

РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

А.С. Ермилов
А.Ю. Балашов
Н.Х. Гюльмагомедов
Д.А. Евсеев

a.s.ermilov@vpk.npomash.ru
a.yu.balashov@vpk.npomash.ru
940@vpk.npomash.ru
d.a.evseev@vpk.npomash.ru

АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов,
Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Разработан и изготовлен макет адаптивной антенной решетки, работающей в диапазоне частот L1 спутниковых радионавигационных систем. Рассчитаны радиотехнические характеристики базового излучателя антенной решетки. Излучатель выполнен в виде керамического микрополоскового антенного элемента, состоящего из излучающего элемента, керамической подложки, возбуждающего штыря и металлического экрана. Приведено описание конструкции антенной решетки, состоящей из основания и восьми излучателей. Конструкция разработанной решетки выбрана с учетом обеспечения минимальных габаритных размеров и минимизации взаимовлияния между излучателями. Для подтверждения работоспособности выбранной конфигурации антенной решетки изготовлен действующий макет, состоящий из микрополосковых керамических излучателей и основания. Основание макета изготовлено из PLA-пластика с использованием технологии 3D-печати и представляет собой вырезку из боковой поверхности цилиндра. Приведенные результаты измерений коэффициента стоячей волны по напряжению подтвердили работоспособность макета антенной решетки в диапазоне частот L1 спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Результаты анализа численных расчетов и измерений подтвердили правильность реализованных в антенной решетке технических решений. Использование технологии 3D-печати позволило ускорить обработку техниче-

Ключевые слова

Конструкция антенной решетки, микрополосковая антенна, разработка макета, аддитивные технологии, аппаратура потребителей спутниковой навигации, 3D-печать, отработка технических решений

ских решений по реализации макета антенной решетки. Предложенная конструкция антенной решетки может быть использована в приемниках навигационных сигналов с адаптивным формированием диаграммы направленности

Поступила 25.03.2024

Принята 22.04.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. К радиотехническим характеристикам антенн, работающих в приемниках спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS, предъявляются определенные требования:

- минимальное значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в рабочем диапазоне частот;
- прием/передача электромагнитных волн с правой круговой поляризацией;
- равномерность (изотропность) диаграммы направленности (ДН) в верхней полуплоскости.

Широкое распространение получили микрополосковые антенны (МПА) [1, 2], которые выполнены в виде планарной структуры. Такие антенны отличаются простотой изготовления, высокой повторяемостью и возможностью минимизации размеров антенны за счет использования подложки с высоким значением диэлектрической проницаемости ϵ .

В настоящее время особое внимание уделяется разработке антенных решеток (АР) для приемников сигналов спутниковых навигационных систем. В частности, для ряда специфических применений [3–7] требуются антенные системы с относительно большим коэффициентом усиления с фиксированным амплитудно-фазовым распределением в раскрыве. Наиболее широкое применение АР для приема навигационных сигналов находят в адаптивных системах с цифровым формированием ДН требуемой формы [4, 5].

Простые АР включают в себя малое число элементов $N \leq 10$ и состоят из микрополосковых антенных элементов (АЭ). 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 [6, 8]. Вследствие этого для получения адекватной теоретической оценки радиотехнических характеристик необходимы теоретический расчет всей модели АР и экспериментальное подтверждение полученных решений по реализации АР. Необходима также доработка АР, поскольку ее границы, периферийные элементы и АЭ расположены близко друг к другу. Зачастую для изготовления опытных образцов требуются существенные временные ресурсы, что в свою очередь влияет на общие сроки разработки. Одним из способов ускорения отра-

ботки технических решений по реализации АР, а также технологической подготовки производства является использование аддитивных технологий при изготовлении составных частей АР.

В настоящей работе рассмотрены разработка и изготовление восьми-элементной АР, которая состоит из микрополосковых керамических АЭ и основания из PLA-пластика. Приведены результаты расчета радиотехнических характеристик микрополосковых керамических АЭ и расчета всей АР, осуществлен выбор материала основания и взаимного положения АЭ. Приведены результаты измерения КСВН каждого АЭ с дальнейшим сравнением их с результатами расчета.

Описание элемента АР. Разработка АР проведена с использованием микрополосковых керамических АЭ (рис. 1, а), которые состоят из излучающего элемента, керамической подложки и возбуждающего штыря. Для обеспечения правильного функционирования МПА необходимо наличие металлического экрана (рис. 1, б) [9]. Геометрические размеры металлического экрана должны быть в 2–3 раза больше габаритных размеров МПА.

Формы микрополоскового АЭ и излучающего элемента выбраны прямоугольными, полуволновыми, габаритные размеры выбраны с учетом диэлектрических характеристик материала и поправки для резонансной длины, учитывающей краевой эффект [10]. Профиль излучающего элемента выполнен в виде квадратного элемента со срезами по краям (рис. 1, в). Точка питания МПА смещена относительно центра излучающего элемента и диэлектрической подложки. Смещение точки питания совместно со скошенными гранями на излучающем элементе позволяет реализовать прием/передачу электромагнитной волны с правой круговой поляризацией [11]. Подложка выполнена из керамического материала с высокой диэлектрической проницаемостью.

Для микрополоскового АЭ проведен расчет радиотехнических характеристик с использованием электродинамического моделирования в специализированной среде. Расчет радиотехнических характеристик микрополоскового АЭ выполнен с помощью метода конечных разностей во временной области [12] с учетом расположения его на металлическом экране с размерами 70 × 70 мм.

В качестве питания микрополоскового АЭ в разработанной модели использована коаксиальная линия с номинальным сопротивлением 50 Ом. Материалом излучающего элемента, возбуждающего штыря и металлического экрана выбран металл без потерь. Параметры керамической подложки АЭ заданы следующими: диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 19,5$ и тан-

генс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = 0,001$ [12]. Расчет проведен в диапазоне частот L1 спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS 1570...1620 МГц [13].

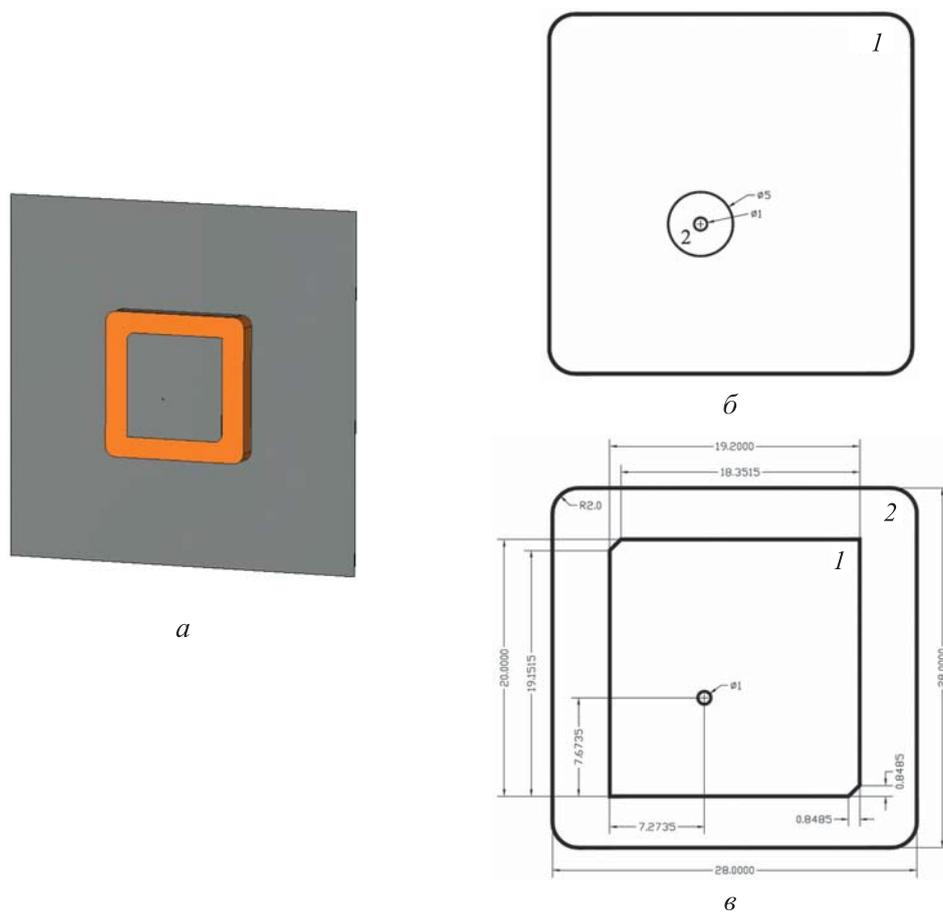


Рис. 1. Микрополосковый керамический АЭ:

a — общий вид излучающего элемента, *б* — вид спереди, *в* — вид сзади;
1 — основание с металлизацией; *2* — керамическая подложка

Результаты расчета объемной ДН АЭ на частоте 1575 МГц (GPS L1) приведены на рис. 2. Форма ДН — искаженная обратная кардиоида [14]. Искажения находятся со стороны металлического экрана и вызваны обратным излучением антенны. Выявленные искажения не влияют на работу самой антенны. Максимальное излучение ДН направлено в нуль. На частотах функционирования системы ГЛОНАСС L1 объемная ДН имеет аналогичную форму. Частотная зависимость КСВН АЭ приведена на рис. 3.

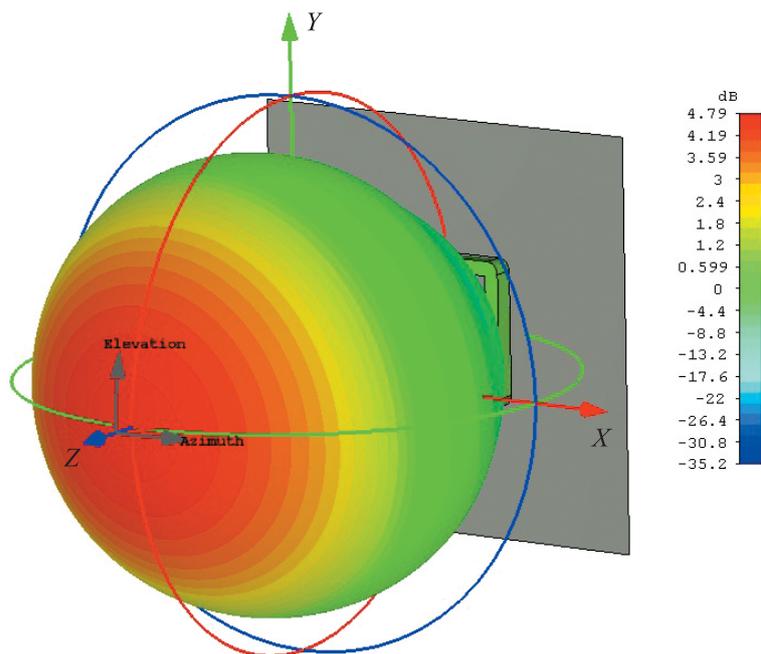


Рис. 2. Объемная ДН АЭ на частоте 1575 МГц (GPS L1)

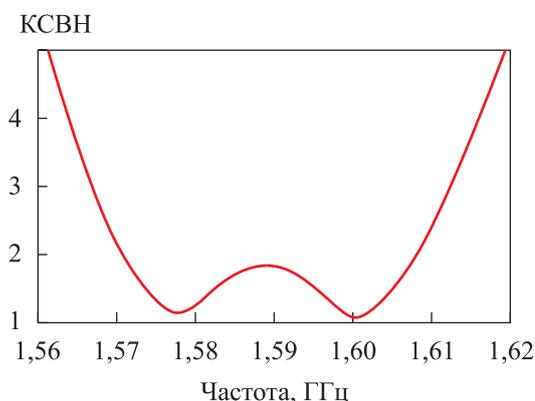


Рис. 3. Частотная зависимость КСВН АЭ

В результате анализа выявлено, что АЭ имеет КСВН менее 3 в диапазоне частот 1565... 1614 МГц (рис. 3), что составляет примерно 4 % центральной частоты диапазона. Коэффициент

усиления АЭ в рабочем диапазоне частот составляет не менее 4,5 дБ. Ширина сечений ДН по уровню половинной мощности (-3 дБ) в угломестной и азимутальной плоскостях равна $\pm 48^\circ$ и $\pm 45^\circ$. Коэффициент эллиптичности в исследуемой полосе частот имеет значение не менее 0,8, что указывает на то, что АЭ имеет поляризацию, близкую к круговой. Полученные радиотехнические характеристики микрополоскового АЭ подтверждают его работоспособность в диапазоне частот L1 спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Разработанная модель микрополоскового керамического АЭ будет использована при формировании и теоретическом расчете модели восьмиэлементной АР.

Расчет радиотехнических характеристик АР. В соответствии с теорией построения АР для обеспечения нормального функционирования и минимизации взаимовлияния микрополосковые АЭ в составе разрабатываемой АР должны располагаться на расстоянии $d \approx \lambda/2$. Уменьшение расстояния ($d < \lambda/2$) приводит к увеличению взаимовлияния между АЭ [9–13].

Общий вид разработанной восьмиэлементной АР приведен на рис. 4. Конфигурация разработанной АР выбрана так, чтобы обеспечить минимальные габаритные размеры разрабатываемой АР и минимизировать взаимовлияние микрополосковых АЭ. Основание АР вырезано из боковой поверхности цилиндра [15].

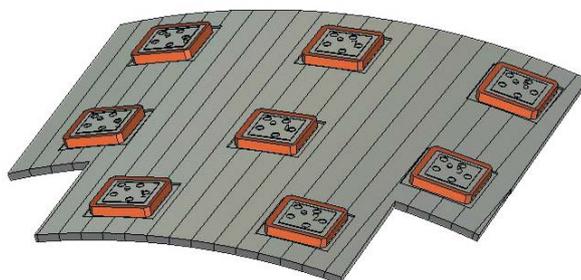


Рис. 4. Общий вид восьмиэлементной АР

Результаты расчета объемной ДН АЭ в составе АР на частоте 1601 МГц (ГЛОНАСС L1) приведены на рис. 5. Форма ДН — искаженная обратная кардиоида. Выявленные искажения не влияют на работу самой антенны. Для каждого АЭ максимум ДН формируется в направлении нормали к плоскости изучения с учетом размещения в составе АР. На частотах функционирования системы GPS L1 объемная ДН АЭ имеет аналогичную форму.

Ширина ДН по уровню половинной мощности (-3 дБ) в угломестной и азимутальной плоскостях равна $\pm 50^\circ$ и $\pm 54^\circ$. Реализуемый коэффициент усиления АЭ в составе АР в диапазоне частот L1 (1574...1611 МГц) равен не менее 4 дБ вдоль оси расположения микрополосковых АЭ. Коэффициент стоячей волны по напряжению АЭ в составе АР в диапазоне частот L1 (1574...1611 МГц) не превышает 2,5. Рабочая полоса по уровню КСВН = 3 составляет также примерно 4 % центральной частоты диапазона. Коэффициент эллиптичности в исследованной полосе частот имеет значение не менее 0,6, что свидетельствует о том, что АЭ имеет поляризацию, близкую к круговой.

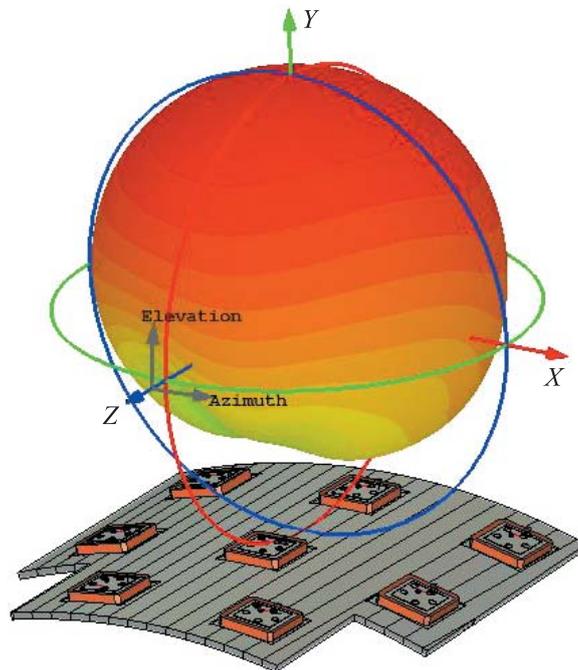


Рис. 5. Объемная ДН АЭ из состава АР на частоте 1601 МГц (ГЛОНАСС L1)

Результаты расчетов радиотехнических характеристик подтверждают работоспособность АЭ в составе восьмиэлементной АР в диапазоне частот L1 спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Форма и конфигурация АР обеспечивает работоспособность микрополосковых АЭ и минимизацию их взаимовлияния.

Изготовление и экспериментальные исследования характеристик макета АР. В целях подтверждения работоспособности выбранной конфигурации восьмиэлементной АР изготовлен действующий макет, состоящий из коммерчески доступных микрополосковых керамических АЭ и основания. Основание вырезано из боковой поверхности цилиндра, изготовлено из PLA-пластика с использованием технологии 3D-печати [16, 17]. Геометрическая форма основания выбрана с учетом опыта расположения антенн аппаратуры потребителей спутниковой навигации на летательных аппаратах [7, 18]. Для формирования металлического экрана на поверхности основания проведена металлизация. Общий вид изготовленного действующего макета восьмиэлементной АР приведен на рис. 6.

Работоспособность АР подтверждена путем измерения КСВН на каждом АЭ АР в диапазоне частот L1 спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Схема измерения КСВН каждого АЭ приведена на рис. 7.

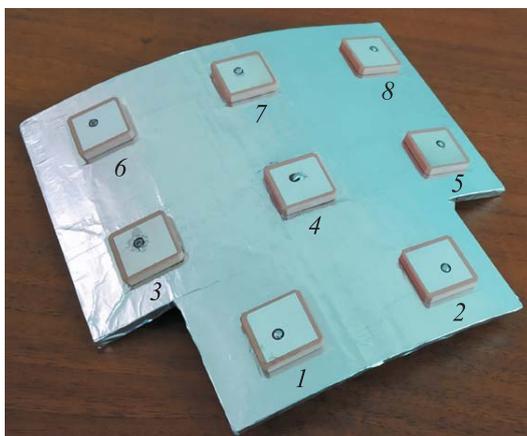
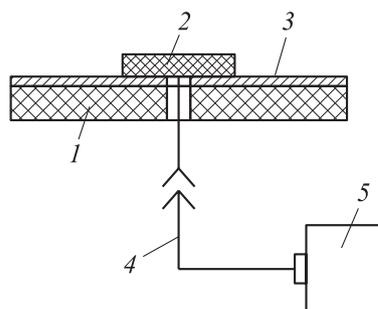


Рис. 6. Общий вид действующего макета восьмиэлементной АР:
1–8 — номера АЭ

Рис. 7. Схема измерения КСВН АЭ:
1 — основание из PLA-пластика; 2 — АЭ;
3 — металлическая подложка; 4 — фазостабилизаторный кабель; 5 — векторный анализатор электрических цепей



Измерение КСВН АЭ АР проведено в безэховой камере с помощью векторного анализатора электрических цепей в диапазоне частот L1 спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Перед измерением КСВН выполнена калибровка векторного анализатора электрических цепей с фазостабилизаторным кабелем. При измерении на остальные АЭ установлена согласованная нагрузка номиналом 50 Ом.

Результаты измерения КСВН АЭ АР на металлической подложке размером 70 × 70 мм приведены на рис. 8. Номера зависимостей на графике соответствуют номерам АЭ на действующем макете АР (см. рис. 6).

В результате измерения КСВН одиночного АЭ выявлено, 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 МПА, и влияние близко расположенных к АЭ граней основания [19, 20]. Несмотря на это, результаты расчетов и измерений КСВН АЭ АР достаточно хорошо коррелируют друг с другом.

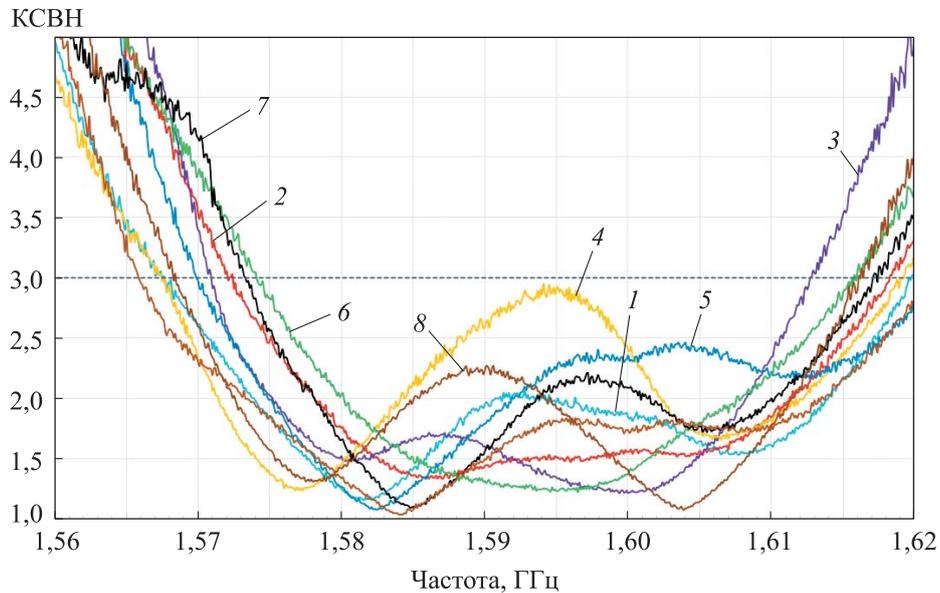


Рис. 8. Зависимость КСВН АЭ от частоты:
 кривые 1–8 соответствуют номерам АЭ на макете АР, см. рис. 6;
 сплошная прямая — одиночный АЭ; штриховая — КСВН = 3

Заключение. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований радиотехнических характеристик восьмиэлементной АР диапазона L1, которая может быть использована в приемниках навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Проведены численные расчеты радиотехнических характеристик элементарного излучателя АР, выполненного в виде керамической МПА. Приведено описание конструкции АР, состоящей из основания и восьми АЭ. Материал общего основания действующего макета АР — PLA-пластик с металлизацией. Результаты измерений КСВН подтвердили работоспособность АР в диапазоне частот L1 спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS, а результаты анализа численных расчетов и измерений КСВН — правильность реализованных в АР технических решений. Использование технологии 3D-печати позволило ускорить отработку технических решений по реализации АР. Разработанная АР может быть применена в приемниках навигационных сигналов с адаптивным формированием ДН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Лось В.Ф. Микрополосковые и диэлектрические резонаторные антенны. М., ИПРЖР, 2002.

- [2] Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны. М., Радио и связь, 1986.
- [3] Жексенов М.А., Печурин В.А., Волченков А.С. Антенная решетка с печатными излучателями для БПЛА. *Труды МАИ*, 2011, № 45.
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=25385&PAGEN_2=2
- [4] Ксендзук А.В. Синтез апертуры с использованием навигационной системы ГЛОНАСС. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2003, № 11, с. 44–54.
- [5] Яскин Ю.С., Харисов В.Н., Ефименко В.С. и др. Характеристики подавления помех в первом образце помехоустойчивой аппаратуры потребителей СРНС ГЛОНАСС/GPS с адаптивной антенной решеткой. *Радиотехника*, 2010, № 7, с. 127–136. EDN: NBGVFD
- [6] Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки: решения задач GPS. *Электроника: НТБ*, 2009, № 1, с. 74–78. EDN: OCALQL
- [7] Зимин А.С., Криницкий Г.В. Применение многоантенных систем для повышения помехозащищенности систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах. *Труды МАИ*, 2012, № 51.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29151>
- [8] Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М., Радиотехника, 2010.
- [9] Нефедов Е.И., Фиалковский А.Т. Полосковые линии передачи. М., Наука, 1980.
- [10] Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М., Энергия, 1966.
- [11] Банков С.Е., Давыдов А.Г., Папилов К.Б. Малогабаритные печатные антенны круговой поляризации. *Журнал радиоэлектроники*, 2010, № 8.
URL: <http://jre.cplire.ru/win/aug10/1/text.html>
- [12] Мигалёв И.Е. Практическое применение метода конечных разностей во временной области к моделированию электромагнитного поля. *Ползуновский вестник*, 2012, № 4, с. 33–35. EDN: PYQAYZ
- [13] Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М., Радиотехника, 2010.
- [14] Гнедак П.В. Фазовый синтез нулей в диаграммах направленности апертурных антенн на основе метода апертурных ортогональных полиномов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., МЭИ, 2009.
- [15] 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://trudymai.ru/published.php?ID=96683>
- [16] 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. EDN: UUZBTO

[17] Балашов А.Ю., Ермилов А.С., Гюльмагомедов Н.Х. Применение 3D печати при разработке конструкций, обладающих радиопрозрачными свойствами. *Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Матер. VII Междунар. конф.* Москва, ВИАМ, 2021, с. 180–189. EDN: COSCVL

[18] Ендогур А.И., Кравцов В.А., Солошенко В.Н. Принципы рационального проектирования авиационных конструкций с применением композиционных материалов. *Труды МАИ*, 2014, № 72.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=47572>

[19] Харалгин С.В., Войтович М.И. Исследование диэлектрических характеристик материалов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. *Российский технологический журнал*, 2021, № 2, с. 57–65.

DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65>

[20] Тарасова Т.В., Скорняков И.А. Возможности аддитивных технологий в производстве полимерных композиционных материалов. *Автоматизация и управление в машиностроении*, 2017, № 3, с. 7–11. EDN: XMZHID

Ермилов Алексей Станиславович — заместитель начальника отдела, начальник сектора АО «ВПК «НПО машиностроения» (Российская Федерация, 143960, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33).

Балашов Антон Юрьевич — начальник сектора АО «ВПК «НПО машиностроения» (Российская Федерация, 143960, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33).

Гюльмагомедов Несреддин Ханмагомедович — начальник сектора АО «ВПК «НПО машиностроения» (Российская Федерация, 143960, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33).

Евсеев Дмитрий Алексеевич — заместитель начальника отделения, начальник отдела АО «ВПК «НПО машиностроения» (Российская Федерация, 143960, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ермилов А.С., Балашов А.Ю., Гюльмагомедов Н.Х. и др. Реализация адаптивной антенной решетки для аппаратуры потребителей спутниковой навигации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 2 (149), с. 82–95.

EDN: QVXCWJ

ADAPTIVE ANTENNA ARRAY INTRODUCTION FOR THE SATELLITE NAVIGATION SYSTEM USERS

A.S. Ermilov

a.s.ermilov@vpk.npomash.ru

A.Yu. Balashov

a.yu.balashov@vpk.npomash.ru

N.Kh. Gyulmagomedov

940@vpk.npomash.ru

D.A. Evseev

d.a.evseev@vpk.npomash.ru

JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia”, Reutov, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

A prototype of the adaptive antenna array operating in the L1 frequency range of the satellite radio navigation systems was developed and manufactured. Radio technical characteristics of the antenna array basic emitter were calculated. The emitter was made in the form of a ceramic micro-strip antenna element consisting of radiating element, ceramic substrate, exciting pin and metal screen. Description of the antenna array design is provided, it consists of a base and eight emitters. The developed array design is chosen to ensure the minimum overall dimensions and mutual influence between the emitters. To confirm functionality of the selected antenna array configuration, a working prototype was manufactured consisting of the micro-strip ceramic emitters and a base. The setup base appears to be a cut-out from the cylinder side surface and is made of the PLA plastic using the 3D printing technology. Presented results of measuring the standing wave voltage coefficient confirmed the antenna array setup operability in the L1 frequency range for the GLONASS and GPS satellite radio navigation systems. Analysis results of the numerical calculations and measurements confirmed correctness of the technical solutions implemented in the antenna array. Using the 3D printing technology made it possible to accelerate development of the technical solutions in implementing the antenna array setup. The proposed antenna array design could be introduced in the navigation signal receivers with the adaptive beamforming

Keywords

Antenna array design, micro-strip antenna, setup development, additive technologies, satellite navigation user equipment, 3D printing, technical solutions development

Received 25.03.2024

Accepted 22.04.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Los V.F. Mikropoloskovye i dielektricheskie rezonatornye anteny [Microstrip and dielectric echo box antennas]. Moscow, IPRZhR Publ., 2002.

- [2] Panchenko B.A., Nefedov E.I. Mikropoloskovyye anteny [Microstrip antennas]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1986.
- [3] Zheksenov M.A., Pechurin V.A., Volchenkov A.S. Patch antenna array for unmanned aerial vehicle. *Trudy MAI*, 2011, no. 45 (in Russ.). Available at: https://trudymai.ru/published.php?ID=25385&PAGEN_2=2
- [4] Ksendzuk A.V. Aperture synthesis using the GLONASS navigation system GLONASS. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2003, no. 11, pp. 44–54 (in Russ.).
- [5] Yaskin Yu.S., Kharisov V.N., Efimenko V.S., et al. Jamming suppression characteristics in the first model of antijam GLONASS/GPS navigation receiver with adaptive antenna array. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2010, no. 7, pp. 127–136 (in Russ.). EDN: NBGVFD
- [6] Slyusar V.I. Digital antenna arrays. Solving the GPS problems. *Elektronika: NTB* [Electronics: STB], 2009, no. 1, pp. 74–78 (in Russ.). EDN: OCALQL
- [7] Zimin A.S., Krinitskiy G.V. Using multi-antenna systems to improve the noise immunity of satellite navigation systems for mobile vehicles. *Trudy MAI*, 2012, no. 51 (in Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29151>
- [8] Grigoryev L.N. Tsifrovoe formirovanie diagrammy napravlenosti v fazirovannykh antennoykh reshetkakh [Digital generation of the radiation pattern in phased array antennas]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010.
- [9] Nefedov E.I., Fialkovskiy A.T. Poloskovyye linii peredachi [Strip transmission lines]. Moscow, Nauka Publ., 1980.
- [10] Markov G.T., Chaplin A.F. Vozbuzhdenie elektromagnitnykh voln [Excitation of electromagnetic waves]. Moscow, Energiya Publ., 1966.
- [11] Bankov S.E., Davydov A.G., Papilov K.B. Circularly polarized compact patch antennas. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2010, no. 8 (in Russ.). Available at: <http://jre.cplire.ru/win/aug10/1/text.html>
- [12] Migalev I.E. Practical application of the finite difference time domain method to modeling the electromagnetic field. *Polzunovskiy vestnik*, 2012, no. 4, pp. 33–35 (in Russ.). EDN: PYQAYZ
- [13] Perov A.I., Kharisov V.N. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya [GLONASS. Principles of construction and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010.
- [14] Gnedak P.V. Fazovyy sintez nuley v diagrammakh napravlenosti aperturnykh antenn na osnove metoda aperturnykh ortogonalnykh polinomov. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Zero phase synthesis in the aperture antenna radiation patterns based on the aperture orthogonal polynomial method. Abs. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Moscow, MEI, 2009 (in Russ.).
- [15] Astapov V.Yu., Khoroshko L.L., Dudkov K.V. Evaluation of additive technologies application for creating models of space missile head. *Trudy MAI*, 2018, no. 101 (in Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96683>

- [16] Demidenko E.V., Kuzmin S.V., Kirik D.I. 3D printing of the antenna feeder systems from polymeric materials. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2018, vol. 1, pp. 491–495 (in Russ.). EDN: UUZBTO
- [17] Balashov A.Yu., Ermilov A.S., Gyulmagomedov N.Kh. [3D printing application for designing structures with the radio transparent characteristics]. *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee. Mater. VII Mezhdunar. konf. [Additive Technologies Today and in the Future. Proc. VII Int. Conf.]*, 2021, pp. 180–189 (in Russ.). EDN: COSCVL
- [18] Endogur A.I., Kravtsov V.A., Soloshenko V.N. Principles of rational aviation structural design with the use of composite materials. *Trudy MAI*, 2014, no. 72 (in Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=47572>
- [19] Kharalgin S.V., Voytovich M.I. Investigation of the dielectric characteristics of materials manufactured using additive technologies. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal [Russian Technological Journal]*, 2021, no. 2, pp. 57–65 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65>
- [20] Tarasova T.V., Skorniyakov I.A. Possibilities of additive technologies in fabrication of polymer composite materials. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroyenii*, 2017, no. 3, pp. 7–11 (in Russ.). EDN: XMZHID

Ermilov A.S. — Deputy Head of the Department, Head of the Sector, JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia” (Gagarina ul. 33, Reutov, Moscow Region, 143960 Russian Federation).

Balashov A.Yu. — Head of the Sector, JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia” (Gagarina ul. 33, Reutov, Moscow Region, 143960 Russian Federation).

Gyulmagomedov N.Kh. — Head of the Sector, JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia” (Gagarina ul. 33, Reutov, Moscow Region, 143960 Russian Federation).

Evseev D.A. — Deputy Head of the Department, Head of the Department, JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia” (Gagarina ul. 33, Reutov, Moscow Region, 143960 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ermilov A.S., Balashov A.Yu., Gyulmagomedov N.Kh., et al. Adaptive antenna array introduction for the satellite navigation system users. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 2 (149), pp. 82–95 (in Russ.). EDN: QVXCWJ