

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ШАЙДУРОВ Кирилл Дмитриевич

**ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК АВТОДИННЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ
С АМПЛИТУДНОЙ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий ИРИТ-РтФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
НОСКОВ Владислав Яковлевич

Официальные оппоненты:

ДАНИЛИН Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет)», заведующий кафедрой радиотехники;

ЕЗЕРСКИЙ Виктор Витольдович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», профессор кафедры радиоуправления и связи;

РОВКИН Михаил Евгеньевич, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», старший научный сотрудник НИИ систем электросвязи

Защита состоится «25» июня 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.10.27 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2231>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кирилл Александрович Игнатков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень разработанности темы

Системы ближней радиолокации (СБРЛ), построенные по автодинному принципу, имеют простейшую конструкцию приёмо-передающего модуля, который содержит лишь антенну и автодинный генератор, совмещающий в себе одновременно функции передатчика и приёмника. Поэтому автодины (АД), работающие в условиях воздействия собственного отражённого от цели излучения, находят широкое применение в СБРЛ различного назначения. Например, в аппаратуре контроля параметров технологических процессов и измерительной технике, а также на транспорте и в промышленности, системах безопасности и в военном деле, в научных исследованиях и медицине, в которых отмеченные выше достоинства АД являются определяющими.

Конструктивная простота АД, тем не менее, контрастирует со сложностью описания и анализа процессов, протекающих в нем. Дело в том, что АД, представляет собой единую автоколебательную систему «генератор – объект локации». В этой системе расстояние и скорость его изменения являются, по отношению к АД, «внешними» параметрами этой системы. Изменения этих параметров в соответствии с автодинным эффектом вызывают изменения собственных параметров генератора (амплитуды и частоты колебаний). Поэтому автодинные системы относятся к классу автопараметрических систем с запаздывающей обратной связью. Учёт динамических характеристик необходим при использовании АД в СБРЛ с различными видами модуляции, а также в случаях регистрации этими СБРЛ быстропротекающих процессов. Для этого необходим учёт инерционности при анализе автодинных сигналов, для чего, как показано в диссертации¹, целесообразно привлечение методов теории систем с запаздыванием.

Необходимо отметить, что в период становления и развития данного научного направления и до последних дней значительный вклад в теорию и технику АД внесли отечественные и зарубежные ученые: Е.К. Алахов, И.Л. Берштейн, В.Т. Бузыкин, С.Д. Воторопин, Е.М. Гершензон, В.Н. Дамгов, Г.П. Ермак, И.М. Коган, В.Я. Носков, С.М. Смольский, А.Ф. Терещенко, Б.Н. Туманов, Д.А. Усанов, Ю.Л. Хотунцев, Т. Itoh, P.A. Jefford, M.J. Lasarus, S. Nagano, F.R. Pantooya, Y. Takayama и многие другие. В своих публикациях они значительно расширили круг задач, решаемых с помощью АД, а также исследовали различные типы, режимы работы, принципы построения и использования автодинных генераторов.

Современные мировые тенденции дальнейшего развития теории и техники СБРЛ связаны с созданием новых и более совершенных приемо-передающих модулей СВЧ и КВЧ диапазонов в монолитном и гибридно-интегральном исполнении и освоением все более высоких рабочих частот. В последнее время в нашей стране возобновился интерес к развитию данного направления в связи с запросом промышленностью приемо-передающих модулей и интегральных схем СВЧ и КВЧ диапазонов для СБРЛ отечественного производства, отвечающих современ-

¹ Носков В.Я. Автодины на полупроводниковых приборах СВЧ и их применение: диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени д.т.н. – М.: МГТУ ГА, 1995. – 76 с.

ным требованиям по электрическим и тактико-техническим характеристикам. В свете этого запроса автодинные модули, которые в наибольшей мере удовлетворяют указанным требованиям, имеют особые преимущества перед гомодинными модулями по габаритам, весу и стоимости при любой технологии их изготовления и поэтому востребованы.

Применение в АД частотной модуляции (ЧМ) излучения значительно расширяет функциональные возможности СБРЛ в решении задач обнаружения и измерения параметров движения объектов локации. Эти СБРЛ обеспечивают возможность формирования, так называемых, «мертвых зон» и «зон селекции» цели на заданных расстояниях. Кроме того, ЧМ обеспечивает повышение помехоустойчивости СБРЛ к воздействию как активных, так и пассивных помех.

Очевидно, что для успешного применения автодинных СБРЛ с ЧМ необходимо учитывать динамические особенности формирования сигнальных и шумовых характеристик АД, отличающие их от хорошо изученных систем гомодинного типа. Эти особенности АД с ЧМ, как и обычных АД без модуляции, состоят в том, что в условиях «сильного сигнала» у них наблюдаются ангармонические искажения сигналов. Данное явление создает проблемы при обработке сигналов, сужает динамический диапазон СБРЛ и ограничивает область применения АД, особенно в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Изучению сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ посвящено большое число работ. Однако на сегодня результаты выполненных исследований этих характеристик имеют ограниченную область применения. В связи с этим представляется **актуальным** проведение исследований, направленных на поиск новых режимов работы, структур и технических решений автодинных приемо-передатчиков, обеспечивающих улучшение динамических сигнальных и шумовых характеристик, а также расширение функциональных возможностей и областей применения СБРЛ. При этом **востребованными** для практики являются результаты исследования АД с амплитудной (АМ) и частотной (ЧМ) модуляциями с учетом их взаимного влияния на сигнальные характеристики. Кроме того, практический интерес представляют результаты исследований шумовых характеристик, а также режима биений генератора для определения динамических свойств генераторов как автодинов.

Объектом исследования диссертации являются СБРЛ с АМ и ЧМ с автодинным принципом построения приемо-передатчика.

Предметом исследования – модели и методы анализа автодинных генераторов, принципы построения и применения АД в СБРЛ.

Цель и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертации является исследование динамических особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ, а также изучение свойств АД при асинхронном воздействии излучения от стороннего источника.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. На основе выполненного обзора литературы по СБРЛ с АМ и ЧМ показать

актуальность темы диссертации, дать обоснование цели и задач исследования.

2. Разработать математическую модель для расчета динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ.
3. Произвести расчеты и анализ динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ
4. Выполнить экспериментальные исследования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ с целью проверки результатов теоретических исследований.
5. Представить обоснование метода биений для определения динамических характеристик АД. Кроме того, дать описание радиолокационных датчиков для систем измерения скорости, путевой навигации по геометрии железнодорожного пути и обзора передней полусферы локомотива.

Новизна защищаемых положений и результатов диссертации

1. Впервые разработана математическая модель автодинного радиолокатора с одновременной амплитудной и частотной модуляцией излучения, описывающая формирование характеристик амплитудной селекции цели в зависимости от расстояния. При этом модель учитывает внешнюю инерционность автодинной системы «генератор – объект локации», обусловленную конечным временем распространения зондирующего излучения до цели и обратно, а также произвольное соотношение этого времени и периода модулирующей функции.

2. Впервые выполнены теоретические и экспериментальные исследования взаимного влияния АМ и ЧМ, а также величины параметра внешней обратной связи, на формирование динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ при произвольном соотношении времени запаздывания отраженного от цели излучения и периодов сигнала и модулирующей функции.

3. Впервые дано обоснование метода биений для определения динамических свойств и чувствительности автодинных генераторов.

4. Выполненные исследования позволили найти новые технические решения СБРЛ с ЧМ, предназначенные для определения параметров движения локомотивов и повышения безопасности эксплуатации железнодорожного транспорта.

Научная ценность защищаемых положений и результатов диссертации

Научная ценность работы состоит в том, что в ней с позиций общего подхода к анализу процессов в системе «генератор – объект локации» разработана теория работы автодинных СБРЛ при одновременной амплитудной и частотной модуляции. Эта теория обеспечивает возможность учитывать различные параметры и характеристики автодинного генератора, произвольное время запаздывания отражённого от цели излучения и динамику формирования сигналов и шумов.

Практическая значимость работы

Результаты выполненных в диссертации исследований позволяют, исходя из заданных параметров используемых генераторов, рассчитать динамические сигнальные и шумовые характеристики АД, необходимые для их правильного использования в перспективных СБРЛ. Кроме того, в диссертации сформулированы основные требования и рекомендации к автодинным модулям, предназначенным для СБРЛ с АМ и ЧМ. Предложенный метод биений обеспечивает снижение за-

трат на проведение исследований динамических свойств автодинных генераторов в лабораторных условиях без выполнения натуральных экспериментов. Технические решения радиолокационных датчиков, защищенные двумя патентами на изобретения, обеспечивают возможность определения параметров движения локомотива и повышения безопасности эксплуатации железнодорожного транспорта.

Методология и методы диссертационного исследования

При разработке математической модели АД использовались методы теории электрических цепей. Переход от дифференциальных уравнений для мгновенных значений к укороченным уравнениям для амплитуды и фазы колебаний выполнялся с использованием методов медленно меняющихся амплитуд, усреднения и квазилинейного, известных из теории нелинейных колебаний. При анализе укороченных уравнений в условиях слабого воздействия отражённого излучения и шумов использовался метод возмущений. При анализе флуктуационных характеристик использовались методы статистической радиотехники и численного моделирования. При решении систем дифференциальных уравнений использовались методы теории систем с запаздыванием. Анализ сложных выражений выполнялся численными методами с привлечением пакета программ в среде MathCAD. При проведении экспериментальных исследований АД использовались методы лабораторного и полунатурного эксперимента. Для регистрации сигналов АД привлекалась компьютерная обработка сигналов с помощью виртуальных приборов, создаваемых в среде программирования LabVIEW.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. При взаимодействии в АД СБРЛ с гармонической АМ зондирующего и отраженного излучений на гармониках частоты модуляции, включая нулевую, формируется периодическая характеристика амплитудной селекции (ХАС) цели в виде зависимости АД сигнала от расстояния до объекта локации.

1.1. Если в АД с АМ величина сопутствующей девиации частоты генерации пренебрежимо мала, то максимум автодинного отклика соответствует середине ХАС. При этом эффективность переноса полезного сигнала на гармоники частоты модуляции уменьшается с увеличением номера гармоники.

1.2. В случае увеличения сопутствующей девиации частоты генерации АД с АМ вначале область главного максимума ХАС смещается в сторону больших значений нормированного расстояния, затем – приобретает многогорбый характер, наблюдаемый в СБРЛ с ЧМ. Также при этом улучшается эффективность переноса сигнала на высшие гармоники частоты модуляции.

2. При взаимодействии в автоколебательной системе АД СБРЛ с гармонической ЧМ излучаемого и принимаемого колебаний формируется периодическая ХАС цели, наблюдаемая на всех гармониках частоты модуляции, включая нулевую.

2.1. Если величины сопутствующей АМ и внешней обратной связи автодинной системы «генератор – объект локации» пренебрежимо малы, то в АД СБРЛ с ЧМ сигналы формируются на гармониках частоты модуляции, включая окрестность нулевой гармоники, в соответствии с функциями Бесселя, аналогично формированию сигналов в гомодинных СБРЛ с ЧМ.

2.2. Наличие сопутствующей АМ в АД СБРЛ с ЧМ вносит изменения в амплитудные и фазовые соотношения сигналов и вызывает отклонения формируемой ХАС цели от вида функций Бесселя. При этом влияние сопутствующей АМ на формирование ХАС значительно уменьшается с увеличением номера гармоники частоты модуляции.

2.3. Выходные сигналы АД СБРЛ с ЧМ, соответствующие краям периода ХАС, наблюдаются только на нулевой гармонике модуляции, т.е. в области доплеровских частот, вне зависимости от наличия сопутствующей АМ.

3. Амплитудные значения сигналов в средней части ХАС на всех гармониках частоты модуляции, включая нулевую, асимптотически возрастают с приближением коэффициента АМ к единице. Спектр сигнала автодинных СБРЛ при одновременной АМ и ЧМ на гармониках частоты модуляции имеет асимметричный вид. Если величина параметра обратной связи автодинной системы «генератор – объект локации» соизмерима с единицей, то сигналы АД СБРЛ с АМ и/или ЧМ от равномерно и прямолинейно движущегося точечного отражателя имеют ангармонические искажения.

4. Частота выходного сигнала АД СБРЛ с ЧМ совпадает с частотой сигнала гомодинной СБРЛ с ЧМ в случаях как движущегося, так и неподвижного объекта локации. Если параметр внешней обратной связи «генератор – объект локации» значительно меньше единицы, то форма сигнала практически синусоидальная, а шумовые характеристики стационарны. В ином случае наблюдаются ангармонические искажения сигнала и обогащение его спектра, а также возникает периодическая нестационарность среднеквадратического уровня шума.

5. При асинхронном воздействии на генератор излучения от стороннего источника регистрация изменений амплитуды биений в виде амплитудно-частотной характеристики обеспечивает возможность фиксации частоты среза по уровню 0,707, что позволяет определить постоянную времени автодинного отклика, которая характеризует динамические свойства генератора как автодина.

Достоверность защищаемых положений и результатов обеспечивается соответствием теоретических выводов данным, полученным экспериментально, сходимость полученных результатов с результатами других работ при предельных переходах, использованием стандартной измерительной аппаратуры при экспериментах, а также подтверждается успешным практическим использованием в реализованных устройствах и системах. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях и симпозиумах, а также публикациями в журналах.

Апробация результатов работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, среди которых 14 статей и докладов, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и учтенных международными библиографическими базами данных (БД) WoS и Scopus. Материалы работы отражены также в 4-х отчётах о НИР. Получено 2 патента РФ на изобретения.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих

симпозиумах и конференциях: с 24-ой по 30-ю Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2014-2020 гг.; 3rd International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, REIT-Spring 2018, Yekaterinburg, Russia; 10-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'20), Kharkov, Ukraine, 2020; 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2020), Kharkov, Ukraine, 2020; 2018 и 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russia; 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia.

Внедрение результатов диссертации и рекомендации по их дальнейшему использованию

Результаты работы получены в ходе выполнения договора о научно-техническом сотрудничестве между Институтом Радиофизики и электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова и Уральским государственным техническим университетом; НИР «Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона» по договору о научно-техническом сотрудничестве между АО «НИИПП» (г. Томск) и ИРИТ-РТФ УрФУ № 3302-34/02 от 06 ноября 2013 г.; НИР «Исследование и разработка автодинных модулей СВЧ и КВЧ диапазонов» по договору о научно-техническом сотрудничестве между АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) и УрФУ № 02-25/044 от 14 ноября 2018 г.; НИР «Исследование возможности создания малогабаритного интерферометра для диагностики быстропротекающих процессов» по договору между УрФУ и РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск), а также в учебном процессе магистрантов на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций УрФУ в качестве лабораторной работы и демонстрационного стенда автодинного радиолокатора КВЧ диапазона с ЧМ. Кроме того, часть практических результатов диссертации получена автором при выполнении должностных обязанностей инженера компании ООО «НПО САУТ» (г. Екатеринбург). Факты использования результатов диссертации подтверждены соответствующими актами и справками (приложены в деле).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Объект и предмет исследований, а также перечисленные выше задачи, новые научные результаты и положения, полученные в диссертации, **соответствуют** пунктам с 1, 3, 4 и 11 из перечня областей исследований для специальности 05.12.14 – радиолокация и радионавигация согласно её паспорту.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Она изложена на 163 страницах, содержит 55 рисунков и одно приложение. Библиография содержит 146 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлены цель работы и задачи исследования, указаны применяемые методы исследований, а также основ-

ные научные результаты и положения, выносимые на защиту. Аргументирована научная новизна и достоверность положений, отмечена научная и практическая значимость работы, указано, где реализованы результаты работы, перечислены мероприятия, на которых проводилась апробация работы, приведены сведения о публикациях, указан личный вклад автора, приведена структура диссертации.

В первой главе выполнен обзор литературы, посвященной исследованиям и применению АД в СБРЛ с АМ и ЧМ. Выполнен обзор основных принципов построения и схемных решений автодинных модулей. Представлены результаты изучения литературы, посвященной изучению особенностей формирования сигналов и шумов в АД с АМ и ЧМ. Дано обоснование цели и поставлены задачи диссертационного исследования.

В главе 2 «Разработка математической модели для расчета динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ» сначала для функциональной и эквивалентной схем генератора (см. рисунок 1, *a* и *б* раздела 2.2) методом усреднения получены исходные для дальнейшего анализа укороченные уравнения для малых относительных изменений амплитуды $a = \Delta A / A_0$ и частоты $\chi = \Delta\omega / \omega_0$ колебаний в виде:

$$\frac{Q_H}{\omega_0} \frac{da}{dt} + \alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (1)$$

$$\beta a + Q_H \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau) - a_s(t), \quad (2)$$

где α , ε , β – безразмерные дифференциальные параметры АЭ генератора в окрестности его стационарного режима, определяющие прочность предельного цикла, неизодромность и неизохронность генератора; Q_H – нагруженная добротность колебательной системы; $a_c(t)$, $a_s(t)$ – относительные синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума генератора; ΔA , $\Delta\omega$ – автодинные изменения амплитуды A и частоты ω относительно их стационарных значений A_0 и ω_0 ; $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 [A(t) / A(t, \tau)]$ и $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$ – модуль и фаза мгновенного коэффициента отражения, приведенного в нагрузку генератора; Γ_0 – коэффициент, характеризующий затухание излучения по амплитуде при его распространении до цели и обратно, определяемый из уравнения радиолокации; $A(t)$, $\Psi(t)$ – амплитуда и фаза колебаний в текущий момент времени t , а $A(t, \tau)$ и $\Psi(t, \tau)$ – они же в момент времени $(t - \tau)$; $\eta = Q_H / Q_{вн}$, $Q_{вн}$ – КПД и внешняя добротность колебательной системы; τ – время запаздывания отраженного от цели излучения.

Из уравнений (1), (2) видно, что основная инерционность автодинной системы связана с изменениями амплитуды колебаний генератора. Комбинируя эти выражения при $a_c(t) = a_s(t) = 0$ и исключая переменную χ , получим:

$$\tau_a (da/dt) + a = \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (3)$$

где τ_a – постоянная времени автодинного отклика, характеризующая скорость изменения процессов в АД:

$$\tau_a = Q_n / [\omega_0 \alpha (1 - \gamma \rho)]; \quad (4)$$

$\gamma = \beta / \alpha$, $\rho = \varepsilon / Q_n$ – коэффициенты неизохронности и неизодромности генератора; $\psi = \arctg(\rho)$ – угол фазового смещения автодинных изменений амплитуды; K_a – коэффициент автодинного усиления: $K_a = \eta(1 + \rho^2)^{1/2} / \alpha(1 - \gamma \rho)$. Обычно нагруженная добротность Q_n колебательных систем СВЧ генераторов достаточно велика $Q_n > 100$. Поэтому в (4) параметр $\rho \ll 1$ и произведением $\gamma \rho$ можно пренебречь. Тогда формулу (4) значительно упрощается: $\tau_a = Q_n / \omega_0 \alpha$.

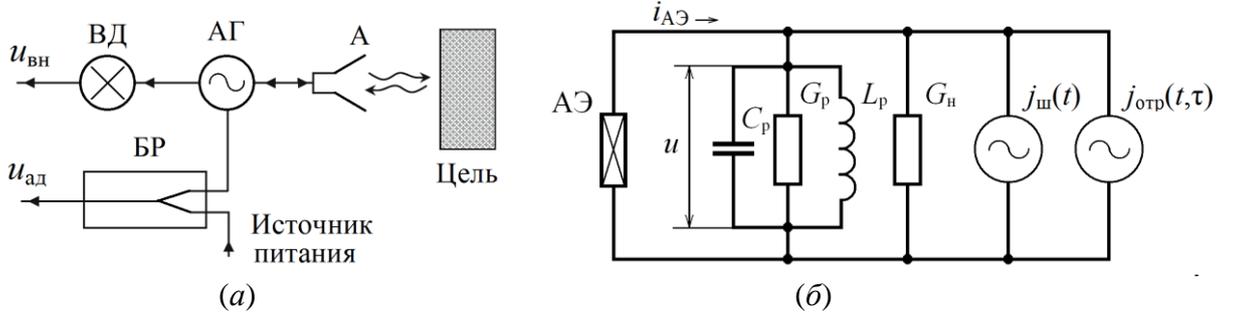


Рисунок 1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы автодинного приемо-передатчика: А – антенна, АГ – автодинный генератор, АЭ – активный элемент генератора, БР – блок регистрации, ВД – внешний детектор, C_p , L_p , G_p – емкость, индуктивность и проводимость потерь резонатора, G_n – проводимость нагрузки генератора; $j_{отп}(t, \tau)$, $j_{ш}(t)$ – эквивалентные источники отраженного излучения и внутренних шумов генератора.

С учётом того, что регистрируемые автодинными устройствами процессы, период сигналов T_c которых обычно не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ с, протекают значительно медленнее, чем скорость изменения параметров СВЧ генераторов: $T_c \gg \tau_a$, а время корреляции τ_k шумов в генераторе также пренебрежимо мало по сравнению с периодом T_c автодинного отклика: $\tau_k \ll T_c$, но значительно превосходит постоянную времени: $\tau_k \gg \tau_a$, допустимо дальнейший анализ системы (1), (2) выполнять квазистатическим методом. Полагая производную в (1) равной нулю, получаем уравнения для дальнейшего анализа автодинной системы «генератор – объект локации», в которых внутренняя инерционность АД не учитывается:

$$\alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(\tau, t) + a_c(t), \quad (5)$$

$$\beta a + Q_n \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(\tau, t) - a_s(t). \quad (6)$$

Как видно из (5) и (6), эти выражения через модуль $\Gamma(t, \tau)$ и фазу $\delta(\tau, t)$ учитывают внешнюю инерционность системы, обусловленную конечным временем распространения зондирующего излучения до цели и обратно. Далее в разделе 2.3 при $a_c(t) = a_s(t) = 0$ разработана математическая модель автодинной СБРЛ с АМ и ЧМ. Для этого выходные квазигармонические колебания, излучаемые антенной в направлении цели, записаны в виде:

$$u_{изл}(t) = A(t) \cos \Psi(t) = A_0 [1 + m_{AM} f_m(t)] \cos \left[\omega_0 t + \omega_0 m_{ЧМ} \int_0^t f_m(t) dt \right], \quad (7)$$

где $m_{AM} = \Delta A_{AM} / A_0$ – коэффициент АМ, вызванной изменениями частоты генера-

ции в процессе ЧМ; ΔA_{AM} – наибольшее отклонение амплитуды от стационарного значения A_0 при модуляции частоты генерации; $m_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \omega_0$ – коэффициент ЧМ; $\Delta\omega_{\text{ЧМ}}$ – наибольшее отклонение (девиация) частоты колебаний генератора от его стационарного значения ω_0 вследствие ЧМ; $f_m(t)$ – нормированная модулирующая функция. Отраженные от цели и принятые антенной колебания $u_{\text{отр}}(t, \tau)$ имеют вид:

$$u_{\text{отр}}(t, \tau) = \Gamma_0 A_0 [1 + m_{\text{AM}} f_m(t, \tau)] \cos \left[\omega_0(t - \tau) + \omega_0 m_{\text{ЧМ}} \int_{t-\tau}^t f_m(t, \tau) dt + \varphi_0 \right], \quad (8)$$

где $f_m(t, \tau)$ – модулирующая функция отраженных колебаний; φ_0 – постоянный фазовый сдвиг, обусловленный отражающими свойствами цели.

Решение системы (5), (6) с учетом (7), (8) для относительных автодинных изменений амплитуды и частоты автоколебаний получено в виде:

$$a(t) = -m_{\text{AM}} f_m(t, \tau) + \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (9)$$

$$\chi(t) = -m_{\text{ЧМ}} f_m(t, \tau) - \Gamma(t, \tau) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (10)$$

где K_a, L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации; $\psi = \text{arctg}(\rho)$, $\theta = \text{arctg}(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений.

Для выявления функций запаздывающего воздействия $f_m(t, \tau)$, $A(t, \tau)$ и $\Psi(t, \tau)$ в этих выражениях далее выполнено их разложение в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с текущим временем t . Это разложение позволило перейти к выражениям, в которых все переменные становятся явными.

В разделе 2.4. выполнен переход от общих выражений к конкретным для случая одновременной АМ и ЧМ автодина по закону гармонической функции. При этом рассмотрен случай выполнения сильного неравенства $\Omega_a \ll \Omega_m$, когда основные спектральные составляющие на частоте Ω_a автодинного сигнала группируются не только в области низких «нулевых» частот, но и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции.

В разделе 2.5. получены выражения для расчета сигнальных и шумовых характеристик автодина с ЧМ по произвольному закону модулирующей функции. При этом для случая соблюдения условия $\Omega_a \gg \Omega_m$ выполнено разложение функций запаздывающего воздействия в ряды Тейлора, как и в предыдущем случае выполнения обратного неравенства.

В главе 3 «Расчет и анализ динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ» на основе полученных выше выражений с использованием ПО «MathCAD» выполнен численный анализ особенностей поведения АД с АМ и ЧМ для гармонического закона модулирующей функции. При выполнении этих вычислений приняты приближения, учитывающие реальные условия функционирования автодинных СБРЛ миллиметрового диапазона. На рис. 2 и 3 раздела 3.2 приведены результаты расчета объемных ХАС как нормированной функции двух переменных: коэффициента амплитудной модуляции m_{AM} и нормированного расстояния до цели r_n для АД с АМ и сопутствующей ЧМ.

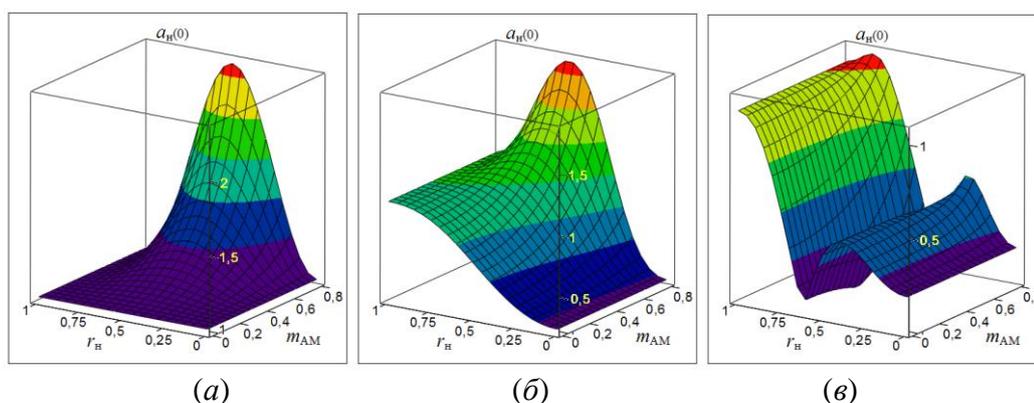


Рисунок 2. ХАС $a_n(0)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний АД с АМ и ЧМ на нулевой гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений индекса ЧМ $p_{\text{ЧМ}}$: $p_{\text{ЧМ}} = 0$ (а), $p_{\text{ЧМ}} = 2$ (б) и $p_{\text{ЧМ}} = 5$ (в)

По вертикали на этих ХАС отложены относительные уровни $a_n(k)$ составляющих автодинного отклика на k -й гармонике частоты Ω_m модуляции. На «нулевой» гармонике эта ось обозначена как $a_n(0)$ (см. рис. 2). На первой гармонике частоты модуляции она обозначена как $a_n(1)$ (см. рис. 3).

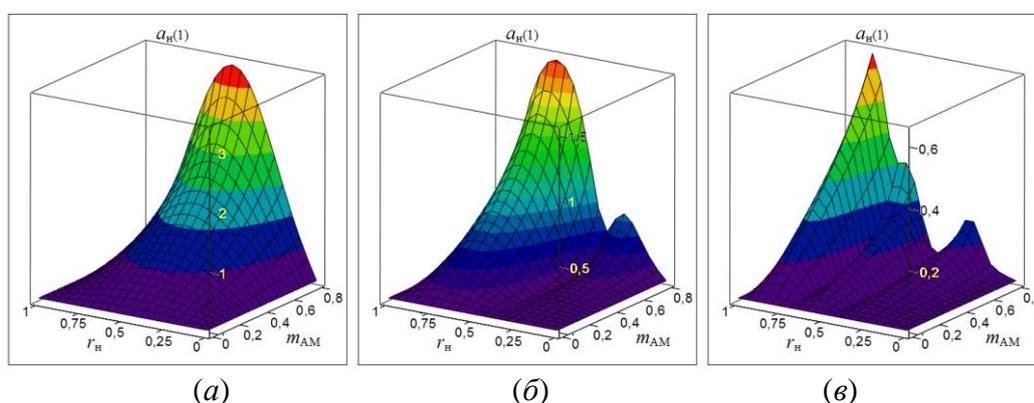


Рисунок 3. ХАС $a_n(1)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний АД с АМ и ЧМ на первой гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений индекса ЧМ $p_{\text{ЧМ}}$: $p_{\text{ЧМ}} = 0$ (а), $p_{\text{ЧМ}} = 5$ (б) и $p_{\text{ЧМ}} = 10$ (в)

Из результатов выполненных расчетов видно, что в автодинных СБРЛ с АМ по синусоидальному закону наиболее целесообразно использование больших значений коэффициента АМ. При этом появляется возможность выделения сигналов на высших гармониках частоты модуляции, на которых форма ХАС является более предпочтительной для ряда применений, а уровень ПАМ – значительно ниже. При этом наличие сопутствующей ЧМ излучения АД способствует изменению соотношения между уровнями гармоник в пользу повышения их порядка.

На рис. 4 приведены результаты расчётов, выполненные в разделе 3.3, объемных ХАС как нормированных функций $J_m(k_{\text{ЧМ}}, r_{\text{нр}})$ двух переменных: величины индекса частотной модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ и нормированного на половину длины модулирующей волны расстояния до цели $r_{\text{нр}}$ для автодинной СБРЛ с ЧМ.

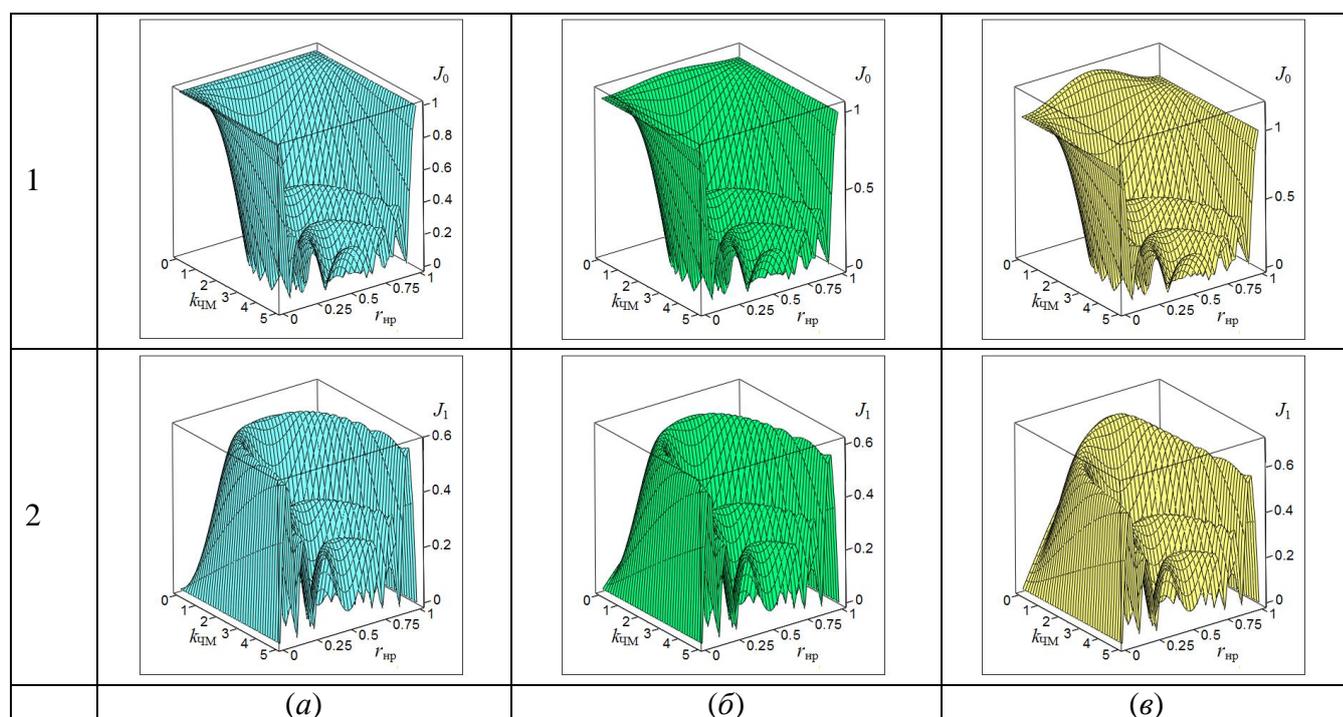


Рисунок 4. ХАС сигнала по изменению амплитуды колебаний АД с ЧМ и сопутствующей АМ на нулевой J_0 (строка 1) и J_1 первой (строка 2) гармониках модуляции, рассчитанные для разных значений m_{AM} : $m_{AM} = 0$ (столбец а), $m_{AM} = 0,2$ (столбец б) и $m_{AM} = 0,4$ (столбец в)

Значения функций $J_m(k_{ЧМ}, r_{нр})$, отложенные по вертикальной оси, представляют собой разложение в гармонический ряд Фурье функции амплитуды сигнала по периоду модуляции $f_m(t)$. На «нулевой» гармонике по этой оси отложены значения J_0 (строка 1). На первой гармонике частоты модуляции эта ось обозначена как J_1 (строка 2). При этом ХАС, рассчитанные для различных значений коэффициента АМ, когда $m_{AM} = 0$, $m_{AM} = 0,2$ и $m_{AM} = 0,4$, соответственно представлены в столбцах а, б и в. Из характеристик, представленных на рис. 4, видно, что наличие АМ излучения АД вызывает некоторый рост уровня сигнала на нулевой гармонике частоты модуляции в средней части ХАС (см. рис. 4, 1-б и 1-в).

В разделе 3.4 выполнены расчеты динамических сигнальных и шумовых характеристик АД с ЧМ при $\Delta\omega_{ЧМ} = 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6$, $\omega_0 = 2\pi \cdot 37,5 \cdot 10^9$, $\Omega_m = 2\pi \cdot 10 \cdot 10^6$, $\gamma = 1$ и $\rho = -0,2$. Начальное расстояние от автодинной СБРЛ с ЧМ до объекта локализации $l_0 = 1,5$ м. Оно соответствует начальному участку первой рабочей зоны нормированного расстояния $r_h \ll 1$.

На рис. 5 представлен вид модулирующей функции и результаты расчётов графиков $\chi_n(t_n, \tau_n)$ и $a_n(t_n, \tau_n)$ при различных значениях параметра C_{OC} и неподвижном отражателе для случая гармонического закона ЧМ. На этих же рисунках приведены графики относительных изменений среднеквадратических уровней частотного $q_\chi(t_n, \tau_n)$ (УЧШ) и амплитудного $q_a(t_n, \tau_n)$ (УАШ) шума АД.

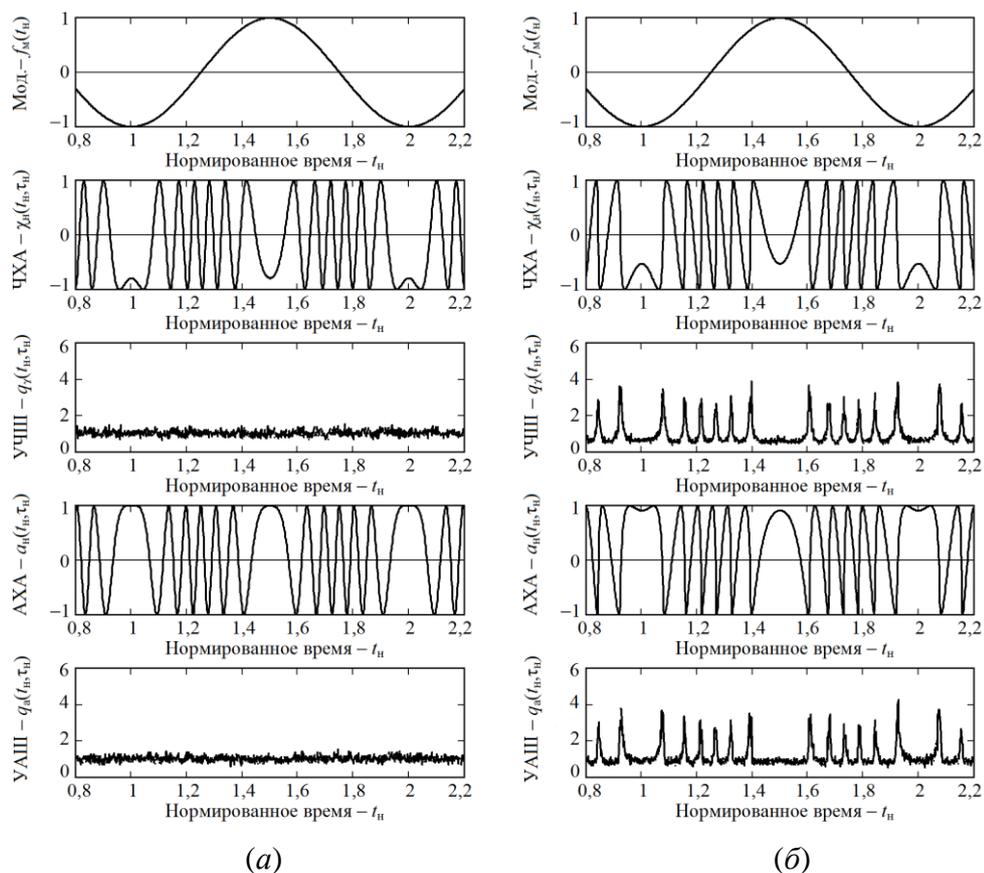


Рисунок 5. Временные диаграммы модулирующей функции $f_m(t_n)$, сигнальных $\chi_n(t_n, \tau_n)$, $a_n(t_n, \tau_n)$ и шумовых $q_\chi(t_n, \tau_n)$, $q_a(t_n, \tau_n)$ характеристик при значениях параметра $C_{OC} = 0,08$ (а) и $C_{OC} = 0,8$ (б) автодинной СБРЛ с гармонической ЧМ для случая неподвижного объекта локации.

Из диаграмм рисунка 5 видно, что в случае слабой внешней обратной связи, когда значение параметра $C_{OC} \ll 1$, сигнальные характеристики имеют вид гармонической функции, а шумовые характеристики являются стационарными. В случае сильной внешней обратной связи, когда C_{OC} соизмерима с единицей, сигнальные характеристики приобретают характерные искажения. При этом у автодинной СБРЛ с ЧМ, так же как и у обычного АД, при изменении набега фазы $\delta(t_n, \tau_n)$ отражённого излучения на 2π уровни шумов периодически изменяются.

В главе 4 «Результаты экспериментальных исследований сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ» выполнены экспериментальные исследования особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ и АМ миллиметрового диапазона. Получены зависимости сигнальных и шумовых характеристик от расстояния до объекта локации и величин параметров модуляции и внешней обратной связи системы «генератор – объект локации». При этом установлена степень влияния одного вида модуляции на параметры СБРЛ с другим видом модуляции.

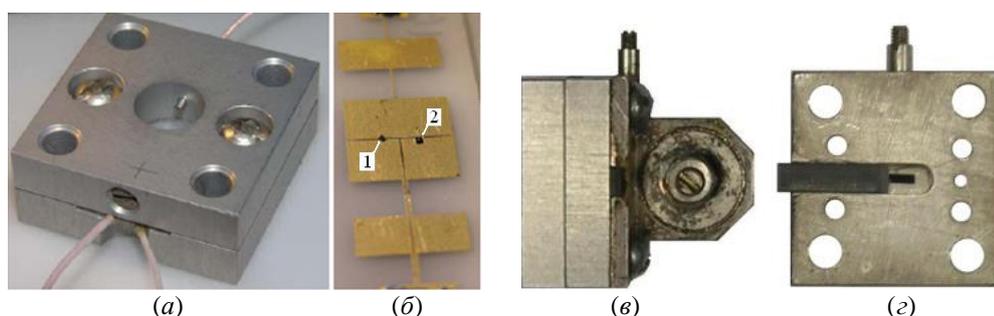


Рисунок 6. Внешний вид модуля «Тигель-08М» (а), топологии подложки (б), модуля со стабилизирующим резонатором (в) и элемента резистивной связи с резонатором (г)

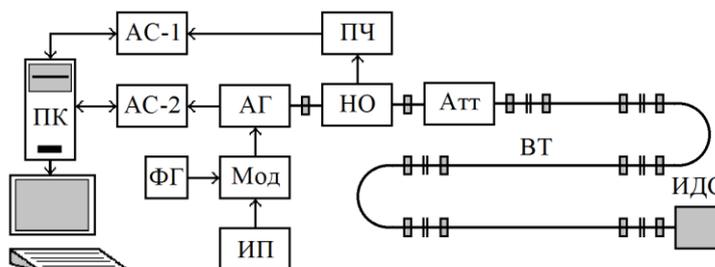


Рисунок 7. Блок-схема стенда: АГ – автодинный генератор; АС-1 и АС-2 – анализаторы спектра; Атт – аттенюатор; ВТ – волноводный тракт; ИДС – имитатор доплеровского сигнала; ИП – источник питания; Мод – модулятор; НО – направленный ответвитель; ПК – персональный компьютер; ПЧ – переносчик частоты; ФГ – функциональный генератор

В качестве объектов исследований при изучении сигнальных характеристик АД с АМ и ЧМ использовались гибридно-интегральные стабилизированные по частоте внешним высокочастотным резонатором и без мер стабилизации частоты модули «Тигель-08М» (см. рис. 6), а при изучении сигнальных и шумовых характеристик – обычная объемно-волноводная генераторная камера на диодах Ганна в составе автодинной СБРЛ с ЧМ.

Основная часть исследований взаимного влияния АМ и ЧМ на сигнальные характеристики автодинных СБРЛ выполнялась на лабораторном стенде (см. рис. 7), в котором пространство взаимодействия автодинного генератора и объекта локализации моделировалось волноводной линией требуемой протяженности, а затухание излучения – переменным аттенюатором. При этом снимались сигнальные характеристики и их спектры (см. рис. 8). Исследования сигнальных и шумовых характеристик в зависимости от расстояния до объекта локализации выполнялись в виде осциллограмм на примере действующей СБРЛ с ЧМ в открытом пространстве (см. рис. 9).

Полученные данные экспериментов подтвердили результаты теоретических исследований и адекватность разработанных моделей автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ для расчета динамических сигнальных и шумовых характеристик.

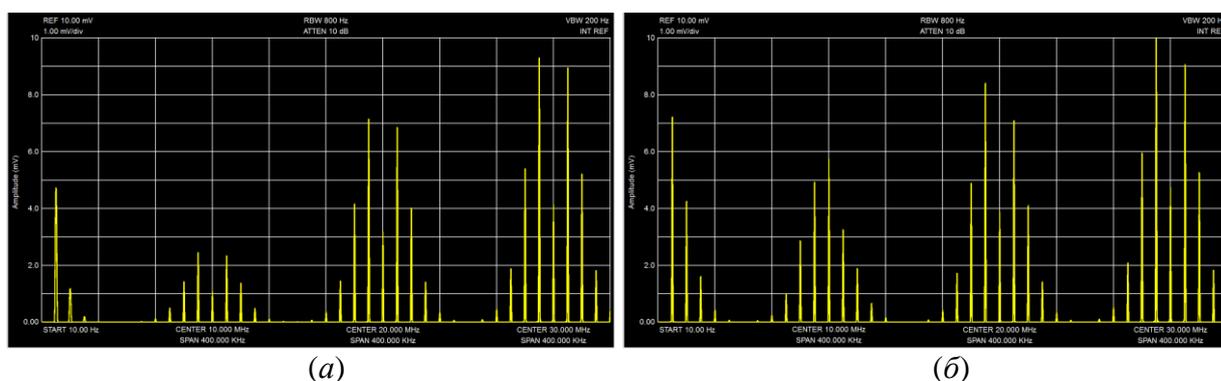


Рисунок 8. Спектры сигналов АД, полученные для случаев модуляции модуля «Тигель-08М» по изменению напряжения смещения на варикапе (а) и смещения на диоде Ганна (б).

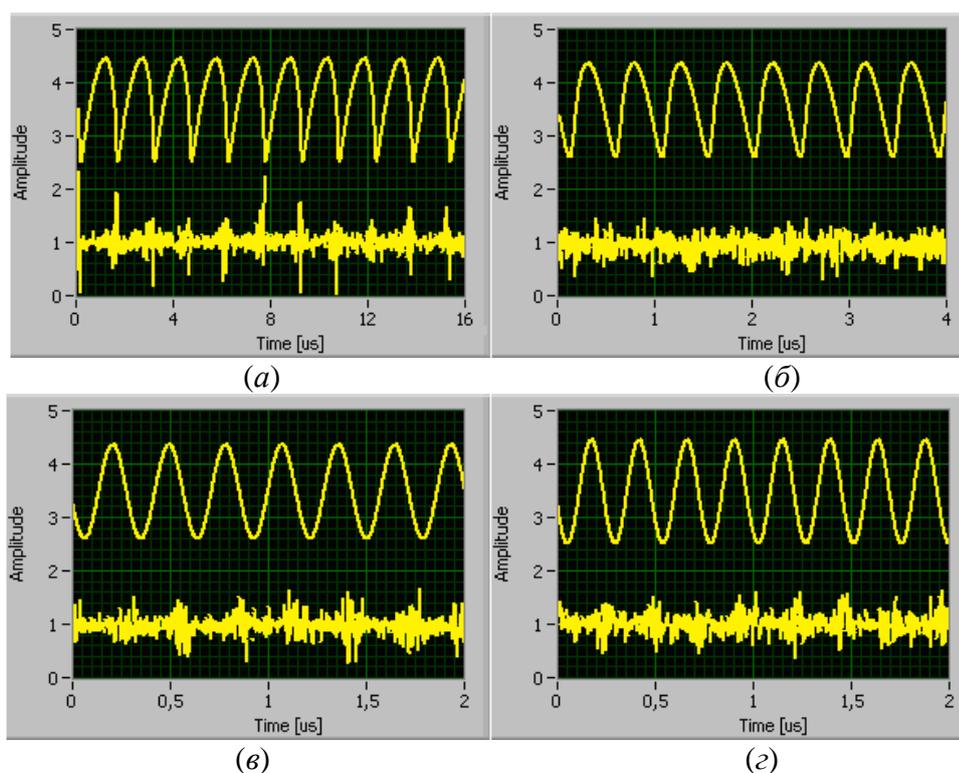


Рисунок 9. Осциллограммы сигналов (верхний след) и шумовых дорожек (нижний след) автодинной СБРЛ с ЧМ, полученные при установке в поле излучения антенны углового отражателя на различных рассеяниях: 10 м (а), 30 м (б), 50 м (в) и 60 м (г).

В главе 5 «Применение результатов диссертационных исследований» дано описание примеров, в которых использованы результаты выполненных выше диссертационных исследований. В разделе 5.2 на основе разработанной выше математической модели выполнены исследования режима биений на предмет его использования для определения динамических параметров генераторов. Для этого анализируется исходная система дифференциальных уравнений для относительных изменений амплитуды a и абсолютных изменений фазы φ колебаний генератора, где вдали от полосы захвата фаза $\varphi(t)$ изменяется практически линейно и частота биений постоянна $\Omega_6 \approx \omega_{\text{вн}} - \omega_0$. Решение этих уравнений при $\varphi = \Omega_6 t$ для динамических относительных изменений амплитуды $a(t)$ и частоты $\chi_{\text{нр}} = \Omega_6 / \omega_0$ колебаний имеет вид:

$$a(t) = k_{\text{вн}} K_a k_a(\Omega_\sigma) \cos[\Omega_\sigma t - \psi_a(\Omega_\sigma)], \quad (13)$$

$$\chi_{\text{нр}}(t) = k_{\text{вн}} L_a l_a(\Omega_\sigma) \sin[\Omega_\sigma t + \theta(\Omega_\sigma)], \quad (14)$$

где в (14) произведение $k_{\text{вн}} L_a = \Delta\omega_{\text{син}}/\omega_0 = (\omega_{\text{вн}} - \omega_0)/\omega_0 = \chi_c$ определяет величину относительных максимальных отклонений мгновенной частоты $\omega = d\Psi(t)/dt$ возмущенного генератора от частоты автономных колебаний ω_0 под воздействием внешнего сигнала; $k_a(\Omega_\sigma)$, $l_a(\Omega_\sigma)$ – нормированные коэффициенты частотной зависимости коэффициента автодинного усиления и девиации частоты генерации соответственно:

$$k_a(\Omega_\sigma) = \sqrt{\frac{(1 - \rho \Omega_\sigma^{\text{н}})^2 + (\rho + \Omega_\sigma^{\text{н}})^2}{(1 + \rho^2)[1 + (\Omega_\sigma^{\text{н}})^2]^2}}, \quad (15)$$

$$l_a(\Omega_\sigma) = \frac{1 + \gamma \Omega_\sigma^{\text{н}} + (1 - \gamma\rho)(\Omega_\sigma^{\text{н}})^2}{\sqrt{(1 + \gamma^2)[1 + (\Omega_\sigma^{\text{н}})^2]} \cos\theta(\Omega_\sigma^{\text{н}})}, \quad (16)$$

$\Omega_\sigma^{\text{н}} = \Omega_\sigma \tau_a$ – нормированная частота биений. На рис. 10 представлены результаты расчетов полулогарифмических частотных зависимостей коэффициента $k_a(\Omega_\sigma)$ для отрицательных (слева) и положительных (справа) значений частоты $\Omega_\sigma^{\text{н}}$.

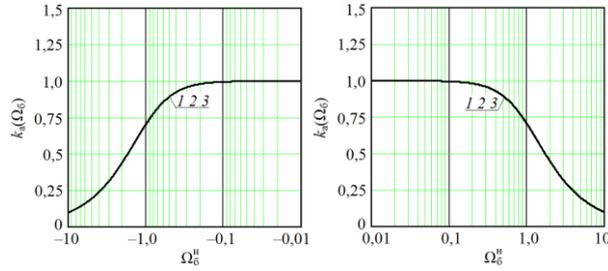


Рисунок 10. Графики частотных зависимостей коэффициентов автодинного усиления $k_a(\Omega_\sigma)$.

Из графиков рис. 10 видно, что частотная зависимость нормированного коэффициента автодинного усиления $k_a(\Omega_\sigma)$, обусловленного инерционностью изменений амплитуды колебаний, является симметричной функцией относительно $\Omega_\sigma = 0$. Вид ее напоминает амплитудно-частотную характеристику фильтра нижних частот и не зависит от величин коэффициентов γ и ρ . Из (15) при условии $k_a(\Omega_\sigma) = 1/2^{1/2}$ находим граничное значение частоты автодинного сигнала

$$\Omega_{\text{гр}} = \frac{1}{\tau_a} = \frac{\alpha\omega_0(1 - \gamma\rho)}{Q_{\text{н}}} = \frac{\omega_0\sqrt{1 + \rho^2}}{K_a Q_{\text{вн}}}. \quad (17)$$

Этот метод может использоваться для измерения предельной чувствительности АД, как радиоприёмного устройства. Он позволяет определить коэффициенты автодинного усиления K_a и девиации частоты L_a . Кроме того, исходя из определения граничной частоты $\Omega_{\text{гр}}$ при снятии характеристики $k_a(\Omega_\sigma)$, этот метод дает возможность определить постоянную времени автодинного отклика τ_a .

В разделе 5.3 дано описание двух патентов на радиолокационные датчики в системах измерения скорости, путевой навигации по геометрии железнодорожно-

го пути и обзора передней полусферы локомотива. Первое изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения основных параметров движения локомотива по железной дороге, а именно скорости, и пройденного пути. Технический результат достигается за счет использования СБРЛ с высокой разрешающей способностью по дальности за счет использования широкополосных зондирующих сигналов, а в качестве объекта локации и отслеживания – подкладки для крепления рельсов к шпалам. В настоящее время опытный образец радиолокационного датчика определения скорости движения локомотива проходит испытания на Московском центральном кольце. Второе изобретение относится к радиолокации. Оно может быть использовано на ЖД для определения параметров движения локомотива, а именно мгновенной скорости, пройденного пути и координат нахождения локомотива. Кроме того, оно предназначено для контроля дорожной обстановки перед локомотивом на расстоянии до одного-двух километров, что особенно важно для предотвращения возможного возникновения внештатных ситуаций. Способ основан на использовании двух СБРЛ. Первая выполнена в соответствии с описанным выше патентом. Вторая СБРЛ предназначена для сканирования передней полусферы по пути следования локомотива. В основу работы второй СБРЛ положен принцип радиолокатора с синтезированной апертурой и формирования зондирующего сигнала с широкополосной линейной ЧМ. В приемнике реализована корреляционно-фильтровая обработка отраженного от цели сигнала. Это позволяет получить высокую разрешающую способность по дальности и высокое угловое разрешение.

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты, которые в совокупности можно квалифицировать как решение **научной задачи, имеющей важное значение** для теории и техники систем ближней радиолокации с автодинным принципом построения приемо-передающих устройств.

Основные выводы и результаты диссертации состоят в следующем.

1. На основе выполненного обзора литературы, посвященной исследованиям автодинных устройств и их применению в СБРЛ, поставлена цель диссертационного исследования и сформулированы задачи исследований. По итогам диссертационных исследований можно утверждать, что цель диссертации достигнута, а задачи решены. При этом получены следующие научные результаты и положения, а также вытекающие из них рекомендации.

2. С использованием известного из теории нелинейных колебаний метода усреднения разработана математическая модель автодинного генератора с учетом воздействия на него собственного отраженного от цели излучения и внутренних шумов генератора. В основе разработанной модели лежит представление автодинной системы «генератор – объект локации» в виде автопараметрической системы с запаздывающим воздействием собственного, отраженного от цели СВЧ излучения. Модель представлена в виде системы линеаризованных в окрестности стационарного режима автономного генератора дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Эти уравнения учитывают внутреннюю и внешнюю инерционности автодинной системы, обусловленные конечной величиной скоро-

сти изменения параметров колебаний генератора и конечным временем распространения зондирующего излучения до цели и обратно соответственно.

2.1. Обобщенная модель распространена на случай автодина с одновременной амплитудной (АМ) и частотной (ЧМ) модуляцией его колебаний по произвольному закону модулирующей функции. Она описывает одновременно протекающие процессы генерации излучения, приема и взаимодействия с отраженным от объекта локации радиосигналом, а также выделения результата этого взаимодействия в виде автодинного отклика.

2.2. Выполнен переход от общих выражений к конкретным выражениям для случая одновременной АМ и ЧМ автодина по закону гармонической функции. При этом рассмотрен случай выполнения сильного неравенства $\Omega_a \ll \Omega_m$, когда основные спектральные составляющие на частоте Ω_a автодинного сигнала группируются не только в области низких «нулевых» частот, но и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции. В конечных выражениях, описывающих автодинный отклик, выполнено разложение функций запаздывающего воздействия в ряды Тейлора по малому времени запаздывания отраженного от цели излучения по сравнению с текущим временем наблюдения. Это разложение позволило перейти к выражениям, в которых все переменные становятся явными.

2.3. Получены выражения для расчета сигнальных и шумовых характеристик автодина с ЧМ по произвольному закону модулирующей функции. При этом для случая соблюдения условия $\Omega_a \gg \Omega_m$ выполнено разложение функций запаздывающего воздействия в ряды Тейлора, как и в предыдущем случае выполнения обратного неравенства.

3. Выполнены расчеты характеристик амплитудной селекции (ХАС), динамических сигнальных и шумовых характеристик, формы и спектров сигналов автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ для общего случая произвольного соотношения времени запаздывания отраженного от объекта локации излучения и длительности периодов автодинного сигнала и модулирующей функции.

3.1. В результате взаимодействия в автоколебательной системе автодинного генератора с АМ зондирующих и отраженных от объекта локации излучений автодинный отклик на гармониках частоты модуляции, включая нулевую гармонику, формируется в зависимости от расстояния в виде периодических зон амплитудной селекции цели.

В случае отсутствия или сравнительно малой величины сопутствующей девиации частоты генерации максимум автодинного отклика соответствует середине зоны амплитудной селекции. С увеличением сопутствующей девиации частоты происходит смещение области главного максимума в сторону больших значений нормированного расстояния и появление многогорбой ХАС, характерной СБРЛ с ЧМ. Амплитуда отклика АД с АМ на всех гармониках частоты модуляции, включая нулевую гармонику, асимптотически возрастает с приближением коэффициента АМ к единице при любом уровне ЧМ. Эффективность переноса сигнала на гармоники частоты модуляции уменьшается с увеличением номера гармоники у АД с АМ, но эта эффективность несколько возрастает при сопут-

ствующей ЧМ.

В случае, когда величина параметра C_{oc} обратной связи соизмерима с единицей, автодинам СБРЛ с АМ, как и обычным СБРЛ без модуляции, свойственны ангармонические искажения сигналов. Эти искажения необходимо учитывать при выборе параметров автодинных генераторов, а также при обработке сигналов.

3.2. В результате взаимодействия в АД с гармонической ЧМ излучаемых и отраженных от объекта локации колебаний на его выходе на гармониках частоты модуляции, включая нулевую, происходит формирование периодических зон амплитудной селекции цели. На краях этих зон автодинный отклик генератора как при ЧМ, так и при наличии сопутствующей АМ наблюдается только на нулевой гармонике модуляции, т.е. в области доплеровских частот. В средней части зоны амплитудной селекции в генераторе с ЧМ при условиях пренебрежимо малой величины или отсутствии сопутствующей АМ и малой величины параметра C_{oc} внешней обратной связи формирование автодинных сигналов происходит аналогично формированию сигналов в гомодинных СБРЛ с ЧМ. При этом амплитуды огибающей сигналов при гармонической ЧМ формируются в соответствии с функциями Бесселя, а сигналы по форме – гармонические. Наличие сопутствующей АМ излучения генератора вносит изменения в амплитудные и фазовые значения сигналов. При этом закономерность формирования огибающей сигналов как на гармониках, так и в окрестности нулевой гармоники отличается от поведения функций Бесселя. Влияние сопутствующей АМ на формирование ХАС в автодинных СБРЛ с ЧМ значительно уменьшается с ростом номера гармоники, на которой производится выделение сигналов.

С приближением величины коэффициента АМ к единице амплитуда отклика на всех гармониках частоты модуляции, включая нулевую, автодинных СБРЛ с ЧМ резко возрастает. Кроме того, в случае приближения величины параметра C_{oc} к единице имеют место сильные изменения формы и спектрального состава автодинного отклика. Указанные факторы приводят к искажению формы ХАС на всех гармониках, включая нулевую гармонику, что может явиться причиной нарушения нормальной работы СБРЛ со спектральной обработкой сигналов.

3.3. Выполненные расчёты сигнальных и шумовых характеристик АД с ЧМ при различной форме модуляции показали, что частота выходного сигнала АД с ЧМ как в случае движущегося, так и неподвижного объекта локации соответствует частоте сигнала, получаемого в случае гомодинной СБРЛ с ЧМ. При этом форма сигналов практически синусоидальная, а шумовые характеристики являются стационарными. Отличия сигналов от гармонической формы этих систем имеют место в случаях, когда параметр C_{oc} внешней обратной связи «генератор с ЧМ – объект локации» соизмерим с единицей. В этом случае наблюдаются ангармонические искажения и обогащение спектра сигнала АД, а также проявляются особенности шумовых характеристик – периодическая нестационарность среднеквадратического уровня шума.

4. Выполнены экспериментальные исследования особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ и АМ милли-

метрового диапазона длин волн. Получены зависимости сигнальных и шумовых характеристик от расстояния до объекта локации и величин параметров модуляции и внешней обратной связи системы «генератор – объект локации», а также осциллограммы и спектры автодинных сигналов. Данные эксперименты подтвердили результаты теоретических исследований и адекватность разработанных моделей автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ.

Попутно экспериментально установлено, что по сравнению с обычными одноконтурными АД, у которых отсутствует стабилизация частоты, стабилизированные автодинные генераторы обеспечивают значительное уменьшение сопутствующей девиации частоты и, соответственно, степени ангармонических искажений сигналов. Эти результаты, дополняющие и развивающие предшествующие исследования АД в данном направлении, показали преимущества АД со стабилизацией частоты перед обычными (нестабилизированными) АД.

5. В плане практического применения результатов диссертации выполнено исследование прикладного характера и предложены новые принципы построения СБРЛ различного назначения. При этом получены новые научные и практические результаты, состоящие в следующем.

5.1. Разработана математическая модель одноконтурного СВЧ генератора, находящегося под воздействием сигнала от стороннего источника СВЧ излучения. На основе этой модели рассмотрено формирование динамических характеристик СВЧ генераторов в режиме биений. Анализ полученных характеристик показал, что только характеристика модуляции амплитуды колебаний совпадает с амплитудной характеристикой автодина и может использоваться для определения постоянной времени автодинного отклика, которая характеризует его динамические свойства. Экспериментальные исследования динамических характеристик генераторов «Тигель-08М» методом биений подтвердили адекватность разработанной модели и показали, что все известные на сегодня методы дают близкие результаты оценки постоянной времени автодинного отклика.

5.2. В ходе выполнения диссертационных исследований предложены два способа и реализующие их СБРЛ и радиолокационный комплекс для измерения скорости, путевой навигации и обзора передней полусферы локомотива, предназначенные для внедрения в состав устройств контроля, управления и безопасности подвижного состава. В настоящее время опытный образец радиолокационного датчика с ЧМ непрерывного излучения радиоволн для определения параметров движения локомотива проходит испытания на Московском центральном кольце.

5.3. Представлены результаты компьютерного моделирования схемы подавления помехового сигнала прямого прохождения в бистатической СБРЛ непрерывного излучения с линейной ЧМ. В условиях компьютерного эксперимента для представленной схемы СБРЛ подавление помехового сигнала составило порядка 100 дБ, при этом выигрыш по динамическому диапазону составил порядка 90 дБ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи и доклады, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Noskov V.Ya. The dynamics of autodyne signal and noise characteristic formation at high target speeds / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov**, G.P. Ermak, A.S. Vasiliev // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020. Vol. 79. No. 6. P. 493–508. 1 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus)

2. Носков В.Я. Автодинный эффект СВЧ генераторов с внешней синхронизацией / В.Я. Носков, К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуров** // *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65. № 6. С. 612–620. 0,5625 п.л. / 0,1875 п.л.

Noskov V.Ya. Autodyne Effect in Microwave Oscillators with Injection Locking / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov** // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020. V. 65. № 6. P. 651–658. 0,5 п.л. / 0,15 п.л. (Scopus, Web of Science)

3. Noskov V.Ya. The influence of accompanying AM on the formation of signals from autodyne short-range sensors with FM / V.Ya. Noskov, G.P. Ermak, E.V. Bogatyrev, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov** // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2020. Vol. 79. No. 16. P. 1397–1424. 1,75 п.л. / 0,35 п.л. (Scopus)

4. Noskov V.Ya. Mathematical model of the autodyne for the analysis of its noise characteristics at the high speed of targets motion / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov**, G.P. Ermak, A.S. Vasiliev // *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2020. Yekaterinburg, Russia. P. 261-264. 0,25 п.л. / 0,05 п.л. (Scopus)

5. Noskov V.Ya. Calculation of signal and noise characteristics of an autodyne at the high speed of targets motion / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov**, G.P. Ermak, A.S. Vasiliev // *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2020. Yekaterinburg, Russia. P. 223-226. 0,25 п.л. / 0,05 п.л. (Scopus)

6. Noskov V.Ya. Near-Field Modelling of the Leaky-Wave Antenna / V.Ya. Noskov, **K.D. Shaidurov** // *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2020. Yekaterinburg, Russia. P. 277-280. 0,25 п.л. / 0,125 п.л. (Scopus)

7. Ermak G.P. Autodyne Response of Injection-Locked Microwave Oscillators for Changing Output Power / G.P. Ermak, A.S. Vasiliev, V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaydurov** // *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. Svetlogorsk, Russia. 2020. № 9166074. 0,25 п.л. / 0,05 п.л. (Scopus)

8. Noskov V.Ya. Autodyne Radar Signals in the Presence of Asynchronous Influence / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaydurov**, G.P. Ermak, A.V. Varavin // *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. Svetlogorsk, Russia. 2020. № 9166065. 0,25 п.л. / 0,05 п.л. (Scopus)

9. Noskov V.Ya. Features of noise characteristics of frequency-modulated autodyne radars / V.Ya. Noskov, G.P. Ermak, A.S. Vasiliev, K.A. Ignatkov, **K.D.**

Shaydurov // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. Vol. 2. 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2020). Kharkiv, Ukraine. September 21–25. P. 245–248. 0,25 п.л. / 0,05 п.л. (Scopus)

10. Fatieiev A.V. Autodyne Response Formation in Injection-Locked Microwave Oscillators / A.V. Fatieiev, V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaydurov**, G.P. Ermak, A.V. Varavin // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. Vol. 3. 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). Kharkiv, Ukraine. September 21–25. P. 884–887. 0,25 п.л. / 0,04 п.л. (Scopus)

11. Noskov V.Ya. Frequency Deviation of Injection-Locked Microwave Autodynes / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov** // Radioengineering. 2019. V. 28. № 4. P. 721–728. 0,5 п.л. / 0,15 п.л. (Scopus, Web of Science)

12. Noskov V.Ya. Dynamic Characteristics of Frequency-Locked Autodynes / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov** // ITM Web of Conferences. 2019. Vol. 30. 0,4375 п.л. / 0,14 п.л. (Web of Science)

13. Noskov V.Ya. Autodyne Signal Features of Frequency-Locked Microwave Oscillators / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, **K.D. Shaidurov** // ITM Web of Conferences. 2019. Vol. 30. 0,4375 п.л. / 0,14 п.л. (Web of Science)

14. Kalmykov An. A. Evaluating the performance of several types of antennas in a holographic radar with continuous wave / An. A. Kalmykov, **K. D. Shaidurov** // 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2014. 0,125 п.л. / 0,06 п.л. (Scopus, Web of Science)

Патенты РФ на изобретения:

15. Головин В.И., Наговицын В.С., Ципп А.Л., Калмыков А.А., Калмыков А.А., **Шайдуrow К.Д.** Способ путевой навигации и обзора передней полусферы локомотива по геометрии железнодорожного пути. Патент на изобретение RU2679491C1, 11.02.2019. Заявка № 2018100852 от 10.01.2018.

16. Головин В.И., Наговицын В.С., Ципп А.Л., Калмыков А.А., Калмыков А.А., **Шайдуrow К.Д.** Способ путевой навигации и измерения скорости локомотива по геометрии железнодорожного пути. Патент на изобретение RU2679268C1, 06.02.2019. Заявка № 2017139680 от 14.11.2017.

Другие публикации:

17. Носков В.Я. Математическая модель автодина с комбинированной амплитудно-частотной модуляцией излучения / В.Я. Носков, К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуrow** // 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). Севастополь, СевГУ. 2020. С. 384–385. 0,125 п.л. / 0,04 п.л.

18. Носков В.Я. Расчет автодинного отклика амплитудно-модулированного СВЧ генератора при наличии частотной модуляции излучения / В.Я. Носков, С.М. Смольский, К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуrow** // 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). Севастополь, СевГУ. 2020. С. 386–387. 0,125 п.л. / 0,03 п.л.

19. Носков В.Я. Отклик автодина с частотной модуляцией при наличии паразитных изменений амплитуды колебаний / В.Я. Носков, С.М. Смольский,

К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуrow** // 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). Севастополь, СевГУ. 2020. С. 388–389. 0,125 п.л. / 0,03 п.л.

20. Носков В.Я. Результаты экспериментальных исследований автодина на диоде Ганна с амплитудно-частотной модуляцией / В.Я. Носков, К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуrow** // 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). Севастополь, СевГУ. 2020. С. 390–391. 0,125 п.л. / 0,04 п.л.

21. Носков В.Я. Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией / В.Я. Носков, Е.В. Богатырев, К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуrow** // Уральский радиотехнический журнал. 2020. Т. 4. № 2. С. 127–166. 2,5 п.л. / 0,625 п.л.

22. Носков В.Я. Оценка погрешности бортового радиолокационного датчика скорости с протяженной антенной вытекающей волны / В.Я. Носков, К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуrow** // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019). Севастополь, СевГУ. 2019. С. 157–158. 0,125 п.л. / 0,04 п.л.

23. Носков В.Я. Определение динамических параметров автодинов методом биений / В.Я. Носков, К.А. Игнатков, **К.Д. Шайдуrow** // Уральский радиотехнический журнал. 2019. Т. 3. № 3. С. 261–285. 1,5625 п.л. / 0,52 п.л.

24. Калмыков А.А. Схема подавления сигнала прямого прохождения в ЛЧМ георадаре / А.А. Калмыков, **К.Д. Шайдуrow** // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». (КрыМиКо-2017). Севастополь, СевГУ. 2017. С. 160. 0,0625 п.л. / 0,03 п.л.

25. Калмыков А.А. Моделирование схемы подавления сигнала прямого прохождения в ЛЧМ георадаре / А.А. Калмыков, **К.Д. Шайдуrow** // Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках форума молодых ученых «ИТ: глобальные вызовы и новые решения». Москва. 2017. С. 245-255. 0,6875 п.л. / 0,34 п.л.

Подписано в печать ____ . ____ .2021 г. Формат 60×84 ¹/₁₆
 Бумага для множительных аппаратов. Печать на ризографе.
 Усл. печ. л. 1. Тираж ____ экз. Заказ № ____