

УДК 004.942
DOI: 10.15827/0236-235X.134.269-280

Дата подачи статьи: 18.11.20
2021. Т. 34. № 2. С. 269–280

Компьютерное моделирование эксперимента по имитации наличия целей для радиолокационной станции

А.Л. Калабин¹, д.ф.-м.н., зав. кафедрой программного обеспечения,
akalabin@yandex.ru

А.К. Морозов¹, аспирант, yerdnavozorom@gmail.com

¹ Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия

В статье изучается вопрос измерения тактических характеристик радиолокационных станций, например, таких как дальность обнаружения, количество координат цели и точность их определения, разрешающая способность по каждой координате, зона видимости и другие. На данный момент тактические характеристики определяются на основе технических характеристик и с применением натурального эксперимента, с привлечением самолетов, самолетов-лабораторий и других объектов. Сложность натурального эксперимента в его организации и ограниченном количестве объектов-целей, к тому же он затратный по ресурсам (денежным, административным, трудовым, временным).

Предлагается для сбора исходных данных (координаты и количество обнаруженных целей средствами радиолокационной станции, координаты и количество имитируемых целей бортовым оборудованием носителя) и дальнейшего анализа (статистическая обработка данных от станции и бортового оборудования носителя) имитировать наличие цели для оборудования радиолокационной станции путем излучения эхо-сигнала цели на заданных координатах. Эхо-сигнал синтезируется оборудованием (генератором и бортовой ЭВМ), располагающимся на борту носителя (беспилотного летательного аппарата). Носитель позиционирует бортовое оборудование на угловых координатах (азимут и угол места), соответствующих угловым координатам имитируемой цели, но на значительно меньшем удалении. Дальность (расстояние между целью и радиолокационной станцией) имитируемой цели контролируется бортовым оборудованием путем изменения параметров генерируемого эхо-сигнала (время задержки излученных импульсов относительно излученных импульсов оборудованием радиолокационной станции), соответствующего имитируемой цели.

Преимуществами предлагаемого метода являются сокращение затрачиваемых ресурсов и возможность контроля количества имитируемых целей путем изменения структуры эхо-сигнала.

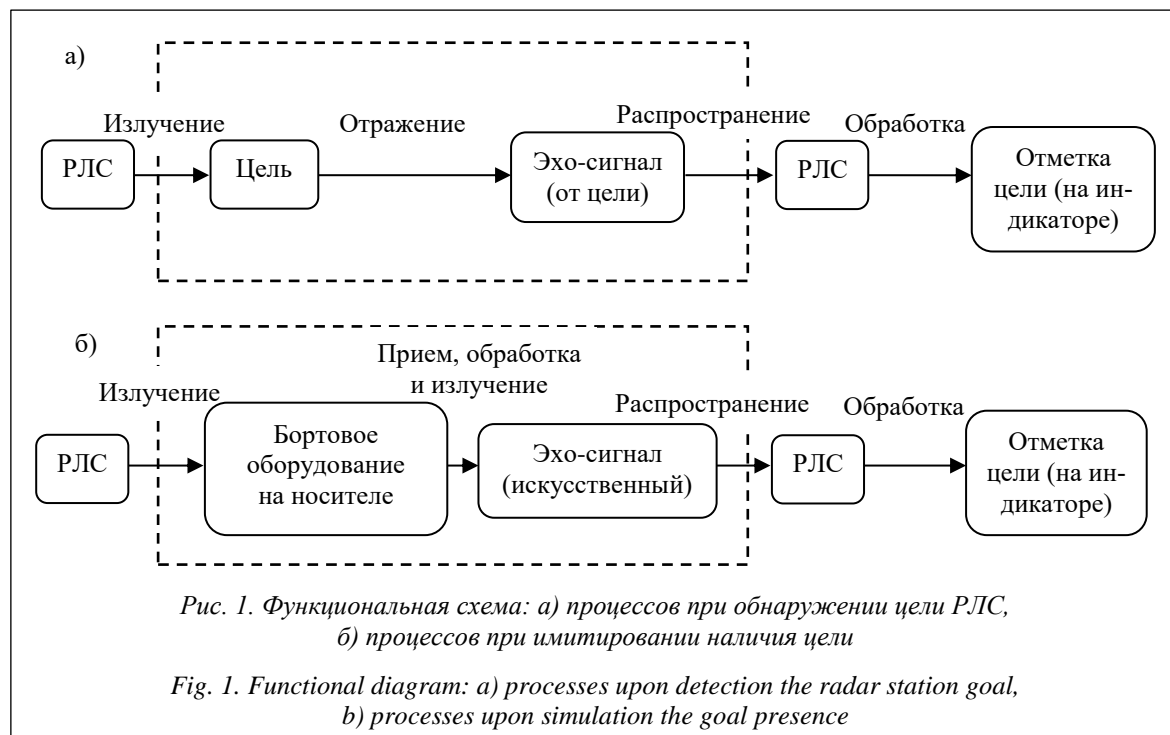
Ключевые слова: имитирование радиолокационной цели, компьютерное моделирование, беспилотный летательный аппарат, QtCreator, C++.

Оценка тактических характеристик радиолокационных станций (РЛС) на различных этапах их создания – сложная научно-техническая задача. Одним из основных методов, с помощью которых можно получить наиболее достоверную информацию о функционировании РЛС и ее характеристиках, является метод натуральных испытаний. Натурные испытания позволяют оценить характеристики станции в реальных условиях ее эксплуатации, причем все зависит лишь от того, насколько осуществимы такие условия и можно ли обеспечить необходимое число экспериментов. На практике возможности проведения натуральных экспериментов существенно ограничены, а в некоторых условиях вообще невозможны. Кроме того, их проведение требует больших затрат времени и средств. Поэтому при проектировании и испытаниях РЛС широко применяют опытно-теоретический метод, основанный на использовании ограниченных натуральных испы-

таний и математического моделирования [1, 2]. Для оценки характеристик РЛС предлагается имитировать наличие целей на заданных координатах путем синтеза эхо-сигнала с генератора (элемент бортового оборудования носителя), расположенного на борту беспилотного летательного аппарата (носителя). Схема предлагаемого эксперимента представлена на рисунке 1.

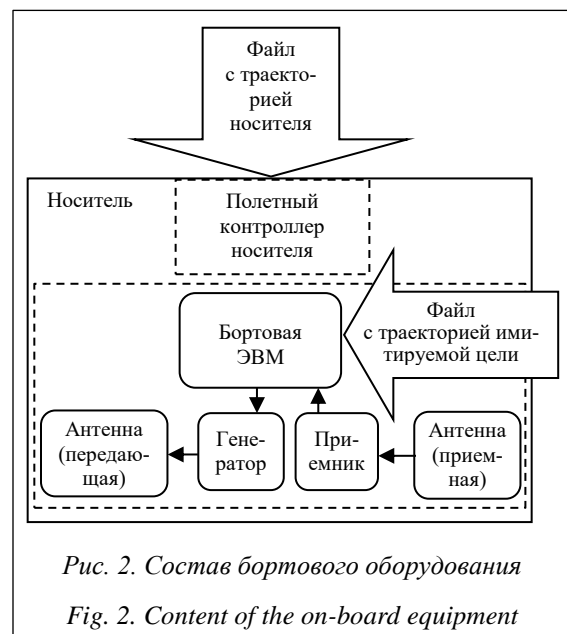
В состав бортового оборудования, представленного на рисунке 2, входят приемная и передающая антенны, приемник, генератор, бортовая ЭВМ для управления приемником и генератором. Задача бортовой ЭВМ – вычисление в процессе эксперимента требуемых характеристик эхо-сигнала имитируемой цели и изменение конфигурации генератора, чтобы сигнал соответствовал эхо-сигналу цели, находящейся на заданном удалении от РЛС.

Роль носителя заключается в перемещении бортового оборудования на заданные угловые



координаты, но на значительно меньшее удаление, чем имитируемой цели (~ 0,5–5 км). Таким образом, угловые координаты цели контролируются положением носителя, а дальность – параметрами эхо-сигнала, генерируемого бортовым оборудованием.

Требуемая траектория носителя загружается в его полетный контроллер (устройство автопилотирования, на рынке присутствуют полетные контроллеры различных производителей: DJI, ArduPilot и др.), который обеспечи-



вает движение по загруженной траектории без участия пилота. В данной работе предполагается, что для носителя используется полетный контроллер фирмы DJI (полетный контроллер определяет структуру и тип файла с информацией о траектории для носителя).

Траектория цели загружается в бортовую ЭВМ, которая в процессе полета, используя текущие координаты носителя и требуемые координаты цели, вычисляет параметры эхо-сигнала и переконфигурирует генератор. Роль бортовой ЭВМ может выполнять одноплатный компьютер либо микроконтроллер с необходимой периферией и прочим (под периферией понимаются grs-датчик, датчик высоты и другие необходимые датчики как источник информации о положении носителя). Для требуемого результата работы такого устройства необходимо написать программу (алгоритм), способную обеспечить траекторию цели, как описано выше. Алгоритм работы для конкретной реализации бортовой ЭВМ в данной работе не рассматривается, предполагается, что уже есть какая-то реализация, которую можно использовать.

Экспериментальные исследования широко применяются на всех стадиях разработки, производства и эксплуатации различных технических объектов, в частности, средств автоматизации и информационно-измерительной техники. При создании электронных и электро-

технических устройств основные затраты приходятся на их настройку и испытания.

Рабочие процессы устройств автоматики протекают в изменяющихся условиях, следовательно, зависят от большого числа переменных. Описание таких процессов аналитическими методами не всегда возможно, поэтому при их исследовании необходимо применять методы планирования эксперимента, которые позволяют одновременно варьировать все влияющие факторы. По экспериментальным данным формируется математическая модель исследуемого объекта. Математическое описание устройств и процессов позволяет исследовать и оптимизировать их параметры [3].

Программная реализация

В данной работе под планированием понимается уточнение условий проведения эксперимента (координаты расположения РЛС, ширина луча, направление по азимуту, углу места, пределы скоростей для носителя и пр.). Результатом планирования будут считаться сгенерированные файлы для полетного контроллера и бортовой ЭВМ, содержащие информацию о траектории носителя и целей. Поэтому для реализации эксперимента, представленного на

рисунке 1б, была написана программа планирования и компьютерного моделирования его основных составляющих.

Программа выполнена на языке C++, визуализация процесса компьютерного моделирования осуществлена с применением графической библиотеки OpenGL. Среда разработки – QtCreator. При проектировании приложения также использовалась архитектура MVC (модель–представление–контроллер). Это подразумевает, что вся логика вычислений содержится в группе классов блока «модель», элементы интерфейса – в блоке «представление», описание реакций на действия пользователя – в блоке «контроллер». Благодаря такому логическому разграничению классов программы существенно облегчается процесс отладки кода при разработке приложения.

На рисунке 3 представлен интерфейс программы и указаны основные элементы моделируемого процесса. Структурная схема объектов программы приведена на рисунке 4. Исходными данными для работы служат параметры носителя (максимальная вертикальная скорость, горизонтальная скорость), параметры имитируемой цели (дальность, эффективная площадь рассеяния), параметры РЛС (уровень чувствительности приемника, коэффициент

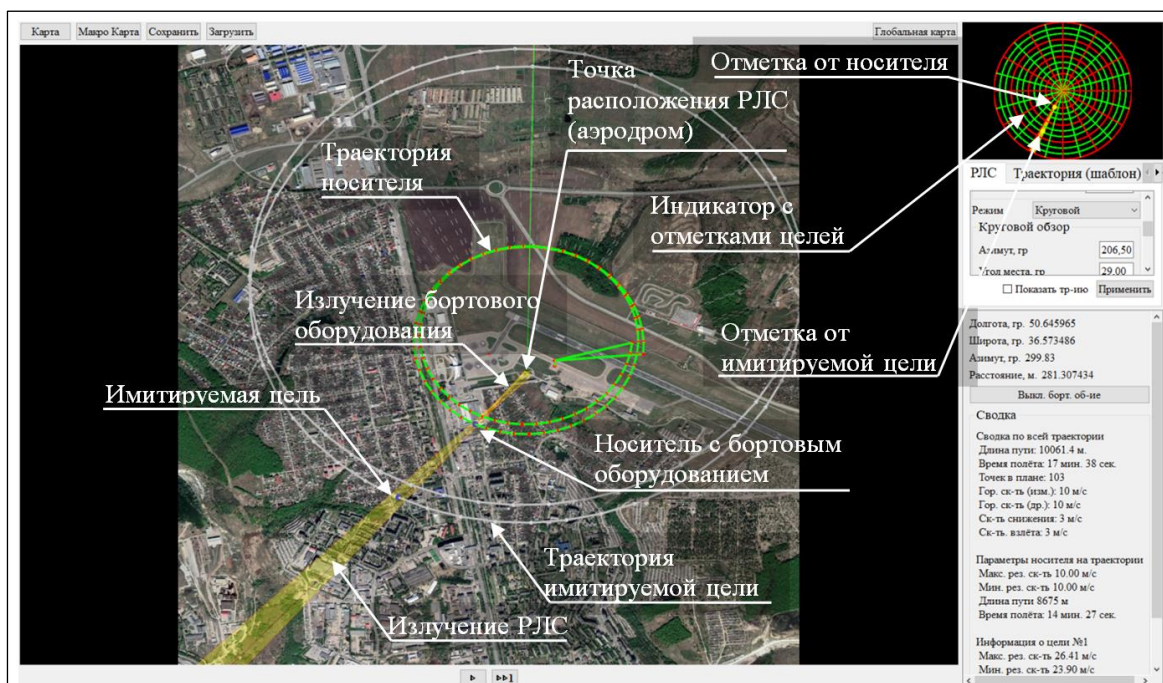
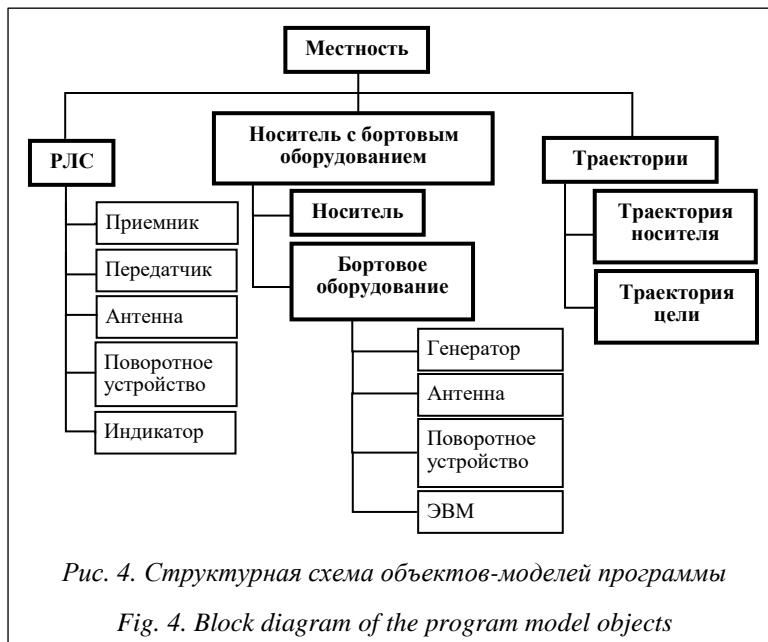


Рис. 3. Экран интерфейса программы с указанием элементов модели эксперимента и их графического представления

Fig. 3. The program interface screen showing the elements of the experiment model and their graphical representation



усиления антенны и пр.). По результатам компьютерного моделирования спланированного эксперимента уточняются выходные параметры имитируемых целей. Например, их количество, максимальная и минимальная скорости каждой цели, вид и длина траектории целей, время прохождения траектории, общая длительность проведения эксперимента, место проведения и т.д.

Основные задачи, решаемые программой: планирование эксперимента с целью уточнения плана его проведения, компьютерное моделирование эксперимента для качественного анализа хода его проведения, генерирование плана проведения эксперимента, включающего в себя полетное задание для беспилотного летательного аппарата, загружаемое в полетный контроллер, и сценарий для бортового оборудования, загружаемый в бортовую ЭВМ.

Рассмотрим подробнее структурную схему объектов-моделей программы, представленную на рисунке 4.

Модель РЛС включает поворотное устройство для ориентирования луча на требуемых угловых координатах, излучатель для моделирования уровня мощности сигнала станции, приемник для моделирования процесса приема сигнала через антенну, антенну для ограничения области пространства, в пределах которой ведутся прием и излучение сигнала, индикатор для отображения отметок целей. Под отметкой цели понимается результат обнаружения по информации, содержащейся в эхо-сигнале от носителя как реальной цели и от эхо-сигнала, синтезированного бортовым оборудованием.

Модель носителя включает в себя основные параметры носителя и алгоритм движения носителя по траектории. **Модель траектории носителя** – алгоритм генерирования траектории носителя по требуемой траектории цели. **Модель траектории цели** – алгоритм генерирования различных типов траектории (вертикальная, горизонтальная, спиральная и т.д.). **Модель бортовой ЭВМ** – алгоритм генерирования дальности цели по заданной траектории носителя и требуемой траектории имитируемой цели. **Модель земной поверхности** служит для отображения карты и привязки планируемого эксперимента к конкретной местности.

Результатом работы программы является отчет (сводка), включающий суммарное время проведения работ, требуемые параметры носителя и генератора для проведения планируемых работ, длину траектории носителя, время имитирования наличия целей, длину траектории целей, скоростные характеристики целей на траектории (рис. 5).

Для воспроизведения спланированного эксперимента в реальных условиях с применением подходящего оборудования программа также генерирует файл с полетным заданием (для носителя) с указанием требуемых скоростей координат точек траектории носителя и конфигурационный файл для бортового оборудования с указанием информации о траектории носителя и целей (рис. 5).

Модели всех объектов составляют модель, соответствующую планируемому эксперименту. Каждая из моделей воспроизводит не точное поведение моделируемого объекта, а лишь его основные черты (с точки зрения программной реализации), поэтому их программное представление упрощено по сравнению с реальным поведением. Разберем подробнее каждый из элементов модели.

Модель поворотного устройства. Под поворотным устройством в программе понимается алгоритм позиционирования луча. В программе реализованы следующие типы:

– круговой обзор [4]

$$\alpha_0 = \alpha_n; \varphi_0 = \varphi_n; \alpha_{k+1}(dt) = \alpha_k + 2\pi/Tdt;$$

$$\varphi_{k+1}(dt) = \text{const} = \varphi_n,$$

где $\alpha_0, \alpha_k, \alpha_{k+1}$ – азимут на 0-м, k -м, $k+1$ -м шагах моделирования; $\varphi_0, \varphi_k, \varphi_{k+1}$ – угол места на



0-м, k-м, k+1-м шагах моделирования; dt – сдвиг модельного времени; T – период оборота станции по азимуту; α_n – начальный азимут; φ_n – начальный угол места;

– фиксированное положение: $\alpha_{k+1}(dt) = \alpha_0 = \alpha_n = \text{const}$; $\varphi_{k+1}(dt) = \varphi_0 = \varphi_n = \text{const}$.

Модель траектории цели. В программе реализованы следующие варианты [5]: полет по кругу (под кругом (рис. 6а) понимается окружность сечения сферы заданного радиуса на заданном угле места); полет по вертикальной траектории (рис. 6б); полет по угловой сетке (по азимуту) (под полетом в угловой сетке понимается часть поверхности сферы заданного радиуса в пределах области с центром в заданном азимуте и угле места (рис. 6в), размер области определяется шириной по азимуту и углу места); полет по угловой сетке (по углу места) (под полетом в угловой сетке понимается часть поверхности сферы заданного радиуса вокруг области с центром в заданном азимуте и угле места (рис. 6г), размер области определяется шириной по азимуту и углу места); по цилиндрической спирали (траектория строится по формуле спирали Архимеда (рис. 6д), фигура задается количеством витков, общей высотой фигуры и радиусом витка); по конической спирали (траектория строится по формуле кониче-

ской спирали Архимеда (рис. 6е), фигура задается количеством витков, общей высотой фигуры, начальным и конечным радиусами витков).

Каждая из траекторий также дискретизируется указанным количеством точек, так как для устройства автопилотирования задаются не тип и конфигурация траектории, а точки, из которых она состоит. Для каждого полетного контроллера есть свои ограничения по количеству точек. Например, для полетного контроллера компании DJI от 16 до 300 в зависимости от марки, для ArduPilot – до 30 000.

Модель траектории носителя. Точки траектории носителя генерируются на основе требуемой траектории цели следующим образом:

$$p_{ni} = \frac{(p_{ci} - p_{plc})}{|p_{ci} - p_{plc}|} r_{n \min} + p_{plc},$$

где p_{ci} – i -я точка траектории с требуемыми координатами цели; p_{plc} – точка с координатами РЛС; p_{ni} – i -я точка траектории с требуемыми координатами носителя; $r_{n \min}$ – минимальное расстояние между носителем и точкой стояния РЛС.

Представленная формула позволяет вычислить координаты точек траектории носителя, находящихся на том же радиус-векторе, что и

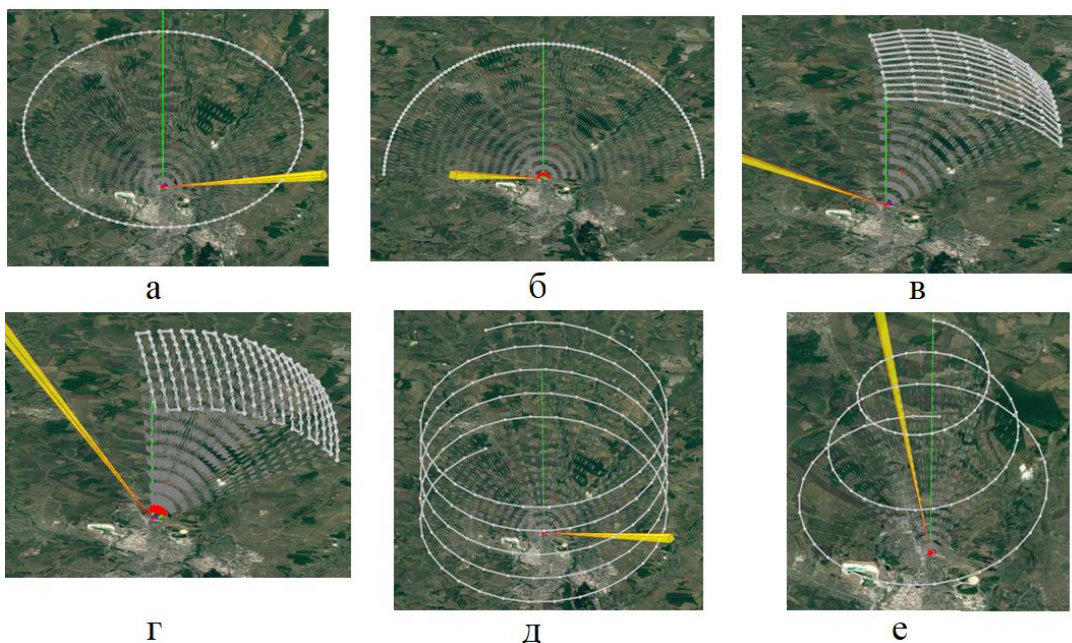


Рис. 6. Траектории цели: а – горизонтальная, б – вертикальная, в – угловая (по азимуту), г – угловая (по углу места), д – спиральная, е – коническая

Fig. 6. Target trajectories: a – horizontal, б – vertical, в – angular (in azimuth), г – angular (in elevation), д – spiral, e – conical

точки траектории цели, но на меньшем удалении от РЛС [5]. Таким образом, цель и носитель имеют одни и те же угловые координаты по отношению к РЛС, но разную дальность, которая зависит от параметров эхо-сигнала, генерируемого бортовым оборудованием носителя.

На основе траектории цели (спираль) генерируется траектория носителя (полусфера) (см. пример <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2021-2/2021-2-dop/14.jpg>). Величина $r_{n \min}$ выбирается исходя из параметров РЛС, носителя и бортового оборудования [6].

Модель сценария работы бортовой ЭВМ.

Задача бортового оборудования (генератора + ЭВМ) – вычисление параметров эхо-сигнала для имитируемой цели, зависящих от положения носителя и требуемого положения цели [7]. Основным параметром является время задержки импульса, сгенерированного бортовым оборудованием, относительно излученного оборудованием РЛС:

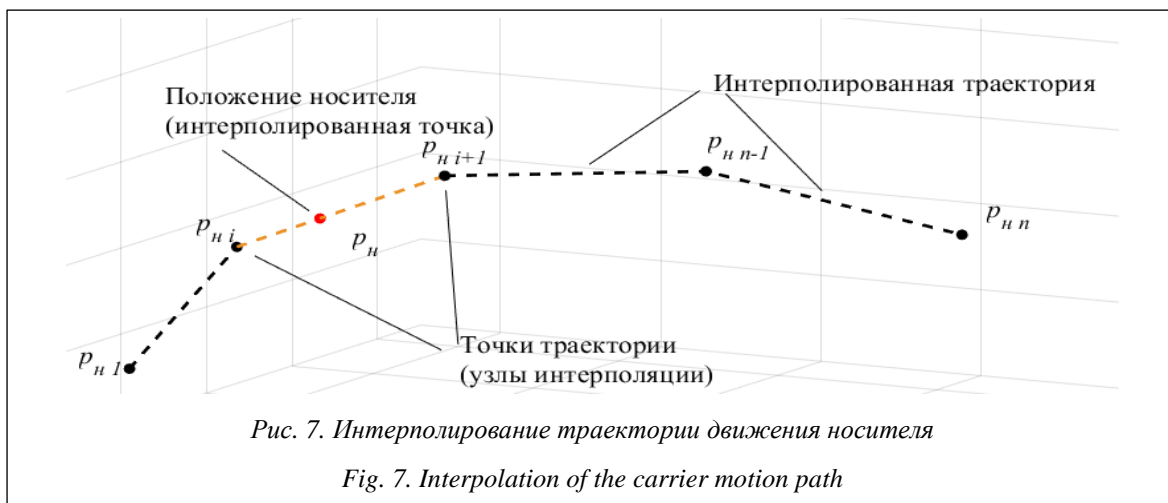
$$t_{зг} = \frac{2|p_{ц} - p_{рлс}| - |p_{н} - p_{рлс}|}{c},$$

где $t_{зг}$ – время задержки сигнала с генератора; c – скорость света; $p_{ц}$ – точка с координатами цели (вычисляется по алгоритму перемещения цели по траектории); $p_{н}$ – точка с координатами

носителя (вычисляется по алгоритму перемещения носителя по траектории).

Алгоритм перемещения носителя по траектории. Для моделирования перемещения носителя по траектории в качестве исходных данных используются траектория полета цели и максимальная горизонтальная и вертикальная скорости носителя. Под траекторией носителя (и цели) понимается множество точек, соответствующих требуемым координатам носителя: $Tr_n = \{p_{n0}, p_{n1}, \dots, p_{ni}, p_{ni+1}, \dots, p_{nll}\}$, $p_{ni} = \{p_{xnk}, p_{yнк}, p_{zнк}\}$, где Tr_n – траектория носителя; $p_{n0}, p_{ni}, p_{nll}, p_{нк}$ – точки траектории носителя; $p_{xнк}, p_{yнк}, p_{zнк}$ – координаты точек траектории носителя по осям OX, OY, OZ в декартовой системе координат.

Для моделирования движения носителя по траектории необходимо через моменты времени dt менять положение носителя в соответствии с его траекторией и ограничениями скорости движения [8]. Траектория носителя имеет дискретный вид и определена только в некоторых точках (задана таблично), поэтому для позиционирования носителя в любые моменты времени его положение между точками траектории линейно интерполируется [9, 10], что соответствует равномерному прямолинейному движению (рис. 7).



Положение носителя на траектории через интервалы модельного времени dt определяется в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 8.

Приведем формулы, необходимые на каждом из этапов выполнения блок-схемы алгоритма.

Результирующая скорость носителя определяется следующим образом [4]:

$$\vec{d} = p_{ni+1} - p_i = [p_{xn\ i+1} - p_{xn\ i}, p_{yn\ i+1} - p_{yn\ i}, p_{zn\ i+1} - p_{zn\ i}];$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{d_z}{|d|}\right) = \arccos\left(\frac{d_z}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}}\right);$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{d_y}{d_x}\right);$$

$$\vec{v} = [v_{гор.} \sin(\theta) \cos(\varphi), v_{гор.} \sin(\theta) \sin(\varphi), v_{верт.} \cos(\theta)];$$

$$v_{рез.} = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2},$$

где $v_{рез.}$ – результирующая скорость; \vec{d} – вектор направления движения; d_x, d_y, d_z – составляющие вектора \vec{d} по осям X, Y, Z; \vec{v} – вектор скорости; v_x, v_y, v_z – составляющие вектора \vec{v} по осям X, Y, Z; p_{ni} – текущая точка плана; p_{ni+1} – следующая точка плана; $v_{гор.}$ – максимальная горизонтальная скорость носителя (в плоскости XOY); $v_{верт.}$ – максимальная вертикальная скорость носителя (по оси Z).

Расстояние между точкой положения носителя и следующей точкой траектории определяется следующим образом:

$$r = |p_n - p_{ni+1}| = \sqrt{(p_{xn} - p_{x\ ni+1})^2 + (p_{yn} - p_{y\ ni+1})^2 + (p_{zn} - p_{z\ ni+1})^2}.$$

Положение носителя между точками траектории (текущим положением и следующим) линейно интерполируется в предположении, что носитель между точками плана движется равномерно и прямолинейно:

$$p_{n\ след.} = p_{n\ тек.} + d \frac{v_{рез.} dt}{|d|} = \left[p_{xn\ тек.} + d_x \frac{v_{рез.} dt}{|d|}, p_{yn\ тек.} + d_y \frac{v_{рез.} dt}{|d|}, p_{zn\ тек.} + d_z \frac{v_{рез.} dt}{|d|} \right],$$

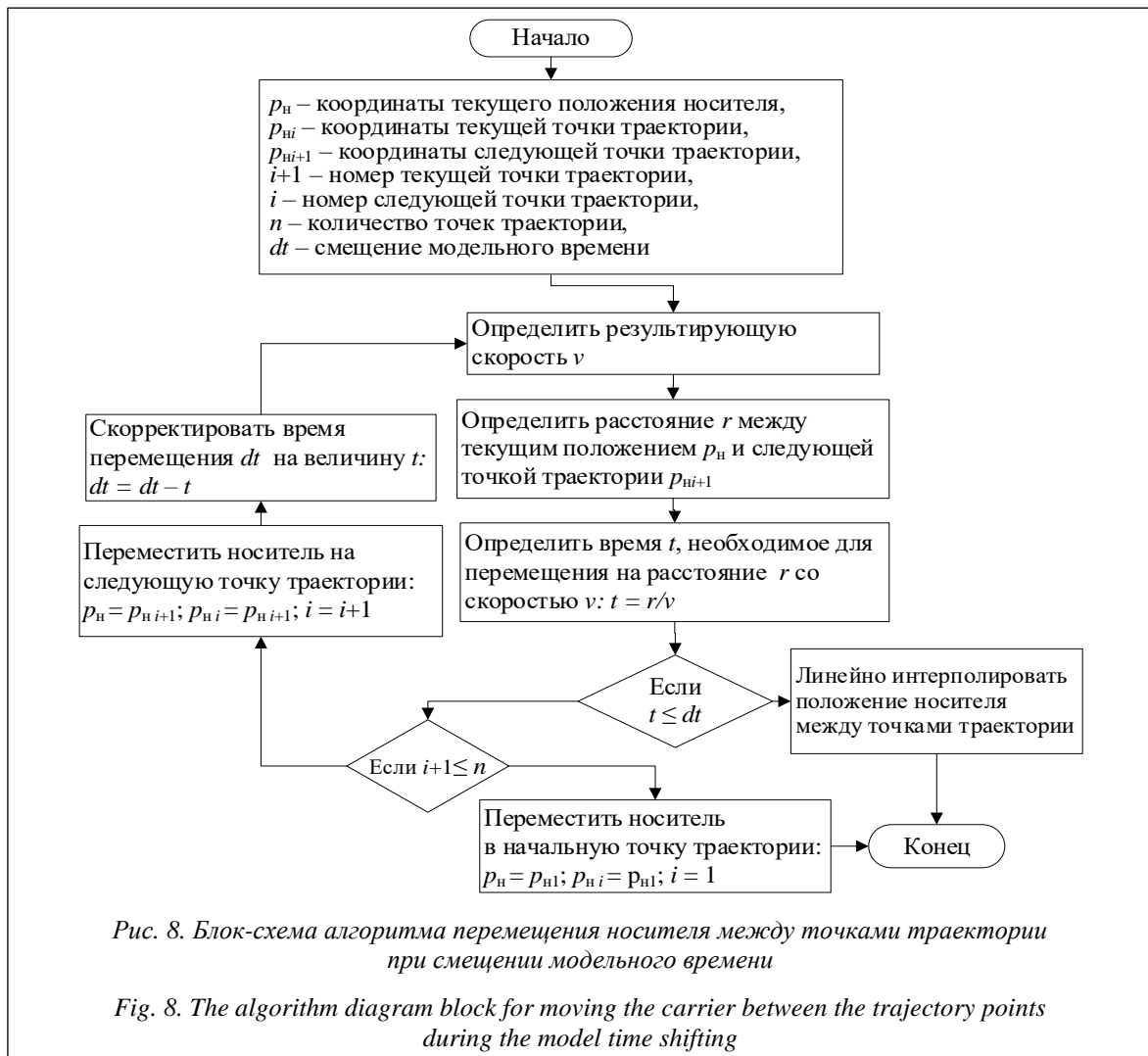
где $p_{n\ след.}$ – новое положение носителя на траектории; $p_{n\ тек.}$ – текущее положение носителя на траектории.

Алгоритм перемещения цели по траектории. Блок-схема алгоритма изображена на рисунке 9. Траектория цели, как и для носителя, задается множеством точек с координатами, соответствующими требуемым координатам цели: $Tr_{ц} = \{p_{ц0}, p_{ц1}, \dots, p_{ци}, p_{ци+1}, \dots, p_{цn}\}$, $p_{ци} = \{p_{цик}, p_{цук}, p_{цук}\}$, где $Tr_{ц}$ – траектория носителя; $p_{ц0}, p_{ци}, p_{цn}, p_{цк}$ – точки траектории цели; $p_{цик}, p_{цук}, p_{цук}$ – координаты точек траектории цели по осям OX, OY, OZ в декартовых координатах.

Предполагается, что угловые координаты цели зависят от угловых координат носителя, то есть цель и носитель расположены на одном и том же радиус-векторе, но на разных удалениях (удаление зависит от параметров сигнала, излучаемого бортовым оборудованием).

Приведем формулы для вычисления положения цели на траектории [5]. Расчет положения цели графически представлен на рисунке 10. Угол $a_{ин}$ можно вычислить по следующей

формуле: $a_{ин} = \arccos \frac{(p_{ци} - p_{рлс}, p_n - p_{рлс})}{|p_{ци} - p_{рлс}| |p_n - p_{рлс}|}$.



Угол $b_{иц}$ вычисляется аналогично $a_{иц}$, но необходимо сместить векторы в начало координат:

$$b_{иц} = \arccos \left[\frac{(p_{рлс} - p_{ш}, p_{иц} - p_{ш})}{|p_{рлс} - p_{ш}| |p_{иц} - p_{ш}|} \right].$$

Угол $c_{иц}$ – третий угол треугольника $p_{рлс}p_{ш}p_{иц}$, поэтому угол $c_{иц}$ можно вычислить так: $c_{иц} = 180 - b_{иц} - a_{иц}$.

Смещение $dp_{иц}$ в направлении $p_{иц}p_{иц+1}$ от точки $p_{иц}$:

$$dp_{иц} = \frac{\sin(a_{иц})}{\sin(c_{иц})} |p_{иц}| = \frac{\sin(a_{иц})}{\sin(c_{иц})} \sqrt{(p_{xиц}^2 + p_{yиц}^2 + p_{zиц}^2)}.$$

Тогда координаты носителя на участке прямой $p_{иц}p_{иц+1}$ можно рассчитать следующим образом:

$$p_{иц} = p_{иц} + \frac{(p_{иц+1} - p_{иц})}{|p_{иц+1} - p_{иц}|} dp_{иц}.$$

Модель земной поверхности. Отображение заданного участка карты и привязка коор-

динат моделей объектов в программе к положению на карте выполнены следующим образом: сначала номера пикселей растрового изображения карты привязываются к географической системе координат в соответствии со стандартом world-файлов [5, 11]. Привязка выполняется следующим образом:

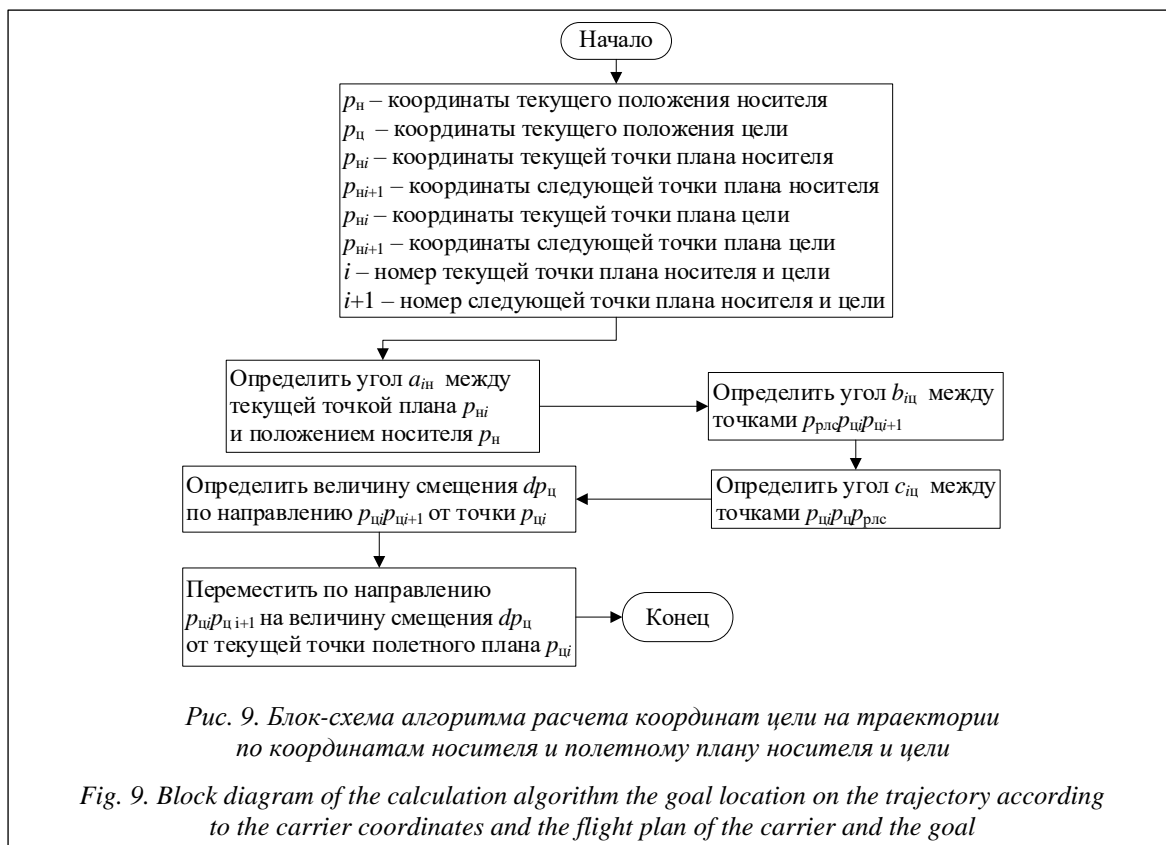
$$x' = Ax_n + By_n + C; y' = Dx_n + Ey_n + F.$$

Тогда координатами пикселя для соответствующих широты и долготы на изображении карты будут:

$$x_n = \frac{B(y' - F) + E(C - x')}{DB - AE},$$

$$y_n = \frac{D(x' - C) + A(F - y')}{DB - AE},$$

где x_n – номер пикселя в изображении карты по горизонтали; y_n – номер пикселя в изображении карты по вертикали; x' – широта в градусах; y' – долгота в градусах; A, B, D, E – коэффициенты аффинного преобразования (из world-



файла); C – смещение по широте; F – смещение по долготе.

Если карта не имеет поворота, коэффициенты B и D равны 0 и $x' = Ax_n + C$, $y' = Ey_n + F$.

По декартовым координатам точки можно получить координаты пикселя на изображении:

$$x_n = \left(\frac{x_d}{R_x} + 1 \right) \frac{W}{2}, \quad y_n = \left(\frac{y_d}{R_y} + 1 \right) \frac{H}{2},$$

где x_d –

координаты точки по оси OX ; y_d – координаты точки по оси OY ; R_x – длина оси OX ; R_y – длина оси OY ; W – ширина в пикселях изображения с картой; H – высота в пикселях изображения с картой.

Тогда широта и долгота по декартовым координатам для траектории носителя и цели будут

$$x' = A \left(\frac{x_d}{R_x} + 1 \right) \frac{W}{2} + C,$$

$$y' = E \left(\frac{y_d}{R_y} + 1 \right) \frac{H}{2} + F.$$

Примеры привязки координат моделей в программе к изображению спутниковой карты, выполненным описанным образом, приве-

дены на рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2021-2/2021-2-dop/15.jpg>).

Практическое использование

Для примера спланируем эксперимент с учетом, что РЛС позиционируется на следующих координатах: широта $50,644707^\circ$, долгота $36,576946^\circ$ (аэропорт Белгорода). Способ об-

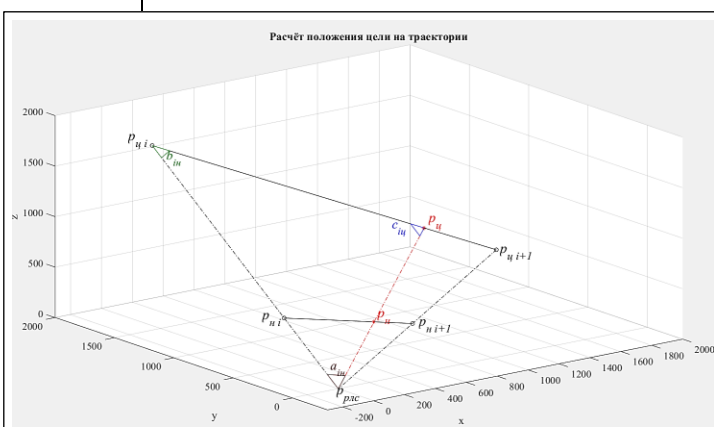


Рис. 10. Расчет положения цели при моделировании движения по траектории

Fig. 10. Calculation of the goal position when modeling the movement along the path

Краткая сводка о параметрах цели по результатам моделирования**A brief summary of the goal parameters based on the simulation results**

Сводка по всей траектории		Параметры носителя на траектории		Информация о цели № 1	
Длина пути	18 949,4 м	Максимальная результирующая скорость	10 м/с	Максимальная результирующая скорость	256,67 м/с
Время полета	32 мин. 22 сек.	Минимальная результирующая скорость	10 м/с	Минимальная результирующая скорость	244,11 м/с
Горизонтальная скорость	10 м/с	Длина пути	17 388 м	Длина пути	435 026 м
Вертикальная скорость	3 м/с	Время полета	28 мин. 58 сек.	Время полета	28 мин. 58 сек.

зора пространства круговой, период обзора 12 секунд. Антенна ориентирована по углу места 30 градусов. В распоряжении имеется носитель, способный развить максимальную горизонтальную скорость 10 м/с, вертикальную 3 м/с. Определено минимальное расстояние проведения эксперимента 800 метров (алгоритм определения минимального расстояния в данной работе не рассматривается). Требуемая траектория цели имеет вид цилиндрической спирали с количеством витков 4, распределенных на углах места с 28° по 32°, удаление цели от РЛС должно быть 20 000 м. Результаты планирования приведены на рисунках (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2021-2/2021-2-dop/16.jpg>, <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2021-2/2021-2-dop/17.jpg>, <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2021-2/2021-2-dop/18.jpg>).

По результатам планирования и моделирования получена краткая сводка с информацией об эксперименте, представленная в таблице.

Дополнительно сгенерирован файл .xml, содержащий информацию о траектории носителя, который можно загрузить в полетный контроллер DJI A2 с использованием ПО, реализующего лицензионное использование программного интерфейса для этого полетного контроллера. Также сгенерирован файл .txt, содержащий информацию о траектории, который можно загрузить в бортовую ЭВМ (схема бортового оборудования и порядок использования

результатов планирования указаны на рисунках 2 и 5).

Заключение

Таким образом, с помощью программы планирования и моделирования эксперимента, представленного на рисунке 1б, решены следующие задачи: планирование эксперимента с учетом привязки к местности, режима работы станции, возможностей используемого носителя, бортового оборудования, траектории полета носителя и имитируемых целей; моделирование хода проведения эксперимента, что позволяет сделать выводы о затраченном времени, длине пути траектории носителя и целей, ожидаемых пределах скоростей носителя и целей на траектории; формирование плана проведения эксперимента в виде конфигурационной информации для носителя и бортового оборудования, содержащей данные о траектории носителя, траектории имитируемых целей. Полученные результаты позволяют при наличии требуемого оборудования и обеспечении условий проведения эксперимента (выезд на нужную местность, расположение станции на планируемых координатах, режим работы станции, согласованных административных вопросов) провести планируемый эксперимент в реальных условиях по заранее спланированному сценарию, повысив его эффективность.

Литература

1. Леонов А.И., Леонов С.А., Нагулинко Ф.В., Омельчук В.П., Степанов С.П. Испытания РЛС (оценка характеристик). М.: Радио и связь, 1990. 208 с.
2. Agilent. Измерения параметров радиолокационных станций. Заметки по применению. URL: https://www.astena.ru/radar_0.html (дата обращения: 15.11.2020).
3. Реброва И.А. Планирование эксперимента. Омск: СибАДИ, 2010. 105 с.

4. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н., Гарин Е.Н., Фатеев Ю.Л., Бердышев В.П., Ноговицын А.А., Темеров А.В. и др. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Красноярск: Изд-во СФУ, 2016. 535 с.
5. Задорожный А.Г., Персова М.Г., Кошкина Ю.И. Введение в трехмерную компьютерную графику с использованием библиотеки OpenGL. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 100 с.
6. Зюкин В.Ф., Свистунов Д.Ю., Белавин А.В. Требования к удалению имитаторов активных помех при полигонных испытаниях РЛС // Системы обработки информации. 2013. Т. 1. № 108. С. 56–60.
7. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.
8. Семушкин И.В., Цыганов А.В., Цыганова Ю.В., Голубков А.В., Винокуров С.Д. Моделирование и оценивание траектории движущегося объекта // Вестн. ЮУрГУ ММП. 2017. Т. 10. № 3. С. 108–119. DOI: 10.14529/mmp170309.
9. Фаддеев М.А., Марков К.А. Численные методы. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2010. 158 с.
10. Огородникова О.М. Вычислительные методы в компьютерном инжиниринге. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. 130 с.
11. Формат файла географической регистрации (world-файл). URL: <https://gis-lab.info/qa/tfw.html> (дата обращения: 15.11.2020).

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.134.269-280

Received 18.11.20
2021, vol. 34, no. 2, pp. 269–280

Planning and computer simulation of an experiment to simulate the goal presence for a radar station

*A.L. Kalabin*¹, *Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department Software, akalabin@yandex.ru*
*A.K. Morozov*¹, *Postgraduate Student, yerdnavozorom@gmail.com*

¹ *Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation*

Abstract. The paper examines the issue of measuring the tactical characteristics of radar stations (radar), such as, for example: detection range, the number of goal coordinates and the accuracy of their determination, resolution for each coordinate, visibility zone, and others. At the moment, the tactical characteristics are determined based on technical characteristics and using a full-scale experiment, involving aircraft, laboratory aircraft, and other objects. The complexity of a natural experiment in its organization and a few goal objects, it is also costly in terms of resources (monetary, administrative, labor, time).

It is proposed to collect initial data (coordinates and the number of localized targets by the radar station, coordinates and the number of simulated targets by the onboard equipment of the carrier) and further analysis (statistical processing of data from the station and onboard equipment of the carrier) to simulate the goal presence for the radar station equipment by emitting an echo signal targets at the given coordinates. The echo signal is synthesized by the equipment (generator and onboard computer) located onboard the carrier (unmanned aerial vehicle). The carrier positions the onboard equipment in angular coordinates (azimuth and elevation) corresponding to the angular coordinates of the simulated target, but at a much smaller distance. The range (distance between the goal and the radar) of the simulated target is controlled by the onboard equipment by changing the parameters of the generated echo signal (the delay time of the emitted pulses relative to the emitted pulses by the radar equipment) corresponding to the simulated target.

The advantage of the proposed method is the expended net resource (time, labor, money) and the ability to control the number of simulated targets by changing the structure of the echo signal.

Keywords: imitation of a radar target, computer simulation, unmanned aerial vehicle, QtCreator, C++.

References

1. Leonov A.I., Leonov S.A., Nagulinko F.V., Omelchuk V.P., Stepanov S.P. *Radar Tests (Performance Evaluation)*. Moscow, 1990, 208 p. (in Russ.).

2. Agilent. *Measuring the Radar Unit Parameters. Application Notes*. Available at: https://www.astena.ru/radar_0.html (accessed November 15, 2020) (in Russ.).
3. Rebrova I.A. *Experiment's Planning*. Omsk, 2010, 105 p. (in Russ.).
4. Tyapkin V.N., Fomin A.N., Garin E.N., Fateev Ju.L., Berdyshev V.P., Nogovitsyn A.A., Temerov A.V. et al. *Fundamentals of Building Radar Stations for Radar Troops*. Krasnoyarsk, 2016, 536 p. (in Russ.).
5. Zadorozhny A.G., Persova M.G., Koshkina Yu.I. *Introduction to Three-Dimensional Computer Graphics Using the OpenGL Library*. Novosibirsk, 2018, 100 p. (in Russ.).
6. Zyukin V.F., Svistunov D.Yu., Belavin A.V. Requirement to delete of active noise simulators at ground tests radar. *Information Processing Systems*, 2013, vol. 1, no. 108, pp. 56–60 (in Russ.).
7. Bakulev P.A. *Radar Systems*. Moscow, 2015, 440 p. (in Russ.).
8. Semushkin I.V., Tsyganov A.V., Tsyganova Yu.V., Golubkov A.V., Vinokurov S.D. Modelling and estimation of a moving object trajectory. *Bulletin SUSU MMC*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 108–119 (in Russ.). DOI: 10.14529/mmp170309.
9. Faddeev M.A., Markov K.A. *Computational Method*. Nizhny Novgorod, 2010, 158 p. (in Russ.).
10. Ogorodnikova O.M. *Computational Methods in Computer Engineering*. Ekaterinburg, 2013, 130 p. (in Russ.).
11. *Geographic Registration File Format (World File)*. Available at: <https://gis-lab.info/qa/tfw.html> (accessed November 15, 2020) (in Russ.).

Для цитирования

Калабин А.Л., Морозов А.К. Компьютерное моделирование эксперимента по имитации наличия целей для радиолокационной станции // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 2. С. 269–280. DOI: 10.15827/0236-235X.134.269-280.

For citation

Kalabin A.L., Morozov A.K. Planning and computer simulation of an experiment to simulate the goal presence for a radar station. *Software & Systems*, 2021, vol. 34, no. 2, pp. 269–280 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.134.269-280.