

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной работе  
ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный  
университет»  
Барышев Руслан Александрович

« 30 » 03 2021 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Диссертация «Антенны круговой поляризации для систем высокоточного позиционирования» выполнена на кафедре «Радиотехника» ИИФиРЭ СФУ.

В период подготовки диссертации соискатель Гафаров Евгений Раисович обучался в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра «Радиотехника».

В 2009 г. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» с присуждением степени магистра по направлению «Радиотехника».

В 2020 г. окончил очную аспирантуру при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2021 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель — Саломатов Юрий Петрович, профессор, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра «Радиотехника», заведующий кафедрой.

### **Оценка выполненной соискателем работы**

Диссертация Гафарова Евгения Раисовича является научно-квалификационной работой, в которой решаются задачи по исследованию параметров многочастотных и широкополосных антенных элементов круговой поляризации с многоточечным возбуждением и их схем питания, а также по исследованию способов улучшения пространственных характеристик антенн (амплитудных, фазовых и поляризационных).

В результате проведенных автором исследований получены результаты, заключающиеся в следующем: показано, что полная эффективность печатной многопортовой антенны практически не зависит от количества точек возбуждения при соответствующем выборе амплитуд и фаз для создания поля круговой поляризации, выработаны рекомендации по выбору количества точек возбуждения для разных типов антенн круговой поляризации; предложен способ улучшения коэффициента эллиптичности (КЭ) плоской волны с малых значений до единицы при помощи поляризатора меандровой линии, на его основе предложена конструкция цилиндрического поляризатора для квадрупольной антенны с целью повышения КЭ на скользящих углах; рассчитана зависимость средней крутизны диаграммы направленности (ДН) от диаметра высокоимпедансного экрана квадрупольной антенны для углов скользящих направлений на нижней и верхней частоте глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), показаны преимущества экрана диаметром  $12\lambda_0$ . Все это имеет значение для технических наук.

### **Актуальность темы**

Важной составляющей навигационного приемника является антенна, принимающая сигналы с правой круговой поляризацией. Качество принимаемого сигнала определяется характеристиками антенны, в том числе

формой ДН, угловой зависимостью КЭ, стабильностью фазового центра (ФЦ), эффективностью и полосой рабочих частот.

Требования к ДН высокоточных антенн ГНСС обусловлены как необходимостью уменьшения уровня приема отраженных сигналов с малых углов ниже горизонта  $\theta=90^\circ-100^\circ$  ( $\theta=90^\circ$  направление на горизонт), так и необходимостью обеспечения достаточного уровня принимаемых сигналов спутников, расположенных на малых углах выше горизонта  $\theta=80^\circ-90^\circ$ . Таким образом, требуются антенны с максимально возможной шириной ДН и высокой крутизной характеристики направленности для скользящих углов ( $\theta = 80^\circ - 100^\circ$ ).

Исследования решений данной задачи приведены в публикациях авторов (Татарников Д. В., Филиппов В. С., Sievenpiper D., Leick A., Rapoport L., и др.), из которых следует, что основным элементом, определяющим уровень и крутизну ДН для скользящих углов является экран антенны и его форма. При этом недостаточно внимания уделено исследованию электрически больших экранов, в том числе высокоимпедансных, для слабонаправленных антенн.

Существует проблема создания высоких значений КЭ в верхней полусфере, а также на углах ниже горизонта. Неоднократно отмечалось, что высокие значения КЭ для углов скользящих направлений позволяют минимизировать эффект многолучевой интерференции (авторы Braasch M. S., Montenbruck O. и др.). В работах авторов (Курдюмов О. А., Kunysz W., Moghadas H.) предложены различные конструкции антенн и частотно-поляризационных поверхностей, позволяющие расширить угловой диапазон с высоким КЭ. Однако, не исследованы пространственные поляризационные структуры на основе меандровой линии для слабонаправленных антенн ГНСС.

Требуют исследования вопросы обеспечения стабильности положения ФЦ антенны, как одного из ключевых параметров обеспечения точности определения координат. Известна серийно выпускаемая антенна ГНСС Trimble Zephyr, в которой использовано многоточечное возбуждение печатной антенны, и, благодаря этому, обеспечена высокая стабильность ФЦ. Многоточечное

возбуждение антенны является перспективным для различных типов антенн ГНСС. Важно отметить, что большее количество точек питания ведет не только к высокой стабильности ФЦ антенны, но и к сложности выполнения ее схемы питания, поэтому нахождение компромисса между этими двумя факторами является актуальной задачей.

Зачастую существующие антенны характеризуются невысокой эффективностью, что ведет к уменьшению отношения сигнал/шум. Представленное множество, как серийно выпускаемых, так и исследуемых антенн для систем спутникового позиционирования (Trimble, Leica, Topcon и др.) либо составлено из нескольких элементов (например, монополей), либо имеет несколько точек возбуждения (например, у печатной антенны) для формирования поля круговой поляризации. Неизбежным является эффект взаимного влияния между элементами такой многопортовой антенны. При этом анализ коэффициента отражения с учетом взаимовлияния и полной эффективности для таких антенн представлен не в полном объеме.

Составной частью многопортовой антенны ГНСС является ее схема питания. Эффективность схемы питания и неравномерность ее амплитудно-фазовой характеристики в полосе частот является фактором, определяющим характеристики антенны в целом. Нередко используются схемы питания в виде интегральных делителей/сумматоров, которые уменьшают эффективность антенны (Topcon PN-A5, RU2620195C1). Поэтому исследование схем питания для антенн круговой поляризации с высокой эффективностью и малой неравномерностью амплитудно-фазовой характеристики является перспективным.

Все вышеописанное обуславливает **актуальность работы**, направленной на исследование и поиск методов улучшения характеристик антенн ГНСС круговой поляризации, их схем питания, пространственных поляризаторов и специальных экранов.

## **Личное участие автора в получении результатов**

Основные исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, были выполнены автором самостоятельно. Совместно с научным руководителем обсуждались цели и задачи исследований, а также результаты работы. Личный вклад автора включает комплексный подход к исследованию электродинамических характеристик высокоточных антенн ГНСС, в том числе разработку схмотехнических и электродинамических моделей широкополосных схем питания, антенных элементов, поляризаторов и высокоимпедансных экранов. Выполнены экспериментальные исследования и проведена обработка экспериментальных данных. Часть экспериментальных результатов получена совместно с соавторами научных публикаций.

## **Степень достоверности результатов**

Результаты диссертационной работы Гафарова Е. Р. подтверждаются:

- корректным применением численных и аналитических методов;
- корректным применением САПР;
- использованием апробированных экспериментальных методик и высокоточного измерительного оборудования;
- воспроизводимостью и проверяемостью полученных данных, количественным и качественным совпадением результатов моделирования, экспериментальных исследований и данных, известных из литературы.

## **Новизна результатов**

1. Найдено компромиссное решение между количеством используемых портов многопортовых антенн разных типов и их характеристиками, позволяющее уменьшить количество составных частей антенн круговой поляризации.

2. Предложен цилиндрический поляризатор меандровой линии для квадрупольной антенны, позволяющий увеличить развязку по поляризации в области скользящих углов и уменьшить уровень нежелательного отраженного сигнала.

3. Рассчитана зависимость крутизны амплитудной ДН квадрупольной антенны от диаметра ее высокоимпедансного экрана в области скользящих углов, которая позволяет получить высокий уровень перепада усиления при переходе в нерабочую область углов с сохранением относительно малых габаритов антенной системы.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

Теоретическая значимость определяется техническими результатами, полученными при численных расчетах и электродинамическом моделировании антенн круговой поляризации, их схем питания, а также структур, позволяющих улучшить характеристики направленности и поляризации таких антенн. Практическая значимость:

1. Выработаны рекомендации по выбору количества точек возбуждения/излучающих элементов антенн ГНСС для получения высокого КПД и стабильного ФЦ.

2. Разработаны широкополосные конструкции схем питания для антенн круговой поляризации ГНСС ( $\Delta f > 35\%$ ) с тремя и четырьмя точками возбуждения в одно- и двухслойной компактной реализации, соответственно.

3. Предложена компактная конструкция двухслойной ПА ГЛОНАСС с интегрированной трехточечной схемой питания. Антенна, благодаря ее малому профилю и весу, может быть использована в качестве элемента плоской антенной решетки, в том числе на борту космического аппарата.

4. Предложена всесистемная квадрупольная антенна ГНСС с интегрированной четырехточечной схемой питания, которая может быть применена в качестве высокоточной антенной системы в комбинации с экраном для подавления многолучевой интерференции, а также в качестве элемента помехозащищенной антенной решетки.

5. Предложена конструкция пространственного поляризатора меандровой линии цилиндрической формы для квадрупольной антенны, позволяющая улучшить развязку по поляризации и уменьшить влияние эффекта многолучевой интерференции в высокоточных антенных системах.

6. Предложена конструкция высокоимпедансного экрана для квадрупольной антенны диаметром 12 длин волн для уменьшения эффекта многолучевой интерференции при относительно малых электрических размерах экрана.

### **Ценность научных работ соискателя**

Ценность исследований Гафарова Е. Р. подтверждается результатами, использованными в НИОКР ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва, о чём свидетельствуют соответствующие акты внедрения. Результаты работы докладывались и обсуждались на восьми российских и международных конференциях.

### **Соответствие требованиям пункта 14 Положения ВАК**

Требования, установленные пунктом 14 Положения ВАК, выполнены: в диссертации автор ссылается на источники заимствования материалов, во Введении автор отметил, что часть результатов получена совместно с соавторами научных публикаций и в каждом оригинальном разделе диссертации привёл ссылки на работы.

### **Специальность, которой соответствует диссертация**

Диссертация Гафарова Евгения Раисовича соответствует специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» в области исследования «Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами» по п. 3 паспорта специальности.

**Полнота изложенных материалов в печатных работах, опубликованных автором**

По результатам исследований опубликовано 19 научных работ, включая 6 статей в рекомендованных ВАК РФ изданиях, 11 в сборниках публикаций, индексируемых в наукометрической базе Scopus, 7 в Web of Science.

*Статьи в журналах из перечня ВАК*

1. Гафаров Е.Р. Антенна ГЛОНАСС/GPS с частотно-селективной поверхностью / Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов // Известия вузов. Физика. Издание Томского Государственного Университета. – 2010. Т. 53, №9/2, С. 60–61.

2. Гафаров Е.Р. Трехчастотная антенна ГЛОНАСС/GPS / Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов // Доклады ТУСУР. Изд. ТУСУРа – 2011. №2-1 (24), С. 197–200.

3. Гафаров Е.Р. Низкопрофильная замедляющая структура для антенн глобального позиционирования / Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов // Известия вузов. Физика. Издание Томского Государственного Университета. – 2012. Т. 55, №9/2, С. 58–59.

4. Гафаров Е.Р. Исследование диаграммы обратного излучения квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном больших электрических размеров / Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2021. Т. 24, № 1. С. 6-14.

5. Гафаров Е.Р. Увеличение коэффициента эллиптичности электромагнитной волны при помощи поляризатора на основе меандровой линии / Е.Р. Гафаров, А.А. Ерохин, Е.А. Литинская // Письма в журнал технической физики. – 2021. Т. 47, № 9. С. 11-13.

6. Гафаров Е.Р. Анализ эффективности многопортовой печатной антенны / Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24, № 1.



1. Gafarov E.R., Salomatov Y.P. Circular polarized dual-band microstrip antenna for application in GLONASS/GPS // 20<sup>th</sup> Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2010), 7–13 September, Sevastopol, Crimea, Russia, pp. 571–572.

2. Gafarov E.R., Salomatov Y.P. Hexagonal FSS for GLONASS/GPS antenna with improved axial ratio // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Krasnoyarsk, Russia, 15-16 Sept. 2011, pp. 159–161.

3. Gafarov E.R., Salomatov Y.P., Lemberg K.V. GNSS antenna characteristics using bi-orthogonal far-field measurement // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 24<sup>th</sup> International Crimean Conference, Sevastopol, 7-13 Sept. 2014, pp. 932–933.

4. Gafarov E.R., Salomatov Y.P. The spiral slot antenna with a horizontal choke ring // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 24<sup>th</sup> International Crimean Conference, Sevastopol, 7-13 Sept. 2014, pp. 513–514.

5. Gafarov E.R., Salomatov Y.P. The dual-band antenna for navigation satellite systems // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 25<sup>th</sup> International Crimean Conference, Sevastopol, 7-13 Sept. 2015, pp. 499–500.

6. Gafarov E.R., Salomatov Y.P., Stankovsky A.V., Polenga S.V. Meander-Line Polarizer for Omnidirectional Antenna // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, 12-14 may 2016.

7. Gafarov E.R., Salomatov Y.P., Stankovsky A.V. A GNSS quadrupole antenna with a spatial polarizer for the suppression of low-angle multipath // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 12-14 May 2016.

8. Gafarov E.R., Erokhin A.A., Salomatov Y.P. Broadband Four-Fed Circularly Polarized Quadrupole Antenna // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, 29-30 June 2017.

9. Gafarov E.R., Salomatov Y.P., Stankovsky A.V. A GNSS Dipole Antenna with a Meander-Line Polarizer for the Reduction of Multipath Interference // IEEE

Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Gelendzhik, Russia, 26 Jun - 30 Jun 2017. pp. 311–313.

10. Гафаров Е.Р. Коэффициент подавления помехи в адаптивной антенной решетке с учетом взаимной связи антенных элементов / Е.Р. Гафаров, А.А. Ерохин, Ю.П. Саломатов // Известия вузов. Физика. 2017. Т. 60, №12/2. С. 95– 99.

11. Gafarov E.R., Erokhin A.A., Salomatov Y.P. Mutual Coupling Effect of Adaptive Antenna Array on Wave-Slowing Structure // XIV Conference «Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering» (APEIE), 2018, pp. 412–416.

12. Gafarov E.R., Erokhin A.A., Salomatov Y.P. Multiband Three-Layer GNSS Microstrip Antenna // IEEE 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia, 18-20 April 2019.

13. Gafarov E.R., Erokhin A.A., Salomatov Y.P. The GNSS Helix Antenna for High Precision Application // IEEE Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Gelendzhik, Russia, 26 Jun - 30 Jun 2019, pp. 128–131.

Диссертация «Антенны круговой поляризации для систем высокоточного позиционирования» Гафарова Евгения Раисовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 — «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара кафедры «Радиотехника».

Присутствовало на заседании – 20 чел. С правом решающего голоса – 11 чел. Результаты голосования «за» – 11 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 2 от 23.03.2021 г.

Патрин Геннадий Семёнович  
Доктор физ.-мат. наук, профессор,  
директор института инженерной физики  
и радиоэлектроники.



---