

На правах рукописи



Гафаров Евгений Раисович

АНТЕННЫ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), г. Красноярск

Научный руководитель: **Саломатов Юрий Петрович**, кандидат технических наук, профессор СФУ

Официальные оппоненты: **Кирпанев Алексей Владимирович**, доктор технических наук, доцент, начальник отдела антенн W-диапазона ОАО «НПП «Радар ммс», г. Санкт-Петербург

Буянов Юрий Иннокентьевич, кандидат физико-математических наук, доцент ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 29 июня 2021 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники <https://postgraduate.tusur.ru/urls/g7xzvb6b>

Автореферат разослан «__» мая 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.268.01,
доктор физико-математических наук, профессор



А. Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важной составляющей навигационного приемника является антенна, принимающая сигналы с правой круговой поляризацией. Качество принимаемого сигнала определяется характеристиками антенны, в том числе формой диаграммы направленности (ДН), угловой зависимостью коэффициента эллиптичности (КЭ), стабильностью фазового центра (ФЦ), коэффициентом полезного действия (КПД) и полосой рабочих частот.

Требования к ДН высокоточных антенн глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) обусловлены как необходимостью уменьшения уровня 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., Рапопорт Л. Б., Филиппов В. С., Sievenpiper D., Leick A. и др.), из которых следует, что основным элементом, определяющим уровень и крутизну ДН для скользящих углов является экран антенны и его форма. Другим способом повышения крутизны ДН является использование линейной антенной решетки, ориентированной в направлении на зенит. При этом недостаточно внимания уделено исследованию электрически больших экранов, в том числе высокоимпедансных, для слабонаправленных антенн.

Существует проблема создания высокого значения КЭ во всем рабочем диапазоне углов антенны ГНСС, а также на углах ниже горизонта. 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.

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 (ПА) и обеспечена высокая стабильность ФЦ. Многоточечное возбуждение 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 навигационных приемников характеризуются низким КПД, что ведет к уменьшению отношения сигнал/шум и, как

следствие, снижению точности позиционирования. Представленное множество, как серийно выпускаемых, так и исследуемых антенн для систем спутникового позиционирования (Trimble, Leica, Topcon) 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 (КО) с учетом взаимовлияния и полного КПД для таких антенн представлен не в полном объеме.

Составной частью многопортовой антенны ГНСС является ее схема питания со ступенчатым набегом фаз на выходах. КПД схемы питания и неравномерность ее амплитудно-фазовой характеристики в полосе частот ГНСС является важным фактором, определяющим характеристики антенны в целом. Нередко используются схемы питания в виде интегральных делителей/сумматоров, которые уменьшают КПД антенны (Topcon PN-A5, RU2620195C1), либо сложность такой схемы питания налагает повышенные требования на точность изготовления (антенна Dorne&Margolin). Поэтому интересным представляется исследование схем питания для антенн круговой поляризации с высоким КПД и малой неравномерностью амплитудно-фазовой характеристики.

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.

Целью диссертационной работы является исследование антенн круговой поляризации ГНСС, направленное на повышение качества приема навигационных сигналов.

Объектом исследования являются антенны круговой поляризации, **предметом исследования** являются способы получения электродинамических характеристик антенн, необходимых для высокоточного позиционирования в беззапросных измерительных системах (БИС).

Задачи диссертационного исследования:

– Анализ принципов построения и конструктивных особенностей антенн ГНСС.

– Исследование параметров многочастотных и широкополосных антенных элементов (АЭ) круговой поляризации с многоточечным возбуждением и их схем питания.

– Исследование возможности улучшения пространственных характеристик антенн (амплитудных, фазовых и поляризационных).

– Разработка и создание антенн для беззапросных измерительных систем ГНСС, проведение экспериментальных исследований и анализ результатов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы электродинамического моделирования, САПР, матричной алгебры и вычислительной математики, экспериментальные исследования в безэховой камере.

Научная новизна:

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

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

– 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:

– Выработаны рекомендации по выбору количества точек возбуждения/излучающих элементов антенн ГНСС для получения высокого $\overline{KЭ}$, КПД и стабильного ФЦ.

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

– 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.

– 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.

– 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.

– Предложена конструкция высокоимпедансного экрана диаметром 12 длин волн для квадрупольной антенны с целью уменьшения эффекта многолучевой интерференции.

Достоверность результатов основывается на использовании современных САПР, апробированных экспериментальных методик и высокоточного оборудования, на корректном применении численных и аналитических методов. Результаты работы являются воспроизводимыми и проверяемыми, наблюдаются количественные и качественные совпадения результатов моделирования, экспериментальных исследований и данных, известных из литературы.

Внедрение результатов исследований. Результаты исследований использованы в ходе выполнения НИР и ОКР: «Разработка материалов в эскизный проект по развитию наземного сегмента космического комплекса система ГЛОНАСС в части разработки антенной решётки для помехоустойчивой беззапросной измерительной системы» (2013 г.), «Исследование и разработка антенн спутниковой радионавигации с применением частотно-селективных поверхностей» проводимой в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009–2013 гг.), «Разработка наземного стенда для обеспечения проведения летного эксперимента по приему и обработке навигационных сигналов» (2015 г.), «Повышение эффективности пространственной фильтрации помех в полосе частот полезного сигнала для помехозащищенной приёмной аппаратуры» (2017-2018 гг.), «Разработка технического проекта и макета беззапросной измерительной системы помехоустойчивой» (2016-2020 г.).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», г. Томск, 2010, 2012, 2017 г.;
- VII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2011 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», г. Красноярск, 2014 г.;
- Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2010, 2014, 2015 гг.;
- Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON, 2011, 2016, 2017, 2019 гг.;
- XIV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», г. Новосибирск, 2018 г.;
- Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», Краснодарский край, пос. Дивноморское, в 2017, 2019 гг.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 19 научных работах, из них 6 в журналах из перечня ВАК, 11 в сборниках публикаций, индексируемых в наукометрической базе Scopus, 7 в Web of Science.

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 полученных данных. Часть экспериментальных результатов получена совместно с соавторами научных публикаций.

Защищаемые научные положения:

1. Коэффициент полезного действия двухслойной двухчастотной печатной антенны круглой формы с разносом центральных частот в 24% составляет более 0,98 при расположении точек возбуждения на расстоянии $0,1\lambda_0$ от геометрического центра антенны и не зависит от их количества ($N_T=2, 3, 4$) и взаимного влияния при формировании поля круговой поляризации.

2. Применение однослойного цилиндрического поляризатора на основе мандровой линии, расположенного соосно с квадрупольной антенной, позволяет в полосе частот 6% увеличить коэффициент эллиптичности для углов скользких направлений $\theta = 80^\circ - 100^\circ$ (90° – направление на горизонт) с 0,45 до 0,77.

3. Предложенная квадрупольная антенна с высокоимпедансным экраном диаметром $12\lambda_0$ системы вертикальных стрижней с треугольной сеткой расположения, имеет наибольшую крутизну амплитудной ДН (1дБ/°) для углов скользких направлений $\theta = 80^\circ - 100^\circ$ на нижней частоте $f/f_0=0,83$ рабочего диапазона шириной 33%.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объём диссертации составляет 150 страниц, количество иллюстраций 136, число цитированных источников 111. Приложение с актами использования результатов исследований на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены защищаемые положения, изложена научная и практическая значимости работы.

В первой главе описываются особенности распространения радиоволн в диапазонах ГНСС, в том числе влияние тропосферы и ионосферы, эффекты многолучевого распространения. Приведены основные параметры антенн круговой поляризации ГНСС, определены требования к ним. Кроме того, представлены основные подходы к исследованию и разработке АЭ и схем питания, антенных систем круговой поляризации высокоточных измерительных станций, а также освещены связанные с этим технические проблемы.

При анализе существующих решений антенн ГНСС сформированы направления исследований в части АЭ и схем питания, а также структур поляризаторов и высокоимпедансных экранов.

Во второй главе исследуется влияние способов возбуждения, геометрических размеров излучателей и толщин подложек двухслойной ПА на полосу рабочих частот при возбуждении одной точкой (портом). Выполнено исследование полного коэффициента отражения и полного КПД двухслойной ПА с несколькими точками возбуждения ($N_T=2, 3, 4$), а также проведен анализ характеристик направленности при создании поля круговой поляризации. Приведены результаты разработки широкополосной схемы питания для двухслойной ПА.

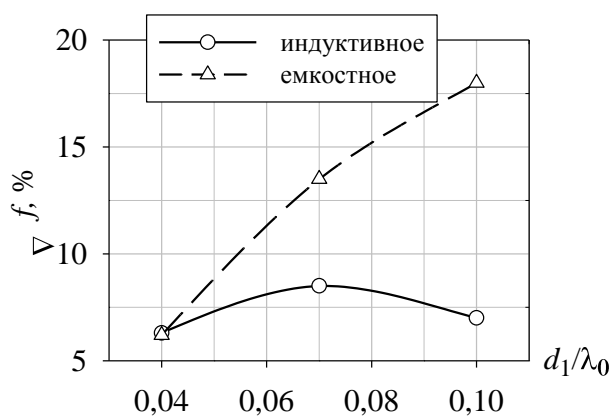


Рисунок 1 – Зависимость полосы частот от толщины подложки ПА при индуктивном и емкостном возбуждениях

Для получения антенны круговой поляризации, работающей на всех частотах ГНСС (всесистемная антенна) с высокими КПД и КЭ исследована двухслойная ПА и многоточечная схема возбуждения. Одной из проблем проектирования двухслойных антенн является выбор расстояния между слоями антенны, т.к. от него зависят резонансные частоты.

Выполнен расчет двухслойной ПА методом конечных элементов для определения достижимой полосы частот вариацией толщин подложек d_1 и d_1' (рисунок 2). При возбуждении ПА в одной точке получена зависимость полосы частот $\Delta f(d_1, d_1')$, из которой следует, что для согласования (по уровню $K_{CB} \leq 2$) на сопротивление $Z_0 = 50$ Ом на частотах ГНСС необходимо выбирать следующие размеры: $d_1' \geq 18$ мм, $d_1 \geq 2$ мм, при этом $D_1 = 88$ мм, $D_2 = 120,4$ мм. Увеличение толщины подложки НЧ пластинки (d_1') ведет к росту как Δf_1 , так и Δf_2 , с увеличением d_1 наблюдается рост Δf_1 , а Δf_2 в свою очередь уменьшается при $d_1' \geq 15$ мм. Такое поведение характеристики можно объяснить ростом реактивных составляющих, в том числе и взаимных.

В зависимости от выбора количества точек питания (N_T) и соотношений их амплитуд и фаз можно получить различные поляризационные характеристики и ДН ПА. Выполнено исследование многоточечного равноамплитудного возбуждения двухслойной ПА с $N_T = 2, 3, 4$, с фазами $[1(0^\circ), 2(90^\circ)]$, $[1(0^\circ), 2(120^\circ), 3(240^\circ)]$, $[1(0^\circ), 2(90^\circ), 3(180^\circ), 4(270^\circ)]$, соответственно (рисунок 3).

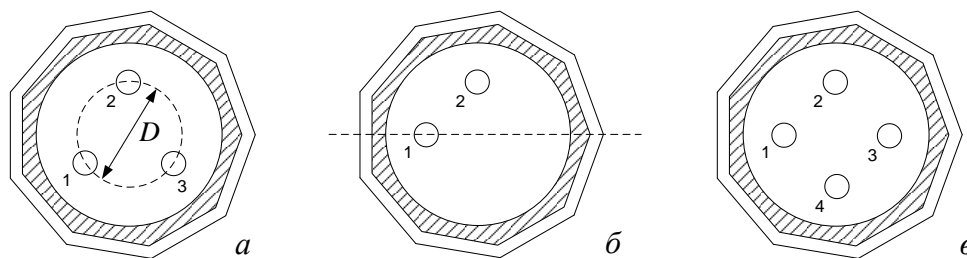


Рисунок 3 – ПА с тремя $N_T = 3$ (а), двумя $N_T = 2$ (б), четырьмя $N_T = 4$ (в) точками питания для создания поля круговой поляризации

Проведен анализ влияния способов возбуждения на полосу рабочих частот однослойной конструкции ПА. Показано, что для обеспечения работы на всех известных частотах ГНСС с полосой НЧ ($\Delta f_2 = 0,83f_0 - 0,93f_0$, где $f_0 = 1,4$ ГГц) не менее 12%, и ВЧ ($\Delta f_1 = 1,09f_0 - 1,15f_0$) не менее 6% необходимо использовать емкостное возбуждение (рисунок 1). Для реализации емкостного возбуждения использована подвешенная подложка ПА с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3,55$.

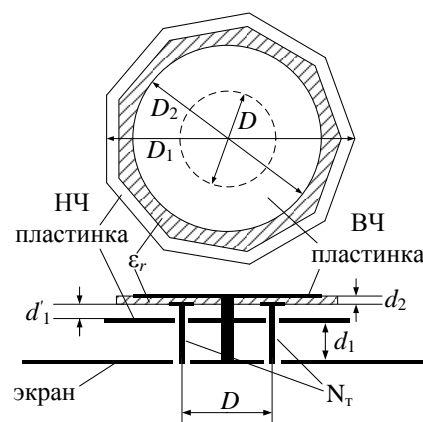


Рисунок 2 – Двухслойная ПА с емкостным возбуждением ВЧ пластинки

Показано, что при выполнении условий:

для $N_T=2$: $S_{11}=S_{22}$ и $S_{12}=S_{21}$;

для $N_T=3$: $S_{11}=S_{22}=S_{33}$ и $S_{12}=S_{21}=S_{13}=S_{31}=S_{32}=S_{23}$;

для $N_T=4$: $S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}$ и $S_{12}=S_{21}=S_{14}=S_{41}$ и $S_{13}=S_{31}=S_{42}=S_{24}$.

Полный коэффициент отражения для различных N_T :

$$\Gamma_a^{r(N_T=2)} = \sqrt{(S_{11})^2 + (S_{12})^2}, \quad \Gamma_a^{r(N_T=3)} = S_{11} - S_{12}, \quad \Gamma_a^{r(N_T=4)} = S_{11} - S_{13}.$$

Полный КПД при этом равен $\eta_{\text{total}} = 1 - |\Gamma_a^r|^2$.

По полученным формулам (FOR) и при помощи характеристик направленности из САПР (рассчитанных методом конечных элементов (FEM)) проведена оценка полного КПД (η_{total}) ПА при различном радиусе кольца $D/2$, на котором расположены точки возбуждения для $N_T=2, 3, 4$. Также по формулам рассчитана частотная зависимость полного КПД при фиксированном радиусе кольца. Из рисунка 4, а следует, что КПД более 0,98 соответствует $D/2=0,1\lambda_0$ и не зависит от количества точек возбуждения (N_T) и взаимного влияния между ними. Полный КПД (рисунок 4, б) в полосе исследуемых частот ГНСС (выделенные области Δf_1 и Δf_2) также почти не зависит от N_T при создании круговой поляризации, $D/2=0,1\lambda_0$.

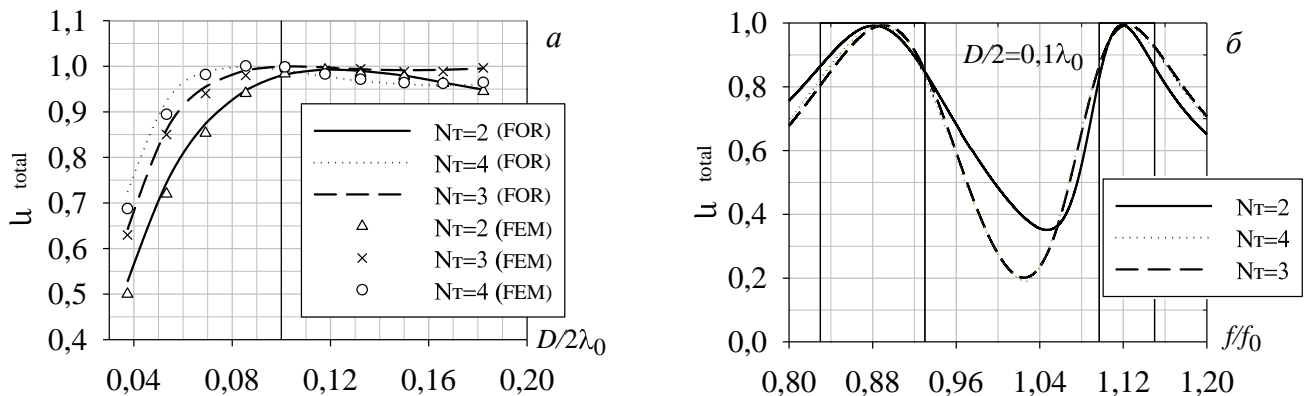


Рисунок 4 – Полный КПД (η_{total}) при возбуждении всех портов в зависимости от радиуса кольца $D/2\lambda_0$ (а), а также его частотная зависимость при $D/2=0,1\lambda_0$ (б) двухслойной ПА с различным N_T

При $N_T \geq 3$ асимметрия излучения у ПА отсутствует, однако, при возбуждении двух ортогональных мод в двух точках ($N_T=2$, рисунок 3, б) характеристики направленности двухслойной ПА могут быть искажены, в этом случае наблюдается отклонения максимума ДН на угол θ_0 от опорного направления (таблица 1). $f_H=0,83f_0, f_B=1,15f_0$.

Преимущество антенны с $N_T=3$ состоит в меньшем количестве плеч схемы питания по сравнению с $N_T=4$, и, следовательно, возможно получение большего

Таблица 1 – Значения характеристик ПА с разным N_T

Параметр	$N_T=2$ (f_H/f_B)	$N_T=3$ (f_H/f_B)	$N_T=4$ (f_H/f_B)
θ_0 , град.	12/10	0/0	0/0
$\sigma_{\text{ФЦ}}$, мм.	5,3/3,87	1,67/0,23	1,42/0,19
$\overline{\text{КЭ}}$	0,68/0,53	0,76/0,66	0,77/0,69

КПД антенны с интегрированной схемой питания. Стабильность ФЦ и средний КЭ при $N_T \geq 3$ (для углов $\theta=[60^\circ; 60^\circ]$ или по уровню минус 10 дБ) изме-

няется незначительно для нижней и верхней частот ГНСС (таблица 1). Таким образом, ПА с $N_T=3$ является предпочтительной, по сравнению с $N_T=2$ и $N_T=4$.

Для ПА с $N_T=3$ исследована конструкция схемы питания, состоящая из двух фазовращателей (ФВР) с фазами $[0^\circ, 120^\circ]$ и $[0^\circ, 240^\circ]$, соответственно. Трехточечная схема питания на основе объединения ФВР 120° и 240° показана на рисунке 5, а (принципиальная схема) и рисунке 5, б (микростриповое исполнение).

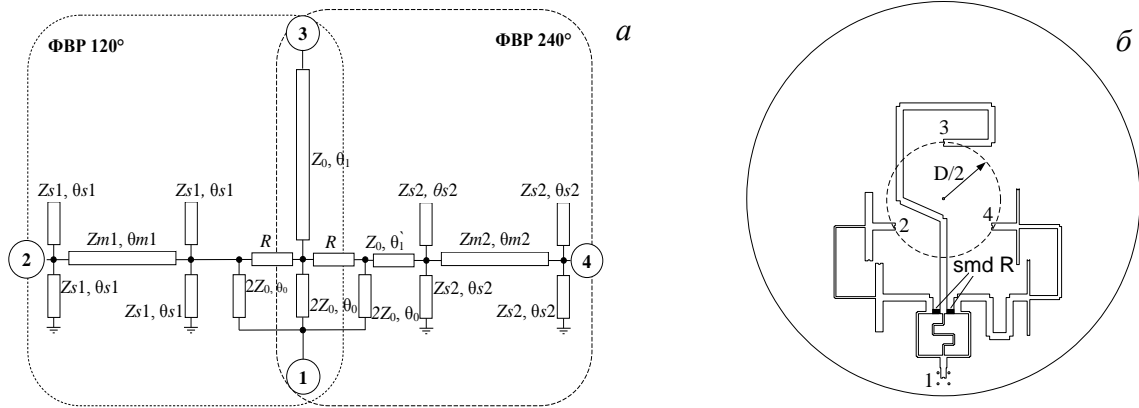


Рисунок 5 – Принципиальная схема (а) и микростриповая топология (б) трехточечной схемы питания

Характеристики схемы питания приведены на рисунке 6.

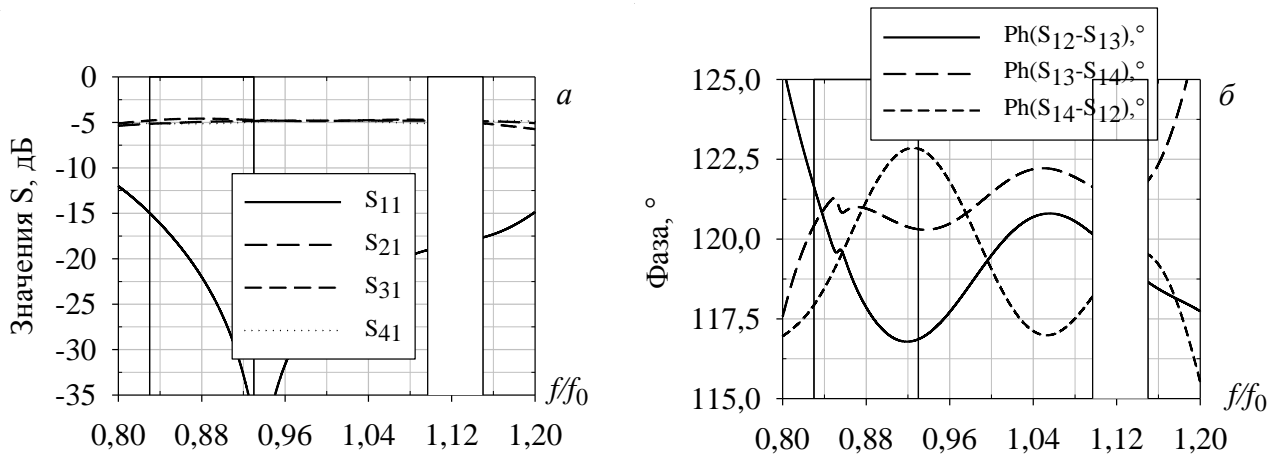


Рисунок 6 – АЧХ (а) и ФЧХ (б) трехточечной схемы питания

По результатам моделирования КПД схемы питания более 96,5%, неравномерность фазы $\Delta\varphi=\pm 3^\circ$, неравномерность амплитуды $\Delta F=0,45$ дБ.

В третьей главе рассмотрена широкополосная антенна ГНСС с полусферической образующей монополей для получения широкоугольной ДН с высоким уровнем горизонтального усиления (коэффициент усиления (КУ) в направлении на горизонт) и высоким КПД. Исследованы способы улучшения поляризационных характеристик квадрупольной антенны для скользящих углов при помощи пространственного поляризатора меандровой линии. Проведено исследование квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном для формирования резкого перепада усиления в области скользящих углов.

Рассмотрен АЭ, составленный из набора сегментов, образующих полусферу радиусом $R1$ (рисунок 7, *а, б*). Система сегментов расположена над идеально проводящей поверхностью. Радиус полусферы определяет рабочую частоту.

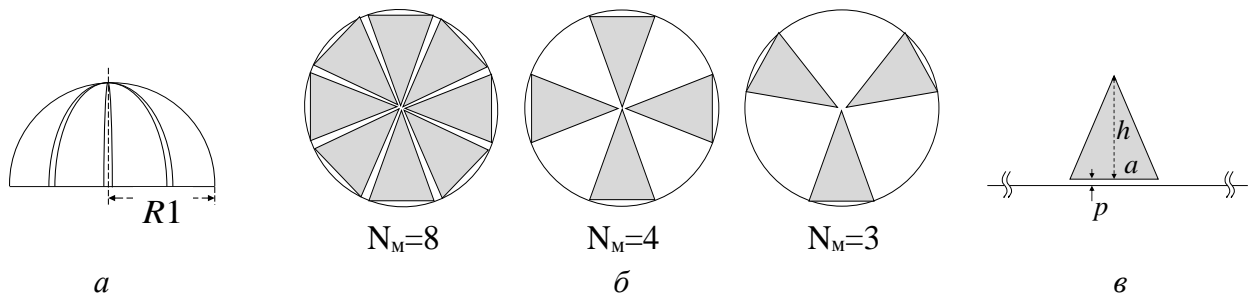


Рисунок 7 – АЭ, составленный из нескольких монополей (N_M) с полусферической образующей: вид сбоку (*а*), вид сверху (*б*). Монополь треугольной формы (*в*)

Для определения характеристик согласования рассмотрен один сегмент полусферы (монополь с полусферической образующей). Сегмент полусферы может быть приближенно представлен в виде плоского монополя треугольной формы с высотой h , основанием a и высотой над экраном p (рисунок 7, *в*).

Проведенный анализ характеристик при помощи метода конечных элементов показал, что наибольшая ширина полосы частот (61%) по уровню КСВ=2 достигается для $a \approx 0,5h$, при этом $p = 11,5^{-3}\lambda_0$ (3мм на частоте $f_0 = 1,4$ ГГц). Для формирования поля круговой поляризации необходимо объединить несколько монополей.

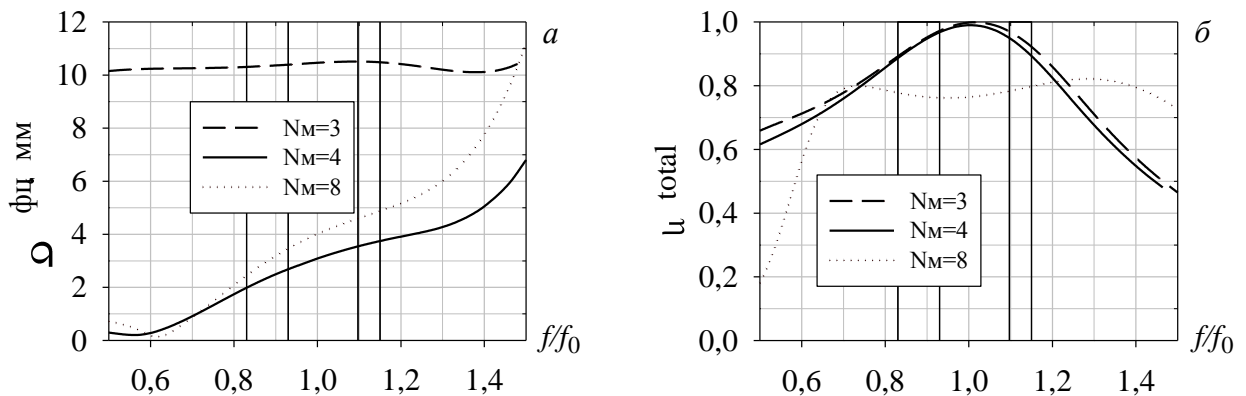


Рисунок 8 – Стабильность ФЦ (*а*) и полный КПД (*б*) антенны с различным количеством элементов N_M в диапазоне углов $\theta = [-90^\circ; 90^\circ]$

Вклад в полный коэффициент отражения и полный КПД антенны будет вносить взаимное влияние между монополями. Было проведено моделирование антенны с различным количеством монополей (триполь $N_M=3$, квадруполь $N_M=4$, октаполь $N_M=8$).

Для создания круговой поляризации обеспечено равноамплитудное возбуждение с фазами $[0^\circ, 120^\circ, 240^\circ]$ для $N_M=3$, $[0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ]$ для $N_M=4$ и $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ]$ для $N_M=8$. Частотная зависимость полного КПД АЭ приведена на рисунке 8, *б*. Полный КПД более 90% в полосе частот не менее 33% для $N_M=3, 4$, и более 75% для $N_M=8$. Наихудшее среднеквадратическое отклонение фазовой ДН в полусфере $\theta = [-90^\circ; 90^\circ]$ наблюдается для антенны с $N_M=3$

(рисунок 8, а). Из работ Татарникова Д. В. известно, что азимутальная неравномерность амплитудной ДН при $N_M=3$ составляет около 5 дБ, а для $N_M=4$ менее 1 дБ. В этой связи наиболее предпочтительным является использование АЭ с $N_M=4$.

Для квадрупольного АЭ предложена двухслойная широкополосная схема питания (рисунок 9). По результатам моделирования для четырехточечной схемы питания искажения на рабочих частотах составляют не более 0,5 дБ по амплитуде и $\pm 5^\circ$ по фазе. КПД схемы питания выше 95%.

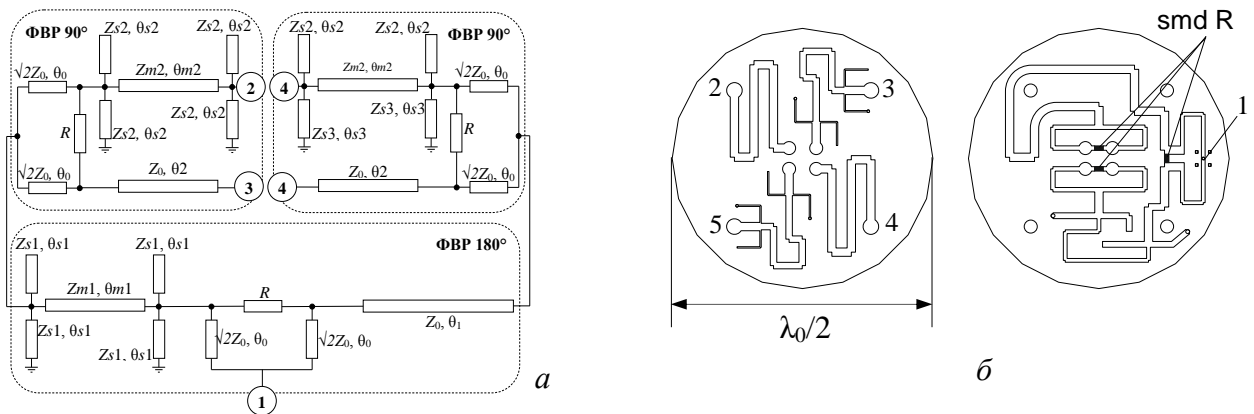


Рисунок 9 – Принципиальная схема (а) и микрополосковая топология (б) четырехточечной схемы питания (верхний слой слева, нижний справа)

Как правило, КЭ антенны ГНСС составляет 0,2-0,3 и менее для углов скользких направлений $\theta = 80^\circ - 100^\circ$ (90° – направление на горизонт). Для повышения этого уровня возможно применение поляризационных структур. В работе для решения задачи увеличения КЭ предложен поляризатор на основе меандровой линии. Проведен анализ поля квадрупольной антенны с цилиндрическим поляризатором меандровой линии (рисунок 10), $d = 1,1\lambda_0$, $k = 0,55\lambda_0$.



Рисунок 10 – Квадрупольная антенна с поляризатором и исследуемые плоскости азимутальных углов $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$

На рисунке 11, а приведена угловая зависимость КЭ квадрупольной антенны без поляризатора, на рисунке 11, б – с поляризатором. На рисунке 12 изображена частотная зависимость среднего $\overline{КЭ}$ для скользких углов, рассчитанная методом конечных элементов (FEM) и при помощи техники конечного интегрирования (FIT).

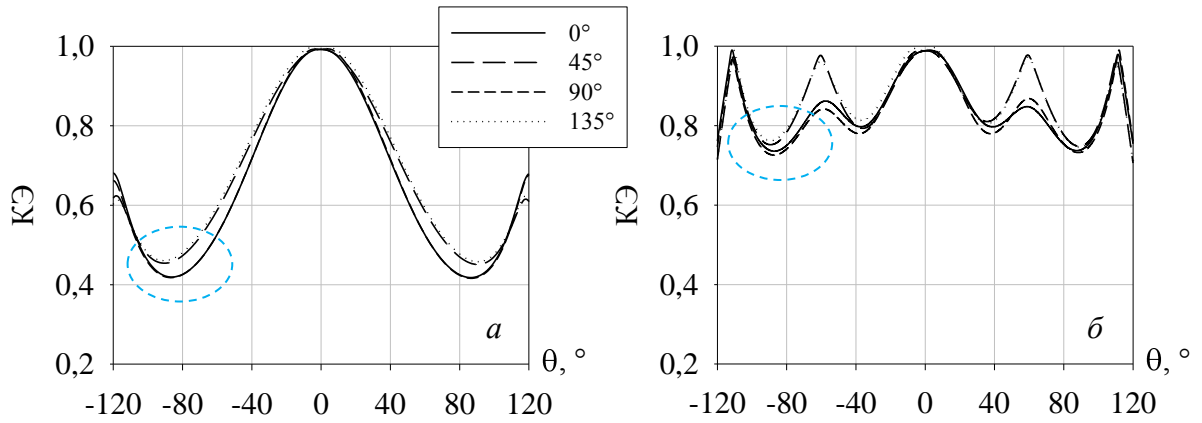


Рисунок 11 – КЭ для $\varphi=[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ]$ квадрупольной антенны без поляризатора (а) и с поляризатором (б), рассчитанный методом конечных элементов (FEM). $f/f_0=1,15$

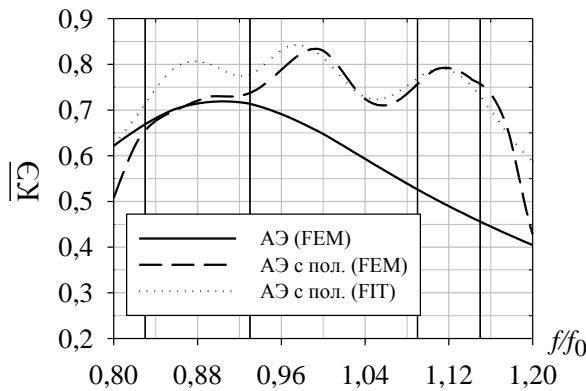


Рисунок 12 – Средний $\overline{КЭ}$ в диапазоне скользящих углов $\theta=[80^\circ; 100^\circ]$, $\varphi=[0^\circ; 360^\circ]$

Анализ вышеприведенных результатов показывает возможность увеличения $\overline{КЭ}$ квадрупольной антенны (рисунок 12) для скользящих углов до значений более $0,72$ (развязка по поляризации увеличена на 8 дБ) на частотах Δf_1 .

Устойчивость к многолучевой интерференции антенн ГНСС во многом определяется крутизной ДН в области скользящих углов. Крутизна ДН антенны определяется размером ее экрана. Далее представлено исследование зависимости

крутизны амплитудной ДН $\overline{F}'(\theta)$ от диаметра экрана антенны R/λ_0 , проведена оценка диаграммы обратного излучения.

В работе предложен высокоимпедансный экран решетки стержней с треугольной сеткой с шагом P (рисунок 13). В ходе исследования установлено, что

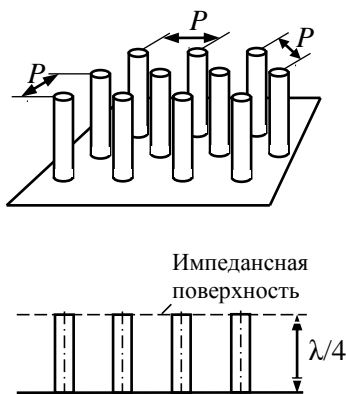


Рисунок 13 – Импедансная поверхность с треугольной сеткой

при $f/f_0=0,83$ с увеличением диаметра экрана первый минимум ДН (рисунок 14, б) перемещается в сторону $\theta=100^\circ$, затем уменьшается. Этим можно объяснить всплеск зависимости $\overline{F}'(\theta)$ (рисунок 15) для значения диаметра экрана $R=10\lambda_n(12\lambda_0)$, $\lambda_n=\lambda_0/0,83$, где первый минимум ДН находится в районе угла $\theta=100^\circ$. Из рисунка 17, б, на котором приведена оценка отношения вперед/назад (Down/Up или $DU(\theta)=F(180^\circ-\theta)/F(\theta)$), также

можно проследить преимущество экрана диаметром $12\lambda_0$ на НЧ. На ВЧ первый минимум ДН (рисунок 14, а) также стремится к углу $\theta=100^\circ$, но достигает этого значения при $R=22,5\lambda_b(20\lambda_0)$, ($\lambda_b=\lambda_0/1,15$), в этой связи наблюдается наименьшее DU (рисунок 17, а) и крутизна ДН при $\theta=100^\circ$ (рисунок 15).

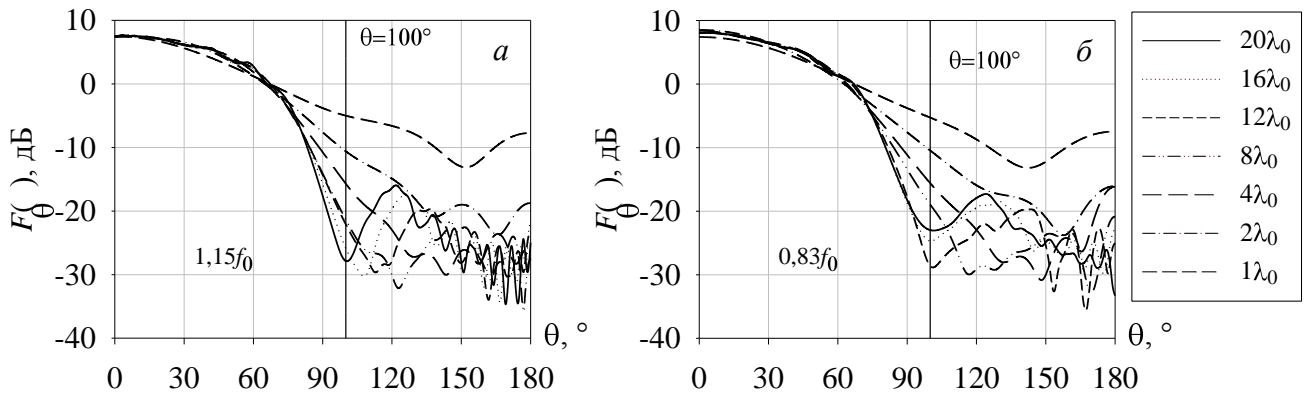


Рисунок 14 – ДН квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном различного диаметра на частоте $f/f_0=1,15$ (а) и $f/f_0=0,83$ (б)

Из графика частотной зависимости крутизны ДН (рисунок 16) видно, что наибольшее значение она принимает на граничной частоте НЧ диапазона ГНСС. На верхних частотах значение крутизны ДН составляет около $0,75 \text{ дБ}/^\circ$.

Высокоимпедансный экран диаметром $R=12\lambda_0$ является предпочтительным для квадрупольной антенны на частотах Δf_2 , дальнейшее увеличение экрана будет незначительно улучшать его характеристики.

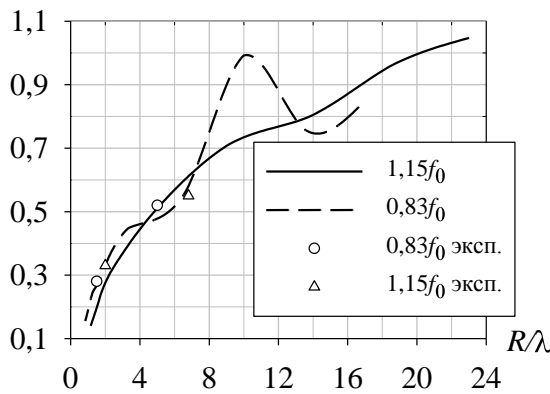


Рисунок 15 – Зависимость средней крутизны ДН для скользящих углов от R/λ для квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном

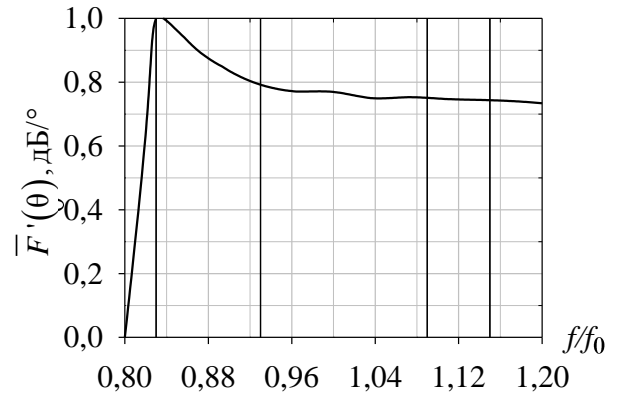


Рисунок 16 – Зависимость средней крутизны ДН для скользящих углов от частоты, $R/\lambda_0=12$

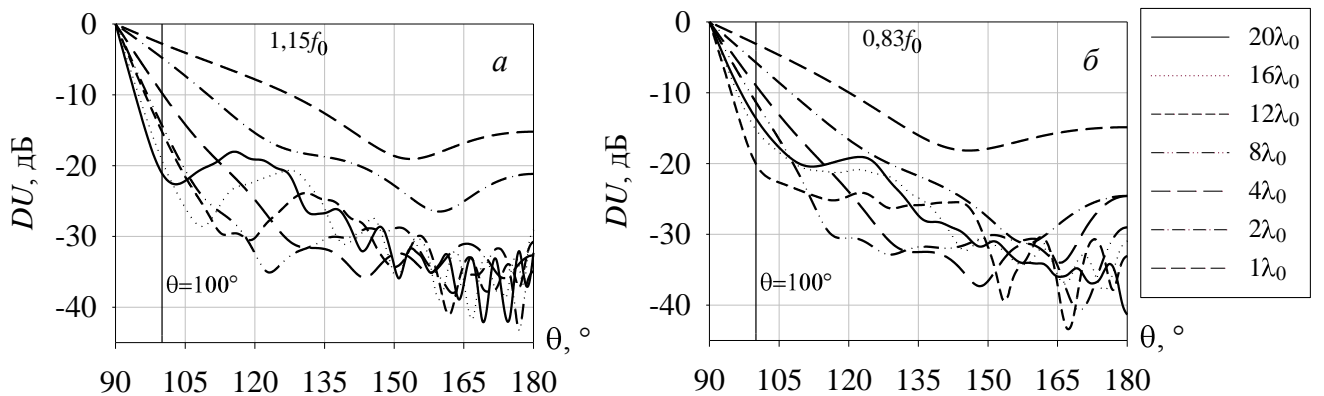


Рисунок 17 – Отношение DU для квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном $f/f_0=1,15$ (а) и $f/f_0=0,83$ (б)

Тем не менее, подавление отраженного сигнала из нижней полусферы при высоких углах к плоскости экрана прямо пропорционально уровню ДН источника в направлении на экран, и, возможности улучшения диаграммы обратного излучения за счет управления шириной ДН для приложений к задачам позиционирования ограничены, так как значительное сужение ДН приводит к опасности срыва слежения за сигналами низких спутников.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований макетов антенн ГНСС. Экспериментальное исследование характеристик антенн проводилось в безэховой камере.

Двухслойная ПА, работающая в диапазонах частот ГЛОНАСС, показана на рисунке 18. Совокупность двух пластинок антенны обеспечивает работу в диапазоне

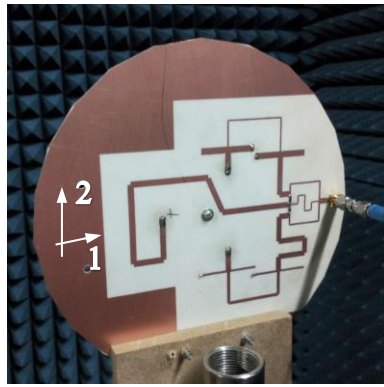
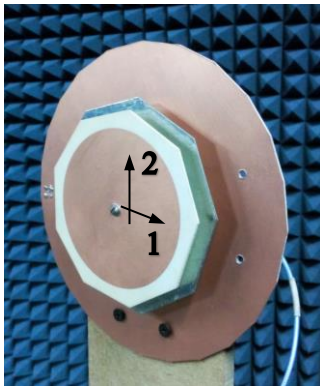


Рисунок 18 – Фотографии макета двухслойной ПА и указание плоскостей измерения ДН: 1, 2

$\pm 2\%$ относительно частоты 1600 МГц и $\pm 3\%$ относительно частоты 1245 МГц. Верхний излучатель реализован на подвешенной подложке Rogers RO4003С ($d_2=1,524$ мм) и имеет диаметр 88мм при толщине воздушной подложки $d_1=6,5$ мм, а нижний излучатель диаметром 124мм с толщиной подложки $d_1'=12$ мм. Диаметр экрана 180мм. Круговая поляризация обеспечивается

трехточечной схемой питания, рассмотренной в главе 2. Схема питания реализована в одном слое на подложке Rogers RO4003С. Экран схемы питания и антенны является общим. Связь антенны и схемы питания обеспечивается емкостным образом. Пластинки антенны закреплены в геометрическом центре посредством металлического несущего стержня.

По результатам эксперимента видно, что для частот ГЛОНАСС отсутствует отклонение максимума ДН ПА (рисунок 19). КУ и КПД ПА практически совпадают по результатам моделирования и эксперимента (рисунок 20, а, б).

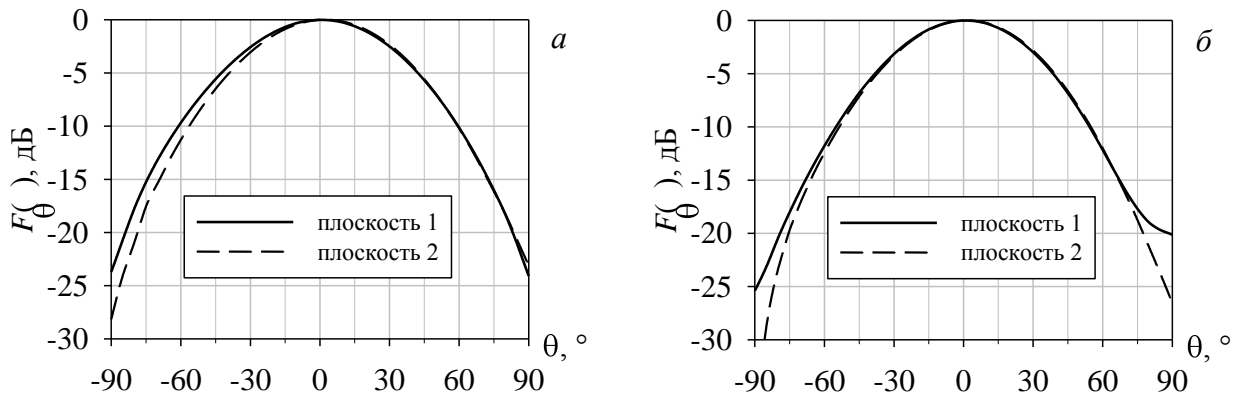


Рисунок 19 – Измеренные ДН двухслойной ПА на частотах ГЛОНАСС $f/f_0=0,89$ (а) и $f/f_0=1,14$ (б)

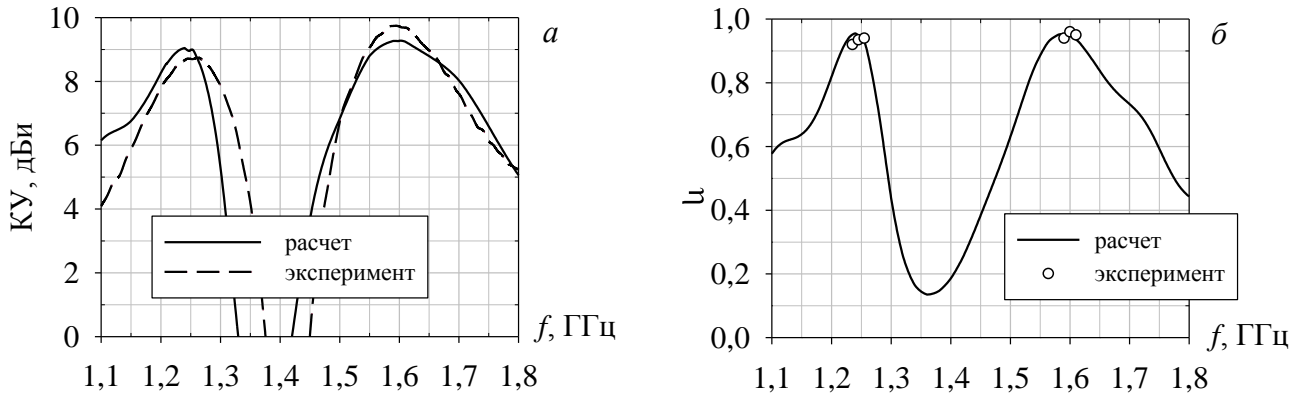


Рисунок 20 – КУ (а) и КПД (б) двухслойной ПА

На рисунке 21 приведена фотография макета всесистемной квадрупольной антенны. Антенна состоит из четырех монополей, интегрированных в двухслойную схему питания, экран схемы питания и антенны является общим. Материал диэлектрической подложки схемы питания – Rogers RO4003C толщиной 1,524мм. Межслойные переходы схемы питания и фиксация монополей антенны выполнены с использованием метрического крепежа при помощи винтовых соединений, обеспечивающих жесткость и прочность конструкции.

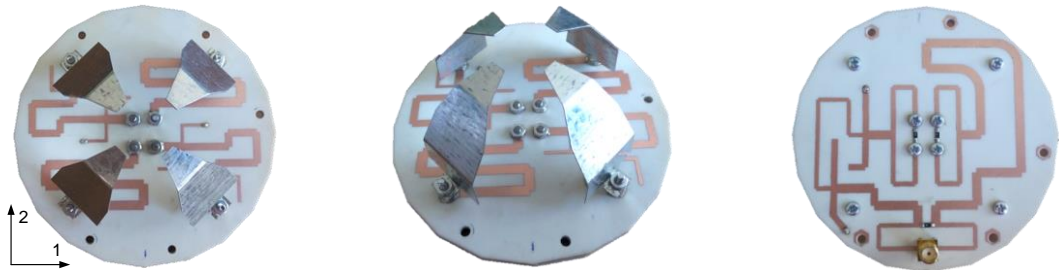


Рисунок 21 – Фотографии макета квадрупольной антенны

Из сравнения расчетной и экспериментальной зависимостей КУ (рисунок 22, а) можно увидеть хорошее совпадение результатов. КПД квадрупольной антенны, полученный по данным моделирования, составляет не менее 87% в полосе частот ГНСС (рисунок 22, б), что хорошо согласуется с результатами для данного типа АЭ (рисунок 8, б).

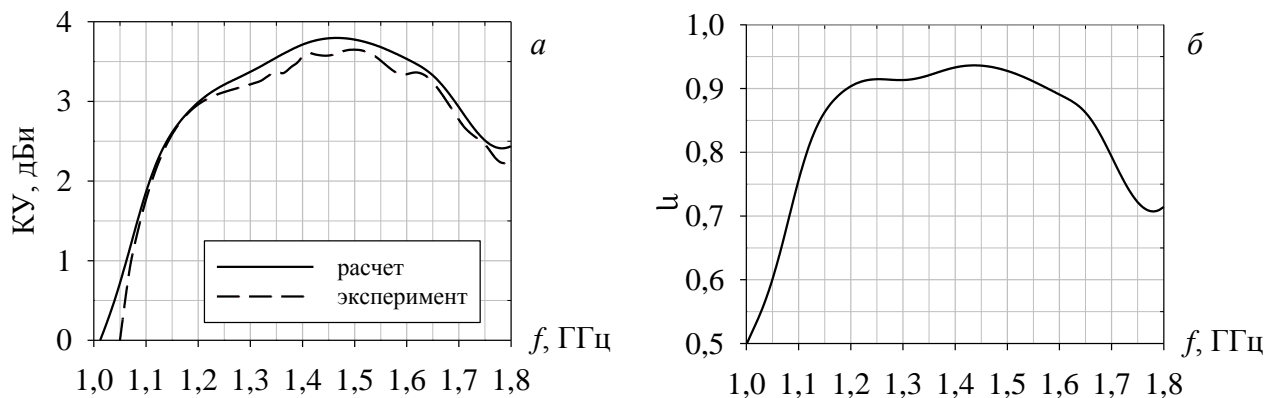


Рисунок 22 – КУ (а) и расчетный КПД (б) квадрупольной антенны

На основе структуры ячейки высокоимпедансного экрана, рассмотренного в главе 3, были построены макеты экранов для квадрупольной антенны. На рисунке 23, *а* приведена фотография макета антенной решетки, на рисунке 23, *б* фотография одиночной антенны. Максимальные продольные размеры экранов: для антенной решетки – $6\lambda_0$, для одиночной антенны – $2\lambda_0$.

Макет одиночной квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном (КАсВЭ) построен в качестве аналога серийно выпускаемых антенн базовых станций с экраном типа choke ring, таких как Trimble GNSS Choke Ring Antenna, Leica AR20 и др. В отличие от известных решений, антенна характеризуется более простым изготовлением экрана. На рисунке 24 приведены ДН антенн на краях диапазона ГНСС.

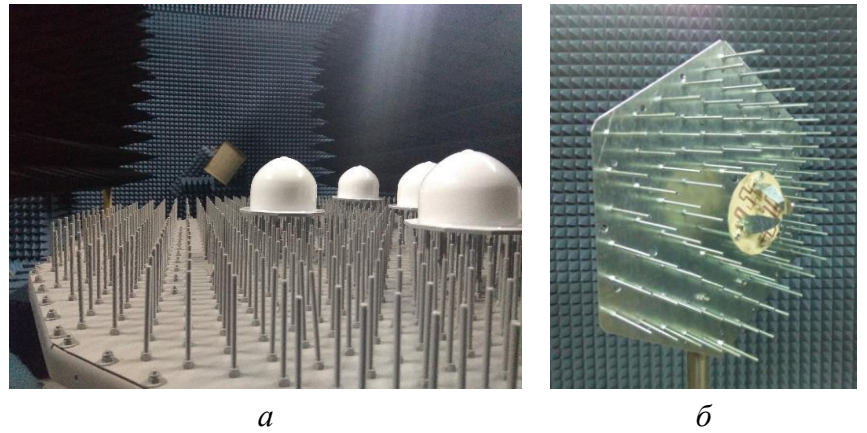


Рисунок 23 – Фотографии макетов антенных систем с высокоимпедансными экранами: антенная решетка (*а*), одиночная антенна (*б*)

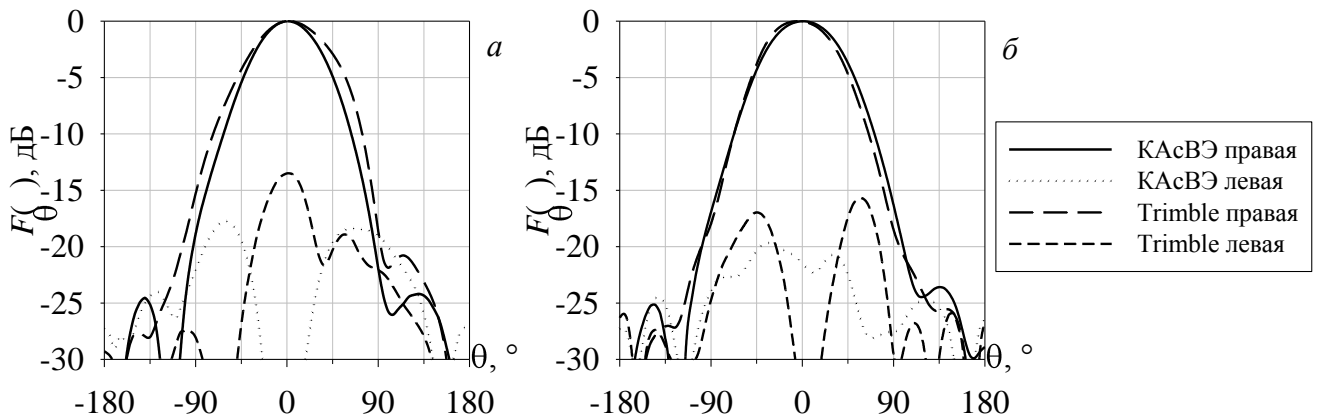


Рисунок 24 – ДН КАсВЭ и антенны Trimble GNSS Choke Ring на частотах 1,164 ГГц (*а*) и 1,615 ГГц (*б*) для правой круговой и кросс-(левой круговой) поляризаций

Кроме того, применение высокоимпедансного экрана для помехозащищенной антенной решетки ГНСС позволяет обеспечить повторяемость формы ДН ее элементов, уменьшить влияние многолучевой интерференции (снизить уровень диаграммы обратного излучения для непреднамеренных/пассивных помех) и повысить стабильность ФЦ.

В заключении диссертации изложены основные научные и практические результаты работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была достигнута цель диссертационного исследования и решены поставленные задачи, которые направлены на улучшение электродинамических характеристик антенн ГНСС. Представленные в данной работе как теоретические, так и экспериментальные результаты имеют высокую прикладную ценность для антенн ГНСС.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Исследовано влияние количества точек возбуждения ($N_r=2, 3, 4$) двухслойной печатной антенны и количества используемых монополей широкополосной антенны ($N_m=3, 4, 8$) круговой поляризации на амплитудные, фазовые и поляризационные характеристики. Проведена оценка полного коэффициента отражения и полного КПД многопортовых антенн.

2. Разработаны планарные схемы питания с высоким КПД и малым разбросом АЧХ и ФЧХ для трех и четырех портовых антенн круговой поляризации в одно- и двухслойной компактной конструкции.

3. Предложен способ улучшения 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 под скользящими углами.

4. Рассчитана зависимость средней крутизны ДН от диаметра высокоимпедансного экрана квадрупольной антенны для углов скользящих направлений на нижней и верхней частоте ГНСС. Показаны преимущества экрана диаметром $12\lambda_0$.

5. Изготовлены макеты антенн ГНСС. Выполненные разработки конструкций антенн, макетирование и экспериментальные исследования подтвердили результаты расчетов и моделирования.

Результаты исследований, полученные в настоящей диссертационной работе, нашли применение в составе НИР и ОКР, выполненных в «АО «ИСС» им. Академика М.Ф. Решетнёва», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Рекомендации по использованию результатов работы. Предложенная конструкция печатной антенны, благодаря ее малому профилю и весу, может быть использована в качестве элемента плоской антенной решетки, в том числе на борту космического аппарата. Разработанная квадрупольная антенна может быть применена в качестве элемента высокоточной антенной системы в комбинации с экраном для подавления многолучевой интерференции. В качестве элемента помехозащищенной антенной решетки квадрупольная антенна была применена в макете БИС-НП. Конструкции поляризатора и высокоимпедансного экрана, исследованные в диссертационной работе, могут быть применены в ГНСС для подавления эффекта многолучевой интерференции в высокоточных системах.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в уменьшении массогабаритных показателей антенн с целью их использования, в том числе, в мобильных системах. Кроме того, перспективным является направление исследований полупрозрачных и импедансных экранов малых электрических размеров для работы на всех частотах ГНСС.

ПУБЛИКАЦИИ 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 Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 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 // Известия 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. – С. 24-29.

ПРОЧИЕ ПУБЛИКАЦИИ

7. **Gafarov E.R.**, Salomatov Y.P. Circular polarized dual-band microstrip antenna for application in GLONASS/GPS // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 20th International Crimean Conference, Sevastopol, 7-13 Sept. 2010, pp. 571–572.
8. **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.
9. Lemberg K.V., Salomatov Y.P., **Gafarov E.R.** GNSS antenna characteristics using bi-orthogonal far-field measurement // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 24th International Crimean Conference, Sevastopol, 7-13 Sept. 2014, pp. 932–933.
10. **Gafarov E.R.**, Salomatov Y.P. The spiral slot antenna with a horizontal choke ring // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 24th International Crimean Conference, Sevastopol, 7-13 Sept. 2014, pp. 513–514.
11. **Gafarov E.R.**, Salomatov Y.P. The dual-band antenna for navigation satellite systems // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 25th International Crimean Conference, Sevastopol, 7-13 Sept. 2015, pp. 499–500.
12. Stankovsky A.V., Polenga S.V., **Gafarov E.R.**, Salomatov Y.P. Meander-Line Polarizer for Omnidirectional Antenna // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, 12-14 may 2016.
13. **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.
14. **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.

15. **Gafarov E.R.**, Stankovsky A.V., Salomatov Y.P. 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.

16. **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.

17. **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), Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 412–416.

18. **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.

19. **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.