

Научная статья

УДК 621.396.676

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179688>

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МАКЕТА АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Алексей Станиславович Ермилов¹, Антон Юрьевич Балашов²✉,

Несреддин Ханмагомедович Гюльмагомедов³

^{1,2,3}АО «ВПК «НПО машиностроения», Московская область, Реутов, Россия

¹a.s.ermilov@vpk.npomash.ru

²a.yu.balashov@vpk.npomash.ru ✉

³940@vpk.npomash.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение аддитивных технологий при разработке и изготовлении действующего макета восьмиэлементной антенной решетки (АР), работающей в диапазоне частот L1 спутниковых радионавигационных систем. Проведены численные расчеты радиотехнических характеристик элементарного излучателя АР, выполненного в виде керамического микрополоскового элемента. Приведено описание конструкции АР, состоящей из основания и элементов АР. Разработано и изготовлено основание АР с применением 3D-печати. Проведенные результаты измерений коэффициента стоячей волны (КСВН) по напряжению подтвердили работоспособность АР в диапазоне частот L1

спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Осуществлено сопоставление результатов численных расчетов и измерений КСВН по напряжению.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, антенна GPS/ГЛОНАСС, антенная решетка

Для цитирования: Ермилов А.С., Балашов А.Ю., Гюльмагомедов Н.Х. Изготовление действующего макета антенной решетки изделий ракетно-космической техники с использованием аддитивных технологий // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179688>

Original article

MANUFACTURING OF FUNCTIONAL PROTOTYPE OF ANTENNA ARRAY FOR THE MISSILE AND SPACE EQUIPMENT USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

Alexey S. Ermilov¹, Anton Yu. Balashov^{2✉}, Nesreddin Kh. Gyulmagomedov³

^{1,2,3}JSC MIC NPO mashinostroeniya, Reutov, Moscow region.

¹a.s.ermilov@vpk.npomash.ru

²a.yu.balashov@vpk.npomash.ru ✉

³940@vpk.npomash.ru

Abstract. The article discusses the development and manufacture of an operating prototype of an eight-element antenna array, which operates in the L1 frequency range of satellite radio navigation systems, using additive technologies. The widespread use of an antenna array for receiving navigation signals is currently found in adaptive noise protection systems

with digital generation of a radiation pattern of the required shape. Calculations of the radio technical characteristics of an elementary emitter of antenna array providing operability in the L1 frequency range of satellite radio navigation systems have been carried out. The emitter is made in the form of a ceramic microstrip antenna, which consists of a silver emitting element, a ceramic substrate, an exciting pin and a metal ground. The profile of the radiating element is made in the form of a square element with chamfers at the edges, so that the antenna element has a circular polarization of the electromagnetic field. The design of the antenna array consisting of a base and 8 radiators is described. The configuration of the developed antenna array was chosen taking into account the provision of minimum geometric dimensions and minimizing interference between the emitters. The maximum number of radio interference that can be suppressed by the antenna array is one less than the number of array emitters and is 7. To confirm the operability of the selected antenna array configuration, a working prototype consisting of microstrip ceramic radiators and a base was made. The base is a cutout from the side surface of a cylinder with a diameter of ~ 400 mm. The base is made of PLA plastic using 3D printing technology. To form a metal ground on the surface of the base, metallization with a thickness of 10 microns was carried out. The results of the VSWR measurements confirmed the operability of the antenna array in the L1 frequency range of the GLONASS and GPS satellite radio navigation systems. The results of calculations and measurements of the VSWR were compared. Analysis of the results of calculations and measurements of VSWR emitters confirmed the correctness of the selected geometric parameters of the antenna array. A slight difference in the characteristics of VSWR emitters is caused by the influence of the edges of the base located close to the

emitter. The developed antenna array can be applied in noise-protected receivers of navigation signals with adaptive formation of radiation pattern.

Keywords: 3D printing, additive technologies, GPS/ GLONASS antenna, antenna array

For citation: Ermilov A.S., Balashov A.Yu., Gyulmagomedov N.Kh. Manufacturing of functional prototype of antenna array for the missile and space equipment using additive technologies. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179688>

Введение

К радиотехническим характеристикам антенн, работающих в спутниковых навигационных системах GPS и ГЛОНАСС, предъявляется ряд определенных требований. Они должны обеспечивать прием/передачу волн с правой круговой поляризацией, обладать близкими к равномерным диаграммами направленности (ДН) в верхнем полупространстве и обеспечивать работоспособность системы в требуемых диапазонах частот. В данной области широкое распространение получили микрополосковые антенны ([1]-[2]), которые выполнены в виде планарной структуры. Данные типы антенн отличаются простотой изготовления, высокой повторяемостью и возможностью минимизации размеров антенны за счет использования подложки с высокой величиной диэлектрической проницаемости.

Сегодня большое внимание уделяется разработке АР для приемников сигналов спутниковых навигационных систем. В частности, для ряда специфических применений требуются антенные системы с относительно большим коэффициентом

усиления с фиксированным амплитудно-фазовым распределением в раскрыве ([3]-[7]). Наиболее широкое применение АР для приема навигационных сигналов находят в адаптивных системах помехозащиты с цифровым формированием ДН требуемой формы [4]. Максимальное число помех, которые могут быть подавлены цифровой АР, на единицу меньше числа антенных элементов (АЭ) решетки ([3], [5]).

Самые простые АР, включают в себя малое число элементов $N \leq 10$ и состоят из микрополосковых АЭ. При этом, характерные межэлементные расстояния составляют половину длины волны и менее, что в совокупности со слабой направленностью ДН самих АЭ не позволяет пренебрегать взаимным влиянием антенн друг на друга ([1], [8]). Вследствие этого для получения адекватной теоретической оценки радиотехнических характеристик необходимо проводить теоретический расчет всей модели АР. Полученные решения по реализации АР требуют экспериментального подтверждения. Тем более, что близкое расположение границ АР к периферийным элементам и АЭ друг к другу требует необходимости доработки АР. Зачастую изготовление опытных образцов требует существенных временных ресурсов, что в свою очередь влияет на общие сроки разработки. Одним из способов ускорения отработки технических решений по реализации АР является использование аддитивных технологий при изготовлении составных частей АР.

В предлагаемой работе рассматривается разработка и изготовление восьмиэлементной АР, которая состоит из коммерчески доступных микрополосковых керамических АЭ и основания, изготовленного из PLA-пластика. В первой части статьи приводятся результаты расчета радиотехнических характеристик

микроросковой керамической АЭ, описываются результаты расчета всей АР, осуществляется выбор материала основания и взаимного положения АЭ. Во второй части приводятся результаты измерения КСВН по напряжению каждого АЭ с дальнейшим сравнением их с результатами расчета.

Описание схемы размещения элементов и их характеристики

Разработка АР проведена с использованием микроросковых АЭ, которые состоят из серебряного излучающего элемента, керамической подложки и возбуждающего штыря (см. рисунок 1). Для обеспечения правильного функционирования микроросковой антенны необходимо наличие металлического «экрана» [2].

Профиль излучающего элемента используемых в работе АЭ выполнен в виде квадратного элемента со срезами по краям [1]. Благодаря выполненным срезам микроросковая антенна имеет круговую поляризацию электромагнитного поля [8].

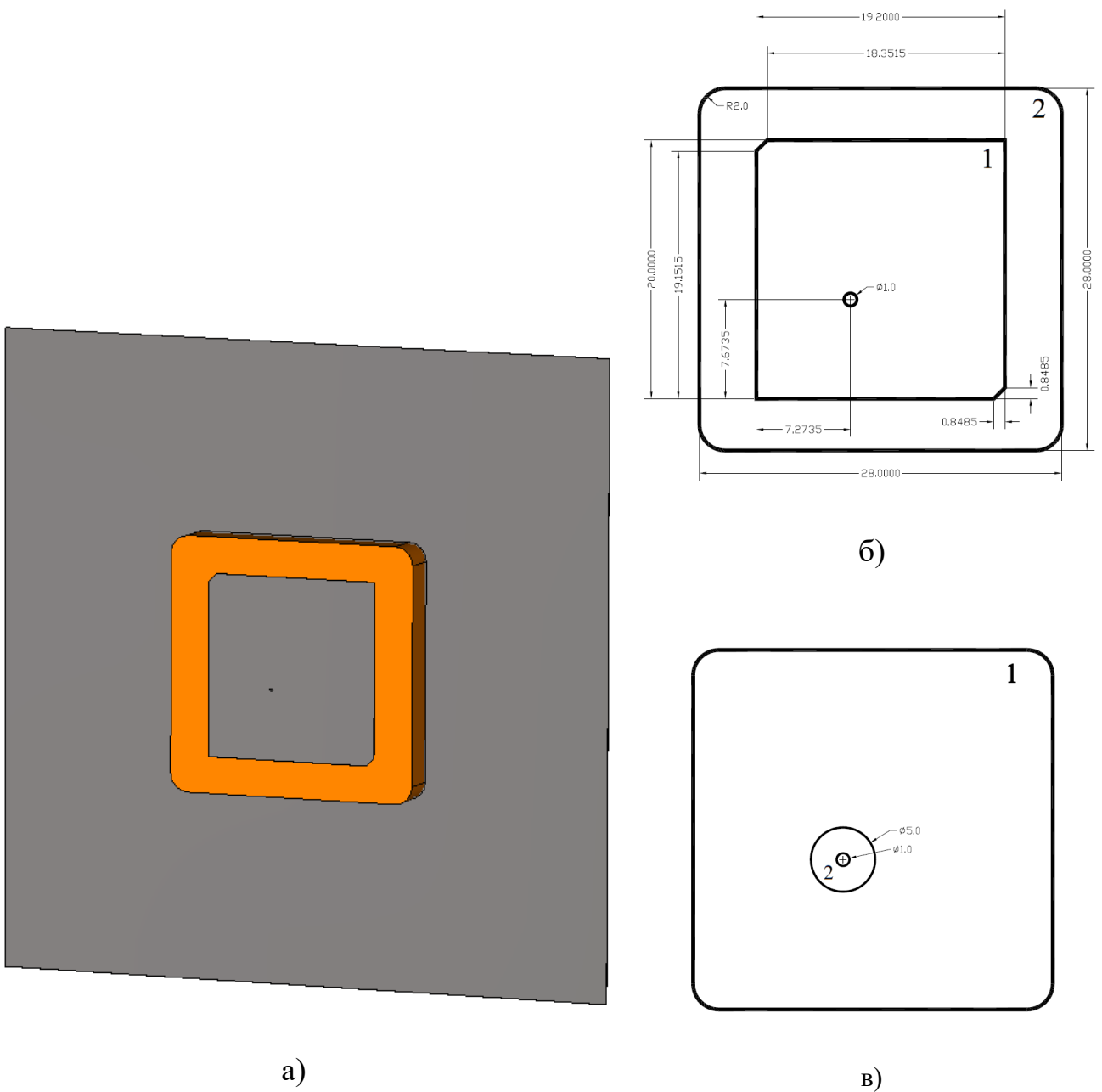


Рисунок 1 - Микрополосковый АЭ: общий вид (а) и геометрия излучающего элемента: вид спереди (б) и вид сзади (в).

Проведен расчет радиотехнических характеристик микрополосковой АЭ методом конечного интегрирования во временной области, который представляет собой не что иное, как более широко известный метод конечных разностей во временной области (*Finite Difference Time Domain, FDTD*). Расчеты радиотехнических

характеристик АЭ проведены с учетом расположения её на металлическом «экране» с размерами 70×70 мм (д × ш).

Для возбуждения использована коаксиальная линия с номинальным сопротивлением 50 Ом. В качестве материала излучающего элемента, возбуждающего штыря и материала экрана задан металл без потерь. Параметры керамической подложки АЭ заданы следующими: диэлектрическая проницаемость $\epsilon=19,5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta=0,001$ ([9]-[10]).

Результаты расчета объемной ДН АЭ представлены на рисунке 2. Результаты расчета приведены для частоты 1575 МГц. Частотная зависимость КСВН АЭ представлена на рисунке 3.

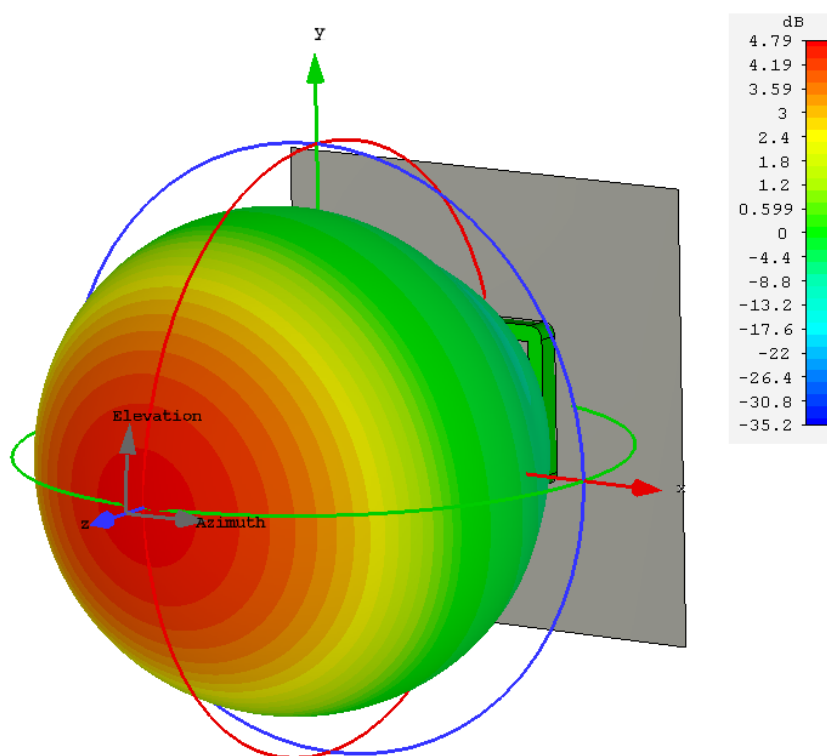


Рисунок 2 – Объемная ДН АЭ на частоте 1575 МГц.

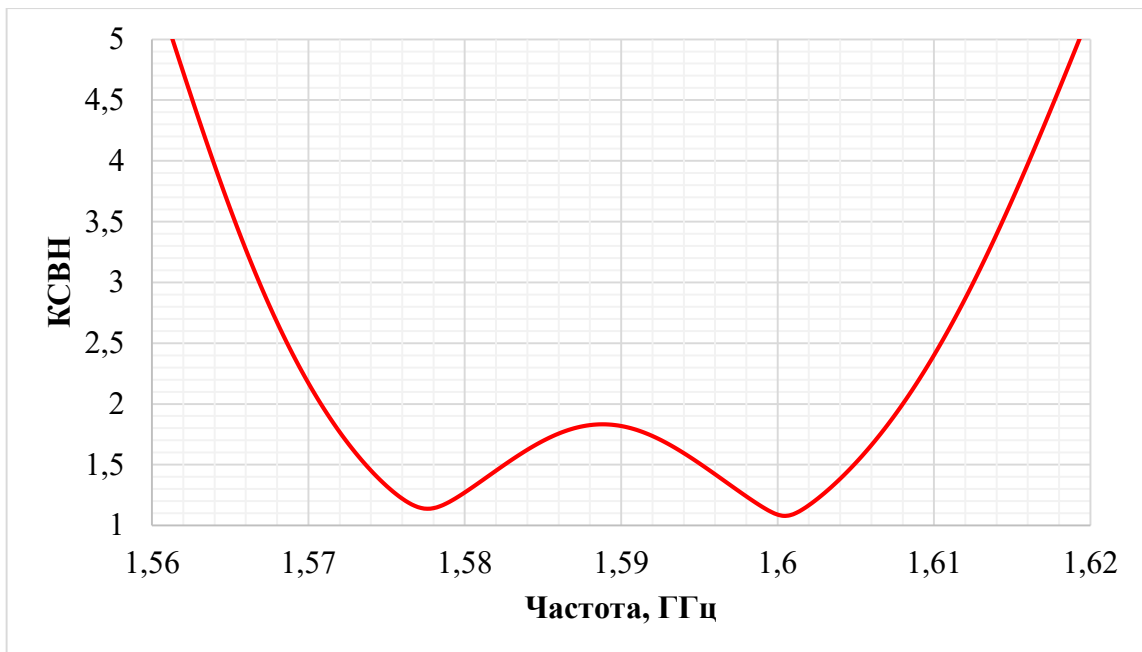


Рисунок 3 – Частотная зависимость КСВН АЭ.

Анализ полученных результатов показал, что АЭ имеет КСВН менее 3 в диапазоне частот от 1565 МГц до 1614 МГц. Коэффициент усиления АЭ в рабочем диапазоне частот составляет не менее 4 дБ. АЭ имеет круговую поляризацию правого вращения. Полученные радиотехнические характеристики АЭ подтверждают его работоспособность и прием сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS в диапазоне частот L1. Разработанная модель микрополосковой АЭ будет использована при построении и теоретическом расчете модели восьмиэлементной элементной АР.

Для обеспечения нормального функционирования и минимизации взаимовлияния микрополосковые АЭ в составе разрабатываемой АР должны располагаться на расстоянии равном $d \approx \lambda/2$. Уменьшение расстояния ($d < \lambda/2$) приводит к увеличению взаимовлиянию между АЭ ([4], [11]). Конфигурация разработанной АР выбрана с учетом обеспечения минимальных габаритных размеров

АР и минимизации взаимовлияния АЭ: восьми микрополосковых АЭ с расстоянием между элементами, равным ~ 70 мм. Общий вид АР представлен на рисунке 4.

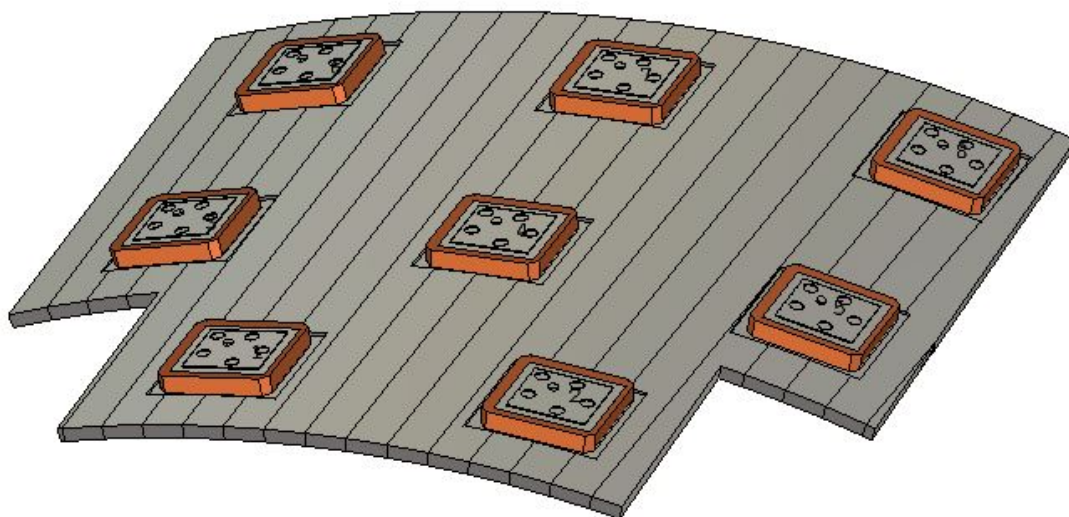


Рисунок 4 – Конфигурация восьмиэлементной элементной АР.

Результаты расчетов радиотехнических характеристик подтвердили, что АЭ в составе восьмиэлементной элементной АР обеспечивают уверенный прием сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Объемная ДН АЭ из состава АР представлена на рисунке 5. Ширина ДН по уровню половинной мощности (минус 3 дБ) обеспечивает прием в секторе углов $\pm 50^\circ$. Реализуемый коэффициент усиления АЭ из состава АР в диапазоне частот L1 (1574 – 1611 МГц) равен не менее 5 дБ вдоль оси расположения антенн. КСВН АЭ из состава АР в диапазоне частот L1 (1574 – 1611 МГц) не превышает 2,5.

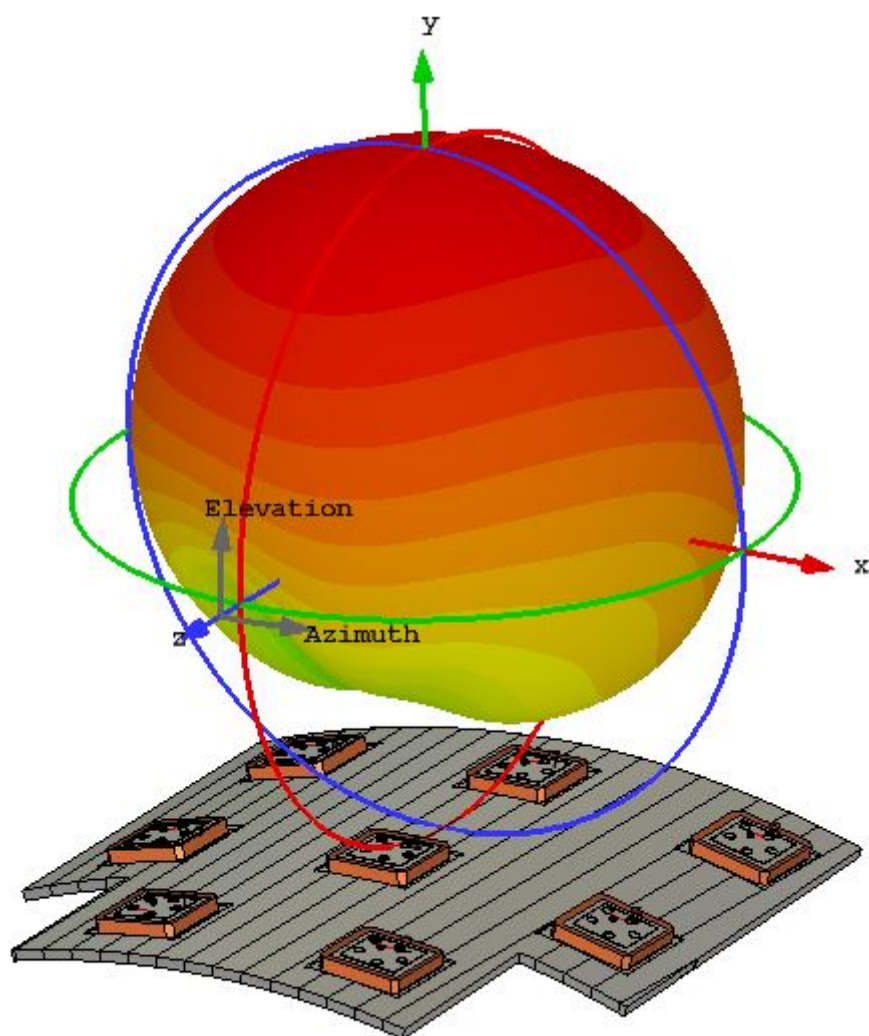


Рисунок 5 – Объемная ДН АЭ из состава АР частоте 1601 МГц.

Анализ полученных результатов подтвердил, что выбранная конфигурация обеспечивает работоспособность микрополосковых АЭ и минимизацию взаимовлияния между АЭ.

С целью подтверждения работоспособности выбранной конфигурации восьмиэлементной элементной АР изготовлен действующий макет, состоящий из коммерчески доступных микрополосковых керамических АЭ и основания.

Основание представляет собой вырезку из боковой поверхности цилиндра диаметром $r \approx 400$ мм. Основание изготовлено из PLA - пластика с использованием

технологии 3D-печати ([12]-[15], [17]-[19]). Геометрическая форма основания выбрана с учетом опыта расположения антенн аппаратуры потребителей спутниковой навигации на изделиях ракетно-космической техники ([16], [20], [21]). Для формирования металлического «экрана» на поверхности основания проведена металлизация. Металлизация на основании выполнена с использованием алюминиевого скотча толщиной 10 мкм. Общий вид изготовленного действующего макета восьмиэлементной АР представлен на рисунке 6.

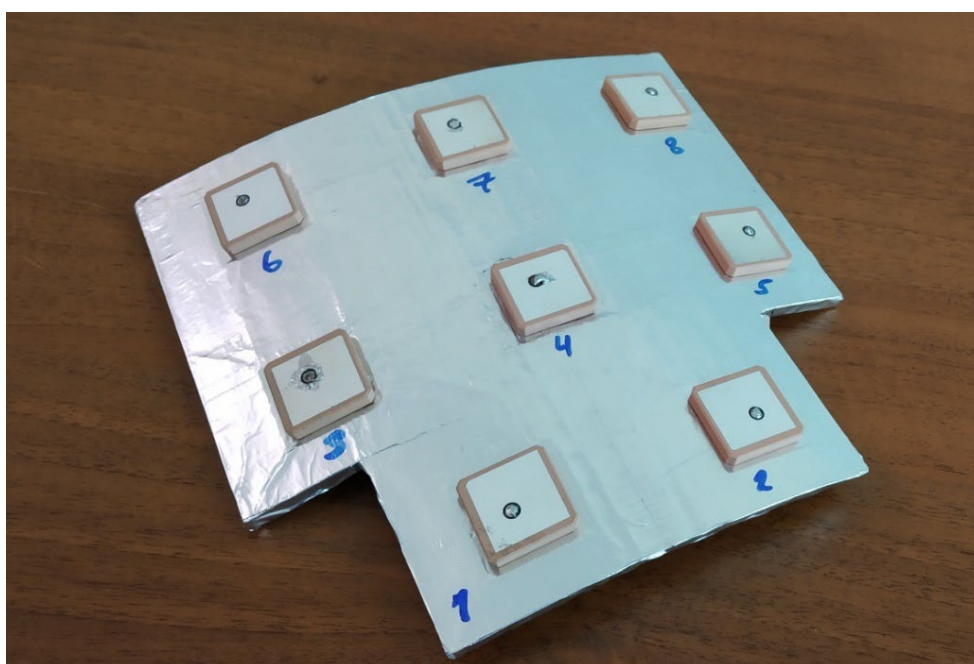


Рисунок 6 – Общий вид действующего макета восьмиэлементной АР.

Вследствие отсутствия на момент проведения измерений технической базы, необходимой для определения характеристик поля излучения АР в дальней зоне, подтверждение работоспособности АР проведено путем измерения КСВН по напряжению на каждом АЭ из состава АР. Измерение КСВН проведено в диапазоне частот L1 спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Схема измерения КСВН каждого АЭ представлена на рисунке 7.

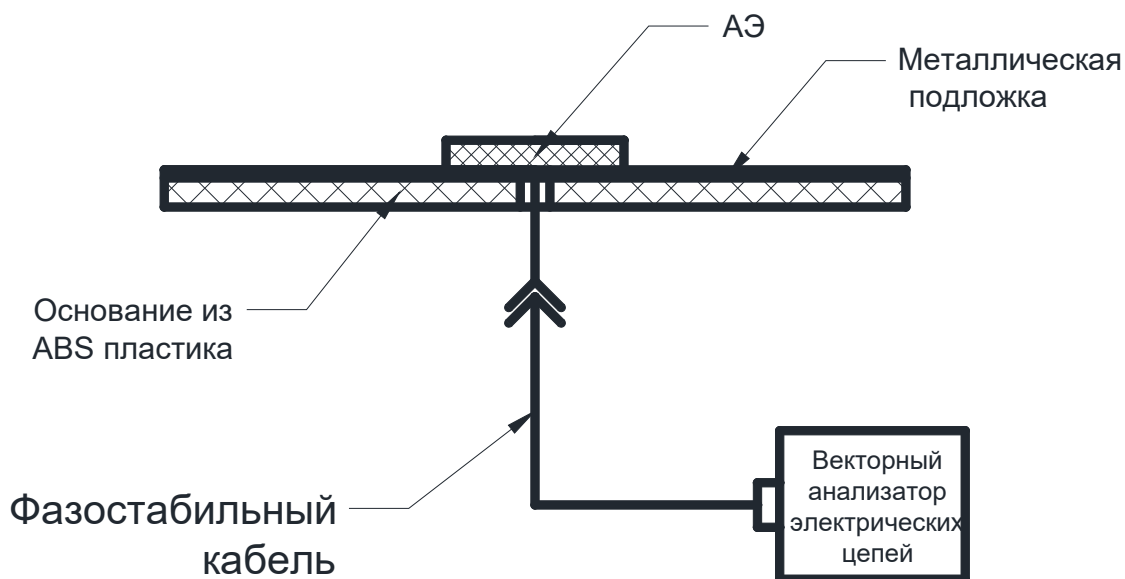


Рисунок 7 – Схема измерения КСВН АЭ.

Измерение КСВН АЭ АР проведено в безэховой камере с использованием векторного анализатора электрических цепей, работающего в диапазоне частот L1 спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Перед измерением КСВН проведена калибровка векторного анализатора электрических цепей с фазостабилизированным кабелем. При проведении измерений, на остальные АЭ была установлена согласованная нагрузка 50 Ом.

Результаты измерения КСВН АЭ в составе АР представлены на рисунке 8. Нумерация зависимостей на графике соответствует нумерации АЭ на действующем макете АР (рисунок 6).

На рисунке 8 также приведены результаты измерения КСВН одиночного АЭ на металлической подложке 70×70 мм. Анализ полученных результатов показал, что установка АЭ на АР приводит к несущественным смещениям рабочей полосы частот АЭ.

К причинам возникновения этих различий можно отнести погрешности изготовления АР, возможный разброс диэлектрических параметров, используемых в керамических микрополосковых антеннах, и т.д. ([1], [10]). Несмотря на это, представленные результаты расчетов и измерений КСВН достаточно хорошо коррелируют друг с другом.

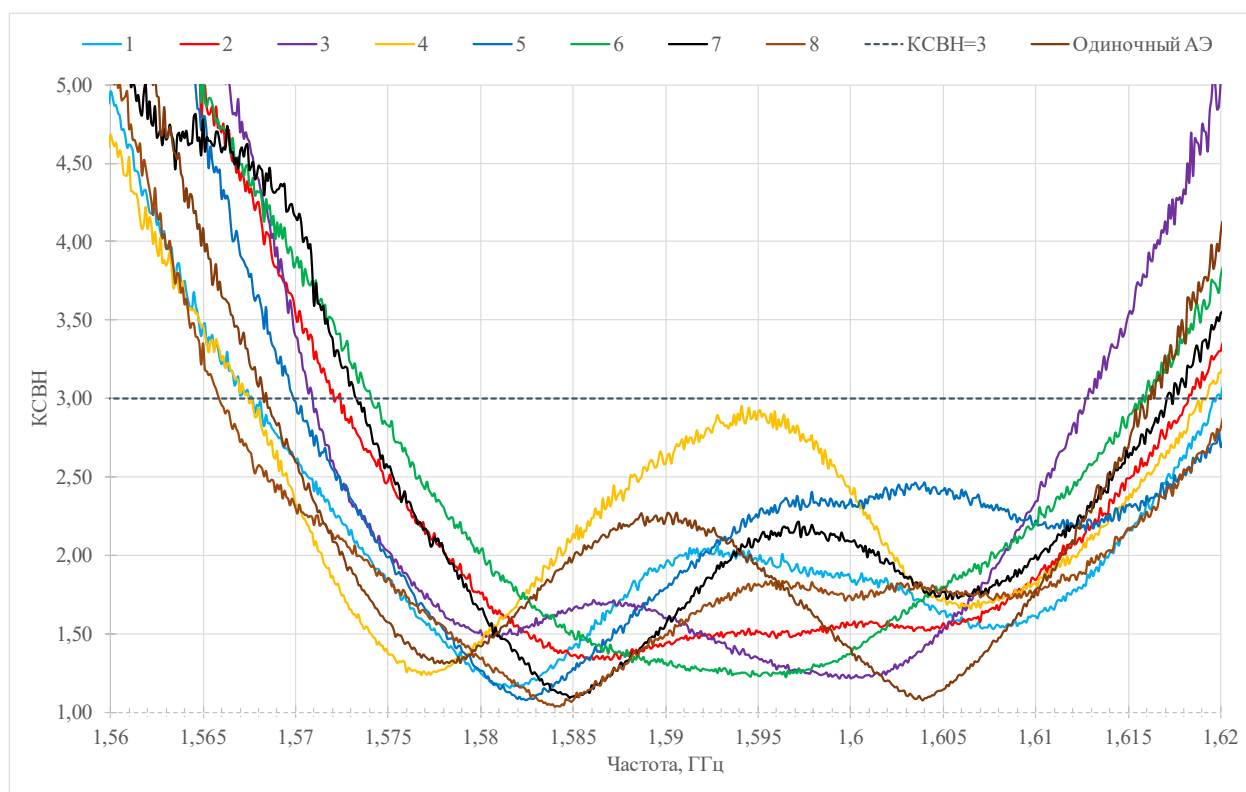


Рисунок 8 – Зависимость КСВН АЭ от частоты.

Выводы

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований радиотехнических характеристик восьмиэлементной АР диапазона L1, которая может быть использована в приемниках навигационных систем GPS / ГЛОНАСС. Проведены численные расчеты радиотехнических характеристик элементарного излучателя АР, выполненного в виде керамической микрополосковой

антенны. Приведено описание конструкции АР, состоящей из основания и восьми АЭ. Материал общего основания действующего макета АР выполнен из PLA-пластика с металлизацией. Проведенные результаты измерений КСВН подтвердили работоспособность АР в диапазоне частот L1 спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Анализ результатов численных расчетов и измерений КСВН подтвердил правильность выбранных параметров АР. Несущественное различие между собой характеристик КСВН для АЭ в составе АР и единичного АЭ вызвано возможным разбросом диэлектрических параметров, используемых в керамических микрополосковых антеннах, и влиянием близко расположенных к АЭ граней основания.

Список источников

1. Лось В.Ф. Микрополосковые и диэлектрические резонаторные антенны. САПР-модели: методы математического моделирования. – М.: ИПРЖР, 2002, - 96 с.
2. Жексенов М.А., Печурин В.А., Волченков А.С. Антенная решетка с печатными излучателями для БПЛА // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: https://www.trudymai.ru/published.php?ID=25385&PAGEN_2=2
3. Чистяков В.А. Алгоритм адаптивной фильтрации помех в цифровых антенных решетках спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=104239>
4. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. - М.: Радиотехника, 2010. - 141 с.

5. Ксендзук А.В. Синтез апертуры с использованием навигационной системы ГЛОНАСС // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 11. С. 44-54.
6. Перов А.И., Харрисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. - М.: Радиотехника, 2010. - 800 с.
7. Яскин Ю.С., Харисов В.Н., Ефименко В.С., Бойко С.Н., Быстраков С.Г., Пастухов А.В., Савельев С.А. Характеристики подавления помех в первом образце помехоустойчивой аппаратуры потребителей СРНС ГЛОНАСС/GPS с адаптивной решеткой // Радиотехника. 2010. № 7. С. 127-136.
8. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки: решения задач GPS // Электроника: НТБ. 2009. № 1. С. 74-78.
9. Зимин А.С., Криницкий Г.В. Применение многоантенных систем для повышения помехозащищённости систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=29151>
10. Гнедак П.В. Фазовый синтез нулей в диаграммах направленности апертурных антенн на основе метода апертурных ортогональных полиномов: автореферат дисс. канд. техн. наук. – М., 2009, - 20 с.
11. Тяпкин В.Н., Дмитриев Д.Д., Мошкина Т.Г. Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. 2012. № 3 (43). С. 113-119.

12.Демиденко Е.В., Кузьмин С.В., Кирик Д.И. 3D печать антенно-фидерных устройств с использованием полимерных материалов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 491-495.

13.Астапов В.Ю., Хорошко Л.Л., Дудков К.В. Оценка применения аддитивных технологий для создания аэродинамических моделей космических головных частей // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=96683>

14.Куликов Г.Г., Кружков В.Н., Дронь Е.А., Колесников А.А., Кружков О.Н., Шарипова А.М. Введение в информационные системы цифрового моделирования. - Уфа: УГАТУ, 2016. - 184 с.

15.Балашов А.Ю., Ермилов А.С., Гюльмагомедов Н.Х. Применение 3D печати при разработке конструкций, обладающих радиопрозрачными свойствами // Материалы VII Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 07–08 октября 2021): сборник трудов. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ "Курчатовский институт", 2021. С. 180-189.

16.Ендогур А.И., Кравцов В.А., Солошенко В.Н. Принципы рационального проектирования авиационных конструкций с применением композиционных материалов // Труды МАИ. 2014. № 72. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=47572>

17.Кузнецов П.А., Васильева О.В., Теленков А.И., Савин В.И., Бобырь В.В. Аддитивные технологии на базе металлических порошковых материалов для

российской промышленности // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2. С. 4-10.

18. Федорова П.С. Перспективы применения аддитивных технологий в машиностроении // Аллея науки. 2017. № 8. С. 447-454.

19. Тарасова Т.В., Скорняков И.А. Возможности аддитивных технологий в производстве полимерных композиционных материалов // Автоматизация и управление в машиностроении. 2017. № 3. С. 7-11.

20. Кирин Б.С., Кузнецова К.Р., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. Сравнительный анализ свойств полиэфирэфиркетонов отечественного и зарубежного производства // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). С. 34-43.

21. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. - СПб.: Научные основы и технологии, 2008. - 822 с.

References

1. Los' V.F. *Mikropoloskovyye i dielektricheskie rezonatornyye anteny. SAPR-modeli: metody matematicheskogo modelirovaniya* (Microstrip and dieletrical echo box antennas. CAD models: mathematical model approaches), Moscow, IPRZhR, 2002, 96 p.

2. Zheksenov M.A., Pechurin V.A., Volchenkov A.S. *Trudy MAI*, 2011, no. 45. URL: https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=25385&PAGEN_2=2

3. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=104239>

4. Grigor'ev L.N. *Tsifrovoe formirovanie diagrammy napravlenosti v fazirovannykh antenykh reshetkakh* (Digital generation of the radiation pattern in phased array antennas), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 141 p.
5. Ksendzuk A.V. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2003, no. 11, pp. 44-54.
6. Perov A.I., Kharrisov V.N. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya*, (GLONASS. Principles of construction and operation), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p.
7. Yaskin Yu.S., Kharisov V.N., Efimenko V.S., Boiko S.N., Bystrakov S.G., Pastukhov A.V., Savel'ev S.A. *Radiotekhnika*, 2010, no. 7, pp. 127-136.
8. Slyusar V.I. *Elektronika: NTB*, 2009, no. 1, pp. 74-78.
9. Zimin A.S., Krinitskii G.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=29151>
10. Gnedak P.V. *Fazovyi sintez nulei v diagrammakh napravlenosti aperturnykh antenn na osnove metoda aperturnykh ortogonal'nykh polinomov* (Zero Phase Synthesis in the Aperture Antenna Radiation Patterns Based on the Aperture Orthogonal Polynom Method), PhD thesis synopsis, Moscow, 2009, 20 p.
11. Tyapkin V.N., Dmitriev D.D., Moshkina T.G. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. M.F. Reshetneva*, 2012, no. 3 (43), pp. 113-119.
12. Demidenko E.V., Kuz'min S.V., Kirik D.I. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2018, vol. 1, pp. 491-495.
13. Astapov V.Yu., Khoroshko L.L., Dudkov K.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=96683>

14. Kulikov G.G., Kruzhkov V.N., Dron' E.A., Kolesnikov A.A., Kruzhkov O.N., Sharipova A.M. *Vvedenie v informatsionnye sistemy tsifrovogo modelirovaniya* (Introduction into the digital simulation information systems), Ufa: UGATU, 2016, 184 p.
15. Balashov A.Yu., Ermilov A.S., Gyul'magomedov N.Kh. *Materialy VII Mezhdunarodnoi konferentsii «Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee»*: sbornik trudov. Moscow, Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut aviatsionnykh materialov NITs "Kurchatovskii institut", 2021, pp. 180-189.
16. Endogur A.I., Kravtsov V.A., Soloshenko V.N. *Trudy MAI*, 2014, no. 72. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=47572>
17. Kuznetsov P.A., Vasil'eva O.V., Telenkov A.I., Savin V.I., Bobyr' V.V. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 2, pp 4-10.
18. Fedorova P.S. *Alleya nauki*, 2017, no. 8, pp. 447-454.
19. Tarasova T.V., Skorniyakov I.A. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroenii*, 2017, no. 3, pp. 7-11.
20. Kirin B.S., Kuznetsova K.R., Petrova G.N., Sorokin A.E. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), pp. 34-43.
21. Mikhailin Yu.A. *Konstruktivnye polimernye kompozitsionnye materialy* (Constructive polymer composite materials), Saint Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008, 822 p.

Статья поступила в редакцию 25.01.2024

Одобрена после рецензирования 31.01.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 25. 01.2024; approved after reviewing on 31.01.2024; accepted for publication on 26.04.2024