

УТВЕРЖДАЮ:



Генеральный директор

АО "НПФ "Микран"

Доценко В.В.

6 октября 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества "Научно-производственная фирма "Микран"
(АО "НПФ "Микран")

Диссертация "Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники" выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» (АО «НПФ «Микран»).

В период подготовки диссертации соискатель Горевой Андрей Викторович работал в АО «НПФ «Микран» в должности ведущего инженера отдела синтезаторов частот департамента информационно-измерительных систем (ДИИС).

В 2007 году с отличием окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники по специальности "Радиоэлектронные системы" (ТУСУР).

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2017 г. ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Задорин Анатолий Семенович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Радиоэлектроники и защиты информации ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа Горевского А.В. "Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники" включает результаты научно-

исследовательских работ, направленных на разработку энергоэффективных источников ВЧ и СВЧ с малой себестоимостью в виде автогенераторов и синтезаторов частот, их включающих, предназначенных для применения в различных областях радиоэлектроники.

Научная новизна исследований

Предложен метод построения синтезатора частот с ФАПЧ с существенно сниженным шагом перестройки по частоте при сохранении качества спектра и умеренном росте энергопотребления системы.

Предложен нестандартный способ формирования опорного сигнала петли ФАПЧ с преобразованием частоты в обратной связи, позволяющий обеспечить высокое качество спектра выходного сигнала при упрощении структуры и удешевлении синтезатора частот.

Предложен способ построения опорного источника СВЧ сигнала с улучшенным качеством спектра по сравнению с традиционными решениями умножения частоты кварцевых генераторов для перспективных разработок новых малошумящих синтезаторов частот.

Практическая значимость работы

По итогам выполнения работы внедрены в серийное производство в АО «НПФ «Микран» и массово применяются в измерительной, радиолокационной и связной технике автогенераторы на резонаторах различных типов.

Разработаны и внедрены в серийное производство новые генераторы сигналов СВЧ серии Portable Lab Devices от 25 МГц до PLG06/12/20 до 6, 12 и 20 ГГц соответственно.

Предложенные методы и способы используются в новых разработках и при модернизации продукции НПФ "Микран".

Личное участие соискателя в получении результатов

Результаты работы в большинстве получены автором лично, а также при его непосредственном участии или с использованием наработок других исследователей.

Моделирование возбуждения бегущей волны моды "шепчущей галереи" в дисковом резонаторе и экспериментальное исследование проведены совместно с инженером отдела синтезаторов частот ДИИС А.А. Лукиной.

Разработка математической модели системы АПЧ в малошумящем автогенераторе с дисковым керамическим резонатором проведена с использованием результатов Д.П. Царапкина и Н. Штина, полученных в процессе исследований монокристаллических резонаторов с модами "шепчущей галереи".

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик, сопоставлением результатов эксперимента с литературными данными, теоретическими оценками и результатами численного моделирования, а также практической реализацией научных положений.

Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

По теме диссертационной работы опубликовано 36 работ, из них 1 монография, 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание степени доктора наук, 4 статьи в зарубежных журналах, индексируемых в Scopus, 1 патент на изобретение (без соавторов), 3 патента на полезную модель (один в соавторстве), 1 патент на промышленный образец (без соавторов), 3 статьи в отраслевых журналах, 20 докладов в сборниках конференций.

Соответствие содержания диссертации выбранной специальности

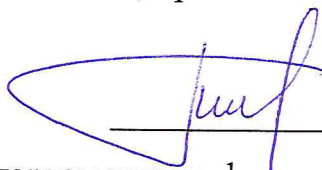
Материалы диссертационной работы А.В. Горевского соответствуют специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения в области исследования " Разработка устройств генерирования, усиления, преобразования радиосигналов в радиосредствах различного назначения. Создание методик их расчета и основ проектирования" (п. 3 паспорта специальности), " Разработка радио-

расчета и основ проектирования" (п. 3 паспорта специальности), " Разработка радиотехнических устройств для использования их в промышленности, биологии, медицине, метрологии и др." (п.10 паспорта специальности).

Диссертация "Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники и радиолокации" Андрея Викторовича Горевго рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Заключение принято на заседании департамента информационно-измерительных систем АО «НПФ «Микран».

Присутствовало на заседании 15 чел. Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 1 от 6 октября 2017 г.



Герман Рихардович Кун
директор департамента информационно-измерительных систем
АО "НПФ "Микран"

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НРИИ ТУСУР

д.т.н., профессор

Р.В. Мещеряков

"22" сентября 2017 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР)

Диссертация "Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники" выполнена в ТУСУР на кафедре радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ).

В период подготовки диссертации соискатель Горевой Андрей Викторович работал в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" в должности младшего научного сотрудника Научно-исследовательского института систем электрической связи, заочно обучался в аспирантуре ТУСУР.

В 2007 г. с отличием окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники по специальности "Радиоэлектронные системы".

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2017 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники".

Научный руководитель – Анатолий Семенович Задорин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры РЗИ федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники".

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Горевых Андрея Викторовича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение таких задач, как получение малого шага перестройки частоты синтезатора частот с ФАПЧ при сохранении качества спектра выходного сигнала и незначительном повышении энергопотребления, генерирование гармонического сигнала гигагерцового диапазона с качеством спектра лучше, чем у приведенного высококачественного кварцевого генератора, формирование сигнала в синтезаторе частот комбинированного синтеза с высоким качеством спектра.

Актуальность темы

Современные перестраиваемые источники гармонических сигналов СВЧ с высоким качеством спектра являются сложными системами с высоким энергопотреблением и стоимостью. В ряде измерительных приборов и систем они являются "лидерами" по указанным параметрам. Новые решения в области синтеза частот и генерирования гармонических сигналов СВЧ могут значительно упростить конструкцию многих радиоэлектронных систем или улучшить их технические характеристики или снизить их стоимость. Поэтому поиск таких решений является актуальной задачей.

Личное участие автора

Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Разработка математических моделей, описывающих спектры фазовых шумов и соотношения частот в синтезаторах, выполнена лично автором. Разработка архитектуры синтезаторов частот, проведение экспериментов выполнены автором лично.

Моделирование микрополоскового устройства возбуждения бегущей волны в дисковом резонаторе с модами "шепчущей галереи" и эксперименты с ним выполнены совместно с А.А. Лукиной.

Разработка модели, описывающей спектр фазовых шумов в малошумящем генераторе со стабилизирующим керамическим резонатором, выполнена на основе результатов, полученных Д.П. Царапкиным, Н. Штином в рамках работ с дисковыми резонаторами с модами "шепчущей галереи". Эксперименты с генератором выполнены автором лично.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на применении физически обоснованных экспериментальных методик и современного высокоточного оборудования, воспроизводимости полученных результатов и их качественным согласием с результатами моделирования, а также, в частных случаях, с результатами и теоретическими исследованиями других авторов.

Новизна результатов

1. Впервые рассмотрено использование делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором в качестве альтернативы микросхеме прямого цифрового синтезатора частот для формирования сигнала, перестраиваемого по частоте с малым шагом.

2. Впервые предложено использование делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором для формирования сигнала опорной частоты для синтезатора с ФАПЧ, работающего в гигагерцовом диапазоне частот с целью существенного уменьшения шага перестройки по частоте при сохранении качества спектра выходного сигнала.

3. Впервые разработана модель, подтверждающая, что при расчете спектра фазовых шумов выходного сигнала синтезатора частот с ФАПЧ можно ограничиться учетом фазовых шумов частотно-фазового детектора, управляемого генератора и источника сигнала делителя СВЧ с сигма-дельта модулятором.

4. Впервые предложено и рассмотрено нестандартное решение по формированию опорного сигнала синтезатора частот с ФАПЧ с преобразованием частоты в обратной связи путем деления частоты выходного сигнала с целью значительного снижения просачивания на выход системы дополнительного сигнала для преобразования частоты.

5. Впервые разработана модель, подтверждающая, что спектр фазовых шумов выходного сигнала описанной выше системы при больших коэффициентах деления выходной частоты ведет себя аналогично обыкновенной схеме с преобразованием частоты.

Практическая значимость результатов

1. При использовании современных малопотребляющих микросхем ФАПЧ с сигма-дельта модуляторами для формирования сигналов опорной

частоты основной петли ФАПЧ можно получить шаг перестройки по частоте не более 1 Гц до частот 20 ГГц при сохранении качества спектра выходного сигнала на уровне, определяемом основной ФАПЧ.

2. Использование описанного подхода позволяет строить малопотребляющие сверхширокополосные синтезаторы частот и измерительные генераторы сигналов на их основе до 20 ГГц.

3. С помощью АПЧ с дискриминатором на дисковом керамическом резонаторе можно построить малощумящий источник гигагерцового диапазона частот с качеством спектра не хуже кварцевого генератора, умноженного по частоте, для использования в перспективных конструкциях синтезаторов частот и РЛС.

Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

По теме диссертационной работы опубликовано 36 работ, из них 1 монография, 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание степени доктора наук, 4 статьи в зарубежных журналах, индексируемых в Scopus, 1 патент на изобретение, 3 патента на полезную модель, 1 патент на промышленный образец, 3 статьи в отраслевых журналах, 20 докладов в сборниках конференций:

Монографии:

1. Глазов, Г.Н. Управляемые генераторы СВЧ / Г.Н. Глазов, **А.В. Горевой**. – Томск.: Изд-во "Красное знамя", 2015.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание степени доктора наук:

2. Андронов, Е.В. Угловая модуляция в синтезаторах СВЧ с ФАПЧ / Е.В. Андронов, **А.В. Горевой** // Доклады ТУСУР. – 2009. – Ч.1 – С. 30.

3. **Горевой, А.В.** Генератор диапазона 1-2 ГГц с повышенной крутизной регулировочной характеристики. / А.В. Горевой // Доклады ТУСУР. – 2011. – Ч.1 – С. 44.

4. **Горевой, А.В.** Режим резонанса бегущей волны в диэлектрическом дисковом резонаторе автогенератора сантиметрового диапазона. / А.В. Горевой, А.С. Задорин, А.А. Лукина // Труды НИИР. – 2017 – №2 – С. 29.

Патенты Российской Федерации:

5. Патент на полезную модель №170771. Российская федерация, МПК Н01Р 1/20 Направленный фильтр СВЧ / **А.В. Горевой**, А.А. Лукина; заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2016145709. Заявл. 22.11.2016, опубл. 05.05.17 Бюл. №13.

6. Патент на промышленный образец №94988. Российская федерация, МКПО 10-05;14-02 Синтезатор частот / **А.В. Горевой**; заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2014502186. Заявл. 03.06.2014, опубл.16.08.15.

7. Патент на полезную модель №132933. Российская федерация, МПК Н03В 5/32 Термостатированный кварцевый генератор / **А.В. Горевой**; заявитель и патентообладатель АО "НПФ Микран" (RU) – заявка №2013113825/08. Заявл. 27.03.2013, опубл. 27.09.2013. Бюл. №27.

8. Патент на изобретение №2523188. Российская федерация, МПК Н03L 7/16. Синтезатор частот / **А.В. Горевой**; Заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2013115792/08. Заявл. 09.04.2013, опубл. 20.07.2014. Бюл. №20.

9. Патент на полезную модель №124092. Российская федерация, МПК Н03В 5/24. Генератор, управляемый напряжением / **А.В. Горевой**; Заявитель и патентообладатель АО "НПФ "Микран" (RU) – заявка №2012139599/08. Заявл. 03.09.2012, опубл. 10.01.2013. Бюл. №1.

Статьи в зарубежных журналах, индексируемых в Scopus:

10. **Gorevoy A.V.** A low noise oscillator based on a conventional dielectric resonator // Microwave Journal. 2013. Vol. 56. Issue 11. P. 84.

11. **Gorevoy A.V.** Frequency Modulation in Microwave Phase Lock Loop Synthesizers // Siberian Conference on Control and Communications SIBCON–2009. Tomsk. 2009. P. 280. DOI: 10.1109/SIBCON.2009.5044871

12. **Gorevoy A.V.** Achieving sub-Hz frequency resolution in high spectral purity and low power frequency synthesizers // 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959306

13. **Gorevoy A.V.** On the application of method increasing frequency resolution in a portable wideband microwave generator // 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959692

Публикации в других научных изданиях:

14. **Горевой А.В.**, Лукина А.А., Пилин Н.В., Аманбаев Н. Возбуждение дискового диэлектрического резонатора бегущей волной // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2017". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2017. В восьми частях. Ч. 1. С. 125

15. **Горевой А.В.**, Лукина А.А. Реализация четырехпортового направленного фильтра с бегущей волной типа "шепчущей галереи" // Материалы XII международной научно-практической конференции "Электронные средства и системы управления". Томск.: В-Спектр, 2016. В двух частях. Ч. 1. С. 182.

16. **Горевой А.В.**, Лукина А.А. Возбуждение резонатора бегущей волны моды "шепчущей галереи" с линией передачи с распределенной связью // 26-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. Севастополь. 2016. В двух частях. Ч. 1. С. 1311.

17. **Горевой А.В.**, Лукина А.А. Исследование направленного фильтра на СВЧ-резонаторе с эффектом "шепчущей галереи" // Материалы XI международной научно-практической конференции "Электронные средства и системы управления". Томск.: В-Спектр, 2015. В двух частях. Ч. 1. С. 262.

18. **Горевой А.В.**, Конкин Д.А., Лукина А.А., Толендиев Г.К. Оптоэлектронный генератор с волоконно-оптической линией задержки :численное моделирование и экспериментальное исследование // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2015". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2015. В пяти частях. Ч. 2. С. 26.

19. **Горевой А.В.** [и др.] Макет оптоэлектронного генератора с волоконно-оптической линией задержки // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2015". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2015. В пяти частях. Ч. 2. С. 70.

20. Лукина А.А., Толендиев Г.К., **Горевой А.В.** Исследование оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона // 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. Севастополь. 2015. В двух частях. Ч. 1. С. 1035.

21. **Горевой А.В.**, Лирник А.В. Измерение шумовых параметров резонатора на квази-ПАВ // 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. Севастополь. 2015. В двух частях. Ч. 1. С. 900.

22. **Горевой А.В.** Современные возможности создания портативных измерительных генераторов СВЧ с высокими метрологическими характеристиками // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2014". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2014. В пяти частях. Ч. 1.

23. **Горевой А.В.**, Лирник А.В. Модернизация генератора с ЖИГ-резонатором // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2013". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2013. В пяти частях. Ч. 1. С. 304.

24. **Горевой А.В.** Генератор 4 ГГц на дисковом керамическом резонаторе с эквивалентной добротностью 50 тысяч // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2012". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2012. В пяти частях. Ч. 1. С. 173.

25. **Горевой А.В.** Малошумящий термостатированный кварцевый генератор // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2012". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2012. В пяти частях. Ч. 1. С. 170.

26. Андронов Е.В., **Горевой А.В.** Генератор диапазона 1-2 ГГц с резонатором на сосредоточенных элементах для октавных синтезаторов частот // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Материалы III общероссийской научно-технической конференции 12-15 октября 2010 г.. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. С. 24.

27. Андронов Е.В., **Горевой А.В.** О возможности снижения фазового шума генератора СВЧ с помощью петли ФАПЧ на стробируемом фазовом детекторе // Обмен опытом в области создания радиоэлектронных систем. Материалы III общероссийской научно-технической конференции 12-15 октября 2010 г.. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. С. 20.

28. Андронов Е.В., **Горевой А.В.** Генератор 2,2 ГГц с ультранизким фазовым шумом на керамическом коаксиальном резонаторе // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Материалы III общероссийской научно-технической конференции 12-15 октября 2010 г.. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. С. 15.

29. **Горевой А.В.** Способ улучшения скоростных характеристик синтезатора частот // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2008". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2008. В пяти частях. Ч. 2. С. 233.

30. **Горевой А.В.** Воздействие вибрации на СВЧ-генераторы // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2008". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2008. В пяти частях. Ч. 2. С. 230.

31. **Горевой А.В.** G-чувствительность к вибрации СВЧ-генераторов различных типов // Электронные и электромеханические системы и устройства. XVI научно-практическая конференция 10-11 апреля 2008 г. Томск: НПЦ Полус, 2008. С. 65.

32. **Горевой А.В.** Чувствительность СВЧ-генераторов к вибрации // XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. Современная техника и технологии. Материалы конференции. Томск.: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. С. 230.

33. **Горевой А.В.**, Тунгусов А.А. Синтезатор частот диапазона 910-940 МГц // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2006". Томск.: Изд-во ТУСУР, 2006. В пяти частях. Ч. 1. С. 20.

Публикации в отраслевых журналах:

34. **Горевой А.В.** Универсальные СВЧ генераторы как замена настольным гигантам // Современная электроника. – М., 2015. – №8.

35. **Горевой А.В.** Архитектура широкополосных синтезаторов частот для панорамных сканирующих приборов СВЧ // Вестник метролога. – М., 2013. – №3. С. 22.

36. **Горевой А.В.** Выбор генераторов для построения маломощных синтезаторов частот // Компоненты и технологии. – М., 2012. – №6. С. 12.

Соответствие содержания диссертации выбранной специальности

Материалы диссертационной работы А.В. Горегового соответствуют специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения в области исследования " Разработка устройств генерирования, усиления, преобразования радиосигналов в радиосредствах различного назначения. Создание методик их расчета и основ проектирования" (п. 3 паспорта специальности), " Разработка радиотехнических устройств для использования их в промышленности, биологии, медицине, метрологии и др." (п.10 паспорта специальности).

Диссертация "Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники и радиолокации" Андрея Викторовича Горегового рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Заключение принято на заседании кафедры РЗИ.

Присутствовало на заседании 19 чел. Результаты голосования: "за" – 19 чел., "против" – нет, "воздержалось" – нет, протокол №2 от "21" 09 2017 г.



Алексей Викторович Фатеев,

кандидат технических наук,

заведующий кафедрой

радиоэлектроники и защиты информации