

0-809787

На правах рукописи



**СЕВАСТЬЯНОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**БРЭГГОВСКИЕ СВЧ-СТРУКТУРЫ В  
КОАКСИАЛЬНОМ КАБЕЛЕ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ  
УРОВНЯ ЖИДКИХ СРЕД**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в НИИ прикладной электродинамики, фотоники и живых систем.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Морозов Олег Геннадьевич.**

**Официальные оппоненты:**

**Пастернак Юрий Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем.

**Бирюков Владимир Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ), доцент кафедры «Физика и техника оптической связи».

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), г. Уфа

Защита состоится 20 февраля 2015 года в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, д.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» <http://www.psuti.ru/science/diss-ob/>

Автореферат разослан «\_\_» января 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 219.003.0  
доктор технических наук, профессор

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



0000942642

Тяжев А.И.

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** СВЧ-устройства, которые можно обобщить определением структуры с периодическими неоднородностями, широко известны в теории и технике направляющих и излучающих систем. Подобные устройства, принцип действия которых основан на резонансном взаимодействии прямых и многократно отраженных от неоднородностей электромагнитных волн, нашли применение при создании фильтрующих схем, формирователей и преобразователей радиочастотных сигналов.

Наблюдающаяся на современном этапе научно-технического развития тенденция трансфера оптических и радиочастотных технологий определила повышенный интерес к подобным устройствам как аналогам оптических фотонных кристаллов, брэгговских структур и метаматериалов. Исследование свойств таких устройств в одном диапазоне электромагнитных колебаний может способствовать открытию новых качеств и явлений в другом диапазоне.

Одним из направлений обмена технологий являются сенсорные приложения. Примером может служить волоконно-оптическая решетка Брэгга, широко используемая в измерительной технике, аналогом которой в радиодиапазоне можно назвать коаксиальный волновод с периодическими неоднородностями в продольном сечении. Свойства брэгговских структур в СВЧ-диапазоне рассматриваются в трудах ряда российских и зарубежных ученых: Никитова С.А., Гуляева Ю.В., Усанова Д.А. Скрипаля А.В., Jie Huang, Tao Weia, Xinwei Lana, Jun Fan, Hai Xiao, Songping Wu.

Работа посвящена развитию научно-технических подходов к решению задач измерения параметров материальных сред и физических полей, базирующихся на использовании в качестве преобразовательного элемента брэгговской структуры в радиочастотном коаксиальном кабеле. В частности, исследуются свойства и характеристики преобразовательных элементов измерителей уровня жидких продуктов.

Задачи, требующие измерения уровня жидких сред, исключительно многообразны и встречаются в различных областях техники. Измерение уровня требуется в большинстве производственных процессов; в системах экологического мониторинга и безопасности; для учета массы, расхода жидких продуктов при их хранении и транспортировке. Методов измерения уровня жидких продуктов существует более двадцати. Наиболее распространенные методы, реализованные в промышленном оборудовании, можно разделить на волновые (локационный ультразвуковой, радиолокационный, лазерный локационный, оптический), неволновые (емкостной, гидростатический, буйковый, поплавковый механический), комбинированные (поплавковый магнитоотрицательный, поплавковый радиолокационный). Каждый метод измерения имеет свой набор ограничений, связанный с типом измеряемой жидкости, наличием паразитных отражений и «мертвых зон», диапазоном рабочих температур, волнением поверхности жидкости, присутствием механических узлов и т.д. В связи с этим актуальной остается задача разработки новых измерительных устройств для определения уровня жидкостей, обладающих однородными измерительными характеристиками

вдоль рабочей длины преобразователя уровнемера и не использующих подвижных механических частей.

Представляемая диссертационная работа посвящена решению поставленных вопросов. Тематика и содержание работы соответствуют плану научных исследований, являющихся составной частью государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ–КАИ» на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Симметрия»).

**Целью работы** является создание СВЧ-структур брэгговского типа, реализованных в коаксиальном кабеле, для использования в качестве преобразовательных элементов измерителей уровня жидких сред, позволяющих проводить измерение в дискретном и непрерывном виде.

**Основная задача научных исследований** - разработка принципов построения, методов анализа и синтеза брэгговских СВЧ-структур в коаксиальном кабеле, предназначенных для построения измерителей уровня жидких сред.

**Решаемые задачи:**

1. Анализ свойств, характеристик и принципа действия СВЧ-структур с периодическими неоднородностями, выступающих в качестве преобразовательных элементов информационно-измерительных систем;

2. Разработка методов теоретического описания характеристик брэгговских сенсорных СВЧ-структур в коаксиальном кабеле, на принципе функционирования которых основываются преобразователи уровня жидких сред, и проведение вычислительного эксперимента на базе предложенных методов анализа для оценки измерительных характеристик и свойств предложенных сенсорных структур;

3. Проведение машинного моделирования в программе электродинамического анализа брэгговских СВЧ-структур в коаксиальном кабеле при различных вариантах форм неоднородностей для реализации измерителей уровня дискретного и непрерывного типа, в том числе предназначенных для определения границ раздела многокомпонентных несмешиваемых жидкостей;

4. Экспериментальное исследование дискретного преобразователя уровня на основе брэгговской сенсорной СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле и формирование предложений и рекомендаций по разработке и проектированию измерительных устройств для контроля уровня жидких продуктов.

**Объект исследования:** система периодических неоднородностей в коаксиальном кабеле.

**Научная новизна работы:**

1. Показана возможность реализации измерителей уровня жидких продуктов, основанных на принципах функционирования электродинамических структур с периодическими неоднородностями в коаксиальном кабеле;

2. Предложены теоретические методы анализа электродинамических структур с периодическими неоднородностями в коаксиальном кабеле, используемых как чувствительные элементы измерителей уровня жидких продуктов;

3. Разработаны варианты преобразовательных элементов на основе брегговских СВЧ-структур в коаксиальном кабеле для измерителей уровня дискретного и непрерывного типа, в том числе предназначенных для определения границ раздела многокомпонентных несмешиваемых жидкостей;

4. Проведена оценка свойств и характеристик преобразователей уровня по результатам аналитического, имитационного и экспериментального исследования брегговских сенсорных СВЧ-структур в коаксиальном кабеле.

**Методы исследования, достоверность и обоснованность.** При выполнении данной работы применялись методы описания линий передач СВЧ с помощью матриц и направленных графов, приложения теории связанных мод, методы вычислительной электродинамики, реализованные в коммерческих программах электродинамического моделирования.

Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук; корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов, результатами опытной эксплуатации созданных устройств.

При решении задач использованы современные программные средства, в том числе пакеты прикладных программ Mathcad и CST Microwave Studio.

**Практическая ценность работы:**

1. Получены результаты компьютерного моделирования различных вариантов конструктивного исполнения преобразовательных элементов измерителей уровня дискретного и непрерывного типа;

2. Сформулированы рекомендации по построению инструментальных средств для реализации измерителей уровня жидких продуктов на основе брегговских сенсорных СВЧ-структур в коаксиальном кабеле, позволяющих проводить измерения в дискретном и непрерывном виде;

3. Предложены технические решения, позволяющие с высокой точностью осуществить извлечение измерительной информации и основанные на двухчастотном зондировании резонансных частотных характеристик брегговских сенсорных СВЧ-структур.

**Личный вклад.**

Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной и практической ценностью, получены автором самостоятельно и соответствуют пунктам 5 и 9 паспорта специальности 05.12.07.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» (тема «Симметричные сигналы, волны и поля в решении прикладных задач комплексного применения микроволновых и оптических технологий наукоемкого машиностроения», шифр «Симметрия»)

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 11-ой Международной научно-технической конференции "Проблемы техники и технологии телекоммуникаций" и 8-ой Международной научно-

технической конференции "Оптические технологии в телекоммуникациях", УФА, 2010 г.; XX международной молодежной научной конференции «Туполовские чтения», Казань, 2012 г.; 6-ой Международной научно-технической конференции «Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы», Курск, 2011 г.; 10-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара, 2011 г.; 10-ой Международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2013», Самара, 2013 г.; Международной научно-практической конференции «АКТО-214», Казань, 2014; 12-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Нижний Новгород, 2014.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 15 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, 1 патент РФ на полезную модель, 9 тезисов докладов.

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

1. Результаты анализа методов реализации метрологических процедур и средств на их основе, преобразовательные функции в которых выполняют структуры с периодическими неоднородностями в направляющей системе СВЧ;

2. Методы теоретического описания свойств и характеристик брэгговских сенсорных СВЧ-структур в коаксиальном кабеле, на принципах действия которых основаны измерители уровня жидких продуктов; результаты вычислительного эксперимента на базе предложенных методов, позволяющие оценить измерительные характеристики и свойства предложенных сенсорных структур;

3. Результаты машинного моделирования различных вариантов конструктивного исполнения преобразовательных элементов в виде брэгговских сенсорных СВЧ-структур в коаксиальном кабеле для измерителей уровня жидких продуктов дискретного и непрерывного типа, в том числе предназначенных для определения границ раздела многокомпонентных несмешиваемых жидкостей;

4. Результаты экспериментального исследования преобразовательного элемента на основе брэгговской СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле, используемой для определения уровня жидкости дискретного типа, и рекомендации по конструктивной реализации инструментальных средств измерителей уровня жидких сред.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 102 наименования. Работа без приложений изложена на 130 страницах машинописного текста, включая 64 рисунка и 4 таблицы.

## **II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.



**В первой главе** рассмотрены свойства СВЧ устройств с периодическими неоднородностями: фотонных кристаллов и брэгговских структур в коаксиальном кабеле и их приложения в области измерения параметров материальных сред и физических полей. В радиочастотном диапазоне аналогом волоконно-оптической решетки Брэгга можно считать структуру, представляющую собой расположенные вдоль продольной оси направляющего волновода периодические неоднородности волнового сопротивления. В качестве направляющей линии передачи может быть использован коаксиальный волновод, частным случаем такой системы является брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном кабеле (БССКК). Введение неоднородностей в поперечных сечениях БССКК реализуется высверливанием отверстий во внешнем проводнике и диэлектрическом заполнении коаксиального кабеля (рис. 1).

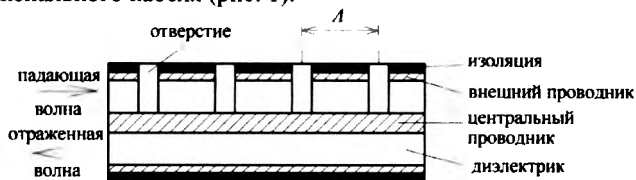


Рис. 1 - Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном кабеле с однорядным расположением неоднородностей.

Периодическое расположение отверстий приводит к отражениям распространяющейся ЭМ волны от каждой неоднородности. Суперпозиция прямых и отраженных волн формирует частотную зависимость коэффициента отражения БССКК, в которой существуют кратные резонансы, определяемые условием Брэгга:  $f_{\text{рез}}^m = m/2L\sqrt{LC}$ , где  $m$  – порядок резонансной частоты,  $L$  – период структуры (расстояние между отверстиями),  $L$  и  $C$  – погонная индуктивность и емкость коаксиального кабеля.

Помимо базовой структуры с однорядным расположением отверстий, показанной на рис. 1, возможны модификации форм и взаимного расположения неоднородностей, позволяющие управлять характером частотных зависимостей параметров БССКК. Например, изготовлены и исследованы БССКК с отверстиями, расположенными в два ряда симметрично продольной оси и трехрядные с расположением отверстий под углом  $120^\circ$ . Анализ частотных зависимостей коэффициента отражения БССКК для трех форм неоднородностей показывает, что при увеличении числа отверстий в поперечном сечении кабеля коэффициент отражения на резонансной частоте увеличивается и стремится к единице. При количестве отверстий в сечении больше трех наблюдается увеличение ширины полосы контура с одновременным увеличением коэффициента прямоугольности контура.

СВЧ системы с периодическими неоднородностями обладают большими перспективами использования в сенсорной технике в силу существования зависимости частотных характеристик подобных структур от внешних условий: вариации электрофизических параметров материалов, контактно связанных с системой; геометрических преобразований структуры, изменений физических свойств компонентов системы. Проведенный анализ показывает, что связанный

с неоднородностью диэлектрический материал приводит к преобразованию формы частотных характеристик СВЧ периодической структуры, характер которого зависит от диэлектрических параметров материального объекта. Логично предположить, что форма характеристик также будет зависеть от степени связи с материалом, например, от количества отверстий, заполненных диэлектриком. Отсюда следует, что подобный принцип может быть применен в измерителях уровня жидких продуктов при последовательном заполнении неоднородностей контролируемой жидкостью.

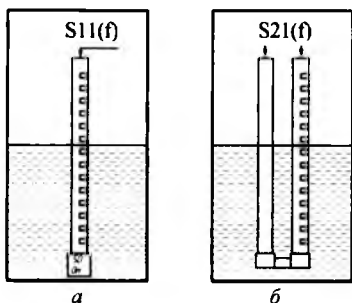


Рис. 2 – Варианты исполнения преобразовательного элемента измерителя уровня жидкости: а - отражательного типа, б – проходного типа.

в соответствии с максимально возможным уровнем контролируемой жидкости, свободный конец кабеля при этом соединен с согласованной нагрузкой. По мере увеличения положения уровня, отверстия кабеля поочередно заполняются жидкостью, что эквивалентно последовательному соединению двух БССКК, параметры неоднородностей и длины которых зависят от количества заполненных жидкостью отверстий. Уровень определяется посредством анализа частотной

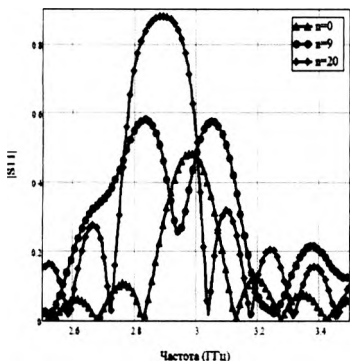


Рис. 3 – Коэффициент отражения БССКК для трех значений  $n$  количества заполненных жидкостью отверстий.

**Во второй главе** рассмотрены методы теоретического описания БССКК для анализа характеристик и параметров преобразовательных элементов измерителей уровня жидкости дискретного и непрерывного действия.

По принципу получения измерительной информации уровнемеры на основе БССКК можно разделить на два класса: с измерением в режиме отражения и в режиме передачи (рис. 2). Преобразовательный элемент, функционирующий в режиме отражения, представляет собой измерительный отрезок коаксиального кабеля с периодически расположенными отверстиями, в частном случае круглого сечения, длина которого выбирается

характеристики коэффициента отражения БССКК (рис. 3), характеризующейся существованием двух резонансов эквивалентных структур, центральные частоты и амплитуды резонансов которых зависят от текущего положения уровня жидкости. Исполнение преобразователя уровня, работающего в режиме передачи, предполагает наличие коаксиального изгиба и дополнительного соединительного кабеля. В данном случае определение уровня производится в результате анализа изменений частотной характеристики, коэффициента передачи последовательного соединения БССКК, коаксиального изгиба и соединительного кабеля.

Описанные выше варианты преобразо-



вателей уровня в силу своей конструкции является измерителями дискретного типа, то есть определение уровня возможно лишь в конкретных точках по длине кабеля. Разрешающая способность уровнемера определяется периодом структуры (расстоянию между соседними отверстиями).

Теоретический анализ свойств и характеристик БССКК основывался на принципах описания СВЧ устройств, использующих приложения матриц и ориентированных графов.

Матричный метод эффективен при предварительном анализе характеристик БССКК, реализующих тип измерения на отражение и прохождение. Общая матрица передачи структуры без учета соединительных элементов будет определяться как

$$T = [T^o][T_1^n]^{(n-M)} \times [T^o][T_2^n]^M$$

где  $n$  – число отверстий в коаксиальном кабеле,  $M$  – число заполненных отверстий,  $[T^o]$  - матрица передачи однородного участка,  $[T_1^n]$  - матрица передачи неоднородного участка с воздушным заполнением,  $[T_2^n]$  - матрица передачи неоднородного участка с заполнением жидкостью.

Для определения матриц передачи БССКК удобно использовать распространенный в теории цепей с распределенными параметрами метод декомпозиции на подсхемы, заключающийся в представлении структуры в виде чередующихся участков однородного коаксиального волновода и участков с неоднородностью. На рис. 4 показано представление отдельных участков БССКК в виде четырехполюсников, где  $U_{пад}^n$  и  $U_{отр}^n$  – напряжения падающих и отраженных волн на соответствующих граничных сечениях  $n=1,2,3...$  Наиболее целесообразным в случае БССКК является описание элементарных участков с помощью волновых матриц передачи, при этом общая матрица будет являться произведением матриц отдельных элементов. Вывод матрицы передачи возможен из матрицы рассеяния, в силу их непосредственной связи. Модуль и фаза частотных S-параметров участков с неоднородностью могут быть получены в программе электродинамического моделирования, например, CST Microwave Studio, либо экспериментальным путем с применением векторных измерителей параметров рассеяния.

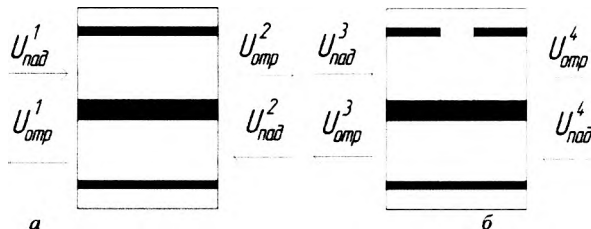


Рис. 4 – Декомпозиционный подход к численному моделированию БССКК: а – однородный участок, б – участок с неоднородностью.

Общая Т-матрица БССКК будет определяться произведением матриц передачи участка с неоднородностью и однородного участка, возведенным в степень, равную количеству отверстий в кабеле:

$$\begin{bmatrix} U_{nad}^1 \\ U_{omp}^1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} U_{omp}^n \\ U_{nad}^n \end{bmatrix} = [T^0][T^n]^n \begin{bmatrix} U_{omp}^n \\ U_{nad}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} e^{(\alpha+j\beta)\Lambda} & -\frac{\dot{\Gamma}}{K} e^{(\alpha+j\beta)\Lambda} \\ \frac{\dot{\Gamma}}{K} e^{-(\alpha+j\beta)\Lambda} & \frac{\dot{K}^2 - \dot{\Gamma}^2}{K} e^{-(\alpha+j\beta)\Lambda} \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} U_{omp}^n \\ U_{nad}^n \end{bmatrix}$$

где  $n$  – количество неоднородностей в БССКК,  $\dot{\Gamma}$  и  $\dot{K}$  – комплексные коэффициенты отражения и передачи каждой диэлектрической/воздушной неоднородности;  $\Lambda$  – длина однородного участка, равная периоду решетки;  $\alpha$  – коэффициент затухания в кабеле;  $\beta = 2\pi f\sqrt{\epsilon}/c$  – постоянная распространения;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля;  $c$  – скорость распространения ЭМ волн в вакууме.

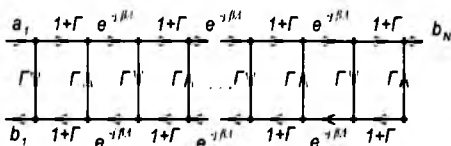


Рис. 5 – Ориентированный граф для БССКК

С помощью метода ориентированных графов можно получить аналитическую зависимость для коэффициента отражения и передачи БССКК. Метод графов наиболее эффективен при калибровке измерительных элементов на основе БССКК и для оценки

погрешностей, вызванных влиянием дополнительных элементов: соединительных линий, согласованной нагрузки, коаксиальных изгибов и т.д.

На рис. 5 показан ориентированный граф для БССКК при условии отсутствия потерь в регулярных линиях между неоднородностями, где  $\Gamma$  – коэффициент отражения отдельной неоднородности (сегмента с отверстием),  $a_1$  и  $b_1$  – падающая и отраженная волна на входе БССКК,  $b_N$  – волна на выходе БССКК. Общий коэффициент отражения и прохождения БССКК, полученный «методом некасающегося контура» без учета контуров более чем второго порядка, передача которых содержит коэффициент отражения  $\Gamma$  в четвертой и более степенях, выглядят как

$$\Gamma_{БССКК} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{\Gamma \sum_{i=1}^N \left[ (1+\Gamma)^{2(i-1)} e^{-2j\beta\Lambda} (1-\Gamma^2 \sum_{k=1}^N (N-k-i+1)(1+\Gamma)^{2(k-1)} e^{-2j\beta\Lambda}) \right]}{1 - \Gamma^2 \sum_{i=1}^N (N-i)(1+\Gamma)^{2(i-1)} e^{-2j\beta\Lambda}}$$

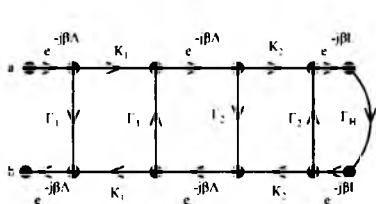


Рис. 6 – Ориентированный граф БССКК как измерителя уровня жидкости

$$K_{БССКК} = \frac{b_N}{a_1} = \frac{(1+\Gamma)^N e^{-j(N+1)\beta\Lambda}}{1 - \Gamma^2 \sum_{i=1}^N (N-i)(1+\Gamma)^{2(i-1)} e^{-2j\beta\Lambda}}$$

Ориентированный граф для БССКК как преобразовательного элемента измерителя уровня, функционирующего в режиме отражения, будет иметь вид, показанный на рис. 6. Топология представляет собой каскадное соединение двух БССКК: с воздушным и жидкостным заполнением. БССКК для воздушного заполнения представлена коэффициентом отражения  $\Gamma_1$  и коэффициентом передачи  $K_1$ , для заполнения жидкостью –  $\Gamma_2$  и  $K_2$ , соответственно. Последние коэффициенты могут быть найдены отдельно методом графов или матричным методом. К выходному порту

воздушным и жидкостным заполнением. БССКК для воздушного заполнения представлена коэффициентом отражения  $\Gamma_1$  и коэффициентом передачи  $K_1$ , для заполнения жидкостью –  $\Gamma_2$  и  $K_2$ , соответственно. Последние коэффициенты могут быть найдены отдельно методом графов или матричным методом. К выходному порту

БССКК подключена согласованная нагрузка с коэффициентом отражения  $\Gamma_H$ , отстоящая от крайней неоднородности на расстояние  $L$ .

Общий коэффициент отражения структуры можно определить как

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \Gamma_1 e^{-2j\beta\Lambda} + \frac{\Gamma_2 K_1^2 e^{-4j\beta\Lambda} (1 - \Gamma_2 \Gamma_H e^{-2j\beta L}) + \Gamma_H K_1^2 K_2^2 e^{-2j\beta(2\Lambda+L)}}{1 - e^{-2j\beta\Lambda} (\Gamma_1 \Gamma_2 + \Gamma_2 \Gamma_H + \Gamma_1 \Gamma_H e^{-2j\beta L} - \Gamma_1 \Gamma_2^2 \Gamma_H e^{-2j\beta L})}$$

Основываясь на матричный метод, проведен вычислительный эксперимент по определению коэффициента отражения структуры при различной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  материала заполнения отверстия. Комплексные коэффициенты S11 и S21 неоднородного участка для разной  $\epsilon$  рассчитаны в программе CST Microwave Studio. Полученные зависимости для S11 брегговской структуры для различных значений количества заполненных отверстий  $n$  при  $\epsilon=3$  представлены на рис. 7, при  $\epsilon=10$  - на рис. 8. Оценивая характер изменения S11 при вариации диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  можно сказать, что в связи с расширением полосы резонанса при больших  $\epsilon$ , возникает наложение двух резонансов начиная с определенного значения количества заполненных отверстий, что приводит к ухудшению эффективности определения уровня.

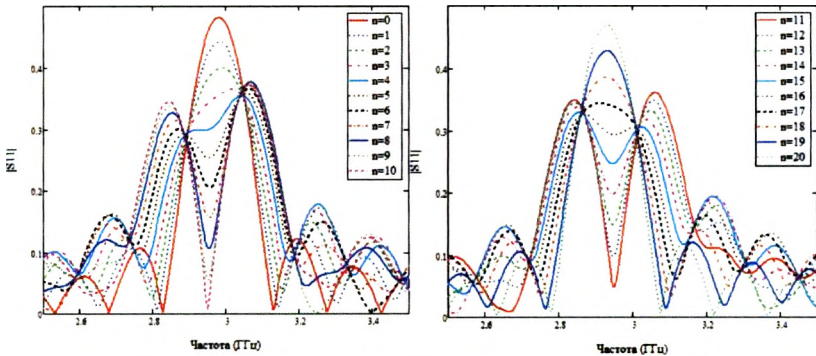


Рис. 7 - Коэффициент отражения БССКК при количестве заполненных отверстий  $n$  от 0 до 20 и диэлектрической проницаемости материала заполнения отверстия  $\epsilon=3$ .

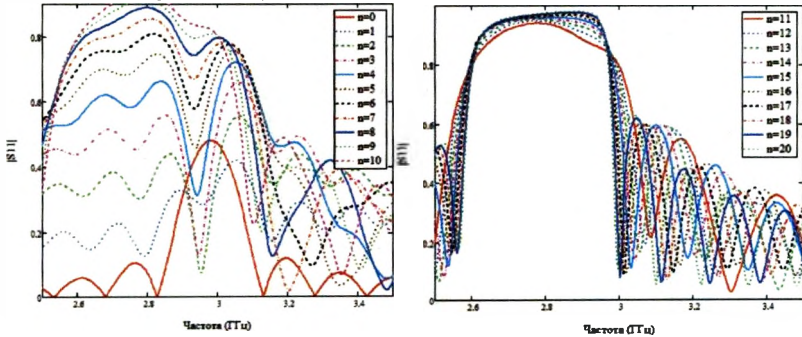


Рис. 8 - Коэффициент отражения БССКК при количестве заполненных отверстий  $n$  от 0 до 20 и диэлектрической проницаемости материала заполнения отверстия  $\epsilon=10$ .

Для устранения указанного эффекта было предложено изменить конфигурацию неоднородности, а именно уменьшить глубину отверстия. В этом случае эффективная диэлектрическая проницаемость неоднородности уменьшается. Подбором значений глубины отверстия для определенных диапазонов диэлектрической проницаемости жидкостей, позволяющих с уверенностью выделить информацию о текущем уровне жидкости, решается задача разработки уровнемера для широкого диапазона измеряемых продуктов. В техническом плане измеритель уровня будет представляться в виде одного блока анализатора и заменяемых чувствительных элементов.

Следующим этапом исследования явилась оценка измерительных параметров преобразователя уровня на основе БССКК, включающая определение формы зависимостей амплитуд двух резонансов, значения центральных частот резонансов и отношения амплитуд двух резонансов от количества заполненных отверстий. Анализируя полученные зависимости для центральных частот можно сделать следующие выводы: во-первых, резонансная частота не остается постоянной при изменении количества заполненных отверстий, во-вторых, характер этой зависимости не монотонен. Касательно изменения амплитуд двух резонансов, здесь также присутствует немонотонность зависимости. Последний факт усложняет возможность извлечения информации о текущем положении жидкости исходя из измерения амплитуды только одного резонанса, либо последовательном измерении амплитуд двух резонансов. Обладая зависимостями для амплитуд двух резонансов можно определить отношение амплитуды первого резонанса (без заполнения) к амплитуде второго резонанса (с заполнением) при различных  $n$  (рис.9). График отчетливо показывает существование линейной зависимости отношения двух амплитуд резонансов в диапазоне значений  $n$  от 6 до 15. Указанная особенность может быть эффективно использована для определения текущего положения уровня жидкой среды. Получение измерительной информации за пределами линейного диапазона изменения отношения амплитуд достигается за счет существования линейного участка в зависимости для первого резонанса в пределах значений  $n$  от 0 до 4 и для второго резонанса в пределах значений  $n$  от 16 до 20.

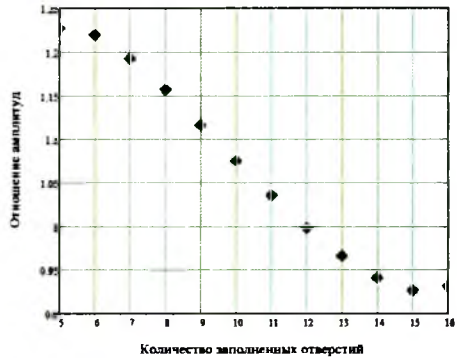


Рис. 9 - Зависимость отношения амплитуд резонансов от количества заполненных отверстий

**Третья глава** посвящена машинному моделированию в программе электродинамического анализа Microwave CST Studio различных вариантов реализации БССКК, применимых в качестве измерительных преобразователей уровня жидких продуктов дискретного и непрерывного действия. Компьютерная имитация включала модели коаксиального кабеля с определенной формой неоднородности.

родностей и цилиндрического резервуара с контролируемой жидкостью, в качестве которой выступал бензин с  $\varepsilon = 4.5$ ,  $tg\delta = 0.0015$  на частоте 3000 МГц.

Существуют задачи в технике измерения уровня жидких продуктов, связанные с определением границ многокомпонентных несмешиваемых жидкостей. Использование в качестве чувствительного элемента БССКК позволяет реализовать измерители, обладающие подобными свойствами. Методом компьютерного электродинамического моделирования оценены характеристики БССКК при анализе двухкомпонентной жидкости.

Компьютерное моделирование позволяет оценить возможность реализации уровнемера на основе БССКК с непрерывным измерением уровня, осуществимого посредством изменения конструкции геометрии неоднородностей. Одним из таких вариантов может служить структура с неоднородностями в виде продольных периодических отверстий, наличие участков неопределенности уровня можно компенсировать наличием близко расположенного идентичного кабеля со сдвигом щелей на величину периода структуры (рис. 10).

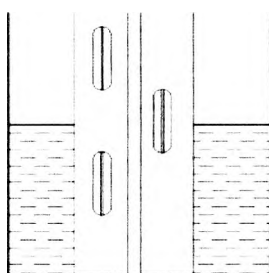


Рис. 10 – Вариант структуры преобразовательного элемента для непрерывного измерения уровня

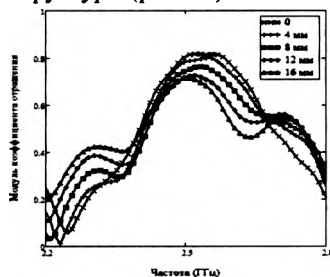


Рис. 11 - Коэффициент отражения БССКК при различном заполнении жидкости в пределах одного отверстия

Контроль в этом случае осуществляется одним анализаторным блоком с последовательной коммутацией входов двух кабельных структур. Модернизацией последнего метода непрерывного измерения является объединение двух вертикально расположенных структур с помощью коаксиального изгиба, в этом случае отсутствует необходимость отдельного контроля кабелей либо их переключения. Для подтверждения возможности реализации непрерывного измерения проведена оценка частотных свойств коэффициента отражения при различном уровне жидкости в пределах одного продольного отверстия (рис. 11).

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментального исследования характеристик БССКК как чувствительного элемента дискретного измерителя уровня жидких продуктов, сформулированы рекомендации к инструментальной реализации преобразователей уровня, предложены технические решения для высокочастотного определения измерительной информации, основанные на двухчастотном зондировании резонансных частотных характеристик брегговских сенсорных СВЧ-структур. Экспериментальная лабораторная установка для исследования характеристик преобразователя уровня в режиме отражения со-

стояла из векторного анализатора цепей, коаксиального кабеля марки 10D-FB, цилиндрического пластикового резервуара с возможностью откачки жидкости. Предварительный анализ частотных характеристик отражения выявил, что при заполнении отверстий происходит образование множественных максимумов, искажающих форму характеристик. Последнее объясняется затеканием жидкости в промежутки между внешним проводником кабеля и диэлектрическим материалом, приводящее к изменению эффективной диэлектрической проницаемости диэлектрика кабеля. В качестве рекомендации к устранению указанного эффекта предложена герметизация боковых граней отверстия. После первоначального сверления производится заделка отверстия с помощью затвердевающего диэлектрического материала, например смеси полиэпоксидной смолы и отвердителя, и повторное сверление отверстия в затвердевшем материале диаметром меньшим исходного (рис.12).

Организация оперативного контроля измерительных характеристик СВЧ брэгговских структур, используемых как преобразователи уровня, предлагается методами двухчастотного зондирования, позволяющих устранить ряд недостатков одночастотных методов с перестраиваемыми генераторами. Метод основан на анализе информационной структуры огибающей сигнала биений двух частот после прохождения или отражения от резонансного контура. Исходя из параметров огибающей определяется амплитуда резонанса.



Рис. 12 – Отверстия БССКК с герметизацией

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований разработаны принципы построения, методы анализа и синтеза измерителей уровня жидких продуктов дискретного и непрерывного типа, основанных на брэгговских сенсорных СВЧ-структурах, реализованных в коаксиальном кабеле.

Кроме того решены следующие задачи:

1. Проведен анализ свойств и характеристик СВЧ структур с периодическими неоднородностями как элементов информационно-измерительных систем, определены резервы для создания на их основе преобразователей уровня жидких сред;

2. Разработаны методы теоретического описания свойств и характеристик брэгговских СВЧ-структур в коаксиальном кабеле для преобразователей уровня жидких продуктов с использованием приложений матриц и графов; проведен вычислительный эксперимент на базе предложенных методов анализа для оценки измерительных характеристик и свойств предложенных сенсорных структур;

3. Проведена компьютерная верификация в программе электродинамического моделирования вариантов исполнения брэгговских СВЧ-структур в коаксиальном кабеле для преобразователей уровня дискретного и непрерывного ти-

пов, в том числе предназначенных для определения границ раздела многокомпонентных несмешиваемых жидкостей;

4. Проведено экспериментальное исследование брэгговских структур в коаксиальном кабеле, используемых как преобразователи уровня жидкости дискретного типа, разработаны рекомендации по проектированию измерительных устройств

#### **IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК:**

1. Насыбуллин, А.Р. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле / А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов, А.А. Севастьянов // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). – 2014. - №3. (<http://jre.cplire.ru/jre/mar14/8/text.pdf>)

2. Морозов, О.Г. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Д.А. Веденькин, А.А. Севастьянов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. - №1 (20). – С.76-86.

3. Севастьянов, А.А. Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью решеток Брэгга в радиочастотном коаксиальном кабеле // Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). – 2014. – № 4. ([www.science-education.ru/118-14209](http://www.science-education.ru/118-14209))

4. Морозов, Г.А. Коаксиальные Брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, А.А. Севастьянов, Р.В. Фархутдинов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2014. – Том 17, №3. – С.65-70.

5. Севастьянов, А.А. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера / А.А. Севастьянов, О.Г. Морозов, А.А. Талипов, Е.П. Денисенко, Т.С. Садеев, С.А. Городилов, М.Р. Нургазизов, П.Е. Денисенко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. - №4. – С.232-236.

**Патент РФ на полезную модель:**

6. Пат. 141415 Российская Федерация МПК G01R 27/04. Устройство для измерения характеристик резонансных структур / Морозов О.Г., Морозов Г.А., Касимова Д.И., Севастьянов А.А., Талипов А.А., Степушенко О.А., Насыбуллин А.Р., Гаврилов П.В., Макаров И.А. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО КГТУ им. А.Н. Туполева – КАИ. №2013152608/28; заявл. 26.06.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. №16.

**В других изданиях:**

7. Севастьянов, А.А. Измерение диэлектрических характеристик жидкостей в Брэгговском коаксиальном кабеле / А.А. Севастьянов, А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов // Физика и технические приложения волновых процессов: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Самара: «Самарское книжное издательство». – 2014. - С. 210-212.

8. Морозов, О.Г. Сенсорные коаксиальные Брэгговские СВЧ-структуры / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.Р. Насыбуллин, А.А. Севастьянов, Р.В. Фархутдинов, Н.В. Багапов // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных работок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Казань. - 2014. - С.258-261.

9. Севастьянов, А.А. Информационно-измерительные устройства на основе периодических неоднородных структур в коаксиальном кабеле / А.А. Севастьянов, Р.В. Фархутдинов, Е.С. Долгова // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Казань. - 2014. - С.377-381.

10. Севастьянов, А.А. Формирование многочастотного зондирующего излучения / А.А. Севастьянов, А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов // Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2013: материалы XI Международной конференции. – Самара. – 2013. – С.25-27.

11. Севастьянов, А.А. Идеология построения учебно-испытательных полигонов, с использованием современных технологий телекоммуникаций / А.А. Севастьянов, О.Г. Морозов // XX Туполевские чтения. Международная молодежная научная конференция: Тез. докл. - Казань. – 2012.

12. Севастьянов, А.А. Волоконно-оптические технологии испытаний: постановки и пути решения задач / А.А. Севастьянов, Е.А. Воронков // Физика и технические приложения волновых процессов. X Междунар. науч.-техн. конф.: Тез. докл. – Самара. – 2011.

13. Севастьянов, А.А. Волоконно-оптические технологии полигонных и лабораторных испытаний / А.А. Севастьянов, Е.А. Воронков // Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. 2-ая Междунар. науч.-техн. конф.: Тез. докл. Курск. – 2011.

14. Севастьянов, А.А. Волоконно-оптические технологии в испытательной лаборатории и на полигоне / А.А. Севастьянов, Е.А. Воронков, С.М. Царев / Авиация, наземный транспорт и энергетика. 6-ая Междунар. науч.-техн. конф.: Тез. докл. - Казань. – 2011.

15. Севастьянов, А.А. Учебный транспортный полигон с распределенным дистанционным управлением / А.А. Севастьянов, М.Ю. Застела, С.М. Царев. Оптические технологии в телекоммуникациях. 11-ая Международная научно-техническая конференция: Тез. докл - Уфа. – 2010.

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

---

Подписано в печать 15 - 12 14 г. Формат 60 x 84/16  
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс.  
Заказ 1549. Печать оперативная. Усл. печ. л. 0,91. 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