

Труды МАИ. 2022. № 123
Trudy MAI, 2022, no. 123

Научная статья
УДК 621.396.96

DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)

СИНТЕЗ МАЛОГАБАРИТНОГО ФАЗОВОГО ПЕЛЕНГАТОРА АВИАЦИОННОГО БАЗИРОВАНИЯ

Андрей Вадимович Азаров¹, Максим Николаевич Караваев²,
Сергей Сергеевич Рожков³, Андрей Олегович Славянский⁴✉,
Константин Андреевич Смолка⁵

^{1,2,3,4}Научно-технологический центр «Системы геомониторинга»,

Королев, Московская область

⁵Университет ИТМО,

Санкт-Петербург, Россия

¹andrey_91@bk.ru

²kmn.2693@yandex.ru

³SSR.kgd@mail.ru

⁴andrey.slavyanskiy@gmail.com ✉

⁵konstantin.smolka@metalab.ifmo.ru

Аннотация. Целью работы является создание малогабаритного комплекса пассивной радиолокации для размещения на беспилотном летательном аппарате. Рассмотрены принципы построения радиопеленгатора, работающего в диапазоне от 1 до 18 ГГц, с учетом ограничений по массогабаритным характеристикам. Предложена антенная система, обеспечивающая высокую вероятность получения азимута на источник

радиоизлучения с точностью до одного градуса в зоне обзора до 180 градусов. Рассмотрена возможность определения географических координат источников радиоизлучения при использовании пеленгатора на беспилотном летательном аппарате.

Ключевые слова: радиолокация, фазовая пеленгация, антенная система, беспилотный летательный аппарат

Для цитирования: Азаров А.В., Карavaев М.Н., Рожков С.С., Славянский А.О., Смолка К.А. Синтез малогабаритного фазового пеленгатора авиационного базирования // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)

SYNTHESIS OF THE AIRCRAFT-BASED PHASE DIRECTION FINDER

Andrey V. Azarov¹, Maxim N. Karavaev², Sergey S. Rozhkov³,

Andrey O. Slavyansky⁴✉, Konstantin A. Smolka⁵

^{1,2,3,4}STC "Geomonitoring Systems", Saint Petersburg, Russia

⁵ITMO University, Saint Petersburg, Russia

¹andrey_91@bk.ru

²kmn.2693@yandex.ru

³SSR.kgd@mail.ru

⁴andrey.slavyanskiy@gmail.com ✉

⁵konstantin.smolka@metalab.ifmo.ru

Abstract. The aim of the work is to create a small-sized passive radar complex for placement on an unmanned aerial vehicle.

The principles of construction of a radio direction finder operating in the range from 1 to 18 GHz, limited on weight and size characteristics, are considered. A direction finder with a different number of antennas (from three to five) was simulated.

An antenna system is proposed that provides a high probability of obtaining an azimuth to a radio source with an accuracy of up to one degree in the viewing area up to 180 degrees with elements representing a combined spiral antenna consisting of printed, hemispherical and cylindrical spiral antennas using plates of radio-absorbing material. Laboratory models of antennas were created and measured. A comparative analysis of the characteristics of the mathematical model and the antenna layout created by 3D printing was carried out, according to the results of which it should be noted the high efficiency of the manufacturing method used due to the high repeatability of the results, low cost and high speed of sample production.

When placing a passive radar complex on a UAV, it is possible to determine not only the direction to the radiation source – its angular, but also geographical coordinates, and hence the range to the source of signal. The calculation of several bearings on the source of signal from different points of the UAV trajectory spaced in the plane allows us to solve the problem of locating it using the maximum likelihood method based on a set of measurements of bearings on the source and UAV motion parameters (angle measurements and altimeter information).

Keywords: radar, phase direction finding, antenna system, unmanned aerial vehicle

For citation: Azarov A.V., Karavaev M.N., Rozhkov S.S., Slavyanskiy A.O., Smolka K.A. Synthesis of the aircraft-based phase direction finder. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)

Введение

Пассивная радиолокация – пеленгование и определение местоположения источников радиоизлучений, является важным направлением мониторинга в интересах гражданских и специальных служб и применяется для контроля использования радиочастотного спектра, контроля радиообстановки, в том числе при проведении массовых мероприятий, а также для поиска, выявления и локализации источников побочных и помеховых излучений [1].

Аппаратура пассивной радиолокации позволяет обнаруживать источники радиоизлучений на значительных дальностях, определять угловые и географические координаты источников, измерять и проводить анализ параметров сигналов и помех [2]. При этом основным достоинством пассивной радиолокации следует считать скрытность работы, так как отсутствует собственное высокочастотное излучение.

При проведении мероприятий радиоконтроля в основном используются наземные стационарные, мобильные или носимые средства пассивной радиолокации [3]. Однако в связи с невысокой дальностью их работы, ограниченной

высотой подъема антенны, применение подобных средств ограничено локальным районом (порядка нескольких десятков километров).

Разработчики малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предлагают использовать свои носители в комплексах дистанционного зондирования земной поверхности [4]. В связи с увеличением массы полезной нагрузки малых беспилотных летательных аппаратах и уменьшением массогабаритных показателей комплексов пассивной радиолокации становится возможным использование малых БПЛА в качестве носителей. Размещение комплекса пассивной радиолокации на борту БПЛА при его полете на высотах от 150 до 5000 м позволит значительно увеличить дальность обнаружения и пеленгования источников радиоизлучений (ИРИ).

Целью данной работы является моделирование малогабаритного фазового пеленгатора и создание прототипа комплекса пассивной радиолокации для малого беспилотного летательного аппарата.

Моделируемый комплекс должен соответствовать следующим требованиям: точность $\pm 1^\circ$, поле зрения 180° в плоскости азимута перед БПЛА ($\pm 90^\circ$), динамический диапазон 40 дБ и общее время обработки менее 0.5 сек. Комплекс обрабатывает радиолокационные импульсы в рабочем диапазоне частот от 1 до 18 ГГц на промежуточной частоте обработки 150 МГц.

Для моделирования комплекса использовался пакет прикладных программ (ППП) MATLAB R2018b. Также в работе рассмотрена задача построения оптимальной антенно-фидерной системы комплекса и предложены антенные элементы, модель которых построена и проверена в пакете CST MICROWAVE STUDIO.

Принципы построения пеленгатора

Тремя основными методами, используемыми в пассивной радиолокации, являются разностно-дальномерный (РДМ), амплитудный и фазовый методы [5]. Каждый из трех методов был смоделирован в ППП MATLAB R2018b.

Во всех трех методах измеряют различия в сигналах, принимаемых двумя или более разнесенными антеннами. РДМ использует разницу во времени прихода одного сигнала на несколько антенн для расчета угла прихода (пеленга) и дальности до ИРИ. Степень точности РДМ зависит от расстояния между антеннами [6]. Воздушная платформа, для которой предназначен комплекс, обеспечивает расстояния не более 5 м, что делает РДМ непрактичным, так как для выполнения требованиям к комплексу расстояние между антеннами должно составлять несколько километров.

В методе сравнения амплитуд используются две направленные в разные стороны антенны так, что соотношение коэффициентов усиления для двух антенн будет уникальным для каждого угла в поле зрения [7]. Сравнивая соотношение амплитуд сигналов, принимаемых двумя антеннами, с известными диаграммами направленности, комплекс рассчитывает пеленг на ИРИ. Моделирование показало, что метод сравнения амплитуд не может определить пеленг в пределах $\pm 1^\circ$ с диапазоном 40 дБ.

Фазовая интерферометрия является методом, использованным в данной работе. Этот метод, как и РДМ, основан на определении временной задержки прихода сигнала между двумя или более антеннами [8]. Вместо измерения времени прихода

фазовая интерферометрия измеряет разность фаз сигналов между антеннами. В отличие от разницы во времени, разность фаз может быть точно измерена на коротких расстояниях. Так сигнал с частотой 12 ГГц претерпевает изменение фазы на 2π менее чем за пять сантиметров на пути распространения волны. Возможность точного измерения разности фаз делает метод фазовой интерферометрии более точным, чем РДМ при применении на БПЛА.

Наибольшая техническая трудность при реализации метода фазовой интерферометрии для определения направления заключается в устранении неоднозначностей [9]. Фазовые интерферометры могут измерять только разности фаз между $-\pi$ и π . Разности фаз за пределами этого диапазона приводят к неоднозначным решениям, и без дополнительной информации невозможно определить истинное значение пеленга на ИРИ [10]. Самый простой способ устранить неоднозначность - разместить две антенны интерферометра на расстоянии меньше, чем половина длины волны. Однако это не может быть использовано для разрабатываемого комплекса из-за широкого диапазона работы и малости требуемых расстояний между антеннами на высоких частотах.

Проблему неоднозначности можно решить, перейдя от двух антенн к нескольким – реализовать многобазовый фазовый пеленгатор [11], который принят за основной вариант в данной работе.

Синтез фазового пеленгатора начинается с выбора наибольшей базы, которая полностью определяет точность пеленгования при построении пеленгатора по «методу уточнений» и в значительной степени при использовании метода максимального правдоподобия.

Принцип выбора базы, следующей за максимальной, заключается в том, чтобы результаты измерений расходились достаточно сильно во всех интервалах однозначности меньших баз, кроме соответствующего истинному пеленгу [12]. Для правильного устранения неоднозначности необходимо, чтобы эта разница была больше, чем возможные ошибки измерений фаз с учетом шумов. По максимальной базе, определённой исходя из требуемой точности пеленгования и принятой величине погрешности фазы в каналах для первой зоны однозначности измерений, определяется следующая база. Далее по найденной базе находятся величины в других секторах однозначности максимальной базы. Процесс выбора дополнительных баз продолжается, пока во всех секторах неоднозначности максимальной базы не будет разности фаз, по значению меньшей величины возможной ошибки измерений фаз в каждом канале пеленгатора.

В работе выбран пеленгатор по схеме с опорной антенной [13], состоящий из четырех каналов приема (рисунок 1). Базы выбраны по вышеописанному методу, достоинством которого является то, что он не связан с видом закона распределения вероятностей случайных фазовых погрешностей. В частности, это могут быть паразитные фазовые сдвиги сигналов в приёмно-измерительных каналах пеленгатора, вызванные технологическими причинами [14].

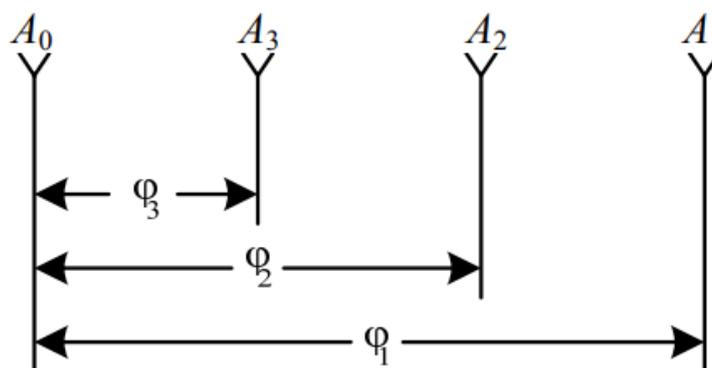


Рисунок 1 – Схема организации фазометрических баз на антенной решетке.

Пеленгатор с опорной антенной.

В ППП MATLAB2018b проведено моделирование пеленгатора с различным количеством антенн (от трех до пяти). Ограничением в размещении антенн являлся максимальный размер антенной решеткой, доступной для размещения на БПЛА – не более одного метра.

В соответствии с ранее описанным методом определены соотношения баз между антеннами. Так для случая четырех антенн в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц выбраны следующие базы, приведенные к длине волны, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Выбранные оптимальные значения баз пеленгатора

Частота, ГГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9
База 1-4	3,5	6,5	10	13,5	16,5	20	23,5	26,5	30
База 1-3	0,5	1,5	2	3	3,5	4,5	5	6	6,5
База 1-2	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1,5	1,5
Частота, ГГц	10	11	12	13	14	15	16	17	18
База 1-4	33,5	36,5	40	43,5	46,5	50	53,5	56,5	60
База 1-3	7	8	8,5	9,5	10	11	11,5	12,5	13
База 1-2	1,5	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5	3

Далее с учетом выбранных баз проведено моделирование процедуры определения угла прихода сигнала при помощи неэквидистантной антенной решетки пеленгатора по следующему алгоритму.

Полная разность фаз между сигналами на двух элементах антенной решетки определяется как

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 2 \cdot \pi \frac{B}{\lambda} \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где $\Delta\Phi$ - полная разность фаз между сигналами на двух элементах антенной решетки, рад; α – угол прихода сигнала (пеленг), рад (угол между направлением на источник сигнала и нормалью к плоскости размещения антенн); B – расстояние между элементами антенной решетки (длина базы), м; λ – длина волны, м.

Расстояние между элементами антенной решетки может быть выражено в длинах волн сигнала $P_{\text{баз}}$:

$$P_{\text{баз}} = \frac{B}{\lambda} \quad (2)$$

Откуда следует, что пеленг определяется как

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda \cdot \Delta\Phi}{2\pi \cdot B}\right) \quad (3)$$

Однако измеренная разность фаз $\Delta\varphi$ может принимать значение $[-\pi; +\pi)$ и отличаться от $\Delta\Phi$ на величину $2\pi \cdot k$

$$\Delta\Phi = \Delta\varphi + 2 \cdot \pi \cdot k \quad (4)$$

где $\Delta\varphi$ - измеренная разность фаз, рад. в диапазоне $[-\pi; +\pi)$; k – коэффициент неопределенности измерения фазы, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm k_{max}$

Максимальное значение k_{max} определяется

$$|k_{max}| = [P_{баз} \cdot |\sin(\alpha_{max})| - 0,5]_{ceil} \quad (5)$$

[...]_{ceil} – округление до целого в сторону $+\infty$

Таким образом для базы с параметром $P_{баз} \leq 0,5$ $k = 0$, $\Delta\Phi = \Delta\varphi$.

Для устранения неопределенности измерения применяют несколько баз различной длины. Базы и их параметры будем обозначать с индексами 1, 2, 3, ... $n_{баз}$.

Первая база самая младшая (короткая), последняя – старшая.

$$\frac{\sin(\alpha)}{\lambda} = \frac{k_1 + F_1}{B_1} = \frac{k_2 + F_2}{B_2} = \dots = \frac{k_i + F_i}{B_i}$$

$$F_i = \frac{\Delta\varphi_i}{2\pi}$$

где F_i - нормированная разность фаз на i -той базе, $[-0.5, +0.5)$.

Значения k для различных баз связаны выражением (6), записанного для частного случая баз 1 и 2:

$$k_2 = \frac{B_2}{B_1} \left(k_1 + \frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} \right) - \frac{\Delta\varphi_2}{2\pi} \quad (6)$$

Из-за погрешностей измерения фаз (и длин баз) правая часть выражения может отличаться от целого значения. Если абсолютная ошибка (из-за погрешностей измерений и др.) в правой части выражения менее 0,5, то значение k_2 может быть точно вычислено

$$k_2 = \left| \frac{B_2}{B_1} \left(k_1 + \frac{\Delta\varphi_1'}{2\pi} \right) - \frac{\Delta\varphi_2'}{2\pi} \right|_{\text{round}} \quad (7)$$

$|\dots|_{\text{round}}$ – округление в сторону ближайшего целого. Величины с дробной частью $1/2$ – пограничные, поэтому можно округлять в любую сторону

то есть с условием

$$\left| \frac{B_2}{B_1} \times \Delta\varphi_1^{\sim} - \Delta\varphi_2^{\sim} \right| < \pi$$

или

$$\left| \Delta\varphi_{\text{max}}^{\sim} \right| < \pi \cdot \frac{B_1}{B_1 + B_2} = \frac{\pi}{1 + K_{B21}} \quad (8)$$

$$\Delta\varphi_i' = \Delta\varphi_i + \Delta\varphi_i^{\sim}$$

где $\Delta\varphi'$ – измеренное значение с погрешностью $\Delta\varphi^{\sim}$ – погрешность измерения разности фаз $\Delta\varphi$; B_1 – длина меньшей базы; B_2 – длина большей базы; $K_{B21} = B_2 / B_1$ (>1) – коэффициент баз.

Аналогично, сопоставляя правую часть выражения (7) до округления и после, можно оценить погрешности конкретных измерений

$$dk = \left(\frac{B_2}{B_1} \left(k_1 + \frac{\Delta\varphi_1'}{2\pi} \right) - \frac{\Delta\varphi_2'}{2\pi} \right) - k_2 = \frac{B_2}{B_1} \times \frac{\Delta\varphi_1^{\sim}}{2\pi} - \frac{\Delta\varphi_2^{\sim}}{2\pi}$$

или

$$K_{B21} \times F_1^{\sim} - F_2^{\sim} = dk \quad (9)$$

Полагая, что погрешности измерения разностей фаз на всех базах подчинены одному закону распределения с математическим ожиданием равным нулю, примем

$$F_1^{\sim} + F_2^{\sim} = 0$$

тогда можно уточнить [15] измеренную разность фаз как

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_2 &= \Delta\varphi_2' + \frac{2\pi \times dk}{K_{B21} + 1} \\ \Delta\varphi_1 &= \Delta\varphi_1' - \frac{2\pi \times dk}{K_{B21} + 1}\end{aligned}\quad (10)$$

и дальнейшие вычисления проводить по уточненной разности фаз.

Моделирование подтверждает, что при внесении поправок (10) вероятность правильной сбойки баз увеличивается, а также уменьшается погрешность разности фаз на старшей базе. Однако, если делать только частичную поправку

$$\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_2' + 0.5 \times \frac{2\pi \times dk}{K_{B21} + 1},$$

то характеристики определения пеленга на ИРИ (вероятность и погрешность) становятся точнее. Моделирование проводилось для всех исправных каналов при максимальной погрешности измерения фазы в канале ± 15 градусов в соответствии с законом равномерного распределения.

Из выражения (7), задавшись однозначной базой $B_0 = 0,5\lambda$ и измеренной полной разности фаз на ней $[-\pi; +\pi)$ получаем

$$\begin{aligned}k_{1\min} &= \left| -B_1 - \frac{\Delta\varphi_2'}{2\pi} \right|_{\text{round}} \\ k_{1\max} &= \left| +B_1 - \frac{\Delta\varphi_2'}{2\pi} \right|_{\text{round}}\end{aligned}$$

Для каждого k_1 от $k_{1\min}$ до $k_{1\max}$ (гипотезы) по описанному выше алгоритму выполняется сбойка баз и расчет полной разности фаз на старшей базе.

При этом для каждой из гипотез фиксируются все значения dk_i (9), и находится сумма модулей dk_i для каждой гипотезы:

$$abs_dk^{гипотеза\ g} = \sum_i abs(dk_i^{гипотеза\ g}).$$

Определив коэффициенты неопределенности измерения фазы, пеленг вычисляется следующим образом:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot B} \cdot (\Delta\varphi + 2 \cdot \pi \cdot k)\right) \quad (11)$$

По результатам моделирования получены следующие параметры пеленгатора:

- тип пеленгатора – с опорной антенной;
- количество антенных элементов – не менее четырех;
- минимальное расстояние между антенными элементами, обеспечивающее наименьшее количество гипотез неоднозначности на максимальной частоте рабочего диапазона – 49 мм;
- максимальное расстояние между антенными элементами, обеспечивающее заданную точность на минимальной частоте рабочего диапазона – 1000 мм.

Исходя из результатов синтеза пеленгатора и с учетом требований к размещению на БПЛА, разработана антенно-фидерная система и предложены варианты исполнения ее элементов, обеспечивающих требования к создаваемой системе.

Антенно-фидерная система

В системе предлагается использовать комбинированную спиральную антенну (КСА-РАЛ-1-18), состоящую из печатной, полусферической и цилиндрической спиральных антенн [16] с применением пластин радиопоглощающего материала (РПМ).

Такая конструкция антенны позволяет обеспечивать приём во всем диапазоне от 1 ГГц до 18 ГГц, но при этом коэффициент усиления (КУ) антенны из-за применения многослойной структуры с РПМ принимает отрицательные значения, что допустимо ввиду использования фазового метода пеленгации в пеленгаторе.

Такое решение в пользу применения сверхширокополосных антенн позволяет значительно сократить массогабаритные параметры системы [17]. Количество антенн и входных трактов в антенной системе сокращается до минимума, обеспечивающего необходимую точность измерений, что актуально при размещении пеленгатора на малых БПЛА.

Математическая модель антенны рассчитана для работы в заданном диапазоне частот. Характеристики, полученные путём электродинамического моделирования работы антенны, представлены на рисунках 2 и 3.

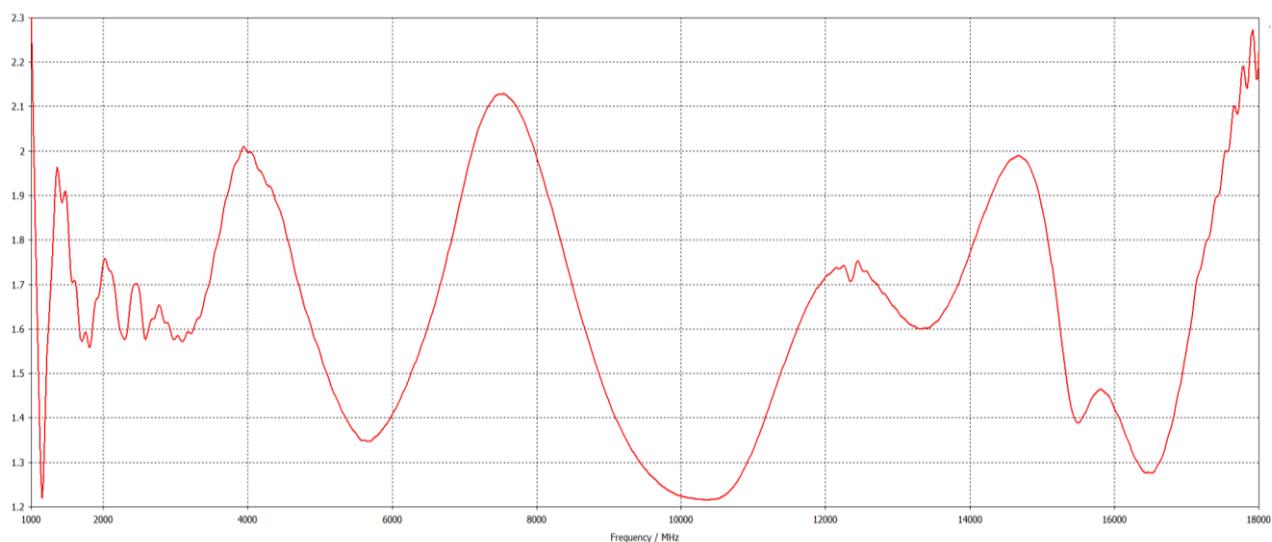


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты математической модели антенны КСА-РАЛ-1-18 в диапазоне 1...18 ГГц.

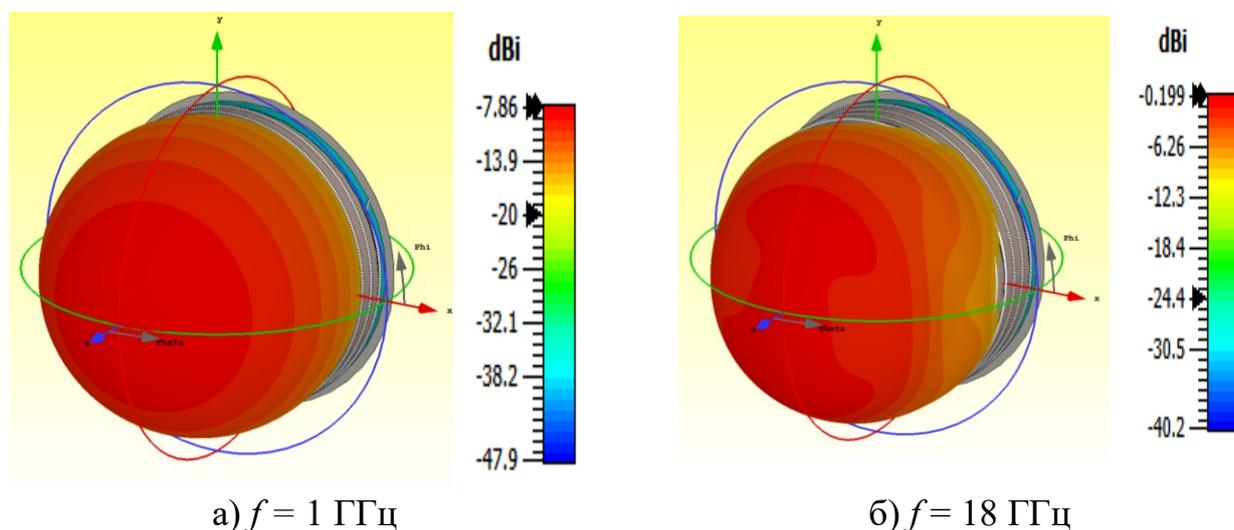


Рисунок 3 – Диаграмма направленности математической модели антенны КСА-РАЛ-1-18 на частотах 1 (а) и 18 (б) ГГц

С целью сокращения затрат, а главное, сокращения времени создания макета антенной системы фазового пеленгатора, лабораторные макеты (рисунок 4) антенн созданы методом быстрого прототипирования [18].

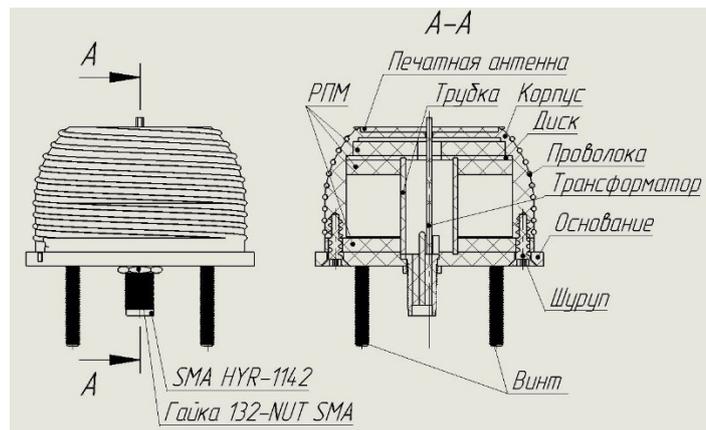


Рисунок 4 – Конструкция лабораторного макета антенны КСА-РАЛ-1-18

Для изготовления лабораторного макета КСА-РАЛ-1-18 была использована аддитивная технология послойного наплавления материала [19], в которой был использован пластик на основе полиэтилен-терефталевой смеси (PET-G). После печати детали были оклеены алюминиевой фольгой. Такой подход существенно сократил время изготовления макета в сравнении с классическими субтрактивными технологиями. В макете был использован близкий к расчётной компьютерной математической модели радиопоглощающий материал марки «ЗИПСИЛ 601 РПМ», высокочастотная коаксиальная розетка SMA HYR-1142, которая позволила закрепить волновой трансформатор благодаря конструкции крепления в торец платы и использованию гайки 132-NUT SMA. Для обеспечения электрического контакта между оклеенными частями был применён электропроводящий клей марки «Kontaktol». По результатам компьютерного математического моделирования волнового трансформатора и спирального излучателя были получены файлы для производства печатных плат, которые выполнены на двухстороннем фольгированном стеклотекстолите марки FR-4. Для намотки сферической и цилиндрической частей

антенны была использована медная проволока диаметром 2 мм. На рисунке 5 представлен собранный лабораторный макет антенны КСА-РАЛ-1-18.

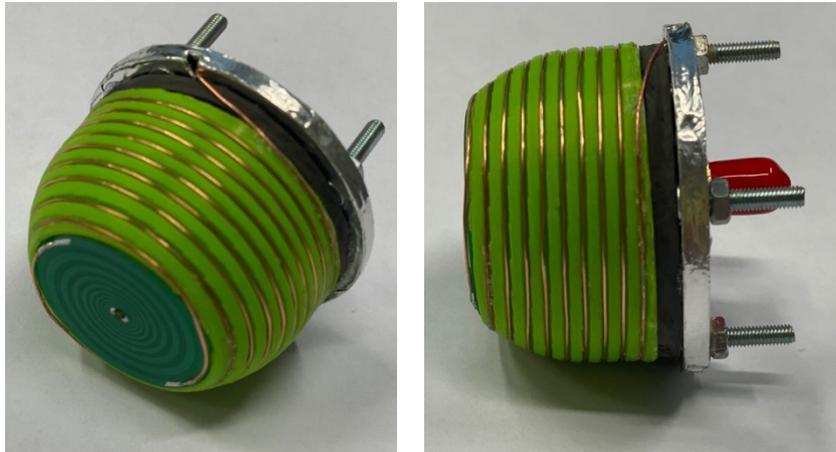


Рисунок 5 – Лабораторный макет антенны КСА-РАЛ-1-18.

На рисунках 6-9 представлены сравнения характеристики на различных частотах: коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и диаграмма направленности (ДН), полученные в результате натурного эксперимента в безэховой камере (БЭК) при измерении лабораторного образца антенны КСА-РАЛ-1-18 и математического моделирования антенны.

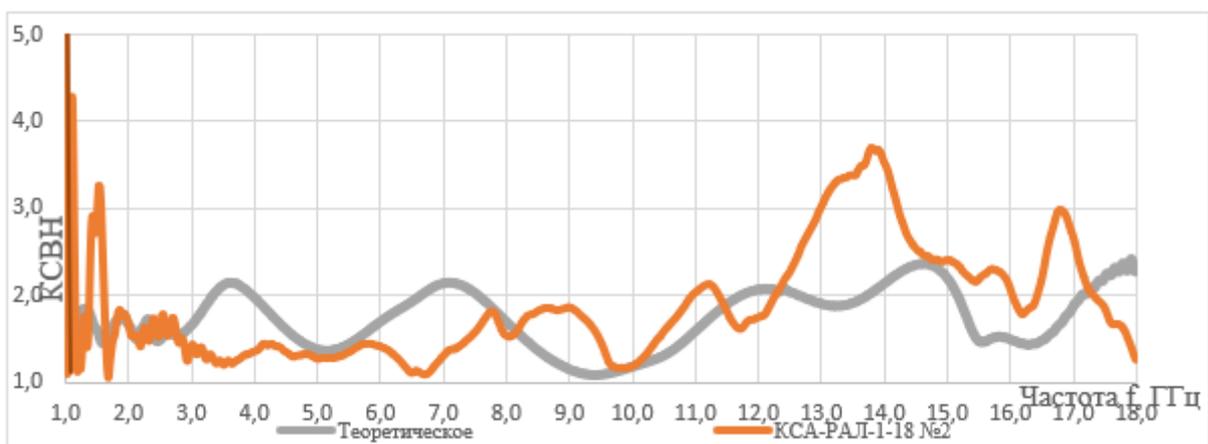


Рисунок 6 – Графики значений КСВН лабораторного макета (оранжевый) и математической модели антенны КСА-РАЛ-1-18 (серый) в диапазоне 1...18 ГГц.

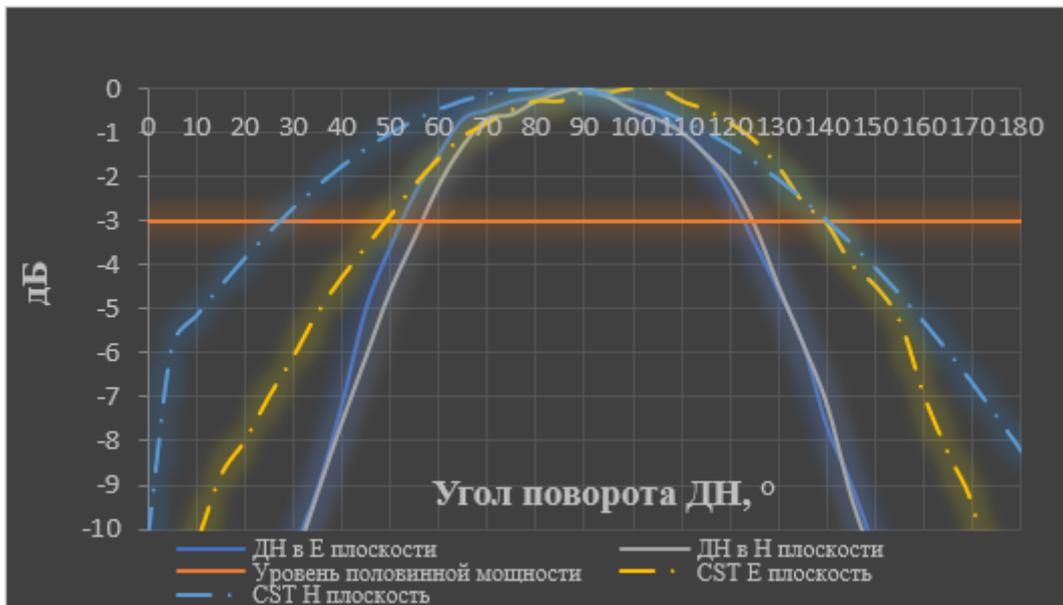


Рисунок 7 – Сравнение ДН лабораторного макета антенны КСА-РАЛ-18 и математической модели антенны на частоте 1 ГГц

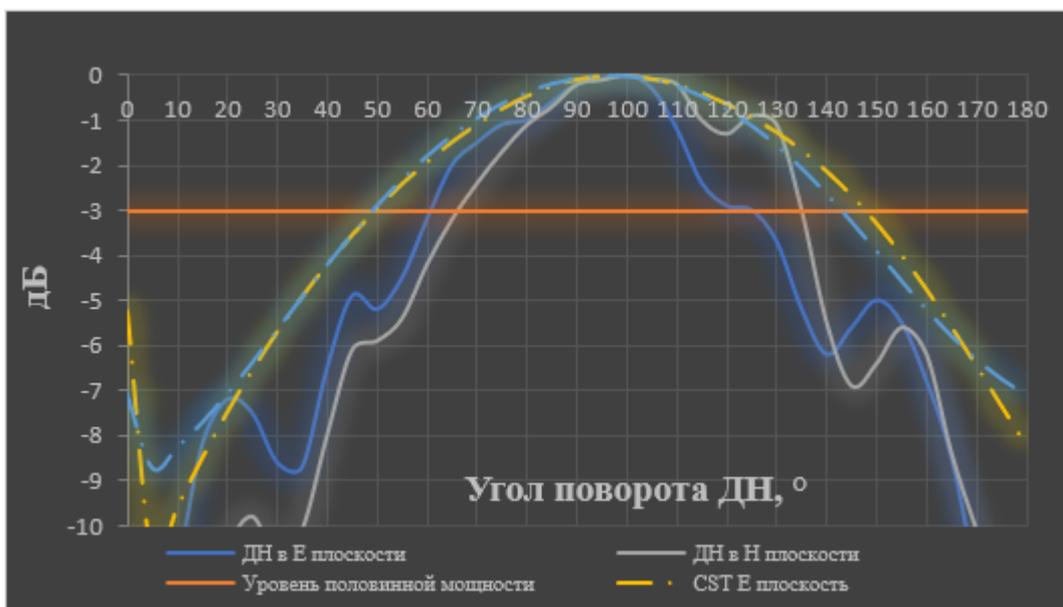


Рисунок 8 – Сравнение ДН лабораторного макета антенны КСА-РАЛ-18 и математической модели антенны на частоте 8 ГГц

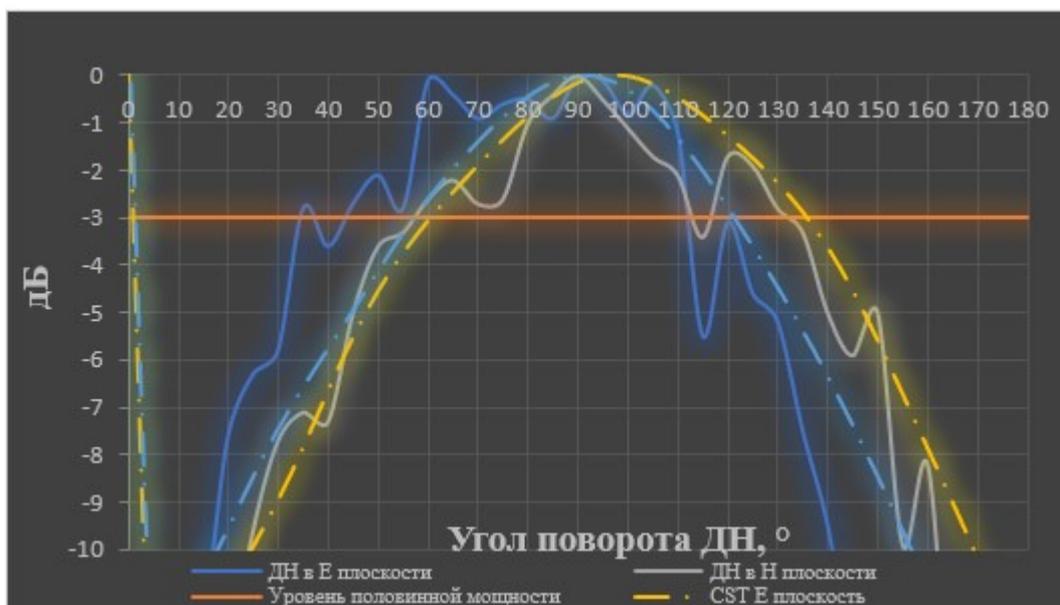


Рисунок 9 – Сравнение ДН лабораторного макета антенны КСА-РАЛ-18 и математической модели антенны на частоте 18 ГГц

Сравнение электродинамических характеристик (ЭДХ) математической модели антенны и лабораторного образца КСА-РАЛ-1-18 представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение ЭДХ антенны КСА-РАЛ-1-18

Технические характеристики	Математическая модель	Лабораторный образец
Значение КСВН в диапазоне рабочих частот	≤ 2.3	≤ 4.0
Коэффициент направленного действия антенны (в зависимости от частоты) D_0 , дБ	-15,70...0,65	-10,14...-1,95
Ширина диаграммы направленности по уровню -3дБ в Е и Н плоскостях, °	78...116 / 68...122	55...100 / 45...120
Габаритные размеры $\text{Ø} \times \text{В}$, мм \times мм	47.0 \times 37.2	48.0 \times 43.5

Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных обусловлены рядом причин, связанных с конструктивными и физическими расхождениями между математической моделью и реализованным макетом антенны:

- в математической модели корпус антенны выполнен из стеклотекстолита с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,3$, а в макете из-за сложности изготовления корпус выполнен из акрилонитрил бутадиен стирола (ABS пластик) с примерной $\epsilon = 2,4 \dots 5,0$;
- в математической модели используется библиотечный радиопоглощающий материал (РПМ) «ECCOSORB FGM-40», а в макете используется материал «ЗИПСИЛ 601 РПМ», данные о котором отсутствуют в библиотеке программы электродинамического расчёта;
- в макете используется SMA-разъём «HYR-1142», документация на который не регламентирует принимаемые значения характеристик КСВН разъёма после 6 ГГц.

Проводя итоговый сравнительный анализ характеристик математической модели и макета антенны, созданного путём 3D-печати, следует отметить высокую эффективность использованного метода изготовления ввиду высокой повторяемости результатов, низкой стоимости и высокой скорости производства образцов.

В рамках проведения работ по улучшению характеристик антенны были применены методы оптимизации параметров конструкции антенны [20], в частности толщин РПМ и расстояния от поверхности антенны до отражающей плоскости, что позволило добиться увеличения коэффициента направленного действия (КНД) в направлении основного лепестка на 2 дБ при незначительном увеличении обратного лепестка (рисунки 10 и 11).

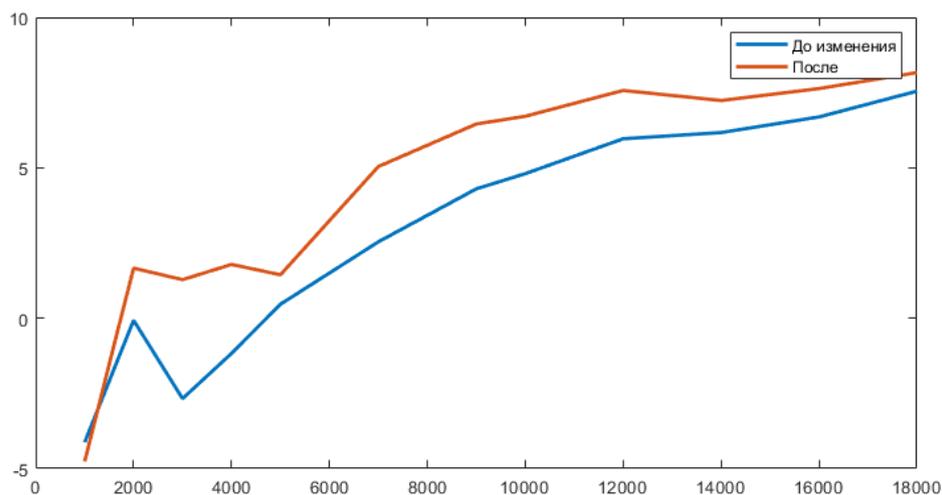


Рисунок 10 – Значения КНД в рабочем диапазоне частот до и после оптимизации

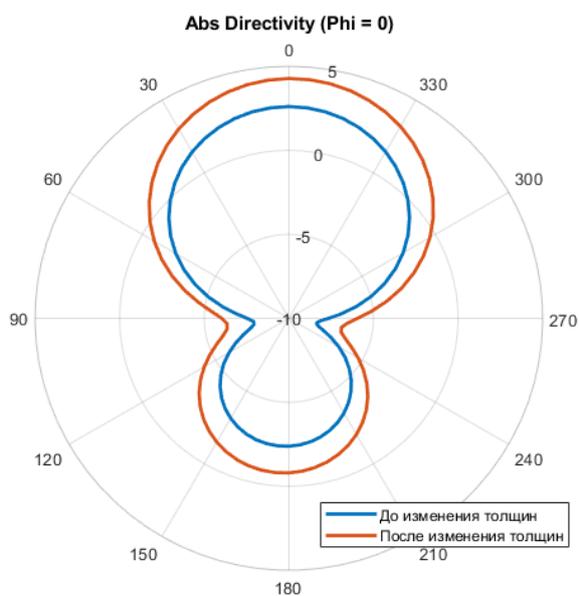


Рисунок 11 – Диаграмма направленности на частоте 4 ГГц до и после оптимизации

При дальнейшей оптимизации с несколькими целевыми функциями возможно найти компромиссное решение, при котором удастся увеличить КНД антенны без существенного изменения значений S_{11} и излучения в обратном направлении. Ограничения на оптимизацию накладывают сложная структура модели и большое количество параметров, которые необходимо учитывать при оптимизации.

Заключение

По результатам выполнения работы синтезирован фазовый пеленгатор, работающий в диапазоне от 1 до 18 ГГц. Разработана антенная система пеленгатора, обеспечивающая точность определения азимута на ИРИ до 1° в диапазоне до 4 ГГц и до 0.5° в диапазоне до 18 ГГц в зоне обзора до 180 градусов.

При размещении комплекса пассивной радиолокации на БПЛА возможно определение не только направления на источник излучения – его угловых, но и географических координат, а значит и дальности до ИРИ, т.е. становится возможной локализация ИРИ в пространстве. Вычисление нескольких пеленгов на ИРИ из различных точек траектории движения БПЛА, разнесенных в плоскости, позволяет решить задачу местоопределения ИРИ с использованием метода максимального правдоподобия по набору измерений пеленгов на источник и параметров движения БПЛА (угломерные измерения и информация высотомера).

Исходя из результатов синтеза пеленгатора и с учетом требований к размещению на БПЛА, разработаны, смоделированы и изготовлены антенные элементы, обеспечивающие требования к создаваемому комплексу. Рассмотрены вопросы оптимизации изготовленных лабораторных макетов антенн.

Общий вид БПЛА «Торус» с малогабаритным комплексом пассивной радиолокации представлен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Общий вид БПЛА «Торус»
с комплексом пассивной радиолокации

В ближайшее время планируется изготовление опытного образца и натурные испытания комплекса с применением БПЛА.

Список источников

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы и средства. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. - 492 с.
2. Яничкин А.Ю., Погорелов М.П., Черваков В.О., Потапов В.А. Анализ вариантов применения средств пассивной радиолокации в составе группировки радиотехнических средств // I Всероссийская научно-практическая конференция «Авионика. Актуальные вопросы состояния, эксплуатации и развития комплексов бортового РЭО воздушных судов, проблемы подготовки специалистов» (Воронеж, 17–18 марта 2016): сборник статей. – Воронеж: ВУНЦ ВВА, 2016. С. 333-336.
3. Слатин В.В. Новые сферы приложения пассивной радиолокации // Авиационные системы. 2015. № 2. С. 2-16.

4. Студеникин А.В., Михалин В.А., Иванов Р.В., Магаршак С.И. Практика применения перспективных беспилотных летательных аппаратов для мониторинга и аэрофотосъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 102-106.
5. Daniel Guerin, Shane Jackson, Jonathan Kelly. Passive Direction Finding. Worcester Polytechnic Institute, 2012, 94 p.
6. Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. С. 41-46.
7. Алексеев М.В. Амплитудные методы радиопеленгации // XXV Международный научно-исследовательский конкурс «Лучшая студенческая статья» (Пенза, 25 ноября 2019): сборник статей. - Пенза: Изд-во Наука и просвещение, 2019. С. 56-58.
8. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: Изд-во ТУСУР, 1994. - 102 с.
9. Денисов В.П., Дубинин Д.В., Крутиков М.В., Мещеряков А.А. Исследование работы фазового пеленгатора с квазиоптимальным устранением неоднозначности на наземных трассах // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. № 2 (24). С. 7-15.
10. Губаренко М.А. Устранение неоднозначности фазовых измерений // Проблемы современной науки и образования. 2014. № 11 (29). С. 18-19.
11. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. - 252 с.

12. Порубов Г.Г., Денисов В.П. Методика расчёта антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 3 (37). С. 25-32.
13. Денисов В.П., Дубинин Д.В., Ерофеев Д.В. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 11-16.
14. Криков Д.С. Синтезаторы сетки частот в радиоэлектронных системах // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90403>
15. Орешкин В.И., Мелёшин Ю.М., Цветков В.К. Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=161424>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)
16. Кохнюк Д.Д., Боровик И.А., Федоров Я.В. и др. Сверхширокополосная спиральная антенна // Патент RU 2687895 С1, 16.05.2019.
17. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В., Салихов М.Р. Применение спиральных антенн для бортовых систем и комплексов // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105685>
18. Челпанов И.Б., Никифоров С.О., Кочева Т.В., Никифоров Б.С. Машинные дизайн-технологии быстрого прототипирования // Вестник Бурятского государственного университета. 2010. № 9. С. 283-289.
19. Сергеева О.Ю. Аддитивные технологии и 3D-моделирование // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2018. Т. 10. № 4. С. 142-158.

20. Якимов А.Н., Бестугин А.Р., Киршина И.А. Оптимизация микроволновой антенны наземной радиолинии связи // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. Т. 24. № 2. С. 13-19.

References

1. Rembovskii A.M. *Radiomonitoring: zadachi, metody i sredstva* (Radio monitoring: tasks, methods and means), Moscow, Goryachaya linyaya-Telekom, 2006, 492 p.
2. Yanichkin A.Yu., Pogorelov M.P., Chervakov V.O., Potapov V.A. *I Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Avionika. Aktual'nye voprosy sostoyaniya, ekspluatatsii i razvitiya kompleksov bortovogo REO vozdushnykh sudov, problemy podgotovki spetsialistov»: sbornik statei*, Voronezh, VUNTs VVA, 2016, pp. 333-336.
3. Slatin V.V. *Aviatsionnye sistemy*, 2015, no. 2, pp. 2-16.
4. Studenikin A.V., Mikhailin V.A., Ivanov R.V., Magarshak S.I. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 4, pp. 102-106.
5. Daniel Guerin, Shane Jackson, Jonathan Kelly. *Passive Direction Finding*, Worcester Polytechnic Institute, 2012, 94 p.
6. Fokin G.A., Al'-Odkhari A.Kh. *T-COMM: Telekommunikatsii i transport*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 41-46.
7. Alekseev M.V. *XXV Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii konkurs «Luchshaya studencheskaya stat'ya»: sbornik statei*, Penza, Izd-vo Nauka i prosveshchenie, 2019, pp. 56-58.
8. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh system* (Theory of phase measuring systems), Tomsk, Izd-vo TUSUR, 1994, 102 p.

9. Denisov V.P., Dubinin D.V., Krutikov M.V., Meshcheryakov A.A. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2011, no. 2 (24), pp. 7-15.
10. Gubarenko M.A. *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 11 (29), pp. 18-19.
11. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatory* (Phase direction finders), Tomsk, Izd-vo TUSUR, 2002, 252 p.
12. Porubov G.G., Denisov V.P. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2015, no. 3 (37), pp. 25-32.
13. Denisov V.P., Dubinin D.V., Erofeev D.V. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2017, no. 4, pp. 11-16.
14. Krikov D.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90403>
15. Oreshkin V.I., Meleshin Yu.M., Tsvetkov V.K. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161424>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-10
16. Kokhnyuk D.D., Borovik I.A., Fedorov Ya.V. et al. *Patent RU 2687895 C1*, 16.05.2019.
17. Generalov A.G., Gadzhiev E.V., Salikhov M.R. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105685>
18. Chelpanov I.B., Nikiforov S.O., Kocheva T.V., Nikiforov B.S. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 9, pp. 283-289.
19. Sergeeva O.Yu. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyi internet-zhurnal*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 142-158.

20. Yakimov A.N., Bestugin A.R., Kirshina I.A. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 13-19.

Статья поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 16.03.2022; принята к публикации 20.04.2022.

The article was submitted on 31.01.2022; approved after reviewing on 16.03.2022; accepted for publication on 20.04.2022.