

ОТЗЫВ

официального оппонента Суржика Дмитрия Игоревича
на диссертационную работу Грошкова Игоря Дмитриевича

«Формирователи когерентных радиосигналов с низким уровнем фазовых шумов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения»

Актуальность темы диссертационной работы.

Синтез стабильных высокочастотных сигналов с возможностью формирования сложных видов модуляции является одной из ключевых задач при проектировании современных радиотехнических систем передачи данных, радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Возможность оперативного изменения режимов работы и быстрой перестройки несущей частоты существенно повышает помехоустойчивость систем в условиях воздействия активных и пассивных помех, а также обеспечивает высокую точность измерения параметров целей. Особенно остро данная проблема проявляется в когерентных доплеровских радиолокационных системах и многоканальных системах с технологией ММО, где когерентность каналов критически важна для реализации алгоритмов пространственной обработки данных и борьбы с многолучевостью и замираниями радиосигналов на трассе распространения. Избыточный фазовый шум в таких системах приводит к росту числа ошибок при передаче информационных сообщений и определению параметров радиолокационных целей.

Традиционные методы синтеза (прямой аналоговый, косвенный на основе систем фазовой автоподстройки частоты, прямой цифровой) обладают принципиальными ограничениями. Гибридные и комбинированные архитектуры на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), использующих специальные режимы работы (RZ, RF/Mixed-Mode, 2xNRZ) и образы сигнала в высших зонах Найквиста, позволяют существенно расширить рабочий диапазон частот, повысить

скорость перестройки и улучшить массогабаритные и энергетические характеристики при сохранении высокого спектрального качества.

Тем не менее, в научной литературе до сих пор недостаточно проработаны экспериментально подтверждённые математические модели спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов таких устройств с учётом влияния специальных режимов работы ЦАП, а также эффективные методики частотного планирования и автоматизированного проектирования многоканальных когерентных формирователей сигналов. В результате отсутствие надёжного научно-методического аппарата сдерживает создание компактных, малошумящих и высокопроизводительных формирователей для перспективных радиосистем.

Совокупность данных факторов определяет актуальность диссертационного исследования Грошкова И.Д., в котором соискатель разрабатывает научно-методический аппарат проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных ЦАП, использующих высшие зоны Найквиста, и проводит комплексное исследование их шумовых характеристик.

Научная новизна результатов диссертационной работы.

В рамках работы соискателем получены следующие результаты, обладающие признаками научной новизны:

1. Методика расчёта и проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей, использующих высшие зоны Найквиста для повышения выходной частоты.
2. Математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей сигналов, учитывающие влияние специальных режимов работы высокоскоростных ЦАП.
3. Структура цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов с комбинированием данных, позволяющая повысить быстродействие и сократить объём требуемой памяти в два раза.

Также научной новизной обладают предложенные в работе обобщённая структурная схема формирователя высокочастотных сигналов когерентной

радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП и алгоритм частотного планирования многоканальных когерентных формирователей сигналов с использованием образов в высших зонах Найквиста.

Практическая ценность работы.

Основными практически значимыми результатами работы являются:

1. Программный продукт для автоматизированного проектирования и частотного планирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных ЦАП, позволяющий сравнивать варианты построения и выбирать оптимальные параметры.
2. Детализированные структурные схемы формирователей сигналов для радиосистем UHF и S диапазонов частот, обеспечивающие уровень СПМ фазовых шумов не более минус 120 дБ/Гц на отстройке 1 кГц от несущего колебания.
3. Цифровой формирователь фазоманипулированных сигналов с двухпортовым интерфейсом и схема гибридного синтезатора частот с квадратурным модулятором.

Достоверность полученных результатов и обоснованность положений, выносимых на защиту.

Достоверность результатов, полученных Грошковым И.Д. в диссертационной работе, подтверждается использованием общепринятых методов регрессионного анализа, имитационного моделирования, спектрального анализа, проведением натурных экспериментов и сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными. Основные положения, выносимые на защиту, чётко сформулированы и полностью доказаны. Структурные схемы цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов с двухпортовым интерфейсом и гибридного синтезатора частот с квадратурным модулятором запатентованы.

Структура и содержание диссертационной работы и автореферата.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения.

Введение обосновывает актуальность темы, определяет цель и задачи исследования, а также его научную новизну и практическую значимость.

В первой главе представлен обзор методов синтеза высокочастотных сигналов. Рассмотрены характеристики устройств для формирования сложномодулированных сигналов, их достоинства и недостатки. Проведен анализ высокоскоростных ЦАП, способных работать в специальных режимах (RZ, RF (Mix-Mode), 2xNRZ).

Во второй главе предложена обобщенная структурная схема формирователя когерентных сигналов на основе ЦАП при использовании образов сигнала. Разработан алгоритм частотного планирования и методика проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных ЦАП в специальных режимах работы. Приведены примеры реализации радиосистемы UHF- и S-диапазонов частот.

В третьей главе исследованы факторы, влияющие на уровень фазовых шумов. Выполнено математическое моделирование СПМ фазовых шумов отдельных компонентов системы, в том числе генератора опорной частоты, буфера тактовых сигналов и высокоскоростного ЦАП в специальных режимах работы. Проведено математическое моделирование СПМ фазовых шумов формирователей высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы, комбинирующих различные методы синтеза.

В четвертой главе предложена новая структура цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов, позволяющая повысить его быстродействие и сократить необходимый объем памяти в два раза. Экспериментально подтверждены разработанные математические модели СПМ фазовых шумов формирователей высокочастотных сигналов. Также разработана структура гибридного синтезатора частот на основе ЦАП и квадратурного модулятора, которая позволяет уменьшить коэффициент деления в цепи обратной связи ФАПЧ и расширить диапазон подстройки синтезатора.

Общий объем диссертационной работы составляет 166 страниц, включая 75 рисунков и 13 таблиц. Библиография содержит 119 наименований.

Тема и содержание работы соответствуют паспорту научной специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» по пунктам 3 «разработка и исследование радиотехнических

устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия и помехоустойчивости» и 4 «разработка и исследование устройств генерирования, усиления, преобразования и синтеза радиосигналов, сигналов изображения и звука в радиотехнических системах различного назначения, включая системы телевидения. Создание эффективных методов их расчета и основ проектирования». Диссертация и автореферат написаны в научном стиле с последовательным и аргументированным изложением материала.

Публикации и апробация результатов диссертационной работы.

Основные положения диссертационной работы опубликованы соискателем в 16 работах, в том числе 4 статьи представлены в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 публикация — в издании, проиндексированном в международной реферативной базе Scopus, имеются 2 патента на полезные модели и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты исследования докладывались и обсуждались на нескольких авторитетных международных и всероссийских конференциях и внедрены в производство, что подтверждается соответствующим актом.

Замечания по диссертационной работе:

1. При описании методики проектирования формирователей когерентных радиосистем на основе высокоскоростных ЦАП (п. 2.4 диссертации) автор указывает, что «среди всех доступных реализаций и режимов работы ЦАП определяется вариант с максимальной амплитудой и минимальной неравномерностью амплитуды сигнала в полосе рабочих частот». Однако не совсем ясен принцип выбора, когда оба этих параметра противоречат друг другу, поскольку методика не содержит формального правила или критерия оптимизации, что снижает её объективность и воспроизводимость. Целесообразно было бы ввести обобщенный функционал качества, учитывающий как амплитудные, так и спектральные показатели.

2. В работе основной акцент сделан на минимизации уровня фазовых шумов, однако для практического применения формирователей когерентных радиосигналов не менее важен динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR), поскольку при использовании образов

сигнала в высших зонах Найквиста уровень гармоник и интермодуляционных продуктов может оказаться весьма существенным. В работе имеются диаграммы распределения частот с маркерами IMD, однако количественные оценки уровня паразитных спектральных составляющих отсутствуют. В связи с этим возникает вопрос о том, каков реальный уровень SFDR для предложенных схем?

3. В работе автором предложены структурные схемы формирователей сигналов когерентных радиосистем S-диапазона частот (3,85...4,05 ГГц), однако экспериментальные измерения (например, как показано на рисунках 4.17 — 4.19) выполнены только для выходных частот гетеродина в 823 и 891 МГц. Для полной верификации предложенных схем, методики и математических моделей шумовых характеристик следовало бы представить хотя бы один результат измерений для выходной частоты S-диапазона.

4. В научную новизну работы и положения, выносимые на защиту, следовало бы включить обобщённую структурную схему формирователя высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП, а также алгоритм частотного планирования многоканальных когерентных формирователей сигналов с использованием образов в высших зонах Найквиста, поскольку их научная новизна также могла быть доказана при соответствующей защите.

5. Имеются отдельные незначительные недочёты в оформлении текста диссертации и автореферата. Например, используется разрозненная терминология, когда автор использует понятия «образы сигнала» и «копии спектра», говоря об одних и тех же объектах исследования, что усложняет восприятие текста. Кроме того, из рисунков распределения спектральных компонент синтезаторов частот на страницах 65, 66, 76, 77 не понятно какие конкретно значения частот интермодуляционных составляющих отображаются на диаграммах.

Отмеченные замечания носят незначительный, либо уточняющий характер и не снижают общей высокой научной и практической ценности работы.

Заключение

На основании проведённого анализа считаю, что диссертационная работа «Формирователи когерентных радиосигналов с низким уровнем фазовых шумов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей», соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор — Грошков Игорь Дмитриевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Официальный оппонент,

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специальных информационных технологий учебно-научного комплекса информационных технологий федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Московский ордена Почета университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В. Я. Кикотя».

Наименование научной специальности, по которой защищена докторская диссертация: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

E-mail: arzerum@mail.ru

Тел.: +7 9190074866

117997, г. Москва, ул. Академика Волгина, д.12.

Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Московский ордена Почета университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В. Я. Кикотя».



Суржик Дмитрий Игоревич

26.06.2026

