

На правах рукописи



Печников Сергей Сергеевич

**ФОРМИРОВАТЕЛИ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ
РАДИОСИГНАЛОВ С КОМПЕНСАЦИЕЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ
ИСКАЖЕНИЙ**

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена на кафедре инфокоммуникационных систем и технологий ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации»

- Научный руководитель **Шерстюков Сергей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации».
- Официальные оппоненты **Фитасов Евгений Сергеевич**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского".
- Храмов Константин Константинович**
кандидат технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектроники и компьютерных систем Муромского института ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
- Ведущая организация Акционерное общество «Воронежский научно-исследовательский институт «Вега».

Защита диссертации состоится «22» сентября 2021 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ корп.3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте ВлГУ <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 12.07. 2021 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТ и РС Самойлову А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Самойлов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное состояние и развитие радиотехники требует постоянного повышения качества радиоэлектронной аппаратуры, используемой в системах передачи информации, в частности в цифровых системах радиосвязи специального назначения, в связи с чем актуальными задачами продолжают оставаться исследование и разработка эффективных способов и устройств формирования радиосигналов с заданными спектрально-временными параметрами.

В современных стандартах цифровой радиосвязи значительное место среди применяемых радиосигналов занимают сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией, что, прежде всего, объясняется их основным достоинством – высокой спектральной эффективностью. Данная особенность позволяет осуществлять передачу большего объема информации с задействованием минимального частотного ресурса, что особенно важно ввиду ограниченности выделенного частотного диапазона. Негативным аспектом является значительное изменение уровня огибающей данных сигналов, что в совокупности с работой выходного тракта передатчика в режиме, близком к насыщению, служит причиной интермодуляционных искажений и ухудшения электромагнитной совместимости с соседними каналами. В то же время современными тенденциями развития систем связи являются достижение максимального коэффициента полезного действия и увеличение времени автономной работы аккумуляторных батарей портативных средств связи, что достигается за счёт применения нелинейных режимов работы усилителя, а это, в свою очередь, снижает возможности внедрения спектрально эффективных радиосигналов.

Существует ряд способов, обеспечивающих одновременную реализацию высоких энергетических и качественных показателей сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией. Одним из решений является представление многопозиционного сигнала в виде двух смещённых по фазе сигналов с постоянной огибающей (дефазирование). Сформированные сигналы усиливаются двумя нелинейными высокоэффективными усилителями мощности, а выходные суммируются до того, как сигнал поступает в антенно-фидерный тракт. Такой подход позволяет усилителям мощности работать непрерывно с максимальной эффективностью, сохраняя при этом возможность получения линейного выходного сигнала.

При рассмотрении данных способов в синфазно-квадратурной системе координат можно прийти к выводу, что к исходному входному сигналу добавляется и вычитается широкополосный сигнал смещения, а спектр двух дополнительных компонент сигнала попадает в соседние каналы, в результате эффективность линейности системы зависит от точного подавления широкополосных сигналов при

объединении мощности, а согласование между двумя ветвями усилителей становится критическим важным фактором.

В ряде случаев для формирования фазомодулированных составляющих применяют генераторы, управляемые напряжением (ГУН), что в свою очередь может вести к рассинхронизации работы усилительных трактов из-за не идентичности параметров ГУН, а наличие управляемых реактивных элементов и частотно-избирательных цепей не позволяет с их помощью осуществлять фазовую модуляцию без перестройки схемы в достаточно широком диапазоне частот несущего колебания.

На основании изложенного актуальной является задача исследования методов прецизионного преобразования формы спектрально-эффективных радиосигналов для усиления в нелинейных усилителях мощности, основанных на качественно иных принципах формирования сигналов с постоянной огибающей.

Степень разработанности проблемы. Усиление мощности с повышенной энергетической эффективностью на основе формирования сдвига фаз высокочастотных сигналов в параллельных каналах было предложено французским инженером Ширексом (H. Chireix) и долгое время использовалось для реализации мощных радиовещательных передатчиков с амплитудной модуляцией в Европе и позже в США. Позже, Коксом (D.C. Cox) применение дефазирования было предложено для усиления других сигналов с переменной огибающей. Шендерович (Senderowicz D.), базируясь на идее разложения сигнала на две фазомодулированные составляющие с постоянной огибающей, использовал ГУН и схему полярной обратной связи, эта идея была доработана Да Сильва (Da Silva M.K.), а Батманом (Bateman A.) предложено включение квадратурной обратной связи. Большое внимание обобщению известных способ дефазирования, а также анализу возникающих при этом ошибок было уделено Джангом (X. Zhang) и Кенингтоном (Kenington P.V.).

В отечественной научной литературе по теме усиления мощности с применением способов разделения сигнала следует отметить работы В.С. Климова, Р.Ю. Иванюшкина и А.А. Лосева.

Объектом исследования являются устройства формирования спектрально-эффективных радиосигналов, циркулирующих в системах связи специального назначения.

Предметом исследования являются структурные схемы формирователей спектрально-эффективных радиосигналов, их теоретические характеристики и методы компенсации амплитудно-фазовой неустойчивости.

Результаты исследования соответствуют п. 3 (разработка устройств генерирования, усиления, преобразования радиосигналов в радиосредствах различного назначения. Создание методик их расчета и основ проектирования), п. 7

(разработка методов и устройств передачи, приема, обработки, отображения и хранения информации) и п. 10 (разработка радиотехнических устройств для использования их в промышленности, биологии, медицине, метрологии и др.) паспорта научной специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является теоретическое обоснование и экспериментальное исследование новых структурных схем формирователей спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющих осуществлять нелинейное усиление мощности и методов компенсации амплитудно-фазовых искажений.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ нелинейных искажений радиосигналов в усилителях мощности, критериев оценки их влияния на спектральную эффективность и методов линеаризации передающего тракта.

2. Разработка и исследование структурных схем формирователей узкополосных спектрально-эффективных сигналов.

3. Моделирование и исследование теоретических характеристик формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов.

4. Разработка и исследование методов компенсации амплитудно-фазовой неустойчивости в формирователе узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов.

5. Аппаратная реализация формирователя функциональных составляющих на базе ПЛИС и моделирование применения формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов для линейного усиления в нелинейных усилителях мощности.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы математического и компьютерного моделирования, методы функционального преобразования, численные методы расчета и анализа, векторного исчисления.

В частности, в теоретической части работы используются методы спектрального анализа (в том числе на основе машинных алгоритмов быстрого преобразования Фурье), аппарат рядов Тейлора, функций Бесселя, тригонометрических функций кратного аргумента.

Экспериментальные проверки были произведены с помощью программного обеспечения, реализующего разработанные устройства в системе автоматизированного проектирования (САПР) MathLab, Advanced Design System и Modelsim.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Структурные схемы формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющие синтезировать выходные сигналы в виде двух фазомодулированных сигналов, отличающихся индексом модуляции пропорциональным амплитудам модулирующих квадратурных сигналов и отсутствием дополнительной фазовой корреляции в фазомодулированных составляющих.

2. Метод компенсации амплитудно-фазовой нестабильности в квадратурном модуляторе радиосигналов, позволяющий минимизировать возникновение паразитной амплитудной и паразитной фазовой модуляции, отличающийся использованием компенсационных сигналов, синтезированных формирователем функциональных составляющих.

3. Полученные в результате моделирования спектральные характеристики и результаты анализа параметрической чувствительности формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющие оценить точность выполняемых преобразований.

4. Устройство формирования функциональных составляющих на базе ПЛИС, отличающееся минимальными аппаратными затратами и применением компенсации амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи.

Практическая ценность результатов. Разработанные устройства внедрены в учебный процесс Воронежского института МВД России на кафедре инфокоммуникационных систем и технологий, подтверждены актом внедрения. Использованы при выполнении научно-исследовательских работ «Исследование вопросов по организации радиосвязи в ВЧ-диапазоне в интересах ГУ МВД России по Воронежской области» (п. 4 плана научной деятельности Воронежского института МВД России на 2019 г.), «Разработка рекомендаций по сопряжению систем IP-телефонии и цифровых систем радиосвязи стандарта DMR» (п. 4 плана научной деятельности Воронежского института МВД России на 2020 г.).

Результаты проведённых исследований применяются в конструкторских разработках при модернизации существующих систем связи, что подтверждается актами внедрения в процесс исследования и разработки ОАО «Концерн «Созвездие», ФГУП «НТЦ Орион» ФСБ России, ООО «Радиокода».

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованностью применения математического аппарата, математическим моделированием, опорой на результаты научных трудов ведущих отечественных и мировых учёных в данной области, совпадением промежуточных результатов с опубликованными в зарубежных

источниках результатами некоторых исследований, основанных на проведении натуральных испытаний, всесторонними обсуждениями на научных конференциях, публикациями результатов работы в рецензируемых научных журналах.

Основные положения работы, выносимые на защиту.

1. Разработанные структурные схемы формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, синтезирующие выходной сигнал в виде двух квадратурных фазомодулированных составляющих для последующего нелинейного усиления.

2. Метод компенсации амплитудно-фазовой нестабильности в квадратурном модуляторе радиосигналов на базе формирователей функциональных составляющих, позволяющий минимизировать возникновение паразитной амплитудной модуляции на 47,3% и паразитной фазовой модуляции на 50% при отклонении фазовращателя на 3° и индексе фазовой модуляции $\pi/4$.

3. Спектральные характеристики и результаты анализа параметрической чувствительности формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющие оценить точность выполнения преобразований при отклонении фазовращателя от 0° до 45° и отклонении коэффициентов передачи балансных модуляторов от 1 до 0,7.

4. Устройство формирования функциональных составляющих на базе ПЛИС, входящее в состав структурной схемы формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющее компенсировать амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция IEEE «Системы синхронизации, генерации и обработки сигналов в телекоммуникациях» (Светлогорск, 2020 г.); Международная научно-техническая конференция IEEE «Системы формирования и обработки сигналов в области бортовой связи» (г. Москва, 2021 г.); Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» (г. Москва, 2021 г.); Международная научно-практическая конференция «Охрана, безопасность, связь» (Воронеж, 2018-2020 гг.); Международная научно-практическая конференция «Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии» (Воронеж, 2019-2020 гг.); Международная научно-техническая конференция «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (Воронеж, 2019 г.); Всероссийская научно-практическая конференция курсантов, слушателей, адъюнктов и молодых специалистов «Актуальные вопросы эксплуатации систем охранного мониторинга и

защищенных телекоммуникационных систем» (Воронеж, 2019-2020 гг.); Всероссийский семинар «Актуальные проблемы и перспективы развития систем связи ОВД» (Воронеж, 2020 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Математические методы и информационно-технические средства» (Краснодар, 2020); Всероссийская научно-практическая конференция «Авионика 2020» (Воронеж, 2020); Межведомственный семинар «Эффективность и живучесть радиотехнических устройств ИМТС МВД России при угрозах информационной безопасности». (Воронеж, 2019); Межведомственный семинар «Состояние и перспективы развития инфокоммуникационных систем» (Воронеж, 2020); Научно-практическая конференция «Молодежные чтения, посвященные памяти Ю.А. Гагарина» (Воронеж, 2021).

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора в разработке и исследовании приведённых в работе схем, алгоритмов, методов; в осуществлении моделирования и обработке полученных данных. Научным руководителем д.т.н., доцентом С.А. Шерстюковым осуществлялись постановка задач и контроль результатов. Часть опубликованных работ по результатам исследований написана в соавторстве с научным руководителем.

Публикации. По результатам работы над диссертацией опубликовано 26 печатных работ (6 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России [5-10], 4 статьи в изданиях, индексируемых в Scopus [1-4]; 14 материалов научных конференций и статей в научных журналах [13-26], 2 заключительных отчета о научно-исследовательской работе [27, 28]), в том числе 8 работ опубликовано без соавторов [8, 15, 16, 19, 22, 23, 25, 26]. Разработана 1 программа для ЭВМ [11] и подана 1 заявка для получения патента на изобретение [12], зарегистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 131 наименования и приложений. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, выносимых на защиту.

В первой главе проведен анализ влияния нелинейных искажений, вносимых усилителем мощности, на увеличение внеполосного излучения в соседнем канале, рассмотрены параметры, количественно определяющие линейность усилителя

мощности. Рассмотрены основные критерии оценки спектральной и энергетической эффективности радиосигналов: отношение пиковой мощности к средней (PAPR), интегральная функция распределения уровней сигнала (CCDF), коэффициент мощности в соседнем (ACPR) и альтернативном канале (AltCPR), модуль вектора ошибки (EVM) и вероятность битовой ошибки (BER). Показано, что сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией обладают высокой спектральной эффективностью, в связи с чем в сетях связи специального назначения получают широкое распространение цифровые стандарты радиосвязи APCO25 и TETRA, применяющие сигналы CQPSK и $\pi/4$ -DQPSK соответственно. В то же время сигналам с цифровой многопозиционной модуляцией свойственно изменение комплексной огибающей, что в свою очередь влечет изменение коэффициента усиления и амплитудно-фазовую конверсию при проявлении нелинейности усиления. Далее в работе проводится обзор основных методов линейризации передающего тракта и анализ методов дефазирования сигналов, основная идея которых заключается в преобразовании амплитудно-фазомодулированного сигнала $S(t)$ в виде суммы двух фазомодулированных сигналов с постоянной огибающей $S_1(t)$ и $S_2(t)$,

$$S(t) = A(t)\cos(\omega_c t + \varphi(t)) = S_1(t) + S_2(t), \quad (1)$$

$$S_1(t) = A_{\max}(t)\cos(\omega_c t + \varphi(t) + \alpha(t)), \quad (2)$$

$$S_2(t) = A_{\max}(t)\cos(\omega_c t + \varphi(t) - \alpha(t)). \quad (3)$$

Векторное представление сигналов изображено на рисунке 1.

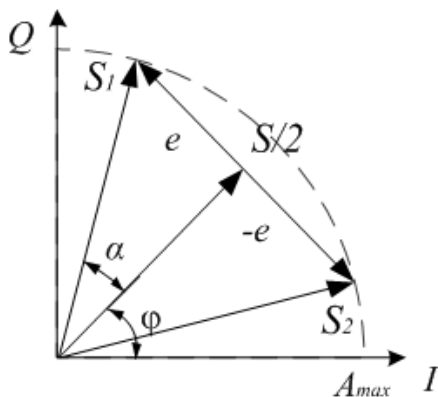


Рисунок 1 – Векторное представление сигнала при дефазировании

Общим недостатком для методов, основанных на дефазировании сигнала, стала чувствительность к диспропорциям усиления и фазы в двух параллельных усилительных трактах.

Схемные решения, являющиеся дальнейшим развитием данного подхода к усилению, направлены на компенсацию амплитудной и фазовой асимметрии плеч схемы, при этом наличие управляемых реактивных элементов и частотно-

избирательных цепей в тракте управления ГУН не позволяет с их помощью осуществлять фазовую модуляцию без перестройки схемы в широком диапазоне частот несущего колебания, а рассинхронизация работы ГУН приводит к недостаточной линейности огибающей и увеличению ширины спектра выходного сигнала.

Во второй главе исследованы структурные схемы устройств формирования функциональных составляющих, являющихся результатом аппроксимаций функций косинуса и синуса ограниченным количеством членов разложений рядов Тейлора. Проведен анализ точности выполнения преобразований и спектральный анализ устройств формирования функциональных составляющих, а также модуляторов фазомодулированных сигналов базе формирователя функциональных составляющих и балансных модуляторов. Исходя из коэффициентов функциями Бесселя и анализа результатов установлено, что увеличение индекса фазовой модуляции $m_\varphi > \pi/4$ влечёт увеличение ширины спектра выходного сигнала, таким образом, для увеличения спектральной эффективности в исследовании использован индекс фазовой модуляции $m_\varphi < \pi/4$, что позволяет ограничиться 3 членами при аппроксимации и построении функциональных преобразователей задавшись погрешностью $|R| < 1\%$. Разработаны формирователи узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов на базе балансных модуляторов в квадратурных ветвях (рис. 2), а также векторных модуляторов в квадратурных ветвях.

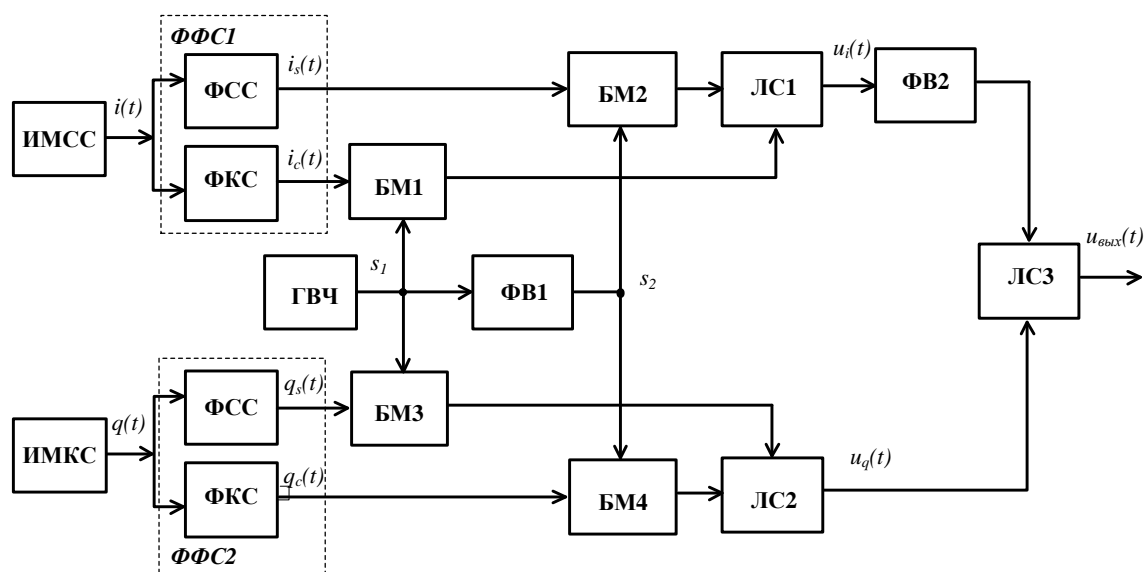


Рисунок 2 – Структурная схема формирователя узкополосных спектрально-эффективных сигналов на базе формирователей функциональных составляющих и балансных модуляторов в квадратурных ветвях

Сигнал в основной полосе частот представлен синфазной $i(t)$ и квадратурной $q(t)$ последовательностями символов, которые формируются источником модулирующей синфазной составляющей (ИМСС) и источником модулирующей квадратурой составляющей (ИМКС):

$$i(t) = kI(t)\sin 2\pi f_s t, \quad q(t) = kQ(t)\sin 2\pi f_s t, \quad (4)$$

где $I(t)$ и $Q(t)$ – амплитуды символов, k – регулировочный коэффициент уровня

сигнала, определяющий значение m_{φ}, f_s – частота следования символов.

Квадратурные составляющие поступают на вход формирователей функциональных составляющих (ФФС), которые представляют совокупность формирователя синусной составляющей (ФСС) и формирователя косинусной составляющей (ФКС). На выходе ФФС будут сформированы сигналы, описываемые выражениями (5, 6):

$$i_c(t) = U \cos[kI(t) \sin 2\pi f_s t], \quad i_s(t) = U \sin[kI(t) \sin 2\pi f_s t], \quad (5)$$

$$q_c(t) = U \cos[kQ(t) \sin 2\pi f_s t], \quad q_s(t) = U \sin[kQ(t) \sin 2\pi f_s t]. \quad (6)$$

С помощью высокочастотного генератора (ГВЧ) и фазовращателя на $\pi/2$ (ФВ1) формируются квадратурные составляющие:

$$s_1(t) = S \cos \omega t, \quad s_2(t) = -S \sin \omega t. \quad (7)$$

Перемножив косинусные составляющие модулирующего сигнала с косинусоидальной несущей, а также синусные составляющие с синусоидальной несущей в высокочастотных перемножителях сигналов (БМ1–БМ4) с коэффициентом модуляции равном единице и сложив их в линейных сумматорах (ЛС1, ЛС2), имеем:

$$u_i(t) = US(\cos[i(t)] \cos \omega t - \sin[i(t)] \sin \omega t) = A \cos(\omega t + [i(t)]) = A \cos(\omega t + m_{\varphi i} \sin 2\pi f_s t), \quad (8)$$

$$u_q(t) = US(\cos[q(t)] \cos \omega t - \sin[q(t)] \sin \omega t) = A \cos(\omega t + [q(t)]) = A \cos(\omega t + m_{\varphi q} \sin 2\pi f_s t), \quad (9)$$

где $A = US$ – постоянная амплитуда, $m_{\varphi i} = kI(t)$, $m_{\varphi q} = kQ(t)$ – индекс фазовой модуляции, который определяется мгновенными значениями амплитуды входного сигнала и регулировочным коэффициентом. Постоянное значение амплитуды сигналов позволяет применить нелинейные высокоэффективные усилители мощности. Результирующий выходной сигнал $u_{\text{вых}}(t)$ может быть выражен графически, как показано на рисунке 2. Вектор с амплитудой $A(t)$ и углом $\varphi(t)$ является суммой двух ортогональных векторов $u_i(t)$ и $u_q(t)$, если их амплитуда $A = I$, то в векторно-модулированный сигнал можно записать в виде суммы действительных и мнимых компонентов:

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}}(t) &= \operatorname{Re} \left\{ [u_i(t) + ju_q(t)] e^{j\omega t} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ A e^{j[\omega t + i(t)]} + jA e^{j[\omega t + q(t)]} \right\} = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ 2A e^{j\omega t} e^{j[i(t) + q(t) + \pi/2]} \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

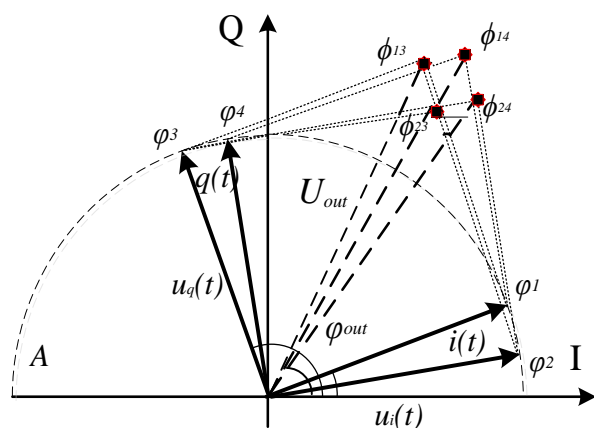


Рисунок 2 – Векторная диаграмма формирования выходного сигнала

где Re – вещественная часть комплексной величины, $u_i(t)$ и $u_q(t)$ – квадратурные компоненты сигнала $u_{\text{вых}}(t)$, A – комплексная постоянная огибающая.

Демодуляция сформированных узкополосных спектрально-эффективных сигналов может быть осуществлена с помощью квадратурного демодулятора при внесении дополнительных постоянных составляющих смещения сигнального созвездия по синфазной оси – Δx и квадратурной оси – Δy .

В третьей главе исследованы влияния ошибки фазы и усиления квадратурного модулятора на выходной сигнал. Проведен анализ параметрической чувствительности формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов и анализ влияния дисбаланса фазы при осуществлении фазового сдвига $\pi/2$ на форму выходного сигнального созвездия. Далее предложен метод автокомпенсации ошибки фазы и усиления, возникающей в квадратурных модуляторах. Компенсация искажений с использованием синтезированных компенсационных сигналов позволяет устранить искажения, возникающие в балансных смесителях и фазовращателе за счет быстроизменяющихся помех, приходящих с выхода высокочастотного генератора или с выхода усилителя мощности по цепи обратной связи, а также медленных отклонений фазы и амплитуды сигнала. На рисунке 3 представлена структурная схема формирователя радиосигналов на базе векторного модулятора, в котором реализован метод компенсации искажений, с использованием синтезированных компенсационных сигналов, где АТ – аттенюатор, АМД – амплитудный детектор, АО – амплитудный ограничитель, ВМ1 – ВМ3 – векторные модуляторы, ЛВ1 – ЛВ4 – линейные вычитатели, ЛС1 – ЛС4 – линейные сумматоры. Совокупность АМД, АО, ВМ2, ВМ3, ФВ2, ФФС, ЛВ1 – ЛВ4, ЛС1 и ЛС2 составляет формирователь функциональных составляющих синтезирующий компенсационные сигналы (ФФССКС).

На выходах ГВЧ и ФВ1 формируются квадратурные высокочастотные сигналы:

$$u_1 = U \cos \omega_0 t, \quad u_2 = -U \sin \omega_0 t. \quad (11)$$

Модулирующее напряжение представляет собой гармонический сигнал:

$$e = E \cos(\Omega t + \phi), \quad (12)$$

где E, Ω, ϕ – амплитуды, частоты и начальные фазы составляющих модулирующего напряжения, а синусно-косинусные преобразователи осуществляют формирование модулирующего напряжения (12) на основании алгоритмов и устройств, описанных в главе 2.

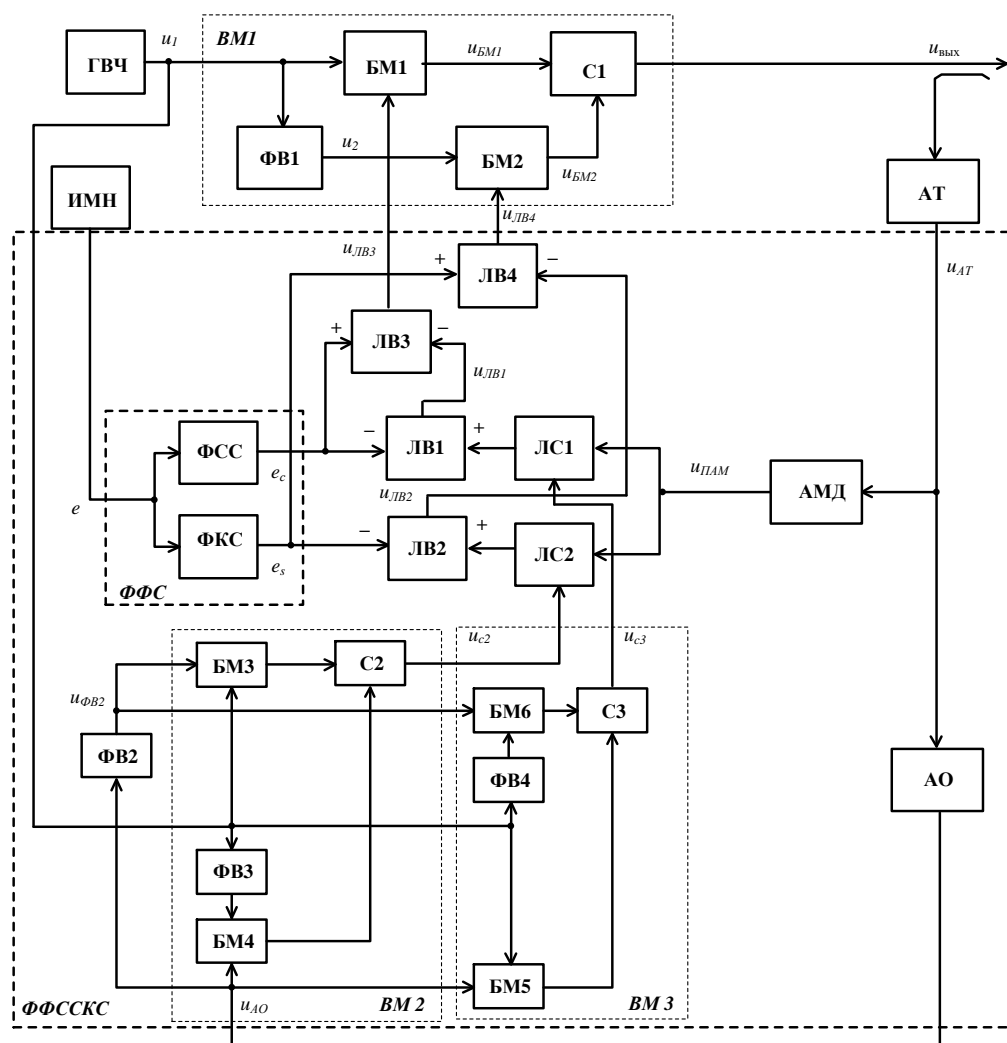


Рисунок 3 – Структурная схема формирователя радиосигналов на базе векторного модулятора с использованием синтезированных компенсационных сигналов

При этом на выходе формирователя функциональных составляющих, напряжения соответственно, имеют вид:

$$e_c = E \cos [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)], \quad e_s = E \sin [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)], \quad (13)$$

где $E = m_\phi$ – индекс полезной угловой модуляции.

После перемножения (11) с (13) и последующего линейного сложения результатов квадратурных перемножений, на выходе С1, при отсутствии дестабилизирующих факторов формируется неискажённый фазомодулированный сигнал:

$$\begin{aligned}
u_{\text{вых}} &= kU \cos \omega_0 t \times E \cos [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] - \\
&- kU \sin \omega_0 t \times E \sin [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] = \\
&= U_{\text{вых}} \cos [\omega_0 t + m_\phi \cos(\Omega t + \phi)],
\end{aligned} \tag{14}$$

где $U_{\text{вых}} = kUE$ – постоянная амплитуда.

При появлении в выходном ФМ сигнале амплитудно-фазовой нестабильности, проявляющейся в виде напряжений $u_{\text{нам}}$ и $\Delta\phi$, и характеризующих, соответственно, паразитную амплитудную модуляцию (ПАМ) и паразитную фазовую модуляцию (ПФМ), начинают обрабатывать цепи обратных связей по следующим алгоритмам.

ФМ сигнал на выходе модулятора, в котором присутствуют ПАМ и ПФМ, можно записать в следующем виде:

$$u'_{\text{с1}} = u_{\text{нам}} \cos [\omega_0 t + m_\phi \cos(\Omega t + \phi + \theta)], \tag{15}$$

где $u_{\text{нам}} = U_{\text{с1}}(1 + U_{\text{нам}})$ – напряжение ПАМ, θ – напряжение ПФМ.

На выходе АТ мощность сигнала (15) понижается до значения, обеспечивающего нормальные режимы работы АД и ВМ, которые предназначены для выделения напряжений, соответственно, $u_{\text{нам}}$ и θ .

В результате квадратурных перемножений и линейных суммирований колебаний (3.20) и (3.21) на выходах сумматоров С2 и С3 будут выделяться, соответственно, синусная и косинусная составляющие модулирующего напряжения, содержащие компоненты ПФМ:

$$u_{\text{с2}} = E \sin [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] + \theta_s, \tag{16}$$

$$u_{\text{с3}} = E \cos [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] + \theta_c, \tag{17}$$

где θ_s и θ_c – синусная и косинусная составляющие ПФМ.

Далее с напряжениями (16), (17) и $u_{\text{нам}}$ последовательно производят следующие линейные преобразования:

$$\begin{aligned}
u_{\text{ЛВ1}} &= -E \cos [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] + \\
&+ E \cos [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] + \theta_c + u_{\text{нам}} = \theta_c + u_{\text{нам}},
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
u_{\text{ЛВ2}} &= -E \sin [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] + \\
&+ E \sin [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] + \theta_s + u_{\text{нам}} = \theta_s + u_{\text{нам}},
\end{aligned} \tag{19}$$

$$u_{\text{ЛВ3}} = E \cos [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] - (\theta_c + u_{\text{нам}}), \tag{20}$$

$$u_{\text{ЛВ4}} = E \sin [m_\phi \cos(\Omega t + \phi)] - (\theta_s + u_{\text{нам}}). \tag{21}$$

В результате выражения (20) и (21) описывают законы изменения управляющих напряжений, представляющие собой алгебраические суммы полезных синусной и

косинусной составляющих модулирующего напряжения и паразитных синусной и косинусной составляющих дестабилизирующего напряжения, при этом слагаемые, описывающие ПФМ и ПАМ, для достижения эффекта их полной компенсации подаются на входы БМ1 и БМ2 в противофазе. Из изложенных алгоритмов и структурной схемы на рисунке 3 следует, что происходит автокомпенсация ПАМ, и осуществляется формирование неискажённого ФМ сигнала. Результаты исследования показали высокую эффективность предложенного метода автокомпенсации ошибки фазы и усиления (рис. 4), при этом увеличение индекса фазовой модуляции снижает влияние фазового дисбаланса на уровень ПФМ и соответственно фазу выходного сигнала, но ведет к росту ПАМ в фазомодулированных составляющих сигнала, а также ведет к снижению эффективности применения компенсации амплитудно-фазовой нестабильности в квадратурном формирователе радиосигналов.

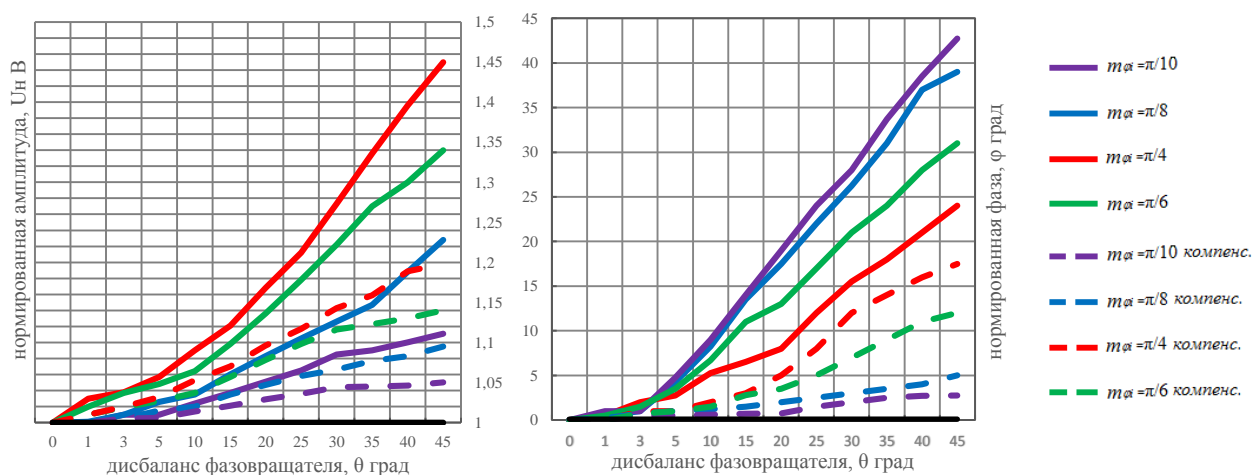


Рисунок 4 – Влияние дисбаланса фазовращателя на ПАМ и ПФМ

Из анализа влияния отклонений коэффициента балансной модуляции следует, что неточности балансного модулятора, осуществляющего перемножения косинусных составляющих, в большей степени влияют на уровень ПАМ, чем неточности при перемножении синусных составляющих. При коэффициенте балансной модуляции $K_{\text{бм}}=1$, а также при $K_{\text{бм1}}=K_{\text{бм2}}$ возникновения ПАМ не происходит, а применение синтезированных компенсационных сигналов является менее эффективным. Во второй части главы исследованы влияния нелинейности усилителей и дисбаланса трактов усиления на выходной сигнал. Рассмотрено применение квадратурной обратной связи для устранения ошибок, вносимых в результате нелинейного усиления и несоответствия трактов усиления, согласно структурной схеме, представленной на рисунке 5.

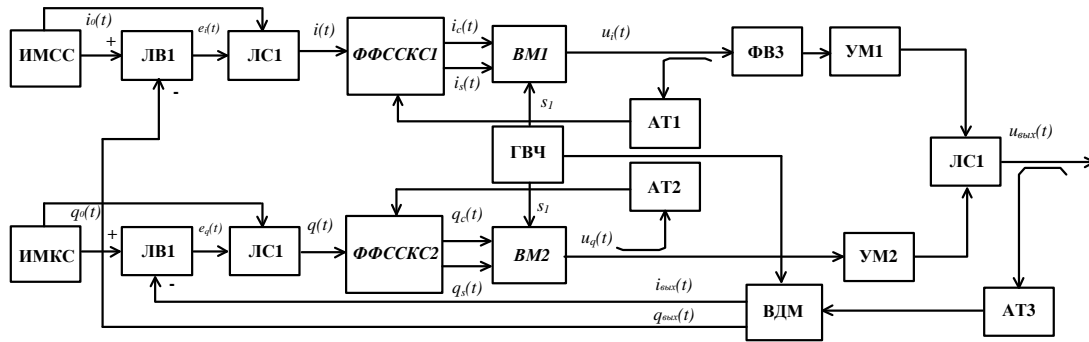


Рисунок 5 – Структурная схема формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов с одновременной компенсацией амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи

Сформированный выходной сигнал поступает в направленный ответвитель сигнала, где происходит отвод части мощности выходного сигнала, аттенюатор (АТ3) понижает её до значения, обеспечивающего нормальный режим работы векторного демодулятора (ВДМ), который осуществляет выделение квадратурных составляющих.

Если исходная синфазная компонента входного сигнала $i_0(t)$, то выходной сигнал с учетом задержки в тракте обратной связи $-I_{out}(t - \tau)$, коэффициент усиления усилителей G_i и G_q , а преобразование выходного сигнала в тракте обратной связи с понижением частоты можно рассматривать, как линейное затухание с коэффициентом передачи $-1/\beta$.

Формируемые синфазная и квадратурная составляющие сигнала обратной связи примут вид:

$$i_{out} \approx \frac{G_i \{ \Delta I_{out}(t - \tau) \}}{1 + G_i \beta}, \quad q_{out} \approx \frac{G_q \{ \Delta Q_{out}(t - \tau) \}}{1 + G_q \beta}, \quad (22)$$

$$\Delta i_{out}(t) = i_{out}(t) + \Delta x, \quad \Delta q_{out}(t) = q_{out}(t) + \Delta y. \quad (23)$$

В результате сравнения текущих значений входных квадратурных сигналов и квадратурных сигналов обратной связи в ЛВ1 и ЛВ2 формируются сигналы ошибки $e_q(t)$ и $e_i(t)$, которые необходимо добавить к исходным сигналам с помощью ЛС1 и ЛС2 для получения предсказанных символьных последовательностей:

$$e_i(t) = i_0(t) - \Delta i_{вых}(t), \quad e_q(t) = q_0(t) - \Delta q_{вых}(t), \quad (24)$$

$$q(t) = q_0(t) + e_q(t), \quad i(t) = i_0(t) + e_i(t). \quad (25)$$

Анализ точности реализации квадратурной обратной связи проведен с применением функции $\arctg[\operatorname{tg}(x)]$.

В четвертой главе описана техническая реализация и экспериментальное исследование компенсации амплитудно-фазовых искажений в ФФС при индексе модуляции $m_\phi \leq \pi/4$ на базе ПЛИС с использованием аппаратного языка описания

аппаратуры VHDL. 64-битные табличные значения косинуса и синуса были вычислены для 3 членов разложения с шагом квантования, обеспечивающим формирование 1024 значений для каждой из таблиц. Таким образом, ПЗУ ПЛИС задействуется 262144 ячейки памяти. Проект реализован на ПЛИС Arria VGZ AGZME3E2H29C3 с использованием отладочной платы Gateway 1x40_4x10G, при этом, исходя из анализа задействованного ресурса ПЛИС, для реализации данного проекта могут быть использованы менее технологичные устройства (MAX II производства ALTERA (Intel)).

Для осуществления моделирования методов линейного усиления спектрально эффективных сигналов, циркулирующих в сетях радиосвязи специального назначения в САПР Advanced Design System был выбран сигнал стандарта TETRA, проведена оценка и подбор электронных компонентов. В качестве усилительных элементов были рассмотрены усилитель LEE-9+ компании Mini-Circuits, HMC549 и HMC8410 компании Analog Devices. Схема моделирования формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов для осуществления линейного усиления в нелинейных усилителях мощности с одновременной компенсацией амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи приведена на рисунке 4, где ИПД – источник потока данных, ППП – последовательно-параллельный преобразователь, ОФК – относительный фазовый кодер, ФНЧ – фильтр нижних частот, ЛВ – линейный вычитатель, ФФССКС – формирователь функциональных составляющих синтезирующий компенсационные сигналы, ВМ – векторный модулятор, ВДМ – векторный демодулятор, УМ – усилитель мощности, АТ – аттенюатор. На рисунке 5 (а) представлены комплексная огибающая $A_i(t)$ синфазной ФМ составляющей сигнала и комплексные огибающие сигналов на выходе рассмотренных усилителей, пунктирными линиями показаны комплексные огибающие сигнала $\pi/4$ -DQPSK до и после нелинейного усиления.

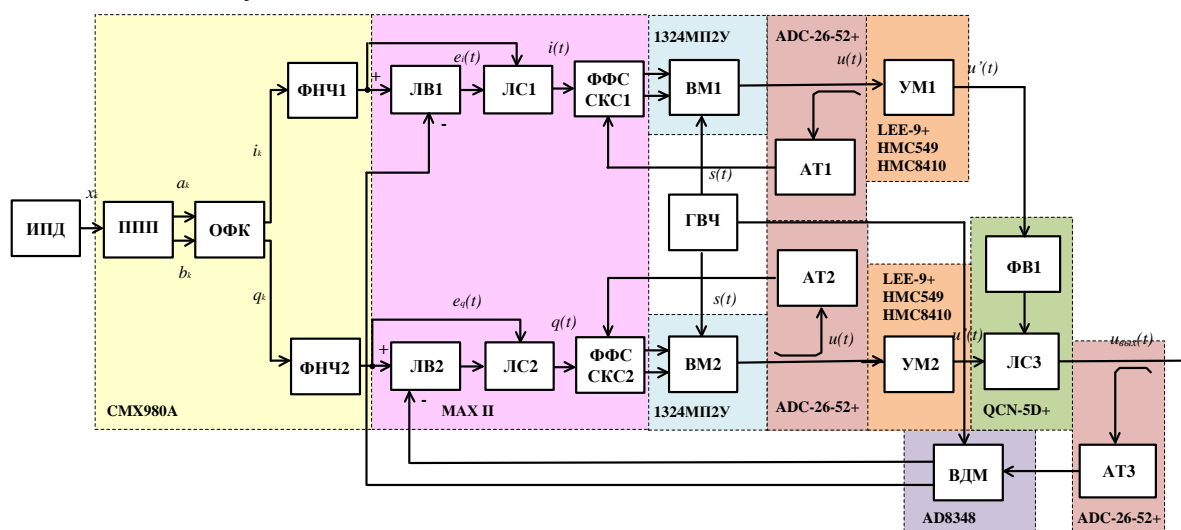


Рисунок 4 – Схема моделирования

На рисунке 5 (б) графически представлены статистические значения пиковой мощности сигнала после осуществления нелинейного усиления. Установлено, что мгновенная мощность синфазной ФМ составляющей сигнала соответствует средней мощности сигнала. В результате объединения синфазной и квадратурной ФМ составляющих формируется выходной сигнал с переменной огибающей.

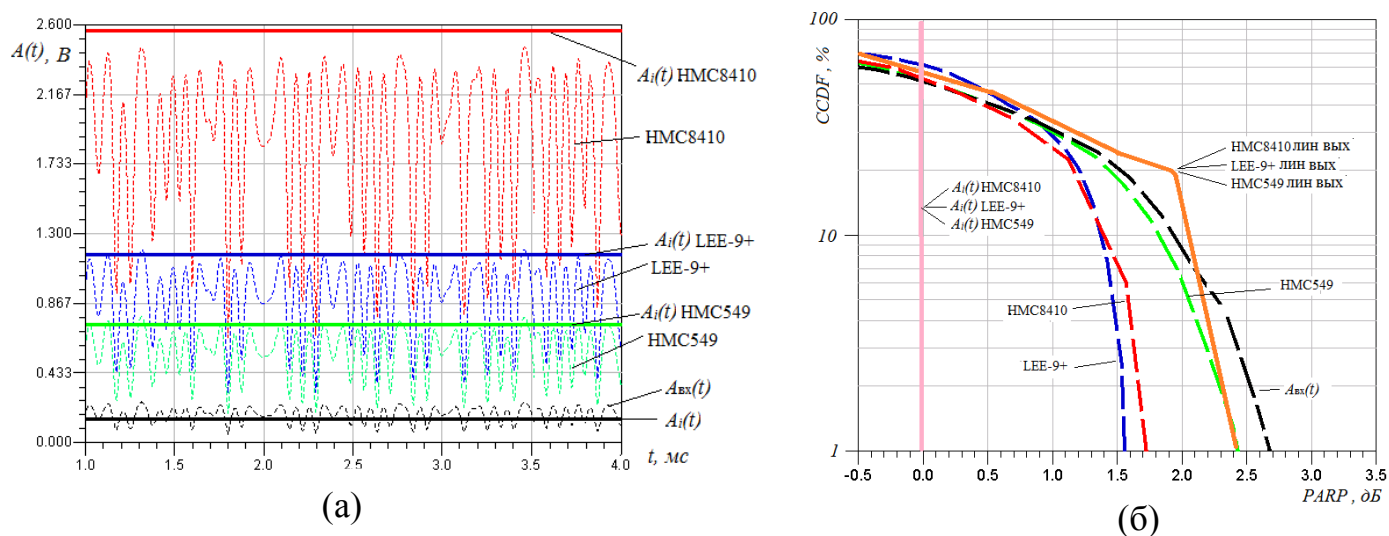


Рисунок 5 – Комплексные огибающие сигналов (а) и CCDF (б)

Далее была проведена оценка спектральной эффективности. На рисунке 6 (а) представлены спектры сигналов $\pi/4$ -DQPSK при скорости информационного потока данных 28,8 кБит/с и частоте несущей 450 МГц, на выходе рассмотренных усилителей мощности, а на рисунке 6 (б) в случае применения формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов для осуществления линейного усиления в нелинейных усилителях мощности с одновременной компенсацией амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи. Установлено, что наибольшее снижение излучения происходит на удалении 25 кГц от несущей частоты. Поскольку показателем качества линейности для цифровых систем беспроводной связи обычно является коэффициент мощности в соседнем канале, то в процентном соотношении произведен расчет повышения эффективности излучения в основном канале и снижения мощности излучения в соседнем и альтернативном канале, а также улучшения значений ACPR и AltACPR за счёт применения формирователей спектрально-эффективных радиосигналов без обратной связи и с компенсацией амплитудно-фазовых искажений квадратурной обратной связью.

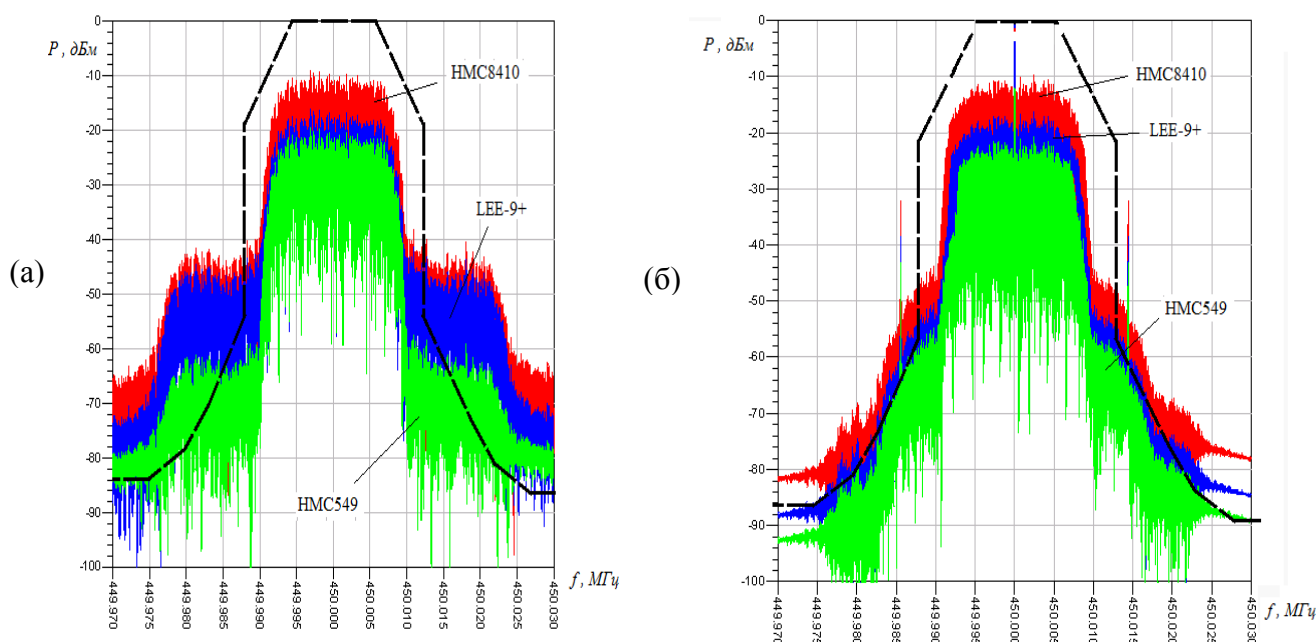


Рисунок 6 – Спектры сигнала $\pi/4$ -DQPSK на выходе усилителей (а) и спектры сигнала $\pi/4$ -DQPSK в случае применения формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов с одновременной компенсацией амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи (б)

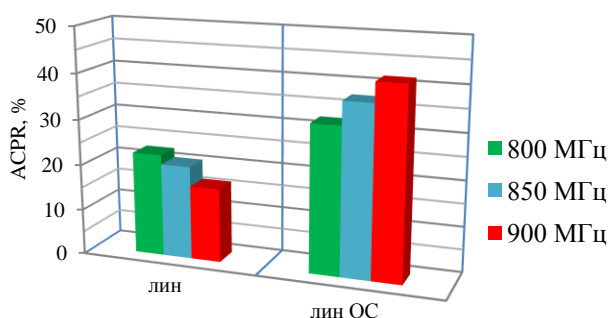


Рисунок 7 – Сравнение ACPR с результатом линейризации квадратурной обратной связью

Для сравнения полученных результатов с исследованиями по линейризации сигналов стандарта TETRA с применением квадратурной обратной связи

Наилучшей мерой качества цифровых радиосигналов является частота ошибок в битах (BER) или частоты ошибки на символ (SER). Оценка энергетической эффективности осуществлена по методу Монте-Карло. Установлено, что применение формирователя узкополосных спектрально-эффективных сигналов для линейного усиления сигнала в нелинейных усилителях мощности позволит формировать выходной сигнал с требуемой вероятностью возникновения ошибок.

дополнительно были проведены моделирования на частоте несущей 800 МГц, 850 МГц, 900 МГц и значения точки 1 dBm компрессии – 34.3 dBm. На рисунке 7 в процентном соотношении представлено, на сколько было улучшено значение ACPR при сравнении с результатом линейризации квадратурной обратной связью, которая может быть реализована микросхемой CMX998.

В заключении подведены итоги диссертации в целом, сформулированы основные результаты и выводы.

Заключение

Таким образом, в работе проведён ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку и исследование формирователей спектрально-эффективных радиосигналов с компенсацией амплитудно-фазовых искажений

1. Исследовано и реализовано устройство формирования функциональных составляющих на базе ПЛИС, входящее в состав структурной схемы формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющее компенсировать амплитудно-фазовые искажения в петле обратной связи.

2. Разработаны структурные схемы формирователей узкополосных спектрально-эффективных сигналов на базе балансных модуляторов в квадратурных ветвях, а также векторных модуляторов в квадратурных ветвях.

3. Предложен метод компенсации амплитудно-фазовой нестабильности в квадратурном модуляторе радиосигналов на базе формирователей функциональных составляющих и проведена оценка его эффективности.

4. Исследована параметрическая чувствительность формирователей узкополосных спектрально-эффективных сигналов.

5. Предложен метод применения формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов для осуществления линейного усиления в нелинейных усилителях мощности с одновременной компенсацией амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи.

6. Проведено моделирование применения формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов для линейного усиления сигнала в нелинейных усилителях мощности, что позволило максимально повысить значение ACPR в случае применения усилителя LEE9+ на 74%, а значение AltACPR на 27,3%, при этом генерируемый выходной сигнал удовлетворяет критериям требуемой вероятности возникновения ошибок.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Печников С.С. Способ повышения спектральной эффективности радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2019. – № 2. – С. 155–164.

2. Печников С.С. Исследование предмодуляционного тракта аппаратно-программного комплекса «Форком» / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2019. – № 4. – С. 158–164.

3. Печников С.С. Моделирование способа компенсации искажений радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией в квадратурном формирователе / С.А. Шерстюков, С.С. Печников, А.Н. Буравцова // Вестник Воронежского института МВД России. – 2020. – № 2. – С. 182–192.

4. Печников С.С. Анализ процесса линеаризации радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией методом подавления и восстановления огибающей / С.С. Печников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2020. – № 1. – С. 169–178.

5. Pechnikov S.S. Analysis of the parametric sensitivity of the method for optimizing the structure of spectrally effective radio signals / S.S. Pechnikov, S.A. Sherstukov // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – № 3. – С. 50–58.

6. Печников С.С. Аппаратная реализация на базе ПЛИС компенсатора амплитудно-фазовых искажений, входящего в состав формирователя спектрально-эффективных радиосигналов // С.А. Шерстюков, С.С. Печников, Е.В. Шаталов // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2020. – № 2. – С. 16–24.

Статьи, индексируемые в Scopus:

7. Pechnikov S.S. Optimization of the Structure of Spectral-Effective Radio Signals on the Basis of Functional Converters and Vector Modulators in the Composition of the Predistortion Tract / S.S. Pechnikov, S.A. Sherstukov // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Svetlogorsk, Russia, 2020, P. 1-5, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166070.

8. Pechnikov S.S. A method of compensating distortion of radio signals with amplitude-phase modulation in a quadrature driver / S.A. Sherstukov, Pechnikov S.S., A.N. Buravtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations (2020). – 2020. – 22038.

9. Pechnikov S.S. Operation algorithms and application of functional converters modulating voltage for generation of precision radio signals with angular modulation / S.A. Sherstukov, A.N. Buravtsovs, S.S. Pechnikov, D.S. Tolstykh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, (2020). – 2020. – 52008.

10. Pechnikov S.S. Transforming the structure of spectrally effective radio signals for amplification in nonlinear power amplifiers / S.S. Pechnikov, S.A. Sherstukov // 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. . – Moscow, Russia, 2021, P. 1-5, DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416021

Патент на изобретение и программа для ЭВМ:

11. Печников С.С. Способ и устройство преобразования структуры спектрально-эффективных радиосигналов для усиления в нелинейных усилителях мощности: заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение от 18.12.2020 № 2020142008 / С.С. Печников. – Москва : ФИПС, 2021.

12. Печников С.С. Компенсатор амплитудно-фазовых искажений с использованием формирователей функциональных составляющих на базе ПЛИС: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 13.04.2021 № 2021615783 / С.С. Печников. – Москва : ФИПС, 2021.

Прочие публикации:

13. Печников С.С. Повышение энергетических свойств радиопередающих устройств, формирующих высокоэффективные радиосигналы с цифровой модуляцией / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Охрана, безопасность, связь – 2019. № 4–2 (4) – С. 96–103.

14. Печников С.С. Анализ способов LINC-преобразования радиосигналов с амплитудно-угловой модуляцией / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Охрана, безопасность, связь – 2020. – № 5–3. – С. 138–143.

15. Печников С.С. Вопросы применения высокоэффективных методов модуляции в системах цифровой радиосвязи / С.С. Печников // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем : сборник материалов всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, – 2019. – С. 33–39.

16. Печников С.С. Увеличение времени работы средств радиосвязи, стоящих на вооружении в органах внутренних дел / С.С. Печников // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2019. – № 5–2. – С. 180–84.

17. Печников С.С. Проблемы технического сопряжения стандартов систем радиосвязи в предмодуляционном и усилительном трактах / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2019. – № 5–2. – С. 207–212.

18. Печников С.С. Оптимизация отношения сигнал/шум при цветных шумах / А.С. Лукьянов, С.С. Печников, А.В. Попов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – Воронеж : ВИВТ, – 2019. – № 1 (28). – С. 4–7.

19. Печников С.С. Вопросы сопряжения стандартов систем радиосвязи / С.С. Печников // Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией : сборник научных статей по материалам III Международной научно-технической конференции ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. – Воронеж, 2019. – С.141–143.

20. Печников С.С. Перспективы развития адаптивной системы радиосвязи и применение в сетях связи ведомственных структур / А.С. Лукьянов, С.С. Печников,

И.В. Гилев // Математические методы и информационно-технические средства : сборник научных статей по материалам XV Всероссийской научно-практической конференции. – Краснодар, 2019. – С.114–117.

21. Печников С.С. Моделирование системы усиления с декартовой обратной связью / С.С. Печников, Лукьянов А.С. // Авионика : сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, – 2020. – С. 287 – 290.

22. Печников С.С. Анализ воздействия двухтонального сигнала на нелинейный усилитель мощности / С.С. Печников // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, – 2020. – С.28–30.

23. Печников С.С. Моделирование нелинейного режима усиления сигнала формируемого квадратурным модулятором при воздействии 2-тонального колебания / С.С. Печников // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2020. – № 6–2. – С.186–189.

24. Печников С.С. Оптимизация структуры спектрально-эффективных радиосигналов на базе функциональных преобразователей и векторных модуляторов в составе тракта предсказания / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2020. – № 2. – С.4–10.

25. Печников С.С. К вопросу эффективности использования источника питания / С.С. Печников // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, – 2020. – С. 193–197.

26. Печников С.С. Количественная оценка точности формирования спектрально-эффективных радиосигналов с использованием глазковых диаграмм колебания / С.С. Печников // REDS: телекоммуникационные устройства и системы. – 2021. – № 3. – С. 58 – 65.

27. Печников С.С. Рекомендации по использованию технических средств и организации радиосвязи в диапазоне ВЧ / А.И. Климов, С.А. Шерстюков, М.А. Галуза, С.С. Печников. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2020. – 35 с.

28. Печников С.С. Сопряжение систем IP-телефонии и цифровых систем радиосвязи стандарта DMR / С.А. Шерстюков, Д.С. Толстых, С.С. Печников, А.Н. Лукьянова. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2020. – 35 с.

Подписано в печать
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 100
Издательство Владимирского государственного университета
Имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир ул. Горького, 87