

*На правах рукописи*



**Грошков Игорь Дмитриевич**

**ФОРМИРОВАТЕЛИ КОГЕРЕНТНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ  
С НИЗКИМ УРОВНЕМ ФАЗОВЫХ ШУМОВ  
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор **В.В. Ромашов**

Муром – 2026

Работа выполнена на кафедре радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель	<b>Ромашов Владимир Викторович</b> Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Официальные оппоненты	<b>Суржик Дмитрий Игоревич</b> Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специальных информационных технологий учебно-научного комплекса информационных технологий ФГКОУ ВО «Московский ордена Почета университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя»  <b>Шерстюков Сергей Анатольевич</b> Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий ФГКОУ ВПО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации»
Ведущая организация	АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники» (АО «ВНИИРТ»), г. Москва

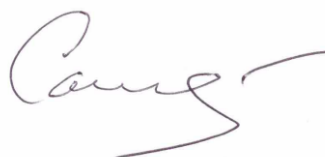
Защита диссертации состоится 29 сентября 2026 года на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ВлГУ и на сайте [https://diss.vlsu.ru/uploads/media/Groshkov\\_Dissertacija.pdf](https://diss.vlsu.ru/uploads/media/Groshkov_Dissertacija.pdf)

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87 ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 534238, E-mail: ags@vlsu.ru.

Автореферат разослан 10 июня 2026 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.281.01  
кандидат технических наук, доцент



С.А. Самойлов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

При проектировании радиотехнических систем одной из основных задач является синтез стабильных высокочастотных сигналов с возможностью реализации различных видов модуляции. В современных системах передачи данных и радиолокации возможность оперативно изменять режимы формирования и перестраивать несущую частоту сигнала позволяет увеличить устойчивость системы в условиях воздействия активных и пассивных помех.

Так, в когерентных доплеровских радиолокационных системах, работающих в UHF, L и S диапазонах частот, отраженный от радиолокационной цели полезный сигнал имеет низкую амплитуду и может быть маскирован шумами устройства формирования сигналов передатчика и гетеродина приёмника, которые накладываются на сигналы с высокой амплитудой (отражения от поверхности земли, зданий, метеорологических образований и т.д.). В современных многоканальных радиосистемах, таких как системы с многими входами и многими выходами (MIMO), требуется реализация нескольких когерентных передающих и приёмных трактов, обеспечивающих определённые фазовые соотношения между каналами. Когерентность каналов позволяет использовать специализированные алгоритмы их обработки для борьбы с многолучевым распространением и замираниями сигнала. В таких системах при передаче данных избыточный фазовый шум приводит к снижению стабильности синхронизации и появлению битовых ошибок.

### **Степень разработанности темы исследования**

Общие проблемы синтеза частот с низким уровнем фазовых шумов широко освещаются в отечественной и зарубежной литературе.

Исследователи, как правило, выделяют несколько основных методов синтеза частот – прямой аналоговый, косвенный и прямой цифровой.

Сложные устройства формирования сигналов зачастую комбинируют в своей структуре элементы различных методов синтеза. В результате недостатки, присущие одним синтезаторам частот, снижаются за счёт достоинств других.

Развитие микроэлектроники привело к широкому распространению метода прямого цифрового синтеза на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). Особенностью современных высокоскоростных ЦАП является наличие специальных режимов работы, позволяющих изменять уровень побочных спектральных составляющих формируемого сигнала и использовать их для повышения частоты. Кроме того, использование высокоскоростных ЦАП в формирователях сигналов позволяет значительно упростить структуру устройства и обеспечить низкий уровень вносимых фазовых шумов. Однако в литературе недостаточно внимания уделяется методикам расчёта параметров формирователей когерентных радиосигналов и отсутствуют экспериментально подтверждённые математические модели фазовых шумов синтезаторов частот на основе высокоскоростных ЦАП в специальных режимах работы, использующих копии спектра (образы) формируемого сигнала в высших зонах Найквиста.

Таким образом, появляется необходимость в разработке научно-методического аппарата для расчёта и проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных ЦАП в специальных режимах работы, использующих образы формируемого сигнала в высших зонах Найквиста.

**Целью исследования является:** разработка научно-методического обеспечения проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы, использующих образы сигнала в высших зонах Найквиста.

**Задачи исследования,** которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Провести анализ существующих формирователей когерентных высокочастотных сигналов со сложными видами модуляции.
2. Предложить обобщённую структуру формирователя сигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей, использующих высшие зоны Найквиста, для генерирования сложно-модулированных, когерентных радиосигналов с низким уровнем фазовых шумов.

3. Разработать алгоритм частотного планирования формирователей когерентных высокочастотных сигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей.

4. Разработать методику расчета и автоматизировать проектирование формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей.

5. Экспериментально проверить и подтвердить методику проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей.

6. Разработать и подтвердить экспериментально математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей когерентных сигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработана методика расчёта и проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей, использующих высшие зоны Найквиста для повышения частоты.

2. Разработаны математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей сигналов, отличающиеся от существующих тем, что в них учитывается влияние специальных режимов работы высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей.

3. Предложена структура цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов, позволяющая повысить его быстродействие и сократить необходимый объем блоков памяти в два раза.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Предложена схема формирователя сигналов на основе высокоскоростного цифро-аналогового преобразователя, использующего образы сигнала в высших зонах Найквиста, позволяющая генерировать сложно-модулированные, когерентные радиосигналы  $S$  диапазона частот с уровнем спектральной плотности мощности фазовых шумов не более минус 120 дБ/Гц на отстройке 1 кГц от несущей частоты.

2. На базе предложенного алгоритма частотного планирования и разработанной методики проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей реализован программный продукт для проектирования таких формирователей, позволяющий сравнивать различные варианты построения и выбирать наилучший.

3. Разработанные математические модели шумовых характеристик формирователя когерентных радиосигналов позволяют проводить оценку параметров таких формирователей с учётом влияния специальных режимов работы высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей.

4. Предложенная структура цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов с комбинированием данных позволяет повысить его быстродействие и сократить необходимый объем блоков памяти в два раза.

#### **Методология и методы исследования.**

В ходе решения поставленных задач применялись методы регрессионного анализа, элементы теории автоматического управления, имитационное моделирование, спектральный анализ. Методика проектирования формирователей когерентных радиосигналов и математические модели шумовых характеристик формирователей сигналов на основе высокоскоростных ЦАП подтверждаются результатами натурных испытаний реальных устройств.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика расчета и проектирования формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей, позволяющая определять параметры формирователя при использовании высших зон Найквиста для повышения выходной частоты.

2. Математические модели шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей, позволяющие оценивать уровень фазовых шумов на ранних этапах проектирования.

3. Использование предложенной структуры цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов позволяет повысить его быстродействие и сократить необходимый объем блоков памяти в два раза.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Разработанный алгоритм частотного планирования и методика проектирования позволили реализовать программу для ЭВМ, на которую получено свидетельство о государственной регистрации.

Результаты моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей сигналов подтверждаются экспериментально полученными характеристиками реальных устройств. Достоверность результатов исследования, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием общепринятой методики исследования шумовых характеристик.

Предложенные структурные схемы цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов и гибридного синтезатора частот запатентованы. Заявленный эффект от использования предложенного цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов подтверждается результатами натурных испытаний и актом внедрения результатов диссертационной работы.

Основные положения диссертационной работы обсуждались на XIV Международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир 2021); XVIII, XIX, XX, XXI Всероссийских молодежных научно-технических конференциях (Москва 2020, 2021, 2022, 2023) «Радиолокация и связь – перспективные технологии»; XIII Всероссийских научных Зворыкинских чтениях «Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России» (Муром 2021); Всероссийской научно-технической конференции «Расплетинские чтения – 2024» (Москва 2024); III Российской научной конференции «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (Омск 2024).

### **Публикации по теме исследований**

По тематике диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ, 1 публикация, индексируемая в международной реферативной базе Scopus, 2 патента на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составляет 166 страницы машинописного текста, включая 75 рисунков и 13 таблиц. Библиография содержит 120 наименований, в том числе 16 работ автора.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы. Обоснована актуальность темы диссертации и определена текущая степень разработанности проблемы проектирования формирователей когерентных радиосигналов с низким уровнем фазовых шумов на основе высокоскоростных ЦАП. Определена цель исследования, сформулированы задачи, которые необходимо решить для её достижения. Представлены положения, выносимые на защиту, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Дана оценка достоверности, теоретической и практической значимости результатов работы.

### **В первой главе**

Проведен обзор основных параметров устройств формирования высокочастотных сигналов. Определены основные параметры устройств синтеза частот, позволяющие оценить их эксплуатационные, частотные, амплитудные и спектральные характеристики.

Определены основные требования к устройствам формирования высокочастотных сигналов когерентных радиосистем с возможностью генерирования сложно-модулированных сигналов и перестройки несущей частоты в сочетании с низким уровнем фазовых шумов.

Проведен обзор основных методов синтеза частот. Рассмотрены особенности построения формирователей высокочастотных сигналов в когерентных радиосистемах. Определено, что для построения формирователя высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы целесообразно использовать многокаскадную структуру, комбинирующую различные методы синтеза с использованием высокоскоростных ЦАП.

Использование современных высокоскоростных ЦАП при построении формирователей сигналов даёт возможность увеличить выходную частоту сигнала за счёт использования копий спектра формируемого сигнала (образов основной частоты) в специальных режимах работы. В работе рассмотрены наиболее часто встречающиеся специальные режимы работы высокоскоростных ЦАП: режим работы без возврата к нулю (англ. Non return to zero – NRZ), режим работы с возвратом к нулю (англ. Return to zero – RZ), режим радиочастоты (англ. radio frequency – RF или mix mode), режим с удвоением тактовой частоты ( $2 \times \text{NRZ}$ ).

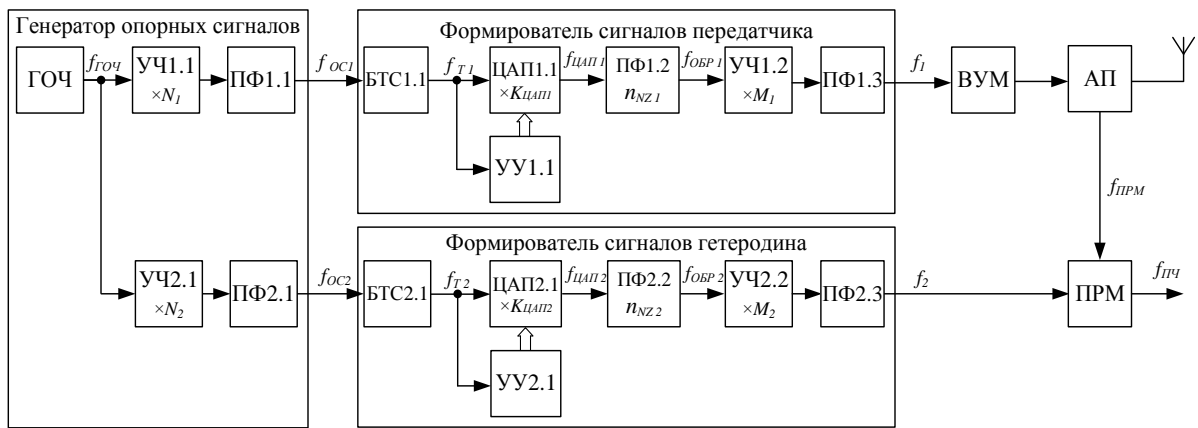
В специальных режимах работы амплитуда образов основной частоты на выходе ЦАП на 6 – 10 дБ выше, чем при классическом прямом цифровом синтезе. В результате, применение высокоскоростных ЦАП при построении формирователей высокочастотных сигналов когерентных радиосистем даёт возможность реализовывать сложные алгоритмы модуляции в цифровой области, а выходную частоту повышать за счёт использования копий спектра основного сигнала, без необходимости использования дополнительных аналоговых элементов и многокаскадных усилителей.

### **Во второй главе**

Проведён анализ вариантов построения формирователей сигналов на основе высокоскоростных ЦАП. В результате анализа предложена обобщенная структурная схема когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП, использующих образы в высших зонах Найквиста, позволяющая формировать сигналы для заданной полосы частот на основе унифицированной структуры.

Обобщённая структурная схема формирователя высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП представлена на рисунке 1.

Для реализации радиосистемы со структурой, приведённой на рисунке 1, разработан алгоритм частотного планирования, позволяющий рассчитать параметры формирователей, а именно: коэффициенты умножения входных и выходных умножителей частоты, номера образов, коэффициенты передачи ЦАП по частоте, амплитуды сигналов при использовании образов в специальных режимах работы ЦАП.



Обозначения: ГОЧ – генератор опорной частоты; УЧ – умножители частоты с коэффициентами  $N_i$ ,  $M_i$ , где  $i$  – номер канала; ПФ – полосовой фильтр; БТС – буфер тактового сигнала; УУ – устройство управления; ВУМ – выходной усилитель мощности; АП – антенный переключатель; ПРМ – приёмное устройство; ЦАП – цифро-аналоговые преобразователи.

Рисунок 1 – Обобщённая структурная схема формирователя высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП

Реализация алгоритма частотного планирования формирователя включает в себя несколько основных этапов:

1. Ввод исходных данных: частота опорного генератора ( $f_{ГОЧ}$ ), минимальная и максимальная частоты передатчика ( $f_{1\text{ МИН, МАКС}}$ ); частоты сигнала на выходе приёмного устройства ( $f_{ПЧ}$ ); минимальная и максимальная тактовые частоты ЦАП ( $f_{T\text{ МИН, МАКС}}$ ); номера используемых зон Найквиста ( $n_{NZ\text{ МИН, МАКС}}$ ), а также диапазоны коэффициентов умножения входных ( $N_{\text{МИН, МАКС}}$ ) и выходных ( $M_{i\text{ МИН, МАКС}}$ ) умножителей частоты.

2. Расчёт диапазона выходных частот формирователя сигналов Гетеродина (ФСГ) с учётом шага сетки частот.

3. Определение минимального и максимального коэффициентов умножения входного умножителя частоты с учётом ограничения тактовой частоты ЦАП.

4. Расчёт коэффициента  $K_{ЦАП i}$  для формирователей сигналов передатчика (ФСП) и ФСГ в пределах заданного диапазона зон Найквиста  $n_{NZ}$  для всех возможных комбинаций коэффициентов умножения частоты  $N_i$  и  $M_i$ .

5. Проверка соответствия диапазона  $K_{ЦАП i\text{ МИН}} \dots K_{ЦАП i\text{ МАКС}}$  условию

$$\left( K_{ЦАП i\text{ МИН}} \geq K_{ЦАП\text{ МИН}} \right) \wedge \left( K_{ЦАП i\text{ МАКС}} \leq K_{ЦАП\text{ МАКС}} \right), \quad (1)$$

где коэффициенты  $K_{ЦАП\ МИН} = 0,15$ ,  $K_{ЦАП\ МАКС} = 0,35$  определяют допустимый диапазон фильтрации паразитных составляющих в спектре на выходе ЦАП.

6. Расчёт частотных параметров формирователя сигнала для каждого канала с номером  $i$ :  $f_{Ti}$  – тактовая частота ЦАП;  $f_{ЦАП\ i\ МИН, МАКС}$  – минимально и максимально допустимые частоты на выходе ЦАП,  $f_{ОБР\ i\ МИН, МАКС}$  – минимальная и максимальная частоты образа на выходе ПФ,  $f_{i\ МИН, МАКС}$  – минимальная и максимальная частоты на выходе ФСП и ФСГ.

7. Расчёт амплитудных параметров каждого варианта реализации формирователя сигнала: минимальная и максимальная амплитуды сигнала на выходе ЦАП нормированные к единице, в режимах работы NRZ, RF, 2×NRZ; неравномерность амплитуды в полосе рабочих частот для четырёх режимов работы ЦАП и режим работы, позволяющий получить максимальную амплитуду сигнала.

На основе предложенного алгоритма реализована программа проектирования формирователей когерентных радиосигналов, позволяющая рассчитать возможные варианты частотного плана и представить их в виде таблицы параметров, с возможностью сортировки и визуального отображения спектральных составляющих сигнала. Для выбора конкретного варианта построения формирователя сигналов была предложена методика проектирования формирователей когерентных радиосистем на основе высокоскоростных ЦАП согласно которой:

1. Определяются исходные данные для проектирования формирователя сигналов когерентной радиосистемы;

2. В соответствии с разработанным алгоритмом частотного планирования проводится расчёт таблицы параметров возможных вариантов реализации каждого формирователя сигналов;

3. Определяются варианты частотного плана для которых возможна техническая реализация умножения с коэффициентами  $N_i$  и  $M_i$ .

4. Среди всех доступных реализаций и режимов работы ЦАП определяется вариант с максимальной амплитудой и минимальной неравномерностью амплитуды сигнала в полосе рабочих частот.

5. Выбранный вариант проверяется на отсутствие интермодуляционных составляющих в полосе рабочих частот.

6. Для выбранного варианта реализации формирователя сигналов уточняется структура и составляются модели, позволяющие оценить уровень шумов, характеристики нелинейности тракта и поведение узлов тракта в целом.

С использованием разработанной программы был проведён расчёт частотного плана формирователей сигналов когерентных радиосистем UHF и S диапазонов частот. Проведён анализ вариантов реализации в результате которого были разработаны схемы формирователя сигналов с использованием для повышения частоты на выходе ЦАП образов сигнала в высших зонах Найквиста и смесителя частоты. На рисунке 2 представлены детализированные структурные схемы формирователя сигналов передатчика S диапазона частот при тактовой частоте ЦАП:  $f_T = 1536$  МГц (а);  $f_T = 1152$  МГц (б);  $f_T = 2304$  МГц (в).

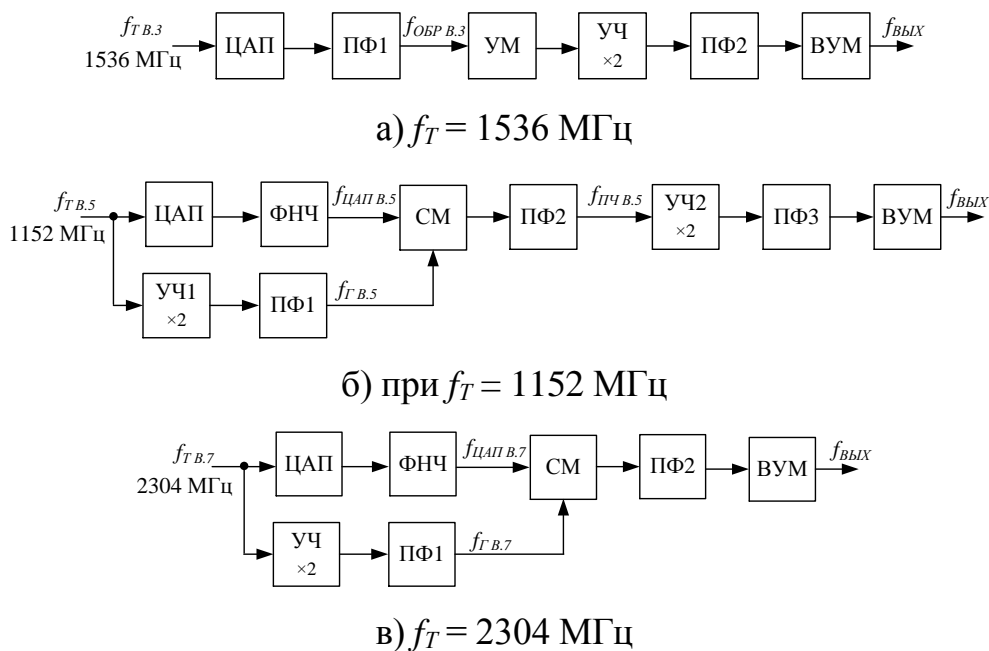


Рисунок 2 – Структурные схемы вариантов реализации формирователя сигналов S диапазона частот

Полученные с помощью разработанной программы частотного планирования диаграммы распределения частот для формирователей сигналов передатчика,

построенных на основе высокоскоростного ЦАП при  $f_T = 1152$  МГц,  $f_T = 1536$  МГц,  $f_T = 2304$  МГц приведены на рисунке 3.

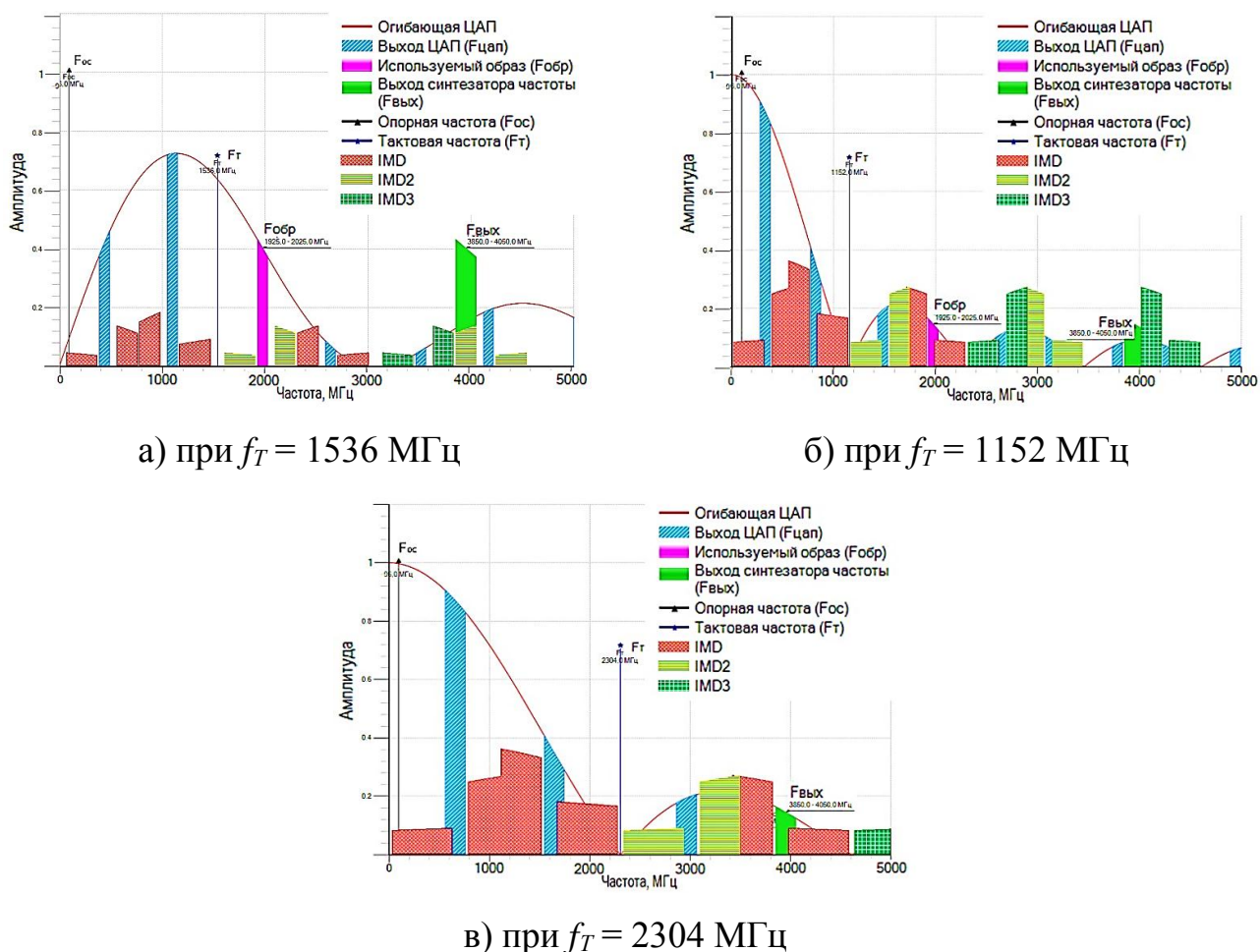


Рисунок 3 – Диаграмма распределения частот формирователя сигналов

### В третьей главе

Рассмотрены основные факторы, влияющие на уровень фазовых шумов радиотехнических систем. Проведён анализ математических моделей шумовых характеристик основных функциональных звеньев формирователей сигналов.

Разработана модель СПМ фазового шума в одиночной боковой полосе для прецизионного малозумящего кварцевого генератора:

$$\begin{aligned}
 S_{ГК219-ТС}(F) &= 6,68 \cdot 10^{-18} F^0 + 1,99 \cdot 10^{-14} F^{-1} + 5,53 \cdot 10^{-12} F^{-2} + 3,1 \cdot 10^{-8} F^{-3} = \\
 &= 10^{-17,18} + \frac{10^{-13,7}}{F} + \frac{10^{-11,26}}{F^2} + \frac{10^{-7,51}}{F^3},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $F$  – значения отстройки от несущей частоты.

Для описания фазовых шумов буфера тактовых сигналов ADCLK944 предложено выражение:

$$S_{ADCLK}(F) = S_{OC}(F) + 10^{-15,18}, \quad (3)$$

где  $f_T$  – частота тактового сигнала,  $S_{OC}(F)$  – СПМ фазового шума опорного сигнала.

Проведён анализ методов математического моделирования шумовых характеристик цифровых вычислительных синтезаторов и высокоскоростных ЦАП. В общем виде модель СПМ фазовых шумов синтезатора частот на основе ЦАП описывается выражением:

$$S_{ЦАП\ ВЫХ}(F) = S_{OG}(F) \cdot \left( \frac{f_{ЦАП}}{f_{OG}} \right)^2 + S_{ЦАП}(F), \quad (4)$$

где  $S_{ЦАП\ ВЫХ}(F)$  – СПМ фазовых шумов на выходе ЦАП;  $S_{OG}(F)$  – СПМ фазовых шумов опорного (тактового) генератора;  $S_{ЦАП}(F)$  – СПМ собственных фазовых шумов цифро-аналогового преобразователя;  $f_{ЦАП}$  – частота, формируемая на выходе ЦАП;  $f_{OG}$  – частота опорного генератора.

Проведён анализ различных подходов к определению собственных шумов ЦАП в результате которого была предложена модель СПМ фазовых шумов высокоскоростных ЦАП на основе регрессии экспериментальных данных, учитывающая изменение амплитуды сигнала в специальных режимах работы, которая может быть получена на основе ограничено набора теоретических данных:

$$S_{ЦАП\ G}(F) = \left( \frac{f_{ЦАП}}{f_{OG}} \right)^2 10^{k_{4.1}} + \left( \frac{f_{ЦАП}}{f_{OG}} \right)^2 \frac{10^{k_{1.1}}}{F} + 10^{k_{3.1}} K_{ЦАП\ ОБР}, \quad (5)$$

где  $K_{ЦАП\ ОБР}$  – коэффициент изменения амплитудной характеристики ЦАП в зависимости от режима работы,  $k_{1.1}$ ,  $k_{3.1}$ ,  $k_{4.1}$  – коэффициенты, определяющие уровень различных типов шумов ЦАП. В модели (5) отсутствие зависимости фликкерных шумов от режима работы справедливо для рассматриваемого диапазона частот  $0,2 f_{OG} < f_{ЦАП} < 0,5 f_{OG}$  в режимах NRZ, RZ и  $0,5 f_{OG} < f_{ЦАП} < 1,5 f_{OG}$  в режиме RF.

Для трактов формирования сигналов гетеродина и передатчика когерентной радиосистемы составлены структурные схемы со всеми источниками фазовых

флуктуаций. На основе структурных схем разработаны математические модели СПМ фазовых шумов генератора опорных сигналов гетеродина  $S_{OCГ}(F)$  (6) и передатчика  $S_{OC ПРД}(F)$  (7), а также формирователей сигналов гетеродина  $S_{Г}(F)$  (8) и передатчика  $S_{ПРД}(F)$  (9) с учётом вклада шумов каждого функционального звена схемы.

$$S_{OCГ}(F) = (S_{ГОЧ}(F) + S_{БТС}(F)) \cdot N_1^2 + S_{УМ}(F), \quad (6)$$

$$S_{OC ПРД}(F) = (S_{ГОЧ}(F) + S_{БТС}(F)) \cdot N_2^2 + S_{УЧ}(F) + S_{УМ}(F), \quad (7)$$

$$S_{Г}(F) = \left( (S_{OCГ}(F) + S_{БТС}(F)) \cdot K_{ЦАП}^2 + S_{ЦАП}(F) + S_{OCГ}(F) + S_{БТС}(F) \right) \cdot \frac{S_{СМ}(F)}{K_{СМ}} + S_{УМ}, \quad (8)$$

$$S_{ПРД}(F) = \left( (S_{OC ПРД}(F) + S_{БТС}(F)) \cdot K_{ЦАП}^2 + S_{ЦАП}(F) + S_{OC ПРД}(F) + S_{БТС}(F) + \frac{S_{СМ}(F)}{K_{СМ}} + S_{УЧ}(F) \right) \cdot M_1^2 + S_{УМ}(F), \quad (9)$$

где  $S_{ГОЧ}(F)$ ,  $S_{БТС}(F)$ ,  $S_{УЧ}(F)$ ,  $S_{УМ}(F)$ ,  $S_{СМ}(F)$  – СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты, буфера тактовых сигналов, умножителя частоты, усилителя мощности и смесителя частоты соответственно;  $K_{СМ}$  – коэффициент преобразования смесителя частоты по мощности (единица если нет ухудшения отношения сигнал / шум);  $N_{1,2}$ ,  $M_1$  – коэффициенты умножения умножителей частоты.

Составлены математические модели СПМ фазовых шумов трёх вариантов реализации формирователя сигналов S-диапазона частот на основе высокоскоростного ЦАП. Результаты моделирования приведены на рисунке 4.

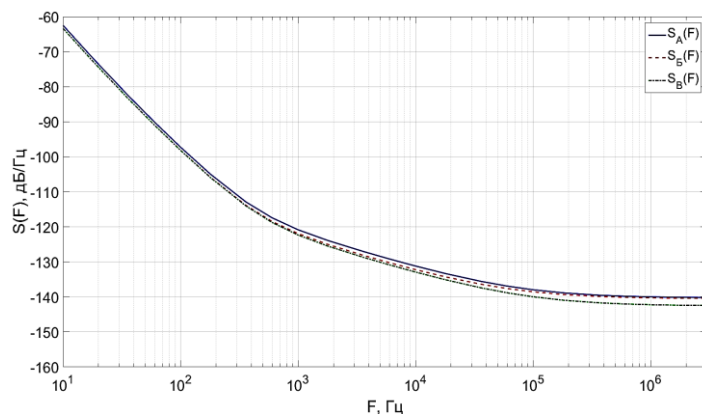


Рисунок 4 – СПМ фазовых шумов трёх вариантов реализации формирователя сигналов на основе высокоскоростного ЦАП, при  $f_{ВЫХ} = 4,05$  ГГц

Сравнительный анализ шумовых характеристик показал, что структура формирователя на основе высокоскоростного ЦАП использующего образ основной частоты, позволяет при более простой реализации обеспечить уровень СПМ фазовых шумов не более минус 120 дБ/Гц на отстройке 1 кГц от несущей частоты, при этом исключив попадание интермодуляционных составляющих в полосу рабочих частот без ухудшения уровня фазового шума.

### В четвёртой главе

Предложена структура цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов на основе высокоскоростного ЦАП с комбинированием данных, позволяющая повысить быстродействие цифрового устройства управления и сократить необходимый объем блоков памяти в два раза. Структурная схема цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов на основе высокоскоростного ЦАП с комбинированием данных приведена на рисунке 5.

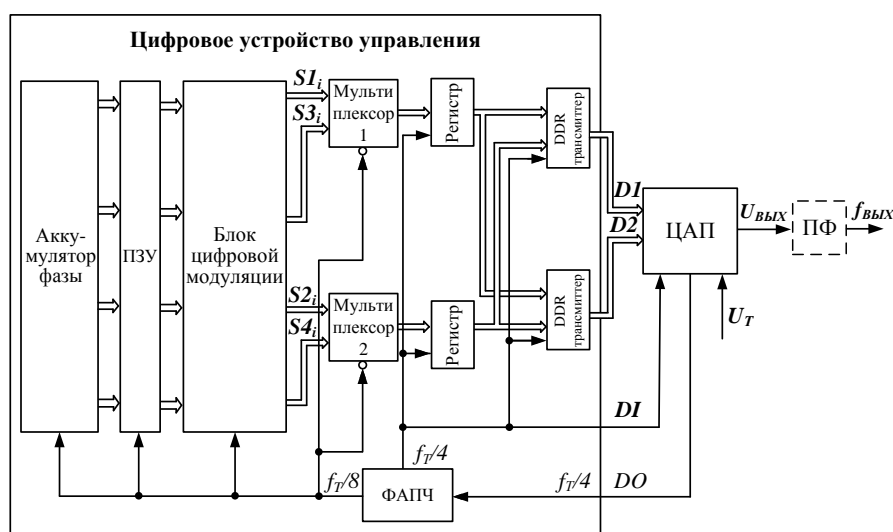


Рисунок 5 – Структурная схема цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов на основе высокоскоростного ЦАП с комбинированием данных

Результаты моделирования огибающей спектра сигнала и экспериментальные измерения показали, что при комбинировании данных в режиме работы NRZ спектр сигнала на выходе ЦАП будет совпадать со спектром сигнала с частотой дискретизации  $f_d = f_T/2$ . В режимах работы RZ и RF при комбинировании данных амплитуды образов в 4, 5 зонах Найквиста увеличиваются на 5–15 дБ и

на 1-5 дБ снижается мощность спектральных составляющих в зонах 1-3, 6-8 по сравнению с режимом, не использующим удвоение тактовой частоты, что позволяет повысить частоты формируемого радиосигнала при использовании образов в специальных режимах работы высокоскоростных ЦАП.

Проведено экспериментальное исследование СПМ фазовых шумов формирователя когерентных сигналов, реализованного по предложенной структуре. Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных характеристик позволил выявить отклонение значений СПМ фазовых шумов на отстройке от 1 кГц до 10 кГц, вызванное влиянием шумов цепи питания ЦАП.

Введение дополнительных цепей стабилизации электропитания позволило снизить уровень фазовых шумов формирователя сигналов на 5-6 дБ. Для предложенных моделей СПМ фазовых шумов значения средней ошибки аппроксимации составляет менее 1 дБ, а максимальная ошибка аппроксимации не превышает 2,5 дБ. Таким образом, разработанные математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей когерентных сигналов на основе высокоскоростных ЦАП подтверждены экспериментально.

Предложена структура гибридного синтезатора частот с квадратурным модулятором и многоканальным ЦАП для смещения частоты в цепи обратной связи ФАПЧ.

Предложенная структура гибридного синтезатора частот позволяет уменьшить коэффициент деления в цепи обратной связи при использовании образов основной частоты в высших зонах Найквиста в специальных режимах работы высокоскоростного ЦАП без использования дополнительных усилительных каскадов. Применение квадратурного модулятора совместно с двухканальным ЦАП позволяет подавить зеркальную частоту и остаточный сигнал несущего колебания, расширив диапазон подстройки синтезатора с помощью цепи смещения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель исследования была достигнута благодаря решению всех поставленных задач. О достижении цели свидетельствуют следующие результаты:

1. Проведен анализ основных характеристик и методов построения синтезаторов частот и формирователей когерентных высокочастотных сигналов со сложными видами модуляции. Определено, что структура на основе высокоскоростного ЦАП обеспечивает унификацию конструкции формирователей сигналов, а генератор опорных сигналов для многоканальной когерентной системы целесообразно построить на основе общей опорной частоты.

2. Предложена обобщённая структурная схема когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП, включающая генератор опорных сигналов, формирователи сигналов передатчика и гетеродина приёмника, которая позволяет на основе унифицированной структуры формировать сигналы для заданной полосы частот при использовании образов в высших зонах Найквиста.

3. Разработан алгоритм частотного планирования, позволяющий определить параметры (коэффициенты умножения, номера зон Найквиста, коэффициенты передачи ЦАП, частоты в различных точках схемы) нескольких когерентных каналов формирования радиосигналов с учётом режима преобразования сигнала в приёмном устройстве, в том числе с возможностью использования спектральных составляющих высших зон Найквиста для повышения выходной частоты ЦАП.

4. На основе предложенного алгоритма реализована программа, позволяющая рассчитать возможные варианты частотного плана и представить их в виде таблицы параметров, с возможностью сортировки и визуального отображения спектральных составляющих сигнала с учётом влияния специальных режимов работы высокоскоростных ЦАП. Разработана методика проектирования многоканальных когерентных радиосистем, использующих высокоскоростные ЦАП в специальных режимах работы.

5. С помощью разработанной автором программы и предложенной методики проектирования проведен расчёт формирователей сигналов когерентных

радиосистем UHF и S диапазонов частот, проведён анализ вариантов их реализации. Разработаны детализированные структурные схемы двухканального генератора опорных сигналов, формирователей сигналов гетеродина и передатчика, которые позволяют реализовать генерирование сигналов на основе унифицированной конструкции с использованием для повышения частоты на выходе ЦАП образов сигнала в высших зонах Найквиста и смесителя частоты. Использование образов основной частоты на выходе ЦАП в режиме RZ позволило значительно упростить структуру формирователя сигналов с точки зрения технической реализации, при этом исключив попадание интермодуляционных составляющих в полосу рабочих частот.

Предложен и реализован цифровой формирователь фазоманипулированных сигналов на основе цифроаналогового преобразователя с двух портовым интерфейсом и удвоенной скоростью передачи данных – схема с комбинированием данных. Предложенный формирователь сигналов, на который получен патент на полезную модель, повысил быстродействие цифрового формирователя фазоманипулированных сигналов и сократил необходимый объём памяти в два раза.

Результаты теоретических исследований, подтвержденные экспериментально, показали, что в режимах работы RZ и RF при комбинировании данных амплитуды образов в 4, 5 зонах Найквиста увеличиваются на 5-15 дБ и на 1-5 дБ снижается мощность спектральных составляющих в зонах 1-3, 6-8 по сравнению с режимом, не использующим удвоение тактовой частоты, что позволяет повысить частоты формируемого радиосигнала при использовании образов в специальных режимах работы высокоскоростных ЦАП.

6. На основе сравнительного анализа известных моделей СПМ фазовых шумов для высокоскоростных ЦАП предложена модель на основе регрессии экспериментальных данных, учитывающая изменение амплитуды сигнала в специальных режимах работы ЦАП.

Составлены математические модели СПМ фазовых шумов в одной боковой полосе частот формирователей сигналов гетеродина и передатчика с учётом вклада шумов каждого функционального звена схемы.

Сравнительный анализ полученных шумовых характеристик показал, что структура формирователя на основе высокоскоростного ЦАП, использующего образы основной частоты, позволяет упростить структуру за счет уменьшения количества функциональных звеньев и обеспечить уровень СПМ фазовых шумов не более минус 120 дБ/Гц на отстройке 1 кГц от несущей частоты для выходных частот 823-1130 МГц и 4050 МГц.

Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных измерений шумовых характеристик формирователя когерентных сигналов, реализованного по предложенной структуре, позволил выявить увеличение уровня СПМ фазовых шумов вызванное влиянием цепи питания ЦАП. Введение дополнительных цепей стабилизации электропитания позволило снизить уровень фазовых шумов формирователя сигналов на 5-6 дБ. Для предложенных моделей СПМ фазовых шумов формирователя сигналов средняя ошибка аппроксимации составляет менее 1 дБ, а максимальная ошибка аппроксимации не превышает 2,5 дБ. Таким образом, разработанные математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей когерентных сигналов на основе высокоскоростных ЦАП подтверждены экспериментально.

7. Предложена схема гибридного синтезатора частот с квадратурным модулятором и многоканальным ЦАП для смещения частоты в цепи обратной связи ФАПЧ, на которую получен патент на полезную модель. Предложенная схема гибридного синтезатора позволяет уменьшить коэффициент деления в цепи обратной связи при использовании образов основной частоты высших зон Найквиста в специальных режимах работы высокоскоростного ЦАП без использования дополнительных усилительных каскадов. Применение квадратурного модулятора совместно с двухканальным ЦАП позволяет подавить зеркальную частоту и остаточный сигнал несущего колебания более 32 дБ, расширив диапазон подстройки синтезатора с помощью цепи смещения.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в изданиях из перечня ВАК**

1. Ромашов, В.В. Математические модели шумовых характеристик цифро-аналоговых преобразователей / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, Н.А. Сочнева, Грошков И.Д. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. Муром. 2021, №2. С. 50-56.

2. Ромашов, В.В. Сравнительный анализ шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов на основе цифро-аналоговых преобразователей / Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. // Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2024. №2. С. 6-16.

3. Грошков, И.Д. Моделирование спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей сигналов на основе высокоскоростных ЦАП / Грошков И.Д. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. Муром. 2024, №3. С. 80-86

4. Грошков, И.Д. Методика проектирования формирователей когерентных сигналов на основе высокоскоростных ЦАП / Грошков И.Д. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. Муром. 2025, №3. С. 19-29

### **Статьи в изданиях, индексируемых Scopus**

5. Romashov, V.V. Radar hybrid signal generators based on high-speed digital-to-analog converters / V.V. Romashov, K.A. Yakimenko, A.N. Doktorov, I.D. Groshkov // Journal of Physics: Conference Series Volume 1991, Issue 1, 19 August 2021, Номер статьи 0120232 Russian Open Scientific Conference «Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction», (MPRSRWPD) 2021 25-27 May 2021, Murom, Russian Federation. DOI:10.1088/1742-6596/1991/1/0120232-s2.0-85114205063

### **Статьи в других изданиях**

6. Ромашов, В.В. Моделирование шумовых характеристик генераторов сигналов радиолокационных систем / В.В. Ромашов, И.Д. Грошков // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2020. Вып. 22. С. 10 – 14.

## **Статьи, опубликованные в сборниках научно-технических конференций**

7. Грошков, И.Д. Анализ методов формирования сигналов радиолокационных станций на основе цифро-аналоговых преобразователей // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XIII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез.докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 5 февр. 2021 г. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2021. С. 133-136

8. Ромашов, В.В. Обзор методов формирования сложных радиолокационных сигналов на основе цифро-аналоговых преобразователей / В.В. Ромашов, И.Д. Грошков // Радиолокация и связь – перспективные технологии. XVIII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция. Москва. 2020 г. // Сборник трудов конференции – М.: Мир науки, 2021. – Режим доступа: [<https://izdmn.com/PDF/02MNNPK21.pdf>] – Загл. с экрана. ISBN 978-5-6045770-2-8 С. 19 – 25.

9. Грошков, И.Д. Математические модели шумовых характеристик буферов тактовых импульсов / И.Д. Грошков // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 14-ой международной научно – технической конференции / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов (и др). – Владимир: ВлГУ. - 2021. – 435 с. - ISBN 978-5-9984-1357-5 С.210-213

10. Грошков, И.Д. Математическое моделирование шумовых характеристик буферов тактовых импульсов / И.Д. Грошков // Радиолокация и связь – перспективные технологии. XIX Всероссийская молодежная научно-техническая конференция (Москва, 09 декабря 2021 г.) // Сборник трудов конференции – М.: Мир науки, 2021. — Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/02MNNPK22.pdf> – Загл. с экрана. ISBN 978-5-6047491-9-7 С. 23 – 27.

11. Ромашов, В.В. Экспериментальное исследование формирователя сигналов на основе радиочастотного ЦАП с удвоенной скоростью передачи данных / В.В. Ромашов, И.Д. Грошков // Радиолокация и связь – перспективные технологии. XX Всероссийская молодежная научно-техническая конференция (Москва, 07 де-

кабря 2022 г.) // Сборник трудов конференции – М.: Мир науки, 2023. – Режим доступа: <https://izdmn.com/PDF/05MNNPK23.pdf> – Загл. с экрана. ISBN 978-5-907603-81-3 С. 52 – 57.

12. Грошков, И.Д. Оценка адекватности регрессионной модели шумовых характеристик устройства формирования высокочастотных сигналов / И.Д. Грошков // Актуальные проблемы современной науки и производства. VIII Всероссийская научно-техническая конференция. Рязань, 27-30 ноября 2023 г. – Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_56573287\\_33941628.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_56573287_33941628.pdf) – Загл. с экрана. ISBN 978-5-7722-0391-0. С. 49 – 53.

13. Ромашов, В.В. Оценка влияния специальных режимов работы быстродействующих ЦАП на уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов формирователей сигналов / В.В. Ромашов, К.А. Якименко, А.Н. Докторов, И.Д. Грошков // Радиолокация и связь – перспективные технологии. XXI Всероссийская молодежная научно-техническая конференция Москва, 07 декабря 2023 г. – Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/02MNNPK24.pdf> – Загл. с экрана. ISBN 978-5-907731-82-0. С. 49 – 53.

#### **Патенты на полезные модели**

14. Ромашов, В.В. Цифровой формирователь фазоманипулированных сигналов на основе цифроаналогового преобразователя с комбинированием данных / В.В. Ромашов, И.Д. Грошков, К.А. Якименко, А.Н. Докторов // Патент на полезную модель №119623 от 20.05.2024.

15. Якименко, К.А. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифроаналогового преобразователя и квадратурного модулятора / К.А. Якименко, И.Д. Грошков // Патент на полезную модель № 226574 от 23.03.2024.

#### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

16. Грошков, И.Д. Программа расчёта частотного плана формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей / И.Д. Грошков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617592 от 26.03.2025.

---

Подписано в печать 27.05.2026.  
Формат 60x84 1/16. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.

Типография акционерного общества  
«Муромский завод радиоизмерительных приборов»  
602267, Владимирская область, г. Муром, ш. Карачаровское, д. 2.

---