

На правах рукописи

САМОХИНА ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА



**УВЕЛИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА  
УСИЛИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ  
СПУТНИКОВЫХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ**

Специальности:

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



003470023

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре радиоприборов Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета)

Научные руководители: доктор технических наук, профессор  
Нефедов Виктор Иванович  
кандидат технических наук, доцент  
Стариковский Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Новожилов О.П.  
доктор технических наук, профессор  
Козлов В.Н.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Московский научно-исследовательский радиотехнический институт», г. Москва


Защита состоится « 25 » июня 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.133.06 в Московском государственном институте электроники и математики (технического университета) по адресу:

109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭМ (ТУ)

Автореферат разослан «15» мая 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., профессор



Н.Н. Грачев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время в различных областях человеческой деятельности все большую роль играют подвижные спутниковые системы связи (ССС). Накопленный опыт разработки и эксплуатации таких систем, а также сравнительная простота их оборудования послужили причиной того, что в большинстве действующих СССР, включая спутниковые системы связи России, в ретрансляторах используется многостанционный доступ с частотным разделением каналов (МДЧР). Поскольку при этом в мобильных спутниковых ретрансляторах применяют большое число разночастотных (часто, многочастотных, групповых) сигналов, то их рабочие полосы должны быть достаточно широки. Рост скоростей и объемов потоков информации требует повышенной пропускной способности каналов связи, что может быть достигнуто увеличением динамического диапазона (ДД) и расширением рабочей полосы пропускания усилительных трактов ретрансляторов.

Важнейшей интегральной характеристикой устройств усиления и обработки сигналов является динамический диапазон, который связан, с одной стороны, с чувствительностью, а с другой стороны, с проявлением их нелинейных свойств. Решение задачи расширения динамического диапазона спутниковых систем связи и повышения качества их функционирования непосредственно связано с обеспечением линейности усилительных трактов прохождения разночастотного сигнала. Особенно большое влияние на качество каналов передачи информации оказывает нелинейность передаточных амплитудных характеристик (АХ) и фазоамплитудных характеристик (ФАХ) транзисторных СВЧ-усилителей мощности (СВЧ-УМ), относящихся к классу нелинейных динамических систем, или устройств с комплексной нелинейностью (УКН). Нелинейность АХ СВЧ-УМ проявляется в нелинейном АМ/АМ-преобразовании разночастотного сигнала, а неравномерность ФАХ — в паразитном преобразовании амплитудной модуляции в фазовую, т. е. в возникновении амплитудно-фазовой конверсии (АФК). Все это приводит к возникновению интермодуляционных искажений (ИМИ). Проблема создания широкополосных СВЧ-устройств ретрансляторов с расширенным динамическим диапазоном традиционно является одной из основных задач радиотехники.

Основной причиной, препятствующей расширению полосы принимаемых частот, являются паразитные каналы приема, образующиеся, в частности, за счет ИМИ СВЧ-УМ. Они ограничивают реальный динамический диапазон усилительных трактов ретрансляторов. На современном этапе развития техники передачи, приема и обработки информации требования к ДД возрастают с каждым годом. Это объясняется, во-первых, улучшением качественных показателей устройств, а во-вторых, существенным усложнением электромагнитной обстановки. Последнее связано с ростом энергетического уровня всевозможных помех, а также с увеличе-

51

нием их числа и видов. Для многих радиосредств характерна также устойчивая тенденция к усложнению приемопередающей аппаратуры, размещение ее на ограниченных площадях (на судах, самолетах, ретрансляторах и т. д.) или работающей от общих антенных устройств.

Нижняя граница динамического диапазона определяется шумами трактов, а верхняя — уровнем нелинейных искажений, т.е. фактически уровнями возникающих в СВЧ-УМ ИМИ. Нелинейные свойства тракта могут быть оценены с помощью допустимого коэффициента гармоник огибающей группового сигнала, коэффициента сжатия амплитуды радиосигнала и т. д. Относительное изменение уровней помех и полезных разночастотных сигналов на выходе передатчика и входе приемников в обычных условиях работы, т. е. динамический диапазон входных воздействий, должен достигать 100...120 дБ. Передать сигналы с таким ДД линейно через весь приемопередающий тракт ретранслятора представляет значительные технические трудности.

Итак, динамический диапазон и линейность передаточных характеристик приемопередающих трактов систем связи неразрывно и тесно связаны с друг другом и оказывают главное влияние на параметры и характеристики ретрансляторов и эффективность спутниковых систем связи (ССС).

Проблемам увеличения динамического диапазона трактов и нелинейных явлений в транзисторных СВЧ-усилителях мощности систем связи посвящены труды В.И. Каганова, Б.М. Богдановича, Г.М. Крылова, Е.Д. Сунде, Р.Т. Весткотта, Е. Бедрояна и др. Данные вопросы рассмотрены в многочисленных работах О.П. Новожилова, А.А. Титова, Ю.Л. Хотунцева, Л.Я. Кантора, В.И. Нефедова, А.Ш. Касимова, М.С. Ярлыкова, Д. Меллора и других отечественных и зарубежных специалистов, которыми к настоящему времени разработано ряд методов расширения динамического диапазона и линеаризации СВЧ-УМ трактов систем подвижной связи. Однако эти методы имеют определенные недостатки, поэтому сохраняется потребность к созданию новых методов и увеличению динамического диапазона и линеаризации СВЧ-УМ систем связи.

Решение этой серьезной научной проблемы определяет **актуальность** диссертационной работы, направленной на увеличение динамического диапазона трактов ретрансляторов систем спутниковой связи и линеаризацию передаточных характеристик транзисторных СВЧ-усилителей мощности и компенсации ИМИ, что позволяет существенно повысить верность передачи информации, улучшить энергетические показатели, сузить рабочие полосы и увеличить надежность систем спутниковой связи различного назначения в интересах всех отраслей экономики страны.

**Целью работы** является создание новых методов исследования комбинационного спектра и разработка технических устройств, обеспечивающих решение проблемы увеличения динамического диапазона и линеаризации транзисторных СВЧ-УМ с повышенными энергетическими характе-

ристиками и минимальными ИМИ при усилении групповых сигналов.

Анализ нелинейных систем с разночастотными сигналами точными методами затруднен ввиду большой сложности, а зачастую и принципиальной невозможности. В диссертации для этих целей предложен спектральный метод исследования нелинейных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами в квазистационарном (квазистатическом) режиме. В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе рассмотрены:

1. Методы увеличения динамического диапазона усилительных трактов ретрансляторов систем спутниковой связи.

2. Вероятностная модель нелинейных транзисторных СВЧ-УМ при усилении разночастотных сигналов, основанная на анализе амплитудной и фазоамплитудной характеристик усилительного тракта ретранслятора.

3. Квазистационарный метод анализа нелинейных транзисторных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами, позволяющий рассчитывать выходной комбинационный спектр и составляющие ИМИ в ретрансляторах ССС.

4. Новые методы и технические решения построения транзисторных СВЧ-УМ с линейными передаточными амплитудными характеристиками и малыми значениями амплитудно-фазовой конверсии.

5. Способ автоматической линеаризации свойств нелинейных СВЧ-УМ с помощью амплитудных и фазовых корректоров с цифровым и адаптивным управлением.

6. Программное обеспечение для исследования различных нелинейных СВЧ-устройств и систем спутниковой связи на компьютере.

7. Рекомендации по увеличению пропускной способности и эффективности систем спутниковой связи с МДЧР.

**Методы исследования.** В работе использованы методы спектрального анализа нелинейных динамических систем, метод функциональных рядов Вольтерра, аппарат функций комплексного переменного, дифференциальные и интегральные преобразования, теория вероятностей и математическая статистика, математическое моделирование и способы аппроксимации передаточных характеристик, теория передачи информации.

**Научной новизной** обладают следующие результаты работы.

1. Новый метод увеличения динамического диапазона трактов ретрансляторов, основанный на линеаризации передаточных характеристик СВЧ-УМ.

2. Вероятностная модель транзисторных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами, представляемые через аппроксимацию передаточных АХ и ФАХ.

3. Предложенный квазистационарный метод анализа нелинейных СВЧ-УМ.

4. Схема корректора характеристик СВЧ-УМ, позволяющая линеаризовать АХ и снизить АФК.

5. Новые технические решения построения СВЧ-УМ с разночастотными сигналами и автоматической цифровой коррекцией передаточных АХ и ФАХ.

6. Рекомендации по увеличению пропускной способности и эффективности систем спутниковой связи с МДЧР.

**Практическая ценность** заключается:

1. В исследовании и разработке усилительных трактов ретрансляторов с увеличенным динамическим диапазоном, линейными СВЧ-УМ с малыми уровнями ИМИ, что позволило повысить КПД, выходную мощность и расширить полосу рабочих частот систем спутниковой связи.

2. В создании комплексной программы по компьютерному анализу и расчету комбинационного спектра и составляющих ИМИ на выходе транзисторных СВЧ-УМ, применяемых в ретрансляторах.

3. Разработке амплитудных и фазовых корректоров и схем линеаризации передаточных характеристик транзисторных СВЧ-УМ с адаптивным управлением и обратными связями.

4. Разработке экспериментальных методик измерения односигнальных и многосигнальных передаточных АХ и ФАХ.

**Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Новый метод увеличения динамического диапазона трактов ретрансляторов, основанный на линеаризации передаточных характеристик СВЧ-УМ.

2. Вероятностная модель транзисторных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами, представляемые через аппроксимацию передаточных АХ и ФАХ.

3. Предложенный квазистационарный метод анализа нелинейных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами с использованием аппроксимации АХ и ФАХ функциями Бесселя и численными исследованиями на компьютере.

4. Схема корректора характеристик СВЧ-УМ, позволяющая линеаризовать АХ и спизить АФК.

5. Новые технические решения построения СВЧ-УМ с разночастотными сигналами и автоматической цифровой коррекцией передаточных АХ и ФАХ.

6. Рекомендации по увеличению пропускной способности и эффективности систем спутниковой связи с МДЧР.

**Основные результаты диссертационной работы внедрены** на предприятиях ОАО «Концерн радиостроения «ВЕГА», ЦНИИ «Радиосвязь», в НИИ космических систем – филиал ГКНПЦ имени М.В. Хруничева, в институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, применены в учебном процессе в Московском государственном институте радиотехники, электроники и автоматики (техническом университете) и Московском государственном институте электроники и математики (техническом университете). Результаты работы отражены в 4 учебниках с грифом Министерства образования и науки РФ «Допущено» в качестве учебника для студентов учреждений среднего профессионального образования и учебном пособии с грифом УМО «Допущено» в качестве учебного пособия для студентов специальности «Радиотехника».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались с 2001-го по 2009 год на научно-технических конференциях и семинарах в Московском государственном

ном институте радиотехники, электроники и автоматики (техническом университете), Московском энергетическом институте (техническом университете), на конференциях и заседаниях НТОРЭС им. А.С. Попова, на международных и Всероссийских научно-технических конференциях.

**Достоверность** основных теоретических положений подтверждена:

- созданием широкого класса СВЧ-УМ, внедренных в состав радиотехнических систем различного назначения;
- экспериментально в процессе исследований разработанных линейных транзисторных СВЧ-УМ;
- точностью расчетов параметров с помощью спектрального метода (0,15...0,25 дБ), что соизмеримо с погрешностью измерительных приборов;
- расчетными оценками границ применения алгоритмов и методик;
- актами о внедрении и использовании научных и практических результатов диссертации;
- совпадением результатов настоящей работы с данными, полученными другими авторами.

**Публикации.** Результаты проведенных в диссертации исследований опубликованы автором более чем в 35: 4 статьях в ведущих научных журналах и изданиях, выпускаемых в Российской Федерации и рекомендуемых ВАК для публикации основных материалов диссертаций, представляемых на соискание ученой степени кандидата наук; 19 статьях в сборниках трудов международных научно-технических конференций; 7 статьях в научно-технических сборниках издательств МИРЭА и других высших учебных заведениях и научно-исследовательских институтов; в 4 учебниках с грифом Министерства образования и науки РФ «Допущено» в качестве учебника для студентов учреждений среднего профессионального образования и учебном пособии с грифом УМО «Допущено» в качестве учебного пособия для студентов специальности «Радиотехника».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, 3 приложений, списка источников информации, включающего 168 наименований; содержит 158 страниц текста, 46 рисунков и 9 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи и методы исследования, представлены новизна, научная и практическая ценность, кратко излагается содержание и основные результаты работы.

**Первый раздел** содержит обзор научно-технической литературы за последние годы, известных исследований, и разнообразные материалы, дающие основные сведения о том, что необходимо выполнить для решения проблемы расширения динамического диапазона и линеаризации переда-

точных характеристик транзисторных СВЧ-усилителей мощности ретрансляторов систем персональной спутниковой связи.

Рассмотрены ретрансляторы спутниковых систем связи с многостанционным доступом (рис. 1), имеющие различные нелинейные СВЧ-устройства, и прежде всего, нелинейные транзисторные СВЧ-УМ.

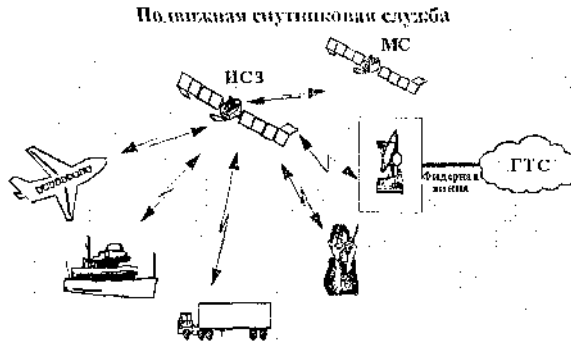


Рис. 1. Структурная схема модели ретранслятора подвижной системы спутниковой связи с групповым нелинейным трактом

Проблема создания широкополосных устройств с расширенным динамическим диапазоном является одной из основных задач радиотехники. Главной причиной, препятствующей расширению полосы частот, являются ИМИ, образующиеся из-за нелинейности усилительных трактов. Существуют несколько путей решения указанной проблемы. Все они имеют свои достоинства и недостатки, связанные со схемотехническими и конструктивными особенностями конкретных устройств. Исследованиями установлено, как при усилении разночастотного сигнала на выходе УКН возникают следующие виды нелинейных эффектов: подавление сильными сигналами слабых до 3... 6 дБ; снижение выходной мощности на 1,5...2,0 дБ и появление ИМИ. Из них наиболее мощные и влияющие на качество связи — ИМИ 3-го и 5-го порядков. Анализ современных транзисторных СВЧ-УМ и усилительных модулей выявил, что при уровне ИМИ в 25...30 дБ, КПД снижается до 25...30 %. При этом расчеты показывают, что снижение уровня ИМИ в групповом сигнале выходного СВЧ-УМ передатчика на 3дБ эквивалентно увеличению его КПД и выходной мощности на 4...5 %.

Для количественной оценки влияния нелинейности СВЧ-УМ на показатели качества систем связи необходимо исследовать их характеристики в многосигнальном режиме. Это трудная задача, так как надо одновременно учитывать совместное влияние двух эффектов: АМ/АМ-преобразования и



АФК. Эти два явления, имеющих место в нелинейных СВЧ-УМ, тесно взаимосвязаны, определяют модуль и фазу комплексного коэффициента передачи, и влияют и на подавление полезных сигналов, и на генерацию ИМИ, поэтому их действие следует учитывать совместно.

Выходные каскады приемопередающих устройств современных и перспективных ССС в своем составе содержат в основном мощные биполярные и полевые транзисторы и микросхемы. Из-за необходимости передачи больших мощностей и обеспечения высокого КПД активные элементы СВЧ-трактов работают, как правило, в режимах, близких к насыщению, вследствие чего их передаточные характеристики могут иметь различный характер. Типовые нормированные передаточные характеристики АХ и ФАХ реальных транзисторных СВЧ-УМ показаны на рис. 2.

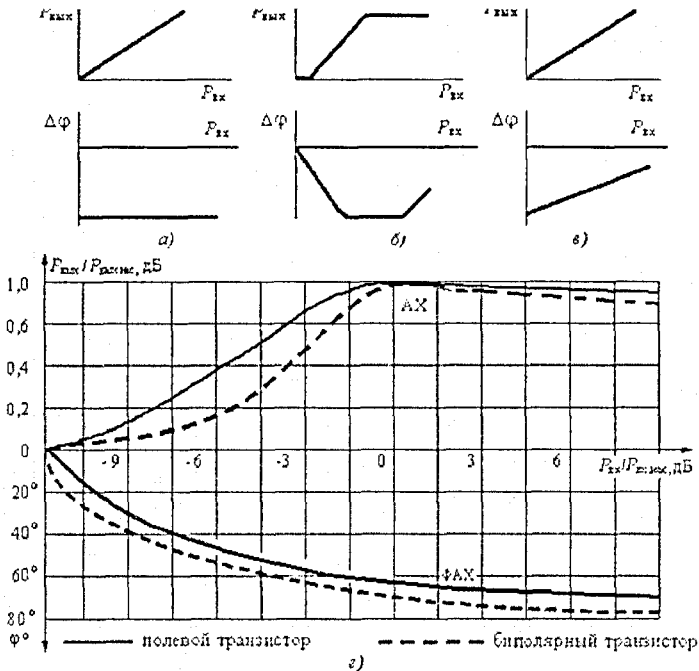


Рис. 2. Передаточные АХ и ФАХ СВЧ-УМ:

а — линейные; б — в — нелинейные; г — реального усилителя

Исследование нелинейности АХ и неравномерности ФАХ транзисторных СВЧ-УМ в настоящее время ведется различными методами. В диссертации проведен сравнительный анализ известных методов исследо-

вания УКН. Нелинейные динамические системы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Анализ таких систем аналитическими и численными методами (как для линейных систем) затруднен ввиду большой сложности. Поэтому большое распространение получили приближенные методы анализа и в первую очередь те, которые позволяют распространить на нелинейные системы методы анализа линейных систем.

Среди них наиболее известны:

- метод интегро-дифференциальных уравнений;
- метод с использованием многомерных рядов Вольтерра;
- метод квазистационарной амплитуды.

Основной проблемой при решении задачи линеаризации оставалось нахождение наиболее эффективных методов математического моделирования транзисторных СВЧ-УМ. Ранее была решена частная задача по оценке мощности ИМИ на выходе нелинейных усилителей. При этом учитывалось влияние только нелинейности АХ. Влияние АФК в расчетах исключалось. Лет 15...20 назад появились работы по спектральным методам исследований СВЧ-УМ, учитывающим совместное влияние нелинейности АХ и ФАХ. Было предложено определять мощности ИМИ, учитывая при раздельно влияние нелинейности АХ и неравномерности ФАХ лишь при двухчастотном сигнале на границах рабочего диапазона. Полученные результаты расчета рекомендовалось затем складывать по мощности. При оценке отмеченных методов вопрос сводится к следующему: допустимо ли распространить их на множество усиливаемых сигналов, представляемых в виде суммарного колебания с меняющимся по сложному закону амплитудой и фазой? Ответ на этот вопрос неоднозначен, поэтому был применен усовершенствованный спектральный метод анализа нелинейных транзисторных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами. Метод назван квазистационарным. Его суть заключается в вероятностном представлении нелинейного СВЧ-УМ эквивалентной схемой с передаточными АХ и ФАХ, полученными в односигнальном или многосигнальном режиме при реальных изменениях амплитуды и фазы разночастотного сигнала с использованием аппроксимации АХ и ФАХ и численными исследованиями на компьютере. При анализе АХ и ФАХ можно определить теоретически или экспериментально практически по любому числу передаваемых сигналов.

**Во втором разделе** дан анализ известных методов исследования нелинейных динамических систем и предложен новый метод исследования СВЧ-УМ при разночастотном входном сигнале.

Метод функциональных рядов Винера-Вольтерра (проще, Вольтерра) широко используется при анализе характеристик и параметров различных динамических систем и позволяет установить аналитическую связь между входным и выходным сигналами, в том числе и между их спектрами.

Выходной сигнал  $u_{\text{вых}}(t)$  представляется суммой откликов нелинейной системы в виде бесконечного множества импульсных характеристик  $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n, \dots, \tau_n)$  и входном разночастотном сигнале  $u_{\text{вх}}(t)$  в виде бесконечного множества импульсных сигналов. При этом используют разложение некоторой известной нелинейной функции, отражающей групповой входной сигнал  $G[u_{\text{вх}}(t)]$  в степенной ряд. Разложение выходного группового сигнала в ряд Вольтерра́ имеет вид:

$$u_{\text{вых}}(t) = G[u_{\text{вх}}(t)] = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n u_{\text{вх}}(t - \tau_i) d\tau_i, \quad (1)$$

где  $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$  – ядра ряда  $n$ -го порядка (импульсные характеристики).

В разработанном в диссертации квазистационарном методе представления вероятностной модели СВЧ-УМ с аппроксимацией передаточных характеристик состоит в условном определении совокупности отсчетов входных АХ и ФАХ, полностью определяющих анализируемое устройство для дальнейшего его исследования. Поэтому метод анализа и расчета комбинационного спектра на выходе нелинейных транзисторных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами назван квазистационарным методом с аппроксимацией передаточных характеристик. Усиленное колебание на выходе нелинейного транзисторного СВЧ-УМ можно представить так:

$$u_{\text{вых}}(t) = \text{Re} \left\{ \exp(j\omega_0 t) \sum_{k_1, k_2, \dots, k_N = -\infty}^{\infty} \exp \left[ j \sum_{i=1}^N K_i \theta_i(t) \right] M(K_1, K_2, \dots, K_N) \right\}, \quad (2)$$

где  $M(K_1, K_2, \dots, K_N)$  — комплексная амплитуда полезных сигналов и продуктов ИМИ на угловой частоте  $\omega = K_1\omega_1 + K_2\omega_2 + \dots + K_N\omega_N + \dots + \omega_0$  на выходе нелинейного СВЧ-устройства;  $K_i$  — номер гармоники  $i$ -го сигнала.

Разночастотные сигналы поступают на вход усилительного тракта со случайной фазой, значение которой считаем равномерно распределенной на интервале  $0 \dots 2\pi$ . Поэтому выражение амплитуд сигналов и ИМИ на выходе нелинейного устройства можно записать

$$M(K_1, K_2, \dots, K_N) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \prod_{i=1}^N J_{K_i}(r) [U_{\text{вх}i}(t)] \right\} dr \int_{-\infty}^{\infty} \rho(t) g(\rho) \exp j[\varphi(\rho)] J_1(\rho) d\rho, \quad (3)$$

где  $J_K$  — функции Бесселя первого рода  $K$ -го порядка;  $r$  — аналог времени; функция  $\rho(t)$  — суммарная огибающая разночастотного сигнала на входе,  $g(\rho)$  и  $\varphi(\rho)$  — передаточные АХ и ФАХ нелинейного транзисторного СВЧ-УМ. Каждый тип и номер ИМИ разночастотного усиленного сигнала на выходе СВЧ-УМ характеризуется набором целочисленных коэффициентов  $K_1, K_2, \dots, K_N$ , которые могут принимать любое значение.

В предложенном методе вероятностная математическая модель нелинейного транзисторного СВЧ-УМ определяется выражением

$$G(\rho) = g(\rho) \exp[j\varphi(\rho)], \quad (4)$$

где  $g(\rho)$  — амплитудная характеристика;  $\varphi(\rho)$  — фазоамплитудная характеристика;  $P_{\text{вх}}$  — мощность группового (группового) сигнала на входе транзисторного СВЧ-УМ; параметр  $\rho = \sqrt{2P_{\text{вх}}}$ .

При этом групповое усиленное колебание на выходе исследуемого нелинейного СВЧ-УМ можно представить следующем образом:

$$u_{\text{вых}}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \exp(j\omega_0 t) \sum_{K_1, K_2, \dots, K_N = -\infty}^{\infty} \exp \left[ j \sum_{i=1}^N K_i \theta_i(t) \right] M(K_1, K_2, \dots, K_N) \right\}, \quad (5)$$

где  $M(K_1, K_2, \dots, K_N)$  — комплексная амплитуда сигналов и ИМИ на частоте  $\omega_0 = K_1\omega_1 + K_2\omega_2 + \dots + K_N\omega_N$  (6)

на выходе исследуемого СВЧ-УМ;  $K_i$  — номер гармоники  $i$ -го сигнала.

Каждый тип ИМИ набором произвольных целочисленных коэффициентов  $K_1, K_2, \dots, K_N$ . Общее выражение комплексных амплитуд полезных сигналов и составляющих ИМИ в разночастотном режиме:

$$M(K_1, K_2, \dots, K_N) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \prod_{i=1}^N J_{K_i}(r) [U_{\text{вх}i}(t)] \right\} dr \int_{-\infty}^{\infty} \rho(t) G(\rho) J_i(\rho) d\rho, \quad (7)$$

где  $J_K$  — функции Бесселя первого рода  $K$ -го порядка;  $r$  — переменная, являющаяся аналогом времени; функция  $\rho(t)$  — огибающая группового сигнала на входе,  $g(\rho)$  и  $\varphi(\rho)$  — АХ и ФАХ нелинейного СВЧ-УМ.

При использовании для аппроксимации АХ и ФАХ СВЧ-УМ функций Бесселя, выражение (7) запишется в следующем виде:

$$G(\rho) = g(\rho) \exp[j\varphi(\rho)] = \sum_{s=1}^L b_s J_L(\alpha s \rho), \quad (8)$$

где  $b_s = b_{gs} + jb_{ms}$  — комплексные коэффициенты;  $b_{gs}$  — вещественная часть;  $b_{ms}$  — мнимая часть модели УКН;  $J_L$  — функция Бесселя 1-го рода  $L$ -го порядка ( $L = 1, 2, \dots, s$ );  $\alpha$  — константа ( $0,4 \leq \alpha < 1,0$ ).

Аппроксимация характеристик производится отдельно для действительных и мнимых частей комплексной нелинейности:

$$G_g(\rho) = g(\rho) \cos \varphi(\rho) = \sum_{s=1}^L b_{gs} J_L(\alpha s \rho), \quad (9)$$

$$G_m(\rho) = g(\rho) \sin \varphi(\rho) = \sum_{s=1}^L b_{ms} J_L(\alpha s \rho). \quad (10)$$

Аппроксимацию выполняем по методу наименьших квадратов:

$$\sum_{k=1}^z \left[ g_k \cos \varphi_k - \sum_{s=1}^L b_{gs} J_L(\alpha s \rho) \right]^2 = \min, \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^z \left[ g_k \sin \varphi_k - \sum_{s=1}^L b_{ms} J_L(\alpha s p) \right]^2 = \min. \quad (12)$$

Здесь  $z$  — число точек АХ и ФАХ;  $g_k$  — значения выходной мощности на кривой АХ и  $\varphi_k$  — значения фазы на кривой ФАХ в точках  $z = k_{\max}$ .

В результате проведенных исследований установлено, что выражения (7), (11), (12) приводят к достаточно простой формуле для вычисления комплексных амплитуд полезных сигналов и составляющих ИМИ:

$$M(K_1, K_2, \dots, K_N) = \sum_{s=1}^L b_s \prod_{i=1}^N J_{K_i}(\alpha s u_{\text{вх}L}), \quad (13)$$

где  $J_{K_L}(\alpha s u_{\text{вх}L})$  — функция Бесселя 1-го рода порядка  $K_L$ .

Для предложенного метода разработано математическое и программное обеспечение расчета мощности сигналов и ИМИ на выходе транзисторных СВЧ-УМ в многосигнальном режиме.

В качестве критерия оценки интенсивности ИМИ было принято считать отношение мощности наиболее интенсивного ИМИ-32  $P_{32}$  к мощности полезного сигнала  $P_c$  на выходе исследуемого нелинейного устройства:

$$\frac{P_{32}}{P_c} = \frac{U_{32}^2}{U_{\text{вых}}^2} = \frac{|M(K_1, K_2, \dots, K_N)|^2}{|M(1, 1, -1, \dots, 0)|^2} = \frac{\left| \sum_{s=1}^L b_s J_1(\alpha s u_{\text{вх}L}) J_0^{N-3}(\alpha s u_{\text{вх}L}) \right|^2}{\left| \sum_{s=1}^L b_s J_1(\alpha s u_{\text{вх}L}) J_0^{N-1}(\alpha s u_{\text{вх}L}) \right|^2}. \quad (14)$$

В работе установлено, что в спектральном методе анализа УКН на основе аппроксимации АХ и ФАХ с помощью функций Бесселя получают выражения, удобные для расчетов на компьютере, не требуются сложные математические преобразования, большие затраты машинного времени, не возрастает громоздкость вычислений с увеличением количества сигналов на входе исследуемого СВЧ-УМ.

**В третьем разделе** представлены методы расширения динамического диапазона и линеаризации усилительных трактов с разночастотными сигналами. Разработанная в диссертации структурная схема корректора с прямой связью представлена на рис. 3. Данная схема имеет огромное преимущество перед другими схемами корректоров вследствие того, что она лишена нелинейного смесителя в цепи коррекции фазы.

Основной проблемой при разработке подобных схем корректоров является минимизация амплитудных и фазовых ошибок. Для подавления ИМИ на выходе сумматора, на один вход которого подается неискаженный входной сигнал, а на второй вход — выходной усиленный сигнал с ИМИ,

необходимо, чтобы амплитуды несущих были бы одинаковы, а сдвиг фаз равен  $180^\circ$ . В результате того, что амплитуды и фазы сигналов не одинаковы, существует определенный порог ограничения несущих.

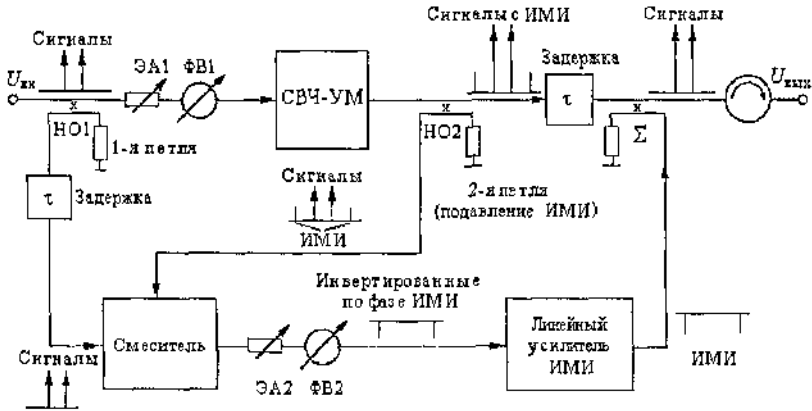


Рис. 3. Структурная схема корректора с прямой связью

В связи с наличием определенных порогов напряжения срабатывания элементов схемы корректора, в его структуру введена автоматическая схема управления, которая отслеживает изменения амплитуды и фазы.

При возникновении в цепи коррекции фазы ошибки, фазовая ошибка  $\Delta\varphi$ , которая пройдет на выход петли подавления ИМИ, будет определяться:

$$\Delta\varphi = 1 - \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[ \frac{1 - 10^{0,1(CP_{a,6}(\Delta P, S) - \Delta P + X)} + 10^{\frac{\Delta P}{10}}}{2 \cdot 10^{\frac{\Delta P}{20}}} \right] \quad (15)$$

В качестве электронно-управляемого аттенюатора А1 корректора была смоделирована и разработана специализированная схема. В результате выполненного моделирования получено, что при включении корректора ИМИ подавляются на 22 дБ в полосе 15 МГц. На основе расчетов были сделаны выводы о том, что амплитудная ошибка в петле подавления составила не более 0,2 дБ. Для выходного сумматора при амплитудной ошибке в 0,2 дБ и при  $X = 0,52$  дБ подобная степень подавления ИМИ возможна при максимальной фазовой ошибке  $0,4 \dots 0,5^\circ$ . Полученные в ходе моделирования результаты подтверждают достоверность выполненных расчетов.

В разделе предложен метод линеаризации характеристик СВЧ-УМ на основе их обратимых функциональных моделей. Для создания схем кор-

ректоров в качестве аналитической модели нелинейного СВЧ-УМ выбран аналог обратимой модели на основе нелинейного уравнения Урысона

$$y_n = \sum_{k=0}^N f_k(x_{n-k}), \quad (16)$$

где  $f_k(x)$  — базовые функции, определенные типом аппроксимации нелинейных моделей из пространства функций (сигналов)  $\mathbf{R}$  ( $x_n, y_n \in \mathbf{R}$ );  $z^{-1}$  — общепринятый символ элемента задержки входной цифровой последовательности сигналов на интервал дискретизации  $\Delta t = T$ . Модель описывается следующим уравнением обратимой системы

$$x_n = \frac{1}{f_0} \left( y_n - \sum_{k=0}^N f_k(x_{n-k}) \right). \quad (17)$$

Проведенные исследования подтвердили, что с помощью разработанной схемы управления корректор передаточных характеристик позволяет подавить ИМИ в выходном спектре группового цифрового сигнала на 25 дБ в полосе рабочих частот.

В четвертом разделе приведены результаты математического моделирования и экспериментальные исследования нелинейных транзисторных СВЧ-УМ в многосигнальном режиме. В разделе использован разработанный специализированный пакет прикладных программ для персонального компьютера, предназначенный для исследования маломощных (до 1 Вт), средней мощности (до 10 Вт) и мощных (до 100 Вт и более) многосигнальных СВЧ-устройств с комплексной нелинейностью. Пакет прикладных программ, в котором использованы стандартные языки и программные оболочки, такие как среда Microsoft Windows, Visual Basic, Pascal, C++ и других современных программных продуктов (например, что пакеты программ ADS — Advanced Design System, Microwave Office, STATGRAPHICS, MATHCAD, LabView), позволяет производить все виды математической обработки данных, предусмотрено автоматическое планирование и обработка пробных и последовательных экспериментов, а также ввод исходных данных параметров АХ и ФАХ исследуемых СВЧ-устройств из базы данных в автоматическом режиме. Практически все расчеты параметров передаточных АХ и ФАХ нелинейных транзисторных СВЧ-УМ выполнены на компьютере с использованием квазистационарного метода анализа нелинейных динамических систем.

Проведен анализ передаточных АХ и ФАХ линеаризованных транзисторных СВЧ-УМ при суммарной мощности входного группового сигнала на 10...12 дБ превышающих режим насыщения нелинеаризованных усилительных устройств. В результате установлено, что:

— абсолютная точность расчетов отношения  $P_{\text{вых}}/P_{\text{ИМИ}}$  на выходе линеаризованных транзисторных СВЧ-УМ, выполненных спектральным мето-

дом характеристических функций соизмерима с погрешностью измерительных приборов и составляет величину (0,10...0,25) %;

– точность компьютерных расчетов отношения  $P_e/P_{\text{ИМИ}} = f(P_{\text{вх}})$  в зависимости от мощности входного сигнала для наиболее интенсивных продуктов ИМИ-31, ИМИ-32 составляет 2,5...5,0 %.

По результатам расчетов продуктов ИМИ можно сделать вывод, что отношение мощности полезного группового сигнала к мощности ИМИ для полевых транзисторов больше на 1,5...3 дБ аналогичного отношения для биполярных транзисторов.

Для транзисторных СВЧ-УМ режим максимальной помехоустойчивости (максимального отношения  $P_e/P_{\text{ИМИ}}$ ) наблюдается в трех рабочих точках работы: (-14; -3,8; 0) дБ. В диапазоне же мощностей -3,8...0 дБ отношение  $P_e/P_{\text{ИМИ}}$  — достаточно стабильное и составляет величину 23 – 24 дБ. Аналогичные результаты получены и для разработанных в диссертации нелинейных СВЧ-устройств: отношение  $P_e/P_{\text{ИМИ}}$  составляет величину (21...21,5) дБ в диапазоне входных мощностей - 4...0 дБ. Следовательно, выбор режима работы транзисторного усилителя мощности в области, близкой к режиму насыщения, не критичен с точки зрения отношения мощностей  $P_e/P_{\text{ИМИ}}$ .

Еще было исследовано два специфичных режима работы СВЧ-УМ: режим повышенной входной мощности и номинальной. В первом случае интенсивность ИМИ в диапазоне мощностей - 8, -6, -4, -2 и 0 дБ соответственно на 5, 6, 10, 8 и 9,5 дБ выше, чем при номинальной мощности.

В разделе приведены экспериментальные данные, на основе которых изучено изменение характеристик в зависимости от ухода параметров и изменения условий эксплуатации СВЧ-УМ. На основе анализа статистики и практических измерений АХ и ФАХ транзисторных СВЧ-усилителей при изменяющихся внешних дестабилизирующих факторах, сформулированы требования, как к отдельным блокам корректоров с прямой связью, так и к характеристикам входных сигналов. Стабильность ФАХ входного сигнала является наиболее важным показателем при работе широкополосных корректоров с прямой связью. Для обеспечения стабильности характеристик в полосе частот 15 МГц необходимо контролировать стабильность АХ в пределах  $\pm 0,2$  дБ и стабильность ФЧХ в пределах  $\pm 0,5^\circ$ . Для этого необходимо стабилизировать источники питания, а также источники напряжений смещения на уровне  $\pm 1,5\%$  от номинального значения напряжения при работе в установившемся режиме. Также необходимо обеспечивать контроль температуры корпусов транзисторов в пределах  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

**В приложениях** приведены электрическая принципиальная схема предложенной схемы корректора, программы расчета комбинационного выходного спектра, анализ последовательного соединения двух УКН, конструкции разработанных СВЧ-усилителей мощности и сумматоров.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны новые методы увеличения динамического диапазона усилительных трактов ретрансляторов систем спутниковой связи.

2. Создана вероятностная модель нелинейных транзисторных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами, основанная на аппроксимации АХ и ФАХ.

3. Предложен квазистационарный метод анализа нелинейных транзисторных СВЧ-УМ с разночастотными сигналами, позволяющий рассчитывать выходной комбинационный спектр и составляющие ИМИ. Показано, что метод обладает перспективностью и высокой точностью — (0,1...0,2) дБ.

4. Предложены новые методы и технические решения построения транзисторных СВЧ-УМ с линейными передаточными АХ и малыми значениями АФК, что значительно расширило область их применения. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при применении разработанных корректоров и сумматора, степень ослабления несущих составит не 2,5 дБ, а всего 0,5 дБ, что представляет значительный выигрыш.

5. Разработан пакет прикладных программ, предназначенный для исследования УКН в многосигнальном режиме. При этом исследуемые устройства могут иметь значительную величину АФК ( $K_{\phi} > 4...5$  град/дБ).

6. Предложены рекомендации по увеличению пропускной способности и эффективности ССС путем неравномерной расстановки несущих частот.

Итак, в результате исследований, а также компьютерного моделирования, решена важная проблема построения линейных схем транзисторных СВЧ-УМ. Проведена разработка новых положений теории нелинейных систем с разночастотными входными сигналами, совокупность которых позволила решить научно-техническую проблему, имеющую важное хозяйственное значение по развитию основ построения, разработки, созданию и внедрению СВЧ-УМ с повышенными энергетическими характеристиками в системы различного назначения. Это должно повысить их КПД, выходную мощность, надежность, уменьшить уровень ИМИ, расширить полосу рабочих частот, снизить стоимость и массогабаритные показатели, а в итоге приведет к увеличению числа пользователей и повышению объема и скорости передаваемой информации систем спутниковой связи.

**Основные результаты диссертации изложены более чем в 35 работах**

*Статьи в изданиях ВАК*

1. Самохина Е. В., Стариковский А.И. Спектральные методы исследования нелинейных СВЧ-устройств. Научное издание, 2008, т. 6, №12, с. 27-29.

2. Самохина Е.В., Нефедов В.И., Власюк Ю.А. Исследование характеристик нелинейных СВЧ-усилителей. Научное издание, 2005, т.6, №10, с. 21-23.

3. Нефедов В.И., Барский Д.Р., Белявский Д.С., Самохина Е.В. Ошибки передачи битовых потоков в цифровых системах подвижной

связи. *Наукоемкие технологии*, 2005, т. 6, № 10, с. 24-26.

4. Самохина Е.В., Битюков В.К., Гуров П.А., Нефедов В.И., Барский Д.Р. Повышение эффективности СВЧ-усилителей систем связи. *Наукоемкие технологии*, 2005, т. 6, № 10, с. 27-29.

*Публикации в журналах, учебники и учебные пособия  
и материалы научно-технических конференций*

1. Самохина Е.В., Стукас А.В., Зубков А.П., Базитов А.В., Оганян А.Б. Увеличение динамического диапазона и линеаризация усилительных трактов систем передачи информации. 64-я научная сессия, посвященная Дню радио. 13-14 мая 2009 г., Москва, Россия.

2. Самохина Е.В., Белявский Д.С., Нефедов В.И., Барский Д.Р. Исследование нелинейных СВЧ-усилителей с использованием рядов Вольтерра. НТОРЭС им. А.С. Попова. 63-я научная сессия, посвященная Дню радио. 17-19 мая 2008 г., Москва, Россия.

3. Самохина Е.В. Повышение эффективности СВЧ-трактов спутниковых систем связи. 4-я Международная научно-техническая конференция “Фундаментальные и прикладные проблемы физики”, с. 121-123. Саранск, 2006 г.

4. Самохина Е.В. Усилители мощности для базовых станций сотовой связи стандарта CDMA. Сб. научных трудов “Радиоэлектроника и связь”, МИРЭА. – М.: 2001. /Под ред. В.И. Нефедова. С. 41-47.

5. Нефедов В.И., Битюков В.К., Самохина Е.В., Стариковский А.И., Белоусов О.Б., Грязных И.В. Основы радиоэлектроники и связи. /Под ред. Нефедова В.И. (рекомендовано УМО Минвуза России в качестве учебного пособия). Часть 2. /Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). – М.: 2008. – 148 с.

6. Самохина Е.В. Квазистатические методы исследования нелинейных СВЧ-устройств с использованием функций Бесселя. Материалы международной научно-практической конференции “Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения”. INTERMATIC. – М.: МИРЭА, 2003. С. 176-178.

7. Nefedov V., Samokhina E.V. Consideration of amplitude and phase errors in the power amplifier linearization circuits. DSPA'2001, 3-th International Conference: Digital Signal Processing And Its Applications. Moscow, Russia. 2002. Proceedings – 2, p. 349.

8. Самохина Е.В., Барский Д.Р., Матюхин А.А., Гуров П.Н., Нефедов В.И., Белявский Д.С. Линеаризация характеристик СВЧ-усилителей мощности на основе обратимых моделей. Москва, МИРЭА. Сб. трудов 57-й научно-технической конференции. Часть 2. Технические науки. 2006 г. С. 58-63.

9. Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К., Самохина Е.В. Метрология, стандартизация и сертификация. / Под ред. профессора Нефедова В.И. Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. – М.: Форум-Инфра-М, 2009 г. 416 с.

10. Самохина Е.В., Барский Д.Р., Матюхин А.А., Нефедов В.И.. Линеаризация усилителей мощности на основе уравнений Урысона. Москва, МИРЭА. Сборник трудов 57-ой научно-технической конференции. Часть 2. Физико-математические науки. Технические науки. 2006. С. 35-38.

11. Нефедов В.И., Барский Д.Р., Самохина Е.В., Белявский Д.С. Спектральный метод анализа нелинейных динамических систем с многочастотными сигналами. Сб. трудов 55-ой научно-технической конференции. Часть 2. Физико-математические науки. Технические науки. 2006 г. С. 64-67.

12. Самохина Е.В. Линейные транзисторные СВЧ-УМ для систем связи. Труды VIII Международной конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информатики". Москва 2005 г. С. 23-26.

13. Самохина Е.В. Исследование нелинейных усилителей с использованием рядов Вольтера. Доклады научной конференции Инфо-2008. Сочи. С. 151-156.

14. Samokhina E.V., Nefedov V.I., Barskij D.R., Gurov P.A. Distortions of signals in powerful the microwave-amplifier. DSPA, 2005, 7-th International Conference: Digital Signal Processing And Its Applications. Moscow, Russia. v. II. 2005. Proceedings – 2, p. 250 – 252.

15. Сигов А.С., Нефедов В.И., Самохина Е.В. и др. Электрорадиоизмерения. (3-е изд.). Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. – М.: Форум-Инфра-М, 2009 г. 384 с.

16. Belyavsky D.S., Matjuhin A.A., Samokhina E.V., Solomatin N.S., Gurov P.A., Nefedov V.I., Buzulyov F.N. Increase of the linearity of communication system microwaves-amplifiers. DSPA-07. Moscow, Russia. P. 598-599.

Подписано в печать 05.05.2009. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отг. 3,72. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 120 экз. Заказ 293.

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Московский государственный институт радиотехники,  
электроники и автоматики (технический университет)"  
119454, Москва, пр. Вернадского, 78