

Государственное научное учреждение
«Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»
Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

На правах рукописи
УДК 537.862

МИКИТЧУК
Кирилл Борисович

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
НА ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ С ОПТИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ
ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ**

05.11.07 – оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Минск 2017

Работа выполнена в лаборатории полупроводниковой оптоэлектроники Института физики НАН Беларуси и в лаборатории радиофотоники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси.

Научный руководитель: **Чиж Александр Леонидович**
кандидат физико-математических наук,
заместитель заведующего лабораторией
радиофотоники Государственного
научно-производственного объединения
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Официальные оппоненты: **Кугейко Михаил Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой квантовой радиофизики и
оптоэлектроники факультета радиофизики и
компьютерных технологий Белорусского государ-
ственного университета

Бобков Юрий Юрьевич
кандидат технических наук, доцент
ведущий научный сотрудник службы
фундаментальных и прикладных исследований
Открытого акционерного общества
КБ «Радар» – управляющая компания холдинга
«Системы радиолокации»

Оппонирующая
организация:

**Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси»**

Защита состоится 19 декабря 2017 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.03 при Государственном научном учреждении «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» по адресу 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2, к. 218, тел. (017) 284-17-33, e-mail: v.kalinov@ifanbel.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан ___ ноября 2017.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций

Калинов В.С.

ВВЕДЕНИЕ

Генераторы квазигармонических сигналов с низким фазовым шумом применяются в качестве гетеродинов или опорных генераторов во многих системах связи и радиолокации. Например, оптические системы связи требуют высокой точности частоты синхронизации между оптическими центральными узлами, а радиолокационные станции нуждаются в высокой кратковременной стабильности частоты сигнала гетеродина для отслеживания движущихся объектов. Обычно квазигармонические сигналы с низким уровнем фазового шума генерируются с помощью электронных схем, содержащих в своем составе высокодобротные электромагнитные, магнитоэлектрические или акустоэлектрические резонаторы. С увеличением частоты генерации до 10 ГГц и выше добротность практически всех резонаторов уменьшается, что приводит к ограничению максимальной частоты прямой генерации и необходимости использования дополнительных каскадов умножения частоты. Умножение частоты в свою очередь приводит к квадратичному возрастанию фазового шума от кратности умножения. Следует отметить высокие требования систем радиолокации и радиосвязи к стабильности генераторов сверхвысокой частоты по отношению к внешним воздействиям таким как температура, статическая перегрузка и вибрация, а также электромагнитные помехи.

Альтернативным способом генерации сигналов с низким уровнем фазового шума являются оптоэлектронные генераторы на линиях задержки (ОЭГЛЗ) с оптическим усилением, которые по принципу своей работы относятся к автогенераторам с положительной обратной связью, реализованной на основе волоконно-оптической линии задержки. Возможность генерации квазигармонического сигнала с низким уровнем фазового шума в таких ОЭГЛЗ обусловлена большими достижимыми временами задержки в волоконно-оптических линиях до 100 мкс, что эквивалентно добротности свыше 10^6 для частоты 10 ГГц, а также использованием оптического усиления, характеризующегося более низким собственным шумом по сравнению с транзисторными СВЧ-усилителями. Главными преимуществами ОЭГЛЗ с оптическим усилением по сравнению с электронными генераторами сверхвысокой частоты являются независимость уровня их фазового шума от частоты генерации, а также высокая устойчивость к электромагнитным помехам, статической перегрузке и вибрации. Однако, практическому использованию ОЭГЛЗ в системах радиосвязи и радиолокации препятствует высокий уровень дискретных составляющих в спектре их генерации. Для одновременного обеспечения низкого фазового шума и подавления дискретных составляющих в спектре генерации, особенно в условиях воздействия внешних факторов, необходим тщательный подбор конструктивных параметров и режимов работы компонентов ОЭГЛЗ. В этой связи, установление взаимосвязи выходных характеристик ОЭГЛЗ с оптическим усилением с конструктивными параметрами и режимами работы компонентов, входящих в их состав, представляется весьма актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы «6. Лазерные, оптические, оптико-, опто-, микро- и радиоэлектронные технологии и системы», подпункт «6.9 принципы схмотехнического построения и технологии создания интегральных, в том числе трехмерных, микро-схем, устройств функциональной и СВЧ-электроники, опто- и микроэлектромеханических систем, светодиодных и фоточувствительных приборов, высокоэффективных солнечных элементов» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 №585), а также приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы «6. Электроника и фотоника», подпункт «6.11 СВЧ-оптоэлектронные приборы и устройства, многофункциональные монолитные интегральные схемы СВЧ-диапазона для систем радиолокации, радиоэлектронного противодействия и разведки, измерительной СВЧ-техники и радиосвязи» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 №190).

Диссертационная работа выполнялась в рамках задания 1.2.04 «Разработка научных основ и технологии создания высокоскоростных оптоэлектронных устройств для контрольно-измерительной техники и волоконно-оптических систем передачи аналоговых и цифровых сигналов в частотном диапазоне до 60 ГГц» и задания 1.2.09 «Исследование оптоэлектронных методов генерации СВЧ-сигналов и разработка высокоскоростных волоконно-оптических модулей и устройств для систем радиолокации, радиосвязи и измерительной техники» государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника» на 2011–2015 годы, а также задания 2.2.01 «Исследование и разработка высокостабильных виброустойчивых оптоэлектронных и твердотельных генераторов и волоконно-оптических лазерных и фотодиодных модулей для систем радиолокации и измерительной СВЧ-техники» государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016–2020 годы.

Цель и задачи исследования

Объектом исследования данной диссертационной работы являются оптоэлектронные генераторы на линиях задержки с оптическим усилением. В диссертационной работе рассматриваются генераторы сверхвысокой частоты в модульном исполнении для систем радиолокации и связи, и не рассматриваются специализированные лабораторные установки для генерации сигналов с рекордно низкими шумами. Предметом исследования являются шумовые, частотные, переходные и спектральные характеристики оптоэлектронных генераторов на линиях задержки с оптическим усилением.

Целью диссертационной работы является установление взаимосвязи выходных характеристик оптоэлектронных генераторов на линиях задержки с оптическим усилением с конструктивными параметрами и режимами работы компонентов, входящих в их состав. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

- разработать физико-математическую модель оптоэлектронного генератора на линиях задержки;
- определить условия стационарной генерации квазигармонического сигнала с низким фазовым шумом в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением;
- разработать способ подавления подпороговой генерации на собственных частотах в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением;
- исследовать влияние внешних воздействий (изменений температуры, стационарной перегрузки, вибрации и электромагнитных помех) на оптоэлектронные генераторы на линиях задержки с оптическим усилением и установить способы снижения чувствительности оптоэлектронного генератора к данным воздействиям.

Научная новизна

1. Впервые создана физико-математическая модель оптоэлектронного генератора на линиях задержки на основе метода комплексных медленноменяющихся амплитуд, учитывающая линейные и нелинейные механизмы преобразования шумов оптической несущей, нелинейности компонентов генератора, нестационарность взаимодействия сигнала генерации с шумовыми составляющими в спектре, внешние динамические и параметрические воздействия на генератор, что позволило моделировать его выходные характеристики во временной и частотной области.

2. Впервые исследован процесс автовозбуждения оптоэлектронных генераторов, что позволило установить способ обеспечения генерации на частоте максимального усиления в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением, заключающийся в использовании режима включения, при котором коэффициент усиления контура обратной связи линейно увеличивается за время, более чем на два порядка превышающее длительность задержки в основной волоконно-оптической линии.

3. Впервые исследованы динамические неустойчивости генерации в оптоэлектронных генераторах, что позволило определить необходимое условие стационарной квазигармонической генерации в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилителем на основе легированного эрбием волокна, заключающееся в использовании контура обратной связи с коэффициентом усиления в режиме малых сигналов в диапазоне от 1 до 3.3.

4. Впервые установлены физические механизмы влияния внешних воздействий (изменения температуры, вибрация, электромагнитные помехи) на динамику генерации в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением, что позволило предложить способы снижения чувствительности оптоэлектронного генератора к данным воздействиям.

Положения, выносимые на защиту

1. Физико-математическая модель оптоэлектронного генератора на линиях задержки на основе метода комплексных медленноменяющихся амплитуд, впервые учитывающая линейные и нелинейные механизмы преобразования шумов оптической несущей, нелинейности компонентов генератора, нестационарность взаимодействия сигнала генерации с шумовыми составляющими в спектре, внешние динамические и параметрические воздействия на генератор, что позволило моделировать его выходные характеристики во временной и частотной области.

2. Необходимым условием стационарной квазигармонической генерации в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилителем на основе легированного эрбием волокна является обеспечение коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов в диапазоне от 1 до 3.3, при этом увеличение коэффициента петлевого усиления в указанном диапазоне приводит к уменьшению фазового шума генератора.

3. Установление генерации на частоте максимального усиления в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки достигается путем использования режима включения, при котором обеспечивается линейное увеличение коэффициента петлевого усиления за время, более чем на два порядка превышающее длительность задержки в основной волоконно-оптической линии, при этом вероятность установления генерации на других собственных частотах уменьшается по экспоненциальному закону от длительности режима включения.

4. Введение в одноконтурный оптоэлектронный генератор дополнительных волоконно-оптических линий с различными длительностями задержки, составляющими менее четверти длительности задержки в основной волоконно-оптической линии, обеспечивает подавление дискретных составляющих в спектре до уровня менее -90 дБн, при этом фазовый шум уменьшается на величину до 3 дБ по сравнению с одноконтурным оптоэлектронным генератором.

Личный вклад соискателя

Представленные в диссертационной работе результаты получены лично соискателем и проанализированы совместно с научным руководителем А.Л. Чижом. Научный руководитель А.Л. Чиж сформулировал тематику и направление исследований. С.А. Малышев принимал участие в обсуждении результатов моделиро-

вания, измерения параметров и характеристик макета оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением. Макет оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением был изготовлен в лаборатории полупроводниковой оптоэлектроники Института физики НАН Беларуси (в настоящее время – лаборатория радиофотоники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси).

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 12 международных научно-технических конференциях и семинарах:

- 1-я Российско-Белорусская научно-техническая конференция «Элементная база отечественной радиоэлектроники» (Нижний Новгород, Россия, 11 – 14 сентября 2013 г.);
 - 9-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, 28 – 31 мая 2013 г.);
 - IEEE International conference on Numerical electromagnetic modelling and optimization for RF, microwave and terahertz applications (Pavia, Italy, 14 – 16 May 2014);
 - 44th European microwave conference (Rome, Italy, 5 – 12 October 2014);
 - 4-я Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, Россия, 1 – 4 июня 2015 г.);
 - 10-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, 26 – 29 мая 2015 г.);
 - IEEE International topical meeting on microwave photonics (Paphos, Cyprus, 26 – 28 October 2015);
 - 5-я Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, Россия, 30 мая – 2 июня 2016 г.);
 - 46th European microwave conference (London, Great Britain, 3 – 7 October 2016);
 - 6-я Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, Россия, 29 мая – 1 июня 2017 г.);
 - 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного назначения (Минск, 22 мая 2017);
 - 24th International conference on noise and fluctuations (Vilnius, Lithuania, 20 – 23 June 2017);
- и на 4 республиканских научно-технических конференциях:
- Республиканская научная конференция студентов и аспирантов Республики Беларусь «НИРС-2011» (Минск, 18 октября 2011 г.);
 - 69-я Научная конференция студентов и аспирантов БГУ (Минск, 14 – 17 мая 2012 г.);
 - Республиканская научно-техническая конференция «Молодежь в науке–2013» (Минск, 19 – 22 ноября 2013 г.);

– Республиканская научно-техническая конференция «Молодежь в науке–2014» (Минск, 18 – 21 ноября 2014 г.).

Часть результатов диссертационной работы получена и использована в рамках зарубежного контракта №937 от 15.03.2013 с ОАО «НПП «РАДИЙ» (г. Москва, Российская Федерация).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, общий объем которых составил 2.5 авторского листа, а также в 14 докладах и 2 тезисах докладов на международных и республиканских конференциях, в 1 патенте Республики Беларусь и 1 патенте Российской Федерации.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения и библиографического списка. Объем диссертации составляет 167 страниц, включая 92 страницы основного текста, 110 рисунков на 48 страницах, 6 таблиц на 3 страницах, библиографический список из 152 наименований на 9 страницах и список публикаций соискателя из 22 наименований на 3 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Генераторы сверхвысокой частоты для систем радиолокации и связи» рассмотрено современное состояние, тенденции развития и конструктивные особенности генераторов сверхвысокой частоты с низким фазовым шумом для систем радиолокации и связи. На основании анализа литературы в конце главы формулируется цель и задачи диссертационной работы.

Для обеспечения стационарной квазигармонической генерации генератор сверхвысокой частоты должен содержать элемент накопления энергии колебаний с очень высокой добротностью и активный элемент с низким собственным фазовым шумом для компенсации потерь. Обычно квазигармонические СВЧ-сигналы с низким уровнем фазового шума генерируются с помощью электронных генераторов, содержащих в своем составе высокодобротные электромагнитные, магнитоэлектрические или акустоэлектрические резонаторы. В лучших образцах электронных генераторов удается получать генерацию с фазовым шумом -120 дБн/Гц (на электромагнитных резонаторах), -110 дБн/Гц (на магнитоэлектрических резонаторах), а также -127 дБн/Гц (на основе акустоэлектрических резонаторов с преобразованием частоты) на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей ($8\div 12$ ГГц). В оптоэлектронных генераторах в качестве высокодобротного элемента накопле-

ния энергии колебаний используется или оптические резонаторы, или волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗ), однако для использования обоих в СВЧ-цепях необходимо применять электрооптические и оптоэлектронные преобразователи (типично, лазер с внешней модуляцией и СВЧ-фотодиод). Фазовый шум лучших образцов оптоэлектронных генераторов на оптических резонаторах составляет величину порядка $-110 \div -120$ дБн/Гц, на кольцевых волоконно-оптических резонаторах составляет величину порядка -127 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей (до 40 ГГц). ОЭГЛЗ лишены многих ограничений, накладываемых сосредоточенными резонаторами: достижимых значений добротности и стабильности при внешних воздействиях. В лучших образцах ОЭГЛЗ с электронным усилением удается получать генерацию СВЧ-сигнала с фазовым шумом -130 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей 8 ГГц, при этом, однако, на частотах отстройки менее $3 \div 9$ кГц от СВЧ-несущей в рассматриваемом диапазоне фазовый шум ОЭГЛЗ определяется высоким фликкер-шумом СВЧ-усилителя.

В результате изучения современного состояния, тенденций развития генераторов сверхвысокой частоты, а также требований, выдвигаемых к ним при использовании в системах радиолокации и связи, в конце главы формулируются выводы относительно достижимого уровня фазового шума, рабочей частоты и чувствительности ко внешним воздействиям различных генераторов, а также обосновывается актуальность цели. В частности, установлено, что многоконтурные ОЭГЛЗ с оптическим усилением потенциально позволяют получать генерацию СВЧ-сигналов со сверхнизким фазовым шумом менее -130 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей в диапазоне частоты $8 \div 12$ ГГц. Для одновременного обеспечения подавления дискретных составляющих в спектре генерации и низкого фазового шума, особенно в условиях воздействия внешних факторов, необходим тщательный подбор конструктивных параметров и режимов работы компонентов ОЭГЛЗ.

Во второй главе «Физико-математическая модель оптоэлектронного генератора на линиях задержки» описывается разработка физико-математической модели ОЭГЛЗ. В главе приводится обоснование выбора нелинейной нестационарной модели и анализ источников шума в ОЭГЛЗ, затем описывается построение модели ОЭГЛЗ, ее дискретизация и реализация. В конце главы приводятся границы применимости и верификация модели.

В диссертационной работе рассматривается наиболее общая конструкция многоконтурного ОЭГЛЗ, приведенная на рисунке 1, в которой излучение лазерного диода модулируется по интенсивности с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера. Задержка модулированного оптического сигнала осуществляется в основной ВОЛЗ, на выходе которой установлен оптический усилитель на легированном эрбием волокне. Периодическая частотная селективность вносится в контур ОЭГЛЗ с помощью M дополнительных ВОЛЗ, соединенных с

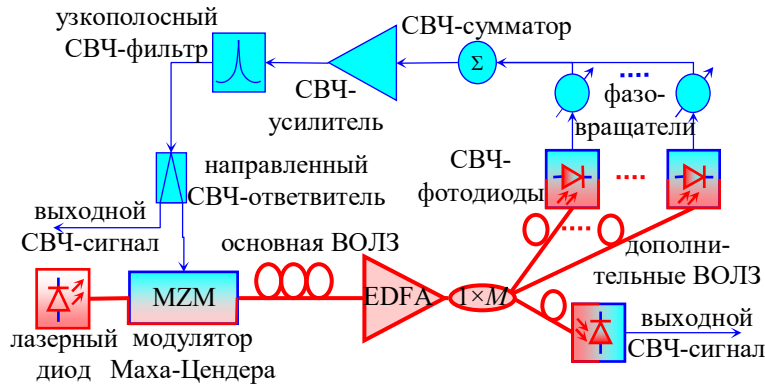


Рисунок 1. – Структурная схема многоконтурного ОЭГЛЗ с электронным и оптическим усилением, с M дополнительными ВОЛЗ, где EDFA – оптический усилитель на легированном эрбием волокне

выходом оптического усилителя. На выходах дополнительных ВОЛЗ осуществляется оптоэлектронное преобразование с помощью СВЧ-фотодиодов. СВЧ-тракт ОЭГЛЗ содержит СВЧ-фазовращатели, СВЧ-усилитель с низким фазовым шумом, а также узкополосный СВЧ-фильтр, задающий частоту генерации. Контур ОЭГЛЗ замыкается через направленный СВЧ-ответвитель.

Существующие модели ОЭГЛЗ (линейные стационарные; линейные нестационарные и некоторые нелинейные нестационарные) не в полной мере позволяют учитывать многоконтурную конфигурацию ВОЛЗ, особенности оптического усиления, а также влияние внешних воздействий. Для построения непрерывной физико-математической модели ОЭГЛЗ был выбран подход, основанный на моделировании эволюции единственного отсчета комплексной огибающей СВЧ-сигнала в ОЭГЛЗ с помощью метода комплексных медленноменяющихся амплитуд при учете временной зависимости частоты генерации. В разработанной модели учитываются шумы отдельных компонентов (дробовый, тепловой), а также шумы, возникающие из-за ряда линейных и нелинейных механизмов преобразования шумов оптической несущей в шумы на выходе СВЧ-фотодиода: из-за интерференции многократно переотраженного и/или рассеянного оптического излучения (рассеяние Рэлея и Бриллюэна); хроматической дисперсии в оптическом волокне; из-за нелинейности энергетической характеристики СВЧ-фотодиода. Шумы моделируются с помощью случайных величин, у которых распределение по амплитуде на фиксированной частоте является нормальным, а спектральная плотность мощности является равномерной, или обратно пропорциональной частоте, или лоренцевской. Полученные в диссертационной работе соотношения, описывающие эволюцию сигнала в ОЭГЛЗ, можно свести к нелинейному неоднородному интегральному уравнению со случайными источниками, которое не имеет аналитического решения, поэтому в диссертационной работе применяется численное моделирование. Шаг равномерной дискретизации физико-математической модели по времени выбирается привязанным к длительности задержки в основной ВОЛЗ. Количество шагов по времени, на которое разбивается время задержки в основной ВОЛЗ, определяется исходя из необходимости корректного моделирования взаимодействия сигнала генерации с узкополосным СВЧ-фильтром. На рисунке 2 приведена схема численного моделирования эволюции отсчета комплексной огибающей сигнала при обходе контура ОЭГЛЗ, где P_{LD} , λ_{LD} – мощность и длина волны генерации лазерного диода; α_{MZM} – коэффициент передачи модуля-

тора Маха-Цендера, смещенного в квадратурную точку; V_{MZM} , φ_{MZM} – полуволновое напряжение на частоте генерации ОЭГЛЗ и фаза смещения модулятора Маха-Цендера с параметром γ_{MZM} , связанным с контрастностью; α_{OF} , n_{OF} , D_{OF} – потери на единицу длины, эффективный групповой показатель преломления сердцевины и коэффициент хроматической дисперсии оптического волокна; τ , τ_m – длительность задержки в основной и m -й дополнительной ВОЛЗ; c – скорость света, G_{EDFA} – коэффициент усиления оптического усилителя; $S_{PD, m}$, $\tilde{S}_{PD, m}$ – статическая и комплексная токовая чувствительность СВЧ-фотодиода на выходе m -ой дополнительной ВОЛЗ; κ_m – коэффициент разветвления в m -ую дополнительную ВОЛЗ; R_{PD} – сопротивление нагрузки СВЧ-фотодиодов; $\delta\varphi_{opt, m}$, $\delta\mathbf{V}_{opt, m}$ – флуктуации фазы и комплексной огибающей, соответствующие шуму на выходе СВЧ-фотодиода в m -й дополнительной ВОЛЗ; α_m , ψ_m – коэффициент передачи СВЧ-тракта и фазовый сдвиг от m -го СВЧ-фотодиода до СВЧ-усилителя; G_{LNA} – коэффициент усиления СВЧ-усилителя; $\delta\varphi_{LNA}$, $\delta\mathbf{V}_{LNA}$ – флуктуации фазы и комплексной огибающей, соответствующие шуму СВЧ-усилителя; α_{NBF} , Γ_{NBF} , f_{NBF} – коэффициент передачи, ширина полосы пропускания и центральная частота узкополосного СВЧ-фильтра. Итерации по времени реализуются следующим образом: отсчет комплексной огибающей последовательно умножается на коэффициенты, соответствующие воздействиям каждого из компонентов ОЭГЛЗ.

Разработанная модель реализована в виде компьютерной программы, базовой вычислительной единицей которой является программа получения реализации комплексных огибающих СВЧ-сигнала. Массивы данных, полученные с помощью последней, анализируются с помощью вспомогательных методов пересчета результатов моделирования в частотную область, расчета частоты генерации, а также логических ветвлений вычислительного процесса. Модель верифицирована: исследована эргодичность и независимость результатов моделирования от параметров дискретизации; проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными выходными параметрами и характеристиками. В конце главы формулируется первое защищаемое положение.

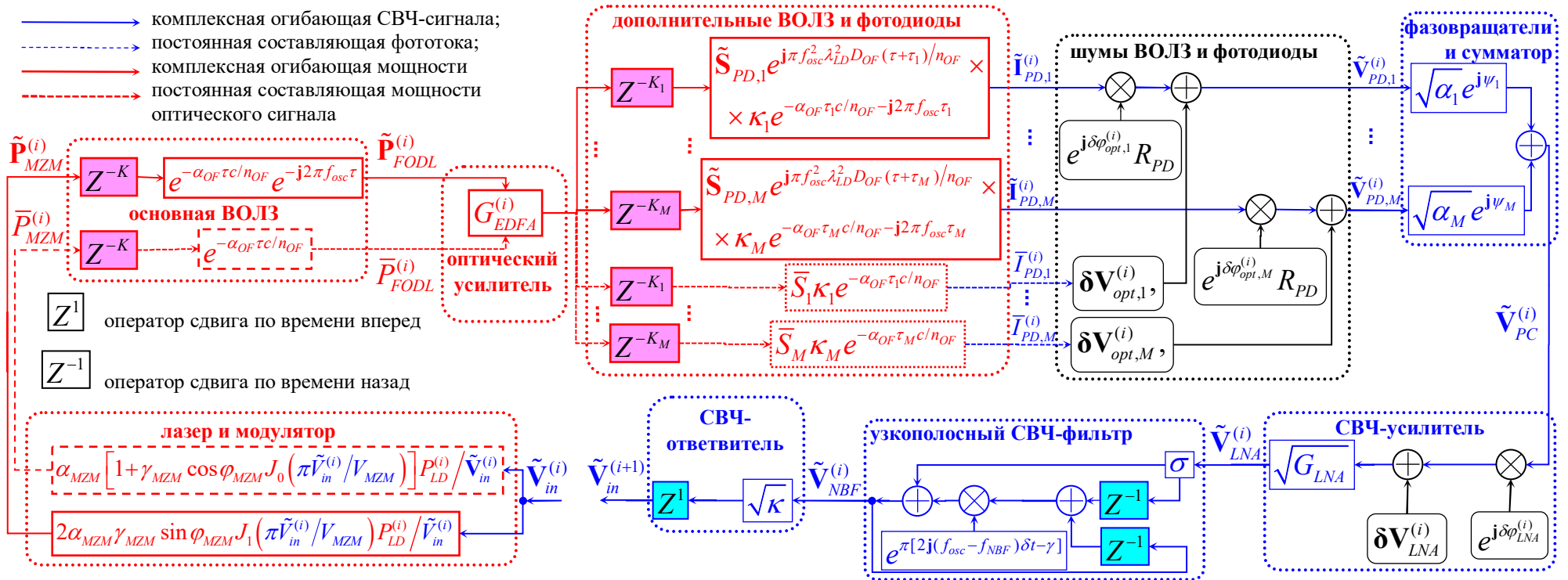


Рисунок 2. – Схема численного моделирования эволюции отсчета комплексной огибающей сигнала генерации при обходе контура ОЭГЛЗ, где показаны отсчеты следующих величин: \bar{P}_{MZM} , \tilde{P}_{MZM} – постоянная составляющая и комплексная огибающая оптической мощности на выходе модулятора Маха-Цендера; \bar{P}_{FODL} , \tilde{P}_{FODL} – постоянная составляющая и комплексная огибающая оптической мощности на выходе основной ВОЛЗ; $\bar{I}_{PD,m}$, $\tilde{I}_{PD,m}$ – постоянная составляющая и комплексная огибающая фототока на выходе фотодиода в m -й дополнительной ВОЛЗ; $\tilde{V}_{PD,m}$ – комплексная огибающая напряжения СВЧ-сигнала на выходе СВЧ-фотодиода в m -й дополнительной ВОЛЗ; \tilde{V}_{PC} – комплексная огибающая напряжения СВЧ-сигнала на выходе СВЧ-сумматора; \tilde{V}_{LNA} – комплексная огибающая напряжения СВЧ-сигнала на выходе СВЧ-усилителя; \tilde{V}_{NBF} – комплексная огибающая напряжения СВЧ-сигнала на выходе СВЧ-фильтра; \tilde{V}_{in} – огибающая амплитуды напряжения СВЧ-сигнала на входе модулятора Маха-Цендера.

В третьей главе «Стационарная генерация в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением» приведены результаты изучения условий и спектра стационарной генерации в ОЭГЛЗ с оптическим усилением, а также результаты исследования подавления дискретных составляющих в спектре с помощью дополнительных ВОЛЗ.

Для стационарной генерации в ОЭГЛЗ помимо обеспечения выполнения фазового и амплитудного условий необходимо применять комплекс мер по управлению коэффициентом петлевого усиления, а также амплитудно-частотной характеристикой контура обратной связи. «Медленное» включение, когда коэффициент петлевого усиления в режиме малых сигналов увеличивается в течение времени включения, значительно превышающего (в сотни и более раз) длительность задержки в ВОЛЗ, наиболее подходит для обеспечения повторяемости установления генерации от включения к включению на частоте максимального усиления. Рисунок 3 показывает процесс «медленного» включения одноконтурного ОЭГЛЗ, при котором генератор последовательно находится в подпороговом состоянии (I), режимах установления генерации (II), квазистационарной и стационарной генерации (III, IV). В подпороговом состоянии генерация невозможна, далее полоса частот положительного усиления становится ненулевой и растет, а необходимые условия генерации выполняются для той собственной частоты, амплитуда сигнала генерации на которой оказалась большей. В режиме квазистационарной генерации уровень дискретных составляющих снижается, что приводит к стационарной генерации. Для установления генерации на частоте максимального усиления необходимо, чтобы во время установления генерации не возникало конкуренции собственных частот в пределах полосы частот положительного усиления. Рисунок 4 показывает зависимость вероятности установления генерации одноконтурного ОЭГЛЗ на частоте, отличной от частоты максимального усиления, от длительности включения. Видно, что для длительности

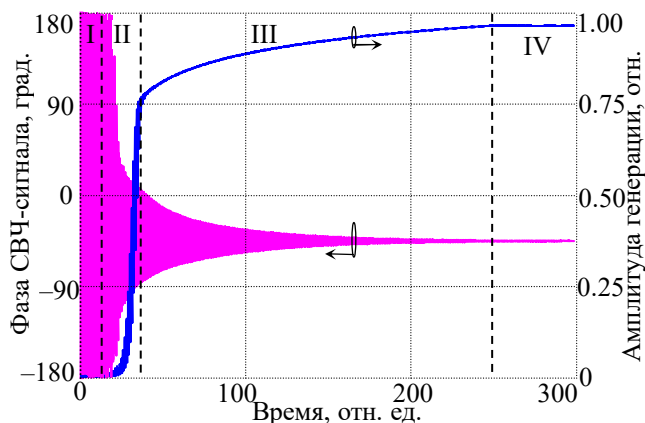


Рисунок 3. — Зависимость фазы и амплитуды СВЧ-сигнала генерации от времени для случая «медленного» включения ОЭГЛЗ

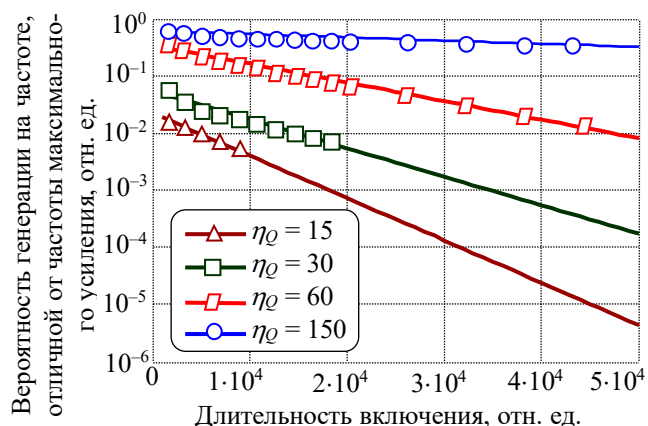


Рисунок 4. — Зависимость вероятности установления генерации одноконтурного ОЭГЛЗ на частоте, отличной от частоты максимального усиления, от длительности включения для различных отношений η_0 эквивалентной добротности ВОЛЗ и СВЧ-фильтра

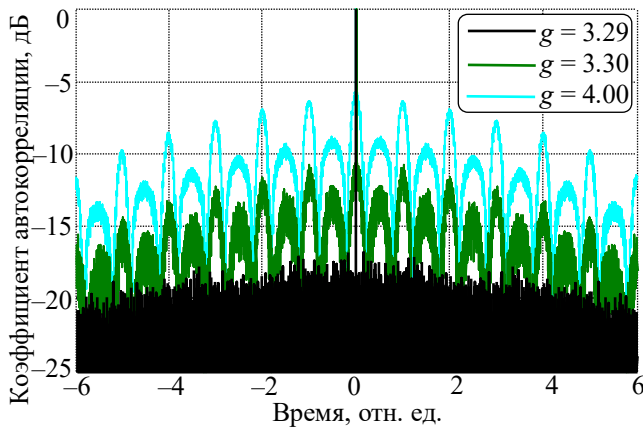


Рисунок 5. – Нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей сигнала генерации в ОЭГЛЗ различных значений коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов

Видно, что для значений коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов менее 3.3 нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей представляет собой дискретную импульсную функцию на фоне шумового пьедестала, а генерация является стационарной (амплитуда комплексной огибающей случайна во времени); в противном случае квазипериодическая автокорреляционная функция свидетельствует об динамических нестабильностях (амплитуда комплексной огибающей – квазипериодический импульсный процесс во времени).

Наиболее важными параметрами ОЭГЛЗ являются фазовый и амплитудный шум на различных частотах отстройки от СВЧ-несущей, а также уровень дискретных составляющих в спектре сигнала генерации. Рисунок 6 показывает зависимость фазового шума на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей (40 ГГц) от длины ВОЛЗ для одноконтурного ОЭГЛЗ с оптическим усилением для различных источников шума, где обозначены кривые, соответствующие

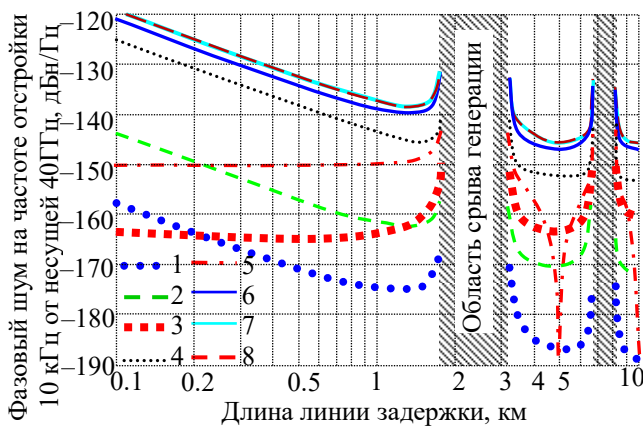


Рисунок 6. – Зависимость фазового шума ОЭГЛЗ на частоте отстройки 10 кГц от длины ВОЛЗ для различных источников шума

включения ОЭГЛЗ, значительно превышающей длительность задержки в ВОЛЗ, вероятность установления генерации на собственной частоте, отличной от частоты максимального усиления, экспоненциально зависит от длительности включения, причем большие значения данной вероятности соответствуют большим значениям отношения эквивалентной добротности основной ВОЛЗ и СВЧ-фильтра.

Рисунок 5 показывает нормированную автокорреляционную функцию амплитуды комплексной огибающей сигнала генерации в ОЭГЛЗ для различных значений коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов. Видно, что для значений коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов менее 3.3 нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей представляет собой дискретную импульсную функцию на фоне шумового пьедестала, а генерация является стационарной (амплитуда комплексной огибающей случайна во времени); в противном случае квазипериодическая автокорреляционная функция свидетельствует об динамических нестабильностях (амплитуда комплексной огибающей – квазипериодический импульсный процесс во времени).

следующим типам источников шума 1 – тепловой, 2 – дробовый, 3 – из-за рассеяния Рэлея, 4 – интенсивности излучения лазера, 5 – из-за дисперсии в оптическом волокне, 6 – оптического усилителя, 7 – полный аддитивный, 8 – полный шум (с учетом мультипликативного). Видно, что основными источниками являются шум оптического усилителя, мультипликативный фликкер-шум и шумы, обусловленные рассеянием Рэлея и дис-

персией в оптическом волокне. Видно также, что для получения наиболее низкого фазового шума на некоторой фиксированной частоте отстройки от СВЧ-несущей необходимо учитывать, что существуют диапазоны длин ВОЛЗ, для которых из-за хроматической дисперсии снижается амплитуда генерации или наступает ее срыв; существует такая длина ВОЛЗ, выше которой фазовый шум перестает снижаться из-за увеличения уровня собственного шума, обусловленного дисперсией или рассеянием Рэлея в оптическом волокне; существует такая длина ВОЛЗ, выше которой фазовый шум перестает снижаться из-за близости собственных частот ОЭГЛЗ. Для снижения уровня дискретных составляющих в спектре необходимо увеличивать частотную селективность контура обратной связи генератора, что достигается с помощью многоконтурной конфигурации ОЭГЛЗ. Рисунок 7 показывает зависимость уровня дискретных составляющих в спектре от нормированной разности длительностей задержки в дополнительных ВОЛЗ для различных отношений эквивалентной добротности ВОЛЗ и узкополосного СВЧ-фильтра η_Q .

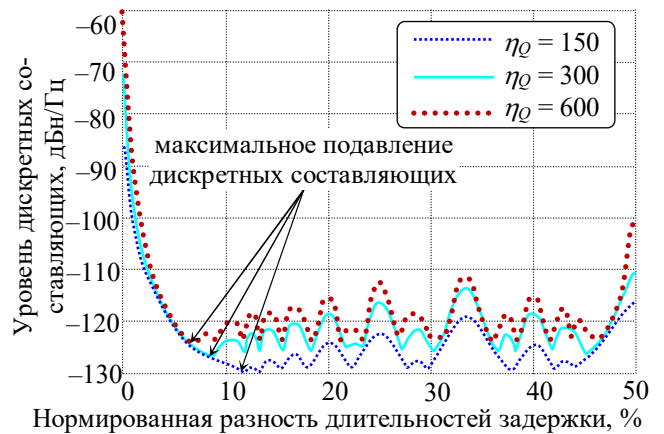


Рисунок 7. – Зависимость уровня дискретных составляющих в спектре от нормированной разности длительностей задержки в дополнительных ВОЛЗ для различных отношений эквивалентной добротности ВОЛЗ и узкополосного СВЧ-фильтра η_Q

Рисунок 8 показывает спектры фазового шума одно-, двух- и трехконтурного ОЭГЛЗ. Видно, что в двухконтурном ОЭГЛЗ обеспечивается подавление дискретных составляющих более, чем на 50 дБ, а в трехконтурном ОЭГЛЗ – более, чем на 60 дБ (в обоих случаях уровень дискретных составляющих не превышает –90 дБн). Установлено, что при соответствующем выборе конструктивных параметров и режимов работы компонентов ОЭГЛЗ с оптическим усилением возможно получение генерации с фазовым шумом ниже –

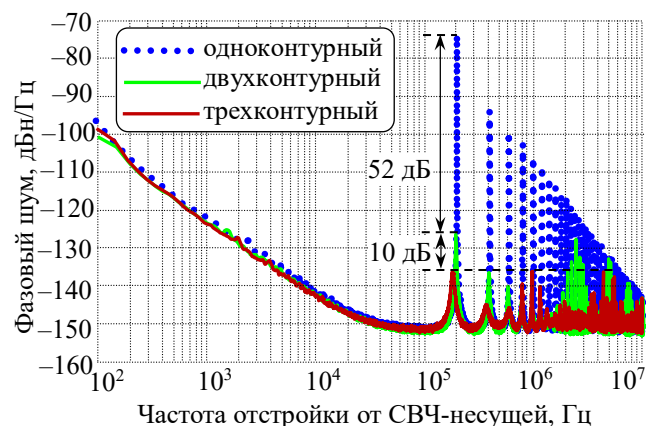


Рисунок 8. – Спектр фазового шума одно-, двух- и трехконтурного ОЭГЛЗ с длительностями задержки в ВОЛЗ, обеспечивающими максимальное подавление дискретных составляющих в спектре

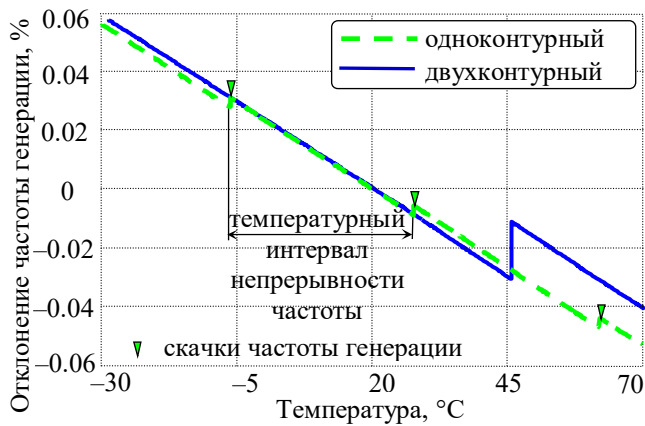


Рисунок 9. – Зависимость смещения частоты генерации от температуры ОЭГЛЗ относительно значения при температуре 20°C

нитных помех на ОЭГЛЗ, а также проведено экспериментальное исследование ряда параметров и характеристик макета ОЭЛГЗ.

Внешние воздействия приводят к отклонению частоты генерации относительно номинального значения, изменению спектра генерации, а также к срыву генерации. Рисунок 9 показывает зависимость отклонения частоты генерации от температуры одноконтурного ОЭГЛЗ относительно ее значения при температуре 20°C. Видно, что изменение температуры ОЭГЛЗ приводит к изменению частоты генерации в пределах узкой частотной полосы вблизи центральной частоты узкополосного СВЧ-фильтра без срыва генерации (фазовый шум и уровень дискретных составляющих изменяется не более чем на ± 1 дБ), в пределах температурного интервала непрерывности частоты генерации температурный коэффициент частоты генерации совпадает с температурным коэффициентом времени задержки в оптическом волокне, взятым с обратным знаком.

В главе установлено, что воздействие вибрации на ОЭГЛЗ приводит без срыва генерации к появлению дискретной составляющей в спектре фазового шума, уровень которой определяется упругими свойствами волоконно-оптической катушки, которая используется в составе ВОЛЗ. В ОЭГЛЗ из-за использования линии задержки на основе оптического волокна, которое принципиально нечувствительно к электромагнитным помехам СВЧ-диапазона, не создаются условия для проникновения СВЧ-сигнала помехи через ВОЛЗ. Установлено, что для исключения срыва генерации или квазисинхронизации генератора внешним воздействием относительная мощность электромагнитной помехи не должна превышать значения минус 75 дБ.

Макет ОЭГЛЗ с оптическим усилением был реализован по одноконтурной схеме (рисунок 9). Для макета ОЭГЛЗ был разработан и изготовлен оптический усилитель на легированном эрбием волокне, конструкция которого обеспечивает наиболее низкий шум в режиме насыщения при входной мощности оптической несущей более -10 дБм.

140 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей в диапазоне до 40 ГГц при уровне дискретных составляющих не более -90 дБн.

В четвертой главе «Теоретическое и экспериментальное исследование оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением» приведены результаты исследования влияния внешних воздействий, стационарной перегрузки, вибрации и электромаг-

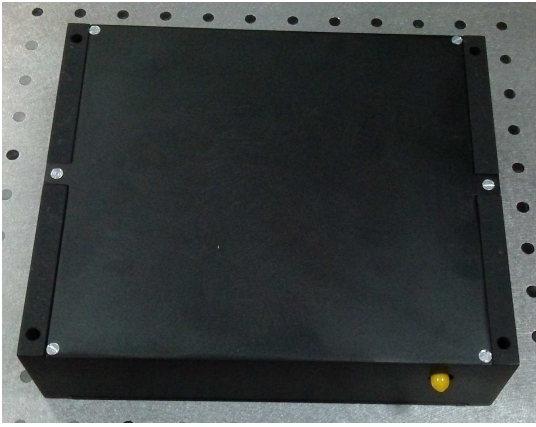


Рисунок 10. – Внешний вид макета ОЭГЛЗ с оптическим усилением

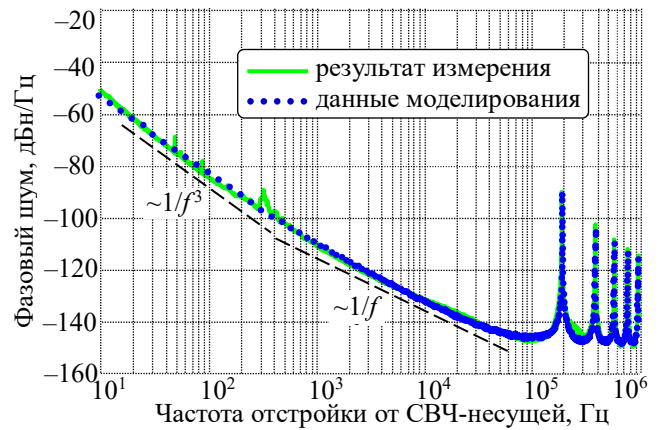


Рисунок 11. – Спектр фазового шума макета ОЭГЛЗ с оптическим усилением

В главе экспериментально подтверждены основные результаты, полученные в ходе теоретического исследования ОЭГЛЗ с оптическим усилением: 1. особенности динамики генерации при установлении автоколебаний (срывы генерации после включения); 2. особенности динамики непрерывной генерации (стационарная генерация, динамические нестабильности генерации; 3. зависимость нормированной амплитуды генерации от коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов; спектральная плотность мощности фазового шума в режиме стационарной генерации. Для измерения фазового шума макета ОЭГЛЗ использовался специализированный анализатор фазового шума сигналов RohdeSchwarz FSWP26, в основе работы которого лежит принцип выделения квадратурных компонентов с одновременным понижением частоты и математической обработкой синфазных и квадратурных компонент сигнала на промежуточной частоте. Рисунок 11 показывает спектр фазового шума макета ОЭГЛЗ с оптическим усилением. Видно, что результаты измерения фазового шума макета ОЭГЛЗ (в том числе и уровень дискретных составляющих) совпадают с результатами моделирования с помощью разработанной модели с точностью не хуже ± 1 дБ. Фазовый шум на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей составляет величину менее -132 дБн/Гц, уровень спектральной плотности мощности дискретных составляющих не превышает -90 дБн/Гц, что соответствует мировому уровню для генераторов СВЧ для систем радиолокации и связи в модульном исполнении, потенциально применимых на подвижной платформе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана физико-математическая модель оптоэлектронного генератора на линиях задержки на основе метода комплексных медленноменяющихся амплитуд, впервые учитывающая линейные и нелинейные механизмы преобра-

зования шумов оптической несущей, нелинейности компонентов генератора, нестационарность взаимодействия сигнала генерации с шумовыми составляющими в спектре, внешние динамические и параметрические воздействия на генератор и позволяющая моделировать выходные характеристики во временной и частотной области, исследовать зависимости выходных характеристик от конструктивных параметров оптоэлектронных генераторов, а также учитывать совместное действие различных комбинаций источников шума [1,4,6,8,19,20].

2. Показано, что установление генерации на частоте максимального усиления в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки достигается использованием режима включения, при котором обеспечивается линейное увеличение коэффициента петлевого усиления за время, более чем на два порядка превышающее длительность задержки в основной волоконно-оптической линии, при этом вероятность установления генерации на других собственных частотах уменьшается по экспоненциальному закону при увеличении длительности режима включения, причем при использовании многоконтурной конфигурации увеличивается частотная селективность контура оптоэлектронного генератора, что приводит к снижению вероятности установления генерации на собственных частотах, отличных от частоты максимального усиления [3,8].

3. Установлено, что для обеспечения сверхнизкого фазового шума необходимо в контуре оптоэлектронного генератора на линиях задержки использовать оптический усилитель на легированном эрбием волокне, электрооптический модулятор Маха-Цендера должен быть смещен от квадратурной токи в сторону точки закрытия для обеспечения фазы смещения модулятора в диапазоне от 140 до 170 градусов, при этом значение коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов в диапазоне от 1 до 3.3 является необходимым условием квазигармонической генерации, а увеличение коэффициента петлевого усиления в указанном диапазоне приводит к уменьшению фазового шума генератора [2,3,4,10,11,17,18].

4. Установлено, что введение в одноконтурный оптоэлектронный генератор дополнительных волоконно-оптических линий с различными длительностями задержки, составляющими менее четверти длительности задержки в основной волоконно-оптической линии, обеспечивает подавление дискретных составляющих в спектре до уровня менее -90 дБн, при этом фазовый шум уменьшается на величину до 3 дБ по сравнению с одноконтурным оптоэлектронным генератором [1,3,4,21,22].

5. Показано, что изменение температуры оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением приводит к изменению частоты генерации в пределах узкой частотной полосы вблизи центральной частоты узкополосного СВЧ-фильтра за время, не превышающее 100 длительностей задержки в основной волоконно-оптической линии, при этом не происходит срыва генерации, фазовый шум и уровень дискретных составляющих изменяется не бо-

лее чем на 1 дБ, а на интервалах непрерывности температурный коэффициент частоты генерации равен температурному коэффициенту длительности задержки в оптическом волокне, взятому с обратным знаком. Установлено, что воздействие вибрации на оптоэлектронный генератор на линиях задержки с оптическим усилением приводит к появлению дискретной составляющей в спектре фазового шума, уровень которой определяется упругими свойствами волоконно-оптической катушки, которая используется в качестве линии задержки [2,8,13,14].

6. Показано, что для исключения срыва генерации или квазисинхронизации генератора внешним воздействием относительная мощность электромагнитной помехи, приведенная ко входу электрооптического модулятора Маха-Цендера, не должна превышать значения минус 75 дБ [4,13,14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Созданная компьютерная программа по численному моделированию процесса генерации в оптоэлектронных генераторах на линиях задержки позволяет проводить численный анализ режимов работы и характеристик оптоэлектронных генераторов при внешних воздействиях температуры, стационарной перегрузки, вибрации и электромагнитных помех для различных практических применений оптоэлектронных генераторов для систем радиолокации и связи, включая системы в модульном исполнении на подвижной платформе.

Расчитанные зависимости, связывающие конструктивные параметры оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением с выходными параметрами и характеристиками, позволяют разрабатывать конструкцию оптоэлектронных генераторов с низким фазовым шумом и уровнем дискретных составляющих, предназначенных для конкретных систем радиолокации и связи.

Разработанные конструкционные подходы к созданию оптоэлектронного генератора с оптическим усилением позволяют обеспечить фазовый шум сигнала генерации менее -140 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей в диапазоне до 40 ГГц при уровне дискретных составляющих в спектре сигнала генерации менее -90 дБн, а также увеличить устойчивость оптоэлектронных генераторов ко внешним воздействиям температуры, стационарной перегрузки, вибрации и электромагнитных помех в составе современных систем радиолокации и связи.

Список публикаций соискателя

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Микитчук, К.Б. Численная модель волоконно-оптического оптоэлектронного генератора СВЧ с полностью оптическим усилением / К.Б. Микитчук, С.А. Малышев, А.Л. Чиж // Прилож. к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі серіі Фізіка-матэматычныя навукі «Молодежь в науке – 2013». – 2014. – Ч. 2. – С. 46 – 51.
2. Микитчук, К.Б. Стационарная генерация в оптоэлектронном генераторе СВЧ с оптическим усилением / К.Б. Микитчук, С.А. Малышев, А.Л. Чиж // Прилож. к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі серіі Фізіка-матэматычныя навукі «Молодежь в науке – 2014». – 2015. – Ч. 3. – С. 89 – 95.
3. Микитчук, К.Б. Режим одночастотной генерации в оптоэлектронном генераторе СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением / К.Б. Микитчук, С.А. Малышев, А.Л. Чиж // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі серіі Фізіка-матэматычныя навукі. – 2015. – № 3. – С. 111–118.
4. Mikitchuk, K. Modeling and design of delay-line optoelectronic oscillators / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // IEEE J. of Quantum Electronics. – 2016. – Vol. 52, № 10. – art. № 5000108.

Статьи в сборниках научных трудов

5. Микитчук, К. Б. Оптоэлектронные генераторы сверхвысокочастотных гармонических сигналов / К. Б. Микитчук // Сборник работ 69-ой научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 14–17 мая 2012 г. : в 3 т. / Белорус. гос. ун-т ; ред.: В.С. Повколос. – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 124–127.
6. Микитчук, К. Б. Обобщенная модель во временной области оптоэлектронного СВЧ-генератора на основе волоконно-оптических линий задержки / К. Б. Микитчук, А. Л. Чиж, С. А. Малышев // Сборник статей 9-го Белорусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе», Минск, 28–31 мая 2013 г. / Институт физики НАН Беларуси ; редкол.: Г.П. Яблонский [и др.]. – Минск, 2013. – С. 233–236.
7. Чиж, А. Л. Оптоэлектронный генератор СВЧ с полностью оптическим усилением / А. Л. Чиж, К. Б. Микитчук, С. А. Малышев // Сборник статей 1-й Российско-Белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», Нижний Новгород, 11 – 14 сентября 2013 г. / РНТОРЭС им. А. С. Попова ; ред. : Ю.В. Гуляев. – Нижний Новгород, 2013. – С.124 – 128.
8. Mikitchuk, K. Numerical nonlinear time-varying model of delay-line optoe-

lectronic oscillator / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of IEEE international conference on numerical electromagnetic modelling and optimization for RF, microwave and terahertz applications, Pavia, 14–16 May 2014. / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : M. Bozzi [et al.]. – Pavia, 2014. – P. 1–4.

9. Mikitchuk, K. Analog optical link operating at the gain peak wavelength of an erbium-doped fiber amplifier / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of 44th European Microwave Conf., Rome, 5–12 October 2014. / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : R. Sorrentino [et al.]. – Rome, 2014. – P. 679–682.

10. Малышев С.А., Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиофотоники на их основе / С.А. Малышев, А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук // Материалы 4-ой Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 1 – 4 июня 2015. : в 2 т. / Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» ; ред. Б.А. Калиникос [и др.]. – Санкт-Петербург, 2015. – Т. 1. – С. 10–18.

11. Микитчук, К. Б. Оптоэлектронный генератор СВЧ с низким фазовым шумом / К. Б. Микитчук, А. Л. Чиж, С. А. Малышев // Сборник статей 10-го Белорусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе», Минск, 26–29 мая 2015 г. / Институт физики НАН Беларуси ; редкол.: Г.П. Яблонский [и др.]. – Минск, 2015. – С. 222–225.

12. Chizh, A. High-speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode / A. Chizh, S. Malyshev, K. Mikitchuk // Proc. of IEEE international topical meeting microwave photonics, Paphos, 26–28 October 2015 / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : S. Iezekiel [et al.]. – Paphos, 2015. – P. 1–4.

13. Mikitchuk K., Theoretical investigation of external influences on delay-line optoelectronic oscillator/ K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of IEEE international topical meeting microwave photonics, Paphos, 26–28 October 2015 / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : S. Iezekiel [et al.]. – Paphos, 2015. – P. 1–4.

14. Микитчук К.Б., Оптоэлектронный генератор СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением / К.Б. Микитчук, С.А. Малышев, А.Л. Чиж, // Материалы 5-ой Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня 2016. : в 2 т. / Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» ; ред. Б.А. Калиникос [и др.]. – Санкт-Петербург, 2016. – Т. 1. – С. 333–337.

15. Mikitchuk, K. Delay-line optoelectronic oscillator with all-optical gain / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of 46th European Microwave Conf., London, 3–7 October 2016. / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : I. Hunter [et al.]. – London, 2016. – P. 953–956.

16. Чиж А.Л., Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули и устройства на их основе для систем радиолокации и радиоэлектронной борьбы /, А.Л. Чиж, С.А. Малышев, К.Б. Микитчук // Материалы 7-й Международной

научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного назначения, Минск, 22 мая 2017. : в 3 ч. / Изд-во «Четыре четверти» ; ред. С.М. Ненужный [и др.]. – Минск, 2017. – Ч. 1. – С. 62–69.

17. Микитчук К.Б., Оптический усилитель на легированном эрбием волокне для оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки / К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж, С.А. Малышев // Материалы 6-ой Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 29 мая – 1 июня 2017. : в 2 т. / Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» ; ред. Б.А. Калиникос [и др.]. – Санкт-Петербург, 2017. – Т. 1. – С. 333–337.

18. Mikitchuk, K. Noise and gain of an erbium-doped fiber amplifier for delay-line optoelectronic oscillator / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of 24th int. conf. on noise and fluctuations, Vilnius, 20–23 June 2017. / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : W. Belzig [et al.]. – Vilnius, 2017. – P.1–4.

Тезисы докладов

19. Микитчук, К.Б. Моделирование характеристик оптоэлектронного генератора / К.Б. Микитчук, А.А. Афоненко // Материалы Республиканской научной конференции студентов и аспирантов Республики Беларусь «НИРС-2011», Минск, 18 октября 2011 г. / Издательской центр БГУ ; ред.: С.А. Абламейко [и др.]. – Минск, 2011. – С. 32.

20. Mikitchuk, K. Optoelectronic microwave oscillator based on fiber optic delay lines / K. Mikitchuk , A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of 20th Lithuania-Belarus seminar «Lasers and optical nonlinearity», Vilnius, 21–22 November 2013 / Center for physical sciences and technology ; ed.: G. Rachiukaitis. – Vilnius, 2013. – P. 21.

Патенты

21. Оптоэлектронный СВЧ-генератор: пат. 119188 Российской Федерации, МПК H03B5/00, К. Б. Микитчук, С. А. Малышев, А. Л. Чиж; заявл. 10.04.2012; опубл. 10.08.2012.

22. Оптоэлектронный СВЧ-генератор: пат. 8641 Республики Беларусь, МПК H03B5/00, К. Б. Микитчук, С. А. Малышев, А. Л. Чиж; заявл. 27.03.2012; опубл. 28.06.2012.

РЭЗЬЮМЭ

Мікітчук Кірыл Барысавіч

ОПТАЭЛЕКТРОННЫЯ ГЕНЕРАТАРЫ НА ЛІНІЯХ ЗАТРЫМКІ З АПТЫЧНЫМ УЗМАЦНЕННЕМ ДЛЯ СІСТЭМ РАДЫЁЛАКАЦЫІ І СУВЯЗІ

Ключавыя словы: оптаэлектронны генератар на лініях затрымкі, аптычны ўзмацняльнік на легаваным эрбіем валакне, фазавы шум, узровень дыскрэтных складнікаў у спектры.

Мэта працы: усталяванне ўзаемасувязі выходных характарыстак оптаэлектронных генератараў на лініях затрымкі з аптычным узмацненнем з канструктыўнымі параметрамі і рэжымамі працы кампанентаў, якія ўваходзяць у іх склад.

Метады даследавання і скарыстаная апаратура: тэарэтычнае мадэляванне з дапамогай лікавай нелінейнай нестацыянарнай мадэлі; эксперыментальнае вымярэнне параметраў контуру оптаэлектроннага генератара з дапамогай вектарнага аналізатара ланцугоў Anritsu MS4645B, вымярэнне фазавага шуму з дапамогай аналізатара фазавага шуму ЗВЧ-сігналаў RohdeSchwarz FSWP26, вымярэнне спектру генерацыі з дапамогай аналізатара спектру ЗВЧ-сігналаў RohdeSchwarz FSP40.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана фізіка-матэматычная мадэль оптаэлектроннага генератара на лініях затрымкі, якая ўлічвае пераўтварэнне шумоў аптычнай апорнай, нелінейнасці кампанентаў, не стацыянарнасць узаемадзеяння сігнала з шумам і знешнія ўздзеянні; упершыню даследаваны падыходы да забеспячэння ўсталявання генерацыі на частаце максімальнага ўзмацнення ў оптаэлектронным генератары на лініях затрымкі; паказаны перавагі і асаблівасці выкарыстання аптычнага ўзмацнення ў оптаэлектронным генератары і распрацаваны падыходы да зніжэння фазавага шуму і ўзроўня дыскрэтных складнікаў у спектры; упершыню колькасна даследаваны ўплыў знешніх уздзеянняў тэмпературы, паскарэнні, вібрацыі і электрамагнітных памех на оптаэлектронныя генератары на лініях затрымкі з аптычным узмацненнем.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: кампутарная праграма, якая рэалізуе фізіка-матэматычную мадэль оптаэлектроннага генератара, дазваляе распрацоўваць канструкцыю оптаэлектронных генератараў з нізкім фазавым шумам і ўзроўнем дыскрэтных складнікаў, прызначаную для пэўных сістэм радыёлакацыі і сувязі; распрацаваныя падыходы да стварэння оптаэлектроннага генератара дазваляюць забяспечыць фазавы шум сігналау генерацыі меней за -140 дБн/Гц на частаце адладкі 10 кГц ад ЗВЧ-апорнай у дыяпазоне да 40 ГГц пры ўзроўні дыскрэтных складнікаў у спектры меней -90 дБн, і павялічыць устойлівасць такіх генератараў да вонкавых уздзеянняў.

Вобласць выкарыстання: сістэмы радыёлакацыі і сувязі.

РЕЗЮМЕ

Микитчук Кирилл Борисович

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ С ОПТИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ

Ключевые слова: оптоэлектронный генератор на линиях задержки, оптический усилитель на легированном эрбием волокне, фазовый шум, уровень дискретных составляющих в спектре.

Цель работы: установление взаимосвязи выходных характеристик оптоэлектронных генераторов на линиях задержки с оптическим усилением с конструктивными параметрами и режимами работы компонентов, входящих в их состав.

Методы исследования и использованная аппаратура: теоретическое моделирование с помощью численной нелинейной нестационарной модели; экспериментальное измерение параметров контура оптоэлектронного генератора с помощью векторного анализатора цепей Anritsu MS4645B, измерение фазового шума с помощью анализатора фазового шума СВЧ-сигналов RohdeSchwarz FSWP26, измерение спектра генерации с помощью анализатора спектра СВЧ-сигналов RohdeSchwarz FSP40.

Полученные результаты и их новизна: разработана физико-математическая модель оптоэлектронного генератора на линиях задержки, учитывающая преобразование шумов оптической несущей, нелинейности компонентов, нестационарность взаимодействия сигнала с шумом и внешние воздействия; впервые исследованы подходы к обеспечению установления генерации на частоте максимального усиления в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки; показаны преимущества и особенности использования оптического усиления в оптоэлектронном генераторе и разработаны подходы к снижению фазового шума и уровня дискретных составляющих в спектре; впервые количественно исследовано влияние внешних воздействий температуры, ускорения, вибрации и электромагнитных помех на оптоэлектронные генераторы на линиях задержки с оптическим усилением.

Рекомендации по использованию: компьютерная программа, реализующая физико-математическую модель оптоэлектронного генератора, позволяют разрабатывать конструкцию оптоэлектронных генераторов с низким фазовым шумом и уровнем дискретных составляющих, предназначенных для конкретных систем радиолокации и связи; разработанные подходы к созданию оптоэлектронного генератора позволяют обеспечить фазовый шум сигнала генерации менее -140 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей в диапазоне до 40 ГГц при уровне дискретных составляющих в спектре менее -90 дБн, и увеличить устойчивость таких генераторов ко внешним воздействиям.

Область применения: системы радиолокации и связи.

SUMMARY

Kiryl B. Mikitchuk

ALL-OPTICAL GAIN DELAY-LINE OPTOELECTRONIC OSCILLATORS FOR RADAR AND COMMUNICATION SYSTEMS

Keywords: delay-line optoelectronic oscillator, erbium-doped fiber amplifier, phase noise, spectral spur level.

Research goal: to correlate design parameters and component operation modes of all-optical gain optoelectronic oscillators with their output characteristics.

Research methods and equipment: theoretical simulation by means of numerical nonlinear time-variant model; experimental study of open-loop small signal gain by means of microwave vector network analyzer Anritsu MS4645B, phase noise measurement by means of microwave phase noise analyzer RohdeSchwarz FSWP26, spectrum measurement by means of microwave spectrum analyzer RohdeSchwarz FSP40.

Obtained results and novelty: physical model of delay-line optoelectronic oscillator has been developed, the model takes into account conversion of optical carrier noise in noise of microwave signal, components nonlinearities, time-variant interactions between noise and oscillation signal, and external influences; techniques for ensuring the repeatable turn-on of the all-optical gain delay-line optoelectronic oscillator at the maximum gain frequency have been studied for the first time; advantages as well as realization difficulties of all-optical gain provided by the erbium-doped fiber amplifier in the delay-line optoelectronic oscillator have been demonstrated; design considerations for simultaneous obtaining of ultra-low phase noise and spur level in the oscillation spectrum have been developed for delay-line optoelectronic oscillator; the effect of external influences (temperature, vibration, and electromagnetic interference) on all-optical gain delay-line optoelectronic oscillator has been studied quantitatively for the first time.

Application guidelines: software realization of the physical model of delay-line optoelectronic oscillator allows to design delay-line optoelectronic oscillator with both ultra-low phase noise and spur level in the oscillation spectrum for particular radar and communication systems; developed design considerations allows to construct delay-line optoelectronic oscillator with increased immunity to external influences and less than -140 dBc/Hz phase noise at 10 kHz offset from up to 40 GHz carrier and spur level as low as -90 dBc.

Application area: radar and communication systems.

Государственное научное учреждение
«Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»
Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

МИКИТЧУК Кирилл Борисович

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
НА ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ С ОПТИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ
ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.11.07 – оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

Минск, 2017

Подписано в печать __. __. 201__ г. Формат 60x90 /16

Тип бумаги – офисная. Печать офсетная.

Объем: 1.7 усл. печ. л., 1.5 уч.-изд. л.

Тираж 60 экз. Заказ __.

Институт физики НАН Беларуси

пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Беларусь

Отпечатано на ризографе Института физики НАН Беларуси

