specific examples of modeling radio signals and images using the proposed software complex based on the use of the UDP protocol and MATLAB as computing core are given.

го программного комплекса, основанного на применении протокола UDP и MATLAB в качестве вычислительного ядра.

Ключевые слова: радиолокационный сигнал, математическое моделирование, программный комплекс, MATLAB, протокол UDP.

Keywords: radar signal, mathematical modeling, software complex, MATLAB, UDP protocol.

Введение

При разработке устройств в различных областях техники используются всего несколько типовых подходов-процессов. Наиболее простой и быстрый – это сборка устройства из доступных компонентов, его настройка и программирование для выполнения нужных функций. Как правило, такое устройство должно иметь работающий прототип и/или очевидную возможность реализации, иначе есть риск выбрать не те компоненты, не те методы и «провалить» сроки, бюджет или всю разработку. Но современные устройства становятся все сложнее и сложнее. Часто, еще до выбора компонентов, требуется сразу получить некоторый оптимальный набор параметров реализации, определяющих надежность, точность, малогабаритность, энергоэффективность, стоимость производства, возможность перенастройки, совместимость и др. Эти параметры всегда противоречивы. Но выход есть! Это использование математического моделирования отдельных (ключевых) составляющих и/или всего устройства в целом. Последний, комплексный вариант разработки исполняемой модели (модели функционирования) устройства относится к модельно-ориентированному проектированию (МОП) [1].

МОП позволяет проверять работоспособность выбранных методов формирования и обработки на уровне сигналов и/или на уровне подсистем и их интерфейсов. Однако МОП является и наиболее тщательным и, соответственно, трудоемким процессом разработки, так как необходимо как-то реализовывать моделирование даже готовых (сторонних) подсистем. Впрочем, показано, что при наличии достаточного спектра компонентов, использования опыта предыдущих разработок время разработки и различные проектные риски снижаются, оставляя основные преимущества МОП: четко сформулировать цель, убедить себя и заказчика в возможности решения задачи, в возможности получения некоторых оптимальных сочетаний параметров проектируемого устройства [2, 3]. В большинстве случаев новые устройства строятся по отработанным технологиям, поэтому математическому моделированию подвергаются только новые или критически важные (дорогие для натурной отработки) алгоритмы обработки сигналов. Дополнительно стоит назвать перспективный и уже применяемый, в том числе в рамках МОП, метод разработки программного кода по математической модели [4], который позволяет привлекать «непрограммистов» (системных интеграторов, математиков и др.) непосредственно к стадии разработки частей системного кода для проектируемых устройств.

Таким образом, математическое моделирование позволяет сравнивать и обоснованно выбирать параметры формирования и обработки сигналов различных систем, в том числе с учетом сочетания неидеальности технических средств и многообразия условий применения. Длительная история разработки и совершенствования систем, например в области радиолокации [2, 5, 6], привела к накоплению наукоемких математических моделей, разработанных с использованием часто несовместимых по коду программных модулей. На границе XX–XXI вв. для разработок математических моделей радиосистем использовались языки высокого уровня Паскаль, Фортран, Си. К сожалению, данные языки в силу их универсальности изначально не приспособлены для реализации математических моделей: не удобны, недостаточно библиотек стандартных функций обработки и анализа сигналов [7]. Поэтому в настоящее время, в зависимости от требуемых возможностей, для решения конкретной задачи стоит выбрать универсальный или специализированный пакет математического моделирования. Здесь, в частности для моделирования радиотехнических систем, следует упомянуть наиболее известные пакеты и средства:

- GNU Radio – открытый и бесплатный пакет программ, предназначенный для цифровой обработки сигналов (ЦОС), имеется визуальный редактор GNURadio Companion;
- Keysight SystemVue – САПР для моделирования и проверки электронного оборудования на системном уровне, имеется библиотека моделей для РЛС;
- MATLAB с богатым набором библиотек для ЦОС, матричных вычислений, тулбоксов графического построения моделей и МОП в Simulink [1, 8];

- SimInTech и программный комплекс ПК «МВТУ» – современная среда интеллектуального САПР для моделирования, исследования динамики и проектирования;
- VisSim, MATRIXx, Mathcad, Labview и др.

Перечисленные пакеты моделирования хотя и ориентированы на простоту построения моделей, но требуют определенной подготовки пользователя и, к сожалению, не позволяют реализовать «дружественный» и функциональный интерфейс пользователя либо его разработка и корректировка требуют больших усилий и допущений. При построении комплексной системной модели устройства или переводе моделей на новую вычислительную платформу требуется организовать возможность совместной последовательной и/или параллельной работы различных моделей под управлением единого интерфейса пользователя, созданного с применением привычных компонентов ввода и редактирования, доступных в языках разработки программного обеспечения под платформу Windows [7, 9, 10]. В таких случаях заманчиво использовать достоинства нескольких платформ разработки, автоматическое взаимодействие между которыми возможно, в том числе с помощью различных стандартных интерфейсов. Например, MATLAB позволяет выполнить оперативный прием команд/параметров и передачу результатов в форме UDP датаграмм, передаваемых по интерфейсу Ethernet.

Постановка задачи и методы ее решения

Для моделирования процессов формирования и обработки отраженных радиолокационных сигналов требовалось решить задачу разработки программного комплекса, который должен включать удобный интерфейс пользователя – Windows-приложение для выбора параметров РЛС и фоновой обстановки (радиолокационной сцены). При этом для выполнения быстрых матричных вычислений, в том числе при комплексном представлении сигналов, в качестве основного вычислительного ядра был выбран MATLAB.

Для реализации Windows-приложения выбран универсальный язык высокого уровня Delphi (Object Pascal) с набором визуальных компонент для быстрого построения «дружественного» интерфейса пользователя в среде разработки IDE Delphi. Сохранение параметров для каждой радиолокационной сцены выполняется в отдельном текстовом ini-файле, который таким образом должен содержать описание параметров зондирующего сигнала РЛС, траекторию движения летательного аппарата (ЛА), карту местности, а также параметры обработки отраженного сигнала, например, для построения радиолокационного изображения (РЛИ) моделируемой местности.

Windows-приложение по соответствующим командам пользователя выполняет управление процессом моделирования путем формирования и выдачи MATLAB-команд. Такие команды представляют из себя строки командного интерпретатора, описанные в документации к MATLAB, т.е. это могут быть строки вида «n=0:32; s(n)=sin(pi*n/8); do_function;» и т.п.

Взаимодействие с MATLAB выполняется по интерфейсу Ethernet, так что среда MATLAB физически может располагаться на удаленном мощном сервере, что также позволяет снизить количество дорогостоящих лицензий среды MATLAB. Часть результатов, например графики, могут сохраняться в файлы для последующего отображения их в Windows-приложении. Для корректного выполнения строковых команд, поступающих на указанный порт в форме UDP датаграмм, с одновременной обработкой возможных ошибок разработан специальный *m*-файл – скрипт «rServer.m» для MATLAB. Данный скрипт открывает рабочий локальный UDP-порт, а затем в цикле ожидает поступления команд, выполняет команды в общем рабочем пространстве MATLAB, выдает ответы по протоколу связи на UDP-порт Windows-приложения или завершает работу при поступлении команды «exit».

Шаги процесса моделирования радиосигналов

Весь процесс моделирования сигналов РЛС поделен на серию последовательных шагов, на каждом из которых выполняется одна модель (передаются параметры и запускается *m*-скрипт) и строится один (или несколько) контрольный график. Графики помогают оценить корректность моделирования, чтобы вернуться к изменению параметров на этом или предыдущем шаге либо перейти к выполнению следующего шага. От шага к шагу переменные сохраняются в рабочем пространстве MATLAB, что существенно снижает время выполнения моделей при последовательной обработке или использовании одних и тех же массивов сигналов.

Таким образом, процесс моделирования радиолокационных (РЛ) сигналов с помощью Windows-приложения программного комплекса является интерактивным и пошаговым. Перечислим

эти шаги (им соответствуют названия вкладок-переключателей в центральной панели окна программы – рис. 1) с кратким содержанием.

Шаг 0 – начало: содержит список подготовленных ранее РЛ-сценариев (включает параметры лоатора, траектории, поверхности и способа обработки), можно создать новый рабочий сценарий путем копирования в сценарий (фактически это ini-файл) с новым именем.

Шаг 1 – радиолокатор: содержит параметры передатчика и антенной системы РЛС (имеется несколько подвкладок с параметрами: «Каналы, ДНА», «Для импульсного», «Для непрерывного», «Общие параметры» – см. рис. 1).

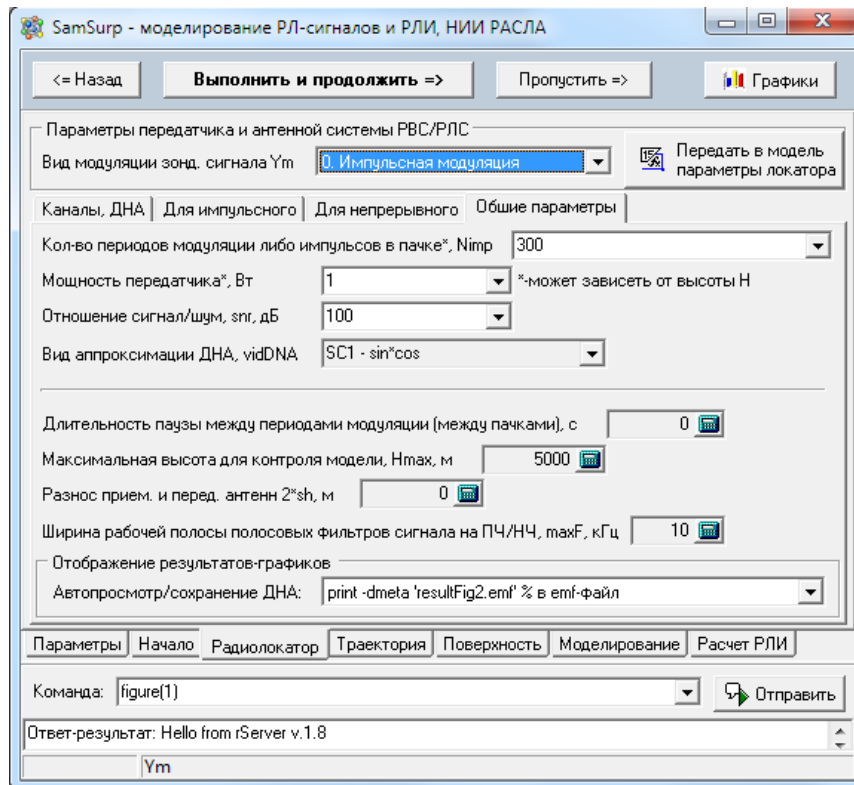


Рис. 1. Окно выбора общих параметров радиолокатора на Шаге 1

При переходе к следующему шагу по кнопке «Выполнить и продолжить =>» запускается модель расчета и построения диаграмм направленности антенн (ДНА).

Шаг 2 – траектория: содержит начальные значения переменных – координаты и эволюции ЛА, а также их зависимость от времени в модели. Здесь выполняется модель расчета и построения траектории движения ЛА.

Шаг 3 – поверхность: содержит параметры подстилающей поверхности. Типы моделей поверхности – однородные (земная, морская), слоистые (лесная, ледовая и др.), комбинированные (сочетание разных типов). Здесь выполняется моделирование и отображение трехмерного изображения земной поверхности.

Шаг 4 – моделирование: запускает основную математическую модель расчета отраженного сигнала в приемных каналах РЛС.

Шаг 5 – расчет РЛИ: запускает основную математическую модель обработки отраженного сигнала, расчета радиолокационного изображения и анализа результатов.

При выполнении моделей в окне графиков на заданную вкладку автоматически загружается содержимое окна MATLAB-фигуры. Использование нескольких вкладок в окне графиков позволяет пользователю смотреть разные рисунки на разных шагах работы модели, вручную переключая вкладки в окне графиков. Пример окна графиков для моделей антенн бортовой радиовысотометрической системы (РВС) приведен на рис. 2. На графиках приведены примеры общей формы диаграммы направленности (ДН) антенны шириной 50° и сечения приемных и передающих ДН в двух плоскостях при их отклонении на 45° .

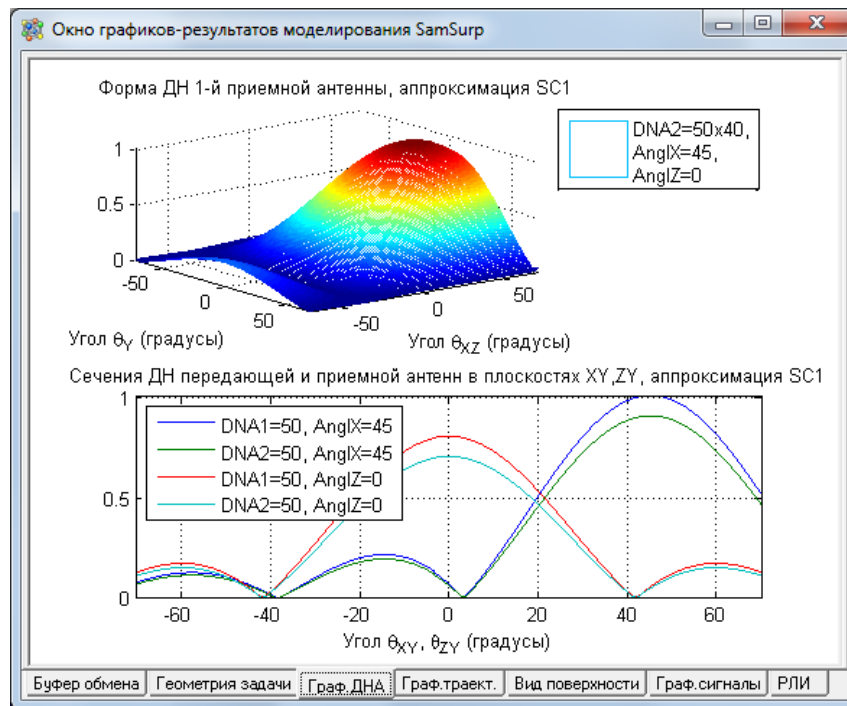
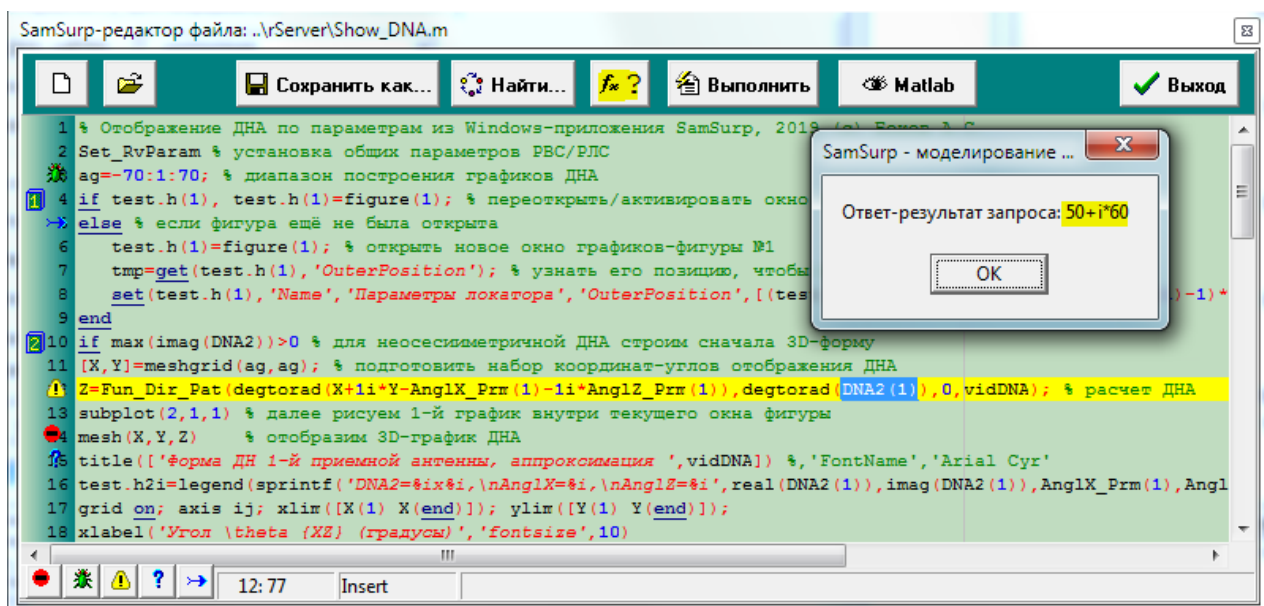


Рис. 2. Результат расчета ДН антенн радиовысотомерной системы на Шаге 1

Таким образом, на каждом шаге доступны: контроль некоторой части параметров, коррекция этих параметров, выполнение части математического моделирования (в том числе неоднократное), переход к следующему шагу, а также возврат назад на 1 или более шагов, если требуется изменение соответствующих условий/параметров моделей.

Также на любом шаге можно выполнить произвольную команду на языке MATLAB. Для этого в нижней части окна в строке «Команда» вводится или выбирается из выпадающего списка текст и нажимается кнопка «Отправить» (см. пример команды «figure» на рис. 1). Более того, имеется возможность просмотра, редактирования (доработки) и оперативного выполнения *m*-скриптов математического моделирования. При выделении выражений или переменных кнопка « f_x ?» (или *Ctrl-W*) позволяют получить результат вычислений на основе текущих значений в среде математического моделирования – пример на рис. 3.

Рис. 3. Окно просмотра, редактирования и выполнения *m*-скриптов

Видно, что хотя Delphi не содержит библиотеки работы с комплексными числами, реализованный метод использования MATLAB позволяет применить все вычислительные возможности внешнего математического ядра в разработанном программном комплексе. Заметим также, что если текст в редакторе не выделен, то будет отправлен на выполнение весь код в текущей строке редактора и курсор переместится на следующую строку (построчное выполнение кода модели).

В окне просмотра-редактирования текст отображается с «подсветкой синтаксиса». Также в левом столбце, где отображаются номера строк текста, имеются возможности расстановки графических символов и нумерованных закладок от 0 до 9. Реализован алгоритм автоматической расстановки закладок и символов в зависимости от содержащихся в строках начальных команд и их положения (закомментированные строки не анализируются).

После выполнения последовательности шагов общего процесса моделирования можно перейти на вкладку «Цикл» главного окна. Здесь можно «Выполнить одну выбранную команду» из списка типовых команд либо сформировать последовательность команд и выполнить их разово или циклически. Для циклического выполнения команд включается соответствующая галочка и нажимается кнопка « Выполнить несколько выбранных галочками команд поочередно», как показано на рис. 4.

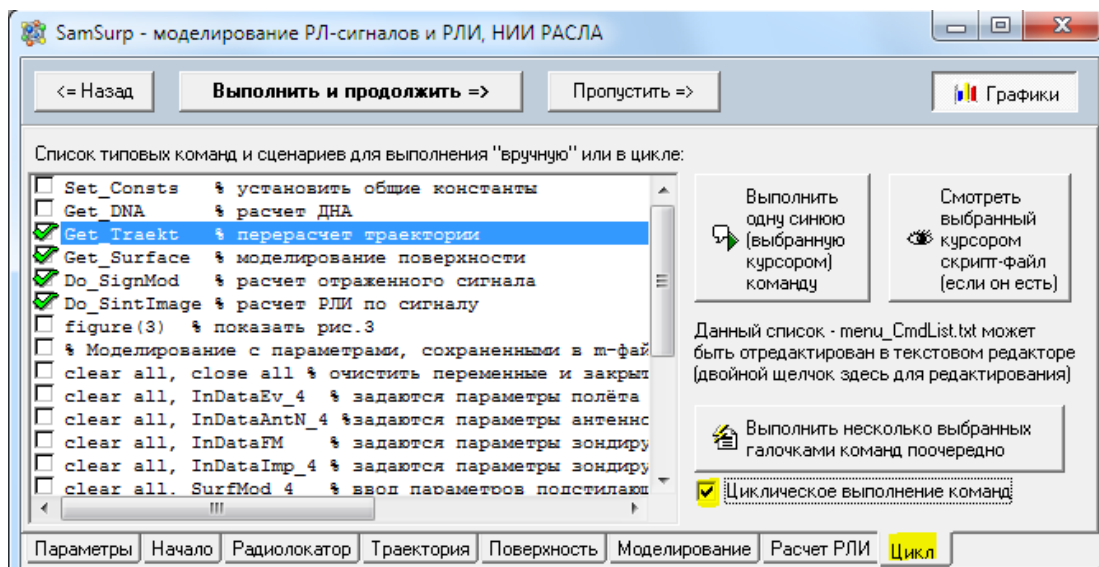


Рис. 4. Окно с вкладкой «Цикл» главного окна программы

При этом может быть реализована последовательная работа соответствующих математических моделей, имитирующая, например, непрерывный полет ЛА по бесконечной траектории, но обычно в пределах заданной местности. Пример тестового рельефа местности, используемого при математическом моделировании радиосигналов РЛС обзора земной поверхности, показан на рис. 5.

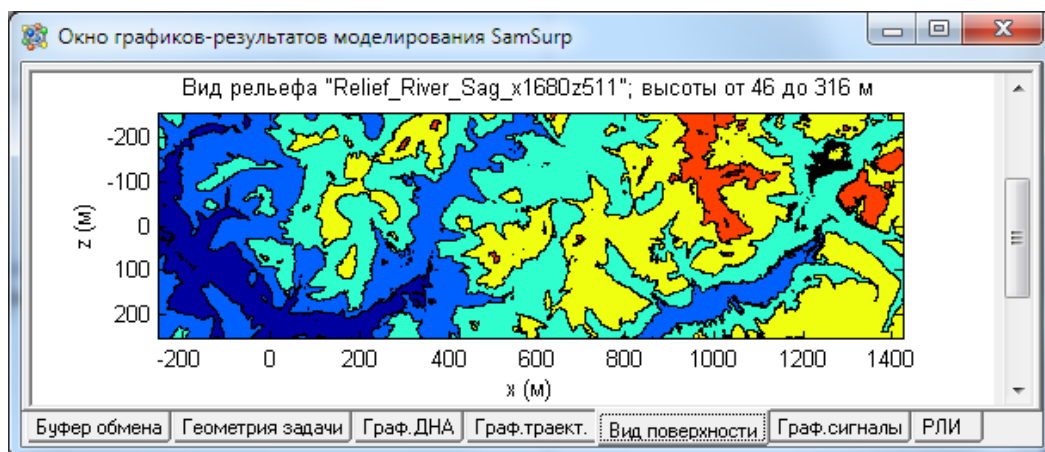


Рис. 5. Результат при просмотре рельефа выбранной поверхности на Шаге 3

Выбранный рельеф местности может быть дополнен описаниями положений границ различных типов поверхности: луг/пашня, вода (море), песок, дорога и другое, а также наличием тестовых угловых отражателей, удобных для проверки алгоритмов работы РЛС с синтезированием апертуры антенны.

Примеры моделирования радиосигналов и изображений

В качестве примера работы программного комплекса приведем пример синтезирования апертуры антенны для горизонтального полета над тестовой поверхностью, состоящей только из угловых отражателей, расположенных на спирали, показанной для удобства красной линией (рис. 6). Траектория в таком масштабе сливается в точку (маркеры малинового цвета соответствуют высоте ЛА 100 м).

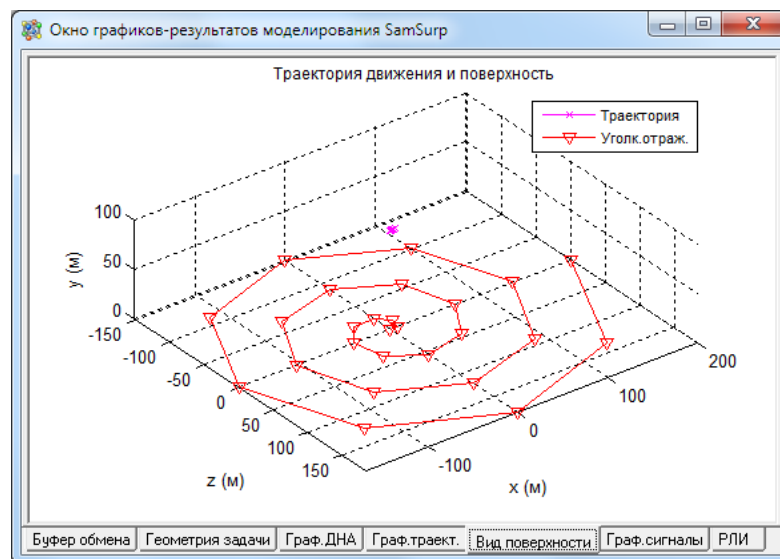


Рис. 6. Результат моделирования тестовой поверхности на Шаге 3

Пример вида огибающей сигнала (на выходе приемника РЛС) для трех зондирующих импульсов показан на рис. 7. Форма ДНА содержит боковой лепесток и проявляется в соответствующем ослаблении амплитуд импульсов, отраженных от тестовых угловых отражателей с разной наклонной дальностью от РЛС (здесь пример для высоты ЛА 1000 м).

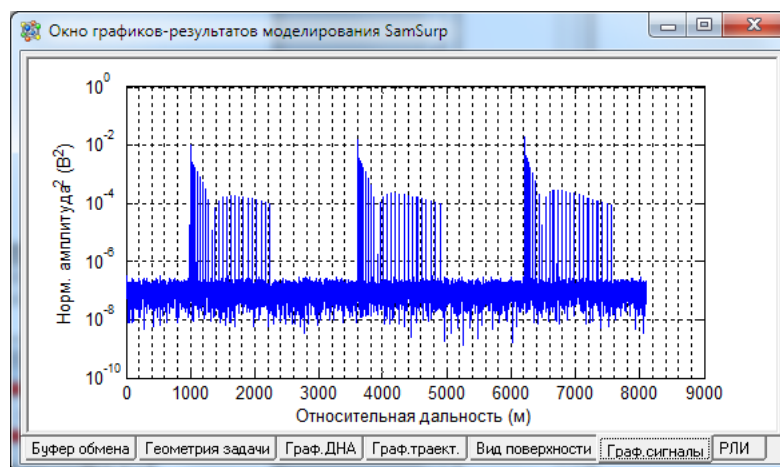


Рис. 7. Результат расчета сигнала, отраженного от тестовой поверхности на Шаге 4

Примеры полученных на Шаге 5 РЛИ приведены на рис. 8 и 9. На рис. 8 РЛИ соответствует варианту тестовой поверхности рис. 6.

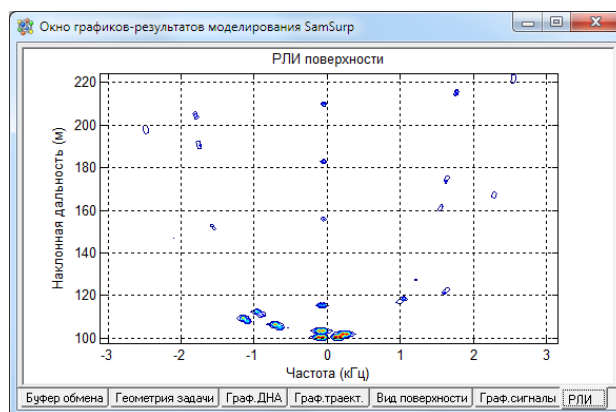


Рис. 8. РЛИ поверхности из тестовой «спирали» отражателей на Шаге 5

На рис. 9 поверхность (в пределах пятна облучения РЛС) с рельефом высотой до 25 м содержит 5000 отражателей для нескольких типов поверхности, включая расположенный в море (синий цвет) песочный остров (желтый цвет) с лугом (зеленый цвет) и водоемом (синий цвет) в центре, и дорогой-мостом (голубой цвет) через озеро, как показано слева. Соответствующее РЛИ приведено справа.

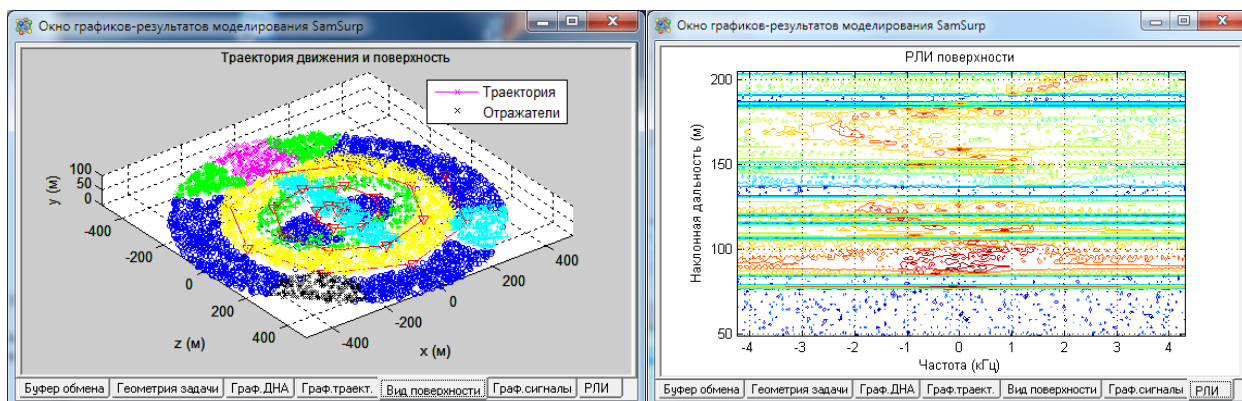


Рис. 9. Пример комбинированной земной поверхности и ее РЛИ на Шаге 5

Приведенные РЛИ получены в координатах дальность-скорость (дальность-доплеровская частота) при вертикальном облучении подстилающей поверхности [10], поэтому геометрические положения отражателей поверхности не соответствуют привычному представлению оптических изображений местности. Однако в ряде случаев такие РЛИ достаточны и удобны (вычислительно эффективны) для решения задач первичной и вторичной обработки сигналов на борту РЛС в режиме реального времени. При обработке такого РЛИ необходимо учесть переменные размеры элемента разрешения, нелинейность расстояний, а также взаимное наложение отражателей, расположенных на одной дальности слева и справа от оси полета ЛА. Представленный программный комплекс позволит выполнить разработку и выбор параметров алгоритмов обработки РЛИ, в том числе в широких условиях применения бортовых РЛС и РВС для различных моделей траектории ЛА и фоноцеловой обстановки [10].

Заключение и рекомендации

Разработана концепция проведения модельных исследований радиолокационных сигналов, отраженных от земных поверхностей в широких условиях применения систем дистанционного зондирования Земли, включающая пятишаговый процесс моделирования, при котором на каждом шаге пользователь выполняет ввод/коррекцию параметров одной подсистемы и выполнение моделей с контролем основных результатов-графиков. Для этого программный комплекс моделирования радиосигналов включает Windows-приложение и математические модели, выполняемые в среде

MATLAB. Эти составляющие взаимодействуют по протоколу UDP, т.е. могут работать на одной ЭВМ либо в локальной или глобальной сети (по IP-адресам), что позволяет работать на относительно слабой по производительности первой ЭВМ пользователя даже без установленного пакета MATLAB. Интерфейс пользователя программного комплекса разработан с использованием среды быстрой разработки приложений IDE Delphi. При этом реализованы возможности создания и/или выбора различных радиолокационных сценариев, пошагового выполнения моделирования, исследования и оперативной корректировки (при необходимости) исходных текстов математических моделей.

Разработанный программный комплекс позволяет выполнять доработку и сравнительный анализ различных алгоритмов обработки сигналов. Код на Delphi не использует библиотек работы с комплексными числами, а предложенный метод использования MATLAB позволяет применить все вычислительные возможности внешнего математического ядра. Возможна доработка текста (*m*-сценариев) математических моделей без перекомпиляции Windows-приложения. Критически важные части наукоемких математических моделей после их отладки постепенно могут быть перенесены и встроены непосредственно в код Windows-приложения, что потенциально позволит выполнять моделирование в режиме реального времени, требующегося при разработке тестовых испытательных комплексов для полунатурного моделирования [11, 12] с использованием имитаторов физических радиолокационных сигналов.

Библиографический список

1. Модельно-ориентированное проектирование встраиваемых систем. ЦИТМ Экспонента. – URL: <https://exponenta.ru/mbd> (дата обращения: 04.05.2020).
2. Боев, С. Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения / С. Ф. Боев. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 430 с.
3. Климов, А. Анализ необходимости внедрения МОП и смягчение рисков при проектировании РЛС ДО / А. Климов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем : VII Всерос. конф. Сессия: «Радиолокационные системы». – Москва, 2020. – С. 84–87.
4. Шидловский, Д. Реализация стандарта профессиональной связи DMR с помощью МОП / Д. Шидловский // Технологии разработки и отладки сложных технических систем : VII Всерос. конф. Сессия: «Системы связи». – Москва, 2020. – С. 214–216.
5. Кротов, И. С. Программно-определяемая радиосистема для обработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры / И. С. Кротов, А. К. Кабаев // Люльевские чтения : материалы XI межрегиональной отраслевой науч.-техн. конф. (20–22 марта 2018 г.). – Екатеринбург : ЮУрГУ, 2018. – С. 61.
6. Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотомеров / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. В. Гусев, Д. Ж. Нагашибаев, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 60–67. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-9.
7. Гурин, И. А. Решение математических задач на языке Visual C# с использованием пакета MATLAB / И. А. Гурин, Н. А. Спирин, В. В. Лавров // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. V Всерос. науч.-практ. конф. (ТИМ'2016). – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – С. 190–193.
8. Усс, М. Проектирование радиолокационных систем в MATLAB и Simulink. Вебинар / М. Усс. – URL: <http://matlab.ru/webinars/proektirovanie-radiolokacionnyh-sistem-v-matlab-i-simulink> (дата обращения: 30.12.2019).
9. Сурков, М. А. Особенности разработки тренажеров и тренажерных комплексов для подготовки специалистов РЭБ / М. А. Сурков, Ю. А. Губсков, Е. И. Савкин, Ю. Ю. Громов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2018. – № 8. – С. 16–31.
10. Markov, Yu. Software Complex for Modeling the Work of Multichannel SAR in Wide Range of Application / Yu. Markov, A. Bokov, V. Vazhenin, S. Margilevsky // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2019. – P. 352–355. – DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792776.
11. Lepekhina, T. A. Radar target hardware-in-the-loop in carrier frequencies for SAR tests / T. A. Lepekhina, V. I. Nikolaev // ITM Web of Conferences. – 2019. – Vol. 30. – P. 15029. – DOI 10.1051/itmconf/20193015029
12. Боков, А. С. Ретрансляционный имитатор сигналов для проверки характеристик бортовых радиолокационных систем и устройств / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 40–49. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-5.

References

1. Model'no-orientirovannoe proektirovanie vstraivaemykh sistem. TsITM EkspONENTA [Model-oriented design of embedded systems. QUOTE from the Exhibitor]. Available at: <https://exponenta.ru/mbd> (accessed May 04, 2020). [In Russian]

2. Boev S. F. *Upravlenie riskami proektirovaniya i sozdaniya radiolokatsionnykh stantsiy dal'nego obnaruzheniya* [Risk management in the design and creation of radar stations of distant detection]. Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman, 2017, 430 p. [In Russian]
3. Klimov A. *Tekhnologii razrabotki i otladki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: VII Vseros. konf. Sessiya: «Radiolokatsionnye sistemy»* [Technologies for developing and debugging complex technical systems: VII all-Russian conf. Session: «Radar system»]. Moscow, 2020, pp. 84–87. [In Russian]
4. Shidlovskiy D. *Tekhnologii razrabotki i otladki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: VII Vseros. konf. Sessiya: «Sistemy svyazi»* [Technologies for developing and debugging complex technical systems: VII all-Russian conf. Session: «Communication system»]. Moscow, 2020, pp. 214–216. [In Russian]
5. Krotov I. S., Kabaev A. K. *Lyul'evskie chteniya: materialy XI mezhhregional'noy otraslevoy nauch.-tekhn. konf. (20–22 marta 2018 g.)* [Lyulyevsky readings: materials of the XI interregional branch scientific and technical conference (March 20–22, 2018)]. Ekaterinburg: YuUrGU, 2018, p. 61. [In Russian]
6. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Gusev A. V., Nagashibaev D. Zh., Iofin A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3 (19), pp. 60–67. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-9. [In Russian]
7. Gurin I. A., Spirin N. A., Lavrov V. V. *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sb. dokl. V Vseros. nauch.-prakt. konf. (TIM'2016)* [Heat engineering and Informatics in education, science and production: collection of reports V all-Russian scientific and practical conference (TIM'2016)]. Ekaterinburg: UrFU, 2016, pp. 190–193. [In Russian]
8. Uss M. *Proektirovanie radiolokatsionnykh sistem v MATLAB i Simulink. Vebinar* [Design of radar systems in MATLAB and Simulink. Web conference]. Available at: <http://matlab.ru/webinars/proektirovanie-radiolokatsionnykh-sistem-v-matlab-i-simulink> (accessed Dec. 30, 2019). [In Russian]
9. Surkov M. A., Gubskov Yu. A., Savkin E. I., Gromov Yu. Yu. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial automated control systems and controllers]. 2018, no. 8, pp. 16–31. [In Russian]
10. Markov Yu., Bokov A., Vazhenin V., Margilevsky S. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. 2019, pp. 352–355. DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792776.
11. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. *ITM Web of Conferences*. 2019, vol. 30, p. 15029. DOI 10.1051/itmconf/20193015029
12. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Iofin A. A., Mukhin V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 3 (27), pp. 40–49. DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-5. [In Russian]

Боклов Александр Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
научно-исследовательского центра
радиоэлектронных систем летательных аппаратов,
доцент департамента радиоэлектроники
и связи Института радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Важенин Владимир Григорьевич

кандидат технических наук,
директор научно-исследовательского центра
радиоэлектронных систем летательных аппаратов,
доцент департамента радиоэлектроники
и связи Института радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: v.g.vazhenin@urfu.ru

Bokov Aleksandr Sergeevich

candidate of technical sciences,
senior scientist researcher of Science Research Center
for Radioelectronic Systems of Aerial Vehicles,
associate professor of Department of Radioelectronics
and Communications, Institute of Radioelectronics and
Information Technologies,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B. N. Yeltsin
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Vazhenin Vladimir Grigor'evich

candidate of technical sciences,
director of Science Research Center
for Radioelectronic Systems of Aerial Vehicles,
associate professor of Department of Radioelectronics
and Communications, Institute of Radioelectronics and
Information Technologies,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B. N. Yeltsin
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Мухин Владимир Витальевич

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора-
главного конструктора по НИОКР,
Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский,
ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb.nio100@mail.ru

Иофин Александр Аронович

кандидат технических наук,
заместитель главного конструктора,
Уральское проектно-конструкторское
бюро «Деталь»
(Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский,
ул. Пионерская, 8)
E-mail: tehdep630@yandex.ru

Mukhin Vladimir Vital'evich

candidate of technical sciences,
deputy general director – chief designer
for Research and Development,
Ural Design Bureau «Detal»
(8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk region, Russia)

Iofin Aleksandr Aronovich

candidate of technical sciences,
deputy chief designer,
Ural Design Bureau «Detal»
(8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk region, Russia)

Образец цитирования:

Боков, А. С. Применение протокола UDP и MATLAB в качестве вычислительного ядра для построения комплекса моделирования сигналов РЛС / А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 88–98. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-11.