

На правах рукописи



МОРОЗОВ АНДРЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

МЕТОД ИСПЫТАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕСТОВОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Специальность 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (технические науки)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тверь – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)

Научный руководитель: Калабин Александр Леонидович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Программное обеспечение»
Федерального бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Тверской
государственный технический университет» (г. Тверь).

Официальные
оппоненты: Бердышев Валерий Петрович,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры тактики и вооружения радиотехнических
войск Военной академии воздушно-космической
обороны имени Маршала Советского Союза Г.К.
Жукова (г. Тверь).

Гатчин Юрий Арменакович,
доктор технических наук, профессор, профессор
факультета безопасности информационных
технологий Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики» (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация: Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
«Центрпрограммсистем» (г. Тверь).

Защита состоится 14 июня 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.2.410.01 в Федеральном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования «Тверской государственный технический
университет» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный
технический университет» и на сайте www.tver.ru

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.физ.-мат.н., профессор

Дзюба С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При производстве радиолокационных станций (РЛС) одной из основных проблем является определение её характеристик и функциональных возможностей.

Основным методом, с помощью которого можно получить наиболее достоверную информацию о функционировании РЛС и её характеристиках на заключительных этапах производства и при проведении приёмо-сдаточных испытаний, является метод натурных испытаний – облётный метод. Недостатком облётного метода является необходимость привлечения реальных воздушных средств, что увеличивает стоимость и сложность проведения и координации работ, и как следствие накладывает ограничение на количество и частоту их проведения.

Развитие технологий за последние 20 лет в области цифровой обработки и генерации цифровых сигналов, развитие беспилотной авиации позволяет формировать заданные условия испытаний без привлечения реальной техники (самолётов). Благодаря этому уменьшаются стоимостные, организационные и временные затраты, что, как следствие, способствует увеличению количества и частоты проводимых работ.

Также при производстве РЛС используется метод лабораторных испытаний. На данный момент существуют способы формирования заданной целевой обстановки для испытаний РЛС в лабораторных условиях. Недостатком лабораторных испытаний является то, что приёмник РЛС проверяется отдельно от всей системы, в лабораторных условиях. Тестовые сигналы вводятся в приёмник по тракту, а в процессе испытаний анализируется выходной сигнал приёмника, что даёт представление о работе приёмника, но не обо всей системе в целом. В частности, в испытаниях подобного плана исключается антенная система РЛС.

Предлагаемый метод оценки характеристик РЛС можно отнести к полунатурному моделированию. В работе также рассматриваются вопросы планирования проведения испытаний предлагаемым методом.

Результаты исследования могут быть полезны, например, для измерения тактических характеристик первичных радиолокаторов управления воздушным движением (УВД): посадочных, обзорных и трассовых. На сегодняшний день в качестве основных средств УВД используются аэродромные и трассовые РЛС, которые предназначены для радиолокационного обзора воздушного пространства и выдачи информации о воздушной обстановке в целях обеспечения контроля за движением в зоне аэродромного и районного центров УВД. Жизненный цикл современной РЛС состоит из этапов, связанных с её проектированием, изготовлением и эксплуатацией. Во время каждого этапа жизненного цикла необходимо решать задачи контроля, измерения характеристик и калибровки как отдельных блоков и узлов, так и станции в целом.

Указанные обстоятельства позволяют говорить о том, что имеет место несоответствие в практике между текущим уровнем развития технологий в области малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), цифровой обработки и генерации сигналов и тем, что указанные технологии совокупно не используются при проведении испытаний наземных РЛС.

Цель диссертации повысить эффективность проведения испытаний за счет применения метода определения характеристик наземных РЛС с использованием тестовой системы на основе БПЛА.

Объектом исследования является приёмная система наземной активной импульсной РЛС.

Предмет исследования – метод испытания наземной активной импульсной РЛС с использованием тестовой системы на основе БПЛА.

Создание перспективных РЛС, в том числе и активных импульсных, невозможно без проведения исследований, направленных на совершенствование методов их испытаний. Анализ рассматриваемой и смежных предметных областей показал, что методы испытаний РЛС и оценки их эффективности, ранее исследовались в ряде работ НИУ и ВУЗах Минобороны России, организациях промышленности АО «НПО «ЛЭМЗ», ОАО «Концерн «Вега», ПАО «Радиофизика». Среди которых можно отметить работы Я.Д. Ширмана, В.П. Бердышева, Ю.А. Гатчина, П.А. Бакулева, Н.П. Балабухи, М.С. Боброва, А.С. Бокова, Ю.П. Большакова, А.В. Богданова, С.Ф. Боева, В.С. Васильева, А.А. Дятко, В.Ф. Зюкина, С.П. Калениченко, А.И. Леонова, М.В. Максимова, А.А. Монакова, Л.Т.

Перевезенцева, В.М. Свистова, М. Сколника, В.С. Вербы, А.С. Солонара, А.Н. Фомина, Н.М. Цейтлина, А.В. Черноусова, К.А. Мазлова, В.Ю. Кузьменкова, А.О. Могильникова и др. ученых.

Анализ этих исследований показывает, что:

1. Проведение натуральных испытаний для оценки характеристик РЛС требует значительных затрат материальных и временных ресурсов.
2. Отсутствует научно-методический аппарат оценки характеристик наземных РЛС с использованием БПЛА с бортовым тестовым оборудованием.
3. Преднамеренные помехи на приёмник РЛС рассматриваются с точки зрения влияния на помехозащищенность как результат нежелательного влияния со стороны других работающих средств, либо по каким-то иным причинам.
4. Большинство методов оценки выполняются в лабораторных условиях для отдельного модуля РЛС, что не даёт полного представления о работе всей системы в целом.

Кроме этого в приведенных выше работах рассмотрены общие подходы к выполнению процедур измерения характеристик и параметров различных типов РЛС в процессе проведения их испытаний. При этом особое внимание уделялось системному подходу. Поэтому рассмотренные методы могут лишь ограниченно использоваться для достижения цели диссертации.

Таким образом анализ существующего научно-методического аппарата испытаний активных импульсных РЛС показывает, что ему присущи определенные недостатки и существует несоответствие в научном плане между необходимостью разработки метода проведения испытаний активных импульсных РЛС с использованием БПЛА и бортового тестового оборудования и несовершенством существующего научно-методического аппарата на основе традиционных методов для получения оценок характеристик испытываемой наземной РЛС, используемых при проведении её испытаний

Несоответствия в науке и практике предопределили актуальность научной задачи – разработать метод испытания наземных РЛС с использованием БПЛА и бортового тестового оборудования для получения оценки испытываемой характеристики на основе компьютерных методов обработки информации в условиях, приближенных к реальным, в интересах повышения эффективности проведения испытаний наземных РЛС при заданных ресурсных ограничениях.

В связи с этим существует необходимость разработки метода проведения испытаний для оценки функциональных характеристик РЛС с приемлемым расходом ресурсов для подготовки к приёмо-сдаточным испытаниям. В рамках исследования:

1. Рассматриваются наземные радиолокационные станции управления воздушным движением (РЛС УВД) с перспективой их развития до 2030 года.
2. Используется БПЛА вертолетного типа.
3. Выбранная позиция РЛС УВД однозначно обеспечивает приём отраженного сигнала, отражение от местных предметов не учитывается.
4. При оценке эффективности в качестве прототипа РЛС используется компьютерная модель наземной РЛС кругового обзора, характеристики которой основаны на характеристиках трассовой РЛС УВД кругового обзора «ЛИРА-1». Оценка эффективности будет выполняться с точки зрения затрачиваемых ресурсов. Планируется оценивать эффективность использования БПЛА в сравнении с самолётом при достижении тех же условий испытаний.

5. В качестве испытательного оборудования для подготовки к приёмо-сдаточным испытаниям предполагается использование БПЛА вертолётного типа, малогабаритного бортового программируемого векторного генератора сигналов, одноплатного компьютера.

В процессе решения общей научной задачи проведена её декомпозиция на следующие частные задачи:

1. Разработать методики проведения испытаний с использованием малогабаритного БПЛА и бортового тестового оборудования для получения оценок характеристик РЛС: дальности обнаружения, разрешающей способности по дальности.
2. Разработать программное обеспечение для моделирования процесса проведения испытаний на основе разработанных методик и получения численной оценки испытываемой характеристики в случае, когда определены параметры предлагаемой системы «РЛС–БПЛА–Объективный контроль».

3. Выполнить компьютерное моделирование процесса получения оценки испытываемой характеристики РЛС с использованием разработанных методик для предлагаемой системы «РЛС–БПЛА–Объективный контроль».

4. Выполнить оценку эффективности предлагаемой системы «РЛС–БПЛА–Объективный контроль» в сравнении с системой «РЛС–Самолёт–Объективный контроль».

В качестве методического аппарата исследования используются методы системного анализа: композиции и декомпозиции, макетирования, математического и компьютерного моделирования, разработки программного обеспечения и теории радиолокации.

На защиту выносятся:

1. Метод испытания наземных РЛС с использованием тестовой системы на основе БПЛА для получения оценки испытываемой характеристики с использованием компьютерных методов обработки информации, включающий:

– методику оценки дальности обнаружения воздушных объектов с использованием:
а) одной имитируемой цели с изменяющейся координатой дальности на фиксированных угловых координатах; б) с использованием нескольких имитируемых целей, распределенных на заданных дальностях, с фиксированными угловыми координатами в) нескольких имитируемых целей, распределенных на заданных дальностях, с изменяющимися угловыми координатами (представлен в автореферате);

– методику оценки разрешающей способности по дальности для воздушных объектов с использованием: а) одной пары имитируемых целей на фиксированных угловых координатах с изменяющимся расстоянием между целями; б) с использованием нескольких пар имитируемых целей, распределенных на заданных дальностях, с фиксированными угловыми координатами и заданным расстоянием между целями; в) нескольких пар имитируемых целей, распределенных на заданных дальностях, с изменяющимися угловыми координатами и с заданным расстоянием между целями.

2. Программно-аппаратный отладочный макет, результаты компьютерного моделирования для системы «РЛС–БПЛА–Объективный контроль».

Научная новизна характеризуется следующими результатами:

1. Разработан новый метод испытания РЛС с использованием тестовой системы на основе БПЛА, отличающийся от известных, использованием БПЛА и бортового тестового оборудования для получения оценки испытываемой характеристики с использованием компьютерных методов обработки информации. Суть метода заключается в излучении тестовых сигналов с борта БПЛА с целью определения и подтверждения характеристик РЛС. Преимущества использования предлагаемого метода в том, что тестовые сигналы вводятся в систему РЛС через антенну, а не по тракту (кабелю). При приёме сигнала через антенну в принимаемом сигнале содержатся все искажения, присущие месту развертывания РЛС. Например, такие как: наличие переотражений от местных предметов, индустриальных шумов; помехи от других средств, работающих на смежных частотах, влияние погодных условий и другие внешние факторы, которые не присутствуют в лаборатории, но в какой-то степени присутствуют при работе РЛС. Также ещё одним преимуществом является использование БПЛА, что позволяет изменять координаты источника излучения во время проведения испытаний.

2. Разработана методика оценки дальности обнаружения воздушных объектов, на основе использования имитируемых целей с различными характеристиками.

3. Разработана методика оценки разрешающей способности по дальности для воздушных объектов, на основе использования различных пар имитируемых целей с заданными характеристиками.

4. Проведено компьютерное моделирование для оценки эффективности системы «РЛС–БПЛА–Объективный контроль» в сравнении с системой «РЛС–Самолёт–Объективный контроль» на разработанном программно-аппаратном отладочном макете.

Новизна определяется разработанным новым методом испытания наземных РЛС с использованием тестовой системы на основе БПЛА для получения оценки испытываемой характеристики с использованием компьютерных методов обработки информации.

Новизна результатов подтверждается 3 патентами РФ: на сигнально-помеховый комплекс, беспилотный летательный аппарат, устройство измерения параметров диаграммы направленности.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, положений и выводов основаны на ясной физической интерпретации полученных результатов, использовании достоверных исходных данных, сходимости полученных теоретических результатов с данными имитационного моделирования, не противоречивости известным результатам, полученным другими авторами в рассматриваемых и смежных предметных областях.

Теоретическая значимость результатов состоит в дальнейшем развитии методов испытания наземных РЛС с использованием БПЛА.

Практическая значимость научных результатов состоит в возможности использования разработанного метода для решения актуальных практических задач, связанных с испытанием и калибровкой наземных РЛС. Предлагаемый метод эффективнее решает задачу проведения испытаний и калибровки наземной РЛС в условиях эксплуатации с точки зрения затрачиваемых ресурсов в сравнении с облётным методом. Практическая значимость результатов исследования подтверждается актом от предприятия АО «ВНИИРТ» о рекомендации использования предложенного метода в качестве технических решений при проведении испытаний радиотехнического оборудования. В работе предложены методики для оценки дальности и разрешающей способности по дальности, реализованные с использованием разработанного программно-аппаратного макета. Также с использованием БПЛА и бортовой тестовой системы можно выполнять испытания для получения оценки других показателей. Например, параметров диаграммы направленности антенны РЛС, точности определения координат станцией.

Апробация. Научные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: I Всероссийская научно-практическая конференция «Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития» (Воронеж, 5 марта 2019 года); XXXII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях-ММТТ-32» (Санкт-Петербург, 4 июня 2019 года); XXXIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях-ММТТ-33» (14 – 18 сентября 2020 г. Казань); XXIV Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (Москва, 23 – 26 марта 2021 г.); XII региональная специализированная выставка «Молодой изобретатель и рационализатор – 2021» («МИР–2021»), (Тверь, 11-12 мая 2021 г.); XXXIV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях-ММТТ-34» (1 – 4 июня 2021 г. Санкт-Петербург); Международный военно-технический форум «АРМИЯ-2021» (22-28 августа 2021 г. Москва).

Публикации. По материалам диссертации всего опубликовано 12 научных работ, из них: 3 публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК; 5 публикаций, приравняемых к публикациям в изданиях из списка ВАК (3 патента на изобретение и 2 свидетельства государственной регистрации программы для ЭВМ); 4 публикации в других научных журналах и материалах конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и одиннадцати приложений. Список литературы содержит 107 наименований. Представленный материал изложен на 165 страницах машинописного текста, в том числе 158 страниц основного текста, содержит 60 рисунков и 43 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы основные цели, задачи исследования, обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приводятся положения, выносимые на защиту; краткий перечень публикаций, содержащих основные результаты диссертации; и список конференций и выставок, на которых апробировались результаты исследования.

Первая глава «Анализ существующих методов проведения испытаний наземных РЛС и постановка научной задачи» содержит анализ существующей проблематики в вопросах испытания радиолокационных станций на заключительных этапах производства при подготовке и проведении приёмо-сдаточных испытаний, разбор существующих методов и документов (ГОСТ по испытаниям продукции, ГОСТ по этапам производства и жизненного цикла продукции), регламентирующих порядок выполнения работ по испытанию продукции заводом-изготовителем. По результатам анализа при производстве РЛС на этапе подготовки к приёмо-сдаточным испытаниям при приемлемых затратах

ресурсов существует необходимость получения численных оценок характеристик РЛС в условиях, приближенным к реальным.

В связи с этим предлагается использовать малогабаритный БПЛА с бортовой системой генерации тестовых сигналов для создания необходимых условий испытаний. Развитие технологий за последние 20 лет в области БПЛА, микропроцессорной техники и цифровой генерации сигналов позволяют реализовать схему проведения испытаний, представленную на рис. 1.

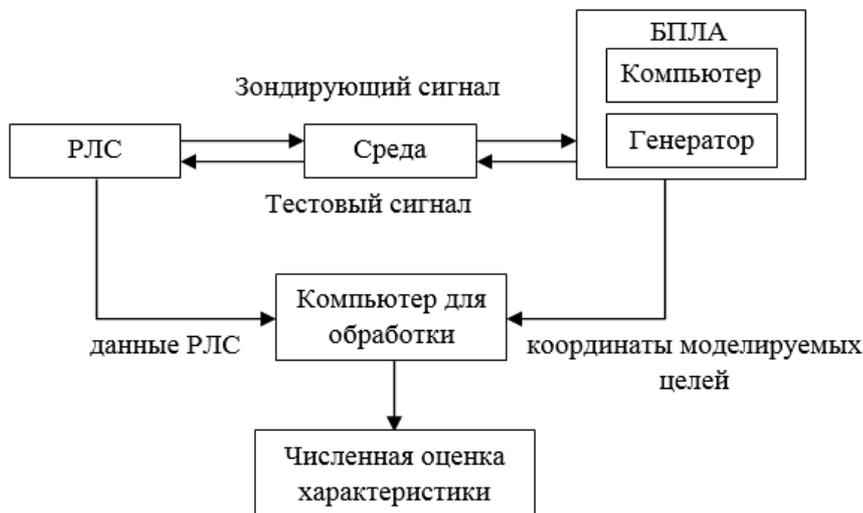


Рис. 1 – Схема проведения испытаний предлагаемым методом. Система «РЛС-БПЛА-Объективный контроль»

В формализованном виде научная задача сформулирована следующим образом: разработать метод испытания наземных РЛС ($x_{рлс}$) с использованием БПЛА и бортового тестового оборудования ($x_{уст}$) для получения оценки испытываемой характеристики (x) на основе компьютерных методов обработки информации в условиях функционирования ($x_{усл}$), приближенных к реальным, в интересах повышения эффективности (η) проведения испытаний РЛС управления воздушным движением (РЛС УВД) при заданных ресурсных ограничениях ($R_{дост}$):

$$x_{усл}^* = \underset{x_{уст} \in \Omega_{x_{уст}}}{argmax} \eta(x, x_{рлс}, x_{уст}, x_{усл}); \quad (1)$$

при ограничении используемых ресурсов $\rightarrow R_{исп} \leq R_{дост}$,

где x – оценка испытываемой характеристики РЛС; $x_{рлс}$ – вектор характеристик РЛС; $x_{уст}$ – вектор характеристик используемого оборудования и БПЛА; $x_{усл}$ – вектор условий испытаний; $R_{исп}$ – используемые ресурсы; $R_{дост}$ – доступные ресурсы; $\Omega_{x_{усл}}$ – множество возможных условий испытаний; η – эффективность проведения испытаний; $x_{усл}^*$ – вектор условий проведения испытаний, при которых достигается максимальная эффективность.

Во второй главе «Метод испытания РЛС с использованием тестовой системы на основе БПЛА» для реализации измерений в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1, приводится описание метода, который в дальнейшем будет реализован в методиках оценки характеристик РЛС с использованием БПЛА. Для описания предлагаемого метода используются: полётное задание для БПЛА (2); для бортового оборудования (3); уравнения (5) для вычисления точек траектории носителя и моделируемых целей; тестовый сигнал, отсчёты которого зависят от координат носителя и координат точек траекторий моделируемых целей.

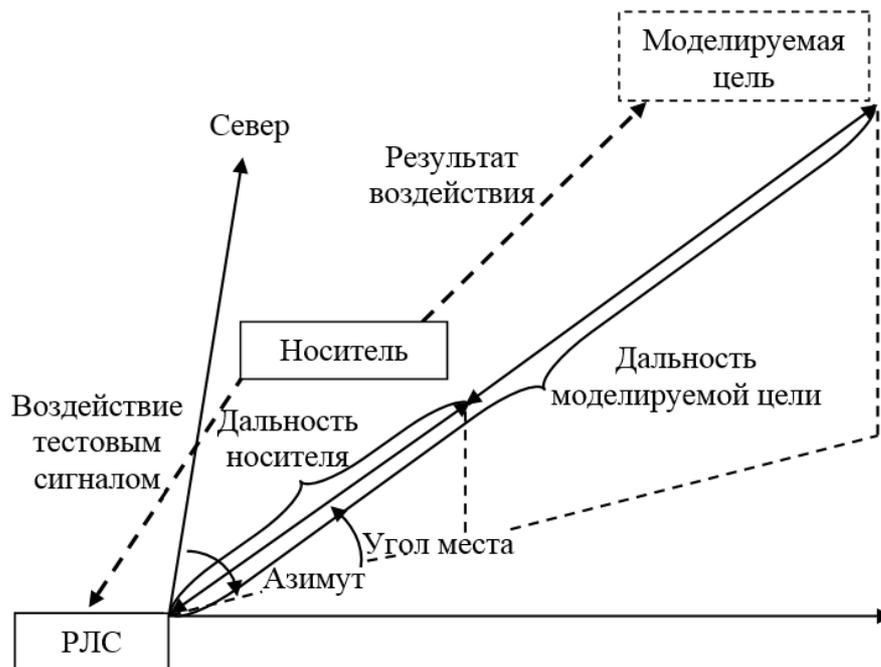


Рис. 2 – Координаты моделируемой цели

Также уравнения (5) дополняются соотношениями (5.1-5.2), ограничениями (5.3-5.6) и условиями эффективности (5.7-5.9) существенными с точки зрения проведения испытаний. Ограничения содержат: характеристики используемого бортового оборудования, носителя, известные характеристики РЛС. Решение уравнений (5) используется для расчёта точек траекторий носителя, моделируемых целей, определяющих вид тестового сигнала в соответствии с (4).

Полётное задание для носителя состоит из точек траектории носителя и времени ожидания в каждой точке;

$$Tr_n = \{p_{нвзл}, p_{н1}, \dots, p_{ни}, \dots, p_{нn}, p_{нпос}\}; i = 1, \dots, n; \\ p_{ни} = (\alpha_{ни}, \beta_{ни}, D_{исп}); p_{нвзл} = (\alpha_{нвзл}, \beta_{нвзл}, D_{нвзл}); p_{нпос} = (\alpha_{нпос}, \beta_{нпос}, D_{нпос}); \\ t_n = \{t_{н1}, \dots, t_{нn}\}, \quad (2)$$

где Tr_n – траектория носителя, $p_{нвзл}, p_{нпос}$ – точка взлёта/посадки; $p_{ни}$ – i -ая точка траектории носителя; $\alpha_{нвзл}$ – азимут точки взлёта носителя; $\beta_{нвзл}, \beta_{нпос}$ – угол места точки взлёта/посадки носителя; $D_{нвзл}, D_{нпос}$ – дальность точки взлёта/посадки носителя, $\alpha_{нпос}$ – азимут точки посадки носителя; $D_{исп}$ – дальность проведения испытаний (не изменяется во время испытаний), $t_{ни}$ – время ожидания в i -ой точке траектории, n – количество точек траектории.

Полётное задание для бортового оборудования включает в себя точки траектории для каждой имитируемой цели:

$$Tr_{мцj} = \{p_{мцj1}, \dots, p_{мцji}, \dots, p_{мцjn}\}; j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n; \\ p_{мцji} = (\alpha_{мцji}, \beta_{мцji}, D_{мцji}); \alpha_{мцji} = \alpha_{ни}; \beta_{мцji} = \beta_{ни}, \quad (3)$$

где $Tr_{мцj}$ – траектория j моделируемой (имитируемой) цели; $p_{мцji}$ – i -ая точка траектории j -ой моделируемой цели; $\alpha_{мцji}$ – i -ый азимут j -ой моделируемой цели; $\beta_{мцji}$ – i -ый угол места j -ой моделируемой цели; $D_{мцji}$ – i -ая дальность j -ой моделируемой цели; m – количество имитируемых целей.

Для тестового сигнала предполагается, что импульсы, излучаемые бортовым генератором, соответствуют импульсам, излучаемым РЛС. У тестового сигнала изменяется только время задержки импульсов относительно зондирующего импульса (излучаемого РЛС) и количество импульсов, излучаемых бортовым генератором в ответ на один зондирующий импульс. Количество импульсов соответствует количеству имитируемых целей, а время задержки импульсов рассчитывается в соответствии с текущей дальностью носителя и требуемой дальностью моделируемой цели по формуле (4).

$$t_{зг} = \frac{2(D_{мц} - D_{н})}{c} - t_{п}, \quad (4)$$

где $t_{зг}$ – время задержки, формируемое бортовым генератором; $D_{мц}$ – дальность моделируемой цели; $D_{н}$ – текущее удаление носителя от РЛС; $t_{п}$ – пауза, вносимая запаздыванием сигнала синхронизации и работой бортового вычислителя; $D_{мц\ min}$ – минимально возможная дальность моделируемой цели; c – скорость света.

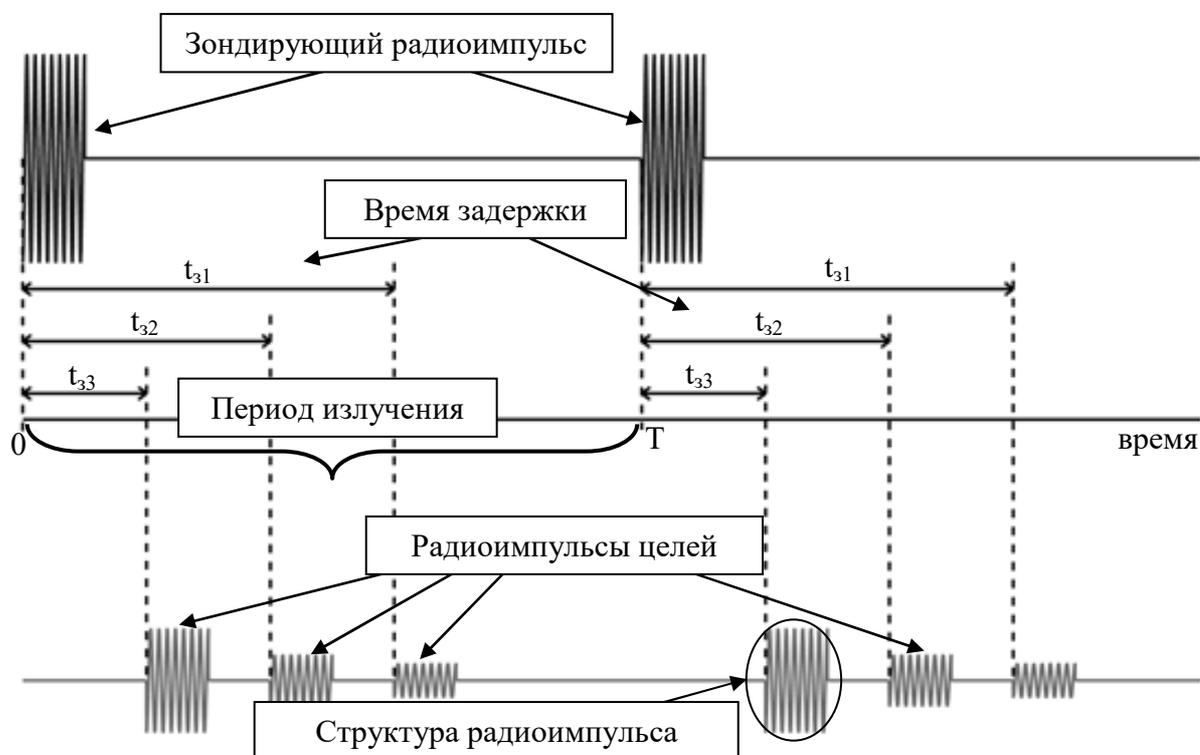


Рис. 3 – Иллюстрация параметров тестового сигнала

Таким образом, воздействие на РЛС определяется видом тестового сигнала, который зависит от траектории носителя (2), количества моделируемых целей и их траекторий (3).

Для определения координат точек траектории носителя и моделируемых целей получены уравнения (5), определяющие точки траектории носителя и моделируемых целей, с учётом, что угловые положения моделируемых целей равны угловому положению носителя:

$$\begin{aligned} \alpha_{ni} &= f_{\alpha n}(\alpha_{изм1}, \alpha_{изм2}, i, n, k, \Delta\alpha_{низм}, \Delta\alpha_{мц}); \\ \beta_{ni} &= f_{\beta n}(\beta_{изм1}, \beta_{изм2}, i, n, k, \Delta\beta_{низм}, \Delta\beta_{мц}); \\ D_{мцji} &= f_{D_{мц}}(D_{изм1}, D_{изм2}, i, j, n, m, k, \Delta D_{мц}). \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения (5) дополняются соотношениями (5.1-5.6), связанными с физической реализацией используемого оборудования, определяющими:

1. точность позиционирования моделируемых целей по азимуту, углу места, дальности:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{мц} &= f_{\Delta\alpha_{мц}}(\sigma_{н\alpha}, D_{исп}); \\ \Delta\beta_{мц} &= f_{\Delta\beta_{мц}}(\sigma_{н\beta}, D_{исп}); \\ \Delta D_{мц} &= f_{\Delta D_{мц}}(\sigma_{нD}, \sigma_{t_{зг}}); \end{aligned} \quad (5.1)$$

2. шаг по азимуту, углу места, дальности для моделируемых целей при изменении их положения во время испытаний между оборотами антенны РЛС:

$$\begin{aligned}
\Delta\alpha_{\text{мцизм}} &= h_{\alpha_{\text{мц}}}\Delta\alpha_{\text{мц}}; \\
\Delta\beta_{\text{мцизм}} &= h_{\beta_{\text{мц}}}\Delta\beta_{\text{мц}}; \\
\Delta D_{\text{мцизм}} &= h_{D_{\text{мц}}}\Delta D_{\text{мц}};
\end{aligned}
\tag{5.2}$$

3. соответствие доступного диапазона дальностей требуемым значениям дальностей:

$$\begin{aligned}
D_{\text{изм } 1} &> D_{\text{мц } \min}; \\
D_{\text{изм } 2} &< D_{\text{мц } \max};
\end{aligned}
\tag{5.3}$$

4. соответствие требуемому времени полёта по траектории к максимально доступному времени полёта:

$$T_{\text{н}} \leq T_{\text{н макс}}. \tag{5.4}$$

5. Соотношениями, ограничивающими целочисленные коэффициенты, определяющие величину шага моделируемых целей по координатам, при смене положения:

$$h_{\alpha_{\text{мц}}} \geq 1; h_{\beta_{\text{мц}}} \geq 1; h_{D_{\text{мц}}} \geq 1. \tag{5.5}$$

6. Дополнительными ограничениями, связанными с логикой проведения испытаний:

$$i \geq 1; i \leq n; j \geq 1; j \leq m; n > 1; m \geq 1. \tag{5.6}$$

Из получаемого множества решений выбираются только соответствующие условиям эффективности для предлагаемых ниже методик определения характеристик РЛС (5.7-5.9):

1. использования максимального доступного времени полёта:

$$T_{\text{н}} \rightarrow T_{\text{н макс}}; \tag{5.7}$$

2. достижения минимального шага по координатам (азимут, угол места, дальность):

$$h_{\alpha_{\text{мц}}} \rightarrow \min; h_{\beta_{\text{мц}}} \rightarrow \min; h_{D_{\text{мц}}} \rightarrow \min; \tag{5.8}$$

3. использования максимального количества положений моделируемых целей:

$$N = mnk \rightarrow \max, \tag{5.9}$$

где $\alpha_{\text{ни}}$ – азимут i -ой точки траектории носителя; $\beta_{\text{ни}}$ – угол места i -ой точки траектории носителя; $D_{\text{ни}}$ – дальность i -ой точки траектории носителя; $\alpha_{\text{мци}j}$ – азимут i -ой точки траектории j -ой моделируемой цели; $\beta_{\text{мци}j}$ – угол места i -ой точки траектории j -ой моделируемой цели; $D_{\text{мци}j}$ – дальность i -ой точки траектории j -ой моделируемой цели; $\alpha_{\text{изм}1}$ – начальный азимут при проведении испытаний; $\alpha_{\text{изм}2}$ – конечный азимут при проведении испытаний; $\sigma_{\text{на}}$, $\sigma_{\text{нб}}$, $\sigma_{\text{нд}}$ – ошибка позиционирования носителя по азимуту, углу места, дальности; $\sigma_{\text{тзг}}$ – ошибка контроля времени задержки ответного сигнала; $\Delta D_{\text{мц}}$ – минимально возможный шаг дальности моделируемой цели; n – количество точек траектории; m – количество одновременно используемых моделируемых целей; N – суммарное количество положений имитируемых целей за время проведения испытаний; k – время остановки носителя в каждой точке траектории, определяемое в количестве оборотов антенны РЛС; $\beta_{\text{изм}1}$ – начальный угол места при проведении испытаний; $\beta_{\text{изм}2}$ – конечный угол места при проведении испытаний; $\Delta\beta_{\text{низм}}$ – смещение по углу места для носителя; $D_{\text{изм}1}$ – начальная дальность целей при проведении испытаний; $D_{\text{изм}2}$ – конечная дальность целей при проведении испытаний; $T_{\text{н}}$ – требуемое время полёта по траектории; $T_{\text{н макс}}$ – максимальное время полёта по траектории; $\Delta\alpha_{\text{н}}$ – минимально возможный шаг изменения азимута для носителя; $\Delta\alpha_{\text{мц}}$ – минимально возможный шаг изменения азимута для моделируемой цели; $\Delta\alpha_{\text{мцизм}}$ – шаг изменения азимута для моделируемой цели во время испытаний; $\Delta D_{\text{мц}}$ – минимальный шаг изменения дальности для моделируемой

цели; $h_{\alpha_{\text{мц}}}$ – коэффициент определяющий шаг по азимуту между точками траектории для моделируемой цели; $h_{\beta_{\text{мц}}}$ – коэффициент определяющий шаг по углу места между точками траектории для моделируемой цели; $h_{D_{\text{мц}}}$ – коэффициент определяющий шаг по дальности между точками траектории для моделируемой цели; $D_{\text{мц}min}$ – минимально возможная дальность моделируемой цели; $D_{\text{мц}max}$ – максимально возможная дальность моделируемой цели.

В третьей главе «Методики проведения испытаний с использованием тестовой системы на основе БПЛА» приводятся разработанные методики для измерения дальности обнаружения и разрешающей способности по дальности. Каждая из методик оценки характеристики имеет 3 вариации:

а) методика оценки дальности обнаружения (разрешающей способности по дальности) с применением одной имитируемой цели (одной пары целей) на заданных угловых координатах;

б) методика оценки дальности обнаружения (разрешающей способности по дальности) с применением нескольких имитируемых целей (нескольких пар целей) на заданных угловых координатах;

в) методика оценки дальности обнаружения (разрешающей способности по дальности) с использованием нескольких имитируемых целей (пар целей) с изменением их угловых координат.

Далее для примера рассматривается методика проведения испытаний по оценке дальности обнаружения с использованием нескольких имитируемых целей с изменением их угловых координат для РЛС кругового обзора пространства. На рис. 3 приведена схема проведения испытаний и обозначения величин, используемых при решении уравнений (8), определяющих координаты точек траекторий носителя (6) и моделируемых целей (7). Таким образом, решение уравнений (8) определяет план проведения испытаний, состоящий из траектории носителя (6) и моделируемых целей (7).

Траектория носителя определяется в соответствии с выражениями (6):

$$\begin{aligned} Tr_n &= \{p_{\text{нвзл}}, p_{\text{н}1}, \dots, p_{\text{н}i}, \dots, p_{\text{н}n}, p_{\text{нпос}}\}; p_{\text{н}1} = \dots = p_{\text{н}n}; \\ p_{\text{н}i} &= (\alpha_{\text{изм}1} + (i-1)\Delta\alpha_{\text{изм}}, \beta_{\text{изм}}, D_{\text{исп}}); i = 1, \dots, n; \\ t_n &= \{t_{\text{н}1}, \dots, t_{\text{н}n}\}; t_{\text{н}1} = \dots = t_{\text{н}n} = kT_{\text{обРЛС}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Траектории имитируемых целей определяются в соответствии с выражениями (7):

$$\begin{aligned} Tr_{\text{мц}1} &= \{p_{\text{мц}11}, \dots, p_{\text{мц}1n}\}; \\ p_{\text{мц}1i} &= (\alpha_{\text{мц}1i}, \beta_{\text{мц}1i}, D_{\text{мц}1i}) = (\alpha_{\text{изм}1}, \beta_{\text{изм}}, D_{\text{изм}1}); \\ &\dots \\ Tr_{\text{мц}j} &= \{p_{\text{мц}j1}, \dots, p_{\text{мц}jn}\}; \\ p_{\text{мц}ji} &= (\alpha_{\text{мц}ji}, \beta_{\text{мц}ji}, D_{\text{мц}ji}) = (\alpha_{\text{изм}1} + (i-1)\Delta\alpha_{\text{изм}}, \beta_{\text{изм}}, D_{\text{изм}1} + (j-1)\Delta D_{\text{мц}изм}); \\ &\dots \\ Tr_{\text{мц}m} &= \{p_{\text{мц}m1}, \dots, p_{\text{мц}mn}\}; \\ p_{\text{мц}mi} &= (\alpha_{\text{мц}mi}, \beta_{\text{мц}mi}, D_{\text{мц}mi}) = (\alpha_{\text{изм}1} + (i-1)\Delta\alpha_{\text{изм}}, \beta_{\text{изм}}, D_{\text{изм}1} + (m-1)\Delta D_{\text{мц}изм}). \end{aligned} \quad (7)$$

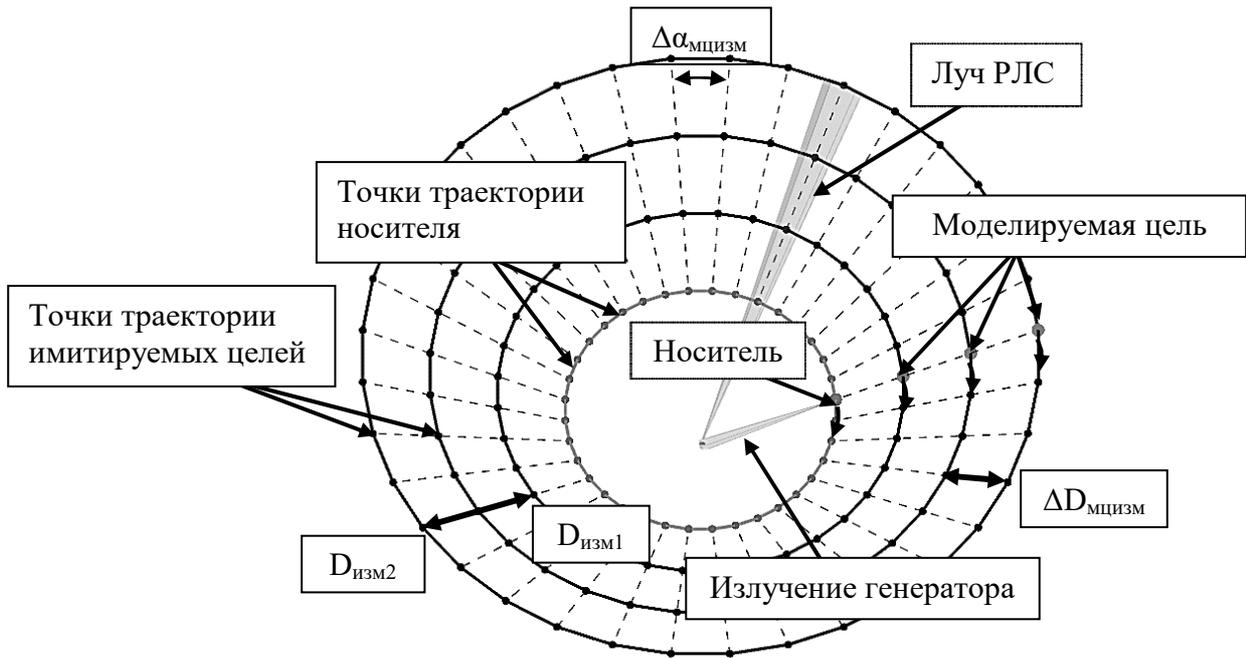


Рис. 4 – Схема проведения испытаний для получения оценки дальности обнаружения испытываемой наземной РЛС, с использованием нескольких имитируемых целей с изменением их угловых координат

Траектории в выражениях (6,7) соответствуют ситуации, когда используется одна или несколько моделируемых целей, угловые координаты всех целей в любой момент времени совпадают и равны координатам носителя. Каждая моделируемая цель имеет различную координату дальности, но фиксированную для каждой из целей. В течение всего времени проведения испытаний носитель перемещается по дуге окружности с начального до конечного азимута на фиксированном угле места, с остановками в каждой точке траектории на заданное время.

Координаты точек траектории носителя (6) и моделируемых целей (7) определяются решением уравнений (8).

$$\begin{aligned} \alpha_{ni}(i) &= \alpha_{изм1} + (i - 1)\Delta\alpha_{мцизм}; \\ D_{мциj}(j) &= D_{изм1} + (j - 1)\Delta D_{мцизм}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения (8) дополняются соотношениями (8.1-8.5), связанными с физической реализацией используемого оборудования, определяющими:

1. шаг по азимуту, углу места, дальности для моделируемых целей при изменении их положения во время испытаний между оборотами антенны РЛС:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{мцизм} &= h_{\alpha_{мци}}\Delta\alpha_{мци}; \\ \Delta D_{мцизм} &= h_{D_{мци}}\Delta D_{мци}; \end{aligned} \quad (8.1)$$

2. соответствие доступного диапазона дальностей требуемым значениям дальностей и выбранной величины шага изменения координат к максимально возможным:

$$\begin{aligned} D_{изм2} &= D_{изм1} + (m - 1)\Delta D_{мцизм}; \\ \alpha_{изм2} &= \alpha_{изм1} + (n - 1)\Delta\alpha_{мцизм}; \\ \alpha_{мцизм} &> \Delta\alpha_{мцизмmin}; \Delta\alpha_{мцизм} < \Delta\alpha_{мцизмmax}; \\ \Delta D_{мцизм} &> \Delta D_{мцизмmin}; \Delta D_{мцизм} < \Delta D_{мцизмmax}; \end{aligned} \quad (8.2)$$

3. соответствие требуемому времени полёта по траектории к максимально доступному времени полёта:

$$t_{\text{нп}} = \frac{\left(\frac{\Delta\alpha_{\text{мцизм}}}{180^\circ}\pi\right) D_{\text{изм}} \cos(\beta_{\text{изм}})}{v_{\text{н}}};$$

$$T_{\text{изм}} = nkT_{\text{обРЛС}} + T_{\text{обРЛС}} \left(1 - \frac{\Delta\alpha_{\text{мцизм}}}{360^\circ}\right) (n - 1); \quad (8.3)$$

$$T_{\text{н}} = t_{\text{взл}} + T_{\text{изм}} + t_{\text{пос}};$$

$$T_{\text{н}} \leq T_{\text{нмакс}}, t_{\text{нп}} < T_{\text{обРЛС}} \left(1 - \frac{\Delta\alpha_{\text{мцизм}}}{360^\circ}\right).$$

4. Соотношениями, ограничивающими целочисленные коэффициенты, определяющие величину шага моделируемых целей по координатам, при смене положения:

$$h_{\alpha_{\text{мц}}} \geq 1; h_{D_{\text{мц}}} \geq 1. \quad (8.4)$$

5. Дополнительными ограничениями, связанными с логикой проведения испытаний. Предполагается, что используется более одной моделируемой цели, траектория состоит как минимум из двух точек, время ожидания носителя в каждой точке как минимум равно времени одного оборота антенны:

$$i \geq 1; i \leq n; j \geq 1; j \leq m; n > 1; m > 1; k \geq 1. \quad (8.5)$$

Из получаемого множества решений выбираются только соответствующие условиям эффективности (8.7-8.9):

1. использования максимального доступного времени полёта:

$$T_{\text{н}} \rightarrow T_{\text{нмакс}}; \quad (8.6)$$

2. достижения минимального шага по координатам (азимут, угол места, дальность):

$$h_{\alpha_{\text{мц}}} \rightarrow \min; h_{D_{\text{мц}}} \rightarrow \min; \quad (8.7)$$

3. использования максимального количества положений моделируемых целей:

$$N = mnk \rightarrow \max; \quad (8.8)$$

где $t_{\text{нп}}$ – оценка времени, необходимого для изменения азимута носителя на величину $\Delta\alpha_{\text{мцизм}}$ (относительно положения РЛС); $v_{\text{н}}$ – результирующая скорость перемещения носителя $T_{\text{обРЛС}}$ – период оборота антенны РЛС; $\alpha_{\text{изм1}}, \alpha_{\text{изм2}}$ – начальный/конечный азимут при проведении испытаний; $\Delta\alpha_{\text{изм}}$ – смещение по азимуту для носителя; n – количество точек траектории; m – количество одновременно используемых моделируемых целей; $\beta_{\text{изм}}$ – угол места при проведении испытаний; $D_{\text{изм1}}, D_{\text{изм2}}$ – начальная/конечная дальность целей при проведении испытаний; $T_{\text{н}}$ – требуемое время полёта по траектории; $T_{\text{нмакс}}$ – максимальное время полёта по траектории; $\Delta\alpha_{\text{мц}}$ – минимально возможный шаг изменения азимута для моделируемой цели; $\Delta D_{\text{мц}}$ – минимальный шаг изменения дальности для моделируемой цели; $h_{\alpha_{\text{мц}}}$ – коэффициент, определяющий шаг по азимуту между точками траектории для моделируемой цели; $h_{D_{\text{мц}}}$ – коэффициент, определяющий шаг по дальности между точками траектории для моделируемой цели; $D_{\text{мцmin}}, D_{\text{мцmax}}$ – минимально/максимально возможная дальность моделируемой цели.

Решением будет являться вектор значений $(n, m, k, h_{\alpha_{\text{мц}}}, h_{D_{\text{мц}}})$, определяющих количество точек траектории для носителя и моделируемых целей, количество одновременно используемых моделируемых целей, время остановки носителя в каждой точке траектории, величину шага по азимуту, величину шага по дальности. Предполагается, что необходимые данные по носителю, бортовому оборудованию, РЛС известны.

В четвертой главе «Вычислительный эксперимент с использованием разработанного программно-аппаратного макета» описывается проведенный вычислительный эксперимент для оценки эффективности проведения испытаний предлагаемыми методиками, реализованными с помощью программно-аппаратного

макета. Для апробации предлагаемых методик был собран и запрограммирован программно-аппаратный макет, представленный на рис. 4. С помощью разработанного макета выполняется планирование измерений и моделирование процесса их проведения в соответствии со спланированным заданием.

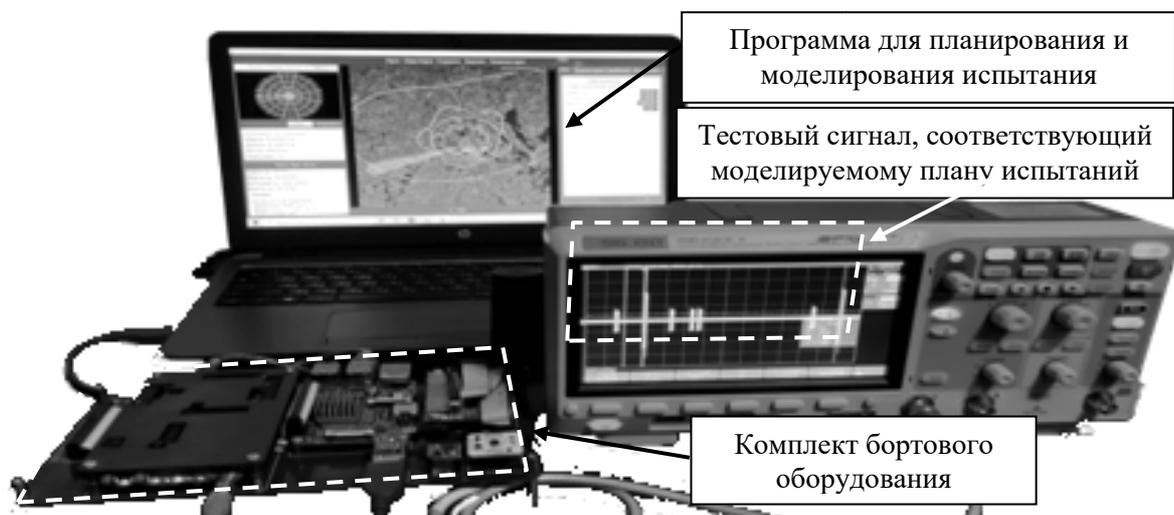


Рис. 5 – Программно-аппаратный макет

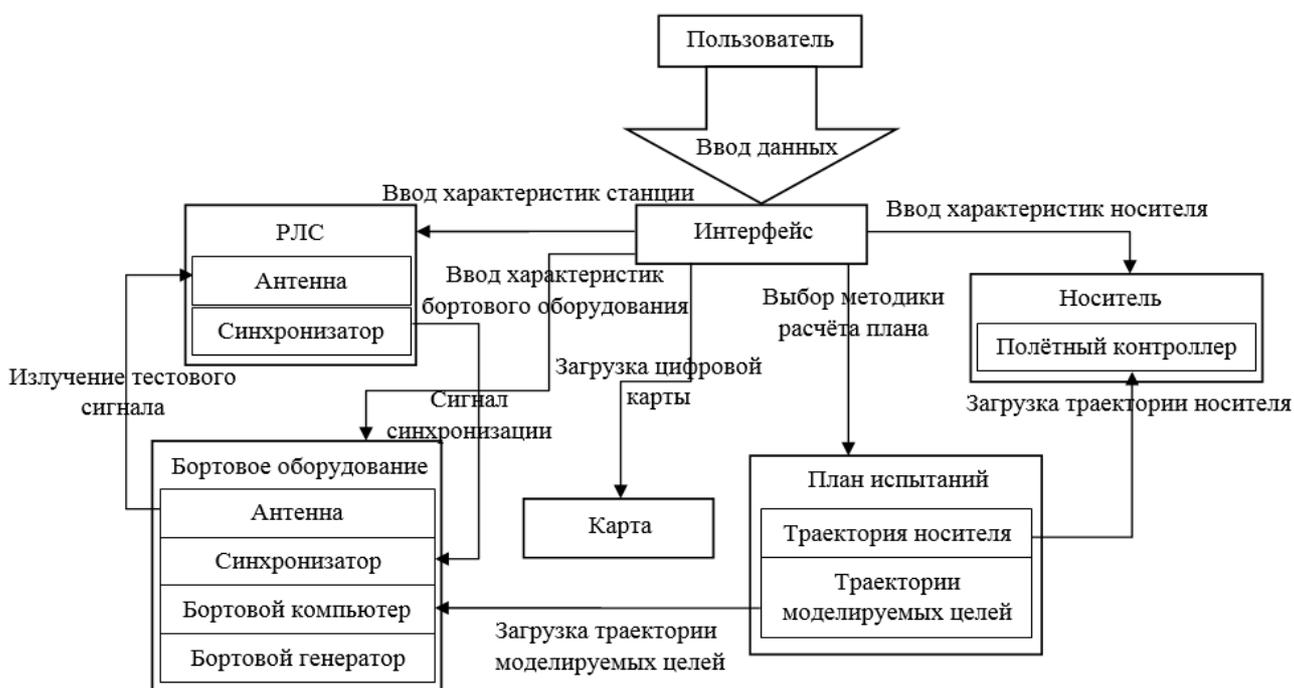


Рис. 6 – Схема взаимодействия компьютерных моделей внутри приложения для планирования и моделирования хода проведения испытаний

На рис. 6 приведены используемые упрощённые компьютерные модели и взаимосвязи между ними, реализованные в программной части разработанного макета. На рис. 7 представлена блок-схема, реализующая поиск решений для определения точек

траектории носителя и моделируемых целей в соответствии с (8, 8.1-8.8).

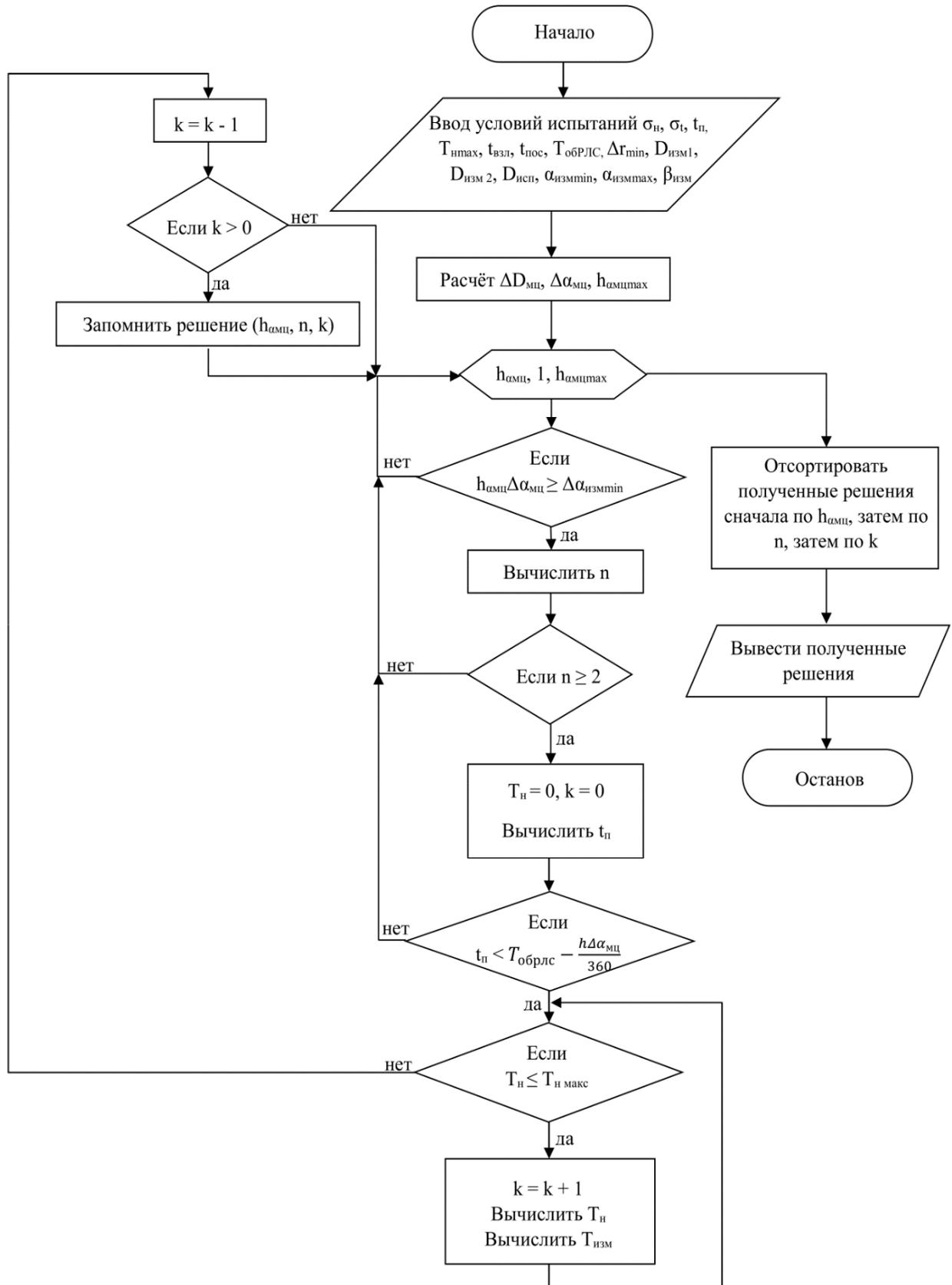


Рис. 7 – Блок-схема алгоритма поиска решения системы 7

Для апробации предлагаемого метода была поставлена и решена следующая задача: провести испытания для оценки минимальной и максимальной дальности

обнаружения на дальностях от $D_{изм1} = 40$ км до $D_{изм2} = 180$ км с шагом 2 км с азимута 0 до азимута 360 на угле места 5° , что соответствует высотам от $\sim 3,5$ км до 15,5 км.

Результаты выполненного моделирования в соответствии с полученным планом испытаний приведены в табл. 1.

Табл. 1. – Сравнение измеренных характеристик с заданными для компьютерной модели РЛС

Характеристика	Заданные	Измеренные	Отклонение, %
СКО координаты азимут	$0,25^\circ$	$0,25^\circ$	0,00
СКО координаты угол места	$0,25^\circ$	$0,24^\circ$	-4,00
СКО координаты дальность	100 м	101 м	1,00
Минимальная дальность	40000 м	39700 м	-0,75
Максимальная дальность	179300 м	179500 м	0,11

Сравнение ожидаемых результатов и полученных при моделировании (табл. 1) позволяют сделать вывод, что используемые упрощенные компьютерные модели адекватно моделируют работу РЛС и носителя, а используемый план испытаний обеспечивает получение необходимого массива координат целей для получения численной оценки исследуемого показателя. Также для оценки адекватности использовался χ^2 критерий Пирсона для проверки предположения о том, что ошибки координат программной модели носителя и координаты целей, обнаруживаемых программной моделью РЛС, распределены по нормальному закону. Для проверки предположения о том, что координаты обнаруживаемых целей, координаты носителя и моделируемых целей статистически не отличаются друг от друга, использовался t-критерий Стьюдента.

При проведении натурных испытаний с использованием самолёта необходимо было бы пролететь по винтовой спирали с 70 витками, заполняющей пространство от 40 км до 180 км на угле места 5 градусов. При полёте по такой траектории будет накоплена приблизительно та же статистика по координатам обнаруживаемых целей, что и при использовании малогабаритного БПЛА с бортовой тестовой системой.

В табл. 2 приведены приблизительные оценки затрат ресурсов, необходимые при использовании самолёта и малогабаритного БПЛА. При оценке допускалось, что суммарная оплата труда исполнителей в обоих случаях одинаковая.

Табл. 2 – Приблизительная оценка затрачиваемых ресурсов при использовании самолёта и БПЛА

Ресурс	Самолёт	БПЛА	Приблизительная оценка эффективности
время	83 часа	3 часа	80 часов
стоимость топлива	756 000 руб.	1000 руб.	755 000 руб.

Использование малогабаритного БПЛА в сравнении с самолётом требует значительно меньше ресурсов. Здесь имеет важность порядок величин: при использовании самолёта потребуются десятки часов и сотни тысяч рублей, а при использовании малогабаритного БПЛА единицы часов и единицы тысяч рублей. Также важно отметить, что при использовании разного оборудования достигаются те же условия испытаний: минимальная и максимальная дальность целей и шаг изменения дальности. Но ресурсов требуется меньше, что делает способ использования БПЛА более эффективным с точки зрения используемых ресурсов. Эффективность достигается за счёт того, что один БПЛА с бортовым оборудованием может моделировать одновременное наличие нескольких целей, а самолёт – только одной.

В заключении приводятся основные результаты диссертационного исследования.

В приложениях приведены акты о передаче и внедрении результатов исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1. Разработаны методики проведения испытаний предлагаемым методом с использованием тестовой системы на основе БПЛА для получения значений оценок характеристик наземных РЛС. В частности, разработаны методики для получения:

1.1. оценки дальности обнаружения с использованием: а) одной имитируемой цели с изменяющейся координатой дальности на фиксированных угловых координатах; б) с использованием нескольких имитируемых целей с фиксированными угловыми координатами, распределенных на заданных дальностях; в) нескольких имитируемых целей, распределенных на заданных дальностях, с изменяющимися угловыми координатами;

1.2. оценки разрешающей способности по дальности с использованием: а) одной пары имитируемых целей на фиксированных угловых координатах с изменяющимся расстоянием между целями; б) с использованием нескольких пар имитируемых целей, распределенных на заданных дальностях, с фиксированными угловыми координатами и заданным расстоянием между целями; в) нескольких пар имитируемых целей, распределенных на заданных дальностях, с изменяющимися угловыми координатами и с заданным расстоянием между целями.

2. Разработаны уравнения с ограничениями, учитывающими характеристики носителя, бортового тестового оборудования, известные характеристики станции. Решение уравнений с учётом ограничений определяет вид плана испытаний, содержащий координаты точек траектории носителя и имитируемых целей. Полученный план испытаний является решением задачи управления малогабаритным БПЛА при проведении испытаний предлагаемыми методиками для получения оценки дальности обнаружения или разрешающей способности по дальности.

3. Разработано программное обеспечение для обработки информации при проведении моделирования, в котором определены параметры предлагаемой системы «РЛС–БПЛА–Объективный контроль».

4. Собран и запрограммирован отладочный макет, на котором выполнено моделирование в реальном масштабе времени хода проведения испытаний предлагаемым методом в соответствии с заданным планом для получения оценки дальности обнаружения программной модели РЛС.

5. Показано повышение эффективности этапа приемно-сдаточных испытаний РЛС предлагаемым методом относительно облетного метода по используемым ресурсам: денежным, временным, трудовым. При использовании БПЛА требуется значительно меньше ресурсов, чем при использовании самолёта. Причём, условия испытаний, созданные с использованием БПЛА и бортового тестового оборудования, содержат цели с теми же координатами, которые имел бы самолёт во время проведения испытаний. Предлагаемый метод не подразумевает исключение метода натуральных испытаний, а рассматривается как дополнительный способ подготовки к ним. В первую очередь рассматривается вариант использования метода для подготовки к натурным испытаниям. За счёт того, что тестовый сигнал поступает в тракт РЛС со всеми искажениями, присущими точке развертывания РЛС. Также за счёт использования БПЛА есть возможность изменять положение источника излучения в пространстве и всесторонне исследовать РЛС, что позволит лучше подготовиться к натурным испытаниям.

В качестве дальнейшего направления исследований можно рассмотреть методики для оценки других функциональных характеристик наземных РЛС, например, ошибки определения координат целей. Также для имитирования более разнообразных условий можно рассмотреть вопрос совместного использования нескольких БПЛА для большего контроля создаваемых условий.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Морозов А.К. Синтез эхо-сигнала цели с требуемыми параметрами для получения отметки радиолокационной цели и оценки тактических характеристик радиолокационной станции // Автоматизация процессов управления. №3, 2020. С. 31-38.

2. Калабин А.Л., Морозов А.К. Компьютерное моделирование эксперимента по имитации наличия целей для радиолокационной станции // Программные продукты и системы. №2, 2021. С. 269-280.

Публикации в журналах, входящих в международную базу данных Scopus:

3. Kalabin A.L., Morozov A.K. Testing a Ground-Based Radar Station as a Cyber-Physical System Using a Carrier and On-Board Equipment. In: Kravets, A.G., Bolshakov, A.A., Shcherbakov, M. (eds) Cyber-Physical Systems: Modelling and Industrial Application. Studies in Systems, Decision and Control, vol 418. 2022. Springer, Cham.

Свидетельства о государственной регистрации программ:

4. Программа для планирования и моделирования движения по траектории имитируемой цели // Свидетельство № 2020665123 / Калабин А.Л., Морозов А.К.

5. Программа расчёта параметров и синтеза эхо-сигнала имитируемой цели для демонстрационного стенда // Свидетельство № 2021523415 / Калабин А.Л., Морозов А.К.

Патенты на изобретение:

6. Беспилотный летательный аппарат // Патент РФ № 2666493. 2018 / Агапов О.Ю., Беденко С.В., Буцев С.В., Зудин О.М., Морозов А.К., Руденок И.А.

7. Сигнально-помеховый комплекс // Патент РФ № 2703998. 2019 / Буцев С.В., Морозов А.К., Руденок А.Н., Руденок И.А.

8. Устройство измерения параметров диаграммы направленности антенн // Патент РФ № 2020119286. 2020 / Буцев С.В., Линкевичюс С.П., Морозов А.К., Руденок И.А.

Остальные статьи и материалы конференций:

9. Морозов А.К. Оценка параметров имитатора сигнально-помеховой обстановки для радиолокационных станций управления воздушным движением // Сборник трудов международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» Том 2. 2019. С. 43-46.

10. Морозов А.К. Метод построения зоны обнаружения для радиолокационных станций управления воздушным движением и создание комплекса, реализующего описываемый метод // Сборник научных статей по материалам I Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 94-98.

11. Морозов А.К. Моделирование отметок радиолокационных целей для оценки тактических характеристик РЛС // Сборник трудов международной научной конференции «Математические методы в технологиях и технике» Том 6. 2020. С. 120-123.

12. Калабин А.Л., Морозов А.К. Метод испытания наземных радиолокационных станций с использованием беспилотного летательного аппарата // Математические методы в технологиях и технике. №8, 2021. С. 7-10.