

На правах рукописи

Докторов

Докторов АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ФОРМИРОВАТЕЛИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОПИЙ СПЕКТРА СИГНАЛА ЦИФРОВЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2018

Работа выполнена на кафедре радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель: **Ромашов Владимир Викторович**
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Официальные оппоненты: **Кошелев Виталий Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

Зеленов Дмитрий Юрьевич кандидат технических наук, начальник сектора открытого акционерного общества «Владимирское конструкторское бюро радиосвязи», г. Владимир.

Ведущая организация: АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», г. Муром

Защита диссертации состоится 05 июня 2018 года в 14⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д.212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 30 марта 2018 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема формирования дискретного множества когерентных стабильных сигналов в заданном диапазоне частотного спектра является крайне важной для многих областей радиоэлектроники. В настоящий момент наиболее востребованными являются диапазоны ультравысоких и сверхвысоких частот. Однако создание устройств формирования когерентных сигналов с низким уровнем фазовых шумов для таких диапазонов частот является актуальной и не до конца решенной задачей. Это связано с тем, что системы прямого аналогового и косвенного синтеза частот не позволяют получить высокую разрешающую способность сетки частот в широком частотном диапазоне, а выходная частота для интегральных микросхем цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС), реализующих метод прямого цифрового синтеза, на данный момент ограничена значением в 1500-1700 МГц. Это обстоятельство затрудняет создание современных систем формирования сигналов на основе ЦВС в более высокочастотных диапазонах.

Степень разработанности темы:

Вопросам повышения выходных частот ЦВС посвящено множество работ отечественных (В.Н. Кулешов, Б.Е. Кулешов, Я.Е. Зильберберг, В.И. Теаро, Н.П. Ямпурин, А.В. Пестряков, В.Н. Кочемасов, С.Я. Шишов, Л.А. Белов, Е.Б. Жалнин, П.А. Попов, В.В. Ромашов) и зарубежных авторов (V.F. Kroupa, Jouko Vankka, Y.H. Liu, Jon Bredeson, Micheal Parten, John Borrelli, Thomas M. Comberiate, J. P. Van't Hof, Laura B. Ruppalt, Keir C. Lauritzen, Salvador H. Talisa, David Brandon), в которых на данный момент предложено несколько способов решения обозначенной проблемы. Однако все они обладают характерными недостатками, основным из которых является увеличение уровня фазовых шумов.

Особенностью прямого цифрового синтеза является то, что в спектре выходного сигнала цифро-аналогового преобразователя ЦВС присутствуют копии спектра сигнала основной синтезируемой частоты - продукты зеркального отображения ее гармоник относительно частоты тактового сигнала. В англоязычной литературе данные побочные компоненты спектра имеют название

images – имиджи, изображения, однако более точным вариантом перевода, передающим смысл термина, являются «образы». Использование указанных побочных компонентов выходного спектра ЦВС может позволить решить проблему ограничения максимальной выходной частоты синтезатора и роста фазовых шумов на ней. Данная идея была обозначена в работах R. I. Vinchentzio, V.F. Kroupa, компании Analog Devices и является весьма перспективной. Однако на данный момент она мало изучена и освещена в научной литературе, а также отсутствуют сведения о реальных устройствах, реализующих данный подход.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование формирователей высокочастотных когерентных сигналов, использующих копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов.

Выполнение цели требует решения следующих задач:

- обосновать возможность использования копий спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов для повышения выходных частот формирователей когерентных сигналов, разработать обобщенную структурную схему;

- разработать алгоритм и программное обеспечение для частотного планирования формирователей когерентных сигналов, использующих копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов;

- на основе экспериментальных данных разработать математическую модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов для частот образов;

- теоретически и экспериментально исследовать шумовые свойства формирователей когерентных сигналов, использующих копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов.

Объектом исследования являются цифровые вычислительные синтезаторы.

Предметом исследования являются копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов и их применение для синтеза сигналов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования, автоматического управления, спектрального анализа,

экспериментальных измерений. Моделирование и расчет проводились на ЭВМ с использованием программ MathCAD, MatLab и C++.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- предложена обобщенная структурная схема формирователя когерентных сигналов, использующего копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов для повышения выходной частоты;

- разработан алгоритм частотного планирования формирователей когерентных сигналов, в которых используются копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов;

- впервые предложена и экспериментально подтверждена математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов, использующих копии спектра выходного сигнала, позволяющая проводить моделирование шумовых характеристик формирователей когерентных сигналов;

- получены результаты теоретического и экспериментального исследования шумовых характеристик разработанных формирователей когерентных сигналов, использующих копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов.

Теоретическая и практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- разработана обобщенная структурная схема формирователя когерентных сигналов, использующих копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов, позволяющая более чем на порядок повысить выходную частоту устройства и исключить выходные умножители частоты, либо уменьшить их количество и снизить коэффициент умножения до минимально возможного значения.

- разработано программное обеспечение для ЭВМ, позволяющее проводить частотное планирование формирователей когерентных сигналов, использующих копии спектра основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов;

- на основе экспериментальных данных разработана математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных

синтезаторов, использующих копии спектра основной частоты, позволяющая на стадии проектирования с низкой погрешностью проводить оценку спектральной плотности мощности фазовых шумов разрабатываемых устройств;

- разработан формирователь когерентных сигналов, использующий копии спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов для повышения выходной частоты и обладающий меньшим на 4-5 дБ уровнем фазовых шумов по сравнению с аналогичным устройством без использования образов.

Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальным исследованием спектральной плотности мощности фазовых шумов интегрального ЦВС AD9910 и формирователя когерентных сигналов на его основе при применении копий спектра сигнала основной частоты.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритм частотного планирования формирователей когерентных сигналов, полученный в диссертации, позволяет рассчитать варианты частотного плана с учетом условия фильтрации копий спектра основной частоты выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов.

- для теоретической оценки шумовых характеристик исследуемых формирователей сигналов необходимо использовать математическую модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов, учитывающую изменение амплитуд копий спектра выходного сигнала от частоты.

- результаты теоретического и экспериментального исследования формирователей высокочастотных когерентных сигналов, использующих копии спектра и передискретизацию выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов свидетельствуют о снижении необходимого числа транзисторных каскадов выходного умножителя частоты и показывают возможность улучшения шумовых характеристик устройств на 4-5 дБ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались на следующих конференциях и семинарах: XVII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные

проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2014); третьей Всероссийской научно-практической конференции акционерного общества «Муромский завод радиоизмерительных приборов» (Муром, 2015); 11-ой и 12-ой международных научно-технических конференциях «Перспективные технологии в средствах передачи информации», (Суздаль, 2015, 2017); 15-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016» (Москва, 2016); X Всероссийской конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2016); 7-ой Всероссийской конференции: "Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации" (Москва, 2017); III-IX всероссийских научных Зворыкинских чтениях (Муром, 2011-2017); IX, XII международных IEEE Сибирских конференциях по управлению и связи (Красноярск, 2013, 2015); 24-ой международной IEEE Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2014).

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 7 статей в журналах перечня ВАК, 3 публикации, индексируемые в международной реферативной базе Scopus, 15 тезисов докладов. Имеется 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в исследования по НИОКР на АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», в учебном процессе кафедры радиотехники Муромского института ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», использованы при выполнении гранта РФФИ № 16-37-00299 мол_а.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составляет 162 страниц машинописного текста, включая 92 рисунка и 15 таблиц. Библиография содержит 157 наименований, в том числе 27 работ автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, намечены основные направления повышения выходных частот формирователей когерентных сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы, посвященной проблеме ограничения максимальной частоты выходного сигнала ЦВС и способам ее повышения, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Для повышения выходных частот формирователей когерентных сигналов на основе ЦВС на данный момент известно четыре метода: совершенствование интегральной технологии для разработки ЦВС с большими тактовыми частотами, применение транзисторных умножителей выходной частоты ЦВС; преобразование выходной частоты ЦВС вверх и использование умножителей выходной частоты ЦВС на основе петли ФАПЧ. Однако каждый из них обладает характерными недостатками: возможности совершенствования интегральных технологий ограничены, использование преобразования выходной частоты ЦВС вверх нарушает когерентность синтезируемых сигналов, а умножение выходной частоты ЦВС петлей ФАПЧ либо транзисторными каскадами сопровождается значительным увеличением уровня фазовых шумов.

Показано, что перспективным методом повышения выходной частоты формирователей сигналов на основе ЦВС является использование образов выходной частоты синтезатора - побочных компонентов спектра выходного сигнала его цифро-аналогового преобразователя, возникающих в результате зеркального отображения гармоник основной частоты относительно частоты тактового сигнала вследствие эффекта дискретизации. Для выделения необходимого побочного компонента с частотой соответствующего образа необходимо использовать полосовой фильтр (ПФ). При этом следует учитывать, что уровень гармоник существенно меньше уровня основной спектральной

компоненты выходного сигнала ЦВС, в связи с чем, для повышения выходной частоты ЦВС рекомендуется использовать только ее образы. Кроме того, с энергетической точки зрения и для обеспечения лучшей фильтрации рекомендуется, чтобы коэффициент передачи ЦВС, определяемый отношением основной синтезируемой частоты к тактовой частоты $K_{ЦВС} = f_{ЦВС} / f_T$, принимал значения в пределах $0,15 \leq K_{ЦВС} \leq 0,35$, поскольку частотная характеристика ЦАП определяется функцией синуса Котельникова и вызывает уменьшение амплитуд образов по сравнению с основной выходной частотой ЦВС.

Во второй главе разработана теория построения формирователей когерентных сигналов с применением образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов.

Разработаны математические модели выходного сигнала цифро-аналогового преобразователя ЦВС, учитывающие реальные особенности его функционирования: эффект дискретизации и ошибки, возникающие из-за усечения кода фазы и квантования. По данным моделям установлено, что огибающие спектров сигналов ошибок моделей изменяются от частоты по закону, соответствующему функции синус Котельникова. Этот результат позволяет сделать вывод о том, что уровень паразитных спектральных составляющих и фазовых шумов, определяемых ошибками из-за усечения кода фазы и квантования, на частоте выделяемого полосовым фильтром образа будет таким же, как и на основной частоте ЦВС. В результате, используя для формирования когерентных сигналов образы основной частоты ЦВС, можно получить меньший уровень фазовых шумов, чем при применении других методов.

Предложена обобщенная структурная схема формирователя когерентных сигналов с использованием образов основной частоты ЦВС - рис. 1.

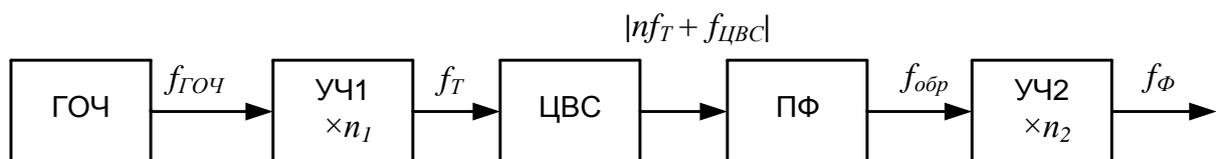


Рисунок 1 - Обобщенная структурная схема формирователя когерентных сигналов с использованием образов основной частоты ЦВС

На схеме приняты следующие обозначения: ГОЧ – генератор опорной частоты $f_{ГОЧ}$, УЧ1 – умножитель частоты кварцевого генератора на нелинейных элементах или на основе интегрированной петли ФАПЧ с коэффициентом умножения n_1 ; f_T – тактовая частота ЦВС; $f_{обр} = |nf_T + f_{ЦВС}|$ – частота образа, $n = \dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 \dots$ – номер образа; УЧ2 – умножитель частоты выходного сигнала ЦВС на нелинейных элементах с коэффициентом умножения n_2 ; f_Φ – выходная частота формирователя сигналов.

При использовании основной частоты ЦВС выходная частота формирователя определяется как

$$f_\Phi = f_{ГОЧ} n_1 n_2 K_{ЦВС}, \quad (1)$$

а при использовании ее образов как

$$f_\Phi = f_{ГОЧ} n_1 n_2 |n + K_{ЦВС}| \quad (2)$$

Разработан алгоритм частотного планирования формирователей когерентных сигналов на образах основной частоты ЦВС, заключающийся в определении комбинаций допустимых значений его параметров: коэффициентов умножения умножителей частоты n_1 и n_2 , а также номера образа основной частоты ЦВС n . Алгоритм включает в себя следующие этапы:

1. Задаются исходные данные, необходимые для частотного планирования: частота ГОЧ $f_{ГОЧ}$, максимальная тактовая частота ЦВС и диапазон выходных частот формирователя.

2. На основании исходных данных определяется среднее значение коэффициента передачи ЦВС $K_{ЦВС}$.

3. Устанавливается максимальный номер образа n_{max} , для которых ведется расчет частотного плана.

4. Определяется диапазон значений номера образов: $n = -n_{max} \dots n_{max}$.

5. Определяется диапазон значений коэффициента умножения тактовой частоты ЦВС (УЧ1): $n_1 = n_{1min} \dots n_{1max}$. Исходя из того, что:

$n_{1min} = trunc(f_{Tmin}/f_{ГОЧ}), n_{1max} = trunc(f_{Tmax}/f_{ГОЧ})$ и определяется диапазон значений тактовой частоты ЦВС: $f_T = n_1 \cdot f_{ГОЧ}$.

6. Осуществляется предварительный расчет коэффициента умножения выходного умножителя частоты формирователя сигналов (УЧ2):

$$\text{при } n \neq 0 \quad n_2 = round\left(\frac{f_\Phi}{f_T \cdot |n + K_{ЦВС}|}\right).$$

7. Определяется частота n -го образа основной частоты ЦВС: $f_{обр} = f_\Phi / n_2$.

8. Производится расчет, уточняющий коэффициент передачи ЦВС $K_{ЦВС}$:

$$\text{при } n \neq 0 \quad K_{ЦВС} = \left(\frac{sign(n)f_\Phi}{f_T \cdot n_2} - n\right), \text{ где } sign(n) - \text{знак номера образа } n, \text{ при}$$

условии, что $[sign(n)f_\Phi / f_T \cdot n_2 - n] \leq K_{ЦВСmax} \wedge [sign(n)f_\Phi / f_T \cdot n_2 - n] \geq K_{ЦВСmin}$.

9. В дальнейших расчетах используются значения n_2 , для которых $K_{ЦВС} \neq 0$. В случае, если $K_{ЦВС} = 0$, то коэффициент умножения выходного умножителя формирователя сигналов УЧ2 становится равным нулю ($n_2 = 0$). Это означает, что данный вариант частотного плана реализовать невозможно.

10. Рассчитываются значения основной частоты ЦВС при $n \neq 0$ и $n_2 \neq 0$:

$$f_{ЦВС} = (sign(n)f_\Phi / n_2 - n \cdot f_T).$$

11. Производится уточняющий расчет выходной частоты ЦВС на n -м образе для $n_2 \neq 0$: $f_{обр} = f_\Phi / n_2$.

Рассчитанные комбинации параметров определяют варианты частотного планирования формирователя.

Разработанный алгоритм частотного планирования формирователей сигналов с использованием ЦВС в режиме образов основной частоты программно реализован в среде С++ и среде MatLab в составе специализированного программного обеспечения, которое содержит модули расчета реализуемых на практике действительных и целочисленных комбинаций коэффициентов умножения умножителей частоты УЧ1 и УЧ2 (n_1 и n_2), графический интерфейс.

База данных, используемая программой, является пополняемой и содержит основные параметры реальных интегральных ЦВС.

Кроме того исследовано явление передискретизации, позволяющее изменить соотношения амплитуд гармоник в спектре выходного сигнала ЦВС. Разработана структурная схема формирователя с использованием образов и передискретизацией выходного сигнала ЦВС. Получены зависимости уровней гармоник образов от скважности импульсов передискретизатора. Показано, что максимальное увеличение амплитуды гармоник образов равно 10-12 дБ.

В третьей главе разработаны математические модели шумовых характеристик цифровых вычислительных синтезаторов на образах основной частоты и формирователей когерентных сигналов на их основе.

Проведенный анализ показал, что образы основной частоты ЦВС и все составляющие его фазового шума имеют одинаковую зависимость от частотной характеристики ЦАП – изменяются обратно пропорционально квадрату функции синус Котельникова. С учетом данного обстоятельства получено результирующее выражение для спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов ЦВС на образах основной частоты

$$S_{\text{ЦВС_обр}}(F) = \left[\left(\frac{f_{\text{ЦВС}}}{f_T} \right)^2 \left(\frac{a_1 \cdot 10^{k_2}}{F^2} + \frac{a_2 \cdot 10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + a_3 \cdot 2^{-2N-0.59} \left(\frac{f_{\text{ЦВС}}}{f_T^2} \right) \right] \cdot \left(\left(\frac{\pi |nf_T + f_{\text{ЦВС}}|}{f_T} \right) / \sin \left(\pi \frac{|nf_T + f_{\text{ЦВС}}|}{f_T} \right) \right)^2, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, определяющие уровень СПМ $1/F$ шума, $1/F^2$ шума, естественной шумовой составляющей входных цепей ЦАП и сопротивления нагрузки; F – частота отстройки от несущей; N – разрядность ЦАП ЦВС, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты размерности, равные соответственно 1 Гц², 1 Гц, 1 Гц.

С учетом шумов ГОЧ $S_{\text{ГОЧ}}(F)$ математическая модель СПМ фазовых шумов ЦВС определяется как

$$S_{\text{ЦВСобрвых}}(F) = S_{\text{ГОЧ}}(F) \cdot (n + K_{\text{ЦВС}})^2 + S_{\text{ЦВС_обр}}(F). \quad (4)$$

Составлена математическая модель СПМ фазовых шумов интегральных ЦВС на образах основной частоты со встроенным умножителем тактовой частоты на ФАПЧ

$$S_{\text{ЦВСобрФАПЧвых}}(F) = S_{\text{ФАПЧ}} K_{\text{ЦВС}}^2 + S_{\text{ЦВС_обр}}(F), \quad (5)$$

где $S_{\text{ФАПЧ}}(F) = (S_{\text{ГОЧ}}(F) + S_{\text{ДПКД}}(F) + S_{\text{ЧФД}}(F)) |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) |H_{32}(F)|^2$ -

СПМ фазовых шумов встроенного умножителя тактовой частоты ЦВС на ФАПЧ;

$S_{\text{ГОЧ}}(F)$, $S_{\text{ДПКД}}(F)$, $S_{\text{ЧФД}}(F)$, $S_{\text{ГУН}}(F)$ - СПМ фазовых шумов ГОЧ, делителя

частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД), импульсно-фазового

детектора (ИФД) и генератора управляемого напряжением (ГУН);

$H_{31}(p) = H(p)/(1+H(p))$ - передаточная функция петли ФАПЧ по внешним шумам;

$H_{32}(p) = 1/(1+H(p))$ - передаточная функция петли ФАПЧ по внутренним шумам;

$H(p) = K_{\text{ФНЧ}}(p) \cdot N_2 \cdot S_{\text{ГУН}}/p$ - передаточная функция разомкнутого кольца ФАПЧ; p -

оператор Лапласа; $K_{\text{ФНЧ}}(p)$ - передаточная функция фильтра нижних частот; N_2 -

коэффициент деления ДПКД, равный коэффициенту умножения n_1 ; $S_{\text{ГУН}}$ -

крутизна модуляционной характеристики ГУН.

На рис. 2а в качестве примера приведены СПМ фазовых шумов интегрального ЦВС AD9910 для основной частоты и ее образов при тактовой частоте 100 МГц и $K_{\text{ЦВС}} = 0,25$, построенные с использованием полученных математических моделей (3), (4).

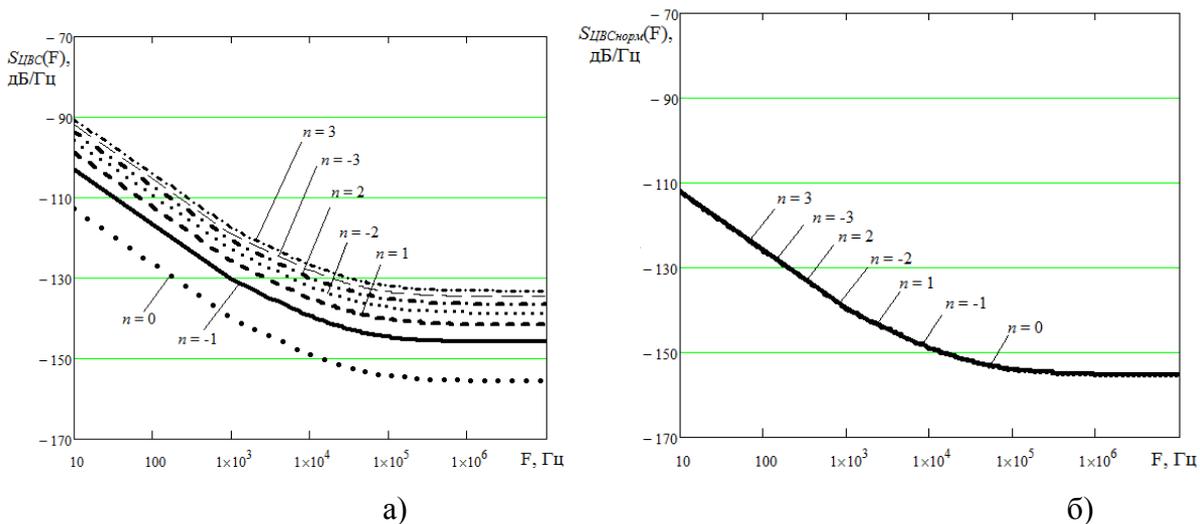


Рисунок 2 - СПМ фазовых шумов интегрального ЦВС AD9910 для основной частоты $n = 0$, и образов $n = 1, -1, -2, 3, -3$ (а); (б) – нормированные СПМ фазовых шумов ЦВС от частот образов к основной частоте

Из анализа полученного семейства кривых следует, что с увеличением номера выделяемого образа наблюдается рост его фазовых шумов. Однако, как следует из рис. 2б, где показаны СПМ фазовых шумов образов основной частоты ЦВС, приведенные к одной частоте, уровень СПМ фазовых шумов для частот образов остается таким же, как и на основной синтезируемой частоте ЦВС.

На рис. 3 приведены результаты экспериментальной проверки полученных математических моделей шумовых характеристик ЦВС на образах основной частоты (3), (4).

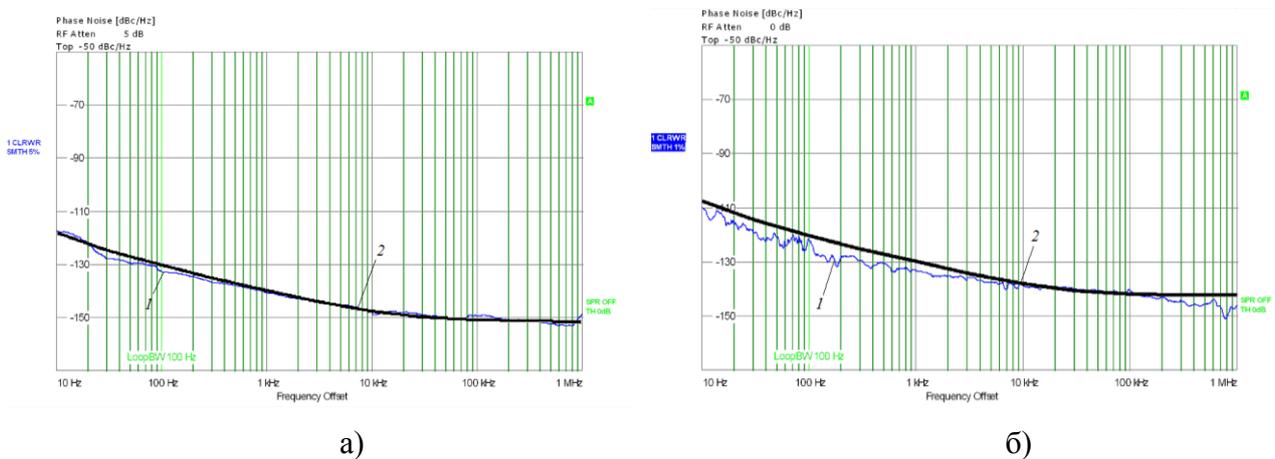


Рисунок 3 - СПМ фазовых шумов интегрального ЦВС AD9910 для основной частоты (а) и при использовании первого отрицательного образа $n = -1$ (б)
1 – моделирование, 2 – эксперимент

В качестве ЦВС использовалась микросхема AD9910 при частоте тактирования 100 МГц и $K_{ЦВС} = 0,25$, в качестве ГОЧ - генератор сигналов SMA100A. Измерения проводились с помощью прецизионного анализатора сигналов и спектра R&S®FSUP8.

По полученным экспериментальным и теоретическим зависимостям установлено, что погрешность моделирования максимально достигает значения в 3 дБ, что позволяет сделать вывод о том, что предлагаемые в работе математические модели могут использоваться для проектирования формирователей когерентных сигналов с ЦВС на образах основной частоты и проводить оценки СПМ их фазовых шумов с низкой погрешностью.

В четвертой главе рассмотрена возможность практической реализации устройств, предложенных в диссертационной работе, на примере

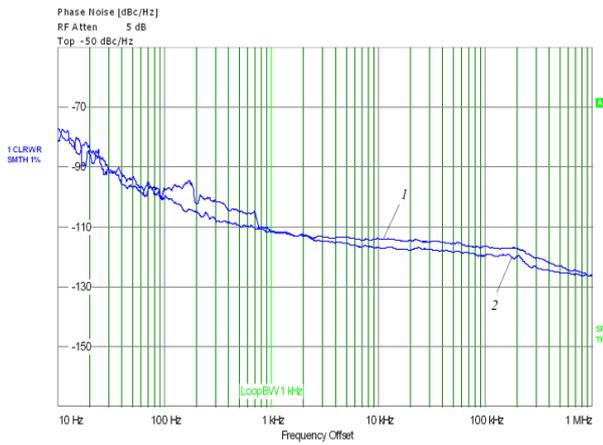
четырёхканальной радиосистемы формирования когерентных сигналов. Приводятся результаты частотного планирования и варианты построения структурных схем формирователей каналов – с использованием и без использования образов основной частоты ЦВС, а также передискретизации. Исходно были определены основные технические требования, предъявляемые к разрабатываемому устройству: частота опорного генератора 24 МГц; диапазоны выходных частот 815-935 МГц, 1610-1730 МГц, 1350-1470 МГц, 2025-2205 МГц; средние частоты выходных сигналов 875, 1670, 1410, 2115 МГц. Показано, что наибольшее количество вариантов частотного планирования имеется у формирователя с высокой выходной частотой.

Проведено экспериментальное исследование формирователя для следующих параметров: тактовая частота ЦВС 600 МГц; частота выходного сигнала 1670 МГц, ЦВС AD9910. Используемые для эксперимента варианты частотного плана приведены в таблице 1.

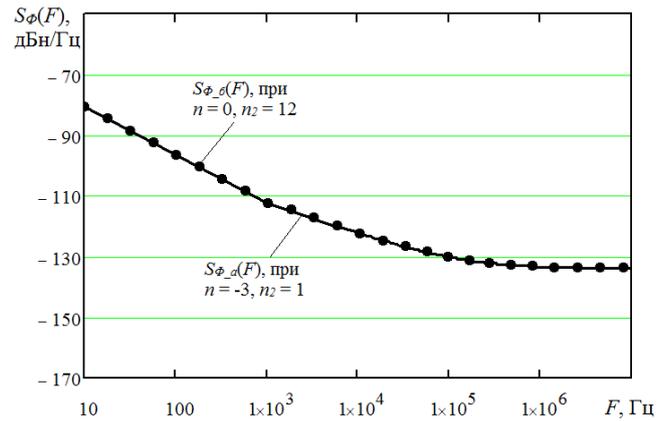
Таблица 1. Частотное планирование формирователя.

N	n_1	n_2	$f_{\text{ЦВС}}, \text{МГц}$	f_{T}	$K_{\text{ЦВС}}$	$f_{\text{ОБР}}, \text{МГц}$
0	1	11	139	600	0,231	основная
-1	1	4	135	600	0,225	417,5
-3	1	1	135	600	0,225	1670
0	1	7	238	1000	0,238	Основная
-1	1	2	165	1000	0,165	835
-2	1	1	330	1000	0,33	1670

Для оценки эффективности применения предложенного формирователя проведена сравнительная оценка его шумовых характеристик с шумовыми характеристиками формирователя с ЦВС на основной частоте и умножением его выходной частоты тремя транзисторными каскадами с коэффициентом умножения $n_2=2*2*3$. Результаты экспериментальных измерений, а также математического моделирования шумовых характеристик данного формирователя для различных образов приведены на рис.4.



а)

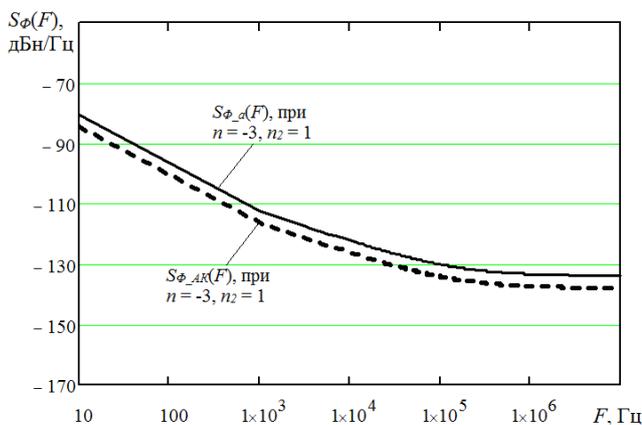


б)

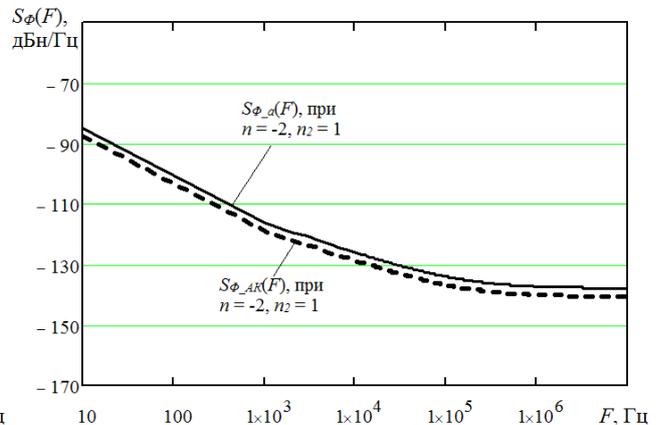
Рисунок 4 - СПМ фазовых шумов формирователя сигналов для ЦВС AD9910 для $f_T = 600$ МГц: а) эксперимент: 1 – при $n_2 = 12$; 2 – на образе $n = -3$; б) моделирование СПМ фазовых шумов

Из полученных зависимостей следует, что шумовые характеристики предложенного формирователя с использованием образов основной частоты практически совпадают с уровнем фазовых шумов формирователя на основной частоте ЦВС. Однако при этом коэффициент умножения выходного умножителя n_2 равен 12, а использование третьего отрицательного образа позволяет обойтись без выходного умножителя, т.е. n_2 равен 1. Поэтому применение образов основной частоты эффективно, оно позволяет увеличить выходную частоту формирователя и уменьшить число каскадов умножителей.

На рис. 5 показан результат расчета СПМ фазовых шумов формирователя с выходной частотой 1670 МГц для тактовых частот 600, 960 МГц, на основе ЦВС AD9910.



а)



б)

Рисунок 5. СПМ фазовых шумов формирователя с выходной частотой 1670 МГц с использованием образов основной частоты и передискретизации выходного сигнала ЦВС для тактовой частоты а) 600 МГц, б) 960 МГц

Как видно из рис. 5, уровень СПМ фазовых шумов при тактовой частоте 960 МГц ниже, чем при тактовой 600 МГц. Применение образов позволяет реализовать данный вариант формирователя при коэффициенте умножения $n_2 = 1$ (-2 образ). Использование передискретизации позволяет дополнительно снизить уровень фазовых шумов на 5 дБ при $f_T = 600$ МГц, и на 3 дБ при $f_T = 960$ МГц.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Обоснована возможность использования копий спектра выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов для повышения выходных частот формирователей когерентных сигналов.

2. Разработана обобщенная структурная схема формирователя когерентных сигналов с использованием копий спектра сигнала цифровых вычислительных синтезаторов, позволяющая повысить выходную частоту устройства более чем на порядок, без применения умножителей частоты, либо при минимально возможном их количестве.

3. Разработан алгоритм и программное обеспечение для частотного планирования формирователей когерентных сигналов с использованием копий спектра выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов.

4. Разработана и подтверждена экспериментально математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов при использовании копий спектра выходного сигнала, позволяющая на стадии проектирования с низкой погрешностью в 3 дБ/Гц проводить оценку спектральной плотности мощности фазовых шумов разрабатываемых устройств.

5. Теоретически и экспериментально исследованы шумовые свойства предлагаемых формирователей когерентных сигналов с использованием копий спектра и передискретизации выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов, которые показали возможность уменьшения СПМ фазовых шумов синтезируемых сигналов на 4-5 дБ по сравнению с уровнем фазового шума на основной частоте ЦВС.

6. На основе полученных результатов разработан формирователь

когерентных сигналов на образах основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов, обладающий на 5 дБ меньшим уровнем фазовых шумов по сравнению с аналогичным устройством без использования копий спектра.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в диссертационной работе решена важная научная задача повышения выходных частот формирователей высокочастотных когерентных сигналов без применения умножителей частоты, либо при минимально возможном их количестве, и снижения уровня фазовых шумов формирователей за счет использования копий спектра сигнала основной частоты, а также передискретизации выходного сигнала цифровых вычислительных синтезаторов.

В приложении приведены акты внедрений результатов диссертационной работы, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Ромашов, В.В. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов на образах основной частоты / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиопромышленность. – 2012. - №2. – С.38 – 48.

2. Ромашов, В.В. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образах основной частоты / В.В. Ромашов, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. - №2 – С.13-17.

3. Ромашов, В.В. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов / В.В. Ромашов, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. - №4 – С.10-16.

4. Ромашов, В.В. Моделирование шумовых характеристик новых интегральных цифровых вычислительных синтезаторов компании Analog Devices / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. - №2 – С.26-33.

5. Ромашов, В.В. Методы повышения частоты выходного сигнала формирователей на основе цифровых вычислительных синтезаторов / В.В. Ромашов, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Проектирование и технология электронных средств. – 2014. - №1 – С. 2-7.

6. Ромашов, В.В. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов, К.А. Якименко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. - №1 – С.5-20.

7. Ромашов, В.В. Экспериментальная проверка моделей шумовых характеристик интегральных цифровых вычислительных синтезаторов компании Analog Devices / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, А.Н. Докторов, К.А. Якименко// Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. - №3 – С.15-24.

Статьи в других изданиях

8. Romashov, V.V. Simulation of Noise Curves of the New Integrated DDS from Analog Devices / V.V. Romashov, L.V. Romashova, K.K. Khramov, A.N. Doktorov // Proc. of the 2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. Pp 23-26. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693574 (Статья индексируется в Scopus).

9. Romashov, V.V. The use of images of DDS fundamental frequency for high-frequency signals formation / V.V. Romashov, K.K. Khramov, A.N. Doktorov // 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo). –Sevastopol, Crimea, Russia, September 7—13, 2014. Pp. 310-311. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959408 (Статья индексируется в Scopus).

10. Romashov, V.V. The mathematical model of noise characteristics of a direct digital synthesizer with the built-in multiplier of clock frequency on PLL / V.V. Romashov, L.V. Romashova, A.N. Doctorov // Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Omsk: Siberian Federal University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. Pp. 1080-1085. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147197 (Статья индексируется в Scopus).

11. Докторов, А.Н. Исследование влияния передискретизации выходного сигнала цифрового вычислительного синтезатора на уровень дискретных

составляющих / А.Н. Докторов, Д.А. Хазов // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2016, № 17. С. 4-11.

12. Докторов, А.Н. Анализ алгоритма частотного планирования формирователей сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов / А.Н. Докторов // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2017, № 19. С. 16-22.

Материалы конференций

13. Докторов, А.Н. Исследование шумовых свойств формирователей сигналов с цифровыми вычислительными синтезаторами на образах основной частоты / А.Н. Докторов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] – Красноярск: СФУ, 2014. – С. 43-47 – 1 электрон. опт. диск. Режим доступа: http://efir.sfu-kras.ru/wp-content/uploads/download/Сборник_СПР-2014.pdf.

14. Ромашов, В.В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик цифрового вычислительного синтезатора / В.В. Ромашов, А.Н. Докторов, Д.А. Хазов // Радиолокационная техника: устройства, станции, системы РЛС-2015. Тезисы докладов Третьей Всероссийской научно-практической конференции акционерного общества «Муромский завод радиоизмерительных приборов» - Муром, 9-10 июня 2015. – С.31-32.

15. Ромашов, В.В. Измерение и математическое моделирование спектральной плотности мощности фазовых шумов цифрового вычислительного синтезатора / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, А.Н. Докторов, К.А.Якименко // Материалы 11-ой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов и др. – Владимир: ВлГУ. 2015. – С.136-139.

16. Докторов, А.Н. Фазовые шумы гибридных синтезаторов частот / А.Н. Докторов, К.А. Якименко // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». 14–18 ноября 2016 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2016. – С.375-377.

17. Ромашов, В.В. Образы основной частоты ЦВС в гибридном методе синтеза / В.В. Ромашов, К.А. Якименко, А.Н. Докторов // X Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИРЭ

им. В.А. Котельникова РАН. – 21-23 ноября 2016 г. – С. 156-160.

18. Докторов, А.Н. Анализ алгоритма частотного планирования формирователей сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов / А.Н. Докторов // Материалы 12-ой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов и др. – Владимир: ВлГУ. 2017. – С. 43-45.

19. Докторов, А.Н. Формирователь высокочастотных гармонических сигналов с использованием образов основной частоты цифрового вычислительного синтезатора / А.Н. Докторов // 7-я Всероссийская конференция Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации. РНТОРЭС имени А.С. Попова, Москва, Россия, 2017. – С. 54-58.

20. Докторов, А.Н. Расчет фазовых шумов интегральных вычислительных синтезаторов частоты со встроенным умножителем тактовой частоты / А.Н. Докторов // Научный потенциал молодежи – будущее России: III Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 22 апр. 2011 г.– Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2011.– С. 403-405.

21. Ромашов, В.В. Частотное планирование формирователей сигналов на основе интегральных цифровых вычислительных синтезаторов / В.В. Ромашов, А.Н. Докторов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. IV Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 3 февр. 2012 г. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2012.– С.341-343.

22. Ромашов, В.В. Моделирование шумовых характеристик новых интегральных цифровых вычислительных синтезаторов / В.В. Ромашов, А.Н. Докторов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. V Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 1 февр. 2013 г.– Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013. – С. 251-252.

23. Докторов, А.Н., Якименко К.А. Алгоритм частотного планирования формирователя сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов в режиме образов основной частоты / А.Н. Докторов, К.А. Якименко // Научный

потенциал молодежи – будущее России: V Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 22 апр. 2013 г.– Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013.– С. 320-321.

24. Ромашов, В.В. Методы повышения частоты выходного сигнала формирователей на основе цифровых вычислительных синтезаторов / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. VI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 14 февр. 2014 г.– Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2014. – С. 299-301.

25. Ромашов, В.В. Экспериментальные исследования спектра выходного сигнала цифрового вычислительного синтезатора / В.В. Ромашов, А.Н. Докторов, И.С. Харитоновна // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. VII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 6 февр. 2015 г. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2015. – С. 217-218.

26. Ромашов, В.В. Исследование влияния передискретизации на спектр выходного сигнала цифрового вычислительного синтезатора /В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. VII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 6 февр. 2015 г. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2015.– С. 221-222.

27. Ромашов, В.В. Анализ результатов измерения шумовых характеристик цифрового вычислительного синтезатора AD9910 /В.В. Ромашов, А.Н. Докторов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. IX Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 17 февр. 2017 г.– Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2017.– С.77-79.

Программы для ЭВМ

28. Ромашов, В.В. Программа расчета частотного плана формирователя сигналов, построенного на базе цифрового вычислительного синтезатора / В. В. Ромашов, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610107, 2015.

Подписано в печать 29.03.2018 г.
Формат 60x84 1/16. Печ.л 1,0. Тираж 100 экз.

Типография
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.