

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.038](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.038)

Имитационная модель радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенными средствами радиолокационных станций

М.Б. Сергеев, А.А. Сенцов, Е.К. Григорьев, С.А. Ненашев

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме: Начало массового использования малых беспилотных летательных аппаратов в различных целях породило проблему их безопасного и контролируемого перемещения в пространстве. В статье показана целесообразность применения распределенных систем в целях повышения точности измерений траекторных координат воздушных объектов. Перечень функций, которые должны осуществлять распределенные системы обнаружения воздушных объектов включает управление режимами работы каждого источника локационных данных по сканированию области воздушного пространства, получение информации о движущихся объектах, вычисление по обработанным данным координат и направления движения (составляющих векторов скорости), а также прогнозирование положения воздушного объекта для принятия решения о выдаче информации в сопряженные системы. Предложены варианты схем расположения автономных пунктов наблюдения, а также их достоинства и недостатки. Описан процесс моделирования распределенной системы, состоящей из двух мобильных радиолокационных станций, применимой для отработки методов обнаружения и оценки координат воздушных объектов. Для разрабатываемой имитационной модели получены аналитические соотношения для расчета координат наблюдаемых воздушных объектов по дальномерной и угломерной информации. Предложена структурная схема этапов моделирования для определения траекторных координат воздушных объектов. Модель построена на основе угломерной и дальномерной информации, полученной по результатам проведения натурных экспериментов. Разработанная имитационная модель предназначена для выбора параметров проектируемых систем, а также отработки алгоритмов совмещения радиолокационных данных от двух автономных РЛС с общей зоной наблюдения в единое информационное поле для определения траекторных координат подвижного объекта типа БПЛА, а также для определения тактико-технических характеристик на этапе разработки функционального взаимодействия системы управления распределенными мобильными средствами.

Ключевые слова: определение координат, воздушные объекты, двухпозиционная система, радиолокационная станция, комплексная обработка информации, имитационная модель.

Для цитирования: Сергеев М.Б. , Сенцов А.А. , Григорьев Е.К. , Ненашев С.А. Имитационная модель радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенными средствами радиолокационных станций. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии* 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/SergeevSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038

Simulation model of the radar environment of an intelligent control system for distributed radar facilities

M. B. Sergeev, A. A. Sentsov, E. K. Grigoriev, S. A. Nenashev
*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

Abstract: The beginning of the mass use of small unmanned aerial vehicles for various purposes gave rise to the problem of their safe and controlled movement in space. The article shows the feasibility of using distributed systems in order to improve the accuracy of measurements of the trajectory coordinates of air objects. The list of functions that should be carried out by distributed systems for detecting airborne objects includes controlling the operating modes of each source of location data for scanning an airspace area, obtaining information about moving objects, calculating coordinates and direction of movement (components of velocity vectors) from the processed data, as well as predicting the position of airspace. an object for making a decision on issuing information to associated systems. Variants of layouts of autonomous observation points, as well as their advantages and disadvantages are proposed. The process of modeling a distributed system consisting of two mobile radar stations is described, which is applicable for developing methods of detecting and estimating coordinates of air objects. For the developed simulation model, analytical relationships are obtained for calculating the coordinates of the observed air objects using rangefinder and goniometric information. A structural diagram of the modeling stages for determining the trajectory coordinates of air objects is proposed. The model is built on the basis of goniometric and rangefinder information obtained from the results of field experiments. The developed simulation model is intended to select the parameters of the systems being designed, as well as to work out algorithms for combining radar data from two autonomous radars with a common observation area into a single information field to determine the trajectory coordinates of a mobile UAV-type object, as well as to determine the tactical and technical characteristics at the stage of developing a functional interaction of the distributed mobile assets management system.

Keywords: determination of coordinates, air object, two-position system, radar system, complex information processing, simulation model.

For citation: Sergeev M.B. , Sentsov A.A. , Grigoriev E.K., Nenashev S.A. Simulation model of the radar environment of an intelligent control system for distributed radar facilities. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/SergeevSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038 (In Russ).

Введение

Радиолокационные системы применяются для решения широкого круга задач, связанных с обнаружением, определением траекторных координат и автоматическим сопровождением воздушных объектов (ВО) радиолокационной станцией (РЛС) и последующей классификацией различных по типу и характеристикам объектов – наземных, надводных, воздушных [1–6]. С совершенствованием вычислительных средств обработки информации возрастают требования к РЛС как по скорости обнаружения, так и по точности определения траекторных координат объектов.

Система из двух и более распределенных в пространстве радаров обладает существенными преимуществами по сравнению с однопозиционной – возможностью определения полного вектора скорости, а также координат наблюдаемых объектов как по дальности, так и по угловой координате. При этом точность определения угловых координат в распределенных РЛС значительно выше по сравнению с однопозиционным вариантом [7–18]. Такие многопозиционные системы называются пространственно-

распределенными, помимо радиолокационных они могут включать в состав и другие типы источников информации (оптические, инфракрасные, акустические). При проектировании многопозиционных распределенных систем требуется поиск новых методов и моделей комплексной обработки информации в режиме реального времени, сопряженных с высокоскоростными вычислениями и обработкой большого объема данных.

Особенность решаемой в статье задачи состоит в том, что в качестве объектов обнаружения рассматриваются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), обладающие высокими маневренными характеристиками и малой эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР), что требует разработки как новых алгоритмов комплексной обработки радиолокационных данных, так и разработки модели для отработки этих алгоритмов в сложных метеоусловиях.

Цель работы – разработать модель, имитирующую радиолокационную обстановку двухпозиционной системы с наземными РЛС, применимую для выбора параметров при проектировании таких систем, а также отработки алгоритмов совмещения радиолокационных данных от двух автономных РЛС с общей зоной наблюдения в единое информационное поле для обнаружения и определения траекторных координат подвижного ВО типа БПЛА на основе угломерной и дальномерной информации, полученной по результатам проведения натуральных экспериментов.

Решаемая научная задача – разработка модели для комплексной обработки информации от двух РЛС в сопряженном пункте обработки, а также управления их работой с целью построения общей траектории движения объекта. Задача разрабатываемой модели состоит в том, чтобы экспериментально проверить возможность эффективного формирования радиолокационной обстановки в пространственно-распределенной системе автономных РЛС при сопровождении ВО, в том числе БПЛА.

Структурная схема и особенности алгоритма моделирования

Анализ предметной области показывает [4–8], что процесс комплексирования радиолокационной информации от разнесенных в пространстве источников в единое информационное поле является задачей специфической, требующей специального исследования.

Модель радиолокационной обстановки и ее оценки в случае режима «земля-воздух» для двухпозиционной системы автономных РЛС включает в себя множество объектов, а именно переотражения от подстилающей поверхности, от ВО естественного или искусственного происхождения, статические объекты в зоне наблюдения и т.д. Кроме того, каждый объект имеет свои особенности и характеристики. В частности, для ВО это вектор скорости и ускорения, ЭПР и др. В связи с вышесказанным, в общем случае становится все более сложно учесть все особенности системы.

Процесс моделирования при исследовании двухпозиционной системы автономных РЛС состоит из нескольких программных блоков, выполняющих:

- ввод исходных данных (ширина диаграмм направленности антенн РЛС₁ и РЛС₂, координаты зоны обзора воздушного пространства, требуемое разрешение по азимуту и дальности, начальные координаты ВО в глобальной системе координат, курсовой угол ВО, период повторения импульсов зондирующего маркированного сигнала, ЭПР ВО, ширина зоны обзора воздушного пространства, путевая скорость и ускорение ВО и т.д.)

- моделирование взаимного расположения распределенной системы РЛС и наблюдаемых ВО;

- генерацию маркированного эхо-сигнала для РЛС₁ и РЛС₂;
- добавление помех/шумов;
- обнаружение ВО на фоне помех/шумов в каждой из РЛС₁ и РЛС₂;
- формирование оценки траекторных координат в РЛС₁ и РЛС₂;
- обмен информацией между РЛС₁ и РЛС₂;
- комплексирование информации в распределенной системе автономных РЛС;
- совместное сопровождение и построение траекторий движения ВО.

Структурная схема модели процесса оценки координат ВО и их сопровождения двухпозиционной системой автономных РЛС представлена на Рисунке 1.

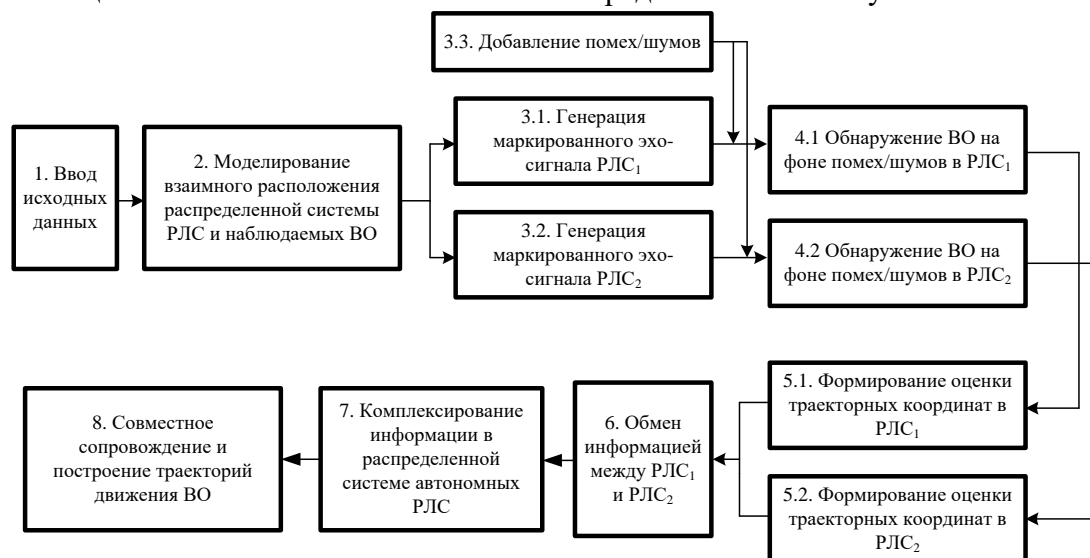


Рисунок 1 – Схема моделирования процесса совместной оценки координат ВО и их сопровождения

Figure 1 – Block diagram of the simulation of the coordinate joint estimation and tracking of air objects

В приведенной схеме используются способы и алгоритмы обработки сигналов, разработанные для современных пространственно-распределенных систем воздушного мониторинга в режиме «земля-воздух», в блоках которой учитываются как сложные маршруты движения ВО, положение и форма диаграмм направленности антенн автономных РЛС, отражающие свойства ВО, влияние метеоусловий и т. п.

Моделирование проводилось для когерентной и некогерентной последовательностей импульсов при флюктуирующем сигнале. Моделирование работы каждого программного блока в отдельности с учетом функциональных особенностей и полученных на практике статистических данных позволяет качественно отладить разработанные алгоритмы и получить достоверные результаты моделирования, что, в свою очередь, обеспечивает качественную отладку применяемых алгоритмов комплексирования.

Модель взаимного положения автономных РЛС и наблюдаемых воздушных объектов

Рассмотрим модель распределенной системы, в которую входят две РЛС – двухпозиционная система. В каждой РЛС измеряется дальность до объекта только по сигналу, излученному с ее позиции. Излученные сигналы каждой РЛС должны быть маркированы. В представленной модели реализуются специализированные алгоритмы генерации и обработки маркированных сигналов для однозначной идентификации

зондирующего сигнала каждой из автономных РЛС пространственно-распределенной системы в условиях деструктивных воздействий [10].

Геометрические соотношения параметров определения координат объекта с помощью двухпозиционной системы представлены на Рисунке 2. Здесь используются следующие обозначения:

РЛС₁ и РЛС₂ – две приемопередающие позиции, разнесенные на расстояние B , которые ведут наблюдение за движущимся ВО (Obj);

R_1 и R_2 – дальности до объекта наблюдения от позиций РЛС₁ и РЛС₂;

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, – азимуты и углы места, измеренные РЛС₁ и РЛС₂, соответственно.

Для удобства восприятия изображения на Рисунке 2 РЛС₁ и РЛС₂ расположены по горизонтали. Для координат воздушного объекта в декартовой системе координат будем использовать следующие обозначения: $x_{Obj}, y_{Obj}, z_{Obj}$.

Координаты ВО в прямоугольной системе координат можно выразить через координаты, полученные с РЛС₁ и РЛС₂ в сферической системе координат.

Для РЛС₁:

$$\begin{aligned} x_{1Obj} &= R_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_1\right) \cos(\alpha_1) - \frac{B}{2}, \\ y_{1Obj} &= R_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_1\right) \sin(\alpha_1), \\ z_{1Obj} &= R_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta_1\right). \end{aligned} \quad (1)$$

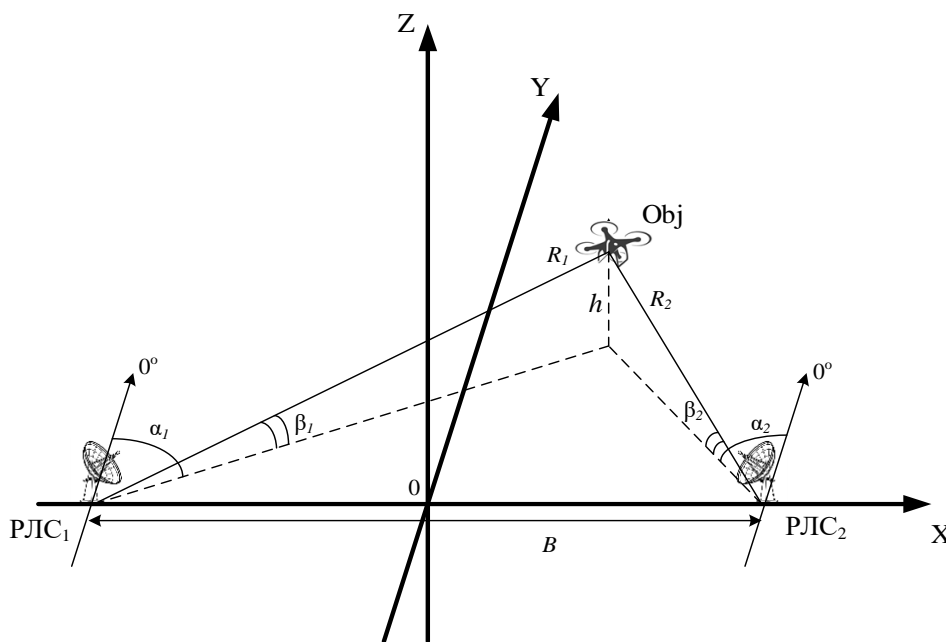


Рисунок 2 - Геометрические соотношения параметров определения координат ВО с помощью двухпозиционной системы

Figure 2 – Geometric relations of parameters for determining the coordinates of an air object using a two-position system

Для РЛС₂:

$$\begin{aligned}x_{2Obj} &= R_2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_2\right) \cos(\alpha_2) + \frac{B}{2}, \\y_{2Obj} &= R_2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_2\right) \sin(\alpha_2), \\z_{2Obj} &= R_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta_2\right).\end{aligned}\tag{2}$$

Оценка скорости ВО на любой из РЛС может быть вычислена как

$$V_{Obj} = \frac{\sqrt{(x_{Obj,n} - x_{Obj,n-1})^2 + (y_{Obj,n} - y_{Obj,n-1})^2 + (z_{Obj,n} - z_{Obj,n-1})^2}}{\Delta t},\tag{3}$$

где индексы n и $n - 1$ указывают моменты времени, в которые была произведена оценка координат, а $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ – интервал времени между оценками координат.

В РЛС₁ и РЛС₂ используются маркированные зондирующие сигналы. Моменты излучения зондирующих сигналов в них привязаны к единой шкале времени, но, в общем случае, различаются между собой, т. е. $t_{ir1,k} \neq t_{ir2,k}$. Для определенности установим $t_{ir2,k} = t_{ir1,k} + \delta T_s$, где δT_s – известная величина, которая вычисляется в РЛС₁ по измеренному значению $t_{ir1,k}$ и полученному по каналу связи от РЛС₂ значению $t_{ir2,k}$.

Поскольку моменты излучения зондирующих сигналов с обеих позиций различны, соответственно и дальности R_1 и R_2 тоже отличаются. В РЛС₁ и РЛС₂ будут измеряться дальности, соответствующие различным моментам времени, которые обозначим как $t_{Obj1,k}$ и $t_{Obj2,k}$, соответственно. Для получаемых в системе измерений можно записать:

$$\begin{aligned}Z_{R1}(t_{r1,k}) &= R_1(t_{r1,k}) + \eta_{mR1}(k); \\Z_{R2}(t_{r2,k}) &= R_2(t_{r2,k}) + \eta_{mR2}(k); \\Z_{\alpha1}(t_{r1,k}) &= \alpha_1(t_{r1,k}) + \eta_{ma1}(k); \\Z_{\alpha2}(t_{r2,k}) &= \alpha_2(t_{r2,k}) + \eta_{ma2}(k).\end{aligned}\tag{4}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$Z_{R1}(t_{r1,k}), Z_{R2}(t_{r2,k}), Z_{\alpha1}(t_{r1,k}), Z_{\alpha2}(t_{r2,k})$ – измерения дальности и азимута в РЛС₁ и РЛС₂, соответственно;

$R_1(t_{r1,k}), R_2(t_{r2,k}), \alpha_1(t_{r1,k}), \alpha_2(t_{r2,k})$ – истинные значения дальности и азимутов для РЛС₁ и РЛС₂, соответственно;

$\eta_{mR1}(k), \eta_{mR2}(k), \eta_{ma1}(k), \eta_{ma2}(k)$ – погрешности измерений дальностей и азимутов, которые считаем независимыми дискретными белыми гауссовскими шумами с задаваемыми математическими ожиданиями и дисперсиями, соответственно.

При совместной обработке радиолокационной информации требуется приведение измерений к единому отсчету в пространстве, что достигается путем преобразования векторов измеренных параметров ВО из локальных систем координат, связанных с

позициями отдельных РЛС, в единую систему координат, связанную с центром объединения в прямоугольной системе координат.

После измерений параметров ВО в сферической системе координат на каждой из РЛС в отдельности информация передается в центр управления и обработки, где методами комплексирования [7–8] она уточняется как по сугубо угловой информации – формулы слева, так и по дальномерной – формулы справа:

$$x_{Obj} = \frac{B \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad x_{Obj} = \frac{(R_1 - R_2)(R_1 + R_2)}{2B}.$$

$$y_{Obj} = \frac{B \sin(\alpha_1) \sin(\alpha_2)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad y_{Obj} = \frac{\sqrt{[B^2 - (R_1 - R_2)^2][(R_1 + R_2)^2 - B^2]}}{2B}.$$

После реализации таким образом модели взаимного расположения автономных РЛС и ВО следует перейти к модели формирования эхо-сигнала.

Представление радиолокационных данных модели эхо-сигнала

Рассмотрим подробнее генерацию эхо-сигнала для моделирования – формирование отражений от ВО (БПЛА) совместно обозреваемого пространства, перекрываемого с позиции РЛС₁ и РЛС₂, на основе алгоритмов обзора. Смоделированные отражения в сочетании с работой блоков 2 и 3 (см. Рисунок 1) определяют кубическую структуру радиолокационной информации эхо-сигналов РЛС₁ и РЛС₂, после чего формируется два сигнала для режимов их функционирования. В ходе приема информации в самих приемных устройствах и каналах передачи неизбежно присутствуют помехи, которые накладываются на полезный сигнал и которые следует учитывать. Это возможные внутренние шумы, а также возможные внешние помехи искусственного и естественного происхождения, в том числе влияние метеоусловий (блок 3.3).

Моделирование траекторного сигнала выполняется для пачки зондирующих сигналов. Принятые сигналы хранятся в виде кубов данных, как показано на Рисунке 3. Осуществление обработки по разным осям куба данных соответствует оценке дальности, доплеровской частоты и углового положения ВО.

Таким образом, блок генерации эхо-сигнала формирует кубы данных – отражений эхо-сигналов для автономных распределенных РЛС₁ и РЛС₂, которые предназначены для формирования и ввода в блок центральной обработки данных цифрового сигнала.

Поставленная научная задача включает объединение получаемой разнотипной локационной кубической информации в единое информационно поле. Она требует проведения исследования на основе разработки моделей, методов и алгоритмов обработки больших объемов информации.

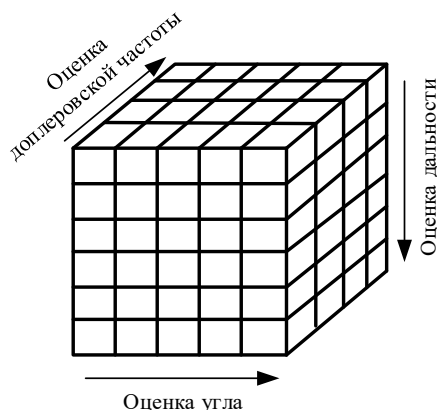


Рисунок 3 – Куб радиолокационных данных
Figure 3 – Radar Data Cube

Поскольку время формирования сигнала может занимать от нескольких минут до нескольких десятков минут, имитация сигнала осуществляется на отдельной высокопроизводительной специализированной рабочей станции на базе NVIDIA Tesla K20X, для математических вычислений в пакете компьютерного моделирования Matlab 2020a.

Предполагается, что обмен данными с блоком комплексной обработки и управления РЛС осуществляется при помощи высокоскоростного интерфейса. Ввод сигнала в алгоритмы указанных блоков обработки и комплексирования осуществляется программным модулем.

Моделирование режимов работы РЛС осуществляется с помощью комплекса программ: одна из них (см. Рисунок 1, блоки 1 и 2) формирует ввод исходных данных и взаимное положение распределенных РЛС и наблюдаемых ВО, а вторая (см. Рисунок 1, блок 3) – непосредственно радиолокационный эхо-сигнал от ВО.

Имея координаты взаимного положения автономных РЛС и наблюдаемого ВО в сферической системе координат, на каждой итерации возможно записать характеристики огибающей эхо-сигнала в виде кубической структуры, как было показано выше. Это позволяет избежать методических ошибок, возникающих при моделировании огибающей эхо-сигнала в декартовой системе координат. Кроме того, применение кубического представления эхо-сигнала делает его удобным математическим объектом для машинного и компьютерного исполнения, а также для преобразования (сжатия и маскирования) больших объемов информации в высокоскоростных каналах распределенных систем.

Регистрация экспериментальных данных при специализированных вариантах размещения РЛС

Имитационная модель отображения воздушной обстановки позволяет подгружать зарегистрированные экспериментальные данные, сформированные следующим образом.

На Рисунке 4 представлены специализированные варианты параллельного и последовательного размещения и ориентации двух РЛС в составе системы с общей зоной наблюдения [12, 13].

Технические характеристики РЛС₁ (для Рисунка 4а) [13]:

- зона обзора по углу места 102°;

- ширина диаграммы направленности (ДН) в вертикальной плоскости $1,7^\circ$;
- ширина ДН в горизонтальной плоскости 11° .

Технические характеристики РЛС₂ [13]:

- зона обзора по азимуту 102° ;
- ширина ДН в горизонтальной плоскости 4° ;
- ширина ДН в вертикальной плоскости 11° .

На Рисунке 4б РЛС₁ повернута на 90° , что позволяет достичь высокой скорости сканирования в вертикальной плоскости в узком секторе.

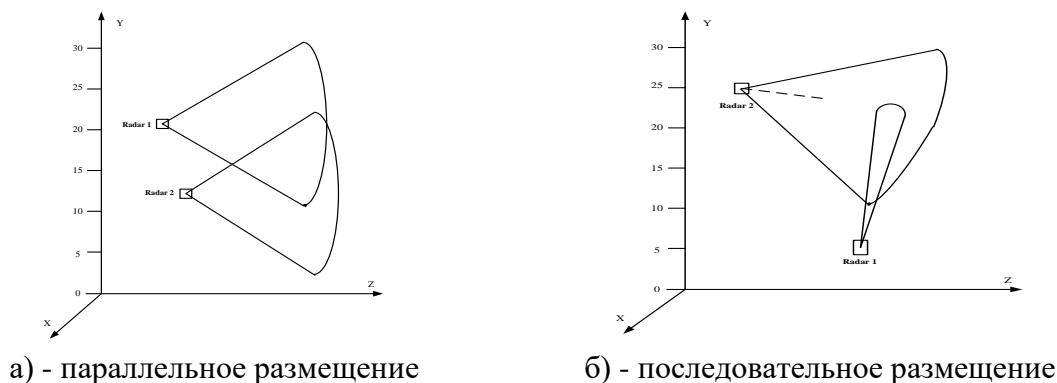


Рисунок 4 – Схемы размещения двух наземных РЛС с общей зоной наблюдения
 Figure 4 – Layout of two ground-based radars with a common coverage area

По результатам совместной обработки информации, зарегистрированной при помощи системы из двух РЛС обнаружения малоразмерных ВО, имеющих совместную зону наблюдения, вычисляются данные по трем координатам объекта: дальность относительно точки начала координат, высота (вычисляемая по отклонению в угломерной плоскости), OZ – боковое отклонение (в азимутальной плоскости).

В качестве объекта обнаружения с заданной ЭПР около 1 м^2 можно применять имитатор радиолокационной воздушной цели (ИРВЦ), состоящий из носителя – БПЛА с полезной нагрузкой, в качестве которой использовать радиоконтрастный ориентир.

В процессе работы были созданы базы данных БПЛА [19-21]. Выполнен анализ вариантов БПЛА, способных нести полезную нагрузку с требуемыми характеристиками по эффективной площади рассеяния, скорости и времени полета.

На основании результатов этого анализа спроектирован и изготовлен типовой вариант воздушного объекта-носителя типа гексакоптер на базе рамы DJI S900, включающий в качестве полезной нагрузки уголкового отражателя для достижения заданных эталонных характеристик.

Внешний вид типового воздушного объекта-носителя на базе гексакоптера представлен на Рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид типового воздушного объекта-носителя на базе гексакоптера
Figure 5 – External appearance of a typical air carrier object based on a hexacopter

Для достижения требуемой ЭПР был сконструирован угловый радиолокационный отражатель, рассчитанный на длину волны, используемую в РЛС [13-18]. В целях обеспечения одинакового среднего значения ЭПР при различных углах наблюдения в пределах полусферы (с учетом того, что обнаружение воздушного объекта производится с уровня земли) отражатель конструктивно представляет собой четыре трехгранных отражателя, объединенных каждый двумя общими гранями. Внешний вид отражателя показан на Рисунке 6.

Одной из реализованных в проведенных экспериментах траекторий была характерная для БПЛА траектория: старт на дальности 1500 м от РЛС₁, удаление до 3500 м с набором высоты до 750 м (боковое отклонение обусловлено сносом воздушного объекта ветром), разворот, возвращение к точке старта, посадка в ручном режиме.

При реализации в экспериментах схемы последовательного размещения РЛС₁ обеспечивает обзор узким сектором траектории воздушного объекта, а РЛС₂ – боковой обзор траектории воздушного объекта.



Рисунок 6 – Угловый радиолокационный отражатель
Figure 6 – Corner radar reflector

При параллельном размещении РЛС₁ и РЛС₂ обеспечивают боковой обзор траектории воздушного объекта учетом максимизации общей зоны наблюдения.

Параметры режима работы РЛС₁ и РЛС₂ в этом случае:

- минимальная длительность элементарного импульса 60 нс;
- минимальный период для некогерентного режима 115 мкс;

- минимальный период для когерентного режима 18 мкс (доплеровский режим);
- мощность излучения 170 Вт.

В результате проведенных экспериментов был накоплен необходимый набор статистических данных для реализации модели распределенной системы.

Результаты моделирование в MATLAB

Моделирование радиолокационной обстановки системы управления распределенными средствами выполнялось в MATLAB. Была реализована модель, позволившая получить оценки дальности и скорости наблюдаемых ВО двухпозиционной РЛС. Для наглядности модель выводит взаимное положение движущегося ВО и обеих станций в 2D и 3D графике и позволяет получать координаты объектов как в декартовой системе координат, так и в полярной [12,18].

После ввода исходных данных происходит моделирование движения объекта и расчет оценок координат взаимного положения в полярной системе координат РЛС₁ и РЛС₂. Результаты работы блока 2 (см. Рисунок 1) в момент времени, когда подвижный ВО попадает в зону совместного наблюдения, представлен на Рисунке 7.

Перевод данных из местной полярной системы координат в базовую декартову с центром в точке (0;0) и вывод информации в 2D и 3D графических видах имитатором для случая параллельного размещения РЛС представлен на Рисунках 8а и 8б. Добавление погрешностей происходит на входах блоков 4 модели (см. Рисунок 1).

Моделирование работы системы при определении дальности до воздушного объекта по имеющейся угломерной информации осуществляется при постепенном повышении среднеквадратического отклонения (СКО) шума, добавленного в измерения. В обоих вариантах размещения РЛС производится сравнение с результатом измерения дальности непосредственно каждой станции по отдельности.

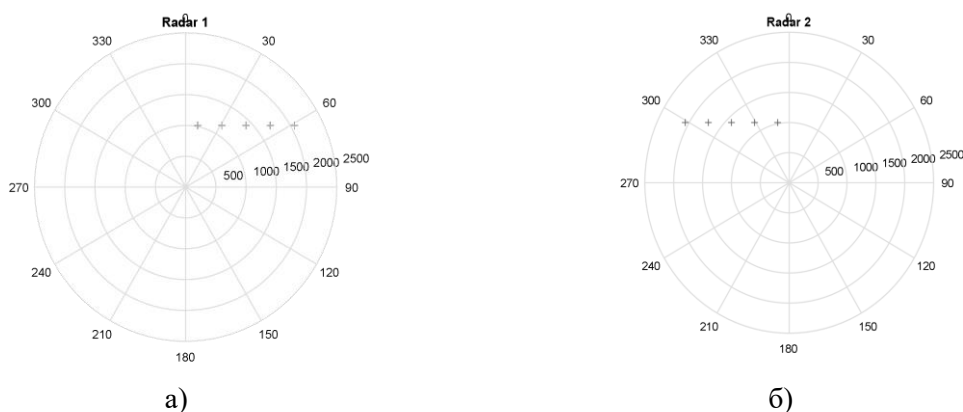


Рисунок 7 – Положение воздушного объекта в полярной системе координат относительно РЛС₁ (а) и РЛС₂ (б)

Figure 7 – The position of the airborne object in the polar coordinate system relative to Radar₁ (a) and Radar₂ (b)

На Рисунке 8 приведены 2D и 3D результаты моделирования при параллельном расположении обеих РЛС, на Рисунке 9 – при последовательном. Для наглядности на 3D результате моделирования знаком (^) показано истинное положение наблюдаемого воздушного объекта, а знаком (O) – его измеренное положение.

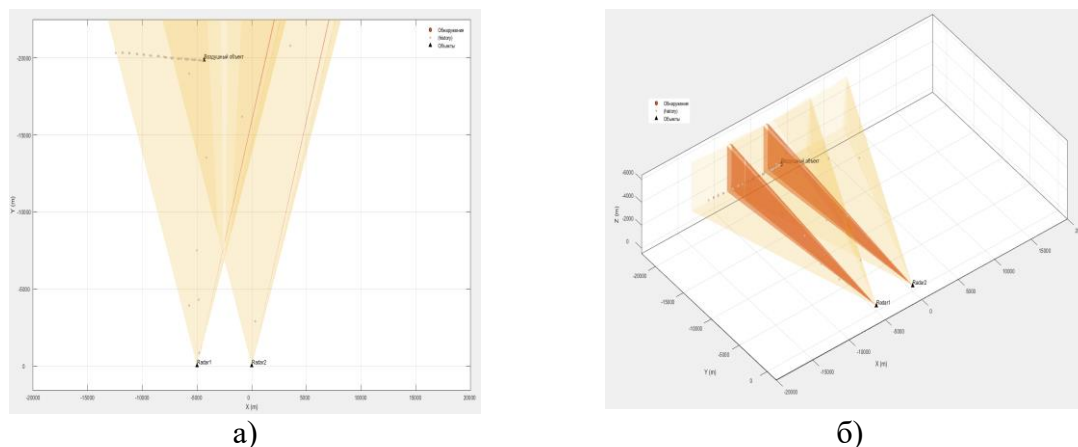


Рисунок 8 – Положение РЛС₁, РЛС₂ и воздушного объекта в 2D (а) и 3D (б) при параллельном размещении РЛС
 Figure 8 – The position of Radar₁, Radar₂ and the airborne object in 2D (a) and 3D (b) with parallel placement of radar posts

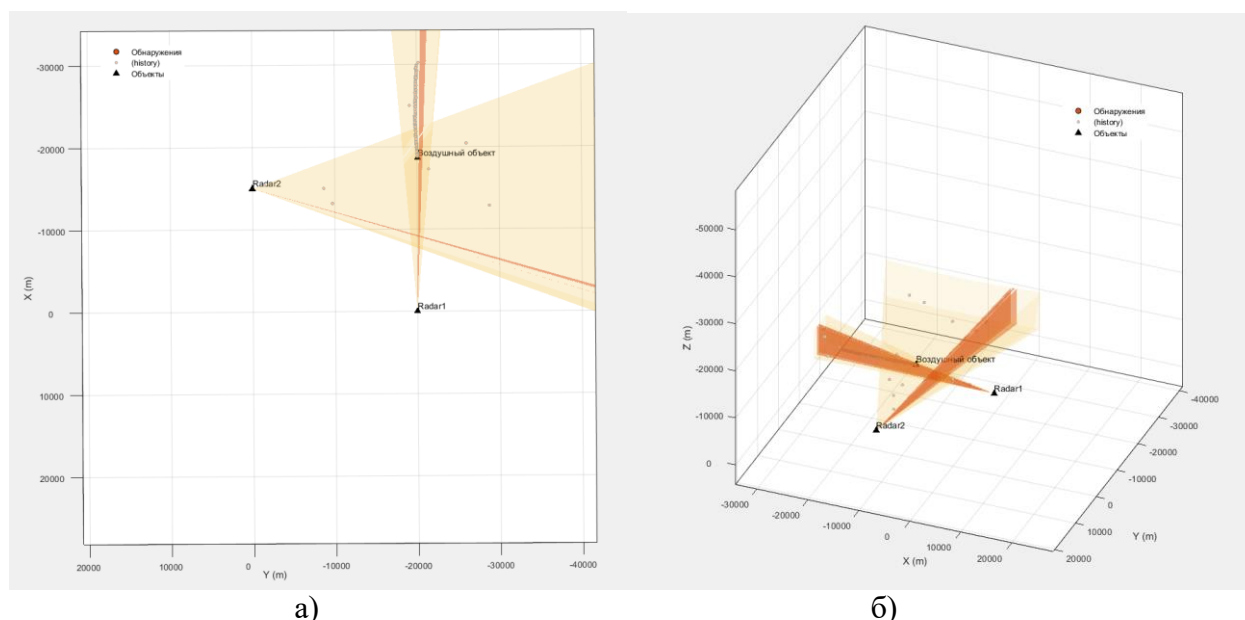


Рисунок 9 – Положение РЛС₁, РЛС₂ и воздушного объекта в 2D (а) и 3D (б) при последовательном размещении РЛС
 Figure 9 – The position of Radar₁, Radar₂ and the airborne object in 2D (a) and 3D (b) for the sequential placement of radar posts

Программа, реализующая модель, может обеспечивать завязку траекторий и принятие решения о дальнейшем сопровождении ВО распределенными РЛС. Она может функционировать как отдельно, так и в составе программного комплекса, реализующего общую систему. В ней предусмотрена возможность отдельно задавать параметры каждой из РЛС, что приближает их к реально существующим образцам. Отработка различных сценариев позволяет ускорить развертывание системы за счет сокращения этапа полунатурных и натурных испытаний.

К реальным условиям функционирования модель приближают сформированные базы данных характеристик беспилотных летательных систем самолетного,

вертолетного и мультикоптерного типа [19-21], а также учет влияния погодных условий на распространение радиоволн в естественных условиях [22].

Кроме перечисленных возможностей модель содержит процедуру прогнозирования сбоев, вызванных влиянием осадков, и оценку долгосрочной статистики затухания электромагнитных радиоволн в дожде.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06029.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-29-06029.

Заключение

Как показывает практика, улучшения тактических характеристик радиолокационных систем можно достичь, не прибегая к модернизации их аппаратной составляющей, а лишь за счет усложнения схемы использования радиолокационных станций и алгоритмов обработки радиолокационной информации от них.

Имитационная модель, разработанная и реализуемая в пакете компьютерного моделирования MATLAB, позволяет моделировать движение ВО, определять их положение в пространстве (угловые координаты), а также осуществлять процесс совместной обработки информации в системе с двумя РЛС при наличии ошибок измерения.

Разработанная модель применима для определения тактико-технических характеристик на этапе проектирования указанных радиолокационных систем и их программного обеспечения. Она позволяет объединить данные об обнаружении воздушных объектов от двух автономных РЛС с общей зоной наблюдения в единое информационное поле в режиме реального времени.

Очевидно, что актуальными задачами по развитию рассмотренной темы являются моделирование сопровождения воздушных объектов, движущихся по сложным траекториям, а также отладка и оценка при помощи разработанной модели современных алгоритмов их распознавания и классификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mahafza B.R. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. Chapman and Hall/CRC; 2016;(3):743. Available from: <http://dx.doi.org/10.1201/b14904>
2. Shishanov S.V., Myakinkov A.V. The system of the circular review for vehicles based on ultra-wideband sensors. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*.2015; (2):55-61. (In Russ.)
3. Gimignani M, Paparo M, Rossi D, Scaccianoce S. RF design and technology supporting Active Safety in automotive applications. *2013 IEEE 10th International Conference on ASIC[Internet]. IEEE*. 2013:1-4. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/asicon.2013.6811875>
4. Верба В.С., Меркулов В.И. (ред.). *Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах*. Москва: Радиотехника, 2010;(3):472.
5. Ji, Z., Prokhorov, D.: Radar-vision fusion for object classification. *In: 2008 11th International Conference on Information Fusion*. 2008:1–7.

6. William L. Melvin, James A. Scheer. *Principles of Modern Radar* vol. II: *Advanced Techniques*. Scitech publishing. 2013;2.
7. Зайцев Д.В. *Многопозиционные радиолокационные системы*. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. Москва: Радиотехника; 2007:96.
8. Raol J.R. *Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB*. CRC Press; 2009:534. Available from: <http://dx.doi.org/10.1201/9781439800058>.
9. Nenashev V. A., Sentsov A. A., Shepeta A. P., "Formation of Radar Image the Earth's Surface in the Front Zone Review Two-Position Systems Airborne Radar," 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2019, pp. 1-5. <http://doi.org/10.1109/weconf.2019.8840641>
10. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства / Под ред. В.С. Вербы, Б.Г., Татарского. Монография. М.: Радиотехника, 2014. - 576 с.
11. Ненашев В.А., Шепета А.П. Точностные характеристики определения координат объектов в двухпозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС. *Информационно-управляющие системы*. 2020;(2):31-36. Available from: <http://www.i-us.ru/index.php/ius/article/view/4981>.
12. Nenashev V. A., Shepeta A. P., Grigoriev E. K., Spindzak I. I., Sentsov A. A., Kapranova E. A. The program for calculating the mutual position of the two-position radar and the observed objects in the polar and Cartesian coordinate systems // Certificate of state registration of computer programs № 2018661851 RF, publ. 09/20/2018. ROSPATENT.
13. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar. *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE; 2018;5. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/weconf.2018.8604329>.
14. Wang R, Deng Y. *Bistatic InSAR. Bistatic SAR System and Signal Processing Technology*. Springer Singapore; 2017:235–275. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-3078-9_8.
15. Shepeta A.P., Nenashev V. A. Modeling Algorithm for SAR. *Proc. of SPIE Remote Sensing, Toulouse, France*; 2015:9642; 96420X-1-96420X-8. <https://doi.org/10.1117/12.2194569>.
16. Toro G.F., Tsourdos A. *UAV sensors for environmental monitoring*. Belgrade: MDPI. 2018:661. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/books978-3-03842-754-4>.
17. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications. Vol 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*. London. Scitech Publishing, 2017;1. Available from: http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f_pti.
18. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion*. London. Scitech Publishing. 2017;2.
19. Св-во гос. рег. базы данных 2020621680, Российская Федерация. База данных характеристик беспилотных летательных систем вертолетного типа / Сергеев М.Б., Григорьев Е.К., Ненашев В.А., Сенцов А.А., Ненашев С.А.; правообладатель Санкт-Петербургский гос. аэрокосм. ун-т. - № 2020621680; дата поступл. 09.09.2020; дата регистр. 15.09.2020.
20. Св-во гос. рег. базы данных 2020621690, Российская Федерация. База данных характеристик беспилотных летательных систем самолетного типа. / Ненашев В.А.,

- Григорьев Е.К., Ненашев С.А.; правообладатель Санкт-Петербургский гос. аэрокосм. ун-т. - № 2020621690; дата поступл. 07.09.2020; дата регистр. 16.09.2020.
21. Св-во гос. рег. базы данных 2020621745, Российская Федерация. База данных характеристик беспилотных летательных систем мультикоптерного типа / Сергеев М.Б., Григорьев Е.К., Ненашев В.А., Сенцов А.А., Ненашев С.А.; правообладатель Санкт-Петербургский гос. аэрокосм. ун-т. - № 2020621745; дата поступл. 10.09.2020; дата регистр.
22. Сенцов А.А., Иванова Г.Р. Моделирование погонного ослабления радиоволн в дожде для проектирования радиолокационных систем. Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса «Студент года 2020». Издательство: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», Петрозаводск, 2020: 99-106.

REFERENCES

1. Mahafza B.R. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. Chapman and Hall/CRC; 2016;(3):743. Available from: <http://dx.doi.org/10.1201/b14904>.
2. Shishanov S.V., Myakinkov A.V. The system of the circular review for vehicles based on ultra-wideband sensors. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2015; (2):55-61. (In Russ.)
3. Gimignani M, Paparo M, Rossi D, Scaccianoce S. RF design and technology supporting Active Safety in automotive applications. *2013 IEEE 10th International Conference on ASIC. IEEE*; 2013:1-4. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/asicon.2013.6811875>.
4. Verba V. S., Merkulov V. I. (ed.). *Estimation of range and speed in radar systems*. M.: Radiotekhnika. 2010;3. (In Russ.)
5. Ji, Z., Prokhorov, D.: Radar-vision fusion for object classification. *In: 2008 11th International Conference on Information Fusion*. 2008:1–7.
6. William L. Melvin, James A. Scheer. *Principles of Modern Radar vol. II: Advanced Techniques*. Scitech publishing. 2013;(2):2300.
7. Zaitsev D.V. *multi-Position radar systems. Methods and algorithms for processing information under interference conditions*. Moscow: Radio Engineering; 2007. (In Russ.)
8. Raol J.R. *Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB*. CRC Press; 2009:534. Available from: <http://dx.doi.org/10.1201/9781439800058>.
9. Nenashev V. A., Sentsov A. A., Shepeta A. P., "Formation of Radar Image the Earth's Surface in the Front Zone Review Two-Position Systems Airborne Radar," 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2019, pp. 1-5. <http://doi.org/10.1109/weconf.2019.8840641>
10. Radar systems for aerospace monitoring of the earth's surface and airspace / Ed. V.S. Willow, B.G., Tatarsky. Monograph. M.: Radiotekhnika, 2014. p. 576. (In Russ.)
11. Nenashev V.A., Shepeta A.P. Precision characteristics of determining the coordinates of objects in a two-position system of small onboard radars. *Information and Control Systems*. 2020;(2):31-36. Available from: <http://www.i-us.ru/index.php/ius/article/view/4981>. (In Russ.)
12. Nenashev V. A., Shepeta A. P., Grigoriev E. K., Spindzak I. I., Sentsov A. A., Kapranova E. A. The program for calculating the mutual position of the two-position radar and the observed objects in the polar and Cartesian coordinate systems // Certificate of state registration of computer programs № 2018661851 RF, publ. 09/20/2018. ROSPATENT.
13. Nenashev VA, Sentsov AA, Shepeta AP. The Problem of Determination of Coordinates of

- Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar. *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE.2018;5. Available from:<http://dx.doi.org/10.1109/weconf.2018.8604329>.
14. Wang R, Deng Y. *Bistatic InSAR. Bistatic SAR System and Signal Processing Technology*. Springer Singapore; 2017:235–275.
Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-3078-9_8.
 15. Shepeta A. P., Nenashev V. A. Modeling Algorithm for SAR. *Proc. of SPIE Remote Sensing, Toulouse, France*; 2015:9642; 96420X-1-96420X-8.
<https://doi.org/10.1117/12.2194569>.
 16. Toro G.F., Tsourdos A. *UAV sensors for environmental monitoring*. Belgrade: MDPI. 2018:661; Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/books978-3-03842-754-4>.
 17. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications. Vol 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*. London. Scitech Publishing. 2017;1. Available from: http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f_pti.
 18. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion*. London. Scitech Publishing. 2017;2.
 19. Sergeev M.B., et al. Baza dannyh karakteristik bespilotnyh letatel'nyh sistem vertoletnogo tipa [Database of characteristics of unmanned aerial systems of helicopter type]. Certificate of state registration no. 2020621680, 2020.
 20. Nenashev V.A., et al. Baza dannyh karakteristik bespilotnyh letatel'nyh sistem samoletnogo tipa [Database of characteristics of unmanned aerial systems of aircraft type]. Certificate of state registration no. 2020621745, 2020. 25.09.2020.
 21. Sergeev M.B., et al. Baza dannyh karakteristik bespilotnyh letatel'nyh sistem mul'tikopternogo tipa [Database of characteristics of unmanned aerial systems of multicopter type]. Certificate of state registration no. 2020621745, 2020.
 22. Sentsov A. A., Ivanova G. R. Simulation of linear attenuation of radio waves in rain for the design of radar systems. Collection of articles of the international research competition "student of the year 2020". Publisher: international center for scientific partnership "New Science", Petrozavodsk, 2020:99-106. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергеев Михаил Борисович, доктор техн. наук, профессор, Институт вычислительных систем и программирования, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: mbse@mail.ru
ORCID: [0000-0002-3845-9277](https://orcid.org/0000-0002-3845-9277)

Mikhail B. Sergeev, Doctor of Engineering Sci., Professor, Institute of Computing Systems and Programming, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation”, St. Petersburg, Russian Federation.

Сенцов Антон Александрович, канд. техн. наук, доцент, Институт вычислительных систем и программирования, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: toxx@list.ru
ORCID: [0000-0002-0860-7873](https://orcid.org/0000-0002-0860-7873)

Anton A. Sentsov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Institute of Computing Systems and Programming, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation”, St. Petersburg, Russian Federation.

Григорьев Евгений Константинович, ассистент, Институт вычислительных систем и программирования, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: ev.grig95@gmail.com

ORCID: [0000-0001-5981-4074](https://orcid.org/0000-0001-5981-4074)

Evgeniy K. Grigoryev, Assistant professor, Institute of Computing Systems and Programming, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation.

Ненашев Сергей Александрович, студент, Институт вычислительных систем и программирования, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: nenashev_sergey178@mail.ru

ORCID: [0000-0002-6913-5590](https://orcid.org/0000-0002-6913-5590)

Sergey A. Nenashev, Student, Institute of Computing Systems and Programming, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation.