

На правах рукописи



**Князев Николай Сергеевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СФЕРИЧЕСКИХ  
РЕЗОНАТОРНЫХ АНТЕНН МАЛЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
РАЗМЕРОВ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (г. Екатеринбург).

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**Панченко Борис Алексеевич**

Официальные оппоненты: **Мартышко Петр Сергеевич**  
Член-корреспондент РАН, доктор  
физико-математических наук, профессор,  
директор Института геофизики УрО РАН

**Нечаев Юрий Борисович**  
Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный сотрудник  
ОАО "Концерн "Созвездие"

Ведущая организация: **Открытое акционерное общество**  
**«Уральское проектно- конструкторское**  
**бюро «Деталь», г. Каменск-Уральский.**

Защита состоится 18 мая 2012 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.285.11 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 32, к.217

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, УрФУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.285.11 С.М. Зраенко

Автореферат разослан 16 апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.285.11, к.т.н., доцент



С.М.Зраенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современных радиотехнических системах наблюдаются тенденции к миниатюризации устройств. Это связано с прогрессом в области мобильных средств связи и возрастающим проникновением телекоммуникационных устройств в повседневную жизнь общества. В связи с этим актуальной задачей является улучшение массогабаритных характеристик элементов и узлов радиоаппаратуры. Эти же проблемы возникают и при создании антенн для летательных аппаратов, в том числе и беспилотных, технологии производства которых бурно развиваются в последнее время. В этом случае выдвигаются также жесткие требования к аэродинамическим характеристикам антенн.

Совершенствование элементной базы в последние десятилетия привело к уменьшению габаритов радиоэлектронных устройств и увеличению плотности компонентов внутри них. Однако это касается в основном узлов радиоаппаратуры, размеры которых мало зависят от рабочей частоты.

Наиболее сложно подвергаются миниатюризации антенны и устройства СВЧ, так как их размеры определяются рабочей длиной волны. Так, при уменьшении электрических размеров антенн неизбежно возникает вопрос об эффективности излучения и согласовании с линией питания, что не позволяет добиться высокого КПД для подобных излучателей в частотной полосе их использования, поскольку существует связь между размерами антенны и её предельной добротностью (предел Чу-Харрингтона). Одной из причин низкой эффективности электрически малых антенн является запасенная в ближней зоне реактивная энергия, доля которой увеличивается с уменьшением размеров излучателя.

Как показывает анализ публикаций, прогресс в области создания антенн малых электрических размеров связывают с применением новых технологий и материалов. Особое внимание уделяется использованию нового типа материалов – метаматериалов (МТМ). Метаматериалы – это композитные структуры, которые обладают уникальными свойствами – отрицательными значениями диэлектрической и (или) магнитной проницаемости. Использование МТМ позволяет компенсировать реактивную энергию, запасенную в ближней зоне антенн и получить излучатели, характеристики которых превосходят фундаментальный предел Чу-Харрингтона. В связи с этим количество работ по вопросам использования метаматериалов в антенной технике постоянно растет. Предлагаются всё новые конструктивные решения, позволяющие улучшить характеристики метаматериальных сред и антенн, их содержащих. Уже появились первые промышленные образцы антенн мобильных устройств, использующих МТМ в конструкции.

С практической точки зрения важным вопросом также является применение в антеннах укрытий, в том числе многослойных. С одной стороны они могут использоваться в качестве обтекателей или защитных покрытий, предотвращающих негативное воздействие окружающей среды (температурное, механическое и т.д.), что имеет большую актуальность, так как антенны, как правило, устанавливаются вне помещений или на поверхности движущихся объектов. С другой стороны, так как укрытия располагаются в непосредственной близости от излучающих элементов, они могут быть использованы для оптимизации параметров антенн.

**Цель диссертации.** Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик сферической резонаторно-щелевой антенны и её модификаций, оценка возможности получения на их базе антенны малых электрических размеров в частности при применении в конструкции антенны метаматериалов.

**Объект исследования.** Сферическая резонаторно-щелевая антенна и её модификации - полусферическая антенна, сферическая антенна с двумя кольцевыми щелями и сферическая антенна с многослойной оболочкой из различных материалов.

**Задачи исследования.** В рамках диссертационной работы было необходимо решить следующие задачи:

1. На основании известной модели излучателя, предложенной Стреттоном и Чу и уточненной автором, получить полное решение как внешней, так и внутренней электродинамической задачи для сферической антенны.

2. Установить механизм трансформации возбуждающего тока из точек питания антенны через резонатор и излучающую щель на поверхности сферы во внешнее пространство.

3. Используя аппарат тензорных функций Грина получить решение антенной задачи с учетом многослойного укрытия.

4. Получить расчетные формулы и численные результаты для электрических характеристик сферической антенны и её модификаций.

5. Исследовать методы уменьшения электрических размеров сферической антенны с условием сохранения эффективности излучения, в том числе при использовании в конструкции метаматериалов.

6. Создать макет антенны и исследовать его характеристики.

**Методы исследования.** Для определения характеристик антенны использовались следующие методы и методики:

- Метод частичных областей – эквивалентных токов;
- Метод электромагнитного возбуждения частичных областей, основанный на использовании тензорных функций Грина;
- Использование универсальных представлений функции Грина для областей радиальной и сферической конфигурации, на которые разбивается конструкция антенны.
- Длинноволновая и коротковолновая асимптотики специальных функций, применяемых для описания поля внутри резонатора и во внешней области, в частности, асимптотика функций Бесселя-Риккати.

**Научная новизна.** Получено полное решение антенной задачи, включающее возбуждение и излучение. При определении внешних характеристик, связанных с излучением, существенно расширено решение, полученное Стреттоном и Чу и другими авторами, в части учета реактивной энергии, определяющей резонансные и широкополосные свойства антенны. Решение учитывает ширину щели и её положение и справедливо не только для кольцевой щели на сфере, но и для ряда модификаций данной конструкции – кольцевой щели на полусфере над экраном, двух кольцевых щелях на сфере

Впервые получены характеристики излучения кольцевой щели на сфере с учетом многослойной структуры во внешней области, при этом использовалось

универсальное представление функций Грина, справедливое для любого числа слоев. Для упрощения записи решения и экономии машинного времени использованы комбинации сферических функций Бесселя-Риккати 2-х переменных, которые имеют хорошую сходимость и асимптотику.

Решения универсальны в части применения как обыкновенных диэлектриков, так и метаматериалов, обладающих отрицательными значениями диэлектрической и (или) магнитной проницаемостей.

**Обоснованность и достоверность результатов.** Достоверность и обоснованность результатов работы определяется: использованием при решении строгих методов, частичным совпадением результатов с ранее опубликованными, сравнением с результатами эксперимента и моделирования в среде Ansoft HFSS.

**Практическая значимость диссертационной работы.** На основании строгого решения электродинамической задачи составлена методика определения полевых и импедансных характеристик малогабаритной сферической резонаторно-щелевой антенны, которая является комбинированным устройством, объединяющим в себе линию питания, резонатор и излучающую часть – кольцевую щель на поверхности сферы, укрытой многослойной структурой. Основная задача – уменьшение размеров достигается несколькими способами: заполнением резонатора диэлектриком, использованием многослойной диэлектрической оболочки, использованием в конструкции метаматериалов, а также комбинацией указанных выше методов.

#### **Реализация и внедрение результатов.**

Полученные при выполнении диссертационной работы результаты используются в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах ОАО «УПП «Вектор», ООО «Институт информационных датчиков и технологий», а также в учебном процессе кафедры «Высокочастотные средства радиосвязи и телевидения» ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Электродинамическая модель антенны, содержащая линию питания, резонатор, излучающую щель на проводящей сфере или полусфере над экраном, в том числе с многослойным укрытием, учитывающая ширину щели и её положение на сфере.

2. Интегральные уравнения, позволяющие определить эквивалентные характеристики устройства: собственное сопротивление штыря, коэффициент трансформации между штырем и щелью, внутреннюю и внешнюю проводимость кольцевой щели с учетом многослойного укрытия, полученные на основе использования условий непрерывности векторов электромагнитного поля.

3. Решение интегральных уравнений с использованием вариационного метода, позволившее получить численные результаты для характеристик резонаторно-щелевой антенны и её модификаций, подтвержденные при проведении экспериментального исследования макета антенны

4. Методика уменьшения электрических размеров антенны с использованием в конструкции диэлектриков и метаматериалов.

### Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-технической конференции «Радиовысотометрия – 2004» (г. Екатеринбург, 2004); VII и IX Международных научно-технических конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара, 2008; г. Челябинск, 2010); Международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2009» в рамках 6<sup>го</sup> Международного форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2009» (г. Екатеринбург, 2009); Международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2010» в рамках 7<sup>го</sup> Международного форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2010» (г. Екатеринбург, 2010); Международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2011» в рамках 8<sup>го</sup> Международного форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2011» - работа отмечена золотой медалью (г. Екатеринбург, 2011); Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск, 2011); Международной конференции 3<sup>rd</sup> European Conference on Antennas and Propagation - EuCAP 2009 (г. Берлин, Германия); Международной конференции 5<sup>rd</sup> European Conference on Antennas and Propagation - EuCAP 2011 (г. Рим, Италия).

### Публикации.

По материалам диссертационной работы имеется 11 публикаций, в том числе: 2 статьи в научно-технических изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 2 публикации в сборниках трудов зарубежных конференций.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 85 наименований, содержит 125 страниц текста и 80 рисунков.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отмечаются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснована их достоверность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы и структуре диссертации. Также выполнен обзор литературы, посвященной теме диссертационной работы.

**В первой главе диссертационной работы** описывается постановка задачи об излучении кольцевой щели на сфере, а также приведен анализ существующих решений.

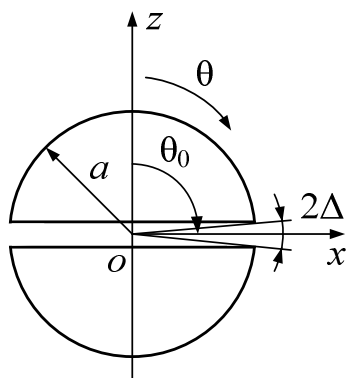


Рис.1 Расположение кольцевой щели на сфере

Излучатель располагается в сферической системе координат и состоит из двух проводящих сферических сегментов радиусом  $a$ , разделенных малым промежутком с угловым раскрытием  $2\Delta$  (рис.1). Центр сферы совпадает с началом координат, угол  $\theta_0$  определяет положение щели на сфере (при экваториальном положении щели  $\theta_0 = 90^\circ$ ). Указанный зазор образует радиальный резонатор, при симметричном возбуждении которого сторонний магнитный ток может полагаться постоянным вдоль щели (нулевая азимутальная вариация тока).

В этом случае силовые линии вектора сторонней напряженности поля в пределах заданного малого промежутка будут совпадать с меридиональными линиями на поверхности сферы. Так как высота радиального резонатора небольшая, то распределение поля в меридиональном направлении можно полагать постоянным.

Сторонний ток возбуждает электромагнитное поле во внешней области и вблизи поверхности проводящей сферы. Ток на поверхности сферы определяется азимутальной составляющей напряженности магнитного поля при  $r = a$ . Тогда на поверхности сферы граничные условия запишутся в виде:

$$E_{\theta} = -E_{\text{ст}} = \begin{cases} 0 \text{ при } r = a; 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \Delta; \frac{\pi}{2} + \Delta \leq \theta \leq \pi; \\ E_{\theta}(\theta) \text{ при } r = a; \frac{\pi}{2} - \Delta \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \Delta; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_{\theta}$  - составляющая вектора  $\mathbf{E}$ , касательная к граничной поверхности;  $E_{\theta}(\theta)$  - функция, характеризующая распределение сторонней напряженности поля в зазоре.

Уравнения Максвелла в сферической системе координат при условии  $\partial/\partial\varphi = 0$  (так как искомое электромагнитное поле не зависит от угла  $\varphi$ ) запишутся в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r}(rE_{\theta}) - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} = -i\omega\mu r H_{\varphi}, \\ \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}(H_{\varphi} \sin \theta) = i\omega\epsilon E_r, \\ -\frac{\partial}{\partial r}(rH_{\varphi}) = i\omega\epsilon r E_{\theta}. \end{cases} \quad (2)$$

Первое решение данной задачи было опубликовано Д.Стреттоном и Л.Чу более 70 лет назад. Позднее появился еще ряд публикаций, развивающих эту тему. Среди них можно выделить статью Й.Мушиаки и Р.Вебстера, в которой приведено решение внешней задачи при различном способе возбуждения и положении кольцевого резонатора, а также получены первые практические результаты. Из современных публикаций можно выделить работы К.Леунга, Г.Стюарта и А.Пидвербетски, С.Беста. Однако до настоящего времени не было опубликовано общего решения внутренней и внешней задачи для сферической антенны, при произвольной ширине щели и её положении на сфере и при наличии многослойной оболочки. Также не была проведена в полной мере оценка возможных методов уменьшения электрических размеров антенны, в том числе при использовании в конструкции метаматериалов различных типов.

**Во второй главе диссертационной работы** приводится решение задачи об излучении кольцевой щели на сфере с использованием метода тензорной функции Грина, в том числе при наличии многослойной оболочки (рис. 2а). Также приведены решения для кольцевой щели на полусфере над экраном (рис. 2б) и двух кольцевых щелей на сфере (рис. 2в).

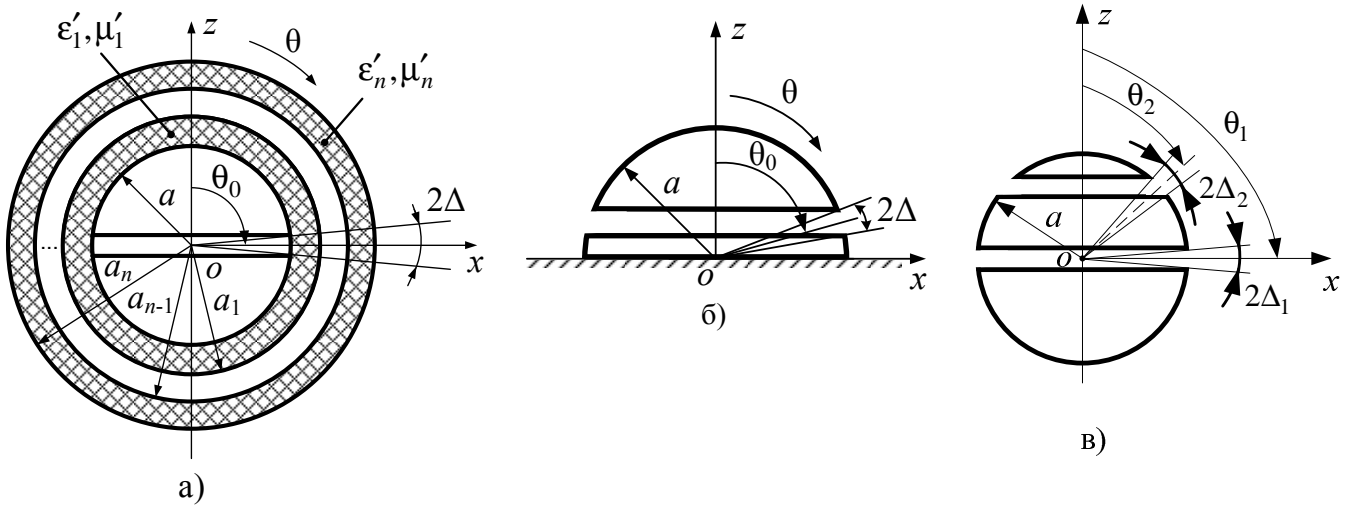


Рис. 2 а – кольцевая щель на сфере с многослойной оболочкой, б – кольцевая щель на полусфере над экраном, в – расположение двух кольцевых щелей на сфере

Объемная плотность стороннего магнитного тока в щели задана следующим образом:

$$\mathbf{J}^M(\mathbf{r}') = \frac{I^M}{2\Delta a} \delta(r' - a) \cdot \mathbf{a}_{\varphi'}, -\pi/2 - \Delta \leq \theta' \leq \pi/2 + \Delta, 0 \leq \varphi' \leq 2\pi, \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}'$  – радиус-вектор точки источника в сферической системе координат;  $I^M$  – амплитуда стороннего тока,  $\delta(r' - a)$  – дельта-функция,  $\mathbf{a}_{\varphi'}$  – азимутальный единичный вектор сферической системы координат.

Решение уравнений Максвелла для магнитного поля может быть записано в виде интеграла от заданного распределения стороннего магнитного тока, ядром этого функционала является тензорная функция Грина:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}(r, \theta, \varphi) = \int_V \bar{\bar{\Gamma}}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}^M(\mathbf{r}') dV', \quad (4)$$

где  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения в сферической системе координат;  $\bar{\bar{\Gamma}}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  – тензор Грина магнитных токов,  $V'$  – объем распределения стороннего тока.

Чтобы получить выражение для напряженности магнитного поля во внешней области, нужно проинтегрировать поверхностный магнитный ток по поверхности апертуры щели с компонентой тензорной функции Грина  $\Gamma_{22;\varphi\varphi}$ .

После интегрирования в (4) с учетом (3) получим:

$$H_{\varphi}(r, \theta) = i \frac{I^M}{2Z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} M_n \frac{\partial P_n(\cos \theta)}{\partial \theta} \frac{1}{r} \frac{h_n^{(2)}(k_0 r)}{[h_n^{(2)}(k_0 a)]'}, \quad (5)$$

где  $Z_0 = 120\pi = 377$  Ом – характеристическое сопротивление свободного пространства;

$$M_n = \frac{1}{2\Delta} \int_{\pi/2-\Delta}^{\pi/2+\Delta} \frac{\partial P_n(\cos \theta)}{\partial \theta} \sin \theta d\theta; \quad (6)$$



$P_n(\cos \theta)$  – полином Лежандра степени  $n$ ;  $h_n^{(2)}(\cdot)$  – функция Ханкеля второго рода порядка  $n$ ;  $[h_n^{(2)}(\cdot)]'$  – ее производная;  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – волновое число,  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве.

Полная внешняя проводимость щели определяется методом наводимых МДС (методом "реакции"):

$$Y_r = G_r + iB_r = -\frac{1}{(I^M)^2} \iint_{S S'} \mathbf{J}^M(\mathbf{r}) \bar{\bar{\Gamma}}_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}^M(\mathbf{r}') dS dS'. \quad (7)$$

После интегрирования в (7) по поверхности щели  $S$  с учетом нулевой азимутальной вариации поля,

$$Y_r = G_r + iB_r;$$

$$G_r = \frac{\pi}{Z_0} \sum_{n=1}^N \frac{2n+1}{n(n+1)} M_n^2 \frac{1}{|h'_n(k_0 a)|^2}; \quad (8)$$

$$B_r = -\frac{\pi}{Z_0} \sum_{n=1}^N \frac{2n+1}{n(n+1)} M_n^2 \frac{j_n(k_0 a) j'_n(k_0 a) + n_n(k_0 a) n'_n(k_0 a)}{|h'_n(k_0 a)|^2}. \quad (9)$$

$j_n(k_0 a)$  – сферическая функция Бесселя первого рода;  $n_n(k_0 a)$  – сферическая функция Бесселя второго рода (функция Неймана);  $j'_n(k_0 a)$ ,  $n'_n(k_0 a)$  – производные указанных функций. Нормировка сферических функций Бесселя выбирается так, чтобы вронскиан удовлетворял условию  $j_n(k_0 a) n'_n(k_0 a) - j'_n(k_0 a) n_n(k_0 a) = 1$ . При такой нормировке сферические функции называются функциями Бесселя–Риккати.

Проведенные исследования сходимости ряда для  $B_r$  показали, что при  $k_0 a < 6$  и  $2\Delta = 5^\circ$  достаточно принять  $N = 85$ .

На рис. 3 представлены зависимости активной (сплошные линии) и реактивной (штриховые линии) составляющих внешней проводимости от электрического размера  $k_0 a$  при  $\theta_0 = 90^\circ$  для различных величин ширины щели (кривые 1 –  $\Delta = 3^\circ$ , кривые 2 –  $\Delta = 5^\circ$ , кривые 3 –  $\Delta = 10^\circ$ ).

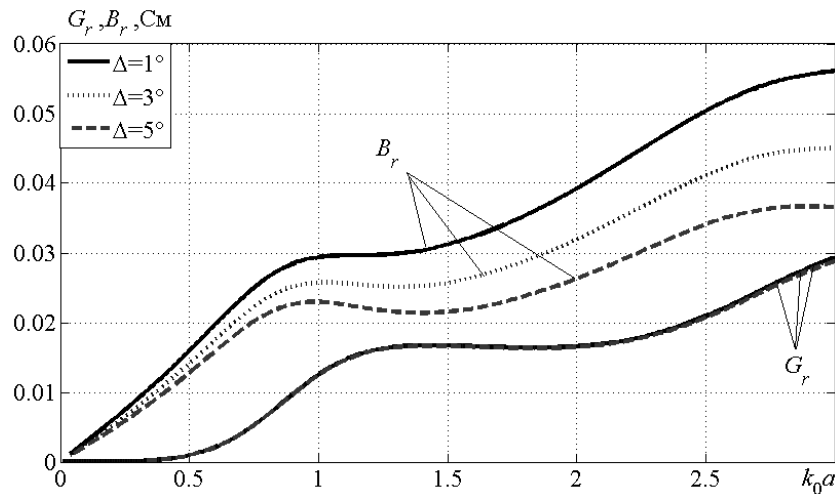


Рис. 3 Зависимости активной  $G_r$  и реактивной  $B_r$  частей внешней проводимости от  $k_0 a$  при  $\Delta = 1, 3, 5^\circ$  и  $\theta_0 = 90^\circ$

Комплексная характеристика направленности определяется выражением

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot e^{i\frac{\pi}{2}n} \cdot \frac{M_n}{h_n^{(2)'}(k_0a)} \cdot \frac{\partial P_n(\cos\theta)}{\partial\theta}. \quad (10)$$

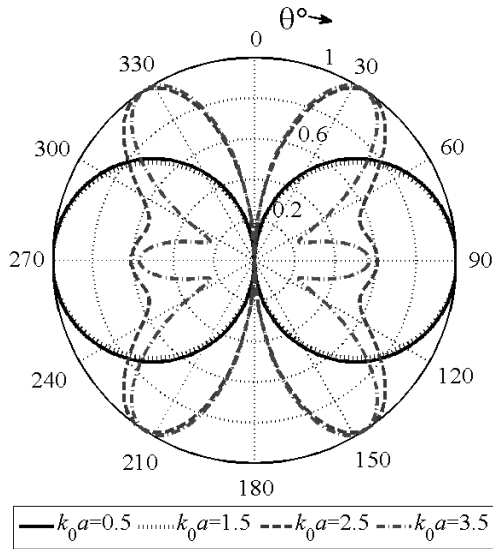


Рис. 4 Диаграммы направленности излучателя в меридиональной плоскости,  $k_0a = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5$ ;  $\theta_0 = 90^\circ, \Delta = 5^\circ$

Коэффициент направленного действия (КНД) рассчитывается по формуле:

$$D(\theta) = \frac{\left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot e^{i\frac{\pi}{2}n} \cdot \frac{M_n}{h_n^{(2)'}(k_0a)} \cdot \frac{\partial P_n(\cos\theta)}{\partial\theta} \right|^2}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot \frac{M_n^2}{\left| h_n^{(2)'}(k_0a) \right|^2}}. \quad (11)$$

На рис. 4 приведены диаграммы направленности излучателя  $|F(\theta)|$  в меридиональной плоскости (плоскость вектора **Е**), рассчитанные по формуле (10) при  $k_0a = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5$  ( $\theta_0 = 90^\circ, \Delta = 5^\circ$ ).

В азимутальной плоскости (плоскость вектора **Н**) излучение не направленное и ДН представляет собой окружность.

Рассмотрим случай с двумя щелями на сфере с угловыми раскрытиями  $2\Delta_1$  и  $2\Delta_2$ , соответственно. Причем одна расположена экваториально ( $\theta_1 = 90^\circ$ ), а другая произвольно (рис. 2б). Тогда активная и реактивная части взаимной проводимости будут иметь вид:

$$G_{r_{12}} = \frac{\pi}{Z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} M_{n_1} M_{n_2} \frac{1}{\left| h_n'(k_0a) \right|^2}; \quad (12)$$

$$B_{r_{12}} = -\frac{\pi}{Z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} M_{n_1} M_{n_2} \frac{j_n(k_0a) j_n'(k_0a) + n_n(k_0a) n_n'(k_0a)}{\left| h_n'(k_0a) \right|^2}. \quad (13)$$

$$M_{n_1} = \frac{1}{2\Delta_1} \int_{\frac{\pi}{2}-\Delta_1}^{\frac{\pi}{2}+\Delta_1} \frac{\partial P_n(\cos\theta_1)}{\partial\theta_1} \sin\theta_1 d\theta, \quad (14)$$

$$M_{n_2} = \frac{1}{2\Delta_2} \int_{\theta_2-\Delta_2}^{\theta_2+\Delta_2} \frac{\partial P_n(\cos\theta_2)}{\partial\theta_2} \sin\theta_2 d\theta.$$

При расположении полусферы над экраном (рис. 2в) в формулы (8) и (9) под знак суммы следует внести сомножитель  $[1 + (-1)^{n+1}]$ , так как в этом случае четные члены ряда в выражении для компоненты тензорной функции Грина  $\Gamma_{22, \varphi\varphi}$  обращаются в ноль.

При введении многослойного укрытия (рис.2а), так как границы слоев являются координатами в сферической системе координат, изменению будет подвержена только характеристическая часть функции Грина  $g_n(r, r')$ .

Полная внешняя проводимость в этом случае определяется как:

$$Y_r = \frac{i}{120} \sum_{n=1}^N \frac{2n+1}{n(n+1)} M_n^2 \frac{1}{i\tilde{Z}_n(a)}, \quad (15)$$

где  $i\tilde{Z}_n(a)$  – ориентированный нормированный импеданс, направленный от поверхности сферы радиуса  $a$  внутрь оболочки, который в случае трехслойной оболочки имеет запись:

$$i\tilde{Z}_n(a) = -\sqrt{\frac{\mu'_1}{\epsilon'_1}} \frac{C'_n(k_1a; k_1a_1) - i\tilde{Z}_n(a_1) \sqrt{\frac{\epsilon'_1}{\mu'_1}} S'_n(k_1a; k_1a_1)}{C_n(k_1a; k_1a_1) - i\tilde{Z}_n(a_1) \sqrt{\frac{\epsilon'_1}{\mu'_1}} S_n(k_1a; k_1a_1)}, \quad (16)$$

где

$$i\tilde{Z}_n(a_1) = -\sqrt{\frac{\mu'_2}{\epsilon'_2}} \frac{C'_n(k_2a_1; k_2a_2) - i\tilde{Z}_n(a_2) \sqrt{\frac{\mu'_2 \epsilon'_2}{\epsilon'_1 \mu'_1}} S'_n(k_2a_1; k_2a_2)}{C_n(k_2a_1; k_2a_2) - i\tilde{Z}_n(a_2) \sqrt{\frac{\mu'_2 \epsilon'_2}{\epsilon'_1 \mu'_1}} S_n(k_2a_1; k_2a_2)}, \quad (17)$$

$$i\tilde{Z}_n(a_2) = -\sqrt{\frac{\mu'_3}{\epsilon'_3}} \frac{C'_n(k_3a_2; k_3a_3) - i\tilde{Z}_n(a_3) \sqrt{\frac{\mu'_3 \epsilon'_3}{\epsilon'_2 \mu'_2}} S'_n(k_3a_2; k_3a_3)}{C_n(k_3a_2; k_3a_3) - i\tilde{Z}_n(a_3) \sqrt{\frac{\mu'_3 \epsilon'_3}{\epsilon'_2 \mu'_2}} S_n(k_3a_2; k_3a_3)}, \quad (18)$$

$$i\tilde{Z}_n(a_3) = -\frac{h_n^{(2)'}(k_0a_3)}{h_n^{(2)}(k_0a_3)}, \quad (19)$$

$\epsilon'_{1,2,3}, \mu'_{1,2,3}$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материалов первой, второй и третьей оболочек соответственно;  $a_{1,2,3}$  – внешние радиусы оболочек;  $k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon'_1 \mu'_1}$ ,  $k_2 = k_0 \sqrt{\epsilon'_2 \mu'_2}$ ,  $k_3 = k_0 \sqrt{\epsilon'_3 \mu'_3}$ ,

$$\begin{aligned} C_n(k_1a, k_1a_1) &= j_n(k_1a) n'_n(k_1a_1) - n_n(k_1a) j'_n(k_1a_1); \\ S_n(k_1a, x_2) &= n_n(k_1a) j_n(k_1a_1) - j_n(k_1a) n_n(k_1a_1). \end{aligned} \quad (20)$$

В случае двухслойной оболочки можно считать, что  $a_3 = a_2$ , тогда

$$i\tilde{Z}_n(a_2) = i\tilde{Z}_n(a_3) = -\frac{h_n^{(2)'}(k_0a_2)}{h_n^{(2)}(k_0a_2)}.$$

Соответственно для однослойной оболочки  $a_3 = a_2 = a_1$  и

$$i\tilde{Z}_n(a_1) = i\tilde{Z}_n(a_2) = i\tilde{Z}_n(a_3) = -\frac{h_n^{(2)'}(k_0 a_1)}{h_n^{(2)}(k_0 a_1)}.$$

Выражения для определения  $i\tilde{Z}_n(a)$  легко модифицируются для произвольного числа слоев.

**В третьей главе диссертационной работы** приводится решение внутренней задачи, методом частичных областей-эквивалентных токов определяется входное сопротивление сферической антенны.

Возбуждение щели производится с помощью низкого радиального резонатора, который в свою очередь возбуждается от коаксиальной линии питания (рис. 5).

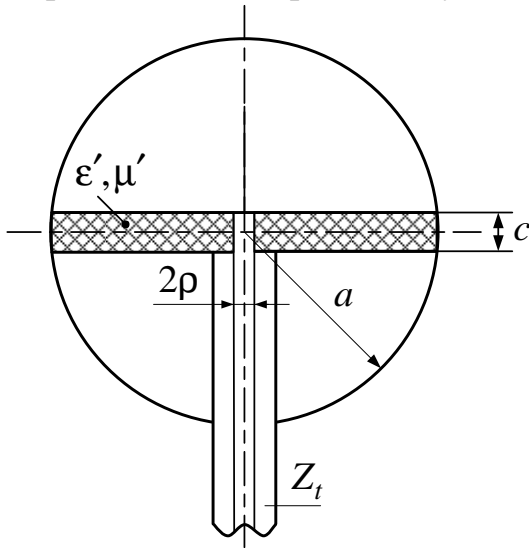


Рис. 5 Кольцевая щель на сфере, возбуждаемая низким радиальным резонатором

Радиус резонатора приблизительно равен радиусу сферы  $a$ , его высота  $c \approx 2\Delta a$ ,  $\rho$  – радиус штыря, являющегося продолжением проводника коаксиальной линии питания. Внутренняя полость резонатора может быть заполнена материалом с относительными проницаемостями  $\epsilon', \mu'$ . Волновое сопротивление коаксиальной линии для основного типа колебаний  $Z_t$ .

Для рассматриваемого способа возбуждения и низких резонаторов распределение электрического тока вдоль штыря и напряженность электрического поля поперек щели можно считать постоянными.

Входное сопротивление антенны в точке питания может быть записано как:

$$\tilde{Z}_{\text{BX}} = \tilde{R}_{\text{BX}} + i\tilde{X}_{\text{BX}} = \tilde{Z}_i + \frac{|N_i|^2}{\tilde{Y}_i + \tilde{Y}_r}, \quad (21)$$

где  $Z_i$  – собственное сопротивление штыря в резонаторе,  $N_i$  – коэффициент связи штырь-щель,  $Y_i$  – внутренняя проводимость резонатора,  $Y_r = G_r + iB_r$  – внешняя проводимость щели, учитывающая излучение. Нормировка произведена к характеристическому сопротивлению свободного пространства.

При определении составляющих формулы (21) использовался аппарат тензорных функций Грина для внутренней области. В результате получены следующие формулы:

$$\tilde{Z}_i = i\sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}} \cdot \frac{k_0 a \cdot \tilde{c} \cdot \sqrt{\epsilon' \mu'}}{4} \cdot \frac{J_0(k_0 a \cdot \tilde{\rho} \sqrt{\epsilon' \mu'})}{J_0(k_0 a \cdot \sqrt{\epsilon' \mu'})} \times$$

$$\left[ J_0(k_0 a \cdot \tilde{\rho} \sqrt{\epsilon' \mu'}) \cdot N_0(k_0 a \sqrt{\epsilon' \mu'}) - N_0(k_0 a \cdot \tilde{\rho} \sqrt{\epsilon' \mu'}) \cdot J_0(k_0 a \sqrt{\epsilon' \mu'}) \right], \quad (22)$$

$$\tilde{Y}_i = i \sqrt{\frac{\epsilon'}{\mu'}} \cdot \frac{2\pi}{\tilde{c}} \cdot \frac{J_1(k_0 a \sqrt{\epsilon' \mu'})}{J_0(k_0 a \sqrt{\epsilon' \mu'})}, \quad (23)$$

$$N_i = \frac{J_0(k_0 a \cdot \tilde{\rho} \sqrt{\epsilon' \mu'})}{J_0(k_0 a \cdot \sqrt{\epsilon' \mu'})}, \quad (24)$$

где  $\tilde{c} = c/a$ ;  $\tilde{\rho} = \rho/a$ ;  $J_0(\cdot)$ ;  $J_1(\cdot)$  – цилиндрические функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно;  $N_0(\cdot)$  – цилиндрическая функция Неймана.

При  $k_0 a \cdot \sqrt{\epsilon' \mu'} < 1$  для получения приближенных формул для параметров резонатора можно использовать первые члены рядов, которыми представляются функций Бесселя и Неймана.

Приближенные формулы позволяют определить характер (индуктивный или емкостной) внутренних сопротивлений и проводимостей. Для резонатора с воздушным заполнением эти формулы принимают вид:

$$N_i \approx 1 + \frac{(k_0 a)^2}{4}, \quad \tilde{Y}_i \approx i \tilde{B}_i = i \frac{\pi \cdot k_0 a}{\tilde{c}} \cdot \left[ 1 + \frac{(k_0 a)^2}{8} \right], \quad \tilde{Z}_i \approx i \tilde{X}_i = i \frac{k_0 a \cdot \tilde{c}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{a}{\rho}\right) \quad (25)$$

Видно, что  $\tilde{B}_i > 0$  и внутренняя проводимость резонатора имеет емкостной характер. Характер сопротивления штыря в резонаторе  $\tilde{Z}_i$  – индуктивный ( $\tilde{X}_i > 0$ )

С учетом преимущественно реактивного характера  $\tilde{Z}_i$ ,  $\tilde{Y}_i$  (без учета омических потерь), формулу для входного сопротивления нагруженного резонатора можно переписать следующим образом

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{\text{вх}} = \tilde{R}_{\text{вх}} + i \tilde{X}_{\text{вх}} &= i \tilde{X}_i + \frac{(N_i)^2}{i \tilde{B}_i + \tilde{G}_r + i \tilde{B}_r} = \\ &= \frac{(N_i)^2 \cdot \tilde{G}_r}{(\tilde{G}_r)^2 + (\tilde{B}_i + \tilde{B}_r)^2} + i \cdot \left\langle \tilde{X}_i - \frac{(N_i)^2 \cdot (\tilde{B}_i + \tilde{B}_r)}{(\tilde{G}_r)^2 + (\tilde{B}_i + \tilde{B}_r)^2} \right\rangle. \end{aligned} \quad (26)$$

Линия питания будет эффективно канализировать мощность генератора в антенну при выполнении условия  $(\tilde{B}_i + \tilde{B}_r) = 0$ .

**В четвертой главе диссертационной работы** приведены численные результаты расчета полного входного сопротивления сферической антенны, результаты моделирования в среде Ansoft HFSS и экспериментальные данные, полученные при исследовании макета.

На рис. 6а представлены расчетные зависимости активной и реактивной частей входного сопротивления, нормированных на волновое сопротивление линии питания  $Z_t = 50$  Ом, а на рис. 6б – зависимости потерь на отражение (*return losses* – *RL*) от электрического размера  $k_0 a$  для сферической резонаторной антенны без оболочки и заполнения резонатора.

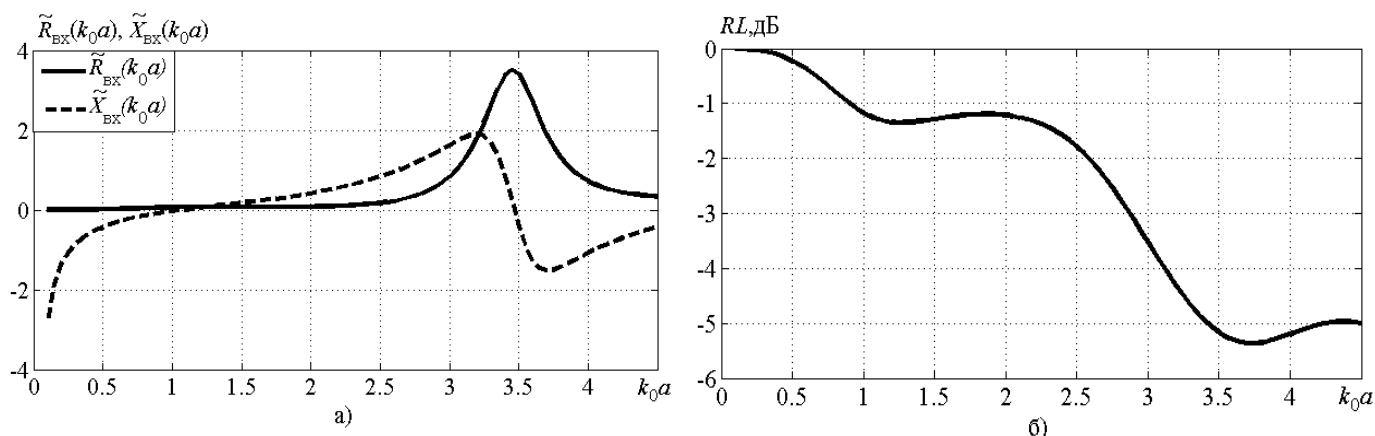


Рис. 6 Электрические характеристики сферической антенны ( $\epsilon' = \mu' = 1$ )

а) зависимость  $\tilde{R}_{\text{вх}}$  и  $\tilde{X}_{\text{вх}}$  от  $k_0a$ , б) зависимость потерь на отражение  $RL$  от  $k_0a$

В этом случае резонанс наблюдается при достаточно больших значениях  $(a/\lambda_{0\text{рез}}) \approx 0,57$ ,  $k_0a = 2\pi a/\lambda_0 = 3,5$ . При этом обратные потери в точке резонанса составляют  $-5,5$  дБ ( $\text{КСВ} = 3,26$ ).

Применение диэлектрического заполнения резонатора и обкладки из диэлектрика смещает резонанс в область меньших значений  $k_0a$ . Для улучшения габаритных характеристик излучателя следует использовать полусферическую антенну над экраном (см. рис. 1б), так как при приблизительно равных электрических характеристиках можно поучить выигрыш в объеме и весе. На рис. 7 представлены зависимости, аналогичные рис. 6, для полусферической антенны с двухслойной оболочкой и заполнением резонатора с параметрами  $2\Delta = 5^\circ$ ,  $\tilde{\rho} = 0,2$ ,  $\tilde{c} = 0,175$ ,  $\epsilon' = \epsilon'_1 = 16 - i0,024$ ,  $t_1 = 1,1$ ,  $\epsilon'_2 = 2,3 - i0,001$ ,  $t_2 = 1,3$ ,  $\mu' = \mu'_1 = \mu'_2 = 1$ . Здесь  $t_1 = a_1/a$  - относительная толщина первой оболочки,  $t_2 = a_2/a$  - относительная толщина второй оболочки.

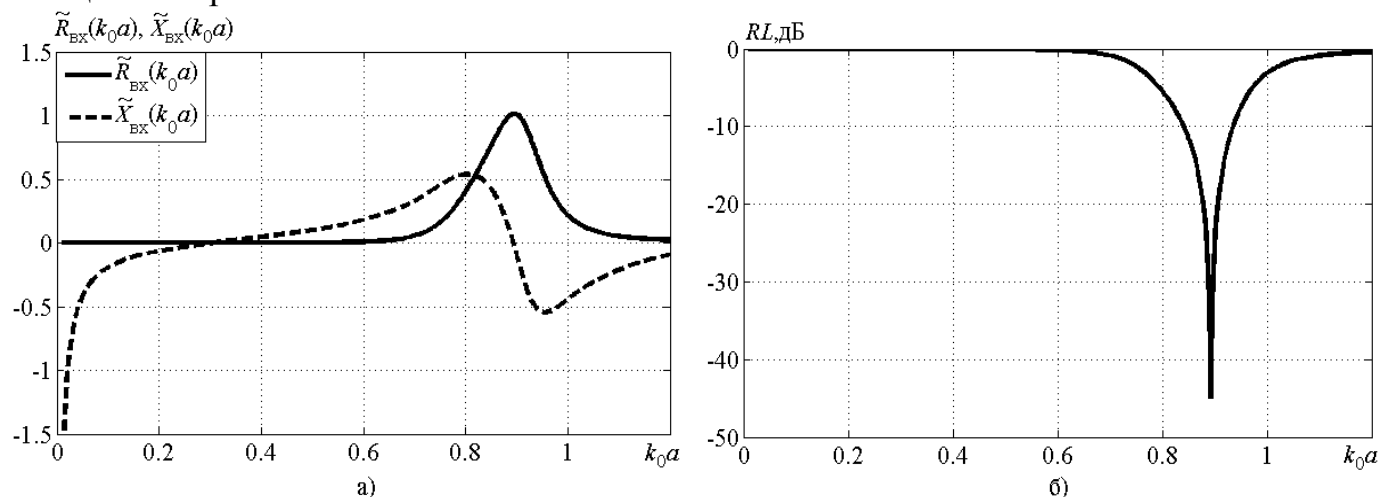


Рис. 7 Электрические характеристики полусферической антенны над экраном с двухслойной оболочкой и диэлектрическим заполнением резонатора:

а) зависимость  $\tilde{R}_{\text{вх}}$  и  $\tilde{X}_{\text{вх}}$  от  $k_0a$ , б) зависимость потерь на отражение  $RL$  от  $k_0a$

Как видно из графиков рис. 7, хорошее согласование антенны (потери на отражение приблизительно равны  $-45$  дБ,  $\text{КСВ} = 1,01$ ) достигается при  $k_0a \approx 0.9$ .

Для экспериментальных исследований был изготовлен макет полусферической антенны (рис.8). Параметры антенны:  $a=16,3$  мм;  $\tilde{c}=c/a=2$  мм/ $16,3$  мм= $0,12$ ;  $\tilde{\rho}=\rho/a=0,3$  мм/ $16,3$  мм= $0,02$ ;  $2\Delta=7^\circ$ . Полусфера была изготовлена из стали, в качестве экрана использовался лист латуни размером  $335\times 335$  мм. В конструкции макета антенны была предусмотрена возможность заполнения резонатора различными диэлектриками. В ходе эксперимента применялись материалы пенопласт ( $\epsilon' \approx 1, \mu' = 1$ ) и ФЛАН-5 ( $\epsilon' = 5 - i0,0075, \mu' = 1$ ).



Рис. 8 Макет полусферической антенны

Питание к антенне подводилось с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением  $Z_t = 50$  Ом через разъем СРГ-50-751ФВ. Продолжение центрального проводника коаксиальной линии питания являлось штырем, возбуждающим резонатор (см. рис. 5). Измерения импедансных характеристик проводились на векторном анализаторе электрических цепей R&S ZVA 24.

Для сравнения были проведены численные расчеты характеристик антенны с параметрами, соответствующими параметрам макета. На рис. 9а,б представлены экспериментальные и расчетные графики зависимостей потерь на отражение для макета полусферической антенны без оболочки и пенопластовым заполнением резонатора и при заполнении резонатора материалом ФЛАН-5 соответственно.

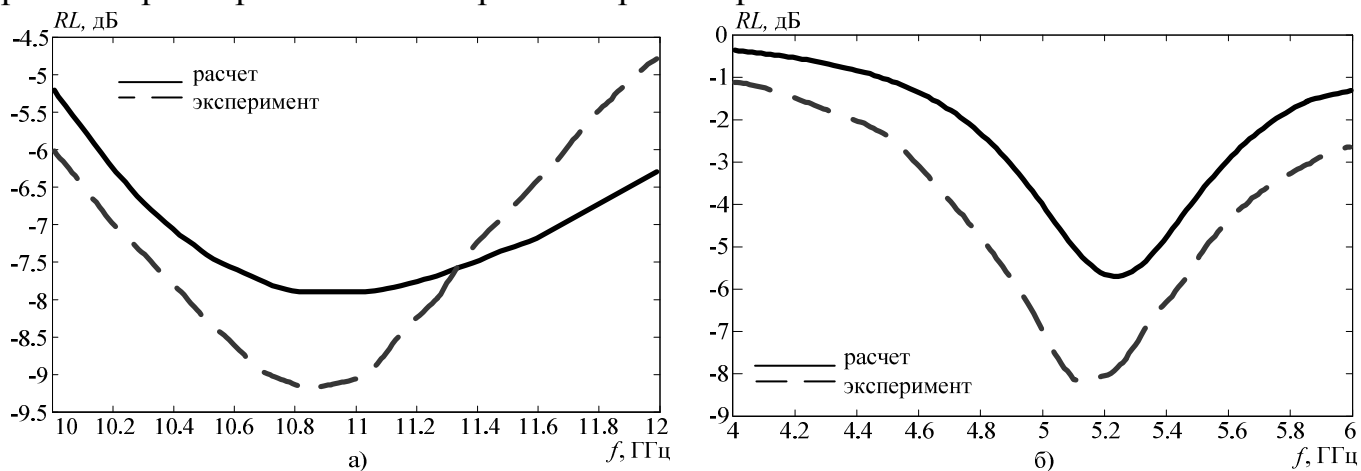


Рис. 9 Экспериментальные и расчетные графики зависимостей потерь на отражение от частоты  
а)  $\epsilon' = \mu' = 1$ , б)  $\epsilon' = 5 - i0,0075, \mu' = 1$

Анализ графиков показывает, что экспериментальные результаты во многом соответствуют расчетным значениям. Некоторое несоответствие, прежде всего в величине обратных потерь, можно объяснить потерями в металле, которые не учитывались при расчетах. Еще одной причиной погрешности может являться отклонение параметров диэлектриков от справочных значений.

Также было проведено моделирование характеристик антенны в среде Ansoft HFSS, данные которого дополнительно подтвердили расчетные результаты. Следует отметить, что при решении задачи в среде HFSS время вычислений увеличивается

примерно в 20 – 30 раз. При этом расчетные значения ближе к экспериментальным данным, нежели результаты моделирования.

**В пятой главе диссертационной работы** рассматривается возможность использования метаматериалов для уменьшения электрических размеров антенны.

Анализ характера сопротивлений и проводимостей, входящих в выражение для определения входного сопротивления сферической антенны (26), показывает, что приемлемое согласование при малых размерах антенны можно получить лишь при условии компенсации внешней и внутренней реактивных проводимостей  $\tilde{B}_i + \tilde{B}_r$ , так как собственное сопротивление штыря  $Z_i$  можно согласовать в линии питания. Это условие можно выполнить, применяя в конструкции антенны (в качестве обкладки и (или) заполнения резонатора) материалы с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями – метаматериалы (MTM).

Метаматериалы являются композитными средами, особые характеристики которых определяются, прежде всего, их структурой. Такие материалы обладают уникальными электрофизическими свойствами – отрицательными диэлектрической и (или) магнитной проницаемостями:  $\epsilon' < 0$ ,  $\mu' < 0$ . Данные среды в силу своих свойств, имеют ряд уникальных особенностей: в данных средах наблюдается отрицательный коэффициент рефракции, обратный эффект Доплера, модификация законов Снеллиуса и несоблюдение эффекта Черенкова.

Среды, у которых либо  $\epsilon' < 0$ , либо  $\mu' < 0$  принято называть SNG (Single-NeGative), причем если  $\epsilon' < 0$ , а  $\mu' > 0$  то среда называется ENG (Epsilon-NeGative), если же  $\epsilon' > 0$   $\mu' < 0$  - MNG (Mu-NeGative). В случае, если и  $\epsilon' < 0$  и  $\mu' < 0$ , то такая среда называется DNG (Double-NeGative). «Обычные» среды с  $\epsilon' > 0$  и  $\mu' > 0$  называют DPS (Double-PoSitive).

Для сферической антенны можно назвать три варианта расположения MTM: внутри резонатора, во внешней области в виде конформной обкладки вокруг проводящей сферы толщиной  $t_1$  с параметрами материала  $\epsilon'_1$ ,  $\mu'_1$  и в виде оболочки, толщиной  $t_2$  с параметрами материала  $\epsilon'_2$ ,  $\mu'_2$  отделенной от сферы слоем из обыкновенного диэлектрика.

На рис. 10 показан график зависимости величины обратных потерь от  $k_0 a$  при заполнении резонатора ENG материалами с величинами  $\epsilon' = -0,5; -1; -1,5; \mu' = 1$ . Для сравнения здесь же приведен график при воздушном заполнении.

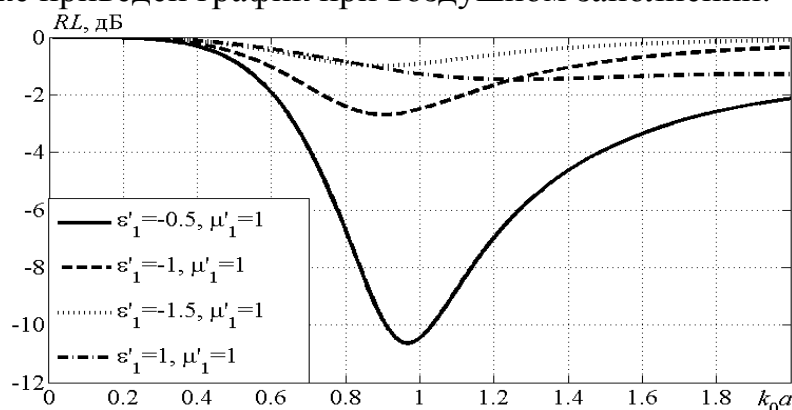


Рис. 10 Зависимость потерь на отражение  $RL$  от  $k_0 a$  при заполнении резонатора несколькими типами ENG материала



При  $\epsilon' = -0,5; \mu' = 1$  потери на отражение составляют  $-11$  дБ ( $KCB = 1,78$ ) при  $k_0 a \approx 1$ . Для других значений  $\epsilon'$ , использовавшихся при расчетах, вследствие большой величины  $\tilde{X}_{\text{вх}}$  и малых значений  $\tilde{R}_{\text{вх}}$  антенна рассогласована с линией питания.

Рассмотрим антенну с МТМ оболочкой. Оболочка может либо непосредственно примыкать к проводящей сфере либо иметь прослойку из DPS материала, что дает возможность дополнительной регулировки параметров антенны при помощи изменения толщины оболочки и её расстояния от проводящей сферы. Также может быть предусмотрен внешний защитный слой (укрытие), предохраняющий антенну от негативного влияния окружающей среды и придающий механическую прочность.

На рис. 11 показан график зависимости величины обратных потерь от  $k_0 a$  для полусферической антенны над экраном с трехслойной оболочкой. Первый слой – материал с параметрами  $\epsilon'_1 = 2,7 - i0,001$ ;  $\mu'_1 = 1$ , относительная толщина первой оболочки  $t_1 = 1,025$ , второй слой – ENG материал с  $\epsilon'_2 = -5 - i0,001$ ;  $\mu'_2 = 1$ , относительная толщина второй оболочки принята равной  $t_2 = 1,3$ , внешний слой – материал с параметрами  $\epsilon'_3 = 2,7 - i0,001$ ;  $\mu'_3 = 1$ , относительная толщина внешней оболочки  $t_3 = 1,325$ ,  $2\Delta = 10^\circ$ , резонатор имеет воздушное заполнение ( $\epsilon' = 1, \mu' = 1$ ).

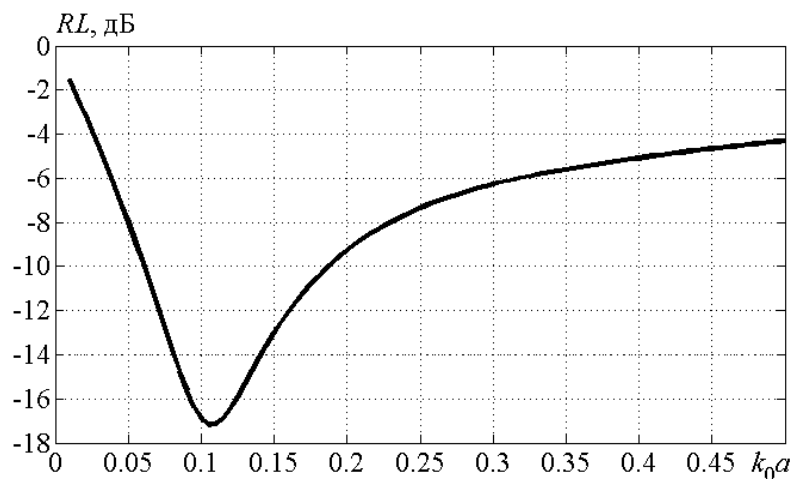


Рис. 11 Зависимость  $RL$  от  $k_0 a$  для полусферической антенны над экраном с трехслойной оболочкой, первый слой – диэлектрик, второй – метаматериал, внешний слой – диэлектрик

Как видно из графиков, при использовании трехслойной оболочки удастся достичь согласования антенны с линией питания ( $RL = -17,2$  дБ,  $KCB = 1,32$ ) при очень малом значении  $k_0 a = 0,105$ ,  $(a/\lambda) = 0,02$ .

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана методика решения задачи об излучении кольцевой щели на сфере, учитывающая положение щели и её ширину. Использование при решении аппарата тензорных функций Грина позволило получить результаты для ряда модификаций данной конструкции – кольцевой щели на полусфере над экраном, двух кольцевых щелях на сфере и сфер с укрытием, содержащим произвольное количество слоев.

2. Получено решение внутренней задачи для сферической антенны. Определены импедансные характеристики устройства возбуждения, состоящего из линии питания, радиального резонатора и возбуждающей щели. Установлены пути минимизации электрических размеров излучателя при контроле степени согласования с линией питания и полосы рабочих частот.

3. Получены численные результаты расчета характеристик сферических антенн различной конфигурации. Исследована возможность использования диэлектриков в конструкции антенны с целью уменьшения электрических размеров излучателя и улучшения согласования с линией питания.

4. Исследованы возможности применения метаматериалов для оптимизации характеристик излучателя. Определены типы и параметры метаматериалов, позволяющие добиться наиболее существенного улучшения характеристик антенны.

5. Предложена конфигурация полусферической антенны над экраном с трехслойной (диэлектрик – метаматериал – диэлектрик) оболочкой, позволяющая добиться согласования антенны с линией питания при радиусе полусферы  $a = 0,02\lambda$ .

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Князев Н.С. Импедансные характеристики кольцевых антенн с радиальными резонаторами / Н.С. Князев, Б.А. Панченко, С.Т. Князев // Радиовысотометрия-2004: труды 1-й Всерос. научн.-технич. конференции. Екатеринбург: АМБ. 2004. С. 223-229.

2. Князев Н.С. Импедансные характеристики кольцевых антенн с радиальными резонаторами / Н.С. Князев, Б.А. Панченко, С.Т. Князев // Вестник УГТУ-УПИ. Теория и практика радиолокации земной поверхности: Серия радиотехническая. 2005. № 19(71). С. 157-164.

3. Князев Н.С., Панченко Б.А. Полное решение задачи Стреттона-Чу об излучении сферической антенны / Н.С. Князев, Б.А. Панченко // Физика и технические приложения волновых процессов: тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения А.С. Попова: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового – Самара: «Книга», 2008. С.128-129.

4. B. Panchenko, M. Gizatullin, N. Knyazev. Enhanced radiation from resonator-slot antenna with metamaterial shell/ Program EuCAP 2009 – 3rd European Conference on Antennas and Propagation 23 – 27 March 2009, Berlin, Germany, p. 33.

5. Князев Н.С., Панченко Б.А. Полное решение задачи Стреттона-Чу об излучении сферической антенны / Н.С. Князев, Б.А. Панченко // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2009» в рамках 6<sup>го</sup> Международного форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2009», посвященного 150-летию со дня рождения изобретателя радио А.С. Попова. В 2-х томах. Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2009. Т. 2. С. 235-237.

6. Н.С. Князев, Б.А. Панченко. Определение входного сопротивления сферической антенны / Н.С. Князев, Б.А. Панченко // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы IX Международной научно-технической конференции / под общ. ред. В.И. Тамбовцева. – Челябинск: Изд-во Челябинского государственного университета, 2010. С. 55.

7. Н.С. Князев, Б.А. Панченко. Определение входного сопротивления резонаторно-щелевой антенны / Н.С. Князев, Б.А. Панченко // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2010» в рамках 7<sup>го</sup> Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2010». Екатеринбург: ООО «Компания Реал-Медиа», 2010, С. 428-431.

8. Н.С. Князев, Б.А. Панченко. Полное решение задачи излучения антенны Стреттона-Чу / Н.С. Князев, Б.А. Панченко // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2011, Вып.2, С. 3-8. Санкт-Петербург, издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

9. Н.С. Князев. Использование метаматериалов для уменьшения электрических размеров резонаторно-щелевой антенны // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2011» в рамках 8<sup>го</sup> Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2011». Екатеринбург: ООО «Компания Реал-Медиа», 2011, С. 407-410.

10. Н.С. Князев, Б.А. Панченко. Методика расчета входного сопротивления сферической антенны // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред. д.т.н, проф. Г.Я. Шайдуров. - Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2011.

11. Panchenko, B. Knyazev, N. Shabunin, S. Useing of double-positive and double-negative materials for minimisation of stratton-chu antenna size / Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2011), 11-15 April 2011, Rome, Italy, pp. 1582 – 1583.