

На правах рукописи

Лосев Александр Александрович

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СПУТНИКОВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА,
ПОСТРОЕННОГО МЕТОДОМ ДЕФАЗИРОВАНИЯ

Специальность 05.12.04 – Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском институте радио (ФГУП НИИР).

Научный руководитель: **Быховский Марк Аронович**,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем и сетей радиосвязи и телерадиовещания МТУСИ.

Официальные оппоненты: **Майстренко Василий Андреевич**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Средства связи и информационная безопасность» ОмГТУ.

Семенов Эдуард Валерьевич,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектроники и защиты информации ТУСУР, старший научный сотрудник лаборатории 42 акционерного общества «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП»).

Ведущая организация: акционерное общество «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «ОНИИП»).

Защита состоится 21 сентября 2017 года в 13:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ <http://www.srd-mtuci.ru/index.php/ru/council>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диссертация посвящена разработке и анализу вариантов построения усилителя мощности методом дефазирования (УМДФ) для бортовых ретрансляторов систем спутниковой связи (спутниковых ретрансляторов), позволяющих обеспечить требования к основным системным показателям: высокую эффективность использования мощности космической платформы, низкий уровень внеполосного излучения и допустимую вероятность ошибки. Усилитель мощности является окончательным усилителем спутникового ретранслятора. Его место в канале связи отмечено на рисунке 1.

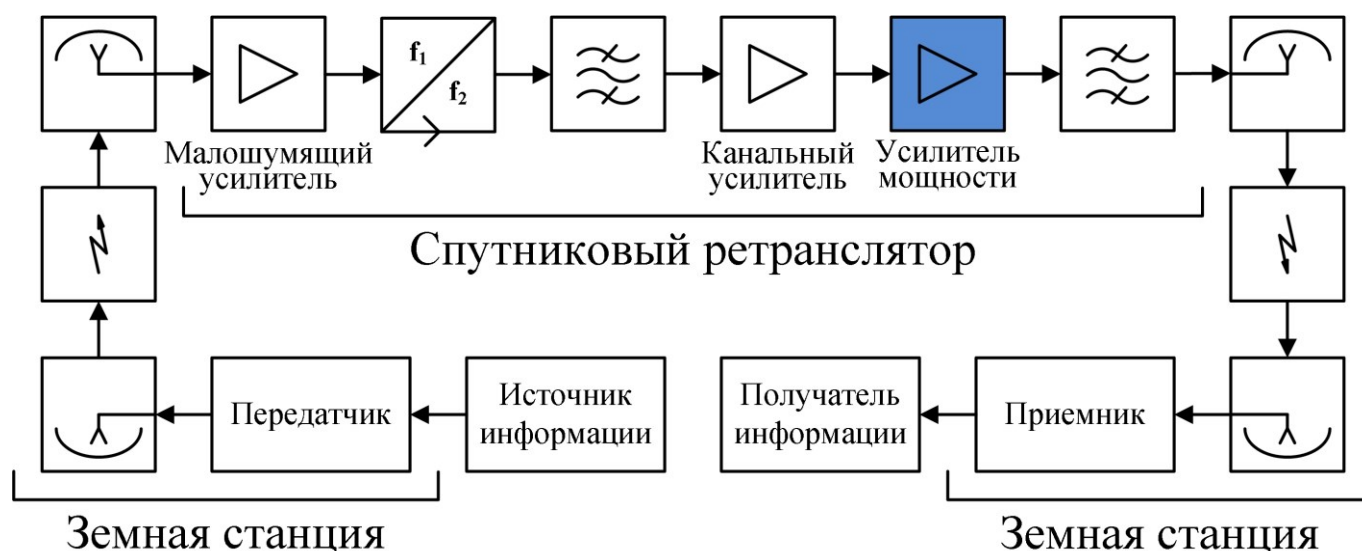


Рисунок 1 – Упрощенная схема спутникового канала связи при прямой ретрансляции сигнала

Применяемые в спутниковых ретрансляторах усилители имеют коэффициент полезного действия (КПД), не превышающий примерно 75% в режиме насыщения. При усилении сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией возникают нелинейные искажения. Для их снижения широко применяются методы предискажения сигнала на борту космического аппарата и в передающей земной станции. Вне зависимости от применения или неприменения этих методов с ростом пик-фактора усиливаемого сигнала для сохранения линейности требуется снижать загрузку усилителя полезным сигналом. Это приводит к уменьшению КПД и, как следствие, к неэффективному использованию ограниченной мощности космической платформы.

Существующая потребность в снижении потребления мощности космической платформы без ущерба качеству ретранслируемого сигнала делает актуальной разработку и анализ новых технических решений, позволяющих повысить линейность и энергетическую эффективность усилителей мощности спутниковых ретрансляторов.

Одним из путей построения линейных высокоэффективных усилителей является метод дефазирования. Этот метод позволяет достигать высокого КПД за счет работы усилителей в энергетически выгодном нелинейном режиме.

Метод дефазирования основывается на представлении усиливаемого сигнала с переменной амплитудой суммой двух сигналов с постоянной амплитудой. Входной сигнал с амплитудно-фазовой модуляцией $S(t)$, амплитуда которого ограничена сверху значением V_m , разделяется на две фазомодулированные составляющие $S_1(t)$ и

$S_2(t)$ с равными постоянными амплитудами в блоке, называемом разделителем сигнала. Принцип такого разделения проиллюстрирован в комплексной плоскости на рисунке 2а. Составляющие входного сигнала усиливаются в идентичных высокоэффективных нелинейных усилителях мощности. Усиленные сигналы $S_{o1}(t)$ и $S_{o2}(t)$ комбинируются в мосте сложения, формируя усиленную копию входного сигнала $S_{out}(t)$. Отсутствие у составляющих входного сигнала амплитудной модуляции позволяет исключить нелинейные искажения сигнала, которые возникают в усилителях мощности при изменениях амплитуды усиливаемого сигнала. Последовательность преобразований входного сигнала проиллюстрирована на рисунке 2б.

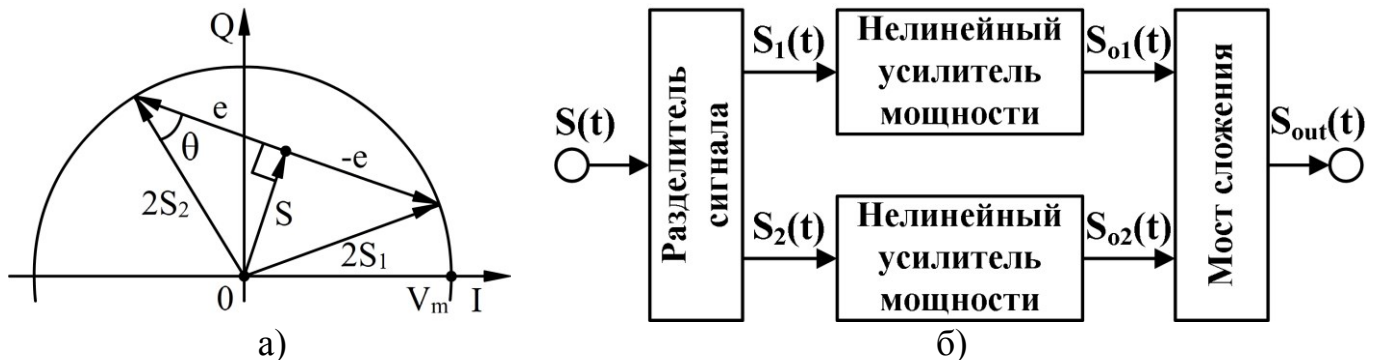


Рисунок 2 - Принцип разделения сигнала на фазомодулированные составляющие (а) и схема линейного усиления методом дефазирования (б)

Степень разработанности темы. Идея метода дефазирования принадлежит М. Ширексу, который в 1935 году с целью снижения энергопотребления высокомогущных радиовещательных передатчиков предложил схему усиления мощности амплитудно-модулированного сигнала. Возможность использования метода дефазирования для усиления сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией была в дальнейшем показана Д. Коксом. Работы Д. Кокса 1970-х годов положили начало интенсивному развитию метода дефазирования, который продолжает развиваться по настоящее время, о чем свидетельствует большое количество опубликованных за последние годы работ.

В развитие метода дефазирования внесли вклад многие ученые, в том числе отечественные: В.Н. Громорушкин, Р.Ю. Иванюшкин, В.С. Климов, В.Б. Козырев, Н.С. Фузик, Н.П. Хмырова и другие. основополагающие зарубежные исследования метода связаны с такими именами, как А. Бэйтман, А. Валдовинос, Р. Вилкинсон, Л. Волкер, Ю. Ех, М. Йохансон, Ф. Касадевол, Л. Коуч, Р. Лек, Дж. Макджихан, Дж. Марвил, Дж. Олмос, Л. Сандстром, Ф. Рааб, А. Рустако, С. Хетцель, Б. Ши, М. Ширекс и многими другими.

Исследования в основном направлены на преодоление трех проблем, препятствующих широкому применению метода дефазирования: проблемы точности формирования составляющих входного сигнала в разделителе сигнала, проблемы идентичности трактов усиления мощности и проблемы эффективности комбинирования усиленных составляющих входного сигнала в мосте сложения.

Существующие исследования метода дефазирования в значительной мере способствовали совершенствованию технических решений усилителя мощности наземных передатчиков. В то же время, ряд актуальных вопросов, связанных с возможностью применения метода дефазирования в спутниковых ретрансляторах,

не раскрыт в достаточной степени. К таким вопросам необходимо отнести следующие:

- разработка технических решений усилителя мощности спутникового ретранслятора, сигнал на входе которого является радиочастотным (в отличие от наземных передатчиков, в которых на УМДФ можно подавать сигнал на видеочастоте) и может иметь заранее неизвестный вид модуляции;

- анализ линейности и энергетической эффективности усиления сигналов, применяемых в системах спутниковой связи и вещания.

Этим не изученным в достаточной степени вопросам, которые обусловлены особенностями применения спутниковых ретрансляторов, посвящены исследования метода дефазирования, выполненные в диссертации.

Целью диссертационной работы является разработка новых научно обоснованных технических решений усилителя мощности спутникового ретранслятора, построенного методом дефазирования, позволяющих:

- снизить потребление ограниченной мощности космической платформы;
- повысить линейность усиления используемых в спутниковой связи сигналов, обеспечив минимальные искажения усиливаемых сигналов и минимальный уровень внеполосного излучения, которые влияют на спектральную эффективность системы спутниковой связи;

- обеспечить возможность усиления радиочастотного сигнала с произвольной, заранее неизвестной модуляцией.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**.

1. Аналитический обзор методов снижения нелинейных искажений сигналов в спутниковых ретрансляторах.

2. Разработка технических решений УМДФ, сигнал на входе которого является радиочастотным и может иметь произвольную, заранее неизвестную модуляцию.

3. Анализ нелинейных искажений, которые возникают при усилении собственных системам спутниковой связи и вещания сигналов в усилителе, построенном по предложенным техническим решениям.

4. Сравнительный анализ эффективности технических решений, направленных на снижение нелинейных искажений сигналов в спутниковых ретрансляторах методом дефазирования и методами, применяемыми в настоящее время.

5. Выработка практических рекомендаций по использованию предложенных технических решений УМДФ в спутниковых ретрансляторах.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Обоснованы новые технические решения усилителя мощности спутникового ретранслятора, построенного методом дефазирования, которые за счет предложенных усовершенствований известных аналогов позволяют усиливать сигнал с произвольной, заранее неизвестной модуляцией, повышать линейность и КПД усилителя.

2. Выполнено исследование влияния на линейность и энергетическую эффективность усиления постоянной времени пикового детектора, который используется в предложенных УМДФ для оценки максимального значения амплитуды усиливаемого сигнала.

3. Исследовано снижение нелинейных искажений, которое достигается в предложенных УМДФ за счет использования схем с одним фазовым модулятором вместо двух.

4. Разработан новый аналитический метод оценки влияния различия фазовых сдвигов и коэффициентов усиления нелинейных усилителей мощности в трактах УМДФ (рисунок 2б) на его линейность при усилении многоканальных сигналов. В отличие от известных экспериментальных и имитационных методов он позволил оценить уровень мощности нелинейных искажений сигнала в занимаемой им полосе частот и внеполосного излучения в смежной полосе с помощью аналитического расчета корреляционных функций.

5. Разработан комплекс методик оценки показателей линейности усиления характерных для спутниковой связи сигналов в предложенных УМДФ. В части методик комплекса впервые учтена неидеальность предложенных в работе усовершенствований УМДФ, в части методик используются новые методы оценки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в том, что разработанные в диссертации методики дают возможность научно обоснованно выбирать параметры предложенных УМДФ, при которых выполняются требования, предъявляемые к линейности усилителей. Разработанный аналитический метод оценки влияния неидентичности трактов УМДФ на его линейность при усилении многоканальных сигналов может быть использован для проверки правильности оценки уровня мощности нелинейных искажений сигнала в занимаемой им полосе частот и внеполосного излучения в смежной полосе, выполненной известными имитационными и экспериментальными методами.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе выработанных в ней практических рекомендаций могут быть созданы новые высокоэффективные бортовые усилители мощности для спутниковых ретрансляторов. Предложенные защищенные патентами усовершенствования УМДФ позволяют усиливать сигнал с произвольной, заранее неизвестной модуляцией, что типично для спутниковых ретрансляторов, и повышать линейность и КПД усилителя по сравнению с аналогами. При усилении характерных для спутниковой связи сигналов и заданных требованиях к помехоустойчивости и внеполосному излучению при определенных параметрах УМДФ ограниченная мощность космической платформы расходуется более экономно, чем при использовании применяемых в настоящее время в спутниковой связи методов предискажения сигнала.

Использование и внедрение результатов диссертации подтверждено актами, приложенными к диссертации. Результаты диссертационной работы использованы при эскизном проектировании бортовых ретрансляционных комплексов спутниковой связи в рамках составной части опытно-конструкторской работы «Построение бортового ретрансляционного комплекса фиксированной спутниковой связи космических аппаратов для системы спутниковой конфиденциальной мобильной связи» по заказу АО «ИСС»; использованы при выборе блока усилителя мощности терминальной станции в рамках работ на объекте «Строительство аэродрома «Темп», о. Котельный архипелага Новосибирские острова» по заказу ООО «ЗАПСИБГАЗПРОМ - ГАЗИФИКАЦИЯ»; внедрены в учебный процесс кафедры радио и информационных технологий

факультета радиотехники и кибернетики Московского физико-технического института (МФТИ) при разработке курса лекций, преподаваемого студентам МФТИ в рамках программы дисциплины «Теоретические основы спутниковой приемопередающей радиоаппаратуры».

Методология и методы исследования. В работе используются методы математического моделирования, теории случайных процессов и спектрального анализа. Теоретическую основу исследования составили работы С.В. Бородича по многоканальным системам радиосвязи, Д. Прокиса по теории цифровой связи и К.М. Гарайбеха по имитационному моделированию нелинейных беспроводных систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Введение схемы нормирования амплитуды входного сигнала с пиковым детектором позволяет применять метод дефазирования в условиях неопределенности модуляции входного сигнала. Если вид модуляции известен, то за счет надлежащего выбора постоянной времени пикового детектора достигается выигрыш в эффективности использования мощности космической платформы относительно нормирования амплитуды на ее максимальное значение.

2. Применение в разделителе сигнала УМДФ предложенных схем с одним фазовым модулятором вместо двух уменьшает влияние отклонения от номинального значения коэффициента преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах на линейность усиления по сравнению с аналогами, в которых каждая из двух составляющих входного сигнала формируется на выходе отдельного фазового модулятора.

3. Разработанные методики оценки показателей нелинейных искажений позволяют научно обоснованно определять допустимые значения параметров предложенных УМДФ, при которых обеспечивается требуемая линейность усиления применяемых в спутниковой связи сигналов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректностью применения математического аппарата и согласованностью результатов, полученных с помощью разработанных методик, с результатами теоретического анализа и имитационного моделирования. Полученные результаты обсуждались со специалистами на научных конференциях и с рецензентами статей, опубликованных соискателем в научных журналах.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в пяти статьях рецензируемых научных изданий, входящих в перечень ВАК, и доложены соискателем на 56-й и 57-й Всероссийских научных конференциях МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» (г. Долгопрудный, 2013-2014), 8-й Международной научной конференции «Технологии информационного общества» (Москва, 2014), 69-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» РНТОРЭС имени А.С. Попова (Москва, 2014), 18-й Международной научной конференции «Решетнёвские чтения» (г. Красноярск, 2014), 3-й Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь» (г. Омск, 2015) и 3-й Международной конференции «Engineering & Telecommunication En&T 2016» (г. Долгопрудный, 2016).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен аналитический обзор методов снижения нелинейных искажений сигналов в спутниковых ретрансляторах. Рассмотрены применяемые методы, к которым относятся предискажение сигналов в ретрансляторе на борту космического аппарата и в передающей земной станции, и альтернативный метод дефазирования.

Анализ применяемых методов предискажения показал, что потребность в дальнейшем снижении потребления мощности космической платформы без ущерба качеству ретранслируемых сигналов сохраняется. В качестве альтернативы предложено использовать метод дефазирования, который позволяет линейно усиливать сигнал с помощью усилителей мощности, работающих в энергетически выгодном нелинейном режиме.

Выполненный аналитический обзор работ, посвященных усилению сигналов методом дефазирования, показал, что известные результаты исследований этого метода в значительной мере способствовали совершенствованию усилителей мощности наземных передатчиков. Применение метода дефазирования в спутниковых ретрансляторах имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при разработке и анализе их усилителей мощности:

1. Сигнал на вход усилителя мощности спутникового ретранслятора (в отличие от наземных передатчиков) обязательно поступает на радиочастоте. Такой сигнал не может быть разделен на фазомодулированные составляющие в разделителе сигнала с блоком цифровой обработки, который используется в большинстве современных усилителей мощности, построенных методом дефазирования (УМДФ). Поэтому необходимо рассмотреть альтернативные УМДФ, способные усиливать сигнал на радиочастоте.

2. Для применения метода дефазирования необходимо знать амплитуду усиливаемого сигнала, нормированную на некоторый пороговый уровень V_m (рисунок 2а), который равен или превышает максимальное значение амплитуды. В известных работах не уделяется внимание поиску порогового уровня и нормированию амплитуды, поскольку в наземных передатчиках ее максимальное значение известно заранее. В спутниковых ретрансляторах ситуация обстоит иначе. Модуляция ретранслируемого сигнала может быть не известна, что приводит к необходимости реализации способа определения порогового уровня амплитуды сигнала и ее нормирования.

3. Системам спутниковой связи свойственны определенные виды сигналов, наиболее распространенные из которых - одноканальные сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией единственной несущей и многоканальные сигналы с частотным разделением. При разработке УМДФ целесообразно проанализировать линейность и энергетическую эффективность усиления этих сигналов.

Необходимость повышения эффективности применяемых методов снижения нелинейных искажений и особенности применения метода дефазирования в спутниковых ретрансляторах определили круг задач, результатом решения которых стали новые технические решения УМДФ и научно обоснованные рекомендации по их рациональному использованию в спутниковых ретрансляторах.

Во **второй главе** обоснованы новые варианты построения усилителя мощности спутникового ретранслятора методом дефазирования; выявлены основные факторы, оказывающие влияние на линейность усилителя, и определен характер их воздействия.

Предложены четыре новые схемы УМДФ (УМ №1 - 4). Усилители содержат по два нелинейных усилителя мощности, идентичность которых обеспечивается технологически без применения специальных методов компенсации их разбаланса. Изготовление одинаковых усилителей представляется возможным, поскольку производство изделий для космического применения носит штучный характер и предполагает их тщательный отбор и настройку. Для комбинирования усиленных составляющих входного сигнала применяется «развязанный» мост сложения, обеспечивающий отсутствие нелинейных искажений. При этом балластная нагрузка моста для повышения КПД усилителя может быть заменена схемой «рекуперации» - восстановления части мощности.

В предложенных УМДФ используется разделитель сигнала, способный разделять на фазомодулированные составляющие характерный для спутниковых ретрансляторов радиочастотный сигнал с неизвестной заранее модуляцией. Возможность работы с радиочастотным сигналом унаследована от аналогов, предложенных в работах М. Ширекса и Д. Кокса. В отличие от упомянутых работ в предложенных УМДФ введены схема нормирования амплитуды входного сигнала с пиковым детектором и блок преобразования первой составляющей входного сигнала во вторую. Схема нормирования амплитуды обеспечивает нормирование амплитуды входного сигнала, необходимое для формирования фазомодулированных составляющих при отсутствии сведений о виде его модуляции. Использование блока преобразования первой составляющей входного сигнала во вторую, как показано в работе далее, позволяет повысить линейность усиления по сравнению с аналогами, в которых каждая из составляющих формируется на выходе отдельного фазового модулятора.

Исследуемые УМДФ отличаются друг от друга схемами разделителя сигнала. В УМ №1 и УМ №3 нелинейное арксинусное преобразование амплитуды входного сигнала выполняется с помощью нелинейного элемента, а в УМ №2 и УМ №4 – с помощью обратной связи по усилению. В разделителях сигнала в УМ №1 и УМ №2 составляющие входного сигнала формируются на выходах каждого из двух фазовых модуляторов. В отличие от этих УМДФ в УМ №3 и УМ №4 используется только один фазовый модулятор. УМ №3 и УМ №4 имеют общий принцип работы, проиллюстрированный на рисунке 3а. Для формирования первой составляющей входного сигнала $S_1(t)$ на соответствующий блок поступают входной сигнал с амплитудно-фазовой модуляцией $S(t) = A(t)\cos[\omega t + \varphi(t)]$, его фазовая компонента, сдвинутая по фазе на 90° , $2\sin[\omega t + \varphi(t)]$ и сама эта компонента $2\cos[\omega t + \varphi(t)]$, полученная в ограничителе. В блоке оценивается угол дефазирования $\theta(t)$ (отмечен на рисунке 2а), равный арксинусу нормированной амплитуды входного сигнала, и осуществляется фазовая модуляция этим сигналом компоненты $2\sin[\omega t + \varphi(t)]$. Полученный сигнал $S_1(t) = 2\sin[\omega t + \varphi(t) + \theta(t)]$ преобразуется в сигнал $S_2(t) = -2\sin[\omega t + \varphi(t) - \theta(t)]$ в соответствующем блоке (рисунок 3б). Сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ являются искомыми составляющими входного сигнала, поскольку они имеют постоянную огибающую, и их сумма пропорциональна входному сигналу.

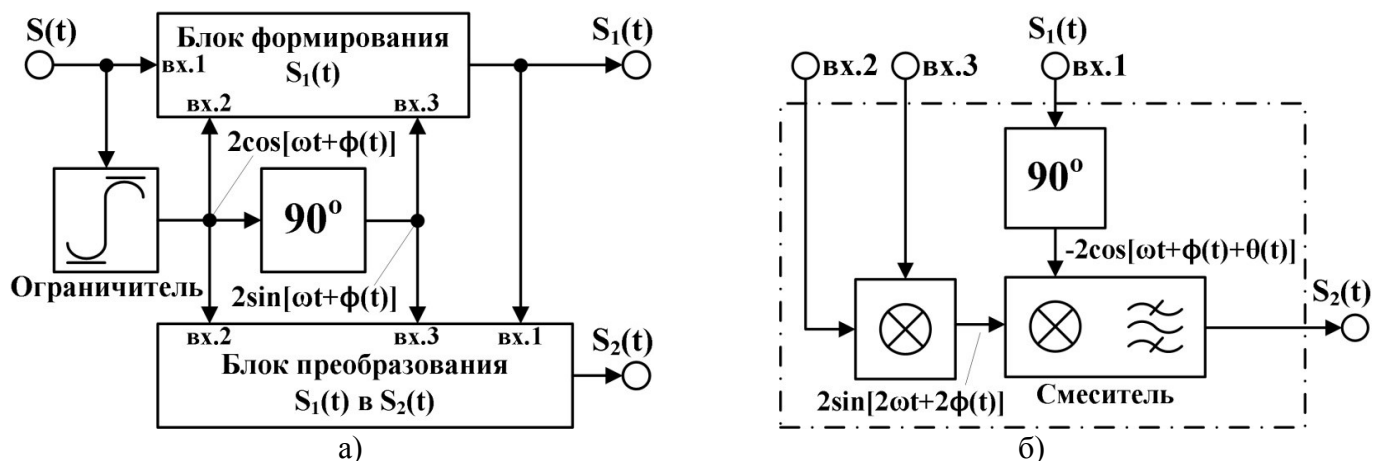


Рисунок 3 - Схема разделителя сигнала (а) с блоком преобразования первой составляющей сигнала во вторую составляющую (б)

Выполненный анализ нелинейных искажений усиленного сигнала позволил выявить основные факторы, влияющие на линейность усиления, и определить характер их воздействия. Различие коэффициентов усиления и фазовых сдвигов в трактах усиления мощности приводит к нелинейным искажениям сигнала, обусловленным неполной компенсацией в мосте сложения разностной компоненты усиленных составляющих сигнала. Непостоянство сигнала на выходе пикового детектора, возникающее по причине конечности его постоянной времени, приводит к искажениям амплитуды усиленного сигнала. Отклонение коэффициентов преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах неодинаково влияет на тип возникающих нелинейных искажений при разных вариантах построения УМДФ. В усилителях с одним фазовым модулятором искажения отсутствуют (УМ №4) или имеют только амплитудную составляющую (УМ №3). В усилителях с двумя фазовыми модуляторами (УМ №1 и УМ №2) искажаются как амплитуда, так и фаза сигнала.

В результате анализа получены аналитические выражения, описывающие зависимость комплексной огибающей усиленного сигнала от варианта построения УМДФ v и его параметров: μ , ε и τ . Неидентичность трактов усиления охарактеризована относительным отклонением комплексных коэффициентов усиления сигнала в трактах УМДФ от их среднего значения μ ; ошибки фазовых модуляторов - относительным отклонением коэффициента преобразования модулирующего сигнала в фазу от номинального значения в фазовом модуляторе ε ; неточность нормирования амплитуды входного сигнала – постоянной времени пикового детектора по разряду τ . При одновременном действии этих факторов комплексная огибающая усиленного сигнала выражена следующим образом с точностью до постоянного множителя:

$$S_{out}(t) = e^{j[\varphi(t)+b_v\theta(t)]}\{\sin[\theta(t) + a_v\theta(t)] + j\mu \cos[\theta(t) + a_v\theta(t)]\}, \quad (1)$$

где

$$\theta(t) = \arcsin \left[\frac{A(t)}{V(t,\tau)} \right] \quad (2)$$

- оценка угла дефазирования; a_v и b_v – параметры, зависимость которых от относительных отклонений коэффициента преобразования модулирующего сигнала в фазу от номинального значения в фазовых модуляторах ε_1 и ε_2 приводится в таблице:

Таблица - Зависимость параметров a_v и b_v от ε_1 и ε_2 при разных вариантах УМДФ (v)

v	1	2	3	4
a_v	$0,5(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$	$0,5(\varepsilon_2-\varepsilon_1)/(1+\varepsilon_1)$	ε_1	0
b_v	$0,5(\varepsilon_1-\varepsilon_2)$	$0,5(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/(1+\varepsilon_1)$	0	0

$V(t, \tau)$ – сигнал на выходе пикового детектора, который повторяет пики амплитуды входного сигнала, а между пиками спадает экспоненциально:

$$V(t, \tau): \frac{\partial V(t, \tau)}{\partial t} = \begin{cases} \frac{\partial A(t)}{\partial t}, & V(t, \tau) = A(t), \frac{\partial A(t)}{\partial t} \geq -\frac{A(t)}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \\ -\frac{A(t)}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, & V(t, \tau) = A(t), \frac{\partial A(t)}{\partial t} < -\frac{A(t)}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \\ -\frac{V(t, \tau)}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, & V(t, \tau) > A(t) \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (1) с учетом (2) и (3) является математической моделью преобразования сигнала в предложенных УМДФ. Эта модель лежит в основе выполненного в диссертации анализа.

Разработан алгоритм, имитирующий преобразование сигнала в усилителе. Алгоритм позволяет в отдельности и совместно учитывать влияние исследуемых факторов, а также имитировать преобразование сигнала как с ограниченной, так и с неограниченной амплитудой. Алгоритм реализован в программе для ЭВМ, на которую получено авторское свидетельство.

Полученные выражения и разработанный алгоритм используются в главах 3-5 для оценки показателей эффективности предложенных УМДФ и проверки правильности разработанных методик их оценки.

Третья глава посвящена анализу нелинейных искажений, возникающих при усилении многоканальных сигналов с частотным разделением в новых УМДФ, которые описаны в главе 2.

При анализе последствия нелинейности усиления оцениваются уровнем мощности нелинейных искажений в занимаемой сигналом полосе частот NPR (Noise Power Ratio) и внеполосного излучения в смежной полосе ABPR (Adjacent Band Power Ratio). В качестве модели многоканального сигнала используется узкополосный гауссовский случайный процесс с нулевым средним значением и прямоугольным спектром единичной ширины. Принято, что сигнал преобразуется в УМДФ в соответствии с полученными в главе 2 выражениями, связывающими выходной сигнал с входным сигналом и параметрами УМДФ. В результате анализа получены зависимости показателей NPR и ABPR от параметров УМДФ, отражающих влияние каждого из основных выявленных в главе 2 факторов.

При оценке влияния неидентичности трактов усиления мощности использованы теоремы Бассгенга и Винера-Хинчина. С их помощью получены зависимости показателей NPR и ABPR от относительного отклонения комплексных коэффициентов усиления сигнала в трактах УМДФ от их среднего значения μ :

$$NPR = \frac{2 \left| 1 + \frac{j}{2} \rho \mu \right|^2}{|\mu|^2 \left[W_e(0) - \frac{1}{2} \rho^2 \right]}; \quad ABPR(\Delta F) = \frac{2 - 2\rho \operatorname{Im}(\mu) + |\mu|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} W_e(f) df}{|\mu|^2 \int_{\Delta F - \frac{1}{2}}^{\Delta F + \frac{1}{2}} W_e(f) df}, \quad 1 \leq \Delta F \leq 2, \quad (4)$$

где ΔF – разность центральных частот соседних каналов, выраженная в ширинах их полосы частот; $\rho = |R_{eS}(0)|$ – модуль средней взаимной мощности сигнала $e(t) = j[2PAPR - A(t)]^{0,5} \exp[j\varphi(t)]$ (отмечен на рисунке 2а) и входного сигнала $S(t) = A(t)\exp[j\varphi(t)]$; $W_e(f) = \int R_e(\tau)\exp(-j2\pi f\tau)d\tau$ – спектральная плотность мощности сигнала $e(t)$; PAPR – пик-фактор входного сигнала $S(t)$.

Корреляционные функции $R_{eS}(\tau)$ и $R_e(\tau)$, необходимые для расчета ρ и $W_e(f)$ в (4) впервые получены аналитически:

$$R_e(\tau) = \begin{cases} \frac{\pi^2 PAPR^3}{8[1-\text{sinc}^2(\tau)]} \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) \left[\frac{PAPR}{4} \frac{\text{sinc}(\tau)}{1-\text{sinc}^2(\tau)} \right]^{2k+1} \left\{ \frac{C_{2k+2}^{k+1} \cdot {}_1F_1\left[k+\frac{3}{2}; k+3; -\frac{PAPR}{1-\text{sinc}^2(\tau)}\right]}{(k+2)!} \right\}^2, & \tau \neq 0, \\ 2(PAPR - 1), & \tau = 0 \end{cases}$$

$$R_{eS}(\tau) = j\pi PAPR e^{-\frac{PAPR}{2}} I_1\left(\frac{PAPR}{2}\right) \text{sinc}(\tau), \quad (5)$$

где
$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, & x \neq 0, \\ 1, & x = 0 \end{cases}$$

$I_1(z) = \frac{z}{\pi} \int_0^{\pi} e^{z\cos(t)} \sin^2 t dt$ – модифицированная функция Бесселя первого рода;

${}_1F_1(a; b; z) = \frac{\Gamma(b)}{\Gamma(b-a)\Gamma(a)} \int_0^1 e^{zt} t^{a-1} (1-t)^{b-a-1} dt$ – вырожденная гипергеометрическая функция порядка 1,1.

При оценке влияния ошибок фазовых модуляторов на показатели NPR и АВРР использовались те же методы, что и при оценке влияния неидентичности трактов усиления, за исключением того, что в одном из случаев корреляционная функция оценивалась с использованием имитационного моделирования. Выполненный анализ показал, что относительное отклонение коэффициентов преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах неодинаково влияет на показатели NPR и АВРР при разных вариантах построения УМДФ. При общих для них требованиях к максимальному модулю этого отклонения УМ №2 имеет меньшие значения показателей NPR и АВРР, которые могут быть гарантированы при выполнении этих требований фазовыми модуляторами. При пик-факторе входного сигнала 8,4 дБ УМ №3 позволяет гарантировать NPR на 4 дБ выше, чем УМ №1. Величина выигрыша увеличивается с ростом пик-фактора. Такой же вывод справедлив для уровня мощности внеполосного излучения в смежной полосе при отличии центральных частот соседних каналов не более чем на 1,5 ширины их полосы частот.

Неточность нормирования амплитуды приводит к нелинейности «с памятью», что затрудняет получение аналитических выражений, связывающих показатели NPR и АВРР с постоянной времени пикового детектора τ . Поэтому необходимые корреляционные функции оценены с помощью имитационного моделирования. В результате моделирования получены поточечная зависимость NPR(τ) и линейная зависимость АВРР от ΔF и $\lg(\tau)$, аппроксимирующая результаты моделирования. Зависимости показателей от постоянной времени пикового детектора проиллюстрированы на рисунке 4. Зависимость АВРР от τ на рисунке 4б приведена для $\Delta F = 1,42$. Такая разность центральных частот соседних каналов находится в соответствии с Планом для радиовещательной спутниковой службы в полосах частот 11,7-12,2 ГГц в Районе 3 и 11,7-12,5 ГГц в Районе 1 в Регламенте радиосвязи.

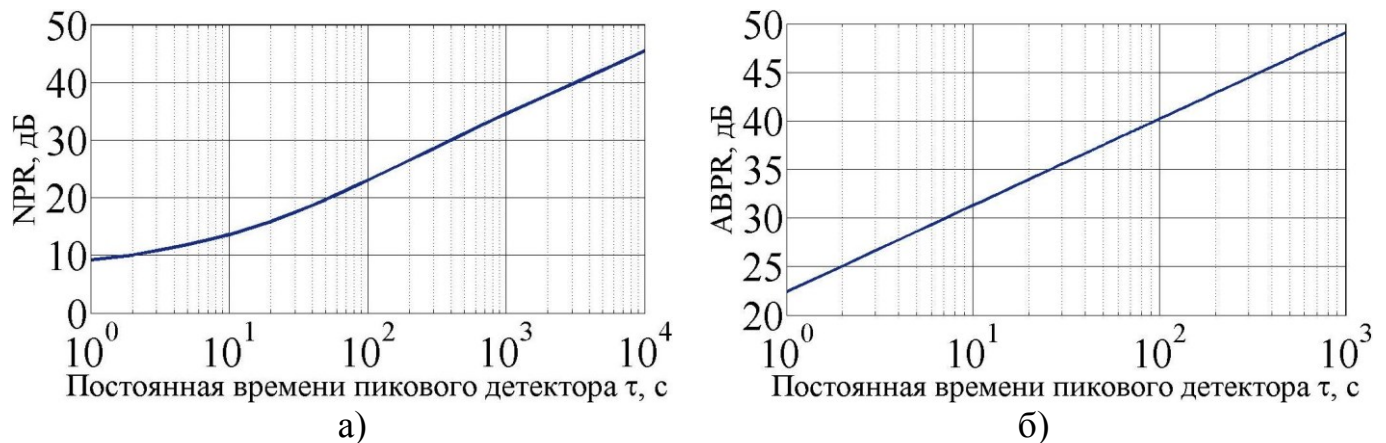


Рисунок 4 - Зависимости NPR (а) и АВРР при $\Delta F = 1,42$ (б) от постоянной времени τ

На основе результатов анализа разработаны методики, позволяющие оценивать значения исследуемых показателей, которые могут быть гарантированы при нахождении параметров УМДФ в ограниченной требованиями области ($|\varepsilon_1| \leq \varepsilon_{\max}$, $|\varepsilon_2| \leq \varepsilon_{\max}$, $|\mu| \leq \mu_{\max}$, $\tau \geq \tau_{\min}$). Методики могут использоваться для подтверждения выполнения требований технического задания на усилитель, предъявляемых к линейности усиления многоканальных сигналов. Достоверность предложенных методик подтверждена результатами имитационного моделирования. При значениях показателей в практически интересующем диапазоне до 40 дБ погрешность оценки влияния неидентичности трактов усиления не превышает 1 дБ; погрешность оценки влияния ошибок фазовых модуляторов не превосходит 1 дБ при использовании УМ №1 и УМ №3 и 2,5 дБ при использовании УМ №2; погрешность оценки влияния неточности нормирования амплитуды входного сигнала не превосходит 0,5 дБ.

В результате анализа показано, что для гарантирования $NPR = 30$ дБ и $ABPR = 40$ дБ (при $\Delta F = 1,42$), комплексные коэффициенты усиления трактов не должны отличаться от их среднего значения более чем на 2-3%; постоянная времени пикового детектора должна выбираться в несколько сот раз больше величины, обратной ширине полосы частот входного сигнала; отклонение коэффициентов преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах от номинального значения не более 14% оказывается достаточным для выбора любого из исследуемых вариантов построения УМДФ.

Четвертая глава посвящена анализу нелинейных искажений, возникающих при усилении цифровых одноканальных сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией в новых УМДФ, которые описаны в главе 2. В качестве модели одноканального сигнала используется комплексный случайный процесс с циклической стационарностью.

Также как и при анализе линейности усиления многоканальных сигналов внеполосное излучение оценивается уровнем его мощности в смежной полосе АВРР. В случае усиления сигнала с импульсами прямоугольной формы и нелинейности «без памяти» спектр усиленного сигнала пропорционален $|\text{sinc}(f)|^2$. Показатель АВРР в этом случае определяется выражением:

$$ABPR(\Delta F) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |\text{sinc}(f)|^2 df}{\int_{\Delta F - \frac{1}{2}}^{\Delta F + \frac{1}{2}} |\text{sinc}(f)|^2 df}, \quad |\Delta F| \geq 1 \quad (6)$$

и не зависит от линейности усиления. Ширина полосы частот сигнала принята единичной.

Если сигнал имеет импульсы прямоугольной формы или нелинейность «обладает памятью», то показатель оценивается с помощью имитационного моделирования.

Нелинейные искажения сигнала влияют на помехоустойчивость его приема. В качестве показателя снижения помехоустойчивости используется увеличение отношения сигнал-шум $\Delta E_S/N_0$, которое необходимо обеспечить на входе приемника для гарантирования заданной вероятности ошибки:

$$\Delta \frac{E_S}{N_0} \triangleq \frac{\left(\frac{E_S}{N_0}\right)^{\text{нел}}}{\frac{E_S}{N_0}}, \quad (7)$$

где E_S/N_0 – отношение средней энергии сигнала, приходящейся на один символ, к спектральной плотности мощности аддитивного белого гауссовского шума на входе приемника при передаче сигнала по линейному каналу, при котором вероятность ошибки равна заданному значению; $(E_S/N_0)^{\text{нел}}$ – таким же образом определяемое отношение в случае канала с нелинейностью.

Отношение сигнал-шум $(E_S/N_0)^{\text{нел}}$ в (7) оценивается по зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал-шум E_S/N_0 , получаемой на основе метода, который предложен в работе М. Джеручима в 1984 году. Метод позволяет оценивать BER по аналитической формуле, в которой в качестве параметров используются отсчеты на входе решающего устройства, полученные в отсутствие шума.

В ходе анализа на примере сигнала с 16-позиционной амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМн-16) и импульсами прямоугольной формы получены ограничения на значения параметров УМДФ, при которых $\Delta E_S/N_0$ при $BER = 10^{-5}$ не превышает 0,1 дБ. Комплексные коэффициенты усиления трактов не должны отличаться от их среднего значения более чем на 3,6%; постоянная времени пикового детектора должна выбираться примерно в 11 раз больше символьного интервала; отклонения коэффициентов преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах от номинального значения не более 6,5% оказывается достаточным для выбора любого из исследуемых вариантов построения УМДФ. При этом влияние отклонения коэффициентов преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах отличается при использовании разных УМДФ (рисунок 5). Использование блока преобразования первой составляющей входного сигнала во вторую (рисунок 3б) в УМ №3 позволяет ослабить требования к максимальному модулю ϵ_{\max} этого отклонения по сравнению с УМ №1 и УМ №2, в которых этот блок не используется. При требованиях к $\Delta E_S/N_0$ в диапазоне 0,1-1,0 дБ выигрыш составляет 65-190% по сравнению с УМ №1 и 25-160% по сравнению с УМ №2.

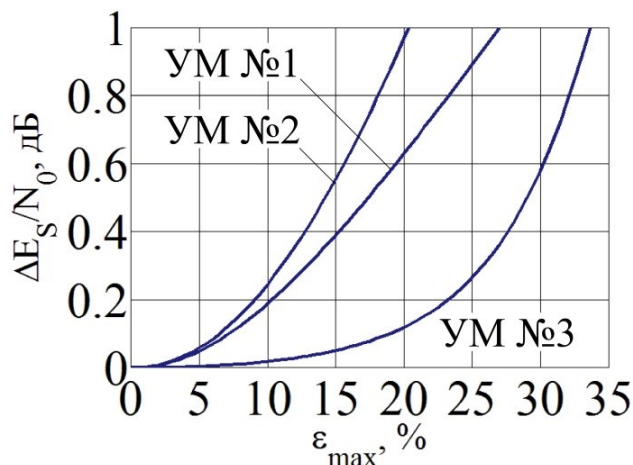


Рисунок 5 - Зависимости $\Delta E_S/N_0$ от максимального отклонения коэффициента преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах ε_{\max}

В результате анализа разработана методика, позволяющая оценивать $\Delta E_S/N_0$ и АВРР при усилении одноканальных сигналов с импульсами заданной формы в усилителе с заданным правилом преобразования комплексной огибающей сигнала в нем. Методика может использоваться для подтверждения выполнения требований технического задания на усилитель, предъявляемых к линейности усиления одноканальных сигналов. Разработанная методика используется в главе 5 для сравнительной оценки эффективности методов снижения нелинейных искажений, возникающих при усилении одноканальных сигналов.

В **пятой главе** выполнен анализ эффективности построения усилителя мощности спутникового ретранслятора методом дефазирования и ее сравнение с эффективностями применяемых методов снижения нелинейных искажений. В главе даны практические рекомендации по рациональному использованию предложенных вариантов построения УМДФ.

Оценка эффективности выполняется с помощью показателя E , представляющего собой отношение минимальной средней мощности потребления идеального линейного усилителя, при которой выполняются заданные требования к вероятности битовой ошибки BER, к средней мощности потребления нелинейного усилителя, удовлетворяющего этим же требованиям и заданным требованиям к уровню внеполосного излучения АВРР. Показатель E служит мерой эффективности использования мощности космической платформы усилителем мощности при наличии нелинейных искажений сигнала. Эффективность использования мощности космической платформы принимает значения от 0 до 1. Чем эффективность выше, тем меньше требуется мощности для выполнения заданных требований. Ноль соответствует случаю невозможности выполнения требований, единица – случаю, когда метод приводит к идеальной линейности и мощность без потерь передается в выходной сигнал. Эффективность E выражается по формуле:

$$E = \frac{\eta}{\Delta SNR}, \quad (8)$$

где η - КПД усилителя мощности; ΔSNR - увеличение отношения сигнал-шум на входе приемника земной станции, показывающее во сколько раз необходимо поднять энергетику радиолинии относительно линейного усиления, чтобы обеспечить заданную вероятность битовой ошибки BER при приеме искаженного сигнала.

Показатель E (8) зависит от применяемого метода снижения нелинейных искажений сигнала в усилителе, параметров его реализации, сигнальной конструкции и требований к помехоустойчивости и внеполосному излучению. Для сравнения реализаций различных методов при передаче сигнала с заданной сигнальной конструкцией оцениваются максимальные значения E_{\max} показателя E на множестве настраиваемых параметров реализации метода, при которых удовлетворяются заданные требования к помехоустойчивости и внеполосному излучению. Если эффективности сравниваемых методов имеют значения E'_{\max} и E''_{\max} , то относительное снижение $\Delta P/P$ потребляемой усилителем мощности космической платформы за счет применения второго метода по сравнению с первым может быть выражено по формуле:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{E''_{\max} - E'_{\max}}{E''_{\max}}. \quad (9)$$

При оценке требования представляют собой ограничения вероятности битовой ошибки $BER \leq BER_{\max}$ и уровня мощности внеполосного излучения в смежной полосе $ABPR(\Delta F) \geq ABPR_{\min}$. Максимальная вероятность битовой ошибки BER_{\max} задана равной 10^{-5} , мощность внеполосного излучения ограничена уровнем $ABPR_{\min} = 30$ дБ. Уровень мощности излучения в смежной полосе $ABPR$ определяется при разности центральных частот соседних каналов $\Delta F = 1,42$ ширины их полосы. Оценка выполнена для одноканальных сигналов с сигнальными конструкциями стандарта DVB-S2 и многоканальных сигналов с заданным пороговым отношением сигнал-шум SNR_0 на входе приемника, при котором обеспечивается требуемая вероятность битовой ошибки $BER = BER_{\max}$.

Оцениваемые УМДФ дополнены схемой рекуперации части мощности с разностного выхода моста сложения. Заданы конкретные практически достижимые значения параметров высокоомощной части усилителя. Оценка выполнена в предположении, при котором неточность нормирования амплитуды является единственным фактором, влияющим на линейность усиления. Настраиваемым параметром является постоянная времени τ пикового детектора.

Выполненная оценка показала, что эффективность использования мощности космической платформы может быть повышена за счет выбора оптимального значения постоянной времени τ . Достижимое процентное снижение потребляемой мощности $\Delta P/P$ (9) графически представлено на рисунке 6. Эффективность использования мощности космической платформы растет при любой доле рекуперированной мощности. При рекуперации от 40% до 60% мощности (значения, достигнутые Р. Лангриджем и соавторами в работе 1999 года) при пороговом отношении сигнал-шум на входе приемника $SNR_0 \leq 20$ дБ обеспечивается снижение потребляемой мощности более чем на 60% при усилении многоканальных сигналов (рисунок 6а). При усилении одноканальных сигналов, сформированных с использованием фильтров типа корня из приподнятого косинуса с коэффициентом сглаживания 0,35, относительное снижение потребляемой мощности составляет примерно 30-40% при четырех- и восьмипозиционной фазовой манипуляции (ФМн-4 и ФМн-8) и 16-позиционной амплитудно-фазовой манипуляции (АФМн-16), и около 20% при АФМн-32 (рисунок 6б).

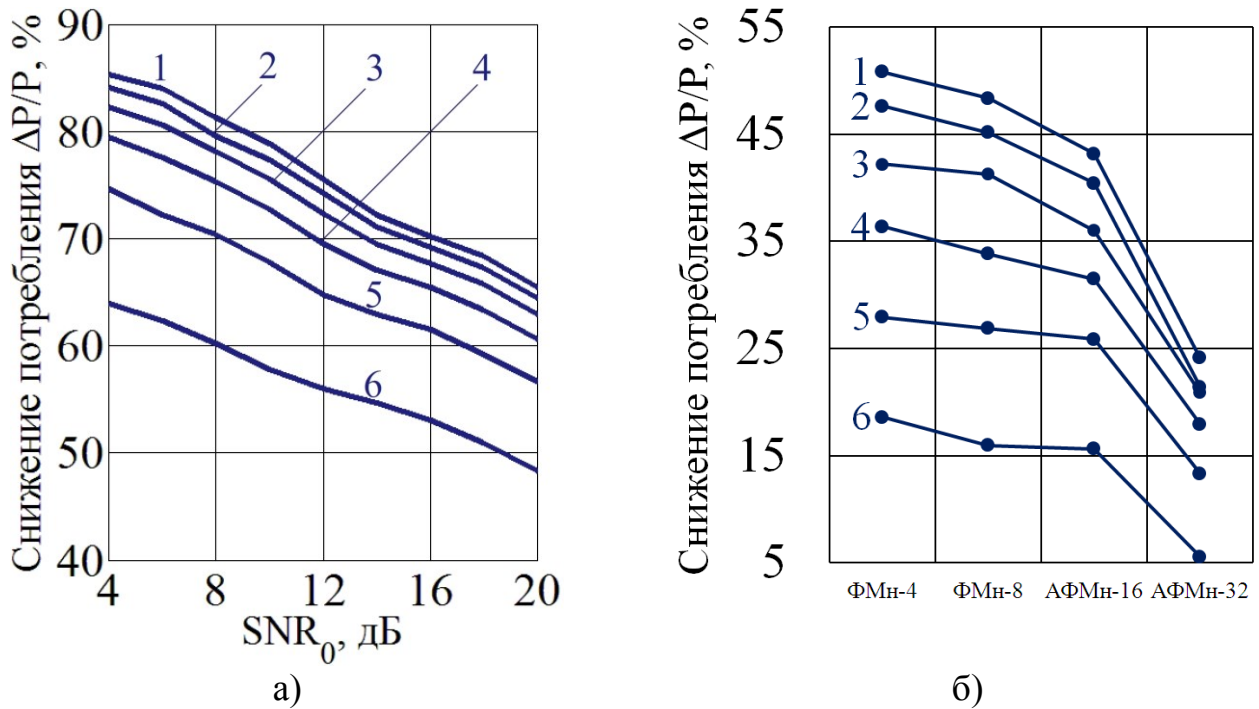
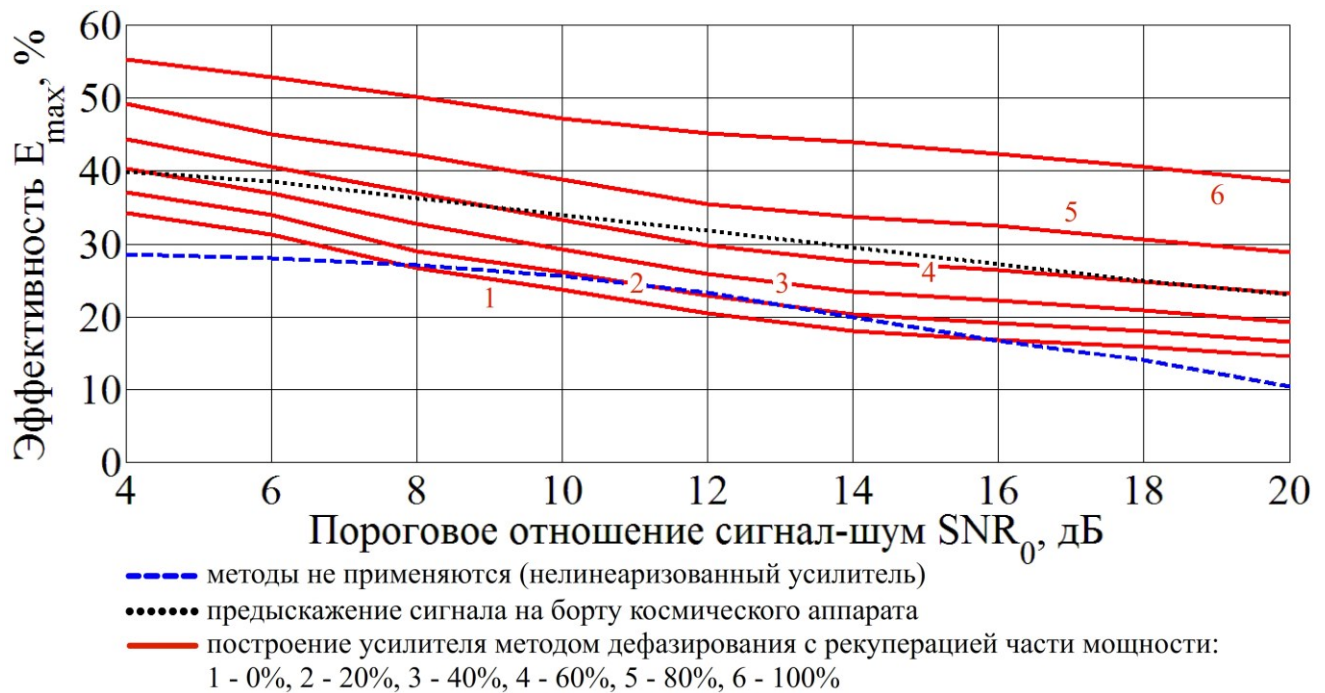


Рисунок 6 – Снижение потребляемой мощности за счет оптимального выбора постоянной времени пикового детектора при усилении многоканальных (а) и одноканальных (б) сигналов и рекуперации части мощности:
1 – 0%, 2 – 20%, 3 – 40%, 4 – 60%, 5 – 80%, 6 – 100%

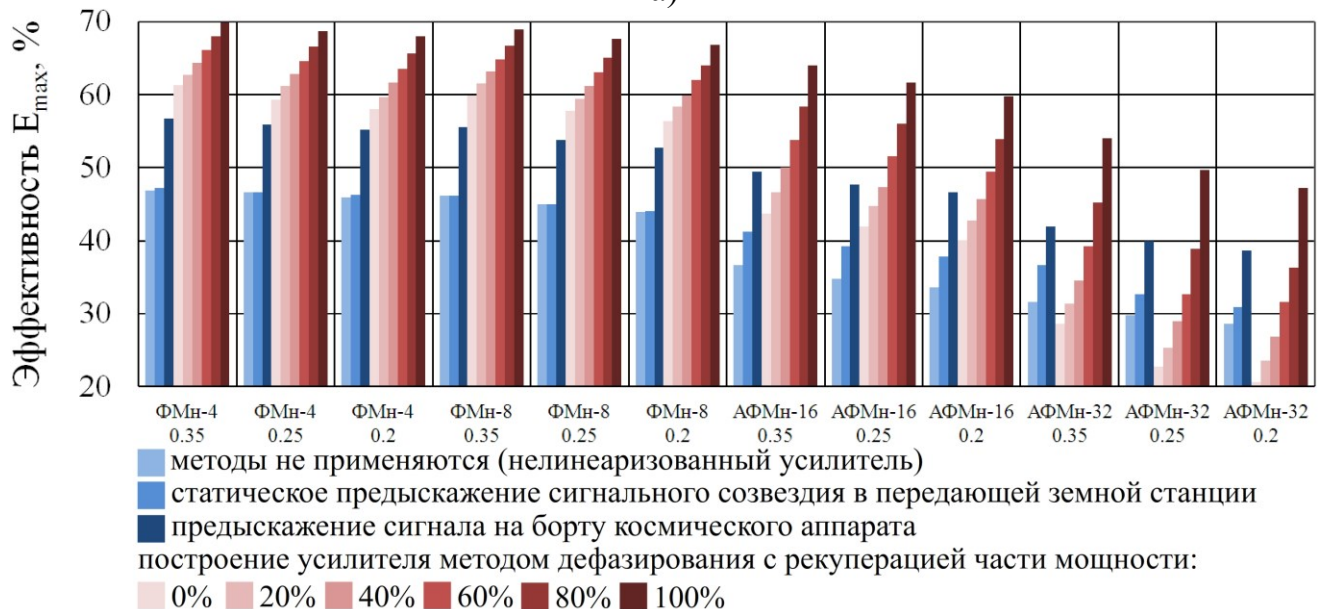
Метод дефазирования сравнен с применяемыми в спутниковой связи методами предсказания сигнала на борту космического аппарата и статического предсказания сигнального созвездия в передающей земной станции. Первый из них позволяет скомпенсировать нелинейные искажения в усилителе за счет предсказывающего линейризатора, который устанавливается непосредственно перед усилителем мощности. Второй метод позволяет с помощью модификации сигнального созвездия в передающей земной станции исключить возникающее из-за нелинейности смещение центров кластеров, в которые группируются отсчеты на входе решающего устройства приемной земной станции. Этот метод работает только на канальном уровне.

Для сравнения выполнена оценка эффективности реализаций этих методов E_{\max} . При ее поиске варьировался уровень средней мощности входного сигнала. Предполагалось, что комплексная огибающая сигнала преобразуется в усилителе мощности спутникового ретранслятора в соответствии с заданными типовыми амплитудно-амплитудной и амплитудно-фазовой характеристиками усилителя на лампе бегущей волны и их линейризованными версиями в случае применения предсказывающего линейризатора на борту космического аппарата. Предсказание сигнального созвездия осуществлено по алгоритму, предложенному Е. Касини с соавторами в 2004 году.

Результаты оценки в сравнительной форме представлены на рисунках ниже: в случае ретрансляции многоканальных сигналов с заданным SNR_0 – на рисунке 7а, одноканальных сигналов с ФМн-4, ФМн-8, АФМн-16 и АФМн-32 и формой символов типа корня из приподнятого косинуса с коэффициентами сглаживания 0,2, 0,25 и 0,35 – на рисунке 7б. Эффективность предсказания сигнального созвездия приведена только на рисунке 7б, поскольку метод не используется при загрузке усилителя многоканальным сигналом.



а)



б)

Рисунок 7 - Эффективность применения методов снижения нелинейных искажений при усилении многоканальных (а) и одноканальных (б) сигналов

Результаты, представленные на рисунке 7, показывают, что потенциально, при рекуперации 100% мощности, реализация метода дефазирования имеет выигрыш в эффективности по сравнению с реализациями применяемых методов предыскажения сигнала на борту космического аппарата и статического предыскажения сигнального созвездия в передающей земной станции. В первом случае применение метода дефазирования позволяет снизить мощность потребления на 27-40% при усилении многоканальных сигналов (при SNR_0 от 4 до 20 дБ) и на 18-23% при усилении одноканальных сигналов стандарта DVB-S2. Во втором случае - на 32-37% при усилении одноканальных сигналов стандарта DVB-S2.

На основании результатов выполненных в главах 2-5 анализов даны практические рекомендации по рациональному использованию в спутниковых ретрансляторах предложенных вариантов построения УМДФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации обоснованы и проанализированы технические решения усилителя мощности спутникового ретранслятора, построенного методом дефазирования. Основные результаты представленных в диссертации научных исследований заключаются в следующем.

1. Научно обоснованы новые технические решения усилителя мощности, построенного методом дефазирования (УМДФ), которые учитывают особенность применения спутниковых ретрансляторов: позволяют усиливать радиочастотный сигнал с произвольной, заранее неизвестной модуляцией. При произвольной модуляции сигнала нормирование его амплитуды, необходимое для формирования его фазомодулированных составляющих, обеспечивается введением блоков, в которых ее максимальное значение оценивается с помощью пикового детектора.

2. Показано, что использование в разделителях сигналов предложенных технических решений УМ №3 и УМ №4 схем с одним фазовым модулятором вместо двух позволяет повысить линейность усиления по сравнению с УМ №1 и УМ №2, в которых каждая из составляющих формируется на выходе отдельного фазового модулятора. В УМ №4 неточность коэффициента преобразования модулирующего сигнала в фазу в фазовых модуляторах не приводит к нелинейным искажениям. В УМ №3 требования, предъявляемые к максимальному модулю отклонения этого коэффициента от его номинального значения, при которых обеспечивается заданная линейность усиления, могут быть ослаблены по сравнению с УМ №1 и УМ №2.

3. Разработан новый аналитический метод оценки влияния различия фазовых сдвигов и коэффициентов усиления нелинейных усилителей мощности в трактах УМДФ на его линейность при усилении многоканальных сигналов, основанный на использовании методов статистической радиотехники для аналитического расчета корреляционных функций (5). Показано, что комплексные коэффициенты усиления трактов не должны отличаться от их среднего значения более чем на 2-3% для гарантирования уровня мощности нелинейных искажений в занимаемой полосе частот 30 дБ и уровня мощности внеполосного излучения в смежной полосе 40 дБ при отличии центральных частот соседних каналов на 1,42 ширины их полосы частот.

4. Выполнена оценка эффективности использования мощности космической платформы УМДФ с рекуперацией части мощности. Показано, что эффективность может быть повышена за счет выбора оптимального значения постоянной времени пикового детектора.

Показано также, что при практически достижимых параметрах высокоомощной части усилителя и пороговом отношении сигнал-шум на входе приемника SNR_0 не более 20 дБ обеспечивается снижение потребления мощности космической платформы более чем на 60% при усилении многоканальных сигналов. Установлено, что при усилении одноканальных сигналов с ФМн-4, ФМн-8 и АФМн-16, сформированных с использованием фильтров типа корня из приподнятого косинуса с коэффициентом сглаживания 0,35, относительное снижение потребляемой мощности составляет примерно 30-40% и около 20% при сигнале с АФМн-32. Дополнительное повышение эффективности метода может быть достигнуто за счет увеличения доли восстанавливаемой мощности. Потенциально, при рекуперации всей мощности, реализация метода дефазирования

имеет выигрыш в эффективности по сравнению с реализациями применяемых методов предсказания сигнала на борту космического аппарата и статического предсказания сигнального созвездия в передающей земной станции. В первом случае применение метода дефазирования позволяет снизить мощность потребления на 27-40% при усилении многоканальных сигналов (при $SNR_0 = 4...20$ дБ) и на 18-23% при усилении одноканальных сигналов стандарта DVB-S2. Во втором случае - на 32-37% при усилении одноканальных сигналов стандарта DVB-S2.

В диссертации представлены следующие основные рекомендации по рациональному использованию в спутниковых ретрансляторах предложенных вариантов построения УМДФ.

1. При определении целесообразности применения УМДФ, построенных по предложенным техническим решениям, рекомендуется оценить их эффективность и сравнить ее с эффективностями альтернатив в соответствии с предложенным в главе 5 подходом. Для достижения максимальной эффективности использования мощности космической платформы УМДФ следует выбрать соответствующее этой эффективности значение постоянной времени пикового детектора.

2. Для проверки выполнения требований к показателям линейности УМДФ при известных значениях его параметров или при их нахождении в ограниченной области рекомендуется использовать разработанные в диссертации методики таких оценок.

3. В спутниковых ретрансляторах целесообразно использовать УМДФ с одним фазовым модулятором (УМ №3 и УМ №4), что позволяет снизить влияние ошибок фазовых модуляторов на показатели линейности усиления в УМ №3 по сравнению с УМ №1 и УМ №2, а в УМ №4 – исключить это влияние.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Лосев А.А. Анализ искажений при усилении многоканальных сообщений по методу дефазирования из-за неидентичности трактов // Электросвязь. – 2015. - №3. - С. 49-53.

2. Лосев А.А. Повышение эффективности метода дефазирования // Техника радиосвязи. - 2015. - №4 (27). – С. 21-30.

3. Лосев А.А. Анализ влияния неточности фазовых модуляторов на линейность усиления сигнала по методу дефазирования // Труды НИИР. – 2015. - №1. – С. 75-82.

4. Лосев А.А. Анализ влияния постоянной времени пикового детектора на искажения сигнала в усилителе мощности по методу дефазирования и его коэффициент полезного действия // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. - Т.8, №10. - С. 47-52.

5. Лосев А.А. Проблемы линеаризации усилителей мощности по методу дефазирования // Труды НИИР. – 2014. - №4. – С. 66-77.

Публикации в материалах конференций

1. Лосев А.А. Оценка эффективности усиления мощности многоканальных сигналов методом дефазирования // III International Conference «Engineering & Telecommunication En&T 2016»: Book of Abstracts. – М. - Долгопрудный : МФТИ. - 2016. – С. 102-117.

2. Лосев А.А. Повышение эффективности метода дефазирования // Радиотехника, электроника и связь : сборник докладов III Международной научно-технической конференции. - Омск : Издат. дом «Наука». - 2015. – С. 283-290.

3. Лосев А.А. Оценка нелинейных искажений из-за неидентичности трактов при усилении стационарных сигналов по методу дефазирования // Материалы XVIII международной конференции «Решетневские чтения». – Красноярск : СибГАУ. - 2014. - Ч. 1. - С. 193-195.

4. Лосев А.А. Оценка уровня внеполосных искажений в соседнем канале при усилении сигнала по методу дефазирования // Сборник докладов международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2014». – М. : РНТОРЭС им. А.С. Попова. - 2014. – С. 274-278.

5. Лосев А.А. Анализ влияния шума на качество усиления мощности сигнала по методу дефазирования в ретрансляторах // VIII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» : прогр. науч.-техн. секций. – М. : МТУСИ. - 2014. – С. 59.

6. Лосев А.А. Оценка влияния неточности фазовых модуляторов на линейность усиления сигнала по методу дефазирования // Труды 57-й научной конференции МФТИ. – М. : МФТИ. - 2014.

7. Лосев А.А. Анализ возможностей применения метода дефазирования для снижения нелинейных искажений сигналов с переменной амплитудой в спутниковых ретрансляторах // Труды 56-й научной конференции МФТИ. – М. : МФТИ. - 2013. - С. 166-167.

Патенты и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

1. Устройство линейного усиления сигнала с амплитудной и фазовой модуляцией с использованием нелинейных усилителей : пат. на изобрет. 2541842 Рос. Федерация / М.А. Быховский, А.А. Лосев ; ФГУП НИИР. - № 2013144859/08 ; заявл. 08.10.2013 ; опубл. 20.02.2015, Бюл. №5. – 7 с.

2. Устройство линейного усиления сигнала с амплитудной и фазовой модуляцией с использованием нелинейных усилителей : пат. на изобрет. 2541843 Рос. Федерация / М.А. Быховский, А.А. Лосев ; ФГУП НИИР. - № 2013144860/08 ; заявл. 08.10.2013 ; опубл. 20.02.2015, Бюл. №5. – 8 с.

3. Устройство линейного усиления сигнала с амплитудной и фазовой модуляцией с использованием нелинейного усилителя : пат. на полез. модель 148191 Рос. Федерация / М.А. Быховский, А.А. Лосев, А.Б. Слободян; ФГУП НИИР. - № 2014128679/08 ; заявл. 14.07.2014 ; опубл. 27.11.2014, Бюл. №33. – 2 с.

4. Устройство линейного усиления сигнала с амплитудной и фазовой модуляцией : пат. на полез. модель 147517 Рос. Федерация / М.А. Быховский, Р.Ю. Иванюшкин, А.А. Лосев ; ФГОБУ ВПО МТУСИ. - № 2014126975/08 ; заявл. 01.07.2014 ; опубл. 10.11.2014, Бюл. №31. - 2 с.

5. Устройство линейного усиления сигнала с амплитудной и фазовой модуляцией с использованием нелинейных усилителей : пат. на полез. модель 136657 Рос. Федерация / М.А. Быховский, А.А. Лосев ; ФГУП НИИР. - № 2013144858/08 ; заявл. 08.10.2013 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. №1. – 2 с.

6. Расчет сигнала на выходе усилителя мощности, построенного по методу дефазирования : свид. о гос. рег. программы для ЭВМ 2016612467 Рос. Федерация / А.А. Лосев ; ФГУП НИИР. - № 2015663143 ; заявл. 30.12.2015 ; зарег. 29.02.2016.