

*На правах рукописи*



Филиппов Сергей Борисович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДВУХЗАХОДНЫХ КОНИЧЕСКИХ ЛОГОСПИРАЛЬНЫХ АНТЕНН  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2016

Работа выполнена на кафедре основ конструирования и технологии радиотехнических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникации и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ)

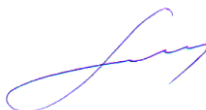
- Научный руководитель: *Неганов Вячеслав Александрович*  
Заслуженный работник высшей школы РФ,  
доктор физико-математических наук, профессор
- Официальные оппоненты: *Разиньков Сергей Николаевич*,  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, ведущий научный сотрудник
- Малахов Василий Алексеевич*,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, профессор кафедры «Физика и техника оптической связи»
- Ведущая организация: ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева», г. Королев, Московская область

Защита состоится « 24 » июня 2016 года в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.002 при ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникации и информатики» (ПГУТИ) по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ПГУТИ и на сайте [www.psuti/science/diss-ob](http://www.psuti/science/diss-ob).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д219.003.002  
доктор технических наук, профессор



А.И. Тяжев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из важных задач при разработке радиотехнических систем космических аппаратов (РТС КА) является построение надежных каналов связи, обеспечивающих устойчивый прием (передачу) информации с борта изделия на наземные станции. Устойчивость связи зависит как от надежности работы аппаратуры с учетом всех условий сопутствующих полету, так и от диаграмм направленности (ДН) антенных устройств, установленных на КА. Характер ДН определяется программой полета и особенностью конструкций КА. В современных спутниковых системах наблюдения, системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), связи и навигации широко применяются двухзаходные конические логоспиральные антенны (ДКЛСА). Преимуществом ДКЛСА является большая стабильность всех их параметров и характеристик по частотным диапазонам. Основными параметрами таких антенн являются ДН и входное сопротивление. ДН ДКЛСА зависят от величины угла при вершине конуса, угла намотки спирали и других параметров и могут быть рассчитаны, если известно распределение токов на спиральных элементах. При этом, изменяя геометрию антенны в сторону меньших или больших размеров, можно добиться практически любой формы ДН.

Как правило, разработка ДКЛСА, которая обеспечивала бы необходимые электродинамические характеристики, начинается с расчетов по классическим инженерным формулам, согласно которым такие антенны рассматриваются в различных приближениях, основанных на физике происходящих в антенне процессов [1-2]. Однако использование ДКЛСА, устанавливаемых на КА, определенных частотных диапазонов часто встречается затруднения, связанные с различными ограничениями, такими как размеры и конфигурации самого аппарата, зонами полезного груза, компоновкой научной и целевой аппаратуры, невозможностью применения раскрывающихся устройств и т.д. Большинство инженерных расчетов ДКЛСА выполняется, как правило, на основе решения внешней электродинамической задачи при заданном из каких-либо физических соображений распределении токов. Основным недостатком такого подхода очень часто является достаточно низкая степень соответствия результатов реальных измерений проделанным расчетам. Поэтому возникает необходимость построения строгой математической модели ДКЛСА, использующей в своей основе интегральные представления электромагнитного поля, переходящих при решении внутренней электродинамической задачи в интегральные уравнения (ИУ), либо систему уравнений относительно неизвестных токов.

**Степень разработанности темы.** Среди работ, в которых электродинамический анализ осуществляется с помощью ИУ, можно выделить [3], но в основном применение ИУ характерно для зарубежных работ. Так, в [4] приведено ИУ произвольной тонкопроволочной структуры и результаты расчета тока в плоской равноугольной спиральной антенне. Интересными также представляются статьи [5-7]. Из российских работ можно выделить [8].

Математическая модель ДКЛСА должна быть универсальной, т.е. с изменяемой геометрией, в рамках которой можно изменять число витков спирали, диаметры вершины и основания конуса, ширину заходов спирали, густоту сетки рефлектора, а также тип возбуждения антенны для получения необходимой формы ДН.

Разработка таких математических моделей и алгоритмов расчета электрических характеристик позволит создавать принципиально новые конструкции и существенно снизить материально-временные затраты на опытное производство, экспериментальные исследования, конечную доводку и настройку ДКЛСА, разрабатываемых для различных частотных диапазонов РТС КА.

**Целью работы** является разработка математической модели и экспериментальные исследования ДКЛСА РТС КА, а также повышение эффективности функционирования РТС КА за счет совершенствования характеристик ДКЛСА.

**Основные задачи диссертационной работы.** Для достижения поставленной цели решаются следующие научные задачи:

1. Построение математической модели и анализ характеристик ДКЛСА на основе интегральных представлений электромагнитного поля. Здесь и далее под характеристиками ДКЛСА подразумевается ее ДН и входное сопротивление.

2. Разработка алгоритма и комплекса программ расчета характеристик ДКЛСА с изменяемой геометрией, согласованной с РТС последовательным трансформатором, включенным непосредственно в конструкцию антенны.

3. Экспериментальные исследования и оценка характеристик ДКЛСА в различных частотных диапазонах и разработка предложений по их технической реализации для применения в РТС КА.

#### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Получена строгая математическая модель ДКЛСА с тонкопроволочным рефлектором конечных размеров на основе интегрального представления электромагнитного поля, позволяющая получить строгое решение краевой задачи, и как следствие, обеспечить высокую точность расчетов ДН и входного сопротивления.

2. Разработан алгоритм расчета характеристик ДКЛСА с изменяемой геометрией конструкции антенны.

3. Выявлена возможность применения меньшего числа антенн для перекрытия кругового сектора углов.

**Теоретическая значимость** работы заключается в построении на базе интегральных представлений электромагнитных полей строгой математической модели ДКЛСА.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что полученные в диссертационной работе результаты имеют большое значение применительно к вопросам, связанным с практическим применением ДКЛСА для излучения и приема радиосигналов РТС КА, а именно:

- разработан комплекс программ, позволяющий рассчитывать электродинамические характеристики ДКЛСА с изменяемой геометрией конструкции антенны, который конкурентоспособен с дорогостоящими зарубежными программами электромагнитного моделирования;
- созданы методики проектирования ДКЛСА;
- разработан метод согласования ДКЛСА непосредственно в ее конструкции, позволяющий обеспечить минимальный КСВ и минимальные потери заданной полосе частот.

Научные и технические результаты диссертации использованы при создании конструкций антенно-фидерных устройств (АФУ) РТС различных КА и ретрансляционных АФУ мобильных башен обслуживания стартовых комплексов космодромов «Восточный» и «Гвианский космический центр» в АО «РКЦ «Прогресс». Результаты диссертационной работы в дальнейшем могут использоваться при разработке как АФУ РТС КА, так и антенных устройств других перспективных РТС.

#### **Методология и методы исследований**

Представленные в диссертационной работе результаты были получены с помощью математического аппарата электродинамики и метода ИУ. Численные результаты получены с использованием вычислительных алгоритмов, реализованных на ПЭВМ. Ряд результатов получен с помощью экспериментальных методов исследования.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель ДКЛСА с тонкопроволочным рефлектором конечных размеров, полученная на основе интегрального представления электромагнитного поля, которая позволяет получить строгое решение краевой задачи, и как следствие, обеспечить высокую точность расчетов ДН и входного сопротивления.
2. Разработанный алгоритм обеспечивает быстрый и точный расчет характеристик ДКЛСА, позволяя тем самым добиться необходимой формы ДН.
3. Разработанный метод согласования ДКЛСА непосредственно в ее конструкции позволяет обеспечить минимальный КСВ и минимальные потери в заданной полосе частот.
4. Разработанные конструкции и экспериментальные образцы ДКЛСА для различных частотных диапазонов РТС КА обладают улучшенными характеристиками по сравнению с известными аналогами, в частности, достаточной всенаправленностью излучения, обеспечивающей необходимый коэффициент заполнения ДН в полном телесном угле при минимальном количестве антенн.

**Степень достоверности результатов диссертации** определяется:

- использованием теоретически обоснованных математических методов;
- наличием сходимости численных алгоритмов;
- результатами экспериментальных проверок образцов ДКЛСА, созданных на основе предложенных методов проектирования;
- проверкой работоспособности спроектированных ДКЛСА на практике в различных РТС КА, разрабатываемых в АО «РКЦ «Прогресс».

Диссертация соответствует п.п. 1,2 и 3 паспорта специальности 05.12.07.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях:

- XIX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2013 г.;
- III Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники», г. Самара, 2013 г.;
- XI научно-техническая конференция «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», г. Сочи, 2014 г.;
- XII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Нижний Новгород, 2014 г.;
- IV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («IV Козловские чтения»), г. Самара, 2015 г.;
- XIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов» г. Казань, 2015 г.;
- XXIII Российская конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ, г. Самара, 2016 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в журналах, включенных в перечень ВАК РФ, 5 докладов и 3 тезиса докладов на различных научно-технических конференциях. Получен один патент РФ на изобретение.

**Личный вклад автора.** Непосредственно идеи, разработки, реализации, проведение расчетов, изготовление опытных образцов, а также основные научные результаты теоретических и экспериментальных исследований, изложенные в диссертации, принадлежат автору. Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, получены автором лично или при его решающем участии. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит часть, связанная с постановкой задачи, разработкой алгоритмов и проведением экспериментальных исследований.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 52 наименований, приложения, и содержит 132 страницы текста, в том числе 83 рисунка и 4 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определена цель диссертационной работы, показана ее актуальность, теоретическая и практическая значимость, научная новизна и обоснована достоверность полученных результатов, представлены основные положения выносимые на защиту.

В **первой главе** «Построение математической модели двухзаходной конической логоспиральной антенны на основе интегральных представлений электромагнитного поля» предложена математическая модель ДКЛСА с тонкопроволочным рефлектором конечных размеров на основе ИУ относительно неизвестных токов на поверхности излучающей структуры.

Интегральное представление электромагнитного поля связывает поле в точке наблюдения с токами в заданном объеме или на поверхности. В случае, когда точки наблюдения находятся на поверхности или в излучающем объеме, используя соответствующие граничные условия из интегрального представления поля можно получить ИУ или систему ИУ для определения неизвестных токов.

В основе расчета характеристик ДКЛСА лежат дискретизированные представления электромагнитного поля (ЭМП). Интегральные представления (ИП) ЭМП тонкопроволочной структуры (ТПС) (рисунок 1а) могут быть представлены как:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \int_L I(l') \mathbf{K}_a^F(\mathbf{r}, \mathbf{r}(l)) dl', \quad \mathbf{F} \equiv \mathbf{E}, \mathbf{H}; \quad (1)$$

здесь  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $I(l)$  – распределение полного тока по образующей  $L$  ТПС,  $\mathbf{K}_a^F$  – ядра ИП ЭМП,  $\mathbf{r}(l)$  – уравнение образующей,  $l$  – естественный параметр.

Граничное условие на образующей ТПС

$$\hat{\mathbf{i}}(\mathbf{r}(l)) (\mathbf{E}^{(in)}(\mathbf{r}(l)) + \mathbf{E}(\mathbf{r}(l))) = 0. \quad (2)$$

фактически приводит нас к ИУ относительно  $I(l)$ . В последнем выражении  $\hat{\mathbf{i}}(\mathbf{r}(l))$  – единичный вектор касательный к образующей,  $\mathbf{E}^{(in)}$  создается сторонними источниками,  $\mathbf{E}$  определяется из ИП ЭМП.

С учетом принципа суперпозиции выражения (1) и (2) легко обобщить на структуру, состоящую из произвольного числа проводников  $L_1, L_2, \dots, L_N$ . В результате (2) перейдет в систему ИУ относительно соответствующих распределений полных токов  $I_1(l), I_2(l), \dots, I_N(l)$ .

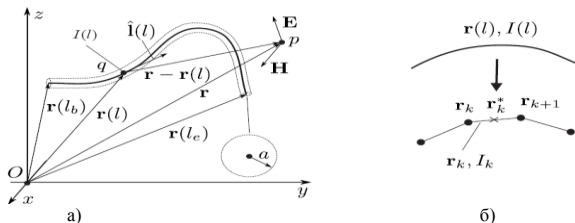


Рисунок 1 – Тонкопроволочная структура (а) и линейризация ее образующей (б)

Линеаризация образующих (рисунок 1б) приводит к следующим выражениям для определения поля:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N \sum_{k_j=1}^{N_j} \mathbf{F}_{a_j}^{\Delta_j}(\mathbf{r}; \mathbf{r}_{j,k_j}, I_{j,k_j}), \quad \mathbf{F} \equiv \mathbf{E}, \mathbf{H}. \quad (3)$$

Выражение (3) описывает ЭМП, создаваемое совокупностью  $N$  излучающих элементов с сегментированными образующими. Для использования (3) необходимо знать неизвестные амплитуды токов  $I_{j,k_j}$ . В рамках метода сшивания в дискретных точках потребуем выполнения граничного условия типа (2) в центрах сегментов. Пусть  $\mathbf{r}_{i,k_i}^*$  – радиус-вектор, проведенный в центр  $k_i$ -го сегмента  $i$ -го элемента. Тогда из (3) с учетом граничного условия (2) получаем систему линейных алгебраических уравнений для определения  $I_{j,k_j}$ :

$$\hat{\mathbf{1}}(\mathbf{r}_{i,k_i}^*) \mathbf{E}^{(in)}(\mathbf{r}_{i,k_i}^*) = \hat{\mathbf{1}}(\mathbf{r}_{i,k_i}^*) \sum_{j=1}^N \sum_{k_j=1}^{N_j} \mathbf{E}_{a_j}^{\Delta_j}(\mathbf{r}_{i,k_i}^*; \mathbf{r}_{j,k_j}, I_{j,k_j}); \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N, \quad k_i = 1, \dots, N_i.$$

Устойчивое решение достигается при соблюдении условия  $\Delta_j \ll \lambda_{a_j}$ , для всех  $j$ .

Уравнение  $k$ -го сегмента  $j$ -го элемента можно записать следующим образом:

$$\mathbf{r}_k(l) = \mathbf{r}_k^* + \hat{\mathbf{1}}_k l; \quad l \in [-\Delta/2, \Delta/2], \quad (5)$$

здесь  $\mathbf{r}_k^*$  – центр сегмента,  $\hat{\mathbf{1}}_k$  – единичный вектор касательной на сегменте,  $\Delta$  – длина сегмента. Полные выражения для  $\mathbf{F}_{a_j}^{\Delta_j}$  приведены в [9]. Там же приводятся соответствующие выражения, учитывающие поворотную симметрию излучающей структуры.

Общий вид геометрии исследуемой модели представлен на рисунке 2а. Вид в плоскости  $\rho O z$  представлен на рисунке 2б, где  $H+b$  – высота модели,  $b$  – высота подъема основания спирали над рефлектором,  $H$  – высота спирального элемента. Структура обладает поворотной симметрией, поэтому рассмотрим только основную ее часть. Дополнительная часть получается поворотом основной на 180 градусов вдоль оси  $Oz$ . Основную часть ДКЛСА условно можно разбить на три составляющие:

- спиральные элементы, основной  $L_S$  и дополнительные  $L_{sj}$ ,  $j=1, \dots, N_s$ , где  $N_s$  – число дополнительных элементов. Вместе спиральные элементы имитируют металлическую ленту, образующую ветвь спирали (рисунок 2в);



- возбуждающая система, состоящая из возбуждающего элемента  $L_g$  и делителя  $L_d$ . В случае отсутствия дополнительных спиральных элементов  $L_{sj}$  делитель  $L_d$  также отсутствует;
- рефлектор, образованный совокупностью прямолинейных проводников  $L_i^X$  и  $L_j^Y$ ,  $i=1, \dots, N_r^X$ ,  $j=1, \dots, N_r^Y$  – число элементов рефлектора вдоль одной из координат (рисунок 2г).

Возбуждающий элемент представляет собой симметричный вибратор, один конец которого соединяется с началом основного проводника спирали  $p$ , являющегося одновременно центром проводника – делителя тока  $L_d$ . Второй конец возбуждающего вибратора совмещается с аналогичным вибратором в симметричной части. В центре вибратора имеется зазор длиной  $l_g$ , в который помещается генератор сторонней ЭДС, создающий касательное поле  $E_l$ , равное нулю всюду, за исключением области зазора, в которой  $E_l = U/l_g$ ,  $U$  – напряжение между краями зазора.

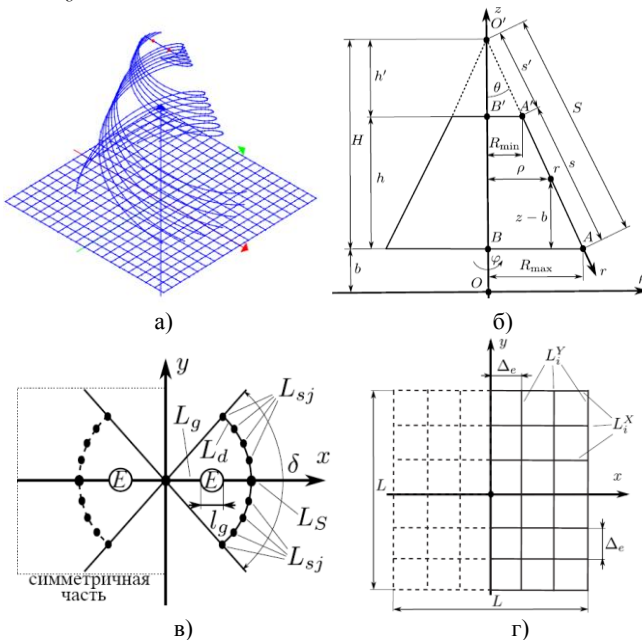


Рисунок 2 – Геометрия модели ДКЛСА: а) – общий вид; б) – вид в плоскости  $\rho Oz$ ; в) – вид в плоскости  $xOy$  при вершине антенны; г) – рефлектор

Параметрическое уравнение возбуждающего вибратора имеет вид:

$$\mathbf{r}_g(l) = l\hat{\mathbf{x}} + H\hat{\mathbf{z}}, \quad l \in [0; R_{\min}]. \quad (6)$$

Число сегментов делителя  $L_d$  кратно числу дополнительных спиральных проводников  $N_s$ . Он распределяет ток, возникающий на возбуждающем вибраторе под действием генератора ЭДС, по заходам спиральных элементов.

Тонкопроволочный рефлектор образован прямолинейными  $X$  - и  $Y$  - проводниками, параллельными, соответственно, осям  $Ox$  и  $Oy$ . Соответствующие параметрические уравнения можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{r}_i^X(l) = l\hat{\mathbf{x}} + \Delta_i\hat{\mathbf{y}}, \quad l \in [0; L/2], \quad i = 1, \dots, N_r^X; \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_i^Y(l) = \Delta_i\hat{\mathbf{x}} + l\hat{\mathbf{y}}, \quad l \in [-L/2; L/2], \quad i = 2, \dots, N_r^Y, \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_0^Y(l) = l\hat{\mathbf{y}}, \quad l \in [-L/2; 0],$$

здесь  $N_r$  – число проводников вдоль одной из осей,  $\Delta_i = -L/2 + (i-1)\Delta$  – константа, определяющая позицию проводника,  $\Delta$  – расстояние между соседними  $X$  - или  $Y$  - проводниками.

Во **второй главе** «Алгоритм и комплекс программ расчета характеристик двухзаходной конической логоспиральной антенны согласованной с РТС последовательным трансформатором» описывается алгоритм расчета характеристик ДКЛСА с изменяемой геометрией, в рамках которого можно изменять число витков спирали, диаметры вершины и основания конуса, ширину заходов спирали, густоту сетки рефлектора, а также тип возбуждения антенны для получения необходимой ДН.

Проектирование ДКЛСА начинается с постановки задачи и анализа технических требований технического задания. Анализ технических требований включает в себя выбор электродинамических характеристик проектируемой ДКЛСА. На основе технических требований осуществляется выбор геометрических и электрических параметров ДКЛСА.

Производится расчет геометрии ДКЛСА, построение и анализ модели. После визуального контроля геометрии ДКЛСА производится автоматизированный расчет ДН при синфазном или противофазном питании антенны. Полученные ДН в азимутальной и меридиональной плоскостях сравниваются с заданными в техническом задании параметрами. При выполнении требований ТЗ по ДН рассчитывается образующая спирали, а при невыполнении – необходимо вернуться на этап задания исходных данных, внести изменения и повторить расчет. Таким образом, путем подбора геометрических и электрических характеристик ДКЛСА, необходимо повторять расчет до получения необходимой ДН. После получения требуемой ДН необходимо рассчитать входное сопротивление ДКЛСА. На следующем этапе принимается решение о необходимости применения согласующего последовательного трансформатора. Расчет электрических параметров и геометрических размеров согласующего трансформатора производится на основе метода расчета изложенного в данной главе диссертационной работы. Оно заключается в определении  $\rho_{TP}$ , при котором, входное сопротивление антенны лежало бы на такой

окружности КБВ и КСВ, которая пересекала бы ось активных сопротивлений в точках, соответствующих волновому сопротивлению фидера. При переходе в систему  $\rho_{TP}$  возможны два варианта.

Вариант 1: входное сопротивление антенны  $R_A < W$ , значит нормированное значение сопротивления  $R_n < 1$ . В системе  $\rho_{TP}$  значения  $R_n$  и  $X_n$  будут в  $N$  раз больше ( $N = W/\rho_{TP}$ ), то есть  $Z_p = NR_n + jNX_n$ . Следовательно:

$$\rho_{TP} = \frac{W}{N} = \frac{W}{\sqrt{\frac{1-R_n}{R_n - R_n^2 - X_n^2}}}$$

Вариант 2: входное сопротивление антенны  $R_A > W$ , значит нормированное значение сопротивления  $R_n > 1$ . В системе  $\rho_{TP}$  значения  $R_n$  и  $X_n$  будут в  $N$  раз меньше, то есть  $Z_p = \frac{R_n}{N} + j\frac{X_n}{N}$ . Следовательно:

$$\rho_{TP} = W \cdot N = W \sqrt{\frac{R_n^2 + X_n^2 - R_n}{R_n - 1}}$$

Конструкция ДКЛСА и согласующего трансформатора представлена на рисунке 3.

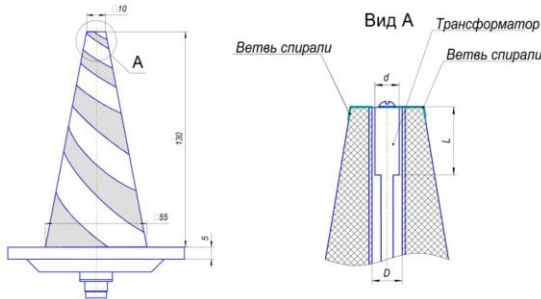


Рисунок 3 – Конструкция согласующего трансформатора ДКЛСА

На этом все шаги по расчету электродинамических характеристик считаются завершенными и можно приступить к разработке конструкторской документации, этапу изготовления и экспериментальным исследованиям разработанной ДКЛСА.

Алгоритм расчета электродинамических характеристик ДКЛСА реализован в виде комплекса программ в системе компьютерной математики wxMaxima.

**В третьей главе** «Экспериментальное исследование электрических характеристик двухзаходных конических логоспиральных антенн для различных частотных диапазонов РТС» приводятся результаты экспериментальных измерений ДН и входных сопротивлений ДКЛСА Р, L, S– диапазонов и проводится сравнение их с результатами расчетов. Для проведения эксперименталь-

ных исследований были рассчитаны, конструктивно разработаны и изготовлены несколько опытных образцов антенн, представленных на рисунке 4.

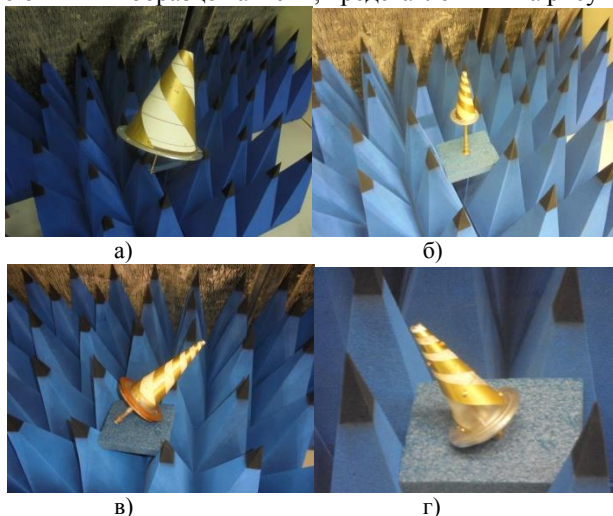


Рисунок 4 – Опытные образцы антенн в рабочем диапазоне частот: а) от 400 до 500 МГц; б) от 1,0 до 1,25 ГГц; в) от 2,0 до 2,2 ГГц; г) от 4,0 до 4,5 ГГц

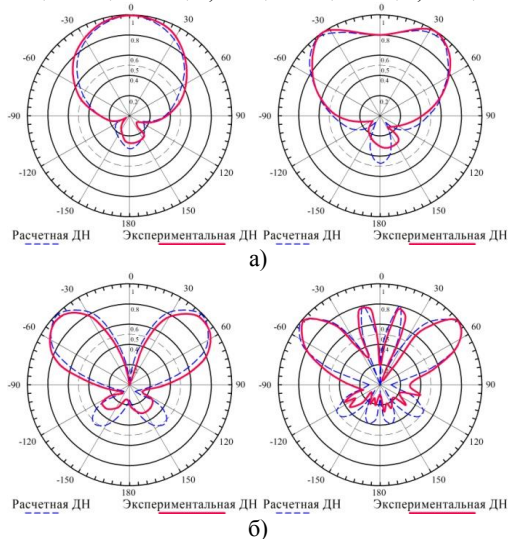


Рисунок 5 – Нормированные ДН опытных образцов ДКЛСА при различных размерах экрана (слева –  $D_{эк.1} = 350$  мм, справа –  $D_{эк.2} = 600$  мм; сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчет); а) – противофазное возбуждение; б) – синфазное возбуждение

Экспериментальные исследования характеристик направленности антенн производились путем замеров амплитуды мощности электромагнитного

поля в меридиональной и азимутальной плоскостях в дальней зоне излучения антенны. На рисунке 5 приведены нормированные ДН опытных образцов ДКЛСА ( $2R_{\min} = 50$  мм,  $2R_{\max} = 297$  мм,  $H=350$  мм, число витков спирали 1) для частоты 435 МГц и их расчетные значения.

Из рисунков видно, что размер экрана существенным образом влияет на ДН. При синфазном питании антенны увеличение экрана приводит к искажению формы ДН, а при противофазном происходит ее развал. Соответственно аналогичные изменения происходят и с увеличением частоты для одной и той же антенны, что подтверждает теорию.

Результаты исследований ДКЛСА для различных частотных диапазонов показали достаточно хорошее совпадение экспериментальных ДН с расчетными (рисунки 6-7).

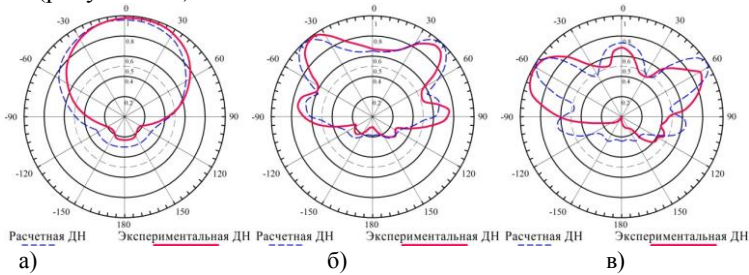


Рисунок 6 – Нормированные ДН опытных образцов ДКЛСА (сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчет) в меридиональной плоскости для частот: а) – 1125 МГц ( $2R_{\min} = 10$  мм,  $2R_{\max} = 60$  мм,  $H=145$  мм,  $D_{\text{эк}} = 80$  мм, число витков спирали 2); б) – 2000 МГц ( $2R_{\min} = 11$  мм,  $2R_{\max} = 91$  мм,  $H=227$  мм,  $D_{\text{эк}} = 100$  мм, число витков спирали 2,5); в) – 4250 МГц ( $2R_{\min} = 10$  мм,  $2R_{\max} = 55$  мм,  $H=130$  мм,  $D_{\text{эк}} = 90$  мм, число витков спирали 2)

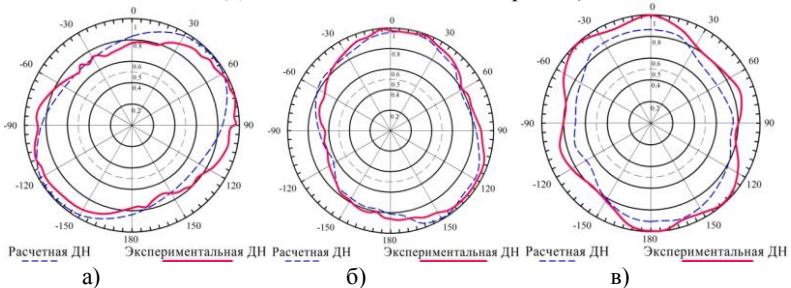


Рисунок 7 – Нормированные ДН опытных образцов ДКЛСА (сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчет) в азимутальной плоскости для частот: а) – 1125 МГц; б) – 2000 МГц; в) – 4250 МГц

Входные сопротивления ДКЛСА в лабораторных условиях определялись с помощью автоматизированных измерителей – анализаторов параметров цепей. Значение сопротивления последовательного согласующего трансформатора, его длина и диаметр определялись по алгоритму, приведенному в главе 2.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. Получена математическая модель двухзаходной конической логоспиральной антенны с тонкопроволочным рефлектором конечных размеров на основе интегрального представления электромагнитного поля, позволяющая получить строгое решение краевой задачи, и как следствие, обеспечить высокую точность расчетов диаграммы направленности и входного сопротивления.
2. Разработан алгоритм расчета электродинамических характеристик двухзаходных конических логоспиральных антенн с изменяемой геометрией. Он позволяет при расчетах изменять число витков спирали, диаметры вершины и основания конуса, ширину заходов спирали, густоту сетки рефлектора, а так же тип возбуждения антенны для получения необходимой диаграммы направленности. Этот алгоритм реализован в виде комплекса программ для ЭВМ.
3. Разработано согласующее устройство, расположенное непосредственно в конструкции двухзаходной конической логоспиральной антенны, позволяющее обеспечить минимальный КСВ и минимальные потери в заданной полосе частот
4. Предложена методика проектирования двухзаходных конических логоспиральных антенн на основе единой формы электродинамического анализа.
5. Разработаны конструкции, изготовлены экспериментальные образцы и исследованы электрические характеристики двухзаходных конических логоспиральных антенн для различных частотных диапазонов радиотехнических систем космических аппаратов. Проведен сравнительный анализ полученных в диссертации теоретических и экспериментальных результатов, подтверждающий их высокое совпадение.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Неганов, В.А. Метод согласования комплексной нагрузки последовательным трансформатором / В.А. Неганов, С.Б. Филиппов, Ю.Е. Ширманов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2012. — Т. 15. — №2. — С. 31-36.
2. Неганов, В.А. Математическая модель двузаходной конической спиральной антенны с тонкопроволочным рефлектором конечных размеров / Неганов В.А., Табаков Д.П., Филиппов С.Б. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2013. — Т. 16. — № 4. — С. 38-45.
3. Неганов, В.А. Метод согласования антенны на двух значительно разнесенных частотах / В.А. Неганов, С.Б. Филиппов, Ю.Е. Ширманов, А.С. Мальцев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2014. — Т. 17. — №4. — С.43-47.
4. Неганов, В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование двухзаходной конической равноугольной логоспиральной антенны малого космического аппарата «Аист-2» / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, С.Б. Филиппов,

А.С. Мальцев // Радиотехника. — 2015. — №2. — С. 5-15.

5. Неганов, В.А. Математические модели и экспериментальное исследование двухзаходной конической логоспиральной антенны с тонкопроволочным рефлектором конечных размеров для малого космического аппарата «Аист-2» / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, С.Б. Филиппов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2015. — Т. 18. — №3. — С. 35-41.

#### Другие публикации по теме работы

6. Неганов, В.А. Простой метод согласования нагрузки с питающим фидером с помощью короткозамкнутых и разомкнутых шлейфов / В.А. Неганов, С.Б. Филиппов, Ю.Е. Ширманов // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2013. — Т.2. — С. 798-812.

7. Капитонов, В.А. Особенности построения схемы ретрансляции сигнала системы телеметрических измерений при нахождении ракеты-носителя под мобильной башней обслуживания» / В.А. Капитонов, В.А. Неганов, С.Б. Филиппов, А.С. Мальцев // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической технике», г. Самара, 2013. — С.48-53.

8. Филиппов, С.Б. Моделирование и экспериментальные исследования антенны высокоскоростной радиолинии маломассогабаритного космического аппарата / С.Б. Филиппов, А.С. Мальцев // Материалы XI научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», г. Сочи, 2014. — С. 305-306.

9. Филиппов, С.Б. Экспериментальное исследование и оценка результатов математического моделирования двухзаходной конической спиральной антенны / С.Б. Филиппов, А.С. Мальцев // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Нижний Новгород, 2014. — С. 56-59.

10. Филиппов, С.Б. Влияние конструктивных особенностей малых космических аппаратов на диаграммы направленности антенн бортовых радиотехнических систем / С.Б. Филиппов, А.С. Мальцев // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Нижний Новгород, 2014. — С. 184-185.

11. Табаков, Д.П. Построение математической модели двухзаходной конической логоспиральной антенны на основе интегральных представлений электромагнитного поля / Д.П. Табаков, С.Б. Филиппов, А.С. Мальцев // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической технике» («IV Козловские чтения»), г. Самара, 2015. — Т.2. — С. 160-167.

12. Филиппов, С.Б. Проектирование и экспериментальные исследования конструкций антенных устройств радиотехнических систем малых космических аппаратов / С.Б. Филиппов // Материалы XIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Казань, 2015. — С. 99-100.

13. Филиппов, С.Б. Согласование двухзаходной конической логоспиральной антенны S-диапазона / С.Б. Филиппов // Материалы XXIII Российской конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ, Самара, 2016. — С.35-36.
14. Антенная насадка: пат. №2574286 РФ: МПК Н 01 Q 1/00 / В.А. Капитонов, Мальцев А.С., В.А. Неганов, А.А. Солдатов, С.Б. Филиппов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ПГУТИ. — № 2013150479/08; заявл. 12.11.2013; опубл. 20.05.2015.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сверхширополосные антенны / Пер. с англ. С.В. Попова и В.А. Журавлева; под ред. Л.С. Бененсона. — М.: МИР, 1964. — 416 с.
2. Жук, М.С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. — М.: Энергия, 1973. — 460 с.
3. Чебышев, В.В. Микрополосковые антенны в многослойных средах / В.В. Чебышев. — М.: Радиотехника, 2007. — 160 с.
4. Mei, K.K. On the integral Equations of Thin Wire Antennas / K.K. Mei // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. — 1965. — AP-13. — P. 374-378.
5. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры; пер. с англ.; под ред. Э.Л. Бурштейна. — М.: Мир, 1977. — 486 с.
6. Hertel, T.W. On the dispersive properties of the conical antenna and its use for paised radiation / T.W. Hertel, G.S. Smith // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. — 2003. — AP-51. — № 7. — P. 1426 – 1433.
7. Hussein, K.F.A. Conical linear spiral antenna for tracking, telemetry and command of low earth orbit satellites / K.F.A. Hussein // Progress In Electromagnetics Research C. — 2012. — Vol. 29. — P. 97- 107.
8. Банков, С.Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С.Е. Банков, А.А. Курушин. — М: Солан-пресс, 2008. — 276 с.
9. Неганов, В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование двухзаходной конической равноугольной логопиральной антенны малого космического аппарата «Аист-2» / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, С.Б. Филиппов, А.С. Мальцев // Радиотехника. — 2015. — № 2. — С. 5-15.

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования “Поволжский государственный  
университет телекоммуникаций и информатики”  
443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

---

Подписано в печать 16 г. Формат 60 x 84/16 Бумага офсетная №1.

Гарнитура Таймс. Заказ \_\_\_\_\_ Печать оперативная.

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. \_\_\_\_\_

Отпечатано в издательстве учебной и научной литературы Поволжского  
государственного университета телекоммуникаций и информатики  
443090, г. Самара, Московское шоссе, 77, т. (846) 228-00-44