

*На правах рукописи*

**Клименко Денис Николаевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ ФИЛЬТРОВ С ШИРОКИМИ  
ПОЛОСАМИ ЗАГРАЖДЕНИЯ НА ПЛАВНО-НЕРЕГУЛЯРНЫХ  
ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего и профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
Плавский Леонид Григорьевич

**Официальные оппоненты:** *Петров Виктор Петрович*, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, начальник лаборатории

*Пальчун Юрий Анатольевич*, доктор технических наук, профессор, Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, г. Новосибирск, ученый-секретарь

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт электронных приборов (ФГУП «НИИЭП»), г. Новосибирск

Защита состоится “17” апреля 2012г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета К212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск, проспект К. Маркса 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” марта 2012г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Райфельд М. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Разработка систем связи, радиолокации и радионавигации, работающих в СВЧ-диапазоне длин волн, потребовало в последние годы совершенствования качественных показателей фильтров, которые являются одними из самых распространенных устройств в радиотехнических системах. Повышение требований к массогабаритным показателям, помехозащищенности передачи информации, электромагнитной совместимости и применением шумоподобных сигналов в технике связи и радиолокации обуславливает создание и миниатюризацию фильтров СВЧ-диапазона с применением элементов на базе микрополосковых линий передачи.

Современные требования для высокочувствительных систем измерений ВЧ- и СВЧ-диапазона длин волн требуют снижения общего уровня шума в рабочем диапазоне частот. Важным требованием к таким системам является отсутствие паразитных полос пропускания, которые влияют на общую шумовую картину. Соответственно, при проектировании низкошумящих систем измерений повышение чувствительности достигается за счет уменьшения собственного уровня шума детектора до его минимального значения и путем сужения полосы измерения при увеличении внеполосного затухания. Последнее требование можно выполнить в случае использования фильтров с широкой полосой заграждения.

В настоящее время в аппаратуре СВЧ диапазона применяются миниатюрные частотно-избирательные устройства (фильтры) в микрополосковом исполнении.

Микрополосковым СВЧ-фильтрам присущи малые габариты, высокая технологичность при изготовлении (отсюда и низкая стоимость, особенно при серийном производстве). К недостаткам микрополосковых фильтров (МПФ) относят трудности обеспечения высокой крутизны склонов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и широкой полосы заграждения, что снижает качественные показатели радиотехнических систем на их основе.

Указанные недостатки в значительной мере могут быть устранены при проектировании фильтров с использованием в их составе плавно-нерегулярных линий передачи (НЛП), т.е. линий передачи с изменяющимися параметрами вдоль направления распространения волны.

Таким образом, разработка новых и оптимизация известных конструкций микрополосковых фильтров на основе НЛП с целью совершенствования характеристик устройств, а именно устранения кратных паразитных полос пропускания в широком диапазоне частот, является на сегодняшний день важной и актуальной задачей.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является исследование плавно-нерегулярных линий передачи и создание на их основе микрополосковых фильтров, обладающих широкими полосами заграждения, исследование полученных структур аналитическими и экспериментальными методами.

#### **Задачи исследования**

1. Обосновать выбор метода синтеза плавно-нерегулярных линий передачи для линий конечной длины на основе спектрального подхода.
2. Получить уравнения перехода от входного сопротивления (проводимости) к интегральному уравнению синтеза волнового сопротивления НЛП для двух типов линий: разомкнутой и замкнутой на конце линии передачи.
3. Провести теоретические исследования и получить уравнения для определения перепада волнового сопротивления плавно-нерегулярных линий передачи по их спектру.
4. Разработать и исследовать конструкции фильтров в диапазоне частот 0.1-10ГГц с широкими полосами заграждения на основе отрезков плавно-нерегулярных линий передачи.

**Методы исследования.** Используемые методы исследований предусматривают комплексный подход к решению поставленных задач и включают использование аппарата функционального анализа, методов матричной алгебры, теории радиотехнических цепей и сигналов, численных методов и компьютерного моделирования; экспериментального исследования изготовленных опытных образцов устройств. Были так же использованы численные методы решения систем нелинейных и интегральных уравнений.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.** Обоснованно корректностью используемых математических выводов и моделей, результатами компьютерного моделирования и натурального эксперимента, внедрением разработанных элементов и устройств в производство.

**Научная новизна работы.** В процессе исследований и разработки теоретических положений получены следующие научные результаты:

1. Выведены уравнения, позволяющие осуществить переход от функции входного сопротивления (проводимости) к интегральному уравнению синтеза волнового сопротивления НЛП для двух типов линий: короткозамкнутой и разомкнутой на конце линии передачи.
2. На основании проведенных исследований выведены функциональные зависимости изменения минимального и максимального значения волнового сопротивления короткозамкнутой на конце и разомкнутой на

конце плавно-нерегулярной линии передачи от коэффициента сдвига резонансной частоты отрезка линии и номера гармоники.

3. Исследованы секции связанных линий передачи гребенчатого и решетчатого типа. Определены условия, при которых обеспечиваются полюса затухания секций гребенчатого и решетчатого типа в микрополосковом исполнении. Получены уравнения для расчета таких секций на связанных плавно-нерегулярных линиях передачи.
4. Разработаны и экспериментально исследованы полосно-пропускающие фильтры и фильтры нижних частот с использованием физически реализуемых плавно-нерегулярных шлейфов. Такие фильтры характеризуются полосой заграждения до 10 ГГц и уровнем внеполосного подавления не менее 30 дБ и стабильной работой при температурах ниже 4.2 К.

### **Практическая значимость**

1. Разработанное программное обеспечение реализует метод синтеза волновых сопротивлений отрезков плавно-нерегулярных линий передачи.
2. Полученные уравнения перехода от функции входного сопротивления (проводимости) к интегральному уравнению синтеза волнового сопротивления плавно-нерегулярной линии позволяют проводить синтез основных элементов конструкции фильтров: короткозамкнутой и разомкнутой на конце плавно-нерегулярной линии передачи.
3. Выведенные функциональные зависимости изменения минимального и максимального значения волнового сопротивления плавно-нерегулярной линии передачи от коэффициента сдвига резонансной частоты отрезка линии и номера гармоники позволяют использовать методы оптимизации фильтров с ограничением на перепад волнового сопротивления плавно-нерегулярной линии передачи и сделать определение ширины нерегулярной линии конечной стадией проектирования фильтра.
4. Предложены оригинальные конструкции микрополосковых НЧ- и полосно-пропускающих фильтров с широкой полосой заграждения, а применение плавно-нерегулярных линий передачи в их составе позволило добиться лучших селективных свойств устройств, а так же существенно уменьшить влияние шумов высокочувствительных измерительных систем и внешних электромагнитных помех.

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

1. Уравнения перехода от входного сопротивления (проводимости) к интегральному уравнению синтеза волнового сопротивления плавно-

нерегулярных линий передачи двух типов: короткозамкнутого и разомкнутого на конце отрезка линии передачи.

2. Ограничения, накладываемые на НЛП и уравнения для определения минимального и максимального значения волнового сопротивления короткозамкнутых и разомкнутых на конце резонаторов на плавно-нерегулярных линиях передачи по спектру линии.
3. Новые конструкции микрополосковых фильтров с широкой полосой заграждения на плавно-нерегулярных линиях передачи.

**Реализация и внедрение результатов исследований.** Работа выполнена на кафедре «Конструирования и технологии радиоэлектронных средств» Новосибирского государственного технического университета. Достижения теоретического и практического характера, в которых используются полученные автором результаты, внедрены в Научно-исследовательском институте электронных приборов (г. Новосибирск, ФГУП «НИИЭП»), ОАО «Дельта» (г. Новосибирск), Институте фотонных технологий IPHT Jena (Лаборатория исследования квантовых объектов, г. Йена, Германия).

**Апробация результатов.** Основные теоретические и практические результаты диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск, 2006, 2007, 2009гг.; VIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП», г. Новосибирск, 2006-2010гг.; Межвузовской научно студенческой конференции «Современные проблемы технических наук», г. Новосибирск, 2006г.; Межвузовской научной конференции «Дни науки НГТУ», г. Новосибирск, 2006-2009гг.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 14 научных работ, в том числе 3 статьи входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 4 публикации в сборниках научных трудов, 6 статей в материалах международных и всероссийских конференций.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем работы составляет 156 страницы, включая 78 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 122 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и поставлены задачи, на решение которых направлена диссертационная работа. Изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а так же приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена краткому обзору нерегулярных структур использующихся в качестве резонансных элементов СВЧ-фильтров. Рассмотрено современное состояние разработок СВЧ-фильтров на нерегулярных линиях передачи.

Проведен анализ функциональных устройств на основе ступенчато-нерегулярных и плавно-нерегулярных линиях передачи, показано, что устройства на основе плавно-нерегулярных линиях передачи позволяют получить более совершенные характеристики.

В рассмотренных публикациях по вопросам расширения внеполосного заграждения авторами не затрагивается вопрос о физической реализуемости фильтрующих структур на НЛП. Так, в работах В.В. Козловского, О.Н. Литвиненко, В.И. Сошникова затронуты только теоретические аспекты синтеза НЛП, а вопрос их реализации не затрагивается в принципе, приводятся фильтрующие структуры на отрезках нерегулярных линий передачи с нереализуемыми на практике волновыми сопротивлениями. И.Н. Салий и М.Я. Воронин в своих работах используют НЛП с заданным законом изменения волнового сопротивления в виде тригонометрических функций, что, в свою очередь, накладывает ограничения на оптимальность выбора структур.

Сделан вывод о том, что существует потребность в дальнейших исследованиях, направленных на изучение свойств нерегулярных линий передачи, поиск новых фильтрующих структур на их основе и разработку методов их расчета. Очевидно, это касается и ключевых составных частей фильтров – резонансных элементов на плавно-нерегулярных линиях передачи.

На основании проведенного обзора литературных источников выявлены направления исследований, проведенных в настоящей диссертационной работе, сформулирована ее цель и поставлены задачи, которые решаются для ее достижения.

Во **второй главе** обосновано использование методики синтеза плавно-нерегулярных линий передачи, на основе спектрального подхода. Описана суть спектрального подхода к синтезу устройств на основе нерегулярных линий, отличительными чертами которого являются универсальность и удобство.

Для синтеза плавно-нерегулярных линий передачи используется интегральное уравнение вида

$$f(z, y) + \int_0^z f(s, y) \cdot K(z, s) ds + K(z, y) = 0. \quad (1)$$

Где закон изменения волнового сопротивления определяется из выражения

$$\rho(z) = \rho(0) \cdot \left[ 1 + \int_0^z K(z, t) dt \right]^{-2} \quad (2)$$

Выведены уравнения перехода от функции входного сопротивления к интегральному уравнению (1) синтеза волнового сопротивления НЛП по спектру линии передачи, для основных элементов конструкций фильтров:

*короткозамкнутого на конце отрезка линии передачи*

$$f(z, y) = \frac{2}{\theta} \left( \sum_{n=1}^{\infty} L_n(\Omega_n, z, y) - \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \cos \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2\theta} z \right] \cos \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2\theta} y \right] \right\} \right), \quad (3)$$

*разомкнутого на конце отрезка линии передачи*

$$f(z, y) = \frac{2}{\theta} \left( \sum_{n=1}^{\infty} L_n(\Omega_n, z, y) - \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \cos \left[ \frac{n\pi}{\theta} z \right] \cos \left[ \frac{n\pi}{\theta} y \right] \right\} \right) + \frac{\theta \cdot k_0 - 1}{\theta}, \quad (4)$$

где  $L_n(\Omega_n, z, y) = \theta \cdot k_n \cdot \cos(\Omega_n z) \cos(\Omega_n y)$ ,  $\theta$  – электрическая длина линии,  $\omega_0$  – центральная частота НЛП,  $\Omega_n$  – резонансные частоты нерегулярной линии передачи,  $k_n$  – вычет в полюсе  $\Omega_n$  входного сопротивления нерегулярной линии передачи.

Реализован численный метод решения интегрального уравнения синтеза НЛП и проведен анализ сходимости алгоритма синтеза, на примере разомкнутой на конце канонической нерегулярной линии передачи (КНЛП), рассчитанной на основе аналитической функции. Сравнение закона изменения волнового сопротивления, полученного с помощью метода синтеза НЛП по входному сопротивлению, с волновым сопротивлением КНЛП, рассчитанным по аналитическому выражению, показало максимальное отклонение характеристик не превышающее 0.1%.

**В третьей главе** описываются условия физической реализуемости плавно-нерегулярных линий передачи. На основе теоретических исследований поведения максимального и минимального значения волнового сопротивления плавно-нерегулярных линии передачи от положения собственных частот линий были выведены уравнения для определения минимального и максимального значения волнового сопротивления линий передачи по спектру НЛП.

Функциональная зависимость изменения максимального и минимального значения волнового сопротивления от величины смещения собственной частоты

ты НЛП и от номера гармоники для короткозамкнутой и разомкнутой на конце линии передачи

$$\rho_{\max(\min)}(\delta, n) = \rho_0 \frac{1 - \text{sign}(\delta - 1)}{2} \rho_{\delta < 1}(n, \delta) + \rho_0 \frac{1 + \text{sign}(\delta - 1)}{2} \rho_{\delta > 1}(n, \delta), \quad (5)$$

где  $\rho_0$  – волновое сопротивление в начале линии,  $\delta$  – коэффициент сдвига резонансной частоты (где  $\delta = \hat{\omega}_n / \omega_n$ ,  $\hat{\omega}_n$  – резонансная частота плавно-нерегулярного отрезка,  $\omega_n$  – резонансная частота регулярного отрезка линии передачи,  $n$  – номер гармоники).

$$\rho_{\delta < 1(\delta > 1)}(n, \delta) = \exp\left(\bar{c}_1(n) \cdot (\delta - 1) + \bar{c}_2(n) \cdot (\delta - 1)^2 - \bar{c}_3(n) \ln \delta\right),$$

$\bar{c}_i(n) = a_1 + a_2 n + a_3 n^2 + a_4 n^3$  – полином,  $a_j$  – вычисляемые коэффициенты,  $i=1 \dots 3$ ,  $n$  – номер гармоники.

При сдвиге нескольких собственных частот НЛП итоговая функциональная зависимость изменения минимального и максимального значения волнового сопротивления от величин смещения собственных частот записывается следующим образом:

$$\rho_{\min(\max)} = \rho_0 \prod_{n=1}^m \frac{1 - \text{sign}(\delta_n - 1)}{2} \rho_{\delta < 1}(n, \delta) + \rho_0 \prod_{n=1}^m \frac{1 + \text{sign}(\delta_n - 1)}{2} \rho_{\delta > 1}(n, \delta), \quad (6)$$

где  $m$  – общее количество смещенных резонансных частот.

Сравнение результатов теоретического исследования и расчетных данных показало, что максимальная ошибка интерполяции изменения максимального и минимального значения волнового сопротивления от коэффициента сдвига гармоники не превышает 0.5%.

**Четвертая глава** посвящена проектированию фильтров с широкими полосами заграждения на плавно-нерегулярных линиях передачи. Показана возможность эффективного подавления нерабочих частот в широком частотном диапазоне.

В первом разделе, предложена конструкция фильтра нижних частот (ФНЧ) с плавно-нерегулярными шлейфами. Метод расчета фильтров основан на использовании прототипа нижних частот на сосредоточенных элементах.

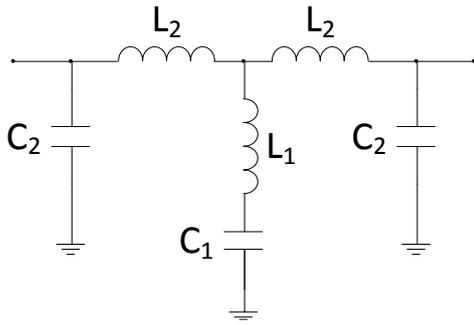


Рисунок 1 – Прототип ФНЧ на сосредоточенных элементах

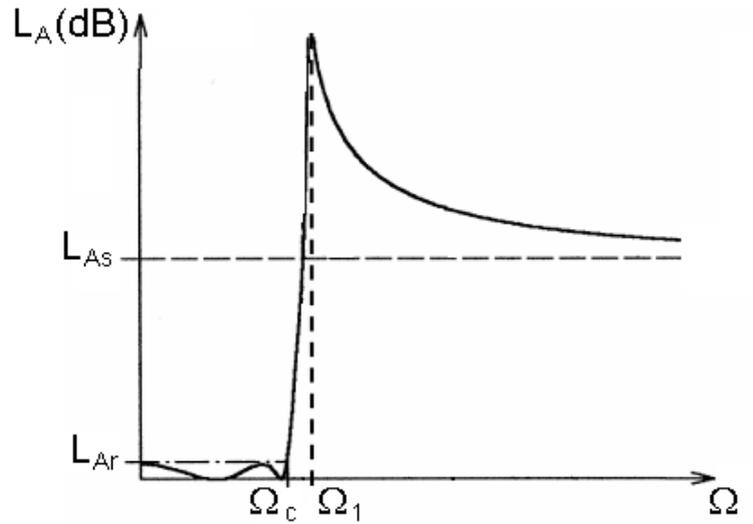


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ на сосредоточенных элементах

Использование прототипа ФНЧ (рис. 1) с Кауэровской характеристикой затухания позволило сконструировать фильтр с более крутыми характеристиками АЧХ (рис 2), а применение в качестве шлейфных элементов плавно-нерегулярных линий передачи позволило расширить полосу заграждения и увеличить уровень внеполосного затухания.

Для обеспечения полосы задерживания в НЧ-фильтре (рис. 1) должно выполняться условие противорезонансности паразитных частот шлейфов на НЛП, т.е. расположение нулей входного сопротивления первого шлейфа должно соответствовать расположению полюсов входного сопротивления следующего шлейфа и т.д.:

$$\prod_{n=1}^{\infty} \frac{\omega^2 + \hat{\omega}_{0n}^2}{\omega^2 + \omega_{0n}^2} \Big|_{НЛП1} = \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\omega^2 + \omega_{pn}^2}{\omega^2 + \hat{\omega}_{pn}^2} \Big|_{НЛП2} = \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\omega^2 + \hat{\omega}_{0n}^2}{\omega^2 + \omega_{0n}^2} \Big|_{НЛП3} = \dots \quad (7)$$

$$\prod_{n=1}^{\infty} \frac{\omega^2 + \omega_{pn}^2}{\omega^2 + \hat{\omega}_{pn}^2} \Big|_{НЛП1} = \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\omega^2 + \hat{\omega}_{0n}^2}{\omega^2 + \omega_{0n}^2} \Big|_{НЛП2} = \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\omega^2 + \omega_{pn}^2}{\omega^2 + \hat{\omega}_{pn}^2} \Big|_{НЛП3} = \dots \quad (8)$$

\$\omega\_{0n}\$ и \$\omega\_{pn}\$ – нули и полюса входного сопротивления, \$\hat{\omega}\_{0n}\$ и \$\hat{\omega}\_{pn}\$ – смещенные нули и полюса входного сопротивления.

Коэффициенты сдвига нулей входного сопротивления НЛП шлейфов для обеспечения полюсов затухания \$\Omega\_1\$ вблизи полосы пропускания:

$$a = \frac{\theta}{\pi^2 \omega_0 \sqrt{L_1 C_1}},$$

где \$a\$ – коэффициент сдвига нуля входного сопротивления НЛП шлейфа, а \$\omega\_0\$ – резонансная частота НЛП шлейфа.

На рисунке 3 показана топология микрополоскового фильтра такого типа, с частотой среза 1 ГГц, уровнем пульсаций в полосе пропускания  $\Delta=0.5\text{дБ}$ , и его амплитудно-частотная характеристика.

Штрихпунктирной линией на рисунке 3 показана характеристика затухания микрополоскового ФНЧ с регулярными шлейфами.

Анализируя полученную функцию рабочего затухания, можно сказать, что применение НЛП в качестве резонансных элементов в фильтре нижних частот позволило расширить полосу заграждения до 10 ГГц при уровне затухания -30 дБ.

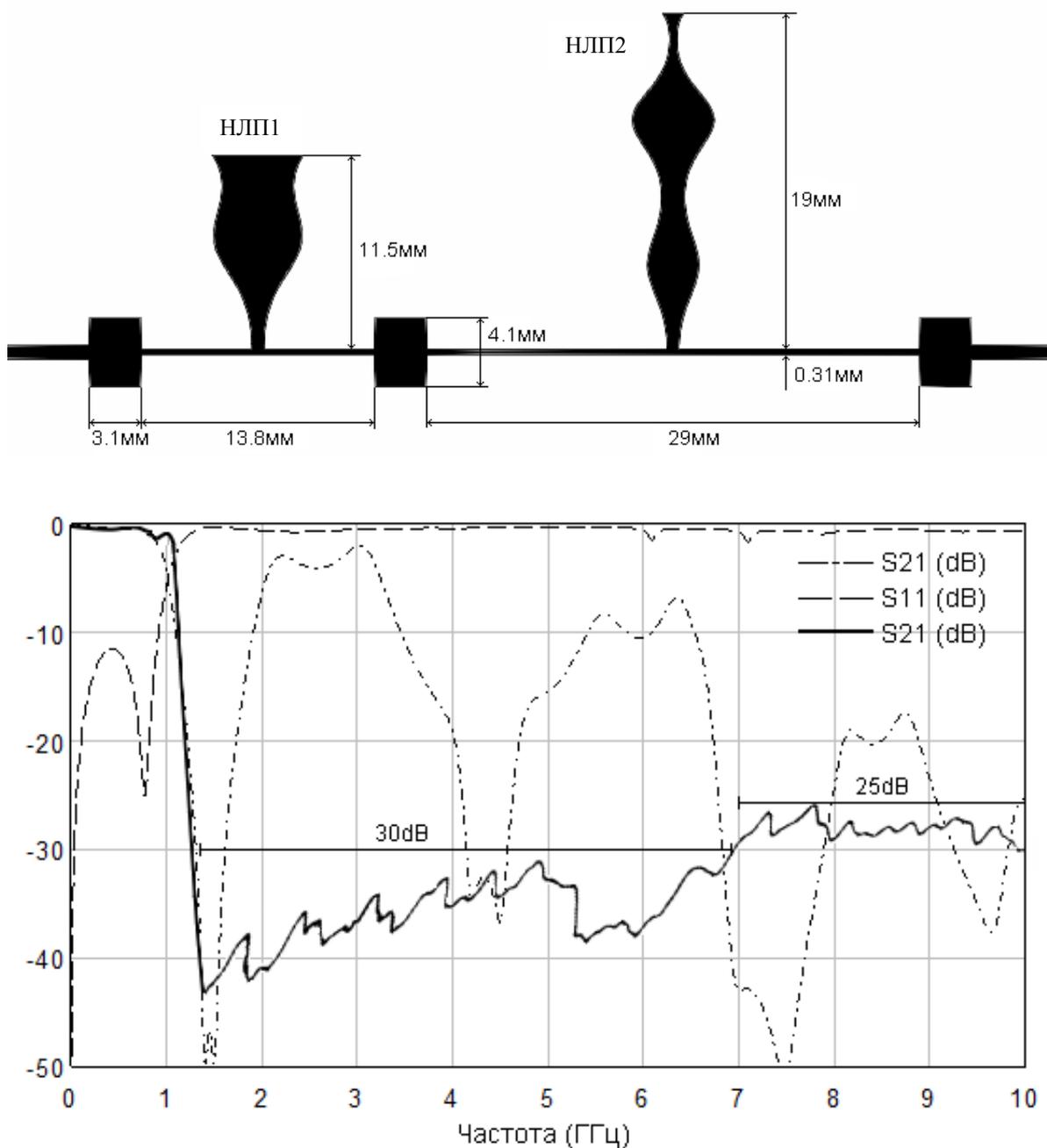


Рисунок 3 – Топология ФНЧ в микрополосковом варианте, АЧХ фильтра на плавно-нерегулярных резонаторах

В следующем подразделе рассматривается синтез узкополосных полосно-пропускающих фильтров (ППФ) шпилечного типа на нерегулярных шлейфах.

Для подавления паразитных полос пропускания, возникающих из-за различных фазовых скоростей (в результате различных электрических длин) для четных и нечетных мод секций связанных линий, в полосе задерживания, были применены эквивалентные Т-образные плавно-нерегулярные шлейфы, разомкнутые на конце, вместо последовательных четвертьволновых соединительных линий в фильтре. Схема замещения показана на рис. 4.

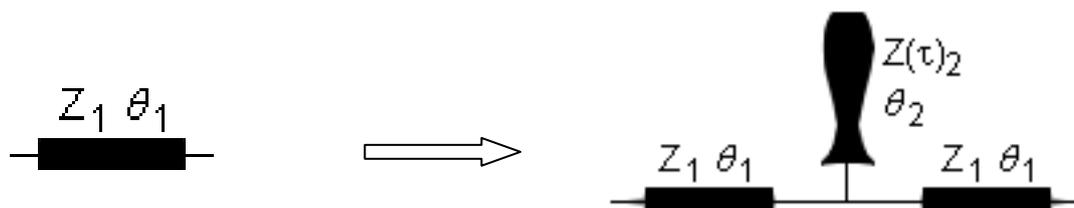


Рисунок 4 – Схема замещения последовательной линии передачи Т-образной плавно-нерегулярной разомкнутой на конце

Т-образные шлейфы, разомкнутые на конце, имеют ослабление на собственных резонансных частотах и малые вносимые потери в остальном спектре частот. Настройка резонансных частот таких шлейфов на паразитные гармоники фильтра шпилечного типа позволяет обеспечить их подавление.

Параметры фильтра шпилечного типа рассчитываются на основе НЧ-прототипа. Параметры шлейфов на НЛП

$$Z_1 = \operatorname{ctg}(\theta_1) \frac{1 - \cot(\theta_0)}{\sin(\theta_0)} Z_0. \quad (9)$$

$$Z_2 \prod_{n=1}^{\infty} \frac{p^2 + \hat{\omega}_{0n}^2}{p^2 + \omega_{0n}^2} \prod_{n=1}^{\infty} \frac{p^2 + \omega_{pn}^2}{p^2 + \hat{\omega}_{pn}^2} \cot(\theta_2) = \frac{\cot^2(\theta_1)}{\cos(2\theta_1) - \cos(\theta_0)} \frac{1 - \cos(\theta_0)}{\sin(\theta_0)} Z_0. \quad (10)$$

Электрическая длина плавно-нерегулярного шлейфа выбирается из условия:  $\theta_2 = \frac{90^\circ}{n}$ , где  $n$  – номер паразитной гармоники,  $\omega_{0n}$  и  $\omega_{pn}$  – нули и полюса входного сопротивления,  $\hat{\omega}_{0n}$  и  $\hat{\omega}_{pn}$  – смещенные нули и полюса входного сопротивления, количество нерегулярных шлейфов выбирается из условия  $N = m + 1$ , где  $m$  – количество паразитных гармоник для подавления.

Моделирование такого типа фильтров подтвердило, что структура с плавно-нерегулярными шлейфами обеспечивает затухание паразитных полос пропускания, не хуже -40дБ в широком частотном спектре, с учетом ограничения

на перепад волнового сопротивления не более 3. Экспериментальные характеристики фильтра такого типа приведены в гл. 5 диссертации.

Далее были рассмотрены секции связанных плавно-нерегулярных микрополосковых линий (СНЛП) гребенчатой и решетчатой структуры (рис. 5).

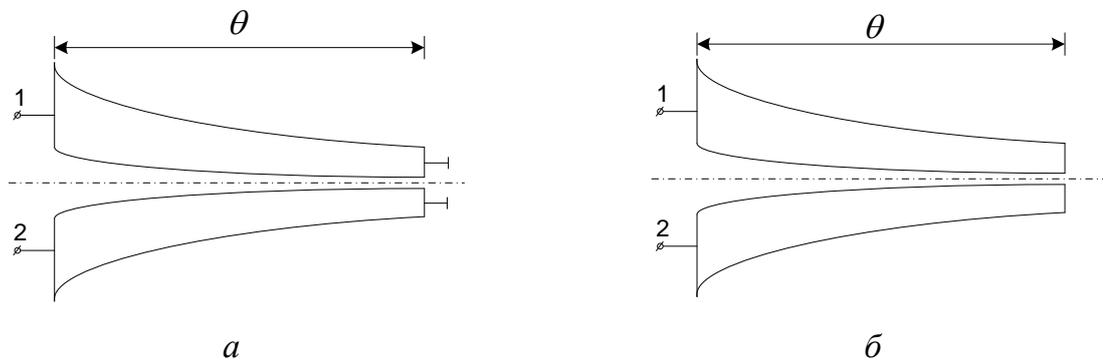


Рисунок 5 – Секции связанных плавно-нерегулярных линий передачи: а) звенья гребенчатого типа; б) звенья решетчатого типа

На основе связанных нерегулярных линий можно синтезировать устройства, характеристики которых являются предельными или близкими к ним. Например, можно реализовать фильтры с бесконечной полосой заграждения.

Звенья фильтров решетчатого (рис. 5а) и гребенчатого (рис. 5б) типов при регулярной области связи являются всезаграждающими по всем диапазоне частот. Их характеристические сопротивления имеют чисто мнимый характер, а затухание – довольно большую величину.

При нерегулярной связи звенья наряду с всезаграждающими могут обладать полосно-пропускающими свойствами в зависимости от параметров СНЛП.

Всезаграждающими свойствами звенья обладают в том случае, если нерегулярность для ортогональных типов волн одинакова и выполняется условие

$$jtg(\beta^{oe}l) = jtg(\beta^{oo}l). \quad (11)$$

Условие (11) для звеньев фильтра решетчатого (рис. 5а) и гребенчатого (рис. 5б) типов справедливо во всей частотной области в случае однородной среды (симметричная полосковая линия передачи;  $\epsilon, \mu$  - скалярные константы).

Если среда неоднородная, то электрические длины четных  $\theta^{oe}$  и нечетных  $\theta^{oo}$  мод будут различными. Тогда для микрополосковой связанной линии  $\beta^{oo(oe)} = \beta_0 n^{oo(oe)}$ , где коэффициенты замедления нормальных волн  $n^{oe(oo)} = \sqrt{\epsilon_{r_{эф}}^{oe(oo)}}$ ,  $\epsilon_{r_{эф}}^{oe(oo)}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость подложки. В этом случае, из-за различных фазовых скоростей четных и нечет-

ных мод, возникают дополнительные паразитные полосы пропускания на частотах  $2f_0$ ,  $4f_0$  и т.д. и  $jtg(\beta^{oe}l) \neq jtg(\beta^{oo}l)$  (рис. 6)

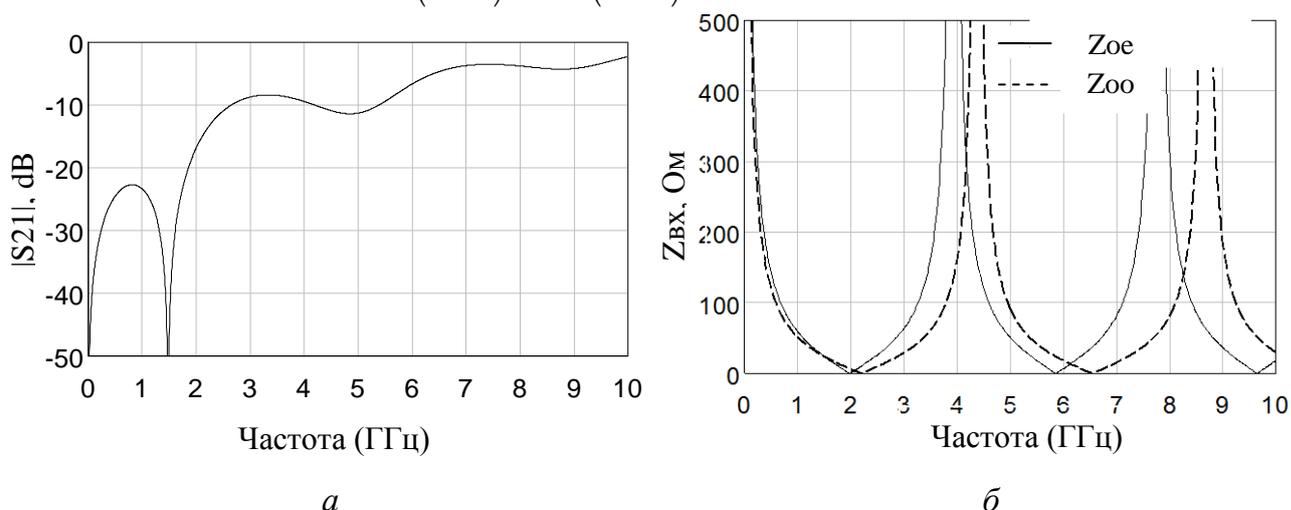


Рисунок 6 – Частотные характеристики звена фильтра решетчатого типа: а) расчетная частотная характеристика звена на несимметричной микрополосковой линии; б) входное сопротивление четной и нечетной мод

Поэтому, чтобы обеспечить затухание на частотах  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$  и т.д. требуется выполнение условия (11).

Данное условие может быть выполнено за счет применения секций параллельно-связанных плавно-нерегулярных линий передачи.

Были получены коэффициенты сдвига резонансных частот для четной и нечетной мод СНЛП обеспечивающие условие (11):

$$\frac{a_{pn}^{oe} \pi \omega_0^{oe}}{\theta^{oe}} = \frac{b_{pn}^{oo} \pi \omega_0^{oo}}{\theta^{oo}}, \quad \frac{a_{0n}^{oe} \pi \omega_0^{oe}}{\theta^{oe}} = \frac{b_{0n}^{oo} \pi \omega_0^{oo}}{\theta^{oo}} \quad (12)$$

где  $\omega_0^{oe} = \omega_0^{oo} = \omega_0$  – резонансная частота СНЛП,  $\theta^{oe}$  и  $\theta^{oo}$  – электрические длины четных и нечетных мод СНЛП соответственно,  $n$  – номер гармоники,  $a_{pn}^{oe}$  и  $b_{pn}^{oo}$  – коэффициенты сдвига полюса четной и нечетной гармоники,  $a_{0n}^{oe}$  и  $b_{0n}^{oo}$  – коэффициенты сдвига нуля четной и нечетной гармоники.

На рис. 7 приведена расчетная частотная характеристика звена на СНЛП для условия (11) и зависимость входных сопротивлений четной и нечетной мод от частоты. Из рисунка видно, что при выполнении условия (11) на резонансных частотах 2ГГц и 4ГГц обеспечивается дополнительное затухание.

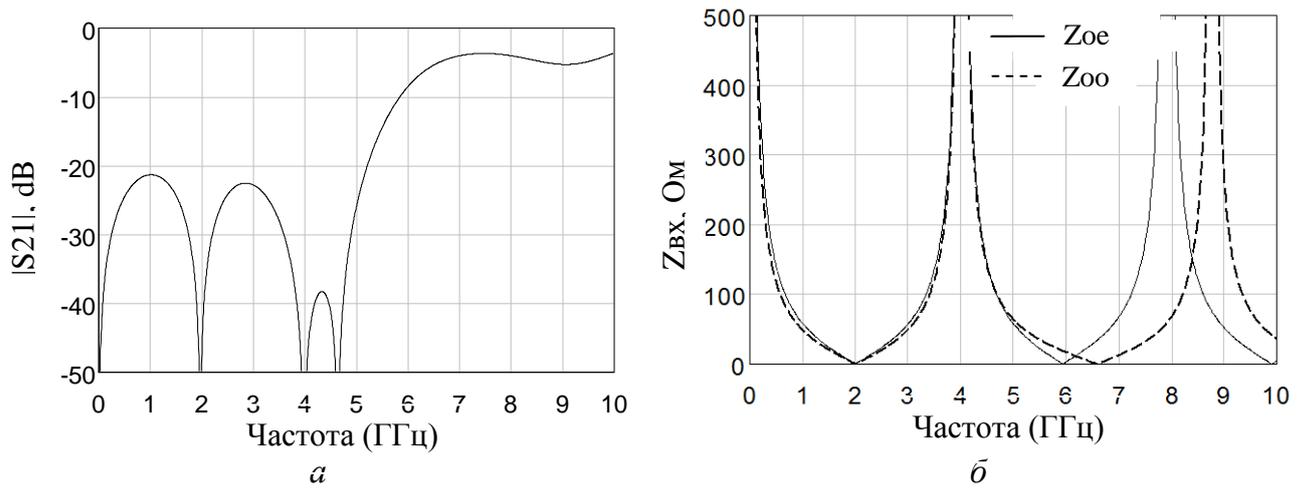


Рисунок 7 – Частотные характеристики звена фильтра решетчатого типа: а) расчетная частотная характеристика звена на СНЛП; б) входные сопротивления четной и нечетной мод

Основываясь на вышесказанных положениях, был спроектирован фильтр нижних частот на секции СНЛП решетчатого типа, с частотой среза 2ГГц. Топология фильтра представлена на рисунке 8.

Матрица проводимости фильтра запишется следующим образом

$$[Y] = [Y'] + [Y''] \quad (13)$$

Коэффициент передачи фильтра  $S_{21}$ :

$$S_{21} = \frac{2Y_{21}}{(1 + Y_{11})(1 - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}} \quad (14)$$

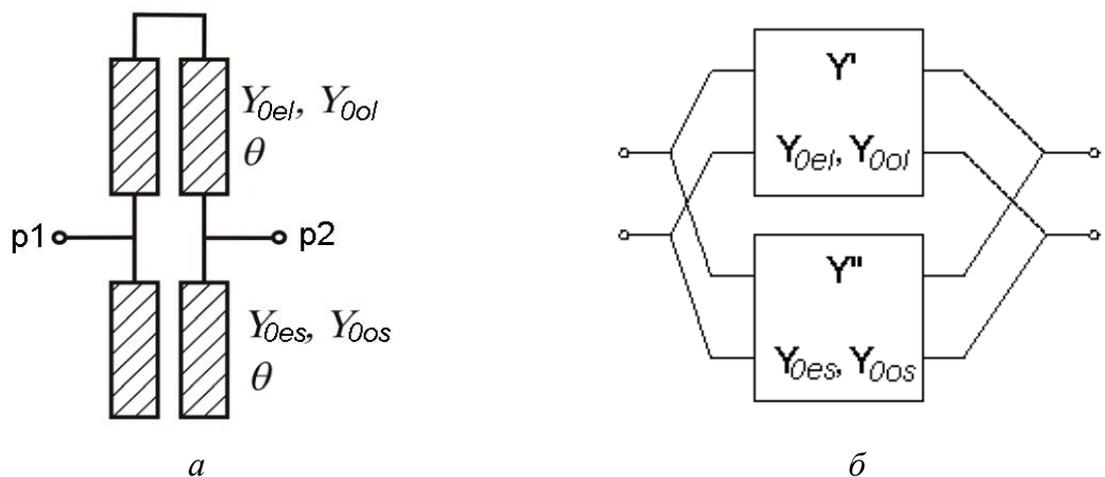


Рисунок 8 – а) структурная схема ФНЧ на связанных линиях передачи, б) матричное представление фильтра

Все нули передачи фильтра могут быть определены из условия  $S_{21}=0$ , откуда из (14)  $Y_{21}=0$ , следовательно, для обеспечения нулей передачи на заданных частотах должно выполняться условие:

$$Y'_{21} = -Y''_{21}, \quad (15)$$

Таким образом, используя связанные плавно-нерегулярные линии передачи в качестве звена решетчатого типа в фильтре (рис. 8а) и условие нулей передачи (15), можно добиться отсутствия паразитных полос пропускания в широком частотном диапазоне.

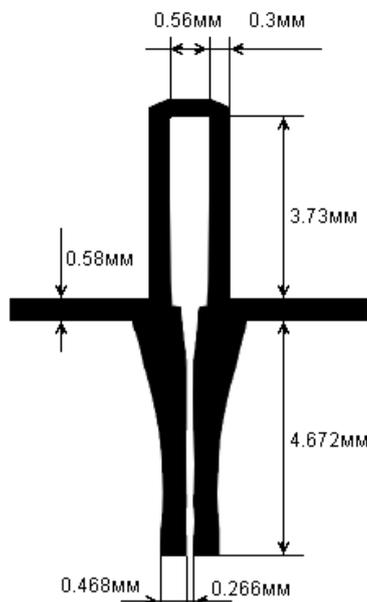
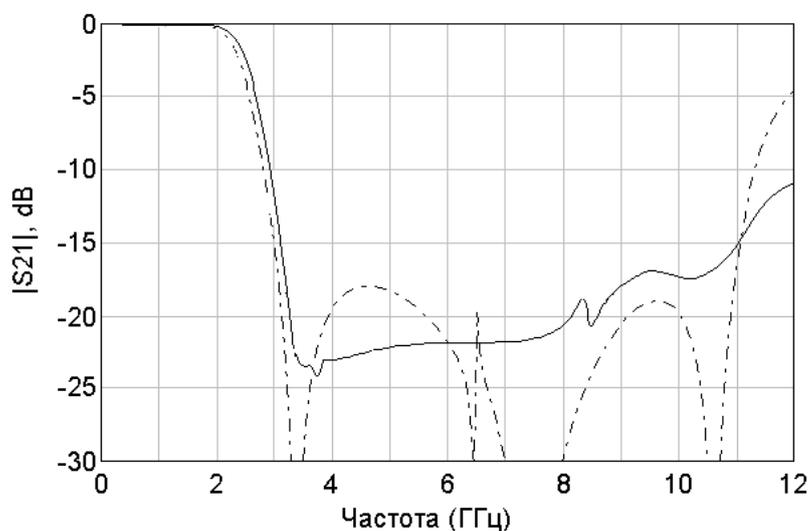


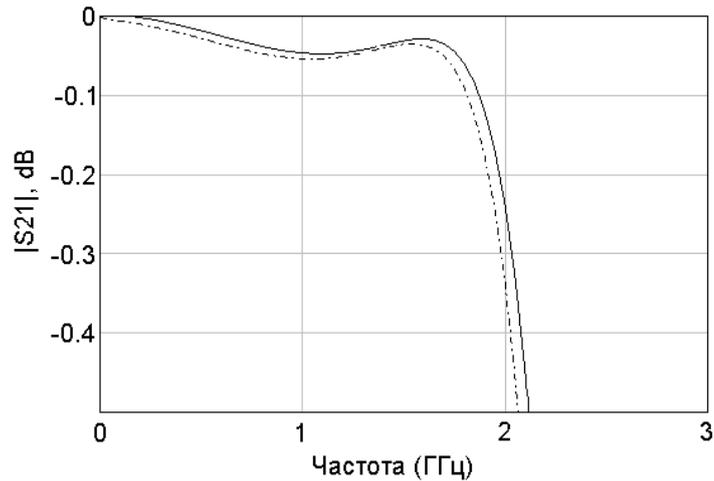
Рисунок 9 – Топология НЧ фильтра на СНЛП

На рис. 9 представлена полная конструкция рассчитанного микрополоскового НЧ-фильтра с геометрическими размерами, а на рис. 10 приведена расчетная АЧХ и АЧХ фильтра, промоделированного в пакете электромагнитного анализа CST Studio.

Анализируя полученную функцию рабочего затухания, можно сделать вывод, что применение СНЛП в структуре фильтра нижних частот (рис. 8а) позволило достигнуть широкой полосы заграждения до 10ГГц при уровне затухания -20дБ.



a)



б)

Рисунок 10 – АЧХ микрополоскового НЧ фильтра: а) амплитудно-частотная характеристика, б) АЧХ в полосе пропускания; штрихпунктирная линия – расчетная характеристика, сплошная линия – ЭМ модель

Таким образом, исследования показали возможность построения фильтров СВЧ с высокой избирательностью на основе применения звеньев с нерегулярной областью связи. Полученные свойства можно использовать в дальнейшем при проектировании высокоизбирательных цепей СВЧ на связанных нерегулярных линиях передачи относительно небольших размеров.

В пятой главе проводятся экспериментальные исследования узкополосного полосно-пропускающего фильтра для высокочувствительных систем измерения.

Для измерительной установки состояний квантовых систем, выполненных на основе трехконтактных потоковых сверхпроводящих квантовых битов, был разработан полосно-пропускающий микрополосковый фильтр на параллельно связанных линиях передачи, комбинированный с нерегулярными линиями. Проектирование ППФ осуществлялось на основании рекомендаций, изложенных в диссертации. Особенности данного фильтра являются широкая полоса заграждения, высокая крутизна АЧХ, малые габаритные размеры и физическая реализуемость плавно-нерегулярных линий. Частота основной гармоники сверхпроводящего осциллятора, связанного с кубитом, составляет 2.5ГГц. Центральная частота полосно-пропускающего фильтра рассчитывается из учета данной резонансной частоты и составляет 2.5ГГц. Данный фильтр был реализован с использованием материала подложки RT/Duroid 6010LM с  $\epsilon_r=10.2$ , толщина подложки  $h=0.64\text{мм}$ , толщина металлизации 17мкм,  $\tan \delta=0.0023$  на частоте 10ГГц (рис. 11).

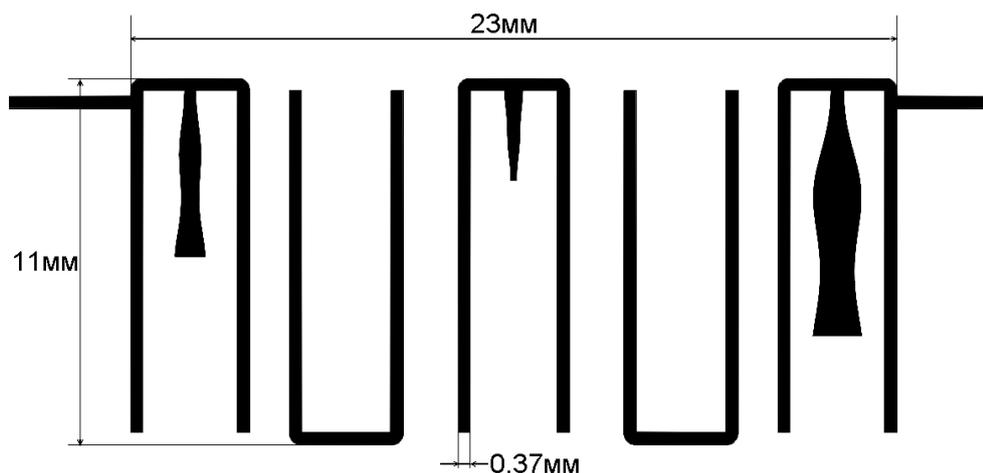


Рисунок 11 – ППФ шпилечного типа с плавно-нерегулярными резонаторами

Были произведены измерения  $S$ -матриц и характеристики входных и выходных импедансов при комнатной температуре и температуре кипения жидкого азота, 77K (рис. 13). Схемы измерений представлены на рисунке 12а и рисунке 12б, соответственно.

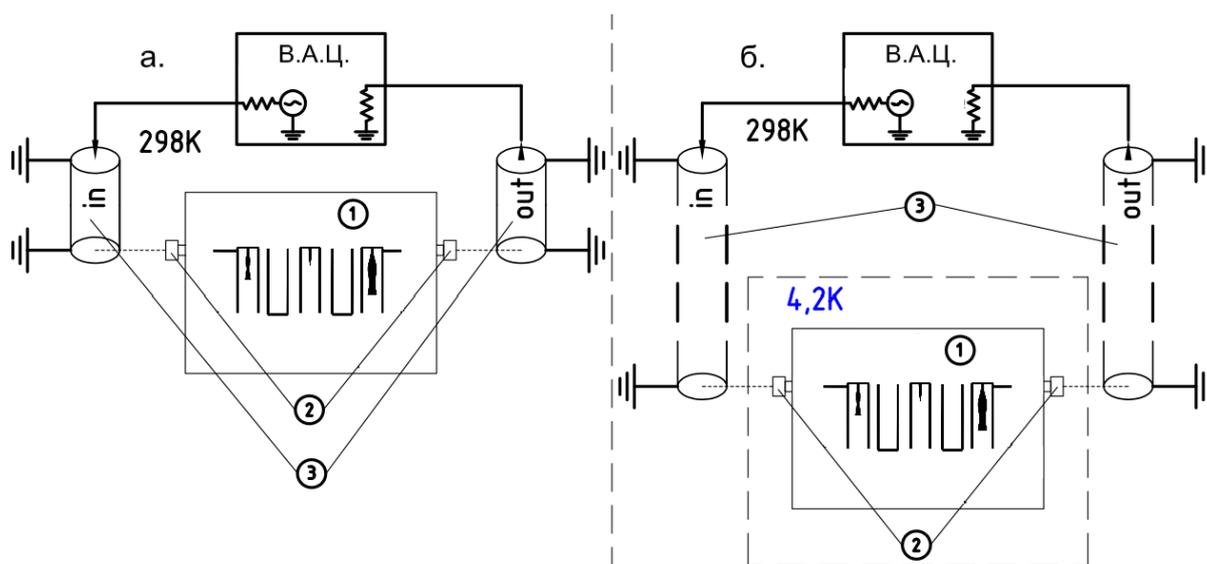


Рисунок 12 – Схема измерений характеристик полосно-пропускающего фильтра шпилечного типа: *а* – комнатная температура, *б* - криогенная температура, 1 - фильтр на подложке, 2 – 50-омные соединяющие разъемы SMA, 3а - гибкий 50-омный коаксиальный кабель, 3б - интегрированный 50-омный коаксиальный кабель в измерительную штангу

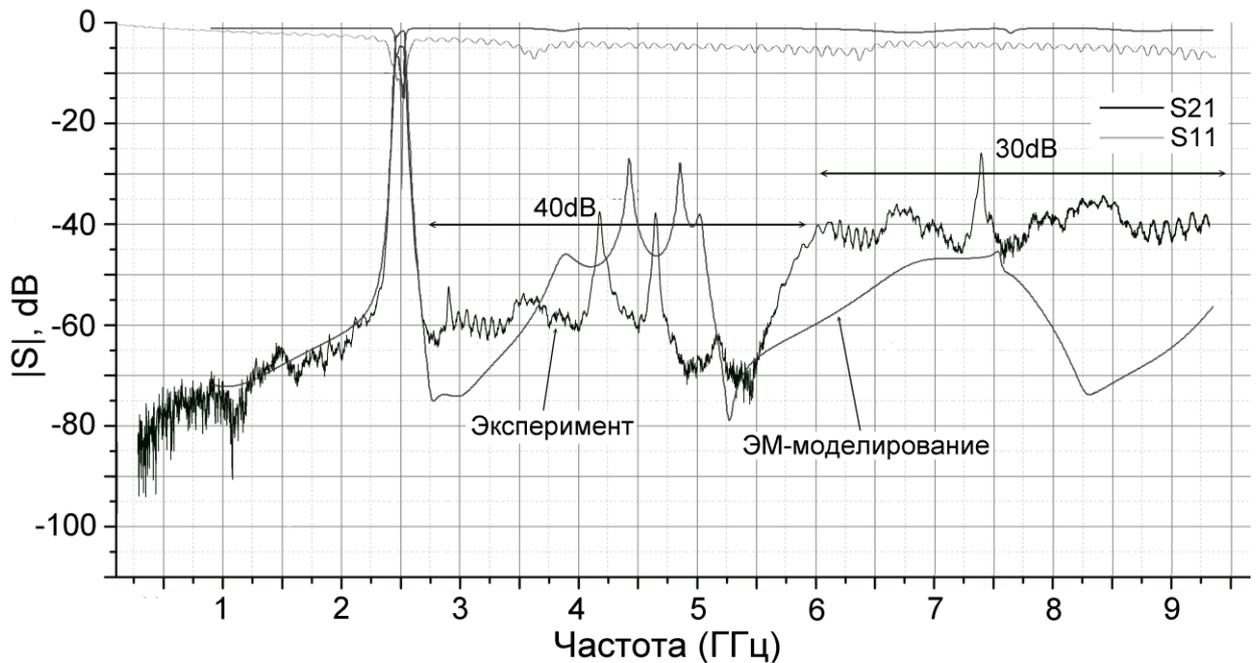


Рисунок 13 – Экспериментально полученные S-параметры полосно-пропускающего фильтра шпилечного типа при комнатной температуре

Для уменьшения потерь в полосе пропускания, применили охлаждение фильтрующей структуры до криогенных температур, компенсируя, к тому же, омические потери в проводящем металле.

Были произведены измерения ППФ шпилечного типа с плавно-нерегулярными линиями при температуре 77К. Передаточная характеристика такого фильтра представлена на рис. 14 и рис. 15.

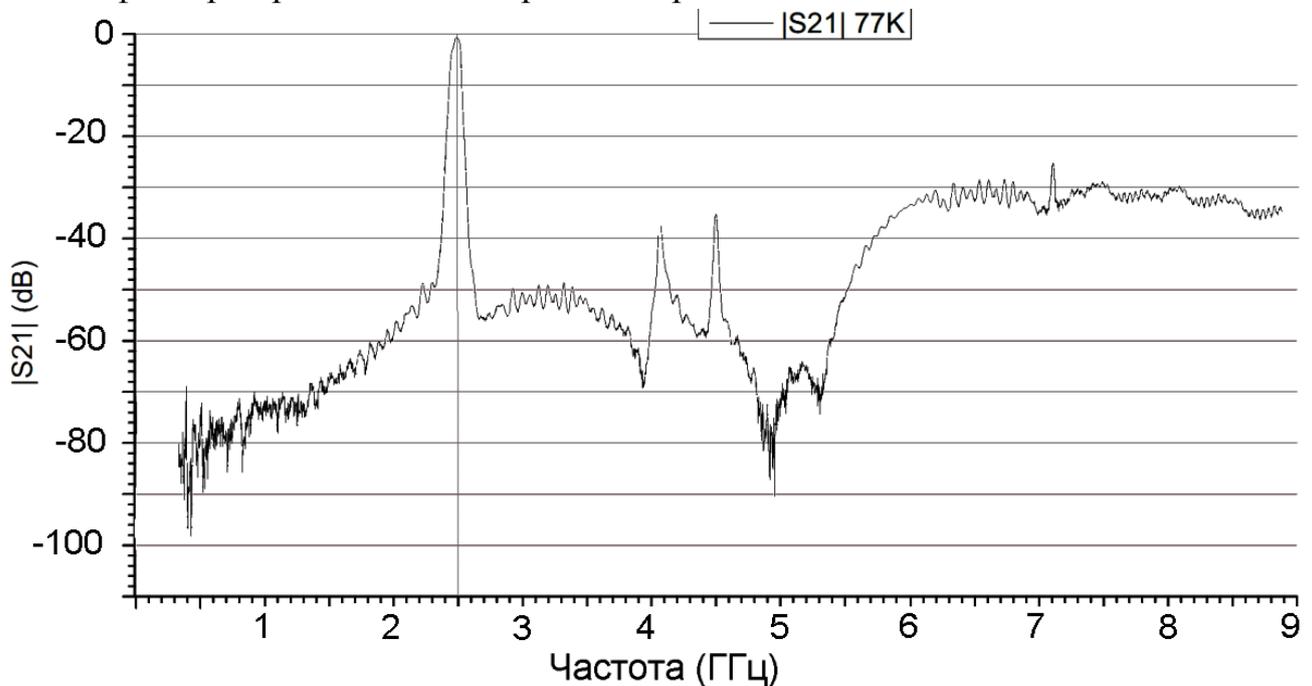


Рисунок 14 – Экспериментально полученные S-параметры полосно-пропускающего фильтра шпилечного типа комбинированного с плавно-нерегулярными линиями при 77К

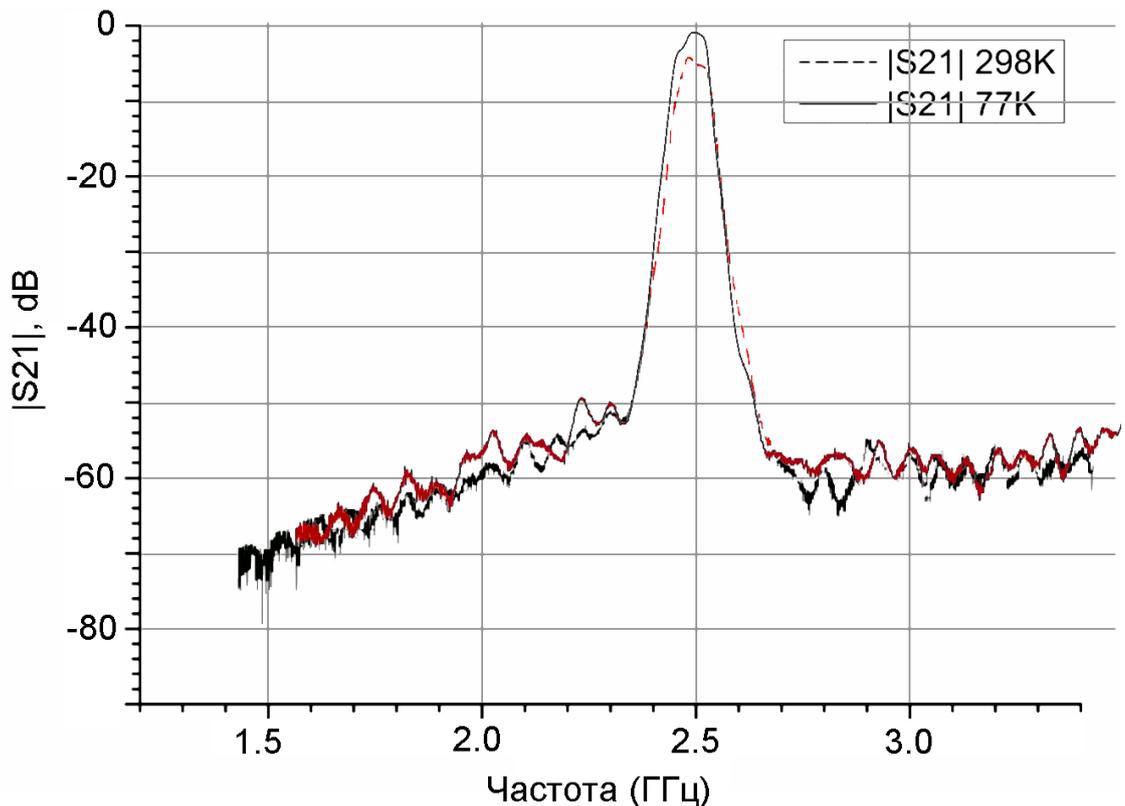


Рисунок 15 – Экспериментально полученные S-параметры полосно-пропускающего фильтра шпилечного типа при комнатной температуре и при 77К

Экспериментальные измерения фильтра подтвердили, что данная комбинированная структура обеспечивает полосу пропускания 100МГц на центральной частоте 2.5ГГц, имеет внеполосное затухание в спектре от 3ГГц до 10ГГц по уровню -30÷-40дБ. Одним из направлений использования данных фильтрующих структур является частотная селекция во входных СВЧ цепях измерения характеристик состояний трехконтактных кубитов, работающих при температурах ниже 50мК на частотах 1-10ГГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выведены уравнения, позволяющие осуществить переход от функции входного сопротивления (проводимости) к интегральному уравнению синтеза волнового сопротивления НЛП для двух типов линий: короткозамкнутой и разомкнутой на конце линии передачи.
2. Реализован численный метод решения интегрального уравнения синтеза волнового сопротивления плавно-нерегулярных линий передачи, адаптированный к решению задач синтеза фильтров СВЧ. Сравнение закона изменения волнового сопротивления, полученного с помощью метода синтеза НЛП по входному сопротивлению, с волновым сопротивлением

КНЛП, рассчитанным по аналитическому выражению, показало максимальное отклонение характеристик не превышающее 0.1%.

3. Определены условия физической реализуемости отрезков плавно-нерегулярных линий передачи. Выведены функциональные зависимости изменения минимального и максимального значения волнового сопротивления короткозамкнутой на конце и разомкнутой на конце плавно-нерегулярной линии передачи от коэффициента сдвига резонансной частоты отрезка линии и номера гармоники. Максимальная ошибка интерполяции изменения максимального и минимального значения волнового сопротивления НЛП от коэффициента сдвига гармоники не превышает 0.5%.
4. Исследованы секции связанных линий передачи гребенчатого и решетчатого типа. Определены условия, при которых обеспечиваются полюса затухания секций гребенчатого и решетчатого типа в микрополосковом исполнении. Получены уравнения для расчета таких секций на связанных плавно-нерегулярных линиях передачи.
5. Разработаны и экспериментально исследованы фильтры нижних частот и полосно-пропускающие фильтры с использованием физически реализуемых плавно-нерегулярных шлейфов. Такие фильтры характеризуются полосой заграждения до 10ГГц и уровнем внеполосного подавления не хуже -30дБ. Такие фильтры позволяют существенно уменьшить влияние шумов высокочувствительных измерительных систем и внешних электромагнитных помех.
5. Исследовано влияние технологических погрешностей изготовления НЛП на смещение резонансных частот. Построены регрессионные характеристики и доказано, что вероятность попадания в доверительный интервал отклонения резонансных частот, равный  $\pm 50$ МГц, составляет 85% при заданных технологических погрешностях.
6. Теоретические и экспериментальные результаты работы применены при проектировании полосно-пропускающих фильтров с плавно-нерегулярными шлейфами для криогенных высокочувствительных систем измерения.

## Основные публикации по материалам диссертации

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Исследование фильтров с широкими полосами заграждения на связанных нерегулярных линиях передачи. Научный вестник НГТУ, – 2008. – № 1 (30). – С. 93-103.
2. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Определение минимального/максимального значения волнового сопротивления нерегулярной линии передачи по заданному спектру линии. Научный вестник НГТУ. – 2009. – №3(36). – С.149-154.
3. Клименко Д.Н., Иванов Б.И. Микрополосковые фильтры шпилечного типа для криогенных высокочувствительных систем измерений. Научный вестник НГТУ. – 2011. – №4(45). – С. 155-160.

### *Публикации в сборниках трудов*

4. Клименко Д.Н. Синтез фильтров с взаимно-противоположным расположением резонансных частот. Materials of the international conference «Agroinfo-2006». Novosibirsk 2006, part 2, p. 245.
5. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Особенности проектирования фильтров с широкой полосой заграждения. Материалы VIII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск, – 2006. – Т. 4. – С. 162-165.
6. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Синтез фильтров гармоник на нерегулярных линиях передачи с широкой полосой заграждения. Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / под ред.: А.И.Громыко, А.В. Сарафанов. – М.: «Радио и Связь». – 2006. – С. 134-137.
7. Клименко Д.Н. Синтез фильтров на резонаторах с взаимно-противоположным распределением собственных частот. Материалы Международной научно-практической конференции «Агроинфо-2006». Россельхозакадемия. Сиб. отделение. Новосибирск. – 2006. – Ч. 2. – С. 175-179.
8. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Использование нерегулярных линий в полосно-пропускающих фильтрах в качестве резонансных элементов. Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. ст. / ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов; – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т; Политехнический институт. – 2007. – С. 246-249.
9. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Определение перепада волнового сопротивления нерегулярной линии передачи по заданному спектру линии. Материалы IX Международной научно-технической конференции “Акту-

альные проблемы электронного приборостроения” (АПЭП-2008) в 7-ми томах, Новосибирск, НГТУ. – 2008. – Т. 4. – С. 111-115.

10. Клименко Д.Н. Вычисление перепада волнового сопротивления плавно-нерегулярных линий передачи. Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред.: А.И. Громыко. - Красноярск: ИПК СФУ. – 2009. – С. 261-263.

11. Клименко Д.Н. Новый компактный НЧ фильтр с широкой полосой заграждения. Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской студенческой конференции молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, – 2009. – Ч. 2. – С.148-150.

12. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Полосно-пропускающий фильтр с широкой полосой заграждения на связанных нерегулярных линиях передачи. Техническая электродинамика и электроника. Сборник научных трудов. СГТУ (Саратов). – 2009. – С. 121-125.

13. Алексеев А.А., Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Способ определения перепада волнового сопротивления нерегулярной линии передачи . Материалы X Международная научно-техническая конференция “Актуальные проблемы электронного приборостроения” (АПЭП-2010) в 7-ми томах, Новосибирск, НГТУ, – 2010. – Т. 4. – С. 126-128.

14. Клименко Д.Н., Плавский Л.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2011611946, Компьютерная программа по синтезу плавно-нерегулярных линий передач «Синтез НЛП». 03.03.2011г.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60 X 84/16, объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.

заказ № \_\_\_\_\_ подписано в печать \_\_\_\_\_ .2012 г.