

На правах рукописи



Фролов Даниил Русланович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ
НЕЛИНЕЙНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ
В РЕЖИМЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2015

Работа выполнена в Кубанском государственном университете.

Научный руководитель: Коротков Константин Станиславович,
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Черкесова Лариса Владимировна,
доктор физико-математических наук,
доцент, Донской государственный
технический университет, доцент кафедры
«Математика и информатика».

Гимпилевич Юрий Борисович,
доктор технических наук, профессор,
Севастопольский государственный
университет, директор Института
радиоэлектроники и информационной
безопасности.

Ведущая организация: Федеральный научно-производственный
центр «Нижегородский научно-
исследовательский приборостроительный
институт «Кварц» имени А.П. Горшкова».

Защита состоится « 5 » февраля 2016 г. в 14-00 час. на заседании
диссертационного совета Д 212.208.10 в Южном федеральном
университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5,
Южный федеральный университет, физический факультет, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной
библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета
по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 21 Ж и на сайте:
<http://hub.sfedu.ru/diss/announcements/council/20/>

Автореферат разослан « » декабря 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.208.10,
доктор физико-математических наук,
профессор



Г.Ф. Заргано

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Диапазон сверхвысоких частот (СВЧ) в настоящее время интенсивно используется для передачи информации различного класса и назначения. При этом наиболее широкое применение получила фазовая модуляция радиосигналов СВЧ, как наиболее помехозащищенная. Фазомодулированные сигналы СВЧ широко применяются в радиофизических исследованиях космических объектов, при создании фазированных антенных решеток для управления и обнаружения различных летательных аппаратов, то есть в системах навигации и радиолокации. Все такие радиофизические системы используют принципы гетеродинного преобразования частоты, которое осуществляется с помощью нелинейных приборов – преобразователей частоты, а они в настоящее время строятся на основе полупроводниковых диодов и транзисторов. Такие полупроводниковые приборы содержат в своем составе емкости в виде р-п-переходов, величины которых, а, следовательно, и комплексное сопротивление этих приборов нелинейно зависят от уровня и частоты сигналов, протекающих через них. Это приводит к тому, что время преобразования электромагнитных колебаний из одного диапазона частот в другой в преобразователях частоты нелинейно зависит от амплитуды и частоты этих колебаний. По этой причине преобразователи частоты могут вносить в фазомодулированные СВЧ-сигналы искажения, которые приводят к повреждению передаваемой информации. Эти искажения могут быть охарактеризованы матрицей рассеяния для конкретного преобразователя частоты, в виде комплексных S-параметров. Но поскольку частоты на входе и выходе преобразователя частоты (СВЧ-смесителя) различны, параметры его матрицы рассеяния невозможно определить стандартными способами, которые применяются для измерения таких параметров у обычных линейных устройств СВЧ, у которых эти частоты равны. Вычисление математическими методами параметров этих матриц рассеяния весьма, проблематично, во-первых, из-за невозможности достаточно точного измерения величины барьерной емкости р-п-перехода на СВЧ, а во-вторых из-за достаточной условности известных эквивалентных схем замещения нелинейных элементов преобразователей частоты.

За рубежом, особенно в США и Германии, исследование и разработка теории и методов определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств в режиме преобразования частоты являются достаточно актуальными вопросами прикладной радиофизики и это подтверждается тем, что почти любой современный импортный измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-устройств (анализатор цепей) содержит опции измерения параметров устройств с преобразованием частоты, и эти опции постоянно совершенствуются. Все современные импортные измерители комплексных параметров СВЧ-смесителей, в том числе и их истинного сдвига фаз, строятся на базе векторных анализаторов цепей. Подобные измерители выпускают фирмы Keysight Technologies (Agilent Technologies), Anritsu, Rohde&Schwarz. В настоящее время все предлагаемые методы определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств основаны на совокупных измерениях. В одних методах параметры испытуемого преобразователя частоты определяются с помощью другого преобразователя частоты в серии измерений, в результате решения системы уравнений. В других методах параметры испытуемого преобразователя частоты определяются с помощью определенных эталонных нагрузок и такие методы основаны на предположении о взаимности испытуемого преобразователя частоты.

Но известные методы таких измерений обладают суммарными погрешностями значительно большими, чем у методов определения параметров матриц рассеяния СВЧ-устройств без преобразования частоты. Это происходит потому, что при определении параметров устройств СВЧ с преобразованием частоты возникает особый тип дополнительных погрешностей: амплитудно-фазовая конверсия, возникающая за счет нелинейной зависимости барьерной емкости полупроводниковых приборов от амплитуды прикладываемого напряжения, а также возникают дополнительные погрешности рассогласований за счет соединений и переключений в трактах, необходимых для реализации режимов совокупных измерений. Несмотря на то, что сами по себе эти типы погрешностей изучены достаточно подробно в работах Крылова Г. М., Фельдштейна А. Л., Абубакирова Б. А., Dunsmore, J., Rytting, D. и других исследователей, методы их устранения и компенсации, применительно к определению параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств с

преобразованием частоты, изучены недостаточно. Изложенные проблемы возникновения ошибок при определении параметров матриц рассеяния нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты делают актуальной задачу поиска путей и возможностей их снижения.

ОБЪЕКТОМ ИССЛЕДОВАНИЯ является процесс трансформации электромагнитных волн в нелинейных устройствах СВЧ.

ПРЕДМЕТОМ ИССЛЕДОВАНИЯ являются изменения амплитуды и фазы электромагнитных колебаний, возникающие в нелинейных СВЧ-устройствах в режиме преобразования частоты колебаний.

ЦЕЛЮ ИССЛЕДОВАНИЯ является создание и теоретическое обоснование новых методик снижения ошибок определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **ЗАДАЧИ**:

1 Провести исследования физических процессов, протекающих в нелинейных СВЧ-устройствах, работающих в режиме преобразования частоты, при определении их параметров различными известными методами.

2 Построить общую физико-математическую модель определения элементов матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств, работающих в режиме преобразования частоты. С её помощью получить аналитические выражения, позволяющие рассчитать пределы динамического диапазона таких измерений и оценить величины погрешностей каждого из рассмотренных методов.

3 Исследовать возможности применения теории X-параметров для анализа нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты.

4 Разработать физико-математическую модель определения амплитудно-фазовых погрешностей нелинейных СВЧ-устройств, работающих в режиме преобразования частоты.

5 На базе полученных физико-математических моделей и их анализа сформулировать новое решение метрологической задачи определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств, работающих в режимах преобразования частоты.

6 На базе нового решения задачи определения параметров нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты разработать новую методику увеличения точности векторных анализаторов цепей.

7 Провести экспериментальные исследования метрологических возможностей предложенного решения задачи определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств в режимах преобразования частоты для подтверждения достоверности полученных результатов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА:

1 Впервые проведен подробный сравнительный теоретический анализ всех известных на сегодняшний день методов определения элементов матриц рассеяния СВЧ-смесителей. Для каждого из проанализированных методов получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать пределы динамического диапазона измерений.

2 Предложена новая методика определения амплитудно-фазовых погрешностей нелинейных устройств СВЧ, работающих в режиме преобразования частоты.

3 Предложена новая методика снижения погрешностей измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения устройств СВЧ.

4 Предложена новая методика определения истинных значений фазовых сдвигов и модулей коэффициентов передачи СВЧ-смесителей и преобразователей частоты

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ:

1 Полученные выражения для погрешностей измерений и разработанные направленные графы методов определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-преобразователей частоты, а также методики снижения этих погрешностей, созданные в процессе исследований, могут быть использованы при разработке первых отечественных приборов для измерения комплексных параметров нелинейных СВЧ-устройств.

2 В результате выполнения работы был создан действующий макет измерителя комплексных коэффициентов передачи СВЧ-смесителей, основанный на использовании стандартного векторного анализатора цепей и двухканального супергетеродинного приемника, в котором исключены погрешности переключений и учтены

амплитудно-фазовые погрешности. С его помощью экспериментально подтверждена возможность физической реализации разработанных новых методов измерений.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1 Результаты исследований по поиску оптимальных (по критерию точности) методик определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты.

2 Физико-математический анализ причин, ограничивающих динамический диапазон измерения и точность определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты.

3 Новая методика определения элементов матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств, работающих в режиме конверсии частоты и её метрологические возможности.

4 Новая методика определения амплитудно-фазовой погрешности, возникающей в полупроводниковом нелинейном элементе СВЧ-устройства с преобразованием частоты.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты исследований докладывались на:

– международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», с. Дивноморское, 24–28 июня 2013 г.;

– 23-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 8 – 14 сентября 2013г.;

– североамериканской конференции по ускорителям частиц «North American Particle Accelerator Conference (NAPAC'13)», г. Пасадена, Калифорния, США, 29 сентября – 4 октября 2013 г.;

– XII Международной научно-практической конференции «Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2013», г. Москва, 28 – 29 ноября 2013 г.;

– специальном семинаре ФГУП «ВНИИФТРИ» «Измерение параметров СВЧ-устройств с преобразованием частоты», проведенном в соответствии с поручением Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, г. Менделеево, 21 ноября 2013 г.;

– X Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014», г. Севастополь, 12 – 17 мая 2014 г.;

– 24-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 7 – 13 сентября 2014 г.

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе три в изданиях, включенных в перечень ВАК. Полученные результаты исследований защищены четырьмя патентами Российской Федерации на изобретение, один из которых получен соискателем лично, без соавторов.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка литературы из 93 наименований и двух приложений. Общий объем диссертации – 167 страниц, включая 34 рисунка, 162 формулы и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

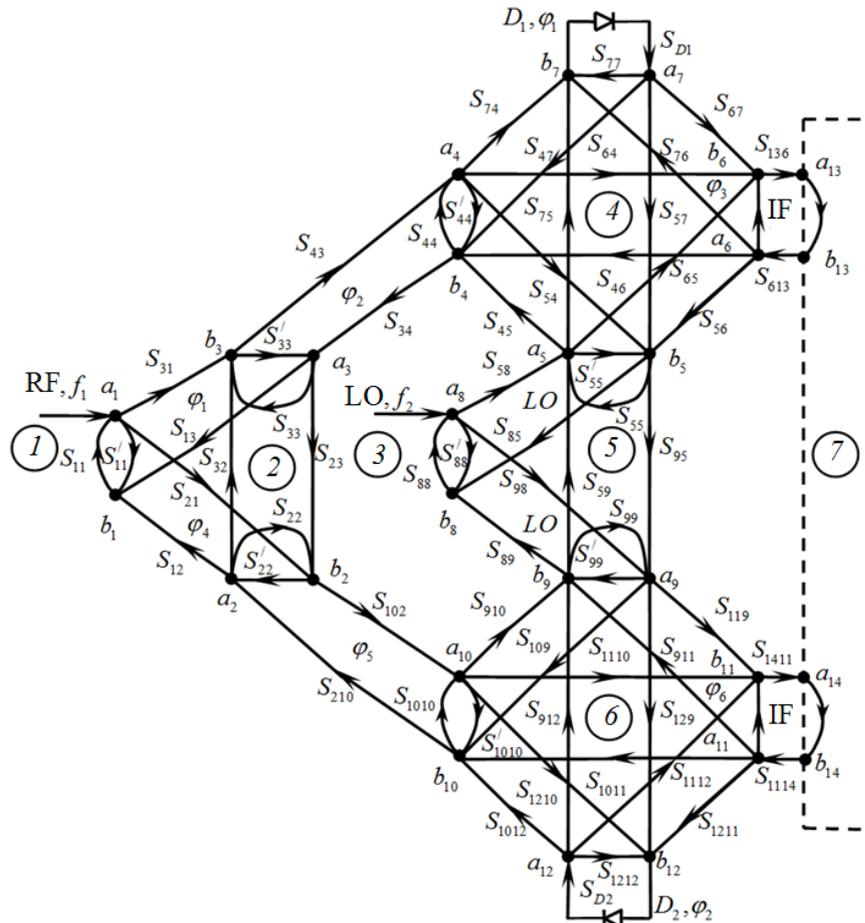
Во введении дано обоснование актуальности диссертации, изложена степень разработанности темы, определены цели и задачи работы, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных в работе результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена апробация результатов работы.

Первый раздел посвящен разработке физико-математической модели, необходимой для поиска путей снижения ошибок, возникающих при определении параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты.

В параграфе 1.1 даны определения основным терминам, которые используются в работе, таким как преобразователь частоты, четырехполюсник с преобразованием частоты, модуль комплексного коэффициента передачи нелинейного элемента, истинный сдвиг фаз нелинейного элемента, относительный сдвиг фаз нелинейного элемента и др.

В параграфе 1.2 проведен физико-математический анализ метода определения параметров матрицы рассеяния преобразователя частоты (СВЧ-смесителя), основанного на измерении суммы и разности комплексных параметров двух СВЧ-смесителей, один из которых испытуемый, а другой – вспомогательный, с последующим математическим определением параметров матрицы рассеяния

каждого из них (метод суммы и разности). Один из разработанных в ходе анализа графов для этого метода представлен на рисунке 1.



1 – генератор СВЧ-сигналов; 2, 5 – делители СВЧ-сигналов; 3 – СВЧ-гетеродин; 4, 6 – испытуемый и вспомогательный СВЧ-смесители; 7 – векторный вольтметр

Рисунок 1 – Граф измерения разности параметров двух СВЧ-смесителей

В результате анализа получены выражения для погрешностей определения модуля коэффициента передачи (1) и истинного сдвига фаз (2) испытуемого СВЧ-смесителя:

$$\delta S = \sqrt{\frac{\delta S_{\Delta}^2 \Sigma S^2}{4 \Delta S} + \frac{\delta S_{\Sigma}^2 \Delta S^2}{4 \Sigma S}} \quad , \quad (1)$$

$$\delta \varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \arcsin \left[\frac{\delta S}{S_u} \right] + n \delta \varphi_{СВЧ} + m \delta \varphi_{ПЧ} \quad , \quad (2)$$

где: δS_{Δ} – абсолютная погрешность измерения разности параметров двух СВЧ-смесителей; δS_{Σ} – абсолютная погрешность измерения суммы параметров двух СВЧ-смесителей; ΔS – измеренная разность потерь преобразования двух СВЧ-смесителей по методу суммы и разности; ΣS – измеренная сумма потерь преобразования двух СВЧ-смесителей по методу суммы и разности; $\delta\varphi_{СВЧ}$ – нестабильность сдвига фаз при СВЧ-соединениях; $\delta\varphi_{ПЧ}$ – нестабильность сдвига фаз при ПЧ (промежуточная частота) соединениях; n – число циклов соединения-разъединения в трактах СВЧ во всем методе; $n \geq 1$, m – число циклов соединения-разъединения в трактах ПЧ во всем методе; $m \geq 1$, S_u – измеренные по методу суммы и разности потери преобразования.

Выводы к первому разделу.

1 На основе теории сигнальных графов построена физико-математическая модель, описывающая пути распространения СВЧ-сигналов в основных двух схемах, применяемых при измерениях параметров нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты – в схеме последовательного соединения СВЧ-смесителей и в схеме параллельного соединения СВЧ-смесителей. Данная модель может быть использована для анализа любого из методов определения комплексных коэффициентов передачи и отражения испытываемых нелинейных СВЧ-устройств, основанных на совокупных измерениях.

2 Получены математические выражения для расчета пределов измерения модуля и погрешностей определения истинного сдвига фаз комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты. Установлены причины, влияющие на точность таких измерений.

3 Проведенный анализ показывает, что основными составляющими погрешностей измерения фазы в схемах, использующих последовательное и параллельное соединение СВЧ-смесителей, являются паразитные каналы приема промежуточной частоты и нестабильность фазовых сдвигов при СВЧ-переключениях. Пропускание паразитных каналов приема полностью определяется развязками используемых делителей и развязками опорного СВЧ-смесителя. С ростом промежуточной частоты, погрешности, как по амплитуде, так и по фазе, увеличиваются.

4 Предложены пути улучшения метрологических возможностей схем измерения суммы и разности комплексных параметров двух СВЧ-устройств, содержащих гетеродинное преобразование частоты на основе СВЧ-смесителей.

Второй раздел посвящен исследованию и поиску источников погрешностей, возникающих при определении параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты различными методами.

В параграфе 2.1 проведен анализ метода определения модуля коэффициента передачи и истинного сдвига фаз испытуемого преобразователя частоты (СВЧ-смесителя), основанного на измерении суммы параметров трех преобразователей частоты – одного испытуемого и двух вспомогательных, присоединенных попарно в разных вариантах к измерительным портам двухканального векторного анализатора цепей (метод трех сумм). В результате анализа получены выражения для погрешностей определения модуля коэффициента передачи (3) и истинного сдвига фаз (4) испытуемого преобразователя частоты этим методом.

$$\delta S_{11} = \sqrt{\left[\frac{\sum S_2 \delta \sum S_1}{2 \sum S_3 S_{11}} \right]^2 + \left[\frac{\sum S_1 \delta \sum S_1}{2 \sum S_3 S_{11}} \right]^2 + \left[\frac{\sum S_1 \sum S_2 \delta \sum S_3}{2 (\sum S_3)^2 S_{11}} \right]^2}, \quad (3)$$

$$\delta \varphi_{11} = \frac{180^\circ}{\pi} \arcsin \left[\frac{\delta S_{11}}{S_{11}} \right] + n \delta \varphi_{СВЧ} + m \delta \varphi_{ПЧ}, \quad (4)$$

где: S_{11} – измеренный по методу трех сумм модуль коэффициента передачи испытуемого СВЧ-смесителя; $\sum S_{1-3}$ – измеренные суммарные модули коэффициентов передачи трех пар СВЧ-смесителей (по методу трех сумм); $\delta \sum S_{1-3}$ – абсолютные погрешности по амплитуде векторного анализатора цепей; $n \geq 4$ – количество циклов соединений на СВЧ во всем методе; $m \geq 2$ – количество циклов соединений на ПЧ во всем методе; $\delta \varphi_{СВЧ}$ – нестабильность фазового сдвига на СВЧ; $\delta \varphi_{ПЧ}$ – нестабильность фазового сдвига на ПЧ.

В параграфе 2.2 проведен анализ метода определения фазы (аргумента) комплексного коэффициента передачи испытуемого преобразователя частоты методом, основанном на измерении комплексного коэффициента отражения от входа испытуемого преобразователя частоты, к выходу которого присоединяется рассогласованная нагрузка, по известным значениям её комплексного

коэффициента отражения (метод отражений) и получено выражение для погрешности измерения фазы комплексного коэффициента передачи испытуемого СВЧ-смесителя:

$$\delta\varphi_6 = \frac{\delta\varphi_u + 2\delta\varphi_8 + \delta\varphi_9}{2} + \left| \Delta\varphi_0(\Delta I_{PP}^{ПД}) - \Delta\varphi_0(\Delta I_{PP}^{ОТР}) \right|, \quad (5)$$

где: $\delta\varphi_u$ – абсолютная погрешность векторного анализатора цепей;

$\delta\varphi_8, \delta\varphi_9$ – погрешности определения сдвига фаз линии задержки и рассогласованной нагрузки соответственно (по методу отражений); $\Delta\varphi_0(\Delta I_{PP}^{ПД})$ и $\Delta\varphi_0(\Delta I_{PP}^{ОТР})$ – функции амплитудно-фазовой погрешности испытуемого смесителя.

В параграфе 2.3 проведен анализ возможностей применения теории X-параметров для определения параметров матриц рассеяния СВЧ-устройств в общем и преобразователей частоты (СВЧ-смесителей) в частности. Анализ проведен методом направленных графов. В результате анализа получены выражения для амплитудной (6) и фазовой (7) погрешностей определения комплексного коэффициента передачи испытуемых преобразователей частоты.

$$\delta^5 X_{22,11}^{(S,T)} = \left\{ \left[\frac{{}^4 X_{2n}^{(F)}}{\Delta U_m \cdot {}^4 X_{2m}^{(F)}} \right]^2 (\delta \Delta U_n^{(1,2)})^2 + \left[\frac{\Delta U_n^{(1,2)}}{\Delta U_m \cdot {}^4 X_{2m}^{(F)}} \right]^2 (\delta \Delta^4 X_{2n}^{(F)})^2 + \dots \right\} \times$$

$$\times \left\{ \dots + \left[\frac{\Delta U_n^{(1,2)} \cdot {}^4 X_{2n}^{(F)}}{[\Delta U_m]^2 \cdot {}^4 X_{2m}^{(F)}} \right]^2 (\delta \Delta U_m)^2 + \left[\frac{\Delta U_n^{(1,2)} \cdot {}^4 X_{2n}^{(F)}}{\Delta U_m \cdot [{}^4 X_{2m}^{(F)}]^2} \right]^2 (\delta^4 X_{2m}^{(F)})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\delta\varphi_n^{(S,T)} = \delta\Delta\varphi_n^{(1,2)} + \delta\Delta\varphi_m + \delta\varphi_n^{(4)} + \delta\varphi_m^{(4)} \quad (7)$$

В выражениях (6), (7) коэффициенты $\delta\Delta U_n^{(1,2)}$; ΔU_m ; $\delta\Delta\varphi_n^{(1,2)}$ и $\delta\Delta\varphi_m$ являются аппаратными погрешностями векторного вольтметра нелинейного анализатора цепей. Погрешности $\delta^4 X_{2m}^{(F)}$; $\delta\varphi_n^{(4)}$; $\delta\varphi_m^{(4)}$ принадлежат генератору комбинационных частот – опорному генератору, который применяется при фазовой калибровке нелинейного анализатора цепей.

Проведенный анализ показал, что применение теории X-параметров для определения аргументов комплексных параметров матрицы рассеяния преобразователей частоты позволяет, по сути дела, определить только относительные значения этих величин, которые

измеряются относительно специального генератора гармоник, применяемого в качестве эталона фазовых сдвигов.

В параграфе 2.4 получены выражения для амплитудно-фазовых погрешностей, обусловленных неравномерностью амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) различных делителей сигналов СВЧ и трактов, применяемых в измерительном фазовом мосте в методе суммы и разности, и методе трех сумм.

Выводы ко второму разделу.

1 Проведен анализ возможных способов определения модуля и фазы комплексных коэффициентов передачи нелинейных СВЧ-устройств, содержащих преобразование частоты. Установлено, что, при прочих равных условиях, погрешности по фазе, за счет ограничения динамического диапазона, у метода суммы и разности и метода трех сумм соизмеримы. Однако, из-за большего количества переключений в СВЧ-трактах, метод трех сумм уступает методу суммы и разности по точности, за счет более высокой погрешности рассогласования.

2 Основной погрешностью метода отражения является амплитудно-фазовая погрешность, обусловленная различными уровнями падающего и отраженного сигналов, проходящих через испытуемый СВЧ-смеситель. Получены выражения, позволяющие учесть эту погрешность, которая начинает резко увеличиваться, если потери преобразования испытуемого смесителя превышают 10 дБ.

3 Метод определения параметров СВЧ-смесителей при помощи анализатора нелинейных цепей на основе X-параметров фактически основан на сравнении сдвига фаз испытуемого смесителя со сдвигом фаз эталонного генератора гармоник. Данный генератор, по сути, является эталонным смесителем, и его параметры должны быть заранее рассчитаны либо измерены другим методом. Получены выражения для определения погрешности измерений методом X-параметров.

4 На основании изложенного можно сделать вывод, что наиболее универсальным и точным является метод суммы и разности, и его следует рассматривать как основу при построении нового устройства для измерения параметров СВЧ-смесителей.

5 Проанализированы различные источники дополнительных погрешностей, которые имеют место при измерении комплексных коэффициентов передачи СВЧ-смесителей. На основании

проведенного анализа можно сделать вывод, что в большинстве случаев такие погрешности являются амплитудно-зависимыми.

6 Наиболее существенными являются амплитудно-фазовые погрешности, которые вызываются нестабильностью амплитуды гетеродинных сигналов, подаваемых на испытуемый и опорный смесители при их соединении в схеме измерительного фазового моста. Для их снижения необходимо обеспечивать постоянный уровень мощности гетеродинного сигнала на портах смесителей. Этого можно добиться путем применения систем автоматической регулировки усиления в плечах делителей гетеродинных сигналов, однако наличие нелинейной фазочастотной характеристики (ФЧХ) у подобных усилителей существенно снижает их преимущества. По этой причине, наиболее выгодным выглядит путь измерения амплитудно-фазовых погрешностей для их последующей компенсации.

7 Для каждого типа рассмотренных погрешностей получены аналитические выражения, позволяющие оценить их величины. Эти выражения могут быть использованы для корректировки полученных в первом разделе выражений для погрешностей определения истинного сдвига фаз испытуемого нелинейного СВЧ-устройства с преобразованием частоты методом суммы и разности или выражений для метода трех сумм из второго раздела.

В третьем разделе приводится описание новой методики определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств, работающих в режиме преобразования частоты, созданной на основе вышеприведённых теоретических исследований и рассмотрено её прикладное применение для увеличения точности векторных анализаторов цепей и измерения амплитудно-фазовой погрешности.

В параграфе 3.1 предложена и рассмотрена новая методика измерения амплитудно-фазовой погрешности, возникающей в преобразователе частоты, как дополнение к истинному фазовому сдвигу, который он вносит в сигнал при конверсии частоты. Для этого используется выражение (8), позволяющее рассчитывать зависимость амплитудно-фазовой погрешности φ от изменения прямого тока через смесительный диод I_{np} .

$$\varphi = I_{np} 2\pi f_0 C_{\Sigma} \phi_T / (I_{np}^2 + 4\pi^2 f_0^2 C_{\Sigma}^2 \phi_T^2) \quad (8)$$

где: f_0 - частота испытательного СВЧ-сигнала, C_Σ - суммарная емкость перехода диода, определяемая по формуле $tg\phi_0 = -2\pi f_0 r_\delta C_\Sigma$, где r_δ - динамическое сопротивление диода, определяемое по формуле $e^{U/\phi_T} I_0 / \phi_T = r_\delta^{-1}$, ϕ_0 - измеренный сдвиг фаз преобразователя частоты, $I_{np} = I_0 (e^{U/\phi_T} - 1)$ - прямой ток смесительного диода, I_0 - ток неосновных носителей заряда в р-п переходе; $\phi_T = \frac{kT}{e}$ - термический потенциал, в котором e - заряд электрона; k - постоянная Больцмана; T - температура по Кельвину; U - напряжение, приложенное к р-п переходу.

В параграфе 3.2 рассматривается новая методика определения комплексных параметров СВЧ-устройств с преобразованием частоты, в основу которой положен принцип измерения модуля и фазы комплексных коэффициентов передачи пары таких устройств с помощью векторного анализатора цепей и двухканального супергетеродинного приемника, что устраняет ошибку измерений за счет переключений в трактах диапазона СВЧ. Структурная схема реализации этой методики изображена на рисунке 2.

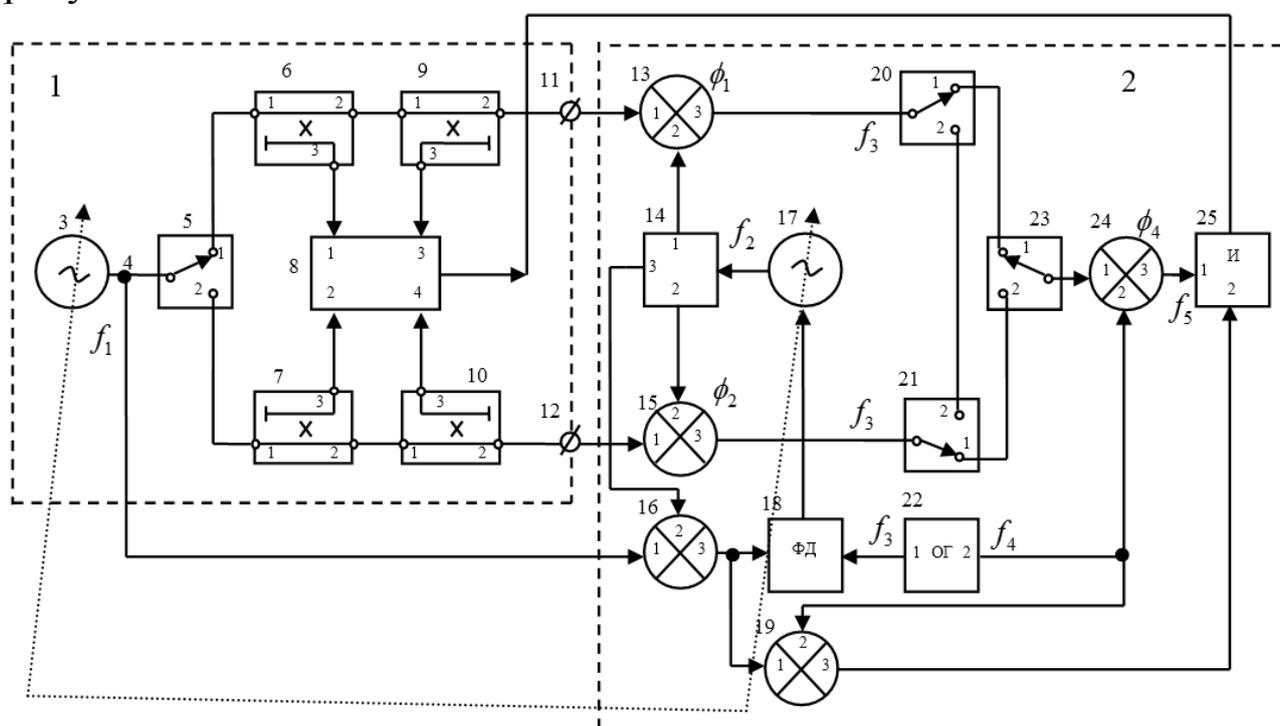


Рисунок 2 – Структурная схема определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты

Схема состоит из векторного анализатора цепей 1 и двухканального супергетеродинного приемника 2. Векторный анализатор цепей построен по стандартной схеме и содержит генератор испытательных СВЧ-сигналов 3 с частотой f_1 , СВЧ-делитель 4, переключатель 5, два рефлектометра состоящих из двух пар встречно включенных направленных ответвителей (НО) 6,9 и 7,10 и векторного вольтметра 8 к входам 1,2,3,4 которого присоединены выходы вторичных каналов НО. К выходным разъемам 11 и 12 анализатора цепей 2 присоединены первыми сигнальными входами испытуемый СВЧ-смеситель 13 и вспомогательный СВЧ-смеситель 15, на вторые гетеродинные входы которых через делитель 14 поступает сигнал с частотой f_2 от СВЧ-генератора 17 через разветвитель 14. Образовавшийся в них разностный сигнал первой промежуточной частоты $f_3 = f_1 - f_2$ через систему низкочастотных переключателей 20, 21, 23 поступает на первый вход смесителя 24, на второй вход которого поступает сигнал от генератора опорных частот 22 с частотой $f_4 = f_3 + \Delta f$, сдвинутой на постоянную составляющую величину Δf , относительно вырабатываемого этим генератором сигнала первой промежуточной частоты f_3 , стабилизированной кварцевым резонатором. Полученный сигнал, как разность частот $f_5 = \Delta f$ с третьего выхода смесителя 24 приходит на один из входов компаратора 25, где сравнивается по амплитуде и фазе с сигналом с частотой f_5 , который поступает с третьего выхода опорного смесителя промежуточной частоты 10. Данный сигнал f_5 образуется в смесителе 10 как разность частот когерентных сигналов, поступающих на него со второго выхода генератора опорных частот 22, с частотой f_4 и смесителя фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) 16, на входы которого поступают сигналы от генератора испытательных СВЧ-сигналов 3 с частотой f_1 и СВЧ-генератора 17, с частотой f_2 . Образовавшийся сигнал разностной первой промежуточной частоты f_3 с третьего выхода смесителя ФАПЧ 16 попадает на один из входов фазового детектора 18, на другой вход которого подает опорный сигнал с частотой f_3 из генератора опорных частот 22. Сигнал ошибки с выхода фазового детектора 18 управляет частотой СВЧ-генератора 17 так, что разность частот $(f_1 - f_2)$ с точностью до фазы

поддерживается постоянной и равной частоте f_3 , которая с помощью генератора опорных частот 22 может быть выбрана любой.

Измерения проводят следующим образом. Переключатели 20 и 21 переводят во второе положение их подвижных контактов, переключатель 5 переводится в первое положение. С помощью векторного анализатора цепей измеряется сумма сдвигов фаз ϕ_Σ испытуемого СВЧ-смесителя 13 ϕ_1 и вспомогательного СВЧ-смесителя 15 ϕ_2 , равная $\phi_\Sigma = \phi_1 + \phi_2$. Значение ϕ_Σ из векторного вольтметра 8 передается в память компаратора 25. Затем подвижные контакты переключателей 20 и 21 переводят в первое положение. После этого переключатель 23 переводят в первое положение и измеряют суммарный сдвиг сигнала f_5 , который равен $\phi_{\Sigma 1} = \phi_1 + \phi_4$, где ϕ_4 - сдвиг фаз, вносимый СВЧ-смесителем 24, путем сравнения его в компараторе 25 с сигналом f_5 , поступающим от опорного смесителя 19. Значение $\phi_{\Sigma 1}$ записывается в память компаратора 25. Затем переключатель 23 и переключатель 5 переводят во второе положение и аналогичным образом получают в компараторе 25 значение сдвига фаз $\phi_{\Sigma 2} = \phi_2 + \phi_4$. Производя в компараторе 25 вычитание полученных ранее значений $\phi_{\Sigma 1}$, $\phi_{\Sigma 2}$, получают значение разности $\phi_\Delta = \phi_{\Sigma 1} - \phi_{\Sigma 2} = \phi_1 + \phi_4 - (\phi_2 + \phi_4) = \phi_1 - \phi_2$ сдвигов фаз испытуемого СВЧ-смесителя 13 ϕ_1 и вспомогательного СВЧ-смесителя 15 ϕ_2 . По методу двух смесителей, решая в компараторе 25 систему уравнений: $\phi_\Sigma = \phi_1 + \phi_2$; $\phi_\Delta = \phi_1 - \phi_2$, находят истинный фазовый сдвиг (аргумент комплексного коэффициента передачи) испытуемого СВЧ-смесителя 13 в виде: $\phi_1 = 0,5(\Sigma\phi + \Delta\phi)$. Измерение модуля коэффициентов передачи (потерь преобразования) осуществляется аналогично измерению фазовых сдвигов.

Перенос режима переключений для реализации измерения суммы и разности сдвигов фаз испытуемого и вспомогательного СВЧ-смесителей в диапазон первой промежуточной частоты f_3 полностью исключает влияние электрических параметров переключателей на погрешности измерений.

С помощью макета измерительного прибора, построенного по структурной схеме, приведенной на рисунке 2, проведены экспериментальные измерения параметров испытуемого

преобразователя частоты, выполненного на смесительном диоде типа 3A123 в диапазоне 8–12 ГГц, которые полностью подтверждают выводы, полученные в диссертационной работе, отдельные наиболее характерные результаты которых приведены на рисунках 3, 4 и 5.

На рисунке 3 представлена измеренная нелинейная составляющая истинного сдвига фаз испытуемого СВЧ-смесителя (сплошная линия) и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) входа смесителя (пунктирная линия). Мощность сигнала гетеродина 8 мВт, мощность входного СВЧ-сигнала 10 мкВт, диапазон рабочих частот 8,73–10,5 ГГц.

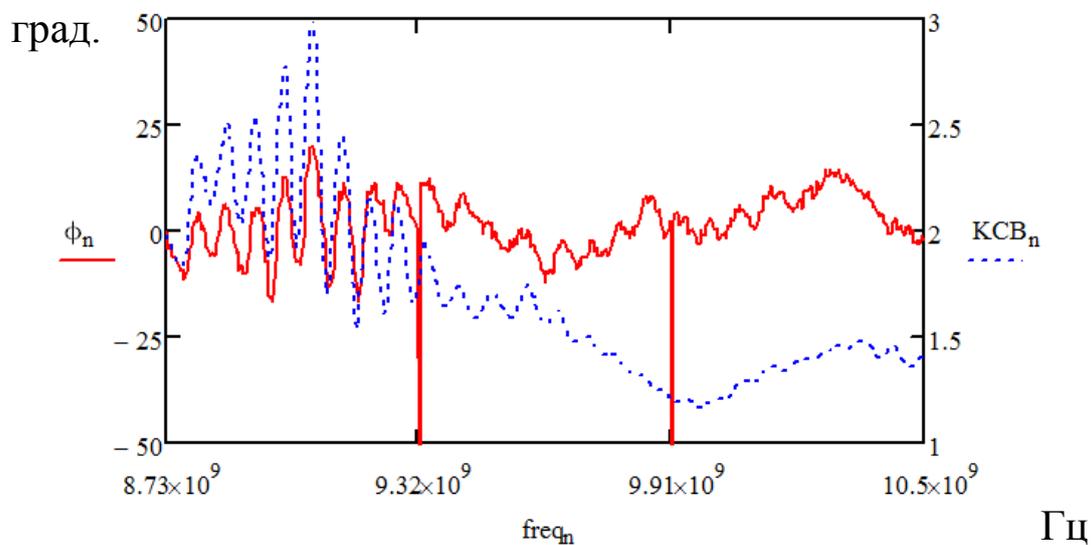


Рисунок 3 – ФЧХ и КСВН смесителя при промежуточной частоте 90 МГц

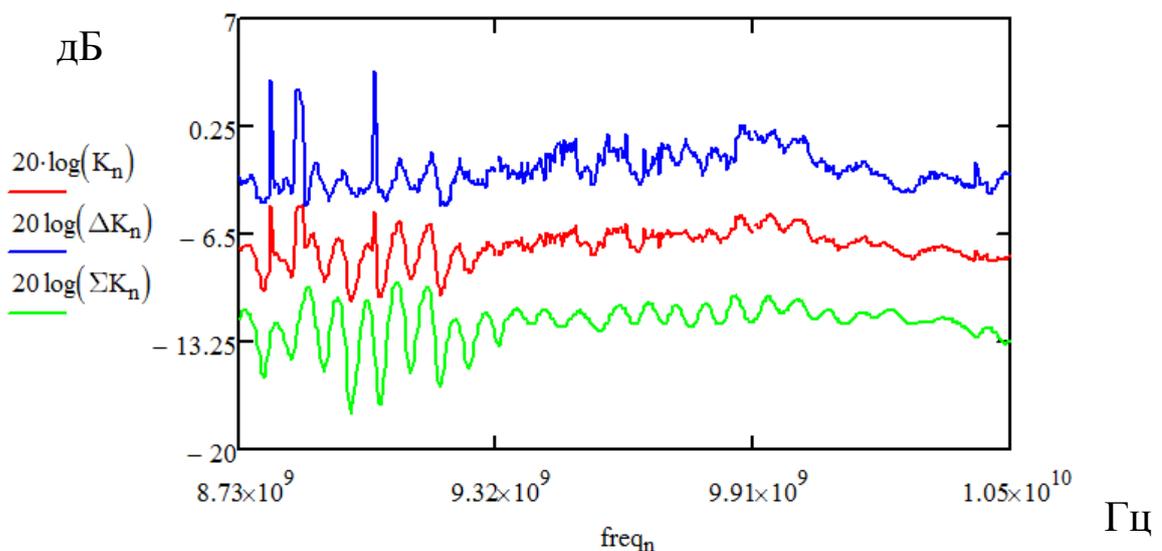


Рисунок 4 – АЧХ смесителя (посередине) при промежуточной частоте 90 МГц

На рисунке 4 представлены АЧХ, измеренные макетом: верхняя кривая – результат измерения разности коэффициентов передачи испытуемого и опорного смесителей; нижняя кривая – результат измерения суммы коэффициентов передачи испытуемого и опорного смесителей; средняя кривая – модуль истинного коэффициента передачи испытуемого смесителя.

На рисунке 5 представлены зависимости среднеквадратического отклонения истинного сдвига фаз (аргумента комплексного коэффициента передачи) испытуемого смесителя, измеренного векторным анализатором цепей P4M-18 с помощью метода трех смесителей ($sko1$) и измеренного тем же анализатором цепей, но в составе разработанного макета измерителя ($sko2$). Из этого рисунка видно, что среднеквадратическое отклонение при измерениях по новой методике более чем в три раза меньше.

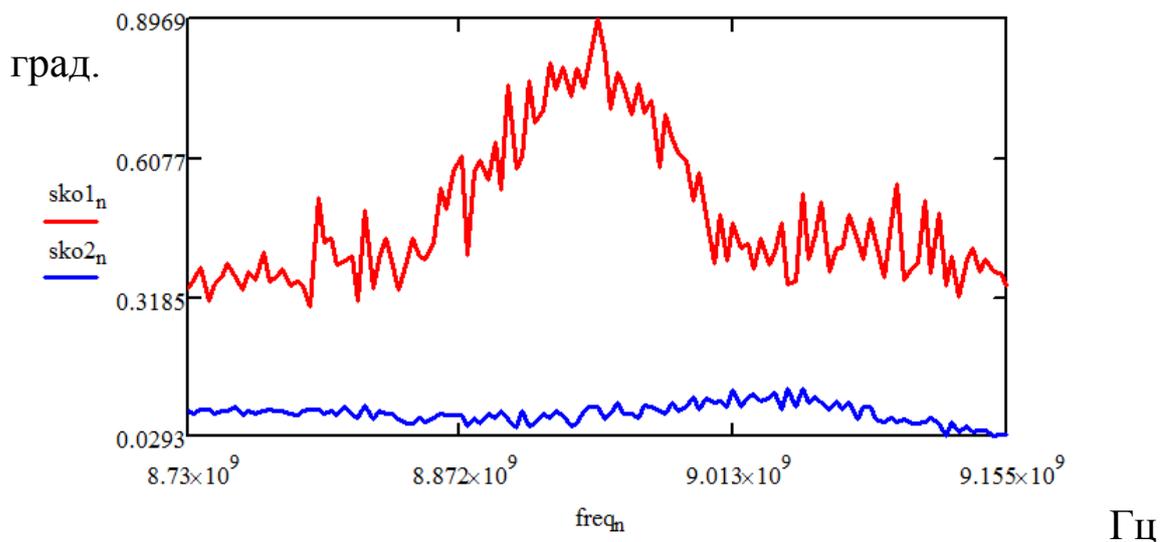


Рисунок 5 – Среднеквадратическое отклонение результатов измерений истинного сдвига фаз испытуемого смесителя двумя различными методами

В параграфе 3.3 рассмотрено прикладное применение в области векторного анализа цепей результатов, полученных в 3.1 и 3.2. Предложена новая методика построения векторного анализатора цепей, в котором учитываются амплитудно-фазовые погрешности векторного вольтметра, за счет чего увеличивается точность измерения S-параметров четырехполюсников СВЧ.

Выводы к третьему разделу:

1 Предложен новый метод измерения функций амплитудно-фазовой погрешности (конверсии) $\varphi(P_{ПЧ})$, $\varphi(P_C)$, $\varphi(P_T)$, которые были введены в параграфе 2.4, предложено реализующий этот метод устройство.

2 Разработаны теоретические основы новой методики определения комплексных параметров СВЧ-устройств, работающих в режиме преобразования частоты, позволяющей определять комплексный коэффициент передачи СВЧ-смесителей без ошибок, возникающих за счет рассогласований в диапазоне СВЧ при переключениях трактов. Дополнительным преимуществом новой методики является возможность за счет применения векторного анализатора цепей определять полный комплект S-параметров матрицы рассеяния испытуемого устройства с преобразованием частоты.

3 Предложен принцип построения векторного анализатора цепей, в котором исключена ошибка определения параметров матрицы рассеяния четырехполюсников СВЧ, возникающая за счет амплитудно-фазовой конверсии.

4 Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие полученные предложения и выводы, направленные на снижение ошибок определения параметров матрицы рассеяния СВЧ-устройств с преобразованием частоты.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

В приложениях представлены результаты экспериментальных исследований созданного макета измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-смесителей и фотографии разработанных узлов, а также копия заключения семинара ВНИИФТРИ по результатам, изложенным в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Исследованы физические процессы, протекающие в нелинейных СВЧ-устройствах, содержащих гетеродинное преобразование частоты, с целью нахождения методики определения их комплексного коэффициента передачи (модуля и фазы) с минимальными возможными погрешностями и максимально допустимым динамическим диапазоном измерений.

2 Разработана и проанализирована общая физико-математическая модель определения элементов матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств, работающих в режиме преобразования частоты. С её помощью получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать пределы динамического диапазона таких измерений и оценить величины погрешностей каждого из рассмотренных методов.

3 Проанализированы возможности применения теории X-параметров для анализа нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты. Установлено, что данный подход позволяет лишь определять сдвиги фаз испытываемых преобразователей частоты относительно специального калибровочного эталона, но его истинный сдвиг фаз остается неизвестным.

4 Разработана математическая модель определения амплитудно-фазовых погрешностей нелинейных устройств СВЧ, работающих в режиме преобразования частоты, основанная на вычислении барьерной емкости р-п перехода полупроводникового диода, за счет определения истинных сдвигов фаз, вносимых им в зондирующие СВЧ-сигналы.

5 Предложено новое решение метрологической задачи определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств, работающих в режиме преобразования частоты: разработана и теоретически обоснована методика определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты, на основе применения векторного анализатора цепей и двухканального супергетеродинного приемника, в которой исключены погрешности переключений и учтены амплитудно-фазовые погрешности.

6 Предложена новая методика увеличения точности измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения устройств СВЧ за счет измерения и исключения амплитудно-фазовых погрешностей его векторного вольтметра.

7 Проведены экспериментальные исследования метрологических возможностей предложенного решения метрологической задачи определения параметров матрицы рассеяния нелинейных СВЧ-устройств в режимах преобразования частоты, которые показали снижение среднеквадратического отклонения результатов измерений по новой методике более чем в три раза, по сравнению с известными методиками.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1 Коротков К. С., Фролов Д. Р., Левченко А. С. Анализ методов измерения истинного сдвига фаз смесителей сверхвысокой частоты // Радиотехника и электроника. – 2015. – т. 60 - № 8. – С. 873-880.

2 Коротков К. С., Фролов Д. Р. Новый метод измерений комплексных параметров сверхвысокочастотных смесителей // Измерительная техника. – 2014. – № 6 – С. 54-57.

3 Фролов Д. Р. и др. Особенности определения матриц рассеяния нелинейных СВЧ-устройств с помощью X-параметров / Д. Р. Фролов, А. С. Левченко, К. С. Коротков, А. А. Бабенко // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2015. – № 2 – С. 82-88.

Патенты Российской Федерации на изобретения:

4 Пат. 2499271 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/28. Устройство для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения четырехполюсников СВЧ [Текст] / Коротков К. С., Фролов Д. Р., Перечнев Д. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный университет". – № 2012129534/28; заявл. 12.07.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. – 15 с. : ил.

5 Пат. 2499272 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/28. Способ определения амплитудно–фазовой погрешности смесителя СВЧ в измерителе комплексных коэффициентов передачи и отражения четырехполюсников СВЧ [Текст] / Коротков К. С., Фролов Д. Р., Перечнев Д. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный университет". – № 2012129535/28; заявл. 12.07.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. – 9 с. : ил.

6 Пат. 2524049 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/28. Устройство для измерения абсолютных комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ–устройств с преобразованием частоты [Текст] / Коротков К. С., Левченко А. С., Мильченко Д. Н., Фролов Д. Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный университет". – № 2013106594/28; заявл. 14.02.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. – 13 с. : ил.

7 Пат. 2543554 Российская Федерация, МПК H 03 H 11/04, H 03 J 3/26, Способ фильтрации радиосигналов [Текст] / Фролов Д. Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет». – № 2013150435/08; заявл. 12.11.2013; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. – 6 с. : ил.

Публикации в изданиях, включенных в базу данных Scopus:

8 Korotkov, K. S., Frolov, D. R., Levchenko A. S. The Method for accurate measurements of absolute phase and group delay of frequency converters / K. S. Korotkov, D. R. Frolov, A. S. Levchenko // Proceedings of Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 23rd International Crimean Conference, Sevastopol. – 2013. – pp.938–939.

9 Korotkov K. S. et. al. Phase Calibration For Non-Linear Network Analyzers / D. R. Frolov, A. S. Levchenko, D.A. Kononenko, R.S. Polugodkin // Proceedings of Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 24nd International Crimean Conference, Sevastopol.– 2014. – pp.886–887.

Публикации в сборниках материалов конференций и прочих изданиях:

10 Фролов, Д. Р. и др. Определение амплитудно–фазовой погрешности СВЧ–четырёхполюсника с преобразованием частоты / Д. А. Кононенко, А. С. Левченко, Р. С. Полугодкин // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ 2014": матер. X Междунар. молодежн. научно–техн. конф., Севастополь, 12–17 мая 2014 г. – Севастополь Изд–во СевНТУ. – 2014. – с. 222.

11 Фролов, Д. Р. Система для измерения комплексных коэффициентов передачи устройств СВЧ с преобразованием частоты / Д. Р. Фролов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2013 : Сборник трудов XII международной научно–практической конференции. – М. – 2013. – с. 21– 22.

12 Коротков, К. С., Фролов Д. Р., Левченко, А. С. Новый высокоточный метод определения абсолютных комплексных параметров СВЧ–устройств с преобразованием частоты / Коротков К. С., Фролов Д. Р., Левченко А. С. // Сб. труд. Междунар. на–уч. конф. «ИРЭМВ–2013», Таганрог–Дивноморское. – 2013. – с.462–467.

13 Frolov, D. R., Saewert, G. A 500 V Fast Switch For ProjectX 200 Ohm Chopper / D. R. Frolov, G. Saewert // Fermilab. ProjectX Document Database. – 2012. URL: <http://projectx-docdb.fnal.gov/cgi-bin/ShowDocument?docid=1058>

14 Saewert, G. et. al. Status of PXIE 200 Ohm MEBT Kicker Development / G. Saewert, M. Awida, B. Chase, H. Pfeffer, D. Wolff, D. Frolov // Proceedings of North American Particle Accelerator Conference (NAPAC'13) 29 sep. – 4 oct. 2013, Pasadena, California, United States. – 2013. – URL: <http://jacow.web.psi.ch/conf/pac13/prepress/THPBA17.PDF>