



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.3>

УДК: 004.94

УРОВНИ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ САПР

А.А. Арутюнян¹, М.Ю. Конопелькин¹, А.О. Щирий^{1,2}

¹ АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»
121471, Москва, ул. Верейская, д.41

² АО «НПК «НИИДАР»
127083, Москва, ул. 8 Марта, д.10, стр.1

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2022

Аннотация. Представлена концепция проектирования радиолокационных станций (РЛС), комплексов и систем в разрабатываемой отечественной системе автоматизированного проектирования (САПР), на трех уровнях проектирования РЛС: системном, структурном, функционально-логическом. Описан маршрут проектирования РЛС, состоящий из этапов предварительной оценки параметров РЛС, инженерного анализа, имитационного моделирования применения РЛС в составе систем воздушно-космической обороны (ВКО), нахождения оптимальных вариантов состава РЛС.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, радиолокационная станция, проектирование радиолокационных станций, имитационное моделирование, моделирование боевых действий, дискретно-событийное моделирование, пошаговое моделирование, инженерный анализ.

Автор для переписки: Щирий Андрей Олегович, andreyschiriy@gmail.com

Введение

При осуществлении комплексного проектирования сложных радиотехнических средств и систем, в частности, радиолокационных комплексов, требуется решать задачи выбора и оптимизации проектных параметров радиолокационных устройств, в т. ч. антенных систем, приемопередающих трактов радиолокационных станций (РЛС), алгоритмов и устройств цифрового формирования и обработки радиолокационных сигналов, а также радиолокационных систем в целом [1-3]. В настоящий момент не существует отечественных систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих решать эти задачи в комплексе.

Ввиду ряда ограничений, вызванных санкциями, закрытой тематикой работ, а также, в связи с проблемой импортозамещения, весьма актуальным является создание САПР РЛС, позволяющей решать указанные выше задачи в непрерывном сквозном цикле проектирования. Разработка САПР РЛС ведется силами АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» [4-11], его дочерних предприятий, а также компаний, обладающих компетенциями в области проектирования РЛС, с использованием имеющегося у них задела.

САПР планируется применять для решения трех основных задач: формирования функционального облика перспективной РЛС; подтверждения характеристик существующих РЛС; отладки алгоритмов работы РЛС и обработки сигналов. Для решения указанных задач необходим функционал поддержки распределенного имитационного моделирования [6-8, 12-13].

1. Уровни проектирования РЛС в разрабатываемой САПР

В разрабатываемую САПР РЛС закладывается [5] концепция многоуровневого ведения проектирования РЛС посредством данной САПР, для чего выделены следующие уровни проектирования.

1) Системный уровень: размещение на картах местности РЛС, компонентов радиолокационных комплексов, целей, а также маршрутов их движения, источников помех с заданием типов. Компоненты выбираются из

существующих библиотек готовых изделий, образцов (шаблонов), а также из компонентов, создаваемых на следующих (нижних) уровнях проектирования. Данный уровень проектирования позволяет оценить эффективность работы группировки радиолокационных средств с учетом местности и внешних воздействий в условиях применения конкретных средств воздушно-космического нападения (СВКН) и воздушно-космической обороны (СВКО).

2) Структурный уровень: создание (сборка) структуры РЛС из готовых модулей (антенно-фидерные устройства, приемники, передатчики и их составные части) – моделей либо реально существующих образцов, либо разработанных на нижних уровнях САПР. На этом уровне проводится исследование возможности создания и оценка показателей эффективности работы отдельных РЛС в целом; обоснование состава отдельных РЛС. Варианты РЛС, собранные на этом уровне, являются неделимыми исследуемыми элементами для системного уровня.

3) Функциональный уровень: варьирование алгоритмов цифровой обработки информации с целью обеспечения оптимального их сочетания по выбранным критериям эффективности. На этом уровне производится выбор и обоснование оптимальных алгоритмов управления РЛС, типов и параметров используемых сигналов; также на этом уровне оцениваются показатели эффективности работы отдельных РЛС, когда моделируется работа РЛС с точки зрения создания и обработки сигналов и радиолокационной информации.

Отметим, что уровни проектирования следует отличать от этапов проектирования (будут рассмотрены далее), хотя для каждого из этапов можно выделить один или несколько уровней наиболее актуальных на этапе.

В САПР РЛС пользователь моделирует работу РЛС в условиях воздушного налета с привязкой к конкретной местности (т.е. в окружении, близком к реальному). Результаты моделирования визуализируются в динамике, а также при моделировании рассчитывается набор показателей качества работы РЛС. Пользователь может моделировать как одну РЛС, так и группировку, состоящую из одно- или разнотипных РЛС, объединенных в иерархию вместе с командными

пунктами. Также пользователь может редактировать имеющиеся модели РЛС или создать собственную модель. Таким образом, функционал системного уровня состоит в основном из двух частей: редактора радиосцены [9] и функционала для создания сценариев имитационного моделирования боевых действий, с возможностью создания моделей обороняющейся и нападающей боевых группировок. Функционал имитационного моделирования проникает на все три уровня (системный, структурный, функционально-логический). С точки зрения стадий проектирования, имитационное моделирование выделено в отдельный этап, необходимый для верификации и уточнения параметров проектируемых РЛС, облик которых определен в общем виде на этапах предварительной оценки параметров и инженерного анализа.

Системный и структурный уровни различаются по следующим аспектам реализуемого в САПР РЛС процесса моделирования.

Системный уровень предназначен для анализа результатов моделирования, и ориентирован на оптимизацию размещения РЛС, объединение их в комплексы и системы с разветвленной иерархией командных пунктов, отработку различных вариантов воздушного нападения, построение траекторий и оснащения объектов на радиосцене. На системном уровне задаются координаты стояния, тип РЛС (роль в группе), количество и координаты антенн, их тип, а также система управления из связанных командных пунктов и средств объединения РЛС в комплексы и системы. Решаются задачи анализа эффективности объединения РЛС в комплексы и системы, эффективности взаимодействия внутри группы, настройки расположения РЛС и траекторий объектов наблюдения, оценки эффективности использования разнесенных антенн с учетом подстилающей поверхности, климатических особенностей сценария и пр. На системном уровне производится также выбор конкретных моделей явлений распространения и рассеяния сигнала из списка подготовленных моделей. Поддерживаются различные версии моделей.

Структурный уровень проектирования – это набор программных средств моделирования и анализа результатов моделирования, ориентированный на

оптимизацию параметров приемных и передающих трактов РЛС, модулей управления антеннами и антенными решетками, других конструктивных элементов РЛС. Предполагается, что облик оптимизируемой РЛС и требования к ее техническим параметрам определены на системном уровне, а структурный используется для поиска наилучших технических решений для достижения указанных требований. Решаются задачи анализа эффективности работы конкретных технических элементов приемных и передающих трактов, использования антенн с заданной геометрией и системой управления и пр. Предполагается, что в САПР будет создана база готовых элементов приемных и передающих трактов РЛС, антенн и пр. Это позволит проводить сравнение компоновок РЛС на базе готовых модулей, производство которых освоено, а также исследовать вопросы необходимости разработки новых образцов указанной техники. На структурном уровне РЛС представлена набором компонентов – программных модулей и связей между ними. Модель РЛС на структурном уровне, выполненную в виде графа потоков данных, можно отображать, создавать и оперативной корректировать визуальными средствами редактора. Настройки режимов работы такой модели возможны путем задания фактических параметров работы ее элементов, а также путем глубокой перекомпоновки в редакторе. Структурные модели РЛС могут использоваться для решения задач системного уровня без ограничений. На обоих уровнях моделирования расчет работы РЛС происходит одинаково, только на системном уровне внутренняя структура станции скрыта от пользователя.

Важнейшее отличие моделирования на функциональном уровне от моделирования на структурном и системном уровнях заключается в том, что имитационное моделирование на нем реализовано по пошаговой схеме, а на 1 и 2 уровнях – по дискретно-событийной схеме (подробнее об этом далее).

2. Этапы проектирования РЛС посредством разрабатываемой САПР

В разрабатываемую САПР закладываются возможности реализации следующих этапов проектирования РЛС (обобщенные связи по передаваемым

данным между модулями САПР, реализующими различные этапы проектирования, показаны на рис. 1:

1) этап предварительной оценки параметров РЛС, требуемых для обеспечения заданных характеристик (системный уровень проектирования); на данном этапе модуль предварительной оценки параметров РЛС получает в качестве входных данных численные значения тактических характеристик, которые должны быть обеспечены, и вычисляет требуемые для этого значения технических параметров РЛС. Основным результатом данного этапа является множество расчетных вариантов РЛС, из которого, в конечном счете, на последнем этапе проектирования формируется подмножество Парето-оптимальных вариантов РЛС;

2) этап подготовки данных для имитационного моделирования (системный, структурный или функциональный уровни проектирования); на данном этапе разработчик готовит дополнительную информацию, необходимую для проведения имитационного моделирования функционирования РЛС в реальных условиях, размещает проектируемую РЛС на местности, задает конструктив и типы используемых материалов, информационные связи, фоно-целевую обстановку, внешние воздействия, задействует аппаратные элементы; запускает расчет характеристик компонентов локально или на вычислительном кластере, в результате получают уточненные характеристики РЛС;

3) этап имитационного моделирования; на данном этапе разработчик уточняет размещение и типы РЛС, задает сценарий имитационного эксперимента: состав, характеристики зондирующих сигналов и режим работы, состав, типы и траекторные характеристики целей, типы и размещение (параметры движения) источников помех; выделяет значимые показатели эффективности и запускает моделирование, получая на выходе статистические оценки показателей эффективности.

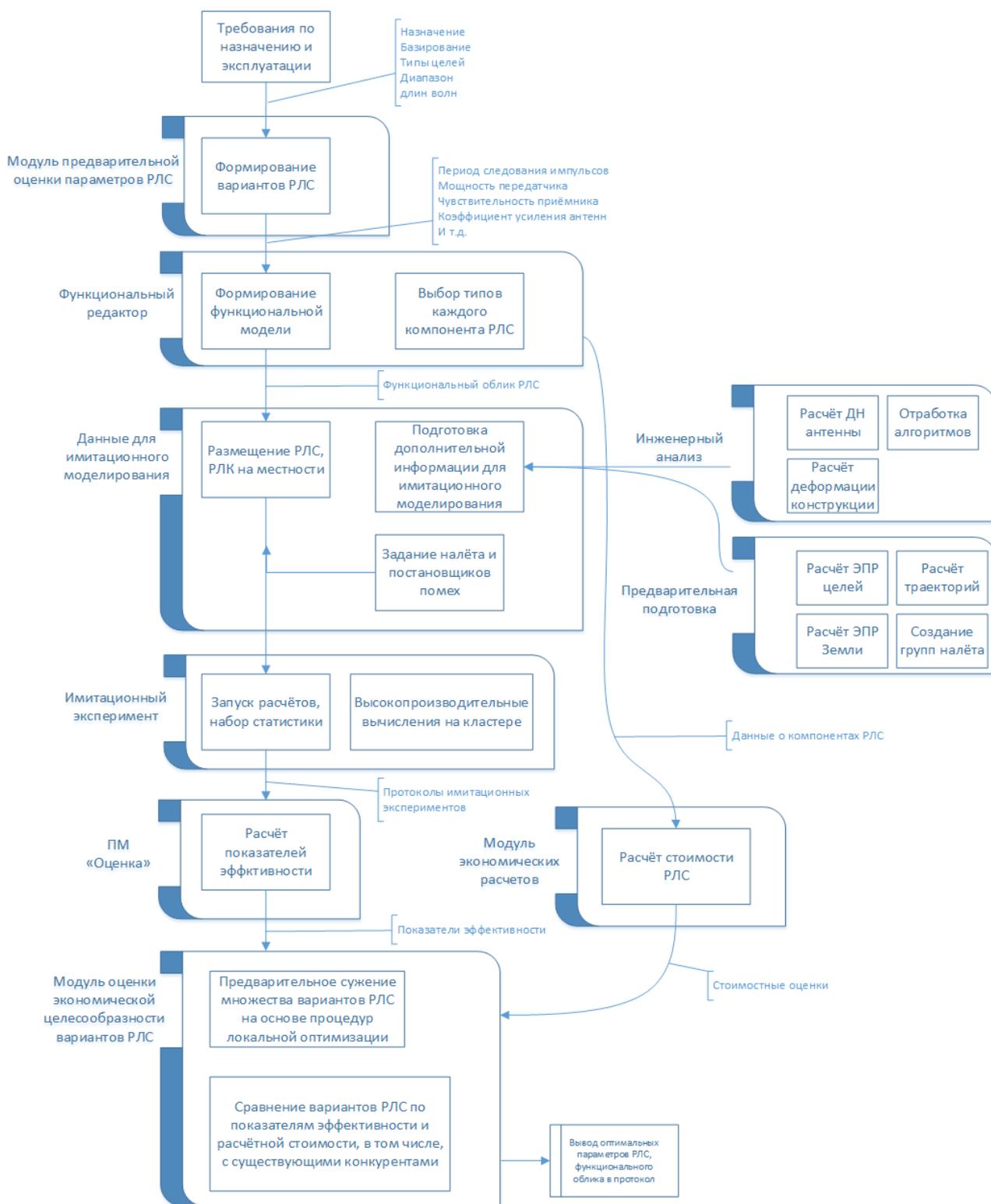


Рис. 1. Обобщенные связи по данным между основными модулями САПР РЛС

4) этап определения Парето-оптимальных вариантов РЛС на основе сравнения вариантов РЛС по показателям эффективности и расчетной стоимости. Этап реализуется модулем оценки экономической целесообразности вариантов РЛС (МОЭЦ) вариантов РЛС. В процессе выполнения данного этапа в качестве

исследуемых принимаются как варианты РЛС, сформированные на предыдущих этапах проектирования, так и существующие РСЛ аналогичного назначения.

Далее кратко поясняется содержание некоторых модулей, разрабатываемой САПР РЛС. При этом вопросы реализуемой в САПР методологии определения подмножества Парето-оптимальных вариантов РЛС и построения конкретных алгоритмов оптимизации в данной статье не рассматриваются.

3. Модуль предварительной оценки параметров РЛС

Основным назначением модуля предварительной оценки параметров (МПОП) РЛС является генерация множества расчетных вариантов РЛС, которые исследуются на всех последующих этапах проектирования. Каждый вариант РЛС задается набором таких значений обобщенных технических параметров РЛС, которые обеспечивают выполнение исходных требований к тактическим характеристикам РЛС.

В группу тактических характеристик РЛС входят:

- 1) зона обзора пространства (размер сектора по азимуту, пределы по углу места, пределы по дальности);
- 2) период обзора пространства;
- 3) максимальная дальность обнаружения цели с заданной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) при заданных вероятностях правильного обнаружения и ложной тревоги;
- 4) вероятность обнаружения цели с заданной ЭПР на заданном рубеже;
- 5) потенциальные точности (среднеквадратичные отклонения) измерения координат цели с заданной ЭПР на заданной дальности (по дальности, по радиальной скорости, по азимуту, по углу места, по плоскостным координатам, по высоте);
- 6) потенциальные разрешающие способности (по дальности, по радиальной скорости, по азимуту, по углу места, по высоте);
- 7) количество одновременно сопровождаемых целей.

В группу обобщенных технических параметров РЛС входят:

- 1) раскрыв антенны (по азимуту, по углу места);
- 2) коэффициент усиления антенны;
- 3) ширина диаграммы направленности антенны (ДНА), желательна по половинной мощности, с учетом отклонения максимума излучения от нормали к полотну антенны (по азимуту, по углу места);
- 4) значения нормированной ДНА (по азимуту, по углу места);
- 5) коэффициент шума приемной системы;
- 6) суммарный коэффициент потерь на прием и передачу;
- 7) суммарная мощность РЛС (импульсная, средняя);
- 8) длительность зондирующего сигнала (максимальная, минимальная);
- 9) ширина спектра зондирующего сигнала;
- 10) период повторения зондирующих сигналов;
- 11) время когерентного накопления;
- 12) измеряемая (инструментальная) дальность (максимальная, минимальная);
- 13) дискретизация по дальности;
- 14) измеряемая радиальная скорость (максимальная, минимальная);
- 15) дискретизация по скорости;
- 16) потенциал РЛС.

В разрабатываемой САПР предусмотрена возможность изменения перечней обобщенных технических параметров и тактических характеристик РЛС.

В основе расчетных методик МПОП лежат простые математические выражения, вытекающие из фундаментальных законов радиолокации. Полученные оценки являются исходными данными для более точных расчетов и моделирования, и позволяют избежать задания недостижимых параметров.

4. Пакет программных средств инженерного анализа

В состав создаваемой САПР входит пакет программных средств инженерного анализа, включающий: комплекс моделирования деформаций под влиянием внешних воздействий; блок построения расчетной сетки конструкции РЛС; блок построения расчетной сетки воздушного пространства, окружающего конструкцию РЛС; блок расчета аэродинамики; блок расчета деформаций; блок расчета теплообмена; интеграционный блок расчета внешних воздействий; модуль оценки электромагнитной совместимости; блок расчета ЭПР; модуль импорта/экспорта моделей из сторонних систем инженерного анализа и автоматизированного проектирования; модуль визуализации результатов инженерного анализа и проектирования. От модели расчета ЭПР целей требуется учет как можно большего количества различных факторов, влияющих на текущее значение ЭПР: длина волны, ракурс облучения, поляризация сигнала, электродинамические характеристики материала, из которого выполнена цель. Требования к моделированию ЭПР подстилающей поверхности сводятся к следующему: в первую очередь должен учитываться тип поверхности (грунт, песок, кустарник, лес и т.д.), причем перечень типов поверхности следует задавать как можно более широким. Также должны учитываться угол падения, длина волны, поляризация, а при расчетах углов падения во внимание должен приниматься и рельеф местности.

Модули пакета программных средств инженерного анализа, как и другие вычислительные модули САПР РЛС, объединены единой интеграционной средой расчетов и моделирования – специализированной интеграционной платформой, также обеспечивающей проведение многокритериальной оптимизации и междисциплинарного анализа, и поддерживающей использование ресурсов вычислительных кластеров в случае их наличия.

На этапе инженерного анализа формируются исходные данные, необходимые для проведения имитационного моделирования РЛС (параметры основных составных частей РЛС, вариант временной диаграммы (кинематики)

работы РЛС и формируемые при этом зоны обнаружения целей, летно-технические и отражательные характеристики целей и др.).

5. Общая концепция реализации имитационного моделирования

В разрабатываемой САПР реализуется поддержка двух схем имитационного моделирования: на 1 и 2 уровнях проектирования имитационное моделирование выполняется по дискретно-событийной схеме, а на 3 уровне – по пошаговой схеме. Пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность, в пошаговой схеме возможно смоделировать некоторые несложные виды РЛС, однако, в ней невозможно корректное моделирование РЛС с параллельной обработкой сигналов на разных частотах: например, ряда РЛС с большой инструментальной дальностью (несколько тысяч км), тем более в пошаговой схеме невозможно моделирование группировок средств СВКН и СВКО.

В дискретно-событийной схеме ведется динамическая очередь задач («календарь»), определяющая порядок передачи управления между вычислительными блоками (агентами, частными моделями). Это делается для синхронизации модельного времени, причем в условиях, когда вычислительные блоки «шагают» по времени, исходя из своей внутренней логики, временными интервалами произвольного размера.

В диспетчере имитационного моделирования (ДИМ) создается очередь задач, в которой могут регистрироваться события разных типов (каждому типу событий соответствует свой обработчик). Каждое событие, помещаемое в очередь задач, регистрируется с указанием определенного модельного времени.

Логика работы очереди задач и обработчиков в общем виде такова:

- каждый раз из очереди событий выбирается событие с наименьшим модельным временем, это модельное время присваивается счетчику текущего модельного времени;
- выбранное из очереди событие передается в обработчик, специфичный для данного типа событий;

- обработчик может как вызывать определенные процедуры для проведения расчетов, так и запланировать в очереди задач новые события, при этом модельное время этих событий должно быть не меньше, чем у текущего события;
- после обработки текущее событие удаляется из очереди.

К событиям очереди задач могут относиться как события, относящиеся к РЛС (начало и конец излучения импульса, конец приема сигнала от импульса и др.), так и события, относящиеся к помехо-целевой обстановке (например, раз в 2 секунды может быть запланирована проверка состояния цели, с возможностью изменения поведения цели и пересчета ее траектории полета).

ДИМ предназначен для осуществления и мониторинга процесса имитационного эксперимента на основе заданного сценария. ДИМ реализует дискретно-событийный вид имитационного моделирования. В дискретно-событийном моделировании функционирование системы представляется в виде хронологической последовательности событий. Событие происходит в определенный момент модельного времени и знаменует изменения состояния системы. Входными данными для ДИМ является сценарий имитационного эксперимента. В сценарии содержится информация о моделируемых объектах, среды, в которой они расположены и параметры процесса проведения имитационного моделирования.

Информация из ДИМ извлекается через механизм событий, к каждому событию привязаны данные. События протоколирования генерируются в ДИМ всегда, протокольную информацию в ДИМ также необходимо записывать в файл. Данная информация является хронологической записью процесса проведения эксперимента и может быть использована, вместе со сценарием, для повторного «проигрывания» эксперимента.

Сценарий ДИМ представляет собой файл, содержащий все сериализованные данные об используемых алгоритмах, значения их параметров или ссылки на них, необходимые для инициализации и осуществления имитационного эксперимента:

- информация о СВКН (модели и параметры движения, отражения, постановки помех; модели и параметры РЛС);
- информация об окружающей среде (области дождя);
- информацию о настройках прикладного программного интерфейса ДИМ;
- информация о настройках процесса имитационного моделирования.

Сценарий ДИМ формируется графическим интерфейсом САПР РЛС на основе информации из базы данных и является финальным этапом конверсии параметров эксперимента, заданных пользователем в параметры, передаваемые непосредственно в используемые алгоритмы моделирования. Операция конвертации данных из базы данных (БД) в сценарий ДИМ не является обратимой: данные из БД, не имеющих прямого отношения к процессу ИМ опускаются.

С помощью сценария ДИМ можно управлять данным программным интерфейсом, глобально влияя на процесс моделирования. Например, можно ускорить процесс моделирования, включив фильтрацию списка целей, анализируемых моделью РЛС по геометрическому признаку попадания в луч; можно включать/выключать учет осадков, подстилающей поверхности; точность расчета траекторий СВКН.

В рамках включаемой в состав САПР имитационной модели реализуется концепция динамического формирования наборов исследуемых параметров в данной сессии работы пользователя с САПР. Суть концепции такова.

Пользователю предоставляется полный перечень предметно определенных параметров, характеризующих трех «участников» моделируемого конфликта: «обороняющаяся сторона», «нападающая сторона», «природа». Очевидно, что в указанный перечень предметных параметров могут входить только те параметры, которые, во-первых, отображены в специализированных модулях САПР, описывающих отдельные подсистемы и элементы РЛС, объекты наблюдения, включая помеховую обстановку, и «природу», и, во-вторых, явно

учитываются в алгоритме имитационной модели, предназначенной для оценок показателей.

Пользователь отбирает из указанного полного перечня конкретный набор параметров, значения которых будут варьироваться с целью построения зависимостей от них выбранных показателей, и задает способ перебора расчетных значений варьируемых параметров. Пользователь фиксирует значения остальных параметров, не варьируемых в данной сессии работы с САПР.

6. Модуль экономических расчетов

Корректное определение рациональных характеристик РЛС возможно лишь в условиях ограничений области технических решений неким затратным показателем. Как показывает опыт тактико-технико-экономических исследований в качестве «затратных» могут использоваться различные показатели: масса, габариты, техническая сложность. Однако, наилучшим показателем затрат на реализацию того или иного решения является стоимость проектируемого изделия.

Модуль экономических расчетов (МЭР) реализует методы оценки стоимости изделий по аналогам, для этого требуется хранить наборы исходных данных радиолокационных станций и их составных частей, сгруппированные в соответствии с принятой в САПР РЛС классификацией.

Оценка стоимости в МЭР производится с использованием параметрических методов на основе исходных данных по аналогичным устройствам и РЛС. Заранее для каждой группы устройств формируется параметрическая модель стоимости, представляющая собой зависимость стоимости от наиболее характерных технических параметров изделия.

Параметрическая модель формально является математической функцией, и с некоторой погрешностью может быть представлена в виде полинома определенного порядка. Коэффициенты полинома рассчитываются на этапе подготовки исходных данных и хранятся внутри МЭР. Предусмотрен механизм

ручного определения параметрических моделей для каждого набора исходных данных вводом коэффициентов полинома или редактирования графика стоимостной зависимости в графическом интерфейсе.

В МЭР рассматривались два подхода к выделению функции стоимости от набора технических параметров:

- многомерная интерполяция и выделение парных корреляционных зависимостей стоимости от каждого из параметров;
- метод интерполяции сплайнами отдельных функций.

Результатом полностью автоматического расчета стоимости в данном модуле является набор оценок стоимости корреляционно-регрессионным методом для каждой из функциональных составных частей проектируемой РЛС, а также станции целиком.

МЭР состоит из следующих функциональных частей:

- блок формирования функций расчета стоимости для подготовки параметрических стоимостных моделей;
- блок расчета стоимости узлов по значениям их технических параметров в соответствии со стоимостной моделью;
- блок расчета стоимости РЛС целиком;
- базы исходных данных по РЛС и составным частям;
- управляющий блок с графическим интерфейсом пользователя.

Для МЭР входными данными являются результаты, получаемые в МПОП. Связь МЭР и МПОП осуществляется через БД посредством SQL-запросов. После проведения расчетов МПОП записывает данные в таблицы БД, которые предназначены для хранения результатов. Модуль оценки экономической целесообразности вариантов РЛС получает необходимые данные из таблиц БД МПОП.

Заключение

Таким образом, решены задачи построения архитектуры САПР, анализа и синтеза сценариев использования САПР, маршрута проектирования РЛС. Работы были выполнены в Концерне ВКО «Алмаз-Антей» в 2017-2021 г.г.

Дальнейшие планы развития САПР РЛС связаны с поддержкой проектирования загоризонтных (ЗГ) РЛС декаметрового диапазона [14-16], обладающих рядом специфических особенностей, прежде всего в вопросах адаптации ЗГ РЛС к геофизической обстановке [14-17].

Литература

1. Ахияров В.В., Нефедов С.И., Николаев А.И., Слукин Г.П., Федоров И.Б., Шустиков В.Ю. Радиолокационные системы. Под ред. А.И. Николаева. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 349 с.
2. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н., Гарин Е.Н. и др. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Под общ. ред. В.Н. Тяпкина. Красноярск, Сиб. федер. ун-т. 2011. 536 с.
3. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. Москва, Сов. Радио. 1971. 366 с.
4. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Постановка задачи разработки и предварительная архитектура отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. №20. С.127-130.
5. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Концепция многоуровневого проектирования РЛС в разрабатываемой САПР РЛС полного сквозного цикла. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т.17. №4. С.889-892.

6. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Отечественная система автоматизированного проектирования радиолокационных систем, комплексов и станций с учетом средств воздушно-космического нападения. Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т.10. №1. С.40-47.
7. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Функции имитации боевых действий в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. Вопросы радиоэлектроники. 2018. №3. С.30-34.
8. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Реализация имитационного моделирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2018. №21. С.290-293.
9. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Реализация редактора радиосцены на системном уровне проектирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т.18. №3. С.638-641.
10. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования. Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т.11. №1. С.4-11.
11. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О., Арутюнян А.А. Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР. Вестник воздушно-космической обороны. 2020. №4(28). С.111-118.
12. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика. Под ред. д-ра техн. наук, проф. Созинова П.А., д-ра техн. наук, проф. Глушкова И.Н. Тверь. 2013. 528 с.
13. Бродский Ю.И. Распределенное имитационное моделирование сложных систем. Москва, Вычислительный центр им. А.А. Дороницына РАН. 2010. 156 с.

14. Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов. Под ред. Боева С.Ф. М.: Техносфера. 2017. 492 с.
15. Giuseppe Fabrizio. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw-Hill Education. 2013.
16. Алебастров В.А., Гойхман Э.Ш., Заморин И.М., Колосов А.А., Корадо В.А., Кузьминский Ф.А., Кукис Б.С. Основы загоризонтной радиолокации. Под ред. Колосова А.А. Москва, Радио и связь. 1984. 256 с.
17. Колчев А.А., Щирый А.О., Недопекин А.Е. Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолоний: монография. Йошкар-Ола, Мар. гос. ун-т. 2013. 147 с.

Для цитирования:

Арутюнян А.А., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О. Уровни и этапы проектирования и исследования перспективных радиолокационных станций в отечественной специализированной САПР. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.3>