

УДК 621.396
DOI: 10.15827/0236-235X.127.452-461

Дата подачи статьи: 29.01.19
2019. Т. 32. № 3. С. 452–461

Разработка алгоритмов функционирования математической модели дирижабельного радиолокационного комплекса обнаружения малозаметных воздушных целей

С.В. Суша¹, начальник отдела, sushasv2008@yandex.ru

¹ Управление Минобороны России, г. Тверь, 170100, Россия

В статье дано описание комплексной математической модели дирижабельного радиолокационного комплекса для обнаружения малозаметных воздушных целей. Исследование проводилось с целью обоснования технического облика, особенностей применения, оценки эффективности функционирования и боевых (информационных) возможностей данного комплекса. Разработка включает в себя ряд имитационных моделей (модель фоноцелевой обстановки, модель Земли, модель бортовых систем, включающая модель радиолокационной станции, модель бортовой системы управления и модель функционирования навигационной системы, модель наземного пункта управления, включающая модель отображения информации об обнаруженных и сопровождаемых целях, модель управления бортом), а также функционально законченные блоки (системы обработки и анализа результатов).

При моделировании все входящие в комплексную математическую модель имитационные модели строятся по единому принципу, динамика функционирования моделируемого комплекса имитируется путем последовательного изменения их состояний через некоторые интервалы времени.

В работе приведена блок-схема общего алгоритма функционирования комплексной математической модели в режиме имитационного моделирования. Процесс моделирования осуществляется путем пошагового изменения модельного времени на величину шага. Представлены алгоритмы функционирования основных блоков и их взаимосвязь в составе общего алгоритма функционирования комплексной математической модели дирижабельного радиолокационного комплекса в режиме имитационного моделирования.

Алгоритмы функционирования модели фоноцелевой обстановки включают в себя и воздушно-космическую целевую, и радиоэлектронную обстановку. Пространственное положение и ориентация целей относительно точки стояния дирижабельного радиолокационного комплекса и излучения всех бортовых радиоэлектронных средств цели определяются параметрами целей, а также направлением их прихода и интенсивностью излучения.

Алгоритмы функционирования модели навигационной системы содержат исходные данные положения носителя – векторы ошибок определения его местоположения. Значения данных этих векторов определяются характеристиками навигационной системы.

Модель радиолокационной станции строится на основе вычисления параметра обнаружения по уравнению радиолокации и расчета процесса распространения сигналов. Данная модель включает алгоритмы первичной и вторичной обработки радиолокационной информации.

Реализация представленных алгоритмов в комплексной математической модели позволяет с достаточной степенью достоверности описать процессы функционирования дирижабельного радиолокационного комплекса при обнаружении, сопровождении, распознавании малозаметных воздушных целей, что обеспечит проведение оценки эффективности вариантов построения комплекса и его информационных возможностей.

Ключевые слова: комплексная математическая модель, радиолокационная станция, дирижабельный радиолокационный комплекс, имитационное моделирование, алгоритм.

Для обнаружения и сопровождения *малозаметных воздушных целей* (МВЦ) в качестве информационного средства воздушно-космической обороны используется *дирижабельный радиолокационный комплекс* (ДРЛК), представляющий собой сложную радиотехническую систему, аппаратно-программные средства которого размещаются как на земле

(наземный пункт управления, приема и обработки информации), так и в воздухе (на управляемой воздушной (дирижабельной) платформе) [1–3].

Основным источником разведывательной информации ДРЛК является *радиолокационная станция* (РЛС), размещаемая на дирижабле. Кроме этого, на дирижабле размещаются си-

стема управления и стабилизации комплекса, а также навигационная система, определяющая местоположение и ориентацию в пространстве ДРЛК (координаты точки стояния ДРЛК, относительно которой выдается разведывательная информация). При этом управление перечисленными системами, а также организацию их взаимодействия осуществляет бортовая система управления. При функционировании ДРЛК информация об обнаруженных и сопровождаемых МВЦ поступает на наземный пункт управления, приема и обработки информации, который обеспечивает обмен данными этого наземного пункта с бортовой частью ДРЛК, с вышестоящим командным пунктом и активными средствами воздушно-космической обороны, а также управление ДРЛК, в том числе режимами его работы, полетным заданием и отображением получаемой разведывательной информации о МВЦ [2].

Для проведения исследований по обоснованию технического облика ДРЛК и оценки эффективности его функционирования разработана комплексная математическая модель (КММ) ДРЛК, в состав которой входят несколько функционально законченных блоков и имитационных моделей: модель фоновой обстановки (ФЦО), модель Земли, модель бортовых систем ДРЛК, включающая модель РЛС ДРЛК, модель бортовой системы управления ДРЛК и модель функционирования навигационной системы ДРЛК, модель наземного пункта управления, приема и обработки информации, включающая модель отображения информации об обнаруженных и сопровождаемых целях ДРЛК и модель управления бортом, а также блок системы обработки и анализа результатов [2].

При моделировании все входящие в КММ ДРЛК имитационные модели строятся по единому принципу, а именно: динамика функционирования моделируемого комплекса имитируется путем последовательного изменения их состояний через некоторые интервалы времени Δt . Блок-схема общего алгоритма функционирования КММ ДРЛК в режиме имитационного моделирования приведена на рисунке 1. Процесс моделирования осуществляется путем пошагового изменения модельного времени на величину шага Δt . Выбор величины шага определяется задачами моделирования и характеристиками самих моделируемых подсистем комплекса – циклограммой их работы. При этом величина шага определяется подсистемой, у которой период функционирования T_{ϕ} минимален: $\Delta t = \min(T_{\phi 1}, T_{\phi 2}, \dots, T_{\phi N})$.

Модели тех подсистем, для которых величина шага меньше периода их работы ($\Delta t < T_{\phi}$), управляют своей работой самостоятельно.

Цель автора статьи – разработка алгоритмов функционирования основных блоков КММ ДРЛК обнаружения МВЦ в интересах обоснования требований к данному комплексу, принципам его построения и эффективности применения.

Научная задача – обоснование требований к ДРЛК обнаружения МВЦ на основе разработанных алгоритмов функционирования его подсистем и оценки эффективности ДРЛК с использованием КММ.

Алгоритмы функционирования модели ФЦО включают в себя воздушно-космическую целевую и радиоэлектронную обстановку, то есть пространственное положение и ориента-

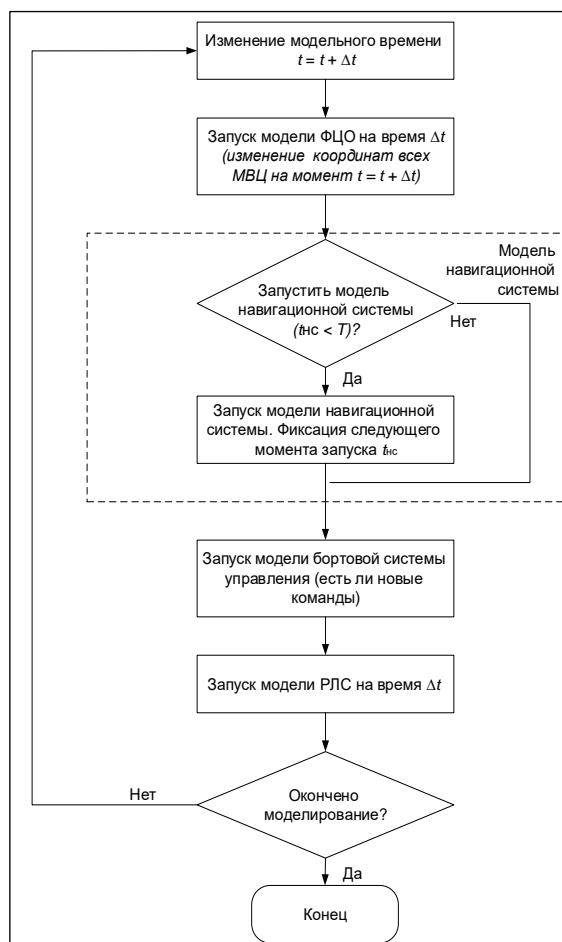


Рис. 1. Блок-схема общего алгоритма функционирования КММ ДРЛК в режиме имитационного моделирования

Fig. 1. A block diagram of a general algorithm for the complex mathematical model of an airship radar system in the simulation mode

цию МВЦ относительно рассматриваемой точки стояния ДРЛК и излучения всех бортовых радиоэлектронных средств МВЦ, определяемые их параметрами (несущая частота, вид модуляции, период повторения, длительность импульсов и т.д.), а также направлением их прихода и интенсивностью излучения, которая определяется излучаемой мощностью и расстоянием от анализируемой точки стояния ДРЛК до радиоэлектронных средств МВЦ [2].

Алгоритмы функционирования модели навигационной системы ДРЛК включают в себя исходные данные положения носителя: вектор ошибок определения его местоположения (например, фазового центра антенны РЛС ДРЛК) в связанной с носителем системе координат и вектор ошибок определения ориентации осей данной системы координат, определяющий ошибки определения углов крена, тангажа и рысканья носителя. При этом значения данных векторов ошибок определяются тактико-техническими характеристиками навигационной системы и задаются как исходные данные при моделировании [2, 4].

Основу обобщенного алгоритма функционирования КММ ДРЛК составляют алгоритмы функционирования РЛС ДРЛК и ее основных подсистем. При этом в КММ ДРЛК используется математическая модель РЛС кругового обзора, в которой передающие и приемные диаграммы направленности антенны (ДНА) формируются в одной антенной системе, обзор по азимуту осуществляется путем равномерного механического вращения антенны с периодом $T_{обз}$, а обзор по углу места реализуется следующими способами: с помощью одного или нескольких неуправляемых разнесенных по углу мест и одновременно функционирующих приемных парциальных каналов; электронным сканированием ДНА по углу места по детерминированной программе.

Модель РЛС ДРЛК строится на основе расчетов параметра обнаружения (отношения сигнал/шум) по уравнению радиолокации, являющегося аналитической моделью

приемо-передающего тракта, и процесса распространения сигналов и включает алгоритмы первичной и вторичной обработки радиолокационной информации ДРЛК обнаружения МВЦ [5].

Блок-схема алгоритма формирования первичной радиолокационной информации ДРЛК в РЛС кругового обзора представлена на рисунке 2. Данный алгоритм реализует требование к имитационной модели РЛС – инвариант-

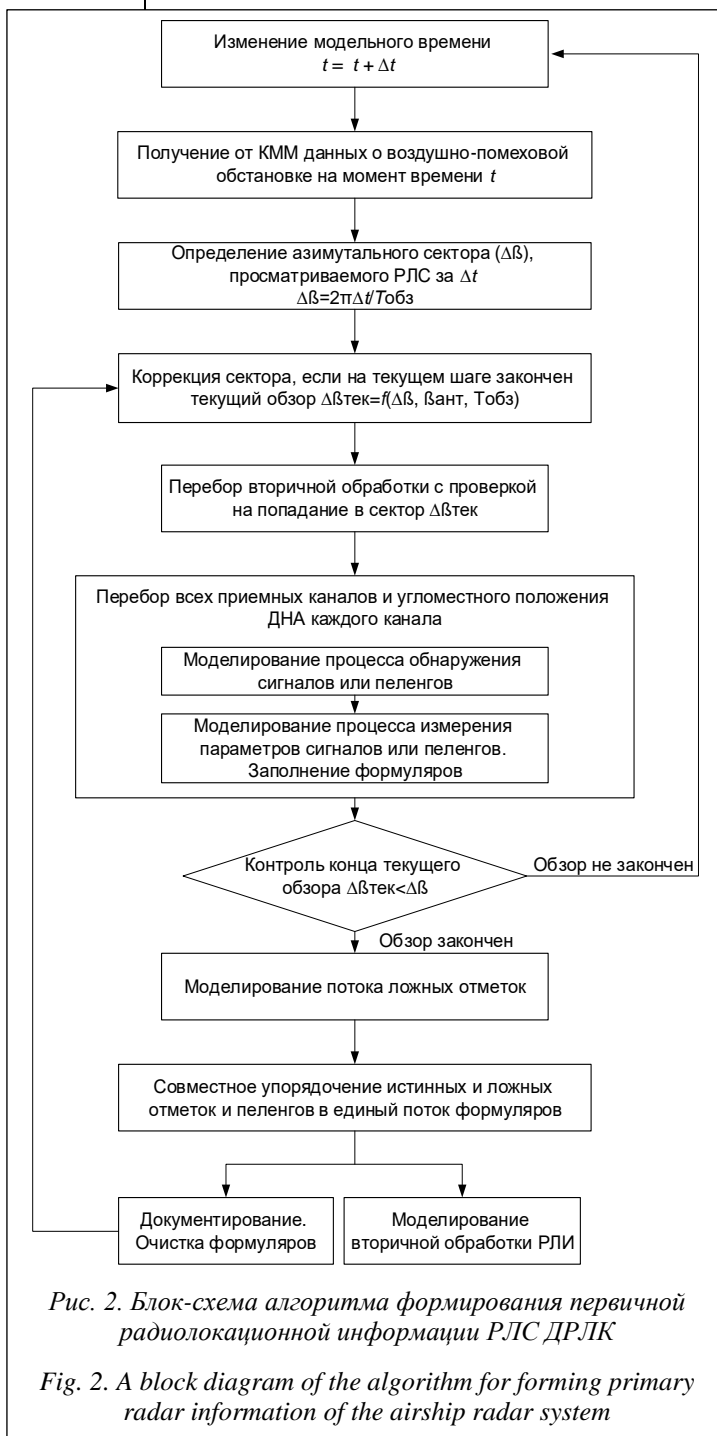


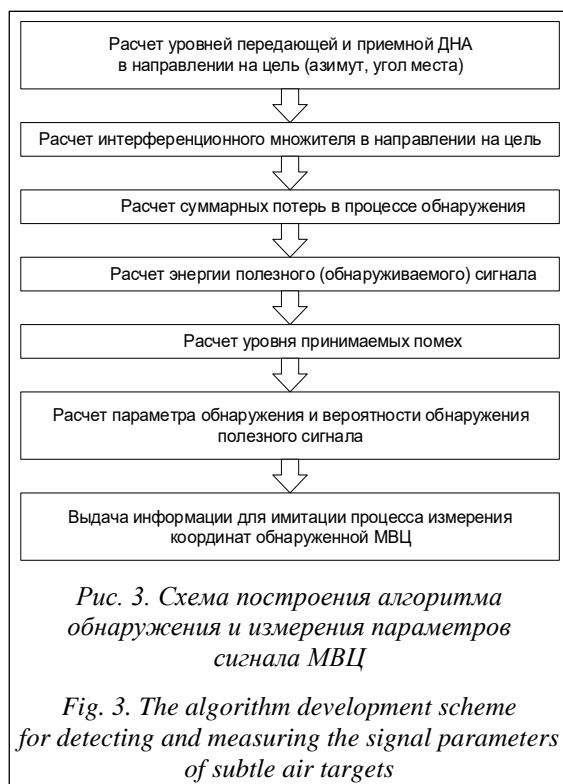
Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования первичной радиолокационной информации РЛС ДРЛК

Fig. 2. A block diagram of the algorithm for forming primary radar information of the airship radar system

ность к величине шага моделирования Δt . Алгоритм позволяет имитировать вращение антенны с произвольным шагом по азимуту. При этом выбор величины шага Δt зависит от задач моделирования. Основу данного алгоритма составляют модели процессов обнаружения и измерения параметров сигналов и пеленгов в каждом приемном канале РЛС (рис. 2, блок «Перебор всех приемных каналов и УМП ДНА каждого канала») [5, 6].

Схема построения алгоритма, моделирующего процесс обнаружения и измерения параметров сигналов МВЦ в одном приемном канале РЛС, приведена на рисунке 3. Для реализации алгоритма используются известные соотношения, описывающие методы расчета передающей и приемной ДНА при известных параметрах решетки и амплитудно-фазовых распределениях на ее раскрыве [7]. В основе алгоритма расчета уровней передающей и приемной ДНА лежит модель антенной системы в виде плоской фазированной антенной решетки (ФАР) [8].

Расчет параметра обнаружения – отношение сигнал/шум и энергии полезного (обнаруживаемого) сигнала – осуществляется на основе отношения суммарной спектральной плотности мощности помех на выходе приемного канала к спектральной плотности собственных шумов приемника [5]. По величине



данного параметра рассчитывается вероятность обнаружения полезного сигнала с использованием характеристик обнаружения, вид которых определяется моделями флуктуаций эффективной площади рассеяния цели и помех, а также алгоритмами накопления сигналов, реализуемыми в РЛС ДРЛК [5]. Рассчитанная вероятность обнаружения используется при статистическом розыгрыше решения об обнаружении МВЦ [9].

Алгоритм вторичной обработки радиолокационной информации ДРЛК включает такие основные операции: обнаружение начала траектории МВЦ, захват на сопровождение, фильтрация параметров траекторий, привязка отметок к сопровождаемым траекториям, принятие решения на сброс с сопровождения [5, 6]. При этом формируются основные массивы хранения информации: массив сопровождаемых траекторий (или трасс), массив обнаруживаемых траекторий, массив изолированных измерений, массив входных формуляров, массив выходных формуляров. Каждый элемент (канал) из перечисленных массивов содержит набор данных, необходимый для описания состояния соответствующего ему объекта.

Для функционирования алгоритма *вторичной обработки информации* (ВОИ) задаются следующие исходные данные: среднеквадратическое отклонение ошибок измерения азимута, дальности и радиальной скорости МВЦ, минимальное и максимальное значения скорости сопровождаемых МВЦ, период обзора, параметры критерия обнаружения и сброса с сопровождения траекторий МВЦ, максимальное количество каналов сопровождаемых траекторий, обнаружения траекторий, изолированных измерений, максимальное количество входных формуляров.

Каждый канал сопровождаемых траекторий определяется номером и содержит такие основные данные: признак занятости, ненулевые значения которого могут соответствовать различным состояниям траектории, в том числе и связанным с обнаружением маневра; вектор состояния сопровождаемой траектории, который содержит координаты цели, векторы скорости ее движения и другие параметры, необходимые для описания траектории; параметры, характеризующие ошибки оценивания вектора состояния; время экстраполяции.

Канал обнаруживаемых траекторий содержит аналогичные параметры, но в отличие от канала сопровождения в нем возможно наличие информации о степени правдоподобия

проверяемой траектории, например, значения длительности серии пропусков измерений по обнаруживаемой траектории, функции правдоподобия обнаруживаемой траектории и др.

Каналы изолированных измерений (отметок) содержат признак занятости, время с момента занятия канала, измерения наблюдаемых параметров (например, дальности, азимута и радиальной скорости), другие признаки, взятые из формуляра входной информации.

Структурная схема алгоритма ВОИ представляется следующей последовательностью действий:

- чтение входной информации из входного буфера в массив входных формуляров ВОИ;
- обработка каналов сопровождения траекторий (включает привязку входных формуляров к сопровождаемым траекториям и уточнение параметров сопровождаемых траекторий);
- обработка каналов обнаружения траекторий (включает привязку входных формуляров к обнаруживаемым траекториям и уточнение параметров обнаруживаемых траекторий);
- выявление возможного маневра целей и соответствующая обработка информации по маневрирующим целям; анализ критерия сброса с сопровождения для сопровождаемых траекторий;
- анализ критерия подтверждения для обнаруживаемых траекторий (при подтверждении траектории она переносится в канал сопровождаемых траекторий);
- обработка каналов изолированных измерений с целью выявления возможного начала новой траектории (захват на сопровождение или завязка траектории);
- оценка начальных параметров траекторий и передача их в каналы обнаружения;
- дополнение каналов изолированных измерений новыми из числа формуляров, находящихся в массиве входных формуляров ВОИ и не использованных на предыдущих этапах обработки;
- анализ дополнительной признаковой информации по всем каналам сопровождения, которая не использовалась на предыдущих этапах обработки;
- обновление массива выходной информации ВОИ;
- траекторное распознавание.

В рамках обобщенной структурной схемы алгоритма ВОИ могут быть рассмотрены раз-

личные варианты составляющих его элементов с целью выявления варианта алгоритма ВОИ, в наибольшей степени соответствующего задачам, решаемым РЛС ДРЛК. На основании оценки вариантов реализации перечисленных алгоритмов для основных операций ВОИ предлагаются следующие подходы. При сопровождении МВЦ в КММ применяется система координат, в которой используются топоцентрические плоскостные координаты, а высота отсчитывается от уровня поверхности земного эллипсоида (уровня моря). При этом сопровождение аэродинамических МВЦ выполняется отдельно по плоскостным координатам и по высоте. При сопровождении МВЦ в плоскостных координатах вектор состояния траектории цели включает плоскостные координаты и проекции вектора скорости, а вектор наблюдаемых параметров в зависимости от типа измерения может включать дальность, азимут, угол места и радиальную скорость цели.

Алгоритм захвата на сопровождение и оценка начальных параметров траекторий осуществляются по двум изолированным радиолокационным измерениям (отметкам) МВЦ, полученным на различных обзорах РЛС ДРЛК. Применение критерия захвата «2 из 3» при периоде обзора 10 с обеспечивает требования для среднего времени захвата, равного 25 с. При этом оцениваемые параметры траектории представляются в виде вектора состояния, включающего вектор координат и вектор радиальных скоростей МВЦ. Данный вариант алгоритма оценки начальных параметров для случая двух координатных отметок основан на вычислении вектора скорости как отношения разности координат к времени между их измерениями [5, 6]. Поскольку в данном алгоритме в состав вектора измеряемых параметров входит значение радиальной скорости, для оценки начального значения параметров траектории используется одна радиолокационная отметка. На основании данных первой отметки оценка вектора состояния определяется на основе оценки вектора скорости, в которой абсолютная величина скорости равна измеренному значению радиальной скорости, а направление вектора скорости параллельно линии визирования цели и оценки координат цели, равной полученному измерению полярных координат, пересчитанных в прямоугольную систему координат.

Алгоритм обнаружения траектории МВЦ определяется алгоритмами завязки и подтверждения траекторий. Он представляется в виде

совокупности алгоритма завязки траектории (захвата на сопровождение) по критерию « k из m » и алгоритма подтверждения траектории – при фиксированном (критерий Неймана–Пирсона) и случайном (критерий Вальда) времени наблюдения [5, 6]. Для выбора критерия подтверждения используются зависимости среднего времени обнаружения траектории от вероятности обнаружения цели для различных критериев. При этом также учитываются такие показатели, как дальность обнаружения траектории и вероятность обнаружения ложной траектории.

Алгоритм оценивания координат и параметров траекторий сопровождаемых МВЦ осуществляется на основе алгоритма функционирования фильтра Калмана [5, 10], построенного для заданной модели движения цели. Основной моделью движения цели являлась модель движения на основе полиномов первого и второго порядков. При этом для фильтрации радиолокационных измерений маневрирующей цели используются нелинейные модели движения.

Алгоритмы обнаружения начала и окончания маневра включают параллельную фильтрацию параметров траекторий с различными моделями движения. Для переключения с одного фильтра на другой используются алгоритмы обнаружения начала и окончания маневра. При этом варианты «цель маневрирует» и «цель не маневрирует» разбиваются на два случая. Для

варианта «цель не маневрирует» выделяются подварианты «отсутствие маневра» и «маневр слабой интенсивности», для которого осуществляется фильтрация с применением квадратичной модели движения (зависимость координат от времени представляется полиномом второго порядка). Для варианта «цель маневрирует» выделяются подвариант «наличие маневра», для которого используется нелинейная модель движения, и подвариант «интенсивный маневр», для которого фильтрация не выполняется, а оценка параметров траектории выполняется по двум последним радиолокационным измерениям (двухточечная экстраполяция). Схема построения алгоритма сопровождения маневрирующих целей приведена на рисунке 4, блок-схема алгоритма моделирования полета МВЦ – на рисунке 5.

Приведенный алгоритм удовлетворяет требованию независимости процесса моделирования от значения шага моделирования Δt . Если внутри шага Δt лежат несколько маневров, то все они будут последовательно выполнены. Основным элементом приведенного алгоритма является блок «Моделирование на $\Delta t'$ движения по алгоритму текущего маневра».

При моделировании полета МВЦ с огибанием рельефа местности формирование списка маневров происходит иначе, так как особенностью движения МВЦ с огибанием рельефа является большое количество маневров в верти-

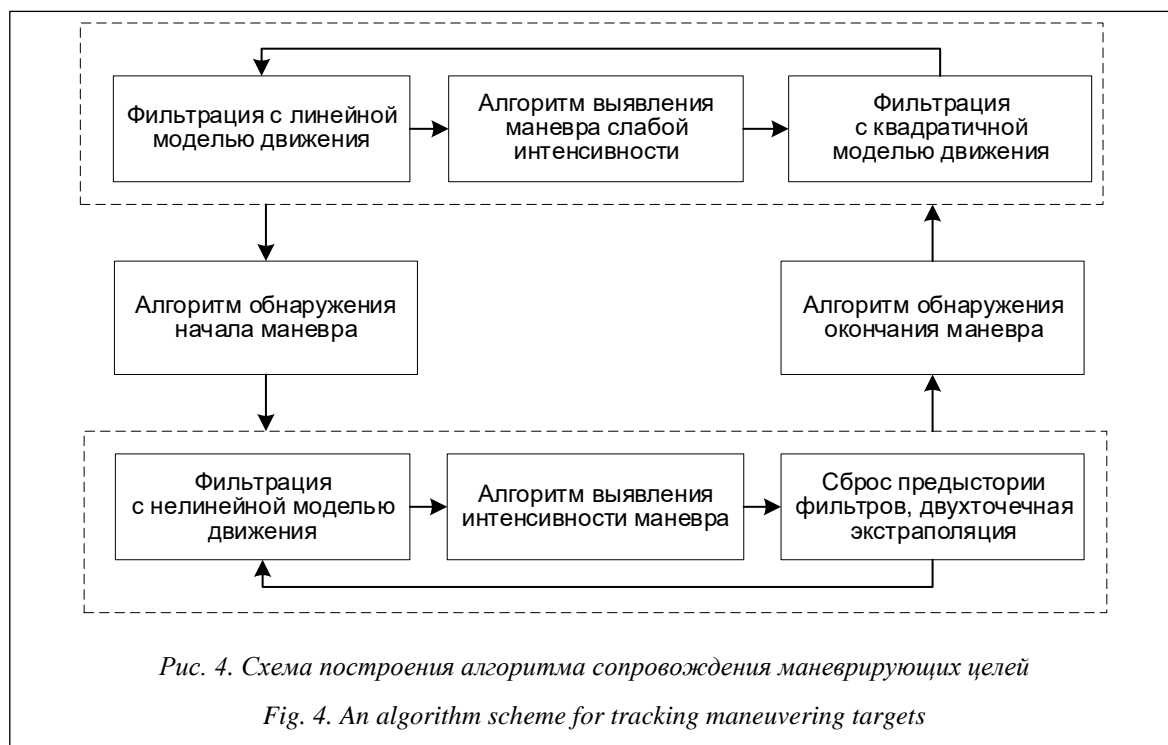
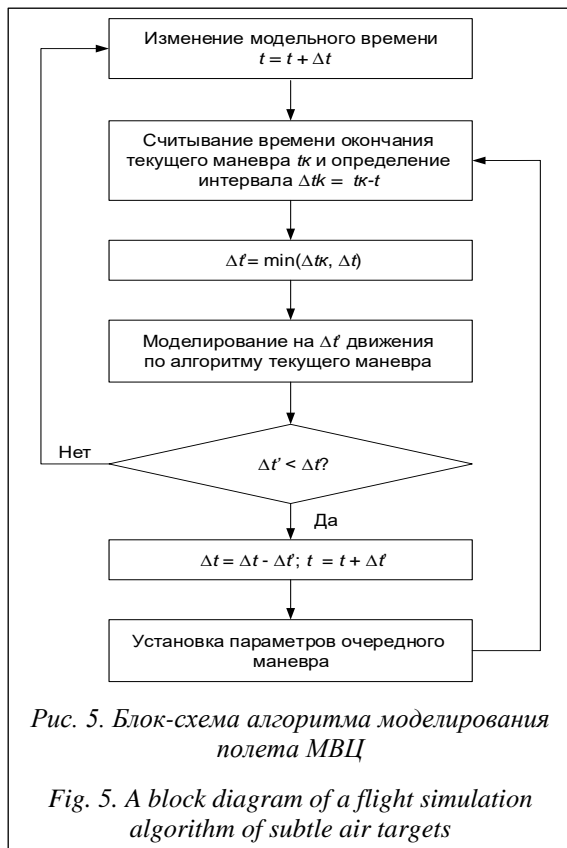


Рис. 4. Схема построения алгоритма сопровождения маневрирующих целей

Fig. 4. An algorithm scheme for tracking maneuvering targets



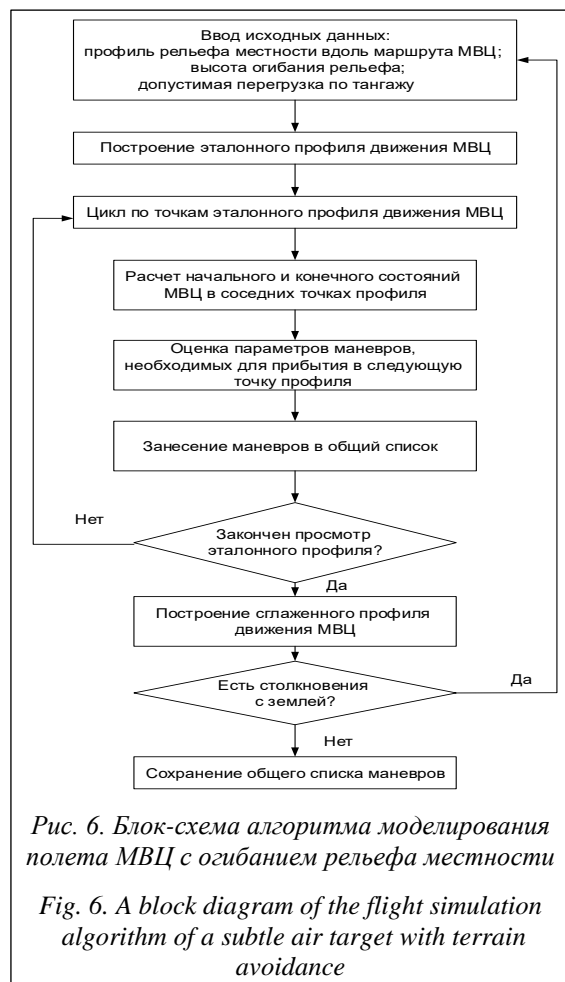
кальной плоскости. Блок-схема алгоритма моделирования полета МВЦ с огибанием рельефа местности представлена на рисунке 6.

При этом исходными данными для расчетов являются профиль рельефа местности вдоль маршрута полета МВЦ и заданная высота полета МВЦ. При функционировании алгоритма вначале очевиден эталонный вертикальный профиль маршрута МВЦ, во всех точках равноотстоящий от профиля рельефа местности, затем в точках перегибов выполняется сглаживание маршрута с учетом максимально допустимых перегрузок МВЦ по тангажу. В результате сглаживания формируется список маневров МВЦ в вертикальной плоскости, который используется при моделировании полета МВЦ.

Список маневров формируется исходя из следующих принципов: количество маневров, а также среднеквадратическое отклонение вертикального профиля маршрута МВЦ от эталонного должны быть минимальными; не допускается столкновение с землей, то есть профиль маршрута МВЦ не должен пересекаться с профилем рельефа местности. При формировании списка маневров для пролета между двумя соседними точками эталонного профиля используется следующий подход. Каждая точка эталонного профиля характеризуется горизон-

тальной дальностью от начала маршрута, высотой от уровня моря и углом места на следующую точку маршрута. Чтобы из первой точки попасть во вторую и прибыть в нее, имея вектор скорости, направленный на третью, в общем случае необходимо совершить два маневра по высоте с заданной перегрузкой и часть пути между ними пройти равномерно и прямолинейно. Специальная процедура рассчитывает время начала и окончания каждого из трех участков движения. В частном случае число участков может оказаться равным двум и даже одному. При невозможности прибытия в точку с требуемыми параметрами обеспечивается прибытие с параметрами, максимально близкими к требуемым.

Общий алгоритм формирования списка маневров предусматривает последовательное применение данной процедуры для всех пар соседних точек профиля. Сформированный профиль проверяется на предмет столкновения с землей. Факт столкновения визуализируется оператору. Это означает невозможность прохода данного маршрута, и про-



дится новый расчет при менее жестких условиях, увеличивая высоту МВЦ.

Алгоритм принятия решения о сбросе с сопровождения основан на определении наличия серии пропусков радиолокационных измерений при сопровождении МВЦ [5, 6]. Критерий, по которому принимается решение, заключается в превышении длины серии пропусков заданной пороговой величины. Этот критерий в значительной степени определяет такие показатели качества траекторной информации, как коэффициент ложных трасс и среднее время существования ложных трасс, а совместно с критерием обнаружения траекторий – среднюю длительность разрывов трасс. Для минимизации среднего времени существования ложных трасс целесообразно применять адаптивный критерий сброса с сопровождения в виде $k(p)$ – количество пропусков подряд в зависимости от вероятности обнаружения цели. При этом используются следующие значения: $k(0, 5) = 5, k(0, 6) = 4, k(0, 7) = 3, k(0, 9) = 2$. Оценка вероятности обнаружения может вычисляться на основании данных об амплитуде принятого сигнала, дальности до цели и предыстории сопровождения цели.

Алгоритм траекторного распознавания классов целей выполняется на основе следующих параметров (признаков): скорость цели, высота цели, амплитуда отраженного сигнала, данные сигнального распознавания. Для траекторного распознавания $N_{кт}$ классов целей используется описание классов в пространстве признаков. Для описания каждого класса строятся по априорным данным диаграммы возможных значений скорости и высоты полета МВЦ, а также зависимости эффективной отражающей поверхности от ракурса цели.

Один из подходов к принятию решения о распознавании состоит в следующем [11]. Пространство признаков разбивается на группы: g_1, \dots, g_M . В каждой группе решение о распознавании принимается в виде нечеткого множества на множестве классов $\chi_m: \Omega_o \rightarrow [0, 1], m = 1, \dots, M$. Решением о распознавании является вектор значений, характеризующий возможность принадлежности наблюдаемого объекта к одному из классов. После того как процедура распознавания выполнена по всем группам признаков и получены нечеткие решения о распознавании, используется пересечение полученных множеств $\chi(\omega) = \min_{m=1, \dots, M} \chi_m(\omega)$

и принимается окончательное решение по критерию максимума функции принадлежности:

$\omega^* = \arg \max_{\omega \in \Omega_o} \chi(\omega)$. В качестве решения задачи

распознавания принимается тот класс ω^* , на котором функция принадлежности $\chi(\omega)$ принимает максимальное значение.

Алгоритм функционирования системы управления ДРЛК обнаружения МВЦ предназначен, в первую очередь, для управления режимами работы РЛС. Модель функционирования системы управления обеспечивает подключение тех или иных ветвей алгоритмов функционирования РЛС в соответствии с заданными режимами. При этом основными режимами РЛС, определяющими структуру модели системы управления ДРЛК, является кру-

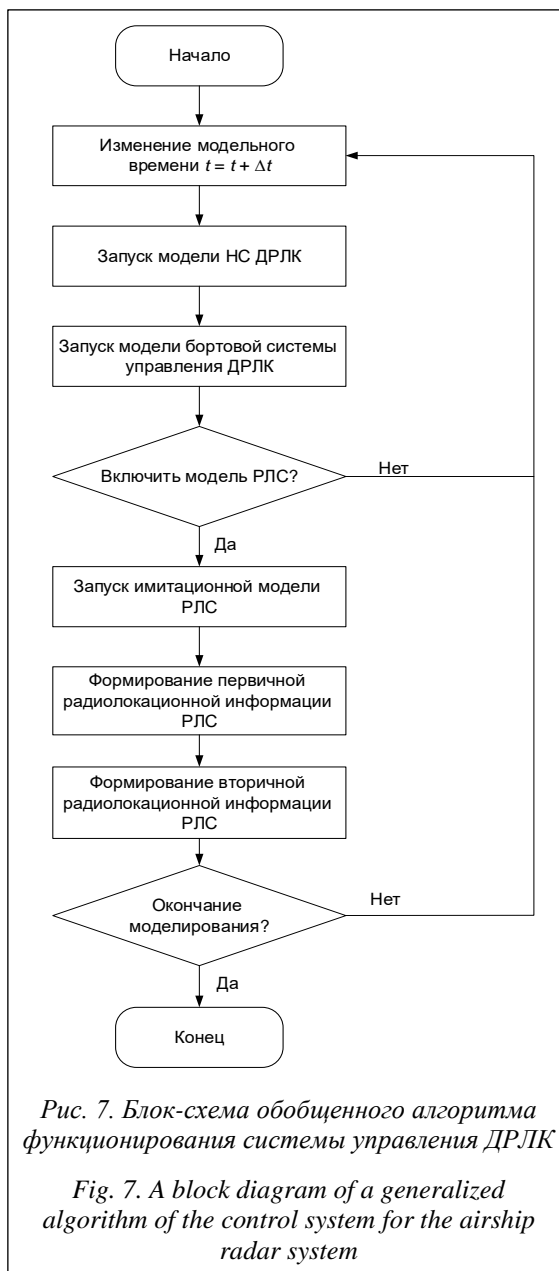


Рис. 7. Блок-схема обобщенного алгоритма функционирования системы управления ДРЛК

Fig. 7. A block diagram of a generalized algorithm of the control system for the airship radar system

говой обзор пространства с темпом 5 или 10 с в соответствии с назначенным режимом функционирования. Для обнаружения баллистических целей и гиперзвукового летательного аппарата в модели РЛС ДРЛК предусмотрены специальные режимы секторного обзора. При этом обнаружение всех типов целей может осуществляться в амплитудном или когерентном режиме работы РЛС. Причем когерентный режим обычно назначается для обнаружения маловысотных целей на фоне интенсивных отражений от подстилающей поверхности Земли при круговом обзоре пространства с темпом 10 с. Таким образом, модель функционирования системы управления ДРЛК обеспечивает моделирование следующих режимов работы модели РЛС: режимы обзора пространства с темпом 5 или 10 с, режим секторного обзора, амплитудный или когерентный режим обнаружения МВЦ.

Блок-схема обобщенного алгоритма функционирования системы управления ДРЛК представлена на рисунке 7. Особенностью данного алгоритма является возможность только поочередного включения режимов обзора РЛС. Когерентный режим может быть включен при темпе обзора 10 с, амплитудный – при любом режиме обзора. Первичная радиолокационная

информация с выхода рассматриваемой модели в зависимости от установленного режима поступает на вход алгоритма вторичной обработки.

Выводы

Разработаны алгоритмы функционирования основных блоков КММ ДРЛК обнаружения МВЦ в интересах обоснования требований к данному комплексу и оценки эффективности его применения. Алгоритмы функционирования ДРЛК включают общий алгоритм функционирования ДРЛК, алгоритмы первичной и вторичной обработки радиолокационной информации ДРЛК, алгоритм функционирования системы управления ДРЛК. Данные алгоритмы позволяют в КММ реализовать методики, разработанные в рамках метода обоснования технического облика ДРЛК обнаружения МВЦ.

Реализация представленных алгоритмов в КММ позволяет с достаточной степенью достоверности описать процессы функционирования ДРЛК при обнаружении, сопровождении, распознавании МВЦ, что обеспечит проведение оценки эффективности вариантов построения комплекса и его информационных возможностей.

Литература

1. Суша С.В. Обоснование необходимости применения дирижабельного радиолокационного комплекса дальнего обнаружения малозаметных воздушных целей // Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах: сб. матер. XXIX Всерос. науч.-технич. конф. М., 2018. С. 29–34.
2. Суша С.В. Комплексная математическая модель дирижабельного радиолокационного комплекса обнаружения малозаметных воздушных целей // Программные продукты и системы. 2019. № 2. С. 290–298. DOI: 10.15827/0236-235X.126.290-298.
3. Митрофанов А. Возрождение дирижаблей. Дирижабли как важная часть вооружённых сил XXI века // Военное обозрение. 2019. URL: <https://topwar.ru/157696-vozhrozhdenie-dirizhablej-dirizhabli-kak-vazhnaja-chast-vooruzhennyh-sil-xxi-veka.html> (дата обращения: 20.01.2019).
4. Мишин А.Ю., Фролова О.А., Исаев Ю.К., Егоров А.В. Комплексная навигационная система летательного аппарата // Тр. МАИ. 2010. № 38. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=14161> (дата обращения: 20.01.2019).
5. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. М.: Радиотехника, 2007. 510 с.
6. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев, 2000. 428 с.
7. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2016. 376 с.
8. Хансен Р.С. Фазированные антенные решётки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
9. Бондарев С.К., Датнова Л.В., Куликов В.Н., Шароглазов В.Б. Методика моделирования процесса обнаружения воздушных объектов наземной обзорной РЛС в условиях воздействия пассивных помех // Программные продукты и системы. 2014. № 1. С. 216–220.
10. Балакришнан А. Теория фильтрации Калмана; [пер. с англ]. М.: Мир, 1988. 168 с.
11. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов; [пер с англ.]. М.: Наука, 1979. 368 с.

Development of operation algorithms of a mathematical model of an airship anti-stealth radar

S.V. Susha¹, Head of Department, sushasv2008@yandex.ru

¹ Directorate of the Ministry of Defense of Russia, Tver, 170100, Russian Federation

Abstract. The paper describes a complex mathematical model of an airship anti-stealth radar system. The purpose of the study was to justify the technical appearance, application features, to assess the effectiveness of the operation and combat (information) capabilities of the complex. The development result includes a number of simulation models (a target environment model, an Earth model, an on-board systems model including a radar station model, an on-board control system model and a navigation system functioning model, a ground control center model including a model for displaying information about detected and tracked targets, a model board control), as well as functionally complete blocks (systems for processing and analyzing results).

When modeling, all simulation models in the complex mathematical model are constructed according to a single principle. The functioning dynamics of the simulated complex is simulated by successive changing of their states at some time intervals.

The paper provides a block diagram of a general algorithm of a complex mathematical model in a simulation mode. The modeling process assumes stepwise changing of the model time by a step size. There are algorithms for the main units and their relationship as part of a general algorithm for the operation of a complex mathematical model of an airship radar system in a simulation mode.

The operation algorithms of the target environment model include both the aerospace target and radio-electronic environments. The spatial position and orientation of targets with respect to a stationary point of the airship radar system and the radiation of all on-board electronic target means is determined by targets parameters, as well as the direction of their arrival and radiation intensity.

The operation algorithms of the navigation system model include source data of a carrier position – its location error vectors. The data values of these vectors are determined by the navigation system characteristics.

A radar station model is based on calculating the detection parameter using the radar equation and calculating a signal propagation process. This model includes algorithms for primary and secondary processing of radar information.

The implementation of the presented algorithms in a complex mathematical model allows reasonable describing of operation processes of an airship radar system when detecting, tracking, and recognizing subtle air targets. It will provide an assessment of the effectiveness of the options for building the complex and its information capabilities.

Keywords: complex mathematical model, radar station, airship radar system, simulation, algorithm.

References

1. Susha S.V. Rationale for using an airship radar system for the early detection of subtle air targets. *Transmission, Reception, Processing and Display of Information About Fast Processes: Proc. 29th All-Russ. Sci. and Tech. Conf.* Moscow, 2018, pp. 29–34 (in Russ.).
2. Susha S.V. A complex mathematical model of the air anti-stealth airship radar system. *Software & Systems*. 2019, no. 2, pp. 290–298. DOI: 10.15827/0236-235X.126.290-298.
3. Mitrofanov A. Revival of airships. Airships as an important part of the armed forces of the XXI century. *Military Review*. 2019. Available at: <https://topwar.ru/157696-vozrozhdenie-dirizhablej-dirizhabli-kak-vazhnaja-chast-vooruzhennyh-sil-xxi-veka.html> (accessed January 20, 2019).
4. Mishin A.Yu., Frolova O.A., Isaev Yu.K., Egorov A.V. An integrated navigation system of the aircraft. *Trudy MAI*. 2010, no. 38. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=14161> (accessed January 20, 2019).
5. Shirman Ya.D. *Radio-electronic Systems: Fundamentals and theory*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007, 510 p.
6. Kuzmin S.Z. *Digital Radar. Introduction to the Theory*. Kiev, 2000, 428 p.
7. Voskresensky D.I. *Microwave Devices and Antennas*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016, 376 p.
8. Hansen R.S. *Phased Array Antennas*. Wiley, 2001, 486 p. (Russ. ed.: Moscow, Teknosfera Publ., 2012, 560 p.).
9. Bondarev S.K., Datnova L.V., Kulikov V.N., Sharoglazov V.B. Method of modeling the detection process of air facilities by ground surveillance radar under the impact of passive jamming. *Software & Systems*. 2014, no. 1, pp. 216–220 (in Russ.).
10. Balakrishnan A.V. *Kalman Filtering Theory*. Springer Publ., 1984, 222 p. (Russ. ed.: Moscow, Mir Publ., 1988, 168 p.).
11. Fukunaga K. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. Academic Press, 1972, 386 p. (Russ. ed.: Moscow, Nauka Publ., 1979, 368 p.).