

Разработка архитектуры программного комплекса симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов

И. С. Сердюков^{1,2✉}

¹НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ i.s.serdiukov@gmail.com

Аннотация

Введение. Программные средства компьютерной симуляции и прототипирования позволяют значительно упростить процесс проектирования сложных информационно-измерительных систем, в том числе радиолокационных систем (РЛС) и комплексов. В настоящее время существует множество программных пакетов, позволяющих в той или иной степени решать данные задачи. Однако данные программные пакеты либо являются универсальными и не учитывают специфику работы РЛС, что требует собственноручной реализации математических моделей для симуляции радиолокационных сигналов, либо позволяют решать узкий спектр задач прототипирования и разработки алгоритмов обработки радиолокационной информации для строго определенного типа (или даже конкретной модели) радиолокатора. Некоторые из программных пакетов, например MATLAB, предлагают пакеты расширений, позволяющие производить симуляцию радиолокационных сигналов с учетом радиолокационной обстановки для автомобильных радаров, а также обработку сигналов РЛС, тем не менее, не покрывая полного спектра задач симуляции и прототипирования.

Цель работы. Анализ актуальных программных пакетов для симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов, обоснование востребованности и разработка концепта и архитектуры программного комплекса симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов.

Материалы и методы. Системный подход, архитектурное и концептуальное проектирование программного обеспечения, системный анализ, критериальный анализ.

Результаты. Определены критерии, которым должен соответствовать программный комплекс симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов. Произведен сравнительный анализ существующих подходов и программных пакетов, позволяющих решать задачи, возникающие на различных этапах разработки РЛС. Составлен список требований, предъявляемых к программному комплексу, разработаны его концепт, архитектура и определены некоторые особенности его реализации.

Заключение. Разработанная архитектура позволяет создать универсальный программный комплекс, обеспечивающий решение задач симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов при помощи единого программного пакета. Применяемые принципы модульности и декомпозиции обеспечивают универсальность и высокий потенциал для адаптации программных модулей, в том числе для создания программных средств управления прототипами РЛС и визуализации радиолокационных данных в режиме реального времени.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы, радиолокация, программное обеспечение контроля и управления, компьютерное моделирование, компьютерная симуляция, цифровая обработка сигналов

Для цитирования: Сердюков И. С. Разработка архитектуры программного комплекса симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 3. С. 81–96. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-81-96

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.04.2024; принята к публикации после рецензирования 27.05.2024; опубликована онлайн 28.06.2024



Development of a Software Package Architecture for Simulation and Prototyping of Radar Systems and Complexes

Ivan S. Serdiukov^{1, 2✉}

¹Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ i.s.serdiukov@gmail.com

Abstract

Introduction. Computer simulation and prototyping software can simplify the design process of complex information and measurement systems significantly, including radar systems and complexes. At present, a number of software packages are used to solve these problems to varying degrees. However, these software packages are either versatile, thus being incapable of taking the specifics of radar operation into account and requiring hand-made implementation of mathematical models for simulating radar signals, or are aimed at a narrow range of prototyping problems and algorithm development for processing radar information for a strictly defined radar type (or even a specific model). Some software packages, such as MATLAB, offer extension packages that allow radar signal simulation for automotive radars, as well as radar signal processing; however, these packages cannot cover the full range of simulation and prototyping tasks.

Aim. Analysis of current software packages for simulation and prototyping of radar systems and complexes, justification of the demand and development of the concept and architecture of a software package for simulation and prototyping of radar systems and complexes.

Materials and methods. Systems approach, architectural and conceptual software design, system analysis, criterion analysis.

Results. The criteria that software packages for simulating and prototyping of radar systems and complexes must meet were determined. A comparative analysis of the existing approaches and software packages that solve problems arising at various stages of radar development was carried out. A list of requirements for such a software package was compiled, its concept and architecture was developed, and some features of its implementation were determined.

Conclusion. The developed architecture allows creation of a versatile software package which could provide solutions to the problems of simulation and prototyping of radar systems and complexes using a single software package. The applied principles of modularity and decomposition ensure versatility and a high potential for adapting software modules, including for creating software for controlling radar prototypes and visualizing radar data in real time.

Keywords: information-measuring systems, radar, monitoring and control software, computer modeling, computer simulation, digital signal processing

For citation: Serdiukov I. S. Development of a Software Package Architecture for Simulation and Prototyping of Radar Systems and Complexes. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 81–96. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-81-96

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 22.04.2024; accepted 27.05.2024; published online 28.06.2024

Введение. Компьютерное моделирование и цифровая симуляция широко применяются в разработке радиолокационных систем и комплексов [1–3]. С их помощью можно оценивать влияние различных характеристик радара на его качественные и количественные показатели, что позволяет подобрать параметры, наиболее удовлетворяющие условиям технического задания. К таким параметрам можно отнести тип сигнала, его мощность, тип антенны, пространственную конфигурацию станции, методы обработки сигналов и др.

Существуют различные подходы к решению задач симуляции радиолокационных сигналов и прототипирования радиолокационных систем. Как правило, они реализуются на базе пакетов прикладных программ.

Наиболее популярные из них (MATLAB, LabView, Scilab, Octave и др.) представляют собой универсальную программную среду для решения широкого спектра прикладных задач [4–7]. Эти среды достаточно гибкие и позволяют пользователю решать инженерные и исследовательские задачи без привязки к области

применения. Помимо этого MATLAB в той или иной степени предлагает пользователю дополнительные программные пакеты, упрощающие решение проблем в различных дисциплинах, в том числе в области моделирования радиолокационных сигналов.

Другие средства (например, тестеры автомобильных радаров от Rohde & Schwartz, комплексы для разработки и прототипирования автомобильных радаров YEA Engineering и пр.) предлагают узконаправленные программно-аппаратные решения, позволяющие производить отладку и прототипирование радаров определенного класса [8, 9].

Большинство из существующих комплексов не подходят для решения полного цикла задач симуляции и прототипирования радиолокационных комплексов – от моделирования сигналов и сигнально-помеховой обстановки до отладки реальных прототипов и оптимизации алгоритмов обработки радиолокационных данных. Каждое из приведенных выше решений обладает определенной областью применения. При этом часть из них жестко ограничена без возможности реализации стороннего функционала, а для другой части реализация сторонних функций будет нетривиальной задачей, требующей глубоких знаний в программировании, опыта реализации программно-аппаратных интерфейсов передачи данных и других специфичных навыков.

На данный момент одной из наиболее распространенных практик является использование нескольких программных пакетов для решения узкого спектра задач в совокупности с разработкой программных модулей (ПМ) управления аппаратным обеспечением для непосредственной работы с прототипом радара [3, 10].

Основной целью данной статьи является обоснование востребованности и разработка концепта и архитектуры программного комплекса симуляции сигналов и прототипирования радиолокационных систем, который позволил бы объединить достоинства существующих программных и программно-аппаратных решений, компенсируя, насколько это возможно, их недостатки.

Анализ актуальных программных пакетов. Для упрощения рассмотрения прикладных пакетов, позволяющих производить симуляцию и прототипирование радиолокационных си-

стем, проще всего разделить этот процесс на несколько этапов:

- симуляция (синтез) радиолокационных сигналов и помех;
- симуляция сигнально-помеховой обстановки на основании геометрической конфигурации пространства и взаимного расположения целей, объектов паразитного отражения и источников помех относительно приемной/передающей антенн;
- симуляция/учет влияния диаграмм направленности (ДН) антенн и диаграмм рассеяния (ДР) объектов;
- работа с физическим прототипом радара с помощью программно-аппаратных интерфейсов передачи данных;
- реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов (диаграммообразование (ДО), фильтрация, сжатие, пороговая обработка (ПО));
- реализация алгоритмов постобработки радиолокационных данных (классификация, траекторная обработка, измерение свойств и т. д.).

Также для упрощения можно разбить прикладные программные пакеты на следующие категории:

1. Прикладные вычислительные пакеты (например, Scilab, Octave). Они позволяют решать широкий спектр инженерных задач, не обладают развитым функционалом в прикладных областях. Позволяют относительно легко работать с алгоритмами обработки и постобработки радиолокационных сигналов. Действительно слабым местом является интегрирование с аппаратными средствами, что не позволяет использовать данные пакеты для прототипирования и работы в режиме (псевдо)реального времени.

2. MATLAB. Являясь по своей сути проприетарной версией пакетов, причисленных к категории выше, имеет большое количество разнообразных пакетов расширения, оптимизирующих решение узконаправленных прикладных программ. Имеет пакеты симуляции радиолокационных сигналов и сигнально-помеховой обстановки с учетом свойств антенны и объектов. Работа с программно-аппаратными интерфейсами улучшена, но также является слабым местом данного решения с точки зрения работы с аппаратной частью прототипа радара.

3. LabView. Основная задача данного пакета программ – построение сложных измеритель-

ных систем, в том числе реального времени. Данный пакет предоставляет широкий спектр инструментов работы с аппаратными интерфейсами и позволяет строить рабочие прототипы с относительно небольшими временными затратами. Также посредством LabView можно производить симуляцию сигналов/помех, однако нельзя производить симуляцию сигнально-помеховой обстановки, учитывающую геометрические и радиофизические параметры объектов симуляции. Под сомнением находится и возможность реализации алгоритмов обработки и постобработки радиолокационных сигналов.

4. Специальные программно-аппаратные комплексы прототипирования радаров. Как правило, обладают встроенным симулятором, позволяющим генерировать радиолокационные сигналы с учетом сигнально-помеховой обстановки и физических свойств. Позволяют работать с прототипом радара в режиме реального времени. Опционально предоставляют среду для разработки алгоритмов обработки и постобработки радиосигналов. Предназначены такие комплексы исключительно для конкретного типа/семейства радаров или же для определенной модели радара, вместе с которой комплекс поставляется непосредственно производителем.

Из таблицы, в которой представлена краткая характеристика рассматриваемых программных пакетов, используемых для симуляции радиолокационных сигналов и прототипирования радиолокационных систем, можно увидеть, что для разработки радиолокационной системы целесообразно применять целую связку программных пакетов: это может быть первичное моделирование средствами MATLAB или иного прикладного вычислительного пакета, реализация программы управления и сбора данных при помощи LabView или средствами какого-либо языка программирования (C++, Rust, Python и др.), проведение экспериментов для сбора данных и дальнейшая работа с собранными данными для работы над алгоритмами цифровой обработки сигналов (ЦОС) и постобработки (в MATLAB или его аналоге); или же покупка радара и симулятора, проведение экспериментов и сбор радиолокационных данных с целью разработки и тестирования эффективных алгоритмов ЦОС и постобработ-

ки (средствами какого-либо прикладного вычислительного пакета).

Цепочки разработки, подобные представленным ранее, могут иметь разнообразный вид, который зависит от многих факторов, таких, как опыт команды разработчиков, область применения и специфика разрабатываемого радиолокатора и др. Такой подход хоть и является громоздким и дорогостоящим, но в то же время и оптимален по критерию минимизации трудозатрат и времени разработки в условиях отсутствия готовых альтернативных решений.

Для создания альтернативного подхода, направленного на упрощение и удешевление процесса разработки радиолокационной системы, необходима разработка специализированной универсальной программной среды. Такая программная среда должна включать в себя ряд ПМ, позволяющих решать задачи моделирования, симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов на всех этапах процесса разработки.

Основные требования. Основные требования, предъявляемые к универсальному программному комплексу симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов, можно поделить на функциональные и эксплуатационные. Функциональные требования определяются особенностями жизненного цикла разработки радиолокационных систем (РЛС) и позволяют задать функционал программной среды. Эксплуатационные требования определяют способы реализации заложенного функционала.

Разрабатываемый программный комплекс должен обеспечивать выполнение следующих функциональных требований:

- возможность реализации всех этапов моделирования и прототипирования;
- инвариантность к диапазону частот;
- реализацию наиболее популярных протоколов передачи данных и возможность их модификации, а также добавления новых;
- внедрение возможности реализации алгоритмов ЦОС и постобработки на интерпретируемых языках программирования (Python, LUA-script);
- мультиплатформенность – компиляцию под ОС семейства Linux и Windows;

Краткое описание функционала, заложенного в рассматриваемые средства моделирования и симуляции
радиолокационных систем и комплексов

A brief description of the functionality included in the considered modeling and simulation tools for radar systems and complexes

Этап	Прикладные вычислительные пакеты	MATLAB	LabView	Специальные программно- аппаратные комплексы
Моделирование сигналов и помех	Возможно	Возможно	Возможно	Сигналы и типичные помехи целевого радар
Симуляция сигнально- помеховой обстановки с учетом конфигурации пространства и взаимного расположения антенн радара, целей и источников помех	Необходимо написание программ, реализующих соответствующую математическую модель	Имеются дополнительные пакеты, реализующие симуляцию сигнально- помеховой обстановки. Возможно написание собственной реализации	Требует высоких трудозатрат и задействования внешних модулей, реализованных на других ЯП	Имеют встроенный симулятор сигнально- помеховой обстановки для генерации радиолокационных данных, приближенных к реальным
Учет влияния диаграмм направленности антенн и радиофизических свойств объектов	Необходимо написание программ, реализующих математическую модель	Имеются дополнительные пакеты. Возможна собственная реализация	Крайне затруднительно, нецелесообразно	Как правило, работают с реальным прототипом радара, записывая излучаемый сигнал и переизлучая сигнал, приближенный к реальной сигнально- помеховой обстановке
Работа с прототипом радара	Невозможна ввиду отсутствия реализации протоколов передачи данных, способных работать в режиме реального времени	Невозможна ввиду отсутствия реализации протоколов передачи данных, способных работать в режиме реального времени с учетом количества данных, генерируемых радаром	Обладает широким набором протоколов передачи данных и позволяет относительно легко создавать программы управления аппаратным обеспечением и сбора данных	Созданы для работы с реальным прототипом радара, позволяют легко разворачивать тестовый измерительный стенд
Алгоритмы ЦОС и постобработки	Обладают высокой гибкостью для реализации алгоритмов ЦОС и постобработки	Обладает высокой гибкостью для реализации алгоритмов ЦОС и постобработки	Возможно, но требует высоких трудозатрат, максимальная производительность сильно ограничена	Как правило, подобный функционал не реализуется производителем

– другие требования, определяемые в процессе разработки.

Архитектура проекта должна в свою очередь обеспечивать выполнение следующих эксплуатационных требований:

– использование операционной системы в качестве среды исполнения;

– разделение ПМ на отдельные программы, обеспечивающие выполнение ограниченного функционала (декомпозиция);

– возможность использования отдельных ПМ в составе Bash- и Python-скриптов;

– возможность использования ПМ в качестве библиотек C++ и Python;

- реализацию программно-пользовательских интерфейсов ПМ, позволяющих использовать их из командной строки;
- создание библиотеки универсальных графических средств для отображения графической информации на различных этапах симуляции прототипирования;
- определение совокупности программных протоколов и протоколов передачи данных, необходимых для реализации базового функционала на этапе прототипирования РЛС;
- другие требования, определяемые в процессе разработки.

Представленная совокупность требований не является исчерпывающей и в соответствии с общепринятой философией создания программного обеспечения может быть дополнена на любом этапе жизненного цикла программного продукта. Тем не менее, они позволяют определять основные линии развития проекта и являются достаточными для создания общей архитектуры и философии.

Общая архитектура. В основу архитектуры проекта легли подходы, основывающиеся на универсальности, модульности и простоте ис-

пользования для конечного пользователя. Основой проекта является программный код, представляющий собой библиотеку, написанную на языке C++ с использованием библиотек boost, вокруг которой выстраивается "обвязка" в виде программных и пользовательских интерфейсов. Таким образом, проект можно условно поделить на несколько уровней, рассчитанных на разного потребителя. Общая архитектура проекта изображена на рис. 1.

На первом этапе происходит формирование сигналов на входе радиоприемного устройства РЛС. Логичными входами симулятора сигнально-помеховой обстановки являются параметры объектов, формирующих радиолокационную обстановку, и параметры непосредственно РЛС.

На втором этапе производится предварительная обработка радиосигналов, включающая в себя частотную фильтрацию, ДО, если идет работа с радаром, содержащим фазированную антенную решетку (ФАР), корреляционную (КФ) и согласованную фильтрацию (СФ), пороговую фильтрацию (ПФ) и другие методы приведения радиолокационного сигнала к виду, требуемому на дальнейших этапах его обработки.

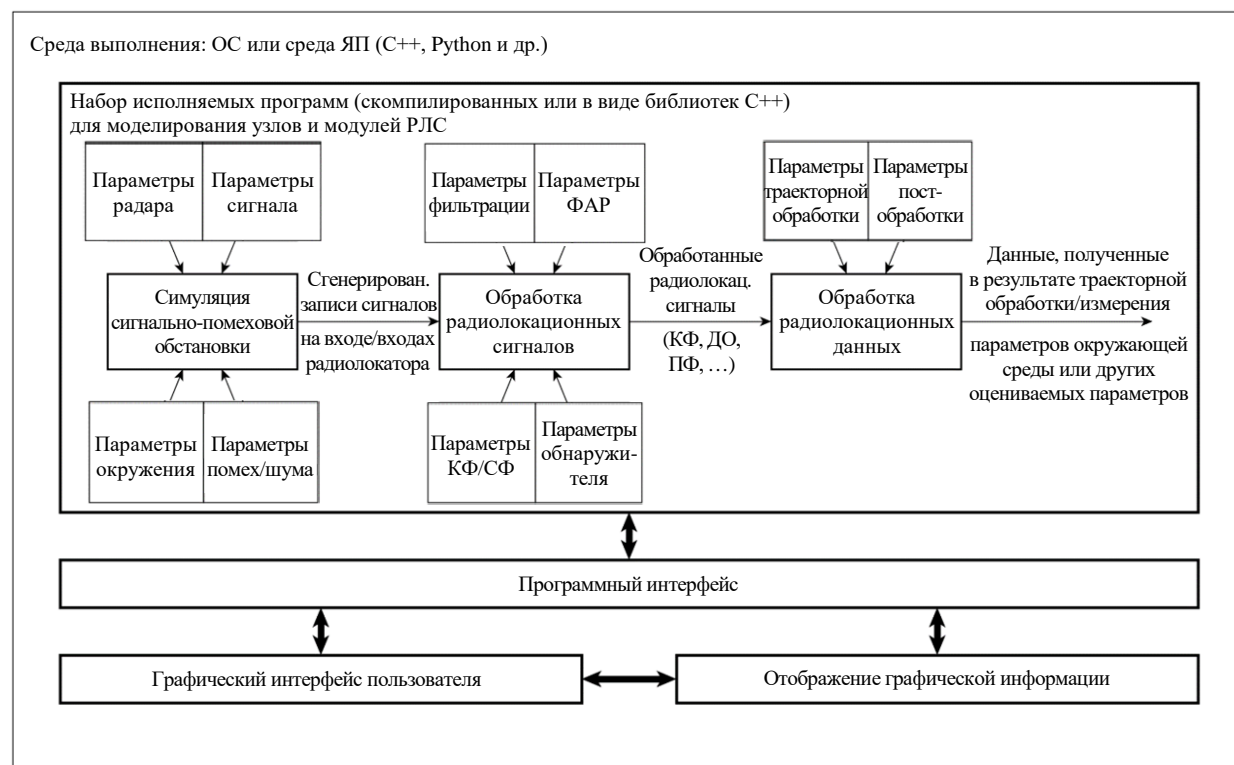


Рис. 1. Общая архитектура проекта

Fig. 1. General architecture of the project

Третьим этапом является обработка радиолокационных данных с целью получения радиолокационных измерений требуемых параметров движущихся целей или параметров окружающей среды. К таким методам можно отнести траекторную обработку, определение параметров морской поверхности, измерение свойств метеорологических образований и др.

Следует отметить, что для обеспечения универсальности применения структура проекта предполагает его условное разделение на 3 основных уровня в зависимости от требуемой глубины интеграции применяемых программных средств.

Первый уровень проекта – низкий уровень – предполагает работу непосредственно с языком программирования C++. Каждый отдельный компонент представляет на этом уровне библиотеку, содержащую определенный набор алгоритмов и структур данных и позволяющую решать узкий спектр задач. Основным пользователем, на которого рассчитан данный уровень, – инженер-программист, использующий библиотеки для стороннего проекта или модернизирующий существующий код для расширения функционала или исправления ошибок программного комплекса или внедрения его частей в составе стороннего программного обеспечения.

Второй уровень проекта – программный интерфейс – средний уровень. Здесь отдельные библиотеки собраны в рабочие программы с описанными входами, выходами и потоками данных. Помимо этого отдельные программные блоки доступны в виде библиотек C++ и Python с обвязкой, необходимой для их встраивания. Программы, скомпилированные под целевую среду, могут быть запущены из командной строки или использованы в качестве немодифицируемых модулей в составе другого проекта. Основным пользователем, на которого рассчитан данный уровень, – инженер-разработчик радиолокационных систем и инженер-программист.

Третий уровень проекта – высокий уровень – представляет собой программную среду, содержащую графический интерфейс пользователя и элементы отображения графической информации. Отдельные компоненты собраны в готовые подпрограммы, способные решать конкретные задачи симуляции и прототипирования РЛС. Подпрограммы в свою очередь со-

браны в составе программной среды, представляющей пользователю гибкий графический интерфейс для управления. Данный уровень рассчитан на широкого пользователя, в том числе не знакомого с основами программирования.

Программный комплекс предполагает наличие программно-аппаратных интерфейсов и набор библиотек для управления прототипами радаров и работы с цифровыми записями радиолокационных сигналов в режиме псевдо-реального времени. Наличие гибкой настройки программной среды позволяет включать и отключать различные компоненты в зависимости от этапа разработки и целей использования.

Комплекс также может быть использован в академических целях. Наличие широкого спектра ПМ, имитирующих работу радара и обработку радиолокационных сигналов, позволяет развернуть программную среду в качестве виртуальной лаборатории, на базе которой студенты могут изучить радар в общих чертах или подробно рассмотреть его отдельные компоненты, принцип их работы и особенности реализации.

Архитектура симулятора радиолокационных сигналов. На рис. 2 изображена упрощенная модель РЛС в некоей сигнально-помеховой обстановке, где A – антенна с координатами $R(x_A, y_A, z_A, v_{x_A}, v_{y_A}, v_{z_A}, \theta_A, \varphi_A)$, определяемыми пространственными координатами x, y, z , мгновенными скоростями v_x, v_y, v_z (определяемыми, например, параметрами вращения антенны кругового обзора) и мгновенными координатами, определяющими угол поворота антенны θ_A, φ_A ; $F(\theta_A, \varphi_A)$ – ДН антенны; Π_i, Π_j – совокупность целей и источников помех, определяемых в общем случае координатами $T(x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}, v_{x_{\Pi}}, v_{y_{\Pi}}, v_{z_{\Pi}}, \theta_{\Pi}, \varphi_{\Pi})$, ДР $\sigma_{\Pi}(\theta, \varphi)$ и шумовым сигналом $N_j(t - \tau_{n_j})$ для источников активных помех. На рисунке также обозначены основные факторы, влияющие на амплитуду A , доплеровский сдвиг частоты f_D и значение временного сдвига τ радиолокационного сигнала.

Согласно [11], если рассматривать в качестве нулевого отсчета времени момент начала излучения зондирующего сигнала, то в общем виде сиг-

нал, отраженный каким-либо объектом и принимаемый антенной радиолокатора в момент времени t , может быть описан следующим образом:

$$S_{\text{пр}}(t) = A_{\text{прям}}(t - \tau)S(t - \tau, f_0 - f_{\text{Д}}) + A_{\text{подст}}(t - \tau')S(t - \tau', f_0 - f_{\text{Д}}),$$

где $S(t)$ – зондирующий сигнал; τ и τ' – времена запаздывания сигнала, соответствующие расстояниям D и D' соответственно; f_0 и $f_{\text{Д}}$ – несущая и доплеровская частоты; $A_{\text{прям}}$ и $A_{\text{подст}}$ – амплитудные компоненты прямого и отраженного от подстилающей поверхности сигналов:

$$A_{\text{прям}} \sim F_{\text{ант}}(\theta_{\text{ц}}, \varphi_{\text{ц}}), D^4, \sigma_{\text{ц}}(\theta_{\text{ант}}, \varphi_{\text{ант}});$$

$$A_{\text{подст}} \sim F_{\text{ант}}(\theta_{\text{ц}}, \varphi_{\text{ц}}), D^2, D'^2, \sigma_{\text{ц}}(\theta_{\text{ант}}, \varphi_{\text{ант}}),$$

где $F_{\text{ант}}(\theta, \varphi)$ – ДН антенны; $\sigma_{\text{ц}}(\theta, \varphi)$ – ДР цели.

В свою очередь совокупный сигнал, принимаемый антенной в момент времени t , может быть описан как суперпозиция отдельных сигналов, отраженных от разных целей и поверхностей, шумовых сигналов, излучаемых источниками шума различной природы, и представлен следующим выражением:

$$S_{\text{пр}}(t) = \sum_i A_{\text{прям}, i}(t - \tau)S_{\text{прям}, i}(t - \tau, f_0 - f_{\text{Д}}) + \sum_i A_{\text{подст}, i}(t - \tau')S_{\text{подст}, i}(t - \tau', f_0 - f_{\text{Д}}) + \sum_i A_{\text{ш}, i}(t - \tau)N_{\text{ш}, i}(t - \tau, f_0 - f_{\text{Д}}) + \sum_i A_{\text{ш.подст}, i}(t - \tau')N_{\text{ш.подст}, i}(t - \tau', f_0 - f_{\text{Д}}),$$

где $A_{\text{ш}}$ и $N_{\text{ш}}$, а также $A_{\text{ш.подст}}$ и $N_{\text{ш.подст}}$ описывают амплитуду и сигнал, исходящие от источников шума, а также шумовых сигналов, отраженных от подстилающей поверхности. Амплитуда шума также зависит от ДН источника шума, ДН радиолокатора, условий среды, дальности и других факторов.

Из представленного описания видно, что для расчета сигнала в момент времени t необходимо учитывать совокупность факторов, влияющих на амплитуду сигнала, время запаздывания, а также на его частоту и фазу. Данные параметры зависят от характеристик излучающей и принимающей антенн, параметров сканирования пространства, геометрии расположения и свойств рассеяния моделируемых объектов локации, свойств пространства распространения радиоволн (погодные условия, под-

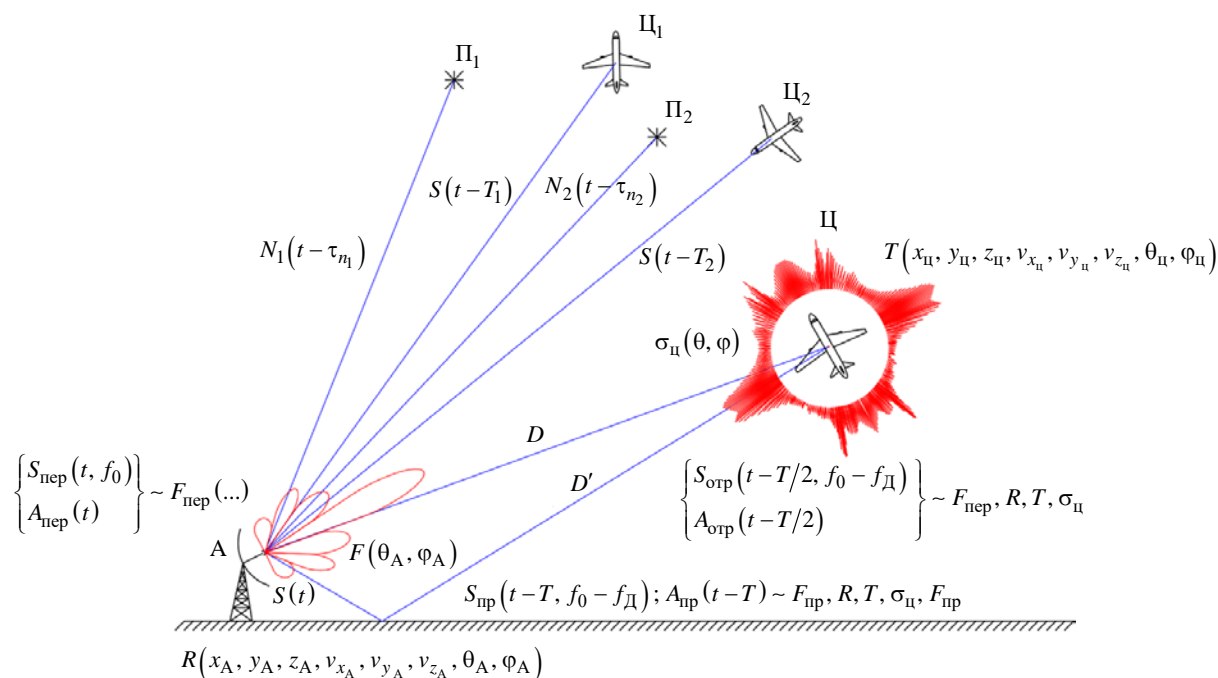


Рис. 2. Упрощенная модель РЛС

Fig. 2. Simplified radar model

стилающая поверхность, влияние ионосферы, рефракции и др.), конфигурации и параметров источников шума и прочих факторов.

На рис. 3 представлена архитектура модуля симуляции радиолокационных сигналов. Подпрограммы, входящие в состав модуля, позволяют сформировать совокупность факторов, влияющих на принимаемый сигнал и учитываемых в блоке симуляции при расчете сигнала на входе радиолокатора. Данная архитектура базируется на обобщенной модели радиолокатора, реализованного с применением супергетеродинного приемника и фазового детектора, описанной в [11, 12].

Слева на диаграмме представлены модули, ответственные за формирование базовых и геометрических параметров модели. Параметры радара: координаты; ориентация нулевого направления; тип антенны (одиночная или антенная решетка – АР) и ее ДН (если влияние ДН учитывается в рамках модели); параметры направления антенны и параметры сканирования пространства (если применимо). Параметры цели/источника помех: координаты; ДР (или эффективная площадь рассеяния – ЭПР); ориентация в пространстве и параметры движения; ДН и ориентация антенны в пространстве для источников шума; мощность помехи. Параметры пространства: свойства подстилающей поверхности; погодные условия; учет влияния ионосферы и ее параметры.

В центре диаграммы представлены модули, отвечающие за формирование параметров, связанных с сигналами, помехами и характеристиками симуляции. Параметры сигнала: несущая частота; вид модуляции; закон модуляции. Параметры шума/помехи: вид шума/помехи; центральная частота и полоса частот. Параметры модели: параметры сканирования пространства; частота повторения зондирующих импульсов; включение/отключение учета влияния каких-либо факторов. Параметры симуляции: тип симуляции; частота дискретизации симуляции; частота дискретизации сигнала на выходе АЦП; количество реализаций; мощность зондирующего сигнала; принцип работы приемного устройства: супергетеродинирование или субдискретизация; промежуточная частота супергетеродинного приемника; параметры фазового детектора; включение в симуляцию или исключение из симуляции супергетеродина и фазового детектора; выбор выхода сигнала: высокочастотный, на промежуточной частоте или на видеочастоте после фазового детектора.

Перечисленные параметры могут быть сформированы соответствующими подпрограммами и сохранены на жесткий диск компьютера в виде файлов конфигурации или же использованы непосредственно из оперативной памяти компьютера в пределах одной исполняемой программы в виде объекта

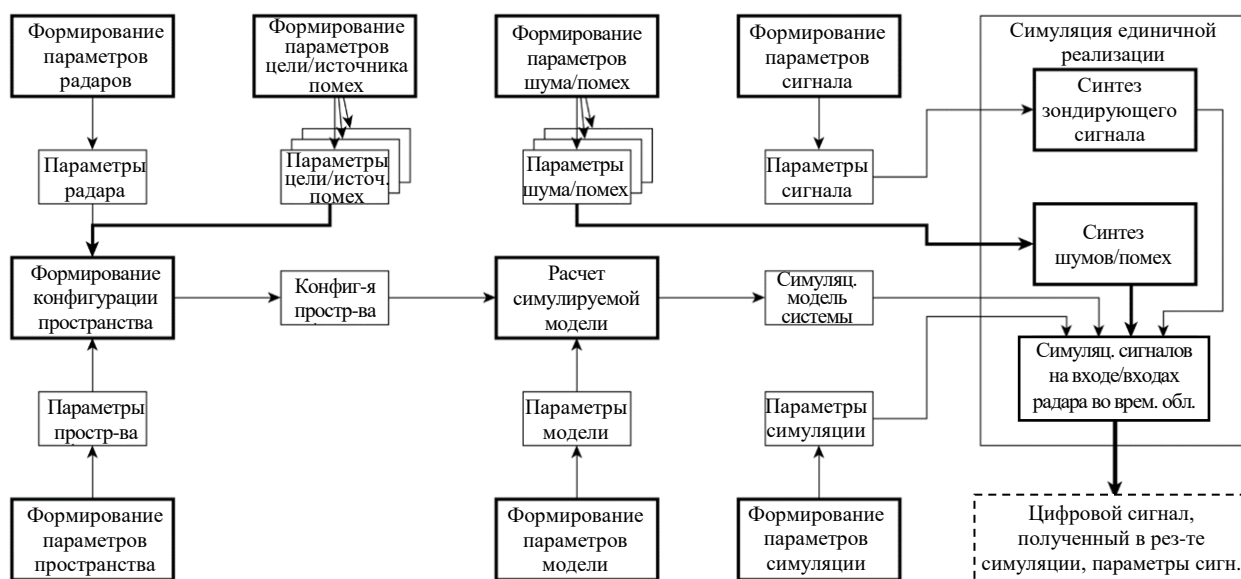


Рис. 3. Архитектура симулятора РЛС

Fig. 3. Radar simulator architecture

соответствующего класса. Совокупность параметров используется для проведения симуляции/моделирования, разделенных на следующие этапы, выполняемые отдельными подпрограммами: формирование конфигурации пространства – учитывает параметры радара, целей, источников помех и параметры пространства; расчет симулируемой модели – учитывает конфигурацию пространства и параметры симуляции; синтез зондирующего сигнала и синтез шумов/помех на основе предоставляемых параметров сигнала и шумов/помех; симуляция во временной области формирует результирующий сигнал на основе симуляционной модели системы, моделей сигнала, шумов и помех, а также параметров симуляции.

Ядром моделирования является симуляционная модель системы. Она описывает функцию преобразования зондирующих импульсов, учитывая их изменение во временной области в соответствии с моделями движения объектов и параметрами сканирования пространства (вращением антенны радиолокатора). Эта модель также включает в себя параметры, определяющие свойства случайных процессов и учитываемые при генерации реализации.

Модели сигналов и шумов/помех как объекты соответствующих классов, реализованных на языке программирования C++, содержат механизмы, реализующие учет доплеровского смещения частоты, сдвига фазы, задаваемого свойствами отражающей поверхности и частотным диапазоном сигнала, а также генераторы псевдослучайных чисел, реализующие влияние случайных процессов.

Таким образом, генерация реализации заключается в преобразовании сигнала в соответствии с симуляционной моделью, генерации шумовых и помеховых воздействий и расчете итогового сигнала как суперпозиции всех учитываемых компонент. Из этого также следует вывод, что воплощение симулятора единичной реализации также возможно с применением подходов параллельных вычислений на графическом ускорителе.

Выходом симулятора являются: цифровой сигнал, представляющий собой имитацию сигнала, записанного на входе радиолокатора или на выходе одного из узлов радиоприемного устройства, формат записи которого позволяет в том

числе сохранять информацию о пространственной ориентации антенны; а также параметры сигнала в виде файла, сохраняемого на жесткий диск персонального компьютера (ПК) или объекта соответствующего класса, помещаемого в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) ПК.

Архитектура модуля обработки радиолокационных данных. Модуль обработки радиолокационных данных представляет собой наиболее интерактивную часть программного пакета, так как он отвечает за получение данных, графическая интерпретация которых позволяет формировать оценку симулируемой модели. Его функционал воплощает функционал устройства обработки и отображения [12] и включает в себя возможности использования различных методов обработки сигналов, способов их графической интерпретации и отображения (рис. 4), как, например, в [13].

Входом данного модуля являются цифровые радиолокационные сигналы, сохраненные в определенном формате, что позволяет использовать его как для работы в составе программного комплекса симуляции, так и для прототипирования радаров. Для этого в составе модуля реализован подключаемый блок контроля и коммуникации, позволяющий управлять радаром и отвечающий за организацию потока цифровых данных, посредством заранее известных протоколов управления и передачи данных. Блок управления и коммуникации также отвечает за приведение данных к формату, необходимому для обработки и корректного отображения сигналов графическим интерфейсом.

Данные в заданном формате, содержащие непосредственно сигналы, их параметры, а также параметры радара, поступают на блок первичной обработки, который позволяет выделить из радиолокационных сигналов интерпретируемые и измеряемые радиолокационные данные, которые в дальнейшем поступают на блок постобработки. В результате постобработки данные преобразуются в измеренные характеристики, такие, как координаты целей, их скорость, направление движения и траектория; параметры окружающей среды (состояние морской поверхности, скорость и направление поверхностного течения) и многие другие данные, которые можно определить с помощью радиолокатора.

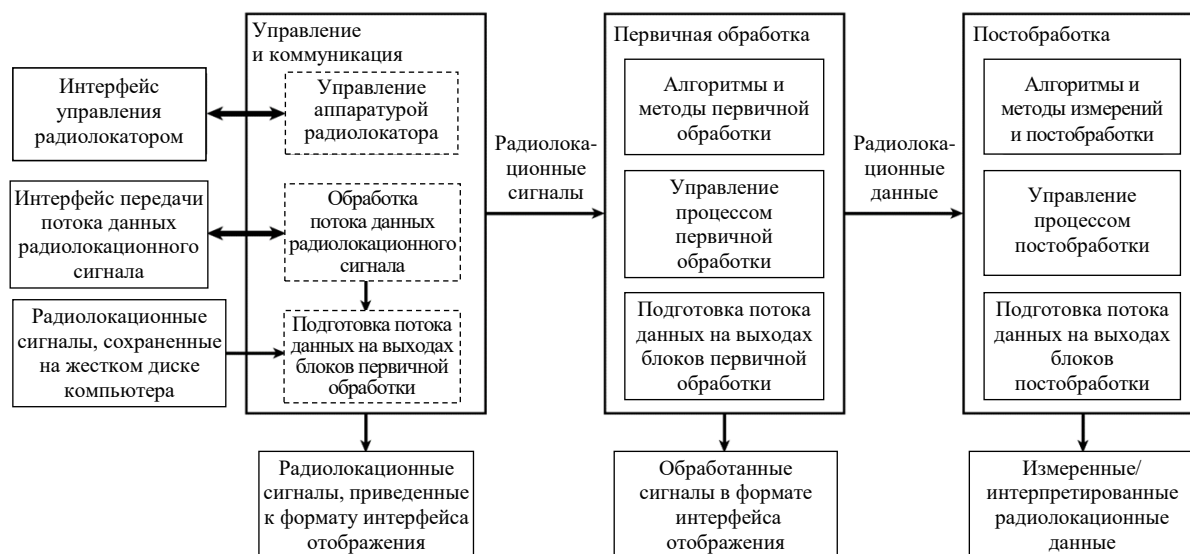


Рис. 4. Архитектура модуля обработки радиолокационных данных

Fig. 4. Radar data processing module architecture

На рис. 5 представлена архитектура блока управления и коммуникации. Как видно из диаграммы, данный модуль предусматривает как работу с заранее записанными радиолокационными сигналами (в том числе сгенерированными при помощи симулятора), так и с потоком радиолокационных данных, поступающих от радиолокатора в режиме реального времени. Для этого данный модуль содержит в своем составе библиотеки, позволяющие организовывать и обеспечивать коммуникацию посредством наиболее популярных протоколов (TCP, UDP,

i²c, RS232, RS485 и др.), а также набор программ, необходимых для реализации программных интерфейсов и процессов управления радаром и получения радиолокационных сигналов. Следует отметить, что, поскольку большинство радаров имеют различные протоколы управления, работа с прототипом радиолокатора, протокол которого не был известен разработчикам проекта, потребует отдельной его реализации и включения в состав ПМ.

На вход ПМ также поступают параметры радара и параметры зондирующего сигнала, необ-

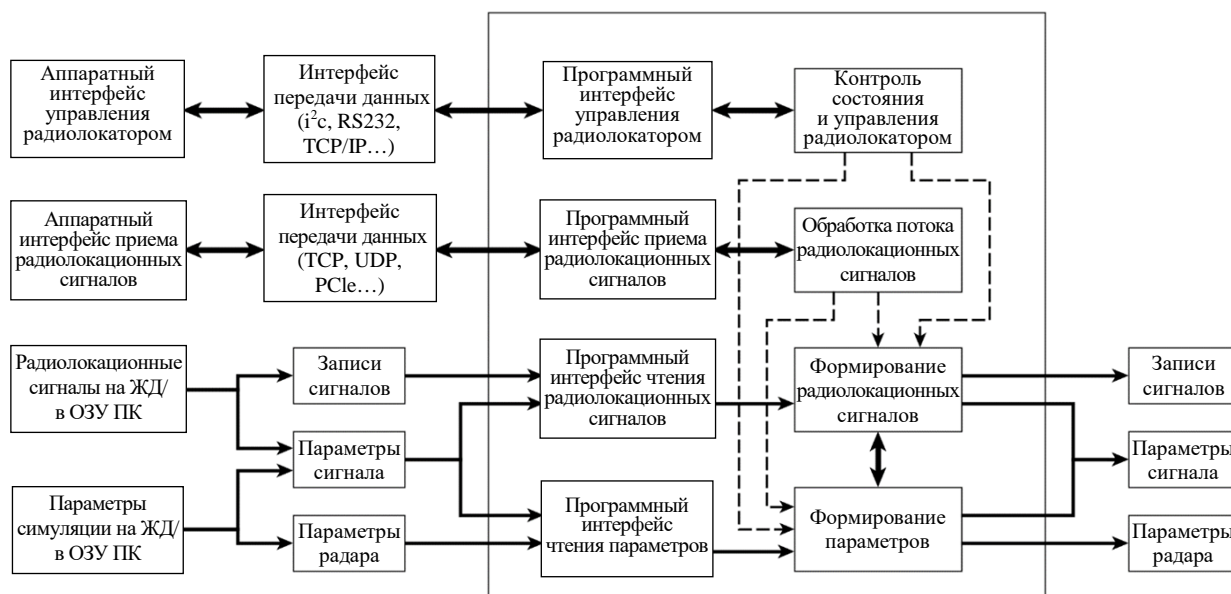


Рис. 5. Модуль управления и коммуникации

Fig. 5. Control and communication module

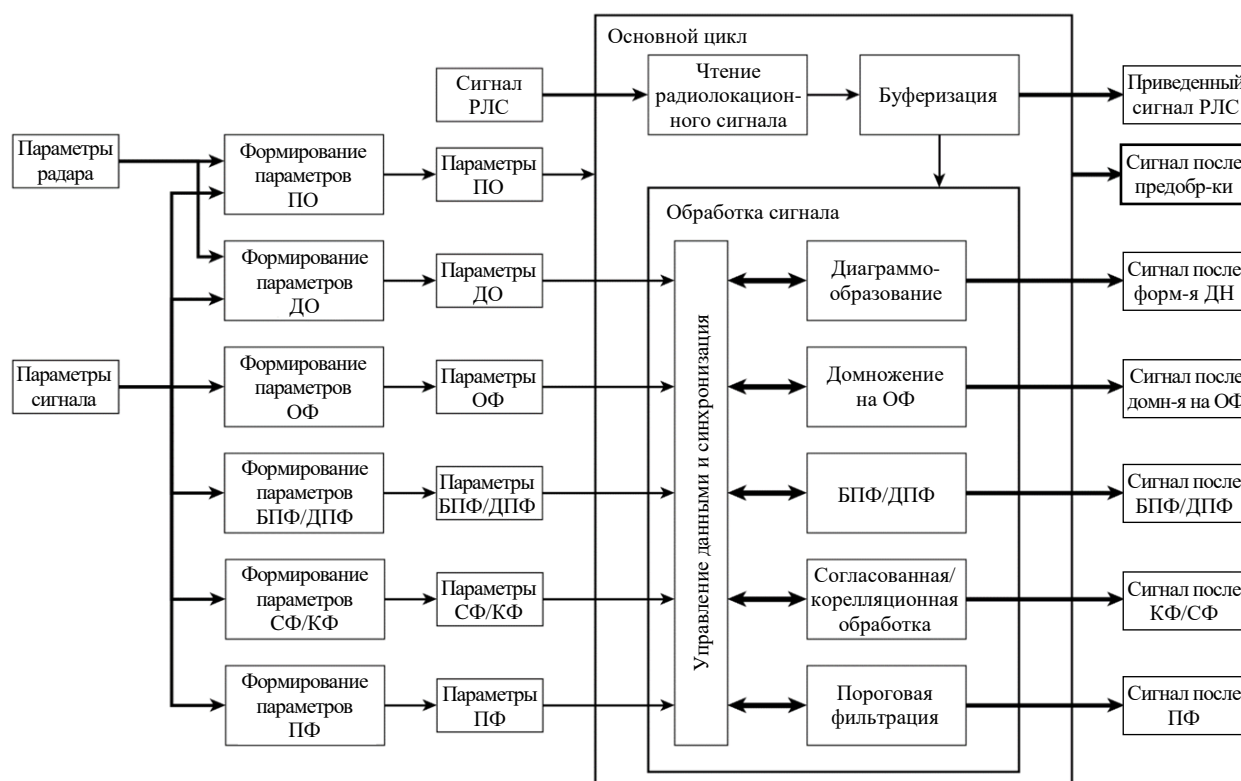


Рис. 6. Модуль первичной обработки

Fig. 6. Primary processing module

ходимые для реализации таких алгоритмов, как СФ/КФ, ПО, ДО, измерение угловых координат и др. Данные параметры могут быть сгенерированы при работе с симулятором или же получены при работе с прототипом радара. После приведения к заданному формату сигналы, параметры сигнала и параметры радара могут быть обработаны ПМ первичной обработки (рис. 6).

Основная цель первичной обработки – привести радиолокационные сигналы и данные к удобному для проведения измерений и интерпретации радиолокационной информации виду. ПМ первичной обработки содержит в себе типичные методы, применяемые в радиолокации: алгоритмы ДО для сигналов, принимаемых АР; домножение сигнала на оконную функцию (ОФ); дискретное и быстрое преобразования Фурье (ДПФ/БПФ); методы корреляционной и согласованной обработки с возможностью реализации многоканального по частоте и времени приемника; методы ПФ для обнаружения целей. Архитектура данного модуля также предусматривает инвариантность последовательности применяемых методов, включая возможность неоднократного применения, если это необходимо.

Данные, поступающие на вход модуля, проходят процесс буферизации и при необходимости аккумулируются для совместной обработки, если метод обработки предусматривает накопление. После накопления достаточного количества сигналов секвенция поступает на вход цикла обработки и может быть, например для отображения, сохранена на жестком диске (ЖД) или в ОЗУ ПК. После каждого этапа обработки сигнал, при необходимости, также может быть сохранен. Выходом блока является сигнал, прошедший все необходимые этапы первичной обработки.

После предварительной обработки следует постобработка. В целом, процесс постобработки (рис. 7) похож на процесс предварительной обработки с применением других методов, требующих своей специфики преобразования входных данных [14–22].

Так как постобработка является, как правило, наиболее трудоемкой частью с точки зрения создания РЛС, а методы постобработки – ключевое звено получения радиолокационных измерений, модуль постобработки предполагает осуществление методов обработки непосредственно инженером, проектирующим систему.

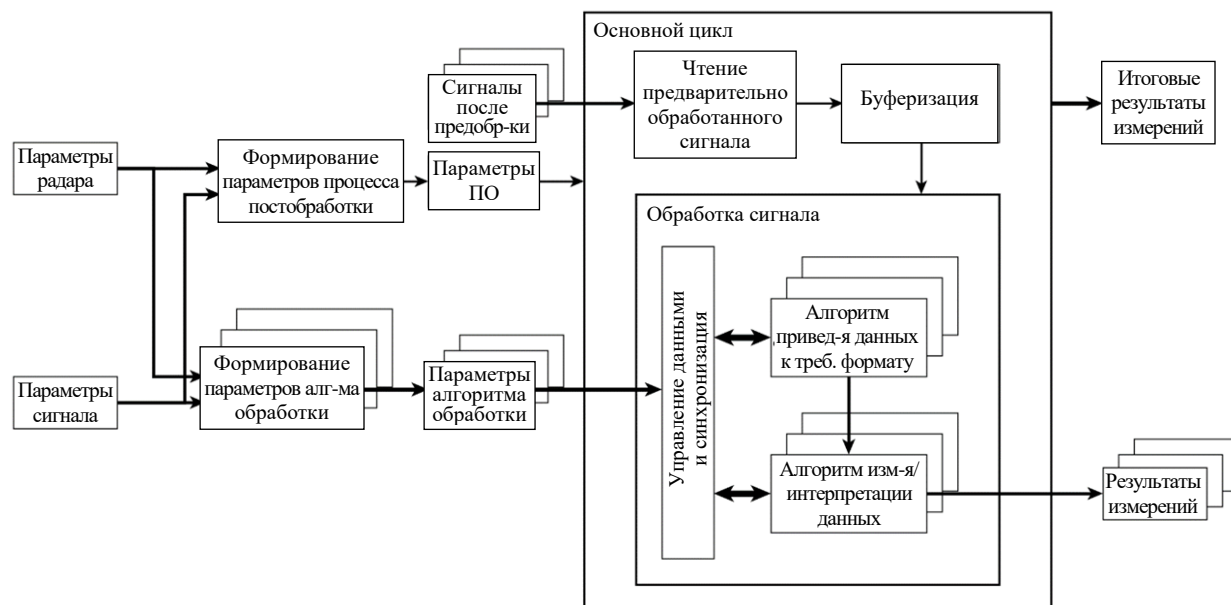


Рис. 7. Модуль постобработки

Fig. 7. Post-processing module

Внедрение методов постобработки в готовый программный пакет – задача нетривиальная и предполагает в большей степени реализацию адекватного для этих целей модуля отображения графической информации. Сами же алгоритмы постобработки могут быть реализованы в виде библиотек C++, а также Lua- или Python-скриптов. Разработчику РЛС также необходимо создать алгоритмы приведения данных, полученных в результате предварительной обработки, к требуемому формату.

Особенности реализации. Реализация масштабного проекта требует достаточно гибкого языка программирования, содержащего, с одной стороны, достаточное количество встроенных инструментов и сторонних библиотек для решения базовых задач, а с другой – обеспечивающего высокую производительность вычислений. Такими свойствами обладает C++, выбранный в качестве основного языка программного пакета, расширенный набор свободно распространяемых библиотек boost. Наличие большого числа независимых операций, особенно в модуле симуляции, требует использования алгоритмов параллельных вычислений, которые могут быть реализованы при помощи языка OpenCL. В совокупности с многоядерным процессором или графическим ускорителем этот язык способен существенно повышать скорость независимых вычислений.

Основой философии проекта является модульность, декомпозиция процессов и ориентация на широкий программный и пользовательский интерфейс. В основе проекта лежат библиотеки, позволяющие реализовывать базовые вычисления и работу с параметрами. Эти библиотеки расширяются новым функционалом для воплощения требуемых функций, и многие компоненты могут быть использованы повторно в разных частях программы – это реализует принцип модульности. Декомпозиция процессов подразумевает разбиение программы на простые подпрограммы, способные работать автономно. Единственная зависимость, которая остается между компонентами, – выходы одних являются входами других. Подпрограммы не делят общие ресурсы и выполняются как выделенные процессы.

Под ориентацией на широкий программный интерфейс подразумевается наличие расширений библиотек, позволяющее использовать их в составе различных программ. В их число входят: использование библиотеки в качестве библиотеки C++, в качестве библиотеки Python, в качестве программы, запускаемой в среде операционной системы, под которую он скомпилирован, и в качестве части программной среды с пользовательским интерфейсом. Ориентация на широкий пользовательский интерфейс означает наличие в пользовательском интерфейсе возможности гибко настраивать программную

среду в зависимости от спектра задач, в том числе включать, отключать и настраивать различные компоненты и настраивать систему отображения графических и цифровых данных.

Основным направлением дальнейшего развития проекта является его расширение и дополнение новыми алгоритмами обработки данных, протоколами обмена данными и управления радиолокационной аппаратурой, улучшение и оптимизация алгоритмов моделирования.

Заключение. В рамках описанной работы была обоснована необходимость создания программного комплекса симуляции и прототипирования радиоэлектронных систем и комплексов, а также разработаны концепт и архитектура программного пакета, способного решать данные задачи.

В основу архитектуры проекта легли модульность и декомпозиция процессов. Программный комплекс состоит из двух основных ПМ: модуля симуляции работы радиолокационного комплекса и модуля обработки радиолокационных сигналов, который также содержит программные средства, реализующие управление РЛС, и интерфейсы передачи данных, обеспечивающие получение оцифрованных сигналов в режиме реального времени.

Главными преимуществами разрабатываемого комплекса являются независимость от стороннего производителя и отсутствие ограничений на реализуемые функции. Так как ядро системы базируется на C++, функционал среды может быть расширен, адаптирован под потребности пользователя. Из этого преимущества вытекает и основной недостаток – модернизация программной среды требует определенного опыта и более глубокого понимания основ программирования, чем иные популярные решения, рассмотренные в рамках статьи.

Предложенный подход позволяет эффективно решать задачи симуляции и прототипирования радиолокационных систем и комплексов, что, в том числе, открывает различные области применения программного пакета: в качестве комплекса моделирования РЛС и разработки алгоритмов обработки радиолокационных данных, в качестве быстро развертываемого комплекса управления РЛС для работы с реальными радарными и прототипами, а также в академических целях как учебное пособие для студентов, обучающихся в высших учебных заведениях по соответствующему профилю.

Список литературы

1. Коновальчик А. П., Плаксенко О. А., Щирый А. О. Перспективы проектирования и совершенствования бортовых РЛС летательных аппаратов с применением разрабатываемой отечественной САПР // Новые информационные технологии в автоматизированных системах / Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. М., 2019. С. 67–72.
2. Деркачев В. А. Формирование радиолокационной сцены для моделирования РЛС с синтезированной апертурой // Изв. Южного федер. ун-та. Техн. науки. 2019. № 2 (204). С. 117–128. doi: 10.23683/2311-3103-2019-2-117-128
3. ЦИТМ "Экспонента". Технологии моделирования при создании радиолокационных систем. URL: <https://exponenta.ru/news/Tekhnologii-modelirovaniya-pri-sozdanii-radiolokacionnyh-sistem> (дата обращения: 19.05.2024)
4. Whole system radar modelling: Simulation and validation / J. Kannanthara, D. Griffiths, M. Jahangir, J. M. Jones, C. J. Baker, M. Antoniou, C. J. Bell, H. White, K. Bongs, Y. Singhformat // IET Radar, Sonar & Navigation. 2023. Vol. 17, iss. 6. P. 1050–1060. doi: 10.1049/rsn2.12399
5. Измерения в LabVIEW. Руководство по применению / пер. с англ.; Рос. филиал корпорации National Instruments. Новосибирск, 2006. 148 с.

6. Румановский И. Г., Калинин Н. А., Александров А. Моделирование системы управления автопилота самолета в средах SciLab и SimInTech // Вестн. ТОГУ. 2023. Т. 68, № 1. С. 55–70.
7. Septanto H., Suprijanto D. Practical Approach to Designing Radar Linear and Nonlinear Frequency Modulation Chirp Waveforms // Proc. of the Intern. Conf on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science. Springer Proc. in Physics. 2022. Vol. 290. P. 829–836. doi: 10.1007/978-981-19-9768-6_76
8. Radar Echo Generation. Rohde & Schwarz. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/echo-generators_232540.html (дата обращения: 19.05.2024)
9. YEA Engineering. Automotive. URL: <https://yea.am/automotive> (дата обращения: 19.05.2024)
10. Программное и аппаратное моделирование радиолокационных сигналов РЛС вертикального зондирования / Е. Н. Гарин, В. Н. Ратушняк, А. Б. Гладышев, Д. И. Смирнов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2020. Т. 13(3). С. 370–378. doi: 10.17516/1999-494X-0229
11. Бакулев П. А. Радиолокация движущихся целей. М.: Сов. радио, 1964. 336 с.

12. Справочник по радиолокации: в 2 кн. / под ред. М. И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2014. 680 с.
13. Сердюков И. С., Веремьев В. И., Нгуен В. Методология разработки программного обеспечения управления и сбора данных для систем автономного мониторинга с большим объемом генерируемой информации на примере программного комплекса управления гидрологическим радиолокатором // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 52–64. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-52-64
14. Orandarenko E. D. Radar Methods for Measuring the Hydrographic Parameters of the Sea // Intern. Conf. "Radar Monitoring Systems-2017 (RMS'2017)", Hanoi, Vietnam, 21–23 Nov. 2017. P. 42–56.
15. System for Adjustment of Angle Coordinates for Sea Surface Surveillance Radar / E. Vorobev, A. Bezuglov, V. Veremyev, V. Kutuzov // Signal Processing Symp. (SPSympto), Jachranka, Poland, 12–14 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 1–5. doi: 10.1109/SPS.2017.8053652
16. Orandarenko E. D., Veremyev V. I. Radar Methods of Measurement Bathymetry // IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St Petersburg, Russia, 29 Jan. – 01 Feb. 2018. IEEE, 2018. P. 1129–1131. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317289
17. Mikhailov V. N., Khachaturian A. B. Estimation of Sea-Wind Parameters Using a Doppler Navigation System // IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St Petersburg, Russia, 29 Jan. – 01 Feb. 2018. IEEE, 2018. P. 83–85. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317035
18. Kulikova D. Yu., Gorbunov I. G. Analysis of the Sea Surface Parameters by Doppler X-Band Radar in the Coastal Zone of the Black Sea // IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St Petersburg, Russia, 28–31 Jan. 2019. IEEE, 2019. P. 1179–1182. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657257
19. Веремьев В. И., Коновалов А. А., Бархатов А. В. Радиолокационный мониторинг нижних слоев атмосферы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 186 с.
20. Коновалов А. А. Основы тракторной обработки радиолокационной информации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.
21. Основы проектирования многопозиционных декаметровых РЛС пространственной волны / под общ. ред. В. М. Кутузова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. 191 с.
22. Веремьев В. И., Коновалов А. А. Радиолокационные методы обнаружения и оценки параметров атмосферных неоднородностей техногенного происхождения. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2008. 136 с.

Информация об авторе

Сердюков Иван Сергеевич – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2020), аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер в НИИ "Прогноз". Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; информационно-измерительные системы. Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: i.s.serdiukov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6637-5994>

References

1. Konovalchik A. P., Plaksenko O. A., Shchiry A. O. Prospects for the Design and Improvement of On-Board Radars of Aircraft Using the Developed Domestic CAD System. New Information Technologies in Automated Systems. Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, KIAM, 2019, pp. 67–72. (In Russ.)
2. Derkachev V. A. Formation of a Radar Scene for Modeling Radars with a Synthesized Aperture. News of the Southern Federal University. Technical Sciences. 2019, no. 2 (204), pp. 117–128. doi: 10.23683/2311-3103-2019-2-117-128 (In Russ.)
3. CITM "Exponenta". Modeling technologies for creating radar systems. Available at: <https://exponenta.ru/news/Tekhnologii-modelirovaniya-pri-sozdanii-radiolokatsionnyh-sistem> (accessed 19.05.2024)
4. Kannanthara J., Griffiths D., Jahangir M., Jones J. M., Baker C. J., Antoniou M., Bell C. J., White H., Bongs K., Singhformat Y. Whole System Radar Modelling: Simulation and Validation. IET Radar, Sonar & Navigation. 2023, vol. 17, iss. 6, pp. 1050–1060. doi: 10.1049/rsn2.1239
5. Measurements in LabVIEW. Instructions for use. National Instruments, 2003, 148 p.
6. Rumanovski I. G., Kalinnikov N. A., Aleksandrova A. A. Simulation of the Aircraft Autopilot Control System in Scilab and SimInTech Environments. Bulletin of Pacific National University. 2023, vol. 68, no. 1, pp. 55–70. (In Russ.)
7. Septanto H., Suprijanto D. Practical Approach to Designing Radar Linear and Nonlinear Frequency Modulation Chirp Waveforms. Proc. of the Intern. Conf. on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science. Springer Proc. in Physics. 2022, vol. 290, pp. 829–836. doi: 10.1007/978-981-19-9768-6_76
8. Radar Echo Generation. Rohde & Schwarz. Available at: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/echo-generators_232540.html (accessed 19.05.2024)
9. YEA Engineering. Automotive. Available at: <https://yeae.am/automotive> (accessed 19.05.2024)
10. Garin E. N., Ratushnyak V. N., Gladyshev A. B., Smirnov D. I. Software and Hardware Simulation of Radar System Signals of the Vertical Sounding. J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2020, vol. 13(3), pp. 370–378. doi: 10.17516/1999-494X-0229 (In Russ.)

11. Bakulev P. A. Radar of Moving Targets. Moscow, Sov. radio, 1964, 336 p. (In Russ.)
12. Skolnik M. I. Radar Handbook. 3rd ed. McGraw-Hill Education, 2008. 1328 p.
13. Serdiukov I. S., Veremyev V. I., Nguyen V. Software Methodology for Data Control and Collection for Autonomous Monitoring Systems with a Large Amount of Generated Information on the Example of Software for a Hydrological Radiolocation System. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 52–64. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-52-64 (In Russ.)
14. Orandarenko E. D. Radar Methods for Measuring the Hydrographic Parameters of the Sea. Intern. Conf. "Radar Monitoring Systems-2017 (RMS'2017)", Hanoi, Vietnam, 21–23 Nov. 2017, pp. 42–56.
15. Vorobev E., Bezuglov A., Veremyev V., Kutuzov V. System for Adjustment of Angle Coordinates for Sea Surface Surveillance Radar. 2017 Signal Processing Symp. (SPSymposium), Jachranka, Poland, 12–14 Sept. 2017. IEEE, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/SPS.2017.8053652
16. Orandarenko E. D., Veremyev V. I. Radar Methods of Measurement Bathymetry. IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 29 Jan.–01 Feb. 2018. IEEE, 2018, pp. 1129–1131. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317289
17. Mikhailov V. N., Khachaturian A. B. Estimation of Sea-Wind Parameters Using a Doppler Navigation System. IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow and St Petersburg, Russia, 29 Jan. – 01 Feb. 2018. IEEE, 2018, pp. 83–85. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317035
18. Kulikova D. Yu., Gorbunov I. G. Analysis of the Sea Surface Parameters by Doppler X-Band Radar in the Coastal Zone of the Black Sea. 2019 IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St Petersburg, Russia, 28–31 Jan. 2019. IEEE, 2019, pp. 1179–1182. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657257
19. Veremyev V. I., Konovalov A. A., Barkhatov A. V. Radar Monitoring of the Lower Atmosphere. St Petersburg, *Izd-vo SPbSETU "LETI"*, 2014, 186 p. (In Russ.)
20. Konovalov A. A. Fundamentals of Trajectory Processing of Radar Information. St Petersburg, *Izd-vo SPbSETU "LETI"*, 2013, 164 p. (In Russ.)
21. Fundamentals of Design of Multi-Position Decimeter Sky-Wave Radars. Ed. by V. M. Kutuzov. St Petersburg, *Izd-vo SPbSETU "LETI"*, 2012, 191 p. (In Russ.)
22. Veremyev V. I., Konovalov A. A. Radar Methods for Detecting and Assessing the Parameters of Atmospheric Heterogeneities of Technogenic Origin. St Petersburg, *Izd-vo SPbSETU "LETI"*, 2008, 136 p. (In Russ.)

Information about the author

Ivan S. Serdiukov, Engineer in "Radioelectronic systems and complexes" (2020), Postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Engineer of the Research Institute "Prognoz" The author of three scientific publications. Area of expertise: radiolocation; information and measurement systems.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: i.s.serdiukov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6637-5994>
