

На правах рукописи



ИГНАТКОВ Кирилл Александрович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА, ПРИНЦИПОВ
ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АВТОДИННЫХ
УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Красноярск – 2025

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

- Научный консультант:** доктор технических наук, доцент,
Носков Владислав Яковлевич
- Официальные оппоненты:** **Паршин Валерий Степанович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», кафедра радиоуправления и связи, профессор;
Шипилов Сергей Эдуардович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра радиофизики, профессор;
Ющенко Валерий Павлович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра автономных информационных и управляющих систем, профессор.
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «06» ноября 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.03 по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 28, ауд. Б-121.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гладышев Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Зародившееся в период Второй мировой войны научное направление, которое в настоящее время именуется как «ближняя радиолокация», окончательно утвердилось к началу 70-х годов прошлого столетия. Согласно определению, данному И.М. Коганом, системы ближней радиолокации (СБРЛ) – это «радиолокационные системы, дальность действия которых соизмерима с геометрическими размерами взаимодействующих объектов...»¹. При этом под «взаимодействующими объектами» в те годы понимались, с одной стороны, – снаряд, ракета или спускаемый космический аппарат. С другой стороны, – воздушная или наземная цель, поверхность Земли или иной планеты. Задачи, которые при этом решались, ограничивались обнаружением объекта локации, определением его координат и параметров движения (скорости, ускорения, направления движения, промаха и др.).

Характерными условиями функционирования СБРЛ, когда расстояние до пространственно-протяженного объекта локации соизмеримо с его размерами, является, во-первых, необходимость учета множественного отражения СВЧ излучения, приходящего на вход приемного устройства. Кроме того, при решении многих задач объект локации, а также посторонние предметы могут находиться в ближней зоне антенны (зоне Френеля). В этих условиях падающее поле излучения значительно отличается от плоской волны, концепция которой лежит в основе традиционной радиолокации при расположении цели в дальней зоне антенны РЛС. Этот случай, когда необходимо учитывать картину формирования поля в ближней зоне, а также дифракцию волн на самом объекте локации, условно относится к задачам так называемых систем сверхближней радиолокации².

Во-вторых, условия функционирования СБРЛ обычно таковы, что диапазоны изменения дальности до объекта локации, эффективной поверхности рассеяния цели имеют значительно бóльшие пределы, чем у обычных, «дальних» РЛС. Поэтому приемное устройство СБРЛ должно обладать соответствующим динамическим диапазоном.

В-третьих, во многих приложениях, например, в радиовзрывателях для снарядов и ракет, радиоволновых датчиках охранной сигнализации, измерителях параметров движения изделий при их аэробаллистических испытаниях, системах предупреждения столкновений на транспорте и пр., продолжительность нахождения цели в зоне контроля СБРЛ и время обработки принимаемых сигналов для выдачи команд, как правило, очень ограничено.

В-четвертых, пространственно-распределенный характер объекта ло-

¹ Коган И.М. Ближняя радиолокация. М.: Сов. радио. 1973. стр. 4.

² Костенко А.А., Хлопов Г.И. Когерентные системы ближней и сверхближней радиолокации миллиметрового диапазона. – Харьков: ИПЦ «Контраст», 2015.

кации, близость его размеров и дальности, являются порождением еще одной проблемы СБРЛ, связанной с погрешностью фиксации положения объекта, которая оказывается соизмеримой с расстоянием. Поэтому во многих приложениях при создании СБРЛ ставится специфическая задача формирования, так называемых, «мертвых зон» и «зон селекции цели» путем выбора вида и параметров модуляции излучения, а также соответствующей обработки принятого сигнала.

Дополнительными требованиями к СБРЛ являются минимальные габариты, вес и стоимость. По этим показателям бесспорное преимущество имеют СБРЛ с автодинным построением приемопередатчика при любом (объемном или интегральном) исполнении. В автодинных СБРЛ (АСБРЛ) функции передатчика и приёмника совмещает в себе единственный каскад, работающий непосредственно на антенну. Этот каскад (автодин – АД), выполненный на основе автогенератора, вырабатывает зондирующие СВЧ колебания, которые излучаются антенной в сторону объекта локации. Отражённый от объекта сигнал принимается этой же антенной и поступает в колебательную систему (КС) генератора, порождая в нем сложный нелинейный процесс, который принято называть автодинным эффектом.

Автодинный эффект проявляется в изменениях практически всех параметров колебаний автогенератора и наблюдается во всех типах генераторов, как непрерывного излучения, так и с различными видами модуляции, и во всём диапазоне частот, от радиочастотных до оптических³. Изменениям подвергаются не только высокочастотные параметры колебаний (амплитуда, частота, фаза и выходная мощность), но и низкочастотные параметры, такие как постоянные токи и напряжения в схеме генератора. Регистрация этих изменений в виде автодинных сигналов и их обработка обеспечивают возможность получения необходимой информации о кинематических, внешних и внутренних параметрах объектов локации, а также среды распространения электромагнитного излучения, характеристик вторичного излучения объектов и параметров антенных систем.

Кроме указанных выше общих условий функционирования СБРЛ, при разработке АСБРЛ необходимо учитывать ряд специфических свойств и особенностей работы АД. Среди них – инерционность автодинного эффекта, ограничивающая быстродействие системы. При неправильном выборе параметров автоколебательной системы инерционные свойства генератора, характеризуемые эквивалентной постоянной времени автодинного отклика, могут вызвать ограничение рабочего диапазона частот АСБРЛ. Другая особенность – наличие ангармонических искажений сигналов, усиливающиеся с укорочением длины волны излучения и создающие проблемы при их обработке. Для их описания, как показано ниже, в свое время потребовался пересмотр некоторых концептуальных представлений теории АД.

³ Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд. СГУ. 2003.

Еще одна особенность АД как радиолокатора связана с совмещением функций передатчика и приемника в одном каскаде – автогенераторе. При его анализе раздельное рассмотрение функций формирования и передачи зондирующего излучения, а также приема и преобразования отраженного излучения от объекта локации невозможно. Это совмещение создает проблему выбора оптимального режима колебаний, при котором обеспечиваются наилучшие характеристики АД, как радиолокатора, поскольку для каждой из указанных функций генератора оптимальные режимы могут значительно отличаться. Сложность решения этой проблемы, которая лежит в плоскости методов теории нелинейных колебаний, зачастую является препятствием для успешного применения АД в решении многих задач ближней и сверхближней радиолокации.

В нашей стране в соответствии с планами конверсии производства СВЧ техники на рубеже 80-90-х годов прошлого века в АО НИИПП (г. Томск) были созданы первые образцы гибридных интегральных схем автодинных модулей 5-мм диапазона типа «Тигель». Данные модули благодаря созданию нового типа активного элемента, выполненного на базе мезапланарных ганновских структур, и развитию физико-технологических основ их производства по своим параметрам и характеристикам в те годы не уступали лучшим зарубежным образцам. Несомненная заслуга в создании этих модулей, проведении комплекса исследований и поиске их практического использования в различных областях принадлежит С.Д. Воторопину.

Необходимо отметить, что среди отечественных учёных основоположниками данного научного направления являются Е.К. Алахов, Л.И. Берштейн, И.М. Коган, Н.Н. Миролубов и др. Значительный вклад в развитие данной тематики в нашей стране внесли научные коллективы под руководством В.М. Богачёва, Е.М. Гершензона, В.Я. Носкова, С.М. Смольского, Б.Н. Туманова, Д.А. Усанова, Ю.Л. Хотунцева, Б.И. Шахтарина и других. Наиболее известными учёными зарубежья являются: W.A.S. Butement, M.A. Tuve, M.J. Lasarus, F.R. Pantoja, Y. Akaiwa, Y. Takayama, M. Kotani, K. Shirahata, M.-S. Gupta, G. I. Haddad и многие другие.

Автодинные СБРЛ благодаря малым габаритам, весу и стоимости имеют многочисленные приложения, и представляют значительный интерес для практики. **Научная проблема**, решению ряда задач которой посвящена настоящая диссертационная работа, связана с развитием теории и техники автодинных приёмопередающих устройств КВЧ диапазона (30...300 ГГц), изучением протекающих в них явлений и особенностей формирования сигналов. Эти устройства по сравнению с автодинами диапазона СВЧ (от 3 до 30 ГГц), имеют качественные отличия в своём функционировании, а также в методах и подходах к их анализу. Поэтому тема диссертации, посвящённая дальнейшему развитию теории и техники автодинных приёмопередатчиков, направленных на поиск новых методов анализа, технических решений и ре-

жимов работы, улучшающих параметры и характеристики АД и расширяющих область их применения, является **актуальной**.

Степень разработанности темы диссертации

Для теоретического исследования и описания автодинного эффекта в автогенераторах используются самые разнообразные математические модели и методы анализа, известные из теории автоколебательных систем. При этом важнейшим моментом в исходной модели АД является адекватность ее представления запаздывающего отражённого от объекта локации излучения.

Исторически первой применительно к анализу работы автодинных радиовзрывателей появилась модель в виде переменной внешней нагрузки (антенны) генератора. При появлении в поле излучения антенны объекта локации ее полное сопротивление (проводимость) изменяется с частотой Доплера. Эти изменения передаются генератору, в котором изменения реактивной составляющей нагрузки вызывают соответствующие гармонические изменения частоты, а резистивной – амплитуды колебаний также с доплеровской частотой.

В более поздних работах функция воздействия на генератор описывается эквивалентным источником отражённого радиосигнала, фаза которого изменяется с доплеровской частотой. В рамках такого подхода частота и амплитуда колебаний генератора изменяются с частотой Доплера, а выходной сигнал, как результат детектирования этих изменений, оказывается тоже гармоническим.

На рубеже 70-80-х годов прошлого столетия, когда началось широкое применение полупроводниковых приборов СВЧ и КВЧ диапазонов в СБРЛ нового поколения, было экспериментально обнаружено, что автодинные сигналы в этих диапазонах при определённых условиях имеют ангармонические искажения, причём характер этих искажений зависит также от направления движения отражающего объекта. В свое время были предприняты попытки объяснения этого явления с различных позиций. Практически во всех публикациях показано, что в линейном приближении автодинный отклик пропорционален амплитуде отражённого излучения, что обусловлено интерференционными амплитудно-фазовыми соотношениями излучаемых и отражённых электромагнитных колебаний. Однако фазовый аспект этой проблемы в литературе решается двояко.

Для описания автодинных систем во многих публикациях 80-х годов прошлого века было показано, что наиболее адекватным является «фазовый» подход. В этой модели априорно закладывается возможность любых фазовых изменений, в том числе определяющие ангармонические автодинные сигналы, наблюдаемые экспериментально. Такой подход хорошо сочетается с известными аналитическими методами классической теории нелинейных колебаний (малого параметра, усреднения, медленно меняющихся

амплитуд и др.), а также чисто «компьютерным» подходом, основанным на использовании метода переменных состояния и численном интегрировании нелинейных дифференциальных уравнений.

Необходимо отметить, что автодинная система «автодинный генератор – объект локации» по своей сути относится к классу *автопараметрических* систем с запаздыванием. Параметры автодинного генератора в этой системе изменяются под воздействием собственного запаздывающего сигнала, отраженного от объекта локации. Поэтому в отличие от СБРЛ гомодинного типа, в автодинной системе входящие в уравнения колебаний функции запаздывающего воздействия являются неявными функциями. Для их выявления и нахождения решения уравнений, которые относятся к классу уравнений с запаздывающим аргументом, известны методы, которые получили развитие в теории систем с запаздыванием. Применение этих методов для анализа автодинов было впервые предложено в работах В.Я. Носкова.

Первый метод предлагает пошаговое интегрирование дифференциальных уравнений по мере воздействия на систему парциальных отражений. Он позволяет рассчитать процесс установления автодинного отклика от момента появления первого отраженного радиосигнала до полного установления отклика. Этим методом в квазистатическом приближении, т.е. без учета внутренней инерционности генератора, выполнен анализ АД с импульсной модуляцией. Однако во многих случаях практического использования радиоимпульсных АД учет инерционных свойств генератора принципиально необходим. Поэтому дальнейшее развитие этого направления исследований является востребованным.

Второй метод позволяет анализировать поведение установившихся значений отклика системы с запаздыванием при условии формирования гладких (отсутствие скачков) автодинных изменений параметров колебаний. Применительно к АД непрерывного излучения согласно этому методу выполнено разложение функций амплитуды и фазы отраженного излучения в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с текущим временем t . В результате получены выражения для «мгновенных» модуля $\Gamma(t, \tau)$ и фазы $\delta(t, \tau)$ коэффициента отражения излучения, приведенного к «зажигам» автодинного генератора:

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 \left[1 - \frac{\tau}{1!} \frac{da(t)}{dt} + \frac{\tau^2}{2!} \frac{d^2a(t)}{dt^2} - \frac{\tau^3}{3!} \frac{d^3a(t)}{dt^3} + \dots \right], \quad (1)$$

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau) = \frac{\tau\omega(t)}{1!} - \frac{\tau^2}{2!} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{\tau^3}{3!} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} - \dots, \quad (2)$$

где Γ_0 – коэффициент, характеризующий все потери амплитуды излучения при его распространении до объекта локации и обратно; $\Psi(t)$, $\Psi(t, \tau)$ – полные фазы колебаний генератора в текущий момент времени t и из предыдущих

тории системы соответственно; $\omega(t) = d\Psi(t)/dt$ – текущая частота генерации АД; $a(t)$ – относительные изменения амплитуды колебаний генератора.

До настоящего времени при таком подходе полученные системы уравнений автодинных генераторов имели решение только для первого приближения функции запаздывающего воздействия, когда можно положить $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0$ и $\delta(t, \tau) = \tau\omega(t)$. Это приближение, позволившее дать научное обоснование «фазового» подхода и выяснить природу ангармонических искажений автодинных сигналов, приемлемо при выполнении условия: $\tau \ll T_a$, где T_a – период автодинного сигнала. Однако при больших расстояниях до объекта, высоких скоростях движения объекта локации и с укорочением длины волны λ излучения данное неравенство может нарушаться. Например, в 3-мм диапазоне длин волн при радиальной скорости движения объекта $V_p = 2000$ м/с частота сигнала АД в соответствии с формулой Доплера $F_d = 2V_p / \lambda$ равна $F_d = 1,33 \cdot 10^6$ Гц, т.е. его период $T_a = 0,75 \cdot 10^{-6}$ с. При расстоянии до объекта $l = 120$ м время запаздывания $\tau = 2l / c$ составляет $0,8 \cdot 10^{-6}$ с, где c – скорость распространения излучения.

Отсюда следует, что полученные в предшествующих работах результаты теоретических исследований не учитывают динамику изменений во времени амплитуды $a(t)$ и частоты $\omega(t)$ колебаний генератора в процессе движения объекта локации. Последующие приближения, как видно из (1) и (2), связаны с необходимостью учета производных от функций $a(t)$ и $\omega(t)$ более высокого порядка. Однако до настоящего времени особенности формирования автодинного отклика СБРЛ с учетом динамики изменения положения объекта локации в известной нам литературе не рассматривались.

Для устранения указанного ограничения существующей теории автодинных систем необходимо внедрение нового концептуального подхода в теорию АД, основанного на представлении отраженного излучения в виде чистого транспортного запаздывания на время его распространения до объекта локации и обратно и, соответственно, применении математических методов теории систем с запаздыванием. На основе этого подхода необходима разработка новых методов расчета сигнальных и шумовых характеристик АД при непрерывном и модулированном излучении. При этом для ряда приложений в условиях высоких скоростей движения объектов локации необходимо также учесть внутреннюю инерционность процессов в автодинном генераторе. Кроме того, востребованными для практики являются результаты исследований, направленных на поиск новых принципов построения автодинных устройств, обеспечивающих улучшение параметров и характеристик, а также расширение их функциональных возможностей и области практического применения в СБРЛ. Совокупность указанных задач диссертационных исследований, по нашему мнению, представляет собой **научную**

проблему, имеющую важное значение для теории и техники СБРЛ с автодинным принципом построения приемопередающих устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Объектом исследования диссертации являются системы и устройства ближней радиолокации миллиметрового диапазона с автодинным принципом построения приемопередатчика. **Предметом исследования** – модели и методы анализа, принципы построения и применения автодинных устройств для систем и устройств ближней радиолокации.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертации является развитие методов анализа, принципов построения и применения автодинных устройств для систем ближней радиолокации миллиметрового диапазона длин волн.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ современного состояния теории и техники автодинных систем, обобщить полученные данные и накопленный опыт предшествующих исследований. На основе выполненного обзора литературы дать обоснование цели и задач исследования.
2. Используя концептуальный подход к анализу АД, как к системе с чисто транспортным запаздыванием собственного отраженного от объекта локации излучения, для математической модели одноконтурного автодинного генератора разработать новые методы расчета процесса формирования сигнальных и шумовых характеристик, учитывающие динамику изменения положения объекта локации и собственные инерционности автодинной системы «генератор – объект локации».
3. Разработать математическую модель и выполнить исследования сигнальных и шумовых параметров и характеристик автодинной СБРЛ с частотной модуляцией (ЧМ) для общего случая произвольного соотношения времени запаздывания отраженного от объекта локации излучения и периода автодинного сигнала.
4. Разработать математическую модель и выполнить исследования переходных процессов и особенностей формирования автодинного отклика радиоимпульсного генератора с учетом его внутренней инерционности и времени запаздывания отраженного излучения.
5. Выполнить исследования АД со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором, с интерференционным принципом формирования сигналов, на основе взаимно синхронизированных генераторов при сильной связи и с внешней синхронизацией в режиме захвата частоты, обеспечивающих улучшение параметров и характеристик, а также расширение функциональных возможностей систем ближней радиолокации.
6. Представить результаты разработки математической модели формирования автодинных сигналов от объектов, находящихся в ближней зоне антенны. Дать описание автодинных СБРЛ, предназначенных для контроля

параметров движения, вибраций, малых перемещений, размеров металлических изделий и диагностики объектов локации, а также технических решений, направленных на повышение разрешающей способности и помехоустойчивости СБРЛ, при создании которых использованы результаты диссертационных исследований.

Методы исследований

Для формирования математической модели АД использовался метод эквивалентных схем. Упрощение полученных нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом для мгновенных значений токов и напряжений и переход к укороченным уравнениям для амплитуд и фаз колебаний выполнялось с использованием методов, известных в теории нелинейных колебаний как медленно меняющихся амплитуд, усреднения, квазилинейный.

Кроме того, использовались методы теории систем с запаздыванием. При анализе АД непрерывного излучения, включая АД с ЧМ, применялся метод разложения функций запаздывающего воздействия в ряд Тейлора по малому времени запаздывания относительно текущего времени. При анализе АД с импульсной модуляцией излучения для расчета реакции генератора на воздействие отраженного излучения использовался метод пошагового интегрирования уравнений.

При анализе АД в условиях слабого воздействия на генератор отражённого излучения и шумов использовался метод возмущений, состоящий в линеаризации нелинейных характеристик системы в окрестности стационарного режима. При анализе флуктуационных характеристик использовались методы статистической радиотехники.

Решение сложных систем уравнений находилось численными методами с привлечением пакета программ в среде MathCAD. При проведении экспериментальных исследований АД использовались методы лабораторного и натурного эксперимента, полунатурного моделирования, методы аналоговой и цифровой обработки сигналов, а также с привлечением компьютерной обработки сигналов с помощью виртуальных приборов, создаваемых в среде программирования LabVIEW.

Положения, выносимые на защиту

1. Внедрение в теорию автодинов нового концептуального подхода к их анализу, основанного на описании функций отраженного от объекта локации излучения математическими методами теории систем с запаздыванием обеспечивает возможность разработки новых методов расчета сигнальных и шумовых параметров и характеристик автодинов. Эти методы позволяют учитывать динамику перемещения объекта локации, расстояние до него и инерционность процессов в автодинном генераторе, а также устранить принципиальные ограничения предшествующей теории автодинных СБРЛ миллиметрового диапазона. (Соответствует п.п. 1, 4 паспорта специ-

альности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

1.1. При анализе математической модели автодина с непрерывным излучением, в том числе с частотной модуляцией, учет высших членов разложения в рядах Тейлора функций запаздывающего воздействия по малому времени запаздывания относительно текущего времени обеспечивает расчет автодинных сигналов при произвольном соотношении величин времени запаздывания отраженного излучения и периода автодинного отклика. (Соответствует п.п. 1, 4 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

1.2. Использование метода пошагового интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих функционирование автодина с импульсной модуляцией излучения, обеспечивает возможность вычисления закона установления автодинного отклика на воздействие запаздывающего отраженного излучения от объекта локации с учетом как внешней, так и внутренней инерционности автодинной системы «генератор – объект локации». (Соответствует п.п. 1, 4 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

2. Применение квазистатического метода А.Н. Малахова для вычислений автодинных характеристик обеспечивает существенное снижение погрешности вычислений при значительном расширении диапазона частот автодинного сигнала, а также учет внутренней инерционности генератора и дисперсионной зависимости автодинной девиации частоты. Предложенная модернизация метода А.Н. Малахова путем учета высших членов разложения функций запаздывающего воздействия согласно п. 1.1 позволяет учитывать не только внутреннюю, но и внешнюю инерционность автодинной системы «генератор – объект локации». (Соответствует п.п. 1, 3, 4 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

3. Стабилизация частоты автодинного генератора с помощью внешнего высокодобротного резонатора обеспечивает значительное уменьшение амплитудно-гармонических искажений сигналов и уровня частотных шумов, что способствует улучшению такого важного параметра автодинных СБРЛ, как динамический диапазон и дальность действия. Выигрыш в динамическом диапазоне, определяемом величиной коэффициента стабилизации частоты, может составлять при сильной связи между резонаторами 20...30 и более дБ. (Соответствует п.п. 1, 3, 4 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

4. В автодинном модуле с двумя внешними детекторами, помещенными в передающую линию между генератором и антенной, в случае высокого значения коэффициента автодинного усиления генератора оба сигнала, регистрируемые на выходах детекторов, находятся в фазе. В случае малой

величины коэффициента автодинного усиления выходные сигналы детекторных диодов имеют сдвиг фаз между собой, зависящий от относительного расстояния между диодами в передающей линии. Фазовый сдвиг этих сигналов дает возможность определять знак радиальной скорости отражающих объектов и использовать в СБРЛ методы квадратурной обработки сигналов. (Соответствует п.п. 1, 18 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

5. Степень ангармонических искажений автодинных сигналов системы двух связанных между собой парциальных генераторов может быть значительно снижена по отношению к обычным (одиначным) автодинам благодаря действию взаимной синхронизации колебаний парциальных генераторов. При этом фазовое смещение между автодинными сигналами парциальных генераторов, которое определяется условиями взаимной связи между ними и значением относительной расстройки их собственных частот, дает возможность определять знак радиальной скорости отражающих объектов и использовать в СБРЛ методы квадратурной обработки сигналов. (Соответствует п.п. 1, 18 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

6. Синхронизация автодина от внешнего генератора исключает характерные обычным (нестабилизированным) автодинам ангармонические искажения сигналов, что способствует расширению их динамического диапазона и дальности действия. При внесении начальной расстройки между частотами внешнего генератора и собственной частотой автодина в пределах полосы синхронизации имеется возможность значительного увеличения коэффициента передачи автодинного сигнала по сравнению с обычными автодинами. (Соответствует п.п. 1, 4 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

7. Применение методов анализа и принципов построения автодинных устройств согласно п.п. 1–6 расширяет рабочие пределы автодинных систем ближней радиолокации миллиметрового диапазона по частоте и уровню отраженного излучения, по дальности и скорости движения объектов локации, точности и разрешающей способности определения параметров движения, а также функциональным возможностям и области применения. (Соответствует п.п. 3, 18 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

Новизна защищаемых результатов и положений диссертации

1. Впервые в теорию автодинов, как с непрерывным, так и с радиоимпульсным излучением, включая автодины с частотной модуляцией, использован концептуальный подход к анализу, основанный на описании функций отраженного от объекта локации излучения математическими методами теории систем с запаздыванием [23–28].

2. Для расчета автодинных сигналов впервые предложено использовать

квазистатический метод А.Н. Малахова [23, 24]. В отличие обычного квазистатического метода, применявшегося ранее, метод А.Н. Малахова учитывает внутреннюю инерционность генератора и дисперсионную зависимость автодинной девиации частоты в широком диапазоне частот автодинного сигнала. Предложенная в диссертации модернизация метода А.Н. Малахова учитывает в расчетах также внешнюю инерционность автодинной системы «генератор – объект локации».

3. Предшествующие исследования стабилизированных автодинов внешним высокочастотным резонатором представлены в литературе только экспериментальными данными. В диссертации приведены основополагающие результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований указанных автодинов. Эти результаты показали преимущества перед обычными (нестабилизованными) автодинами и перспективность их применения в автодинных СБРЛ [29, 30].

4. В отличие от предшествующих исследований, посвященных анализу и разработке автодинных приемопередающих модулей с внешними детекторами в отрезке передающей линии между генератором и антенной, учтено влияние автодинного эффекта на формирование сигналов на выходе детекторных диодов [31, 32].

5. В отличие от исследований автодинной системы, состоящей из двух взаимно синхронизированных парциальных генераторов, выполненных в 80-х годах 20-го столетия в работах коллектива авторов, руководимого С.М. Смольским, в представленной диссертации выполнены исследования особенностей формирования сигналов с учетом вариаций связи между парциальными генераторами и их собственных частот [33, 34].

6. Новизна выполненных в диссертации исследований автодинов в режиме захвата частоты внешним радиосигналом состоит в выяснении особенностей формирования автодинных сигналов в условиях не только квазистатически медленного движения объекта локации, но и быстрого его перемещения, когда постоянные времени синхронизированного генератора превышают период автодинного сигнала [34–36].

7. В ходе выполнения диссертационных исследований найден ряд новых технических решений и прикладных задач, в которых используются результаты диссертационных исследований.

Достоверность защищаемых результатов и положений обеспечивается качественным и количественным соответствием теоретических выводов данным, полученным экспериментально, корректностью упрощающих предположений, применяемых при построении математических моделей, использованием стандартной измерительной аппаратуры и подтверждается успешным практическим использованием в реализованных устройствах и системах. Полученные результаты теоретического анализа проверялись на сходимость с результатами предшествующих исследований. Точность экспериментальных результатов обеспечивалась использованием стандартной

контрольно-измерительной аппаратуры и методов измерений. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях и симпозиумах, а также публикациями в журналах.

Научная ценность защищаемых результатов и положений диссертации

Научная ценность работы состоит в том, что в ней в рамках единого методологического подхода к решению проблемы анализа автодинных генераторов КВЧ диапазона, находящихся под воздействием собственного запаздывающего отраженного от объекта локации излучения, разработана теория их функционирования. Она обеспечивает возможность учитывать различные параметры и характеристики активных элементов и колебательной системы генераторов, динамику перемещения объекта локации и произвольное время запаздывания отражённого излучения, а также различные виды модуляции излучения.

Выполненные на базе разработанной теории исследования параметров и характеристик автодинных устройств для СБРЛ обобщают и развивают результаты предшествующих исследований АД. Кроме того, они также дополняют ее за счет новых объектов исследования: генераторов со стабилизацией частоты внешним резонатором, АД с дополнительными диодами в передающей линии между генератором и антенной, двухдиодных автодинов и автодинов в режиме захвата частоты внешним генератором. Разработанная теория работы автодинных устройств обеспечивает возможность расчета основных параметров и характеристик, необходимых при создании систем и устройств на их основе с улучшенными качественными показателями, а также с более широкими функциональными возможностями, что является вкладом в прикладных областях науки и техники.

Практическая значимость работы

1. Результаты выполненных в диссертации исследований позволяют, исходя из заданных параметров используемых генераторов, рассчитать сигнальные и шумовые параметры и характеристики АД, необходимые для их правильного использования в перспективных СБРЛ, датчиках и измерителях.

2. Использование в СБРЛ предлагаемых для производства новых типов автодинных устройств со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором, применением дополнительных диодных детекторов для выделения сигналов, взаимно синхронизированных (двухдиодных) АД и АД с синхронизацией частоты от дополнительного генератора значительно улучшает их параметры и характеристики, а также расширяет функциональные возможности. Данные устройства обладают по отношению к обычным автодинным генераторам улучшенными техническими характеристиками по такому важному показателю, как динамический диапазон, на 20-30 дБ.

Некоторое увеличение энергетического потенциала, отсутствие периодической нестационарности шумов, а также (за счёт улучшения температурной стабильности частоты) повышение точности измерения скорости объектов локации, являются дополнительными преимуществами этих устройств. Указанные достоинства автодинных устройств способствуют повышению спроса на них и расширению круга потребителей.

3. Разработанные образцы автодинных радиолокаторов для определения параметров движения вагонов на сортировочной станции за счёт применения автодинного приёмопередающего модуля обеспечивают более низкую себестоимость их изготовления по сравнению с радиолокаторами с годинным построением приёмопередатчика. Предложены технические решения по созданию СБРЛ с манипуляцией частоты для измерения параметров движения объектов локации, например, грузовой платформы парашютной системы относительно поверхности земли.

4. Разработаны методические рекомендации по выбору способа и режима регистрации, а также рабочей точки при использовании АД в качестве датчиков параметров вибраций, измерителей размеров металлических изделий, датчиков для контроля и диагностики работы турбоагрегатов и состояния лопаток турбовентиляторных двигателей. Учёт этих рекомендаций обеспечивает повышение точности и расширение динамического диапазона измерений. Реализуемый при этом выигрыш параметров рассчитывается для конкретных условий измерений по полученным в диссертации формулам и использованием данных из графиков.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Объект и предмет исследований, а также перечисленные выше задачи, новые научные результаты, полученные в диссертации, и положения **соответствуют** пунктам 1, 3, 4, 18 из перечня областей исследований специальности 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения согласно её паспорту

Внедрение результатов диссертации и рекомендаций

Результаты работы получены в ходе выполнения НИР «Исследование и экспериментальная проверка возможности применения сканирующих лазерных дальномеров для определения координат вагонов в парках станции («СКАЛА»)), 2.083, по договору № 919 от 28 сентября 2012 года с ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»); НИР «Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона» по договору о научно-техническом сотрудничестве между АО «НИИПП» (г. Томск) и Институтом радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ (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 Уральским федеральным университетом (УрФУ)

№ 02-25/044 от 14 ноября 2018 г.; НИР «Исследование перспективных принципов построения систем ближней радиолокации (СБРЛ) со сложными типами модуляции» (2022 г) по договору о НИР между УРФУ и АО «НПП «Радиосвязь»; НИР «Исследование возможности создания малогабаритного интерферометра для диагностики быстропротекающих процессов» (2018 г), «Расчётно-экспериментальное моделирование системы диагностики быстропротекающих процессов на основе малогабаритных радиоинтерферометров» (2020 г), «Моделирование радиоволновых измерительных систем» (2023) по договорам о НИР между УрФУ и РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск); инициативной работы «Создание радиолокационного датчика для контроля параметров движения грузовой платформы парашютной системы» для ГУП РК «НИИ АУС» (г. Феодосия) в соответствии с Протоколом о намерениях от 28.10.2015г. при финансовой поддержке программы «УМНИК», а также в учебном процессе студентов на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций в качестве демонстрации работы автодинного радиолокатора КВЧ диапазона.

Апробация результатов работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 148 печатных работ, среди которых 22 статьи в журналах, включённых в перечень ВАК, из них 10 статьи вышли в переводных журналах и учтены международными библиографическими базами данных (БДД) WoS и Scopus. Одиннадцать статей вышли в зарубежных журналах на английском языке и вошли в БДД WoS и Scopus. Десять статей вышли в прочих журналах, из них 5 – на английском языке. Материалы 91 доклада доложены на различных конференциях, из них 47 вошли в БДД WoS и Scopus. Материалы работы отражены также в девяти отчётах о НИР и НИОКР. Получено 16 патентов РФ на изобретения.

Личный вклад диссертанта

В диссертации представлены только те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Пять работ опубликовано соискателем без соавторов. Основная часть работ опубликована в соавторстве с научным консультантом, д.т.н., доцентом В.Я. Носковым, а также с д.т.н., профессором С.М. Смольским (МЭИ, Москва). В совместных работах диссертант принимал участие в разработке математических моделей, выполнении расчётов и экспериментов, при обсуждении работы осуществлял объяснение и интерпретацию результатов исследований. В остальных работах в составе научного коллектива соискателем выполнены: математические выкладки, численные расчеты, анализ полученных результатов.

Все научные положения, расчетные и экспериментальные результаты, обладающие научной новизной и составляющие содержание настоящей работы, а также выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, 6 глав и Заключения. Она изложена

на 395 страницах, содержит 161 рисунок и 13 таблиц, 5 приложений. Список литературы содержит 377 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, выполнен анализ степени разработки темы диссертации, сформулированы проблема, цель работы и задачи исследования, указаны применяемые методы исследований, а также основные научные результаты и положения, выносимые на защиту. Аргументирована научная новизна и достоверность исследований, отмечена научная и практическая значимость работы, указано, где реализованы результаты работы, перечислены мероприятия, на которых проводилась апробация работы, приведены сведения о публикациях по теме диссертации, указан личный вклад автора, приведена структура диссертации.

В первой главе выполнен обзор литературы, посвященной исследованиям и применению АД в СБРЛ. При этом рассмотрены области применения, задачи и условия их функционирования. Систематизированы основные понятия и определения, приведена обобщенная структурная схема АД. Представлен также обзор моделей и методов анализа АД. Кроме того, рассмотрены существующие параметры и характеристики АД, выполнен обзор основных принципов построения автодинных приемопередающих модулей, а также АД с различными видами модуляции излучения. Дано обоснование цели и поставлены задачи диссертационного исследования.

В главе 2 «Методы анализа процессов формирования сигналов автодинных СБРЛ» приведены функциональная и эквивалентная схемы автодинного модуля (рисунок 1) с одноконтурной колебательной системой (КС), находящейся под воздействием собственных отраженного от объекта локации излучения и шумов.

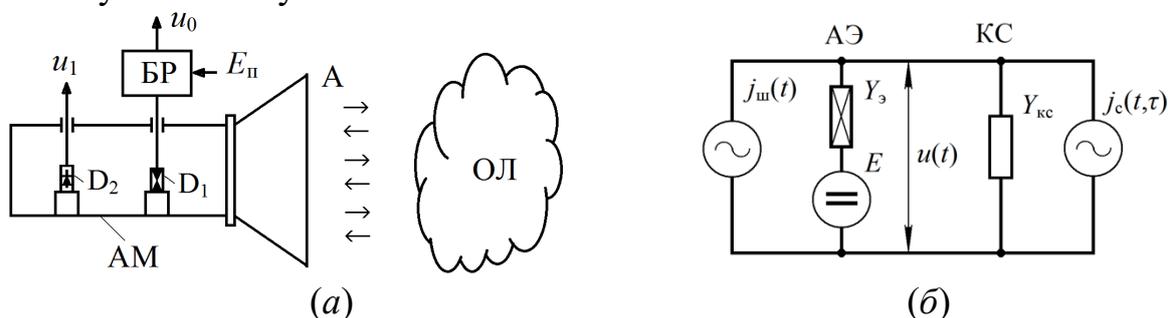


Рисунок 1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы одноконтурного автодинного модуля: А – антенна; АМ – автодинный модуль, БР – блок регистрации сигнала; ОЛ – объект локации

В разделе 2.2 диссертации для эквивалентной схемы рисунка 1б получена система линеаризованных уравнений для определения относительных вариаций амплитуды a и частоты генерации χ в виде:

$$\frac{Q_H}{\omega_0} \frac{da}{dt} + \alpha_{11} a + \varepsilon_{11} \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (3)$$

$$\beta_{11}a + Q_n\chi = -\Gamma(t,\tau)\eta\sin\delta(t,\tau) - a_s(t), \quad (4)$$

где α_{11} , ε_{11} , β_{11} – дифференциальные параметры, имеющие смысл прочности предельного цикла генератора, его неизодромность и неизохронность соответственно; $\eta = Q_n / Q_{вн}$, Q_n , $Q_{вн}$ – КПД, нагруженная и внешняя добротности КС; ω_0 – частота стационарных колебаний; $a_c(t)$, $a_s(t)$ – синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума генератора. Из (3), (4) получено выражение для постоянной времени τ_a автодинного отклика, характеризующей внутреннюю инерционность АД: $\tau_a = Q_n / [\omega_0\alpha_{11}(1 - \gamma\rho)]$, где $\gamma = \beta_{11}/\alpha_{11}$ – коэффициент неизохронности, учитывающий зависимость частоты колебаний генератора от амплитуды; $\rho = \varepsilon_{11}/Q_n$ – коэффициент неизодромности, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний.

Полагая в системе (3), (4) $da/dt = a_c(t) = a_s(t) = 0$, получено квазистатическое решение для автодинного отклика $a(t, \tau)$ и $\chi(t, \tau)$ в виде:

$$a(t, \tau) = \Gamma(t, \tau)K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1], \quad (5)$$

$$\chi(t, \tau) = -\Gamma(t, \tau)L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (6)$$

где K_a , L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты АД; ψ_1 , θ – углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний.

Выражения (5), (6) не являются окончательными для дальнейшего анализа автодинных характеристик, поскольку содержат неявные функции запаздывающих аргументов: модуль $\Gamma(t, \tau)$ и фазу $\delta(t, \tau)$ мгновенного коэффициента отражения. Данные функции учитывают ещё одну принципиально важную инерционность в автодинной системе «генератор – объект локации», связанную с «транспортным» запаздыванием отражённого СВЧ излучения.

В разделе 2.3 с целью выявления (5), (6) получены выражения для функций запаздывающего воздействия отраженного от объекта локации СВЧ излучения в виде: $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0$, $\delta(t, \tau) = \omega_0\tau - C_{oc} \sin[\delta(t, \tau) + \theta]$, где $C_{oc} = \Delta\omega_{ma}\tau$ – параметр внешней обратной связи системы «генератор – объект локации», физический смысл его – индекс фазовой модуляции автодинного сигнала; $\Delta\omega_{ma} = \Gamma_0\omega_0L_a$ – автодинная девиация частоты. Параметр C_{oc} является важным при описании свойств АД, особенно в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. Как показано далее, представление фазы $\delta(t, \tau)$ в таком виде описывает процесс взаимодействия генератора с отраженным от объекта локации излучением только в первом приближении и соответствует «фазовой» концепции описания автодинного эффекта.

В разделе 2.4 для случая движущегося объекта локации из (1) и (2) получено общее решение «внешней задачи» АД при расчете его сигнальных

характеристик:

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 \left\{ 1 + a_m \left[\frac{(\Omega_d \tau)^1}{1} \sin \Omega_d t + \frac{(\Omega_d \tau)^2}{2!} \cos \Omega_d t + \frac{(\Omega_d \tau)^3}{3!} \sin \Omega_d t + \dots \right] \right\}, \quad (7)$$

$$\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau - C_{oc} \left[\sin \Omega_d t + \frac{(\Omega_d \tau)^1}{2!} \cos \Omega_d t + \frac{(\Omega_d \tau)^2}{3!} \sin \Omega_d t + \dots \right], \quad (8)$$

где $a_m = \Gamma_0 K_a$ – амплитуда относительных автодинных изменений амплитуды колебаний; $\Omega_d = 2\pi / T_a$ – частота автодинного сигнала, равная частоте Доплера в АД без модуляции и частоте преобразованного сигнала в АД с ЧМ.

Поэтому для случая произвольной дальности до «быстро» движущегося объекта необходимо учитывать внешнюю инерционность автодинной системы, обусловленную временем распространения излучения до объекта локации и обратно. Для этого в представленных выше выражениях (3), (4) учтём высшие члены в разложениях (7), (8). После элементарных преобразований и свёртывания рядов получим выражения для нормированных автодинных характеристик фазы $\delta(t, \tau)$ (ФХА), частоты $\chi_n(t, \tau_n)$ (ЧХА) и амплитуды $a_n(t, \tau_n)$ (АХА) в виде:

$$\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau - C_{эКВ} \sin[\delta(t, \tau) + \theta + \Theta_i(r_n)] - K_A Y_{ад} \tau \sin[\delta(t, \tau) - \psi_1 + \Theta_i(r_n)], \quad (9)$$

$$a_n(t, \tau) = a(t, \tau) / a_m = \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1] + K_A Y_{ад} \sin[\delta(t, \tau) - \psi_1 + \Theta_i(r_n)], \quad (10)$$

$$\chi_n(t, \tau) = \chi(t, \tau) / \chi_m = -\sin[\delta(t, \tau) + \theta] - K_A Y_{ад} \sin[\delta(t, \tau) - \psi_1 + \Theta_i(r_n)]. \quad (11)$$

где $C_{эКВ} = C_{oc} Y_{ад}$ – эквивалентный параметр внешней обратной связи системы «генератор – объект локации»;

$Y_{ад} = \sum_{i=0}^l (-1)^i Y_i(r_n)$ – амплитудный множитель автодинной девиации частоты;

$r_n = \tau / T_a$ – параметр нормированного относительно периода T_a автодинного сигнала расстояния до объекта локации; K_A – «множитель амплитуды» автодинных характеристик, обусловленный действием отражённого излучения сравнительно большой амплитуды, когда Γ соизмерим с единицей:

$$K_A = \frac{2\pi r_n a_m \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1]}{1 + a_m \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1]}; \quad (13)$$

$Y_i(r_n)$, $\Theta_i(r_n)$ – амплитудные коэффициенты рядов и их фазы соответственно:

$$Y_i(r_n) = \frac{(2\pi r_n)^2 \sqrt{4(i+1)^2 + (2\pi r_n)^2}}{2(i+1) \cdot (2i+1)!}, \quad (14)$$

$$\Theta_i(r_n) = -\arctg \frac{\pi r_n}{(i+1)}. \quad (15)$$

Полученные выражения (9) – (15) для расчета внешнединамических характеристик АД соответствуют случаю, когда постоянная времени τ_a значительно меньше периода автодинного отклика T_a . Однако в случае нарушения этого неравенства при расчётах автодинных параметров и характеристик необходимо учитывать внутреннюю инерционность АД. Эта инерционность учтена в разделе 2.5, используя результаты исследования поведения основных параметров АД от частоты автодинного сигнала. Итоги этого анализа использованы в разделе 2.6 для приближенного учета внутренней инерционности АД при расчете автодинных характеристик. В разделе 2.6 предложен более точный метод учета внутренней инерционности генератора, основанный на применении квазистатического метода А.Н. Малахова. Дальнейшее развитие метод А.Н. Малахова получил в разделе 2.7, где он обеспечивает комплексный учёт как внутренней, так и внешней инерционности автодинной системы «генератор – объект локации» при расчёте сигналов АД.

Шумовые характеристики АД с непрерывным излучением без модуляции излучения исследованы в разделе 2.8. Для случая малого сигнала, когда амплитуда отклика $a_m = \Gamma K_a \ll 1$ и коэффициент $K_A = 0$, после нормировки (9) – (11) получим выражения, описывающие сигнальные и шумовые характеристики АД:

$$\delta(t, \tau_n)_{(c+\text{ш})} = 2\pi\tau_n - p_{\text{ш}}(t) - C_{\text{oc}} \sum_{i=0}^l (-1)^i Y_i(r_n) \sin[\delta(t, \tau_n) + \theta + \Theta_i(r_n)], \quad (16)$$

$$a_n(t, \tau_n)_{(c+\text{ш})} = a(t) / \Gamma_0 K_a = \cos[\delta(t, \tau_n) - \psi_1] + a_{\text{ш}}(t) / \Gamma_0 K_a, \quad (17)$$

$$\chi_n(t, \tau_n)_{(c+\text{ш})} = \chi(t) / \Gamma_0 L_a - \sin[\delta(t, \tau_n) + \theta] - \chi_{\text{ш}}(t) / \Gamma_0 L_a, \quad (18)$$

где $a_{\text{ш}}(t) = a_c(t) + \rho a_s(t)$, $\chi_{\text{ш}}(t) = a_s(t) + \gamma a_c(t)$, $p_{\text{ш}}(t) = C_{\text{oc}} \chi_{\text{ш}}(t) / \Gamma_0 L_a$ – составляющие амплитудного, частотного и фазового шума генератора соответственно.

Из результатов расчета ЧХА $\chi_n(t, \tau_n)$, АХА $a_n(t, \tau_n)$ и среднеквадратических уровней частотных $q_\chi(t, \tau_n)$ и амплитудных $q_a(t, \tau_n)$ шумов (временных диаграмм) установлено, что в случае слабой внешней обратной связи, когда значение параметра $C_{\text{oc}} \ll 1$, сигнальные характеристики имеют вид гармонической функции, а шумовые характеристики являются стационарными и уровни шума соответствуют шумам автономного генератора. В случае сильной внешней обратной связи, когда величина C_{oc} соизмерима с единицей, сигнальные характеристики приобретают ангармонические искажения. При изменении нормированного времени τ_n уровни шумов периодически изменяются (см. временные диаграммы на рисунке 2).

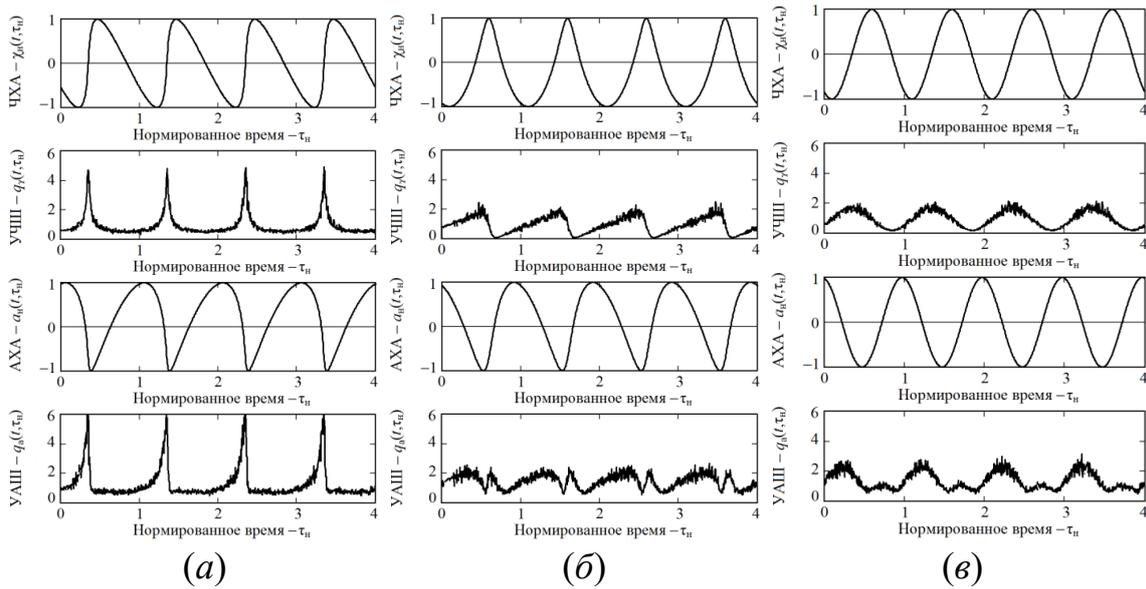


Рисунок 2. Временные диаграммы сигнальных $\chi_n(t, \tau_n)$, $a_n(t, \tau_n)$ и шумовых $q_\chi(t, \tau_n)$, $q_a(t, \tau_n)$ характеристик АД, рассчитанных при $C_{oc} = 0,8$ и различных значениях нормированного расстояния r_n : $r_n = 0$ (а); $r_n = 0,5$ (б) и $r_n = 1$ (в)

Из сопоставления сигнальных и шумовых характеристик видно, что положения по оси нормированного времени τ_n максимумы уровней шумов при нормированном расстоянии $r_n = 0$ совпадают и соответствуют области положительных значений производной от ЧХА $\chi_n(t, \tau_n)$. При этом высота пика шумов возрастает с приближением величины параметра обратной связи C_{oc} к единице. Участкам с отрицательными значениями производной от ЧХА $\chi_n(t, \tau_n)$ соответствуют области с минимумом частотных $q_\chi(t, \tau_n)$ и амплитудных $q_a(t, \tau_n)$ шумов, которые могут находиться ниже (в 1,5...2 раза), чем уровень шумов автономного генератора.

Полученные результаты моделирования шумовых характеристик для первой рабочей зоны нормированного расстояния r_n , где $0 < r_n < 1$, показали, что выявленные особенности поведения шумовых характеристик в условиях когда $C_{oc} \sim 1$, являются достаточно общими и не зависят от скорости и направления движения объекта локации. Исследование этих характеристик при иных значениях нормированного расстояния r_n показало, что с увеличением r_n высота пиков среднеквадратических уровней шума снижается. Особенно заметна такая тенденция в первой рабочей зоне, где $0 \leq r_n \leq 1$. Характер полученных здесь зависимостей шумовых характеристик от нормированного расстояния r_n объясняется поведением множителя $Y_{ад}$, который с ростом r_n быстро затухает, достигая некоторого значения «плато».

В главе 3 «Развитие теории автодинных СБРЛ с ЧМ» на основе разработанных выше методов представления функций запаздывающего воздействия отраженного от объекта локации излучения выполнены исследования автодинной СБРЛ с учетом внутренних шумов генератора и с различными законами линейной и гармонической ЧМ. При этом рассмотрены случаи модуляции генератора как по цепи питания, так и с помощью варикапа. В разделе 3.2 диссертации и здесь на рисунке 3 приведены функциональная и эквивалентная схемы одноконтурного генератора.

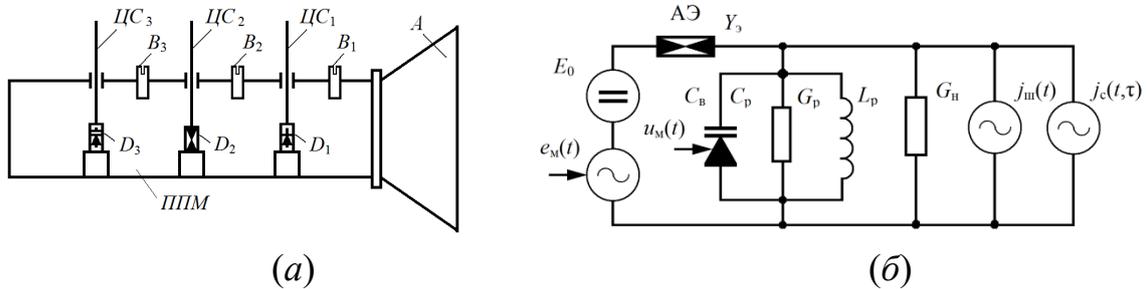


Рисунок 3. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы автодинного модуля с частотной модуляцией: ППМ – приемопередающий модуль; ЦС – цепи смещения диодов; В – регулировочные винты

Для эквивалентной схемы рисунка бб получены основные уравнения для анализа АД с ЧМ. Квазистатическое решение этих уравнений, полученное в разделе 3.3 диссертации, имеет вид:

$$a(t, \tau) = -m_{\text{ам}} f_m(t) + \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1] + a_{\text{ш}}(t), \quad (19)$$

$$\chi(t, \tau) = -m_{\text{чм}} f_m(t) - \Gamma(t, \tau) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta] - \chi_{\text{ш}}(t), \quad (20)$$

$$\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau + C_{\text{чм}} f_m(t) - p_{\text{ш}}(t) - C_{\text{ос}} \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (21)$$

где $m_{\text{ам}}$ – коэффициент амплитудной модуляции; $m_{\text{чм}}$ – относительная величина девиации частоты генератора; $f_m(t)$ – закон модуляции; $C_{\text{чм}} = C_{\text{ос}} (m_{\text{чм}} / \Gamma_0 L_a)$ – индекс фазовой модуляции автодинного сигнала, обусловленный ЧМ излучения.

Из выражений (19), (20) видно, что при ЧМ генератора и одновременном воздействии на него отражённого излучения, автодинный отклик по изменению амплитуды $a(t, \tau)$, кроме полезного сигнала (вторые слагаемые), содержит также составляющие сигнала (первые слагаемые), повторяющие закон модуляции $f_m(t)$. Третьи слагаемые отображают присутствие в выходном отклике генератора аддитивных составляющих стационарного шума, обусловленных внутренними шумами генератора. При этом вторые слагаемые в (19), (20) за счёт шумовой модуляции фазы (21) вносят дополнительные мультипликативные составляющие общего шума, которые проявляются только при наличии отраженного излучения.

Формирование сигналов в автодинной СБРЛ с ЧМ при неподвижном объекте локации рассмотрено в разделе 3.4. Здесь при анализе исключен из

рассмотрения переходной процесс формирования в зонах обращения модулирующих функций $f_m(t)$, поскольку в них обычно выполняется неравенство: $\tau \ll 2\pi / \Omega_m$, где Ω_m – частота модуляции. С учётом сказанного выражения для $\Gamma(t, \tau)$ и $\delta(t, \tau)$ в (19) – (21), как функции нормированного времени запаздывания $\tau_n = \omega_0 \tau / 2\pi$, имеют вид:

$$\Gamma(t_n, \tau_n) = \Gamma_0 \left\{ 1 + 2\pi r_n \Gamma K_a \sum_{i=0}^l (-1)^i Y_i(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n) - \psi_1 + \Theta_i(r_n)] \right\}, \quad (22)$$

$$\delta(t_n, \tau_n) = 2\pi\tau_n + \pi B_{\text{ЧМ}} f_m(t_n) - C_{\text{oc}} \sum_{i=0}^l (-1)^i Y_i(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n) + \theta + \Theta_i(r_n)], \quad (23)$$

где $r_n = l / \Lambda_a = \tau / T_a$ – параметр нормированного расстояния; $\Lambda_a = cT_a / 2$ – длина волны автодинного сигнала; $B_{\text{ЧМ}} = \Delta F_{\text{ЧМ}} \tau$ – параметр «базы ЧМ», который определяет число периодов сигнала, укладываемых на периоде модулирующей функции при неподвижном отражающем объекте; $\Delta F_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} / 2\pi$; $t_n = \Omega_m t / 2\pi$ – нормированное время модулирующей функции.

Решение трансцендентного уравнения (23) при условии его гладкости, когда $C_{\text{oc}} < 1$, находим методом последовательных приближений:

$$\begin{aligned} \delta(t_n, \tau_n) = & \delta(t_n, \tau_n)_{(0)} - C_{\text{oc}} \sum_{i=0}^l (-1)^i Y_i(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n)_{(1)} + \theta + \Theta_i(r_n) - \\ & - C_{\text{oc}} \sum_{i=0}^l (-1)^i Y_i(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n)_{(1)} + \theta + \Theta_i(r_n) - \dots \\ & - C_{\text{oc}} \sum_{i=0}^l (-1)^i Y_i(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n)_{(1)} + \theta + \Theta_i(r_n)] \dots], \end{aligned} \quad (24)$$

где индексами в круглых скобках около слагаемых $\delta(t_n, \tau_n)$ обозначен порядок приближения; $\delta(t_n, \tau_n)_{(0,1,\dots,k)} = 2\pi\tau_n + \pi B_{\text{ЧМ}} f_m(t_n)$.

В случае движущегося объекта локации, рассмотренном в разделе 3.5, в правой части выражений (22) – (24) сделана подстановка: $\tau_n = \tau_{0n} + \tau_n(t_n)$. В результате получено выражение для фаз $\delta(t_n, \tau_n)_{(0,1,\dots,k)}$ в виде:

$$\delta(t_n, \tau_n)_{(0,1,\dots,k)} = 2\pi\tau_{0n} + 2\pi B_d \tau_n(t_n) + \pi B_{\text{ЧМ}} f_m(t_n) + 2\pi B_d \chi_{\text{ЧМ}} \tau_n(t_n) f_m(t_n), \quad (25)$$

где $\tau_{0n} = \omega_0 \tau_0 / 2\pi$ – начальное значение нормированного расстояния; $B_d = (\Omega_d / \Omega_m)$ – параметр «базы доплеровского сигнала», показывающий, какое число периодов доплеровского сигнала укладывается на период модуляции; Ω_d – частота Доплера; $\chi_{\text{ЧМ}} = (\Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \omega_0)$ – относительная величина девиации частоты при модуляции; $\tau_n(t_n)$ – переменная составляющая нормированной дальности, обусловленная перемещением отражающего объекта.

В разделах 3.4 и 3.5 диссертации приведены результаты расчета сигнальных и спектральных характеристик для различных законов модуляции (линейных и гармонических), различных значений параметров генераторов, расстояний и скоростей перемещения объекта локации. Анализ флуктуационных характеристик АСБРЛ с ЧМ выполнен в разделе 3.6. Раздел 3.7 посвящен выяснению общих свойств сигнальных и шумовых характеристик. Результаты экспериментальных исследований сигнальных и шумовых характеристик АСБРЛ с ЧМ представлены в разделе 3.8.

В главе 4 «Исследование радиоимпульсных автодинов» выполнен анализ процесса установления автодинного отклика при появлении объекта локации в поле излучения антенны СБРЛ методом пошагового интегрирования уравнений с запаздыванием. На рисунке 4 (см. раздел 4.3) для случая неподвижного объекта локации при величине параметра $C_{oc} = 0,8$ приведены графики нормированных относительных изменений амплитуды $a_n(n)$ и частоты $\chi_n(n)$ для различных начальных значений нормированного времени $\tau_n = \omega_0 \tau / 2\pi$: $\tau_n = 0$ (кривые 1); $\tau_n = 0,1$ (кривые 2); $\tau_n = 0,2$ (кривые 3); $\tau_n = 0,3$ (кривые 4); $\tau_n = 0,4$ (кривые 5); $\tau_n = 0,5$ (кривые 6).

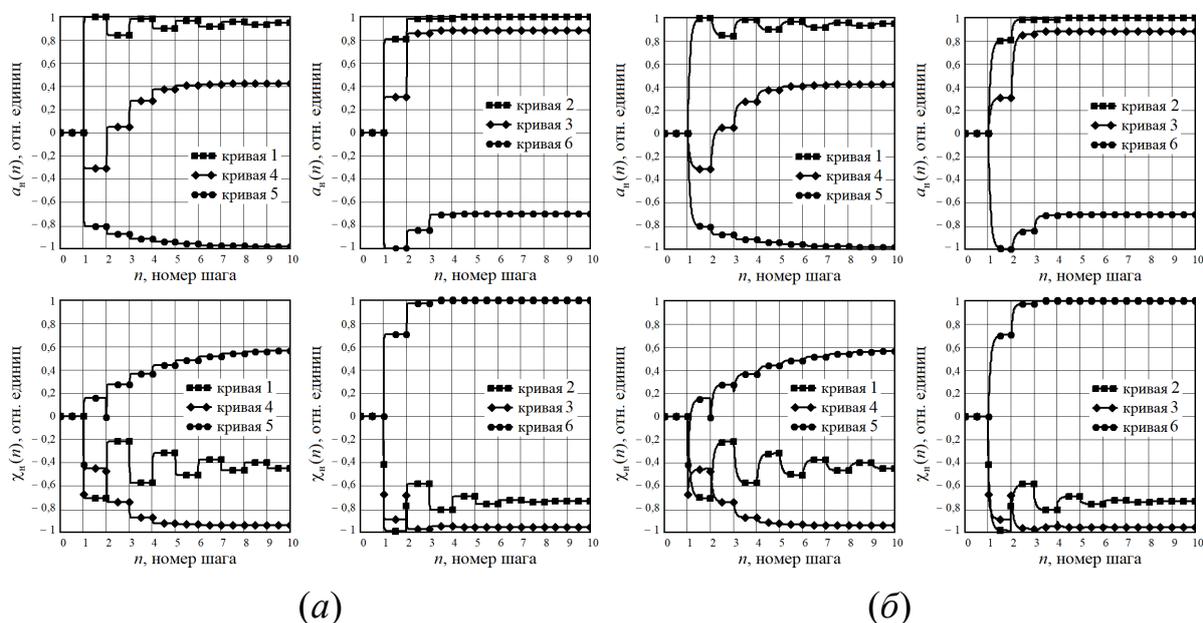


Рисунок 4. Графики установления изменений амплитуды $a_n(n)$ и частоты $\chi_n(n)$ колебаний, рассчитанные при $\gamma = 1$, $\tau_{ан} = 0,01$ (a), $\tau_{ан} = 0,1$ (б) и различных τ_n

Как видно на графиках рисунка 4 на собственные (скачкообразные) изменения частоты $\chi_n(n)$, вызванные воздействием отражённой волны, накладываются дополнительные (экспоненциальные) изменения, обусловленные инерционностью процесса изменения амплитуды колебаний $a_n(n)$. Графики изменений амплитуды $a_n(n)$ на границах зон отличаются сглаженно-

стью процесса установления отклика. Тогда как автодинные изменения частоты $\chi_n(n)$ на границах зон при определенных значениях времени τ_n происходят со скачком.

Далее в разделе 4.3 выполнены исследования влияния величины параметра обратной связи АД и наличия перемещения объекта локации на формирование автодинного отклика. Рассмотрено установление амплитуды автодинного отклика и процесса формирования автодинного отклика в различных зонах воздействия отраженного излучения. Исследовано влияние номера шага на нелинейные искажения сигналов.

Принцип преобразования отклика радиоимпульсных АД в полезный сигнал основан на временном стробировании автодинного отклика, запоминании его мгновенных значений схемой «выборка-хранение» на период повторения и сглаживании фильтром нижних частот. Аналитические исследований представлены в разделе 4.4, экспериментальные исследования радиоимпульсного автодина на диоде Ганна 8-мм диапазона, выполненные в разделе 4.5 диссертации, представлены на рисунке 5.

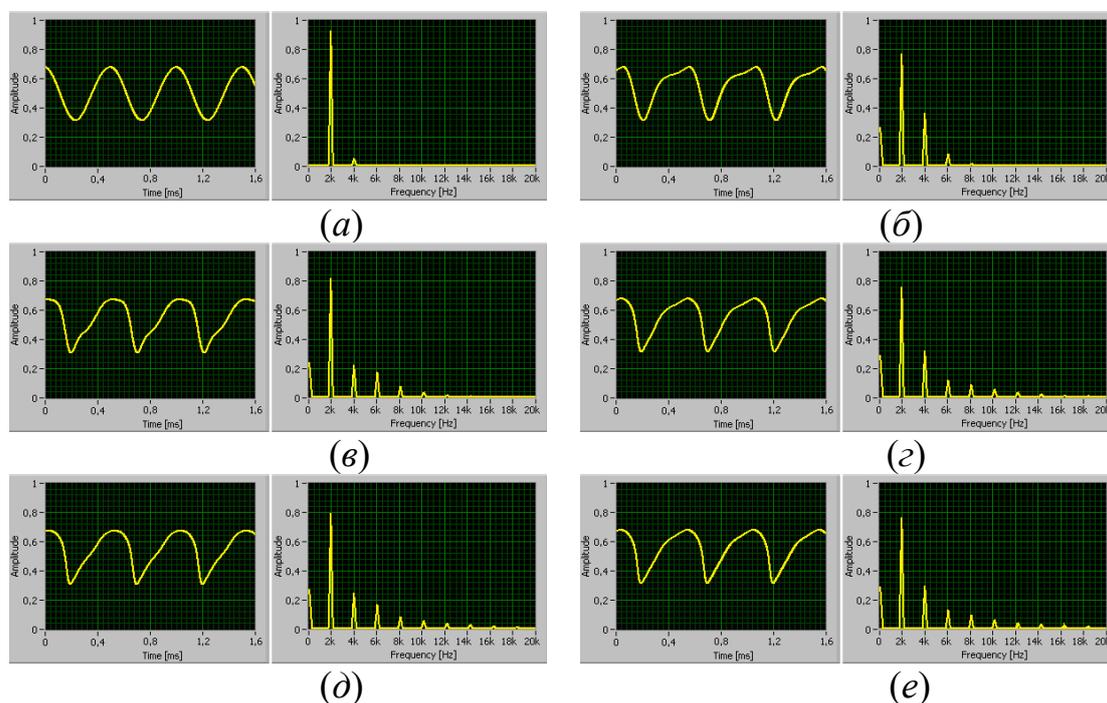


Рисунок 5. Осциллограммы (слева) и спектры (справа) автодинных сигналов радиоимпульсного автодина, полученные для зон воздействия отражённого излучения с первой (а) по шестую (е) соответственно от удаляющегося отражателя

В главе 5 «Новые принципы построения автодинных устройств для СБРЛ» представлены результаты исследований параметров и характеристик, а также особенностей функционирования новых автодинных устройств. Среди них АД со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором. В разделе 5.2 выполнены теоретические исследования

стабилизированных АД, получены основные выражения для анализа и расчета их параметров и характеристик. На рисунках 6 и 7 представлены результаты сравнительных экспериментов с использованием нестабилизированного и стабилизированного генераторных модулей 8-мм диапазона, выполненных на диодах Ганна.

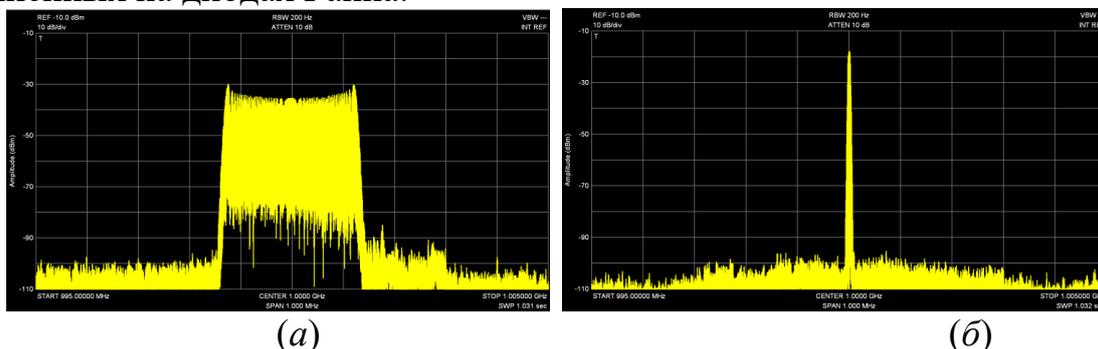


Рисунок 6. Спектры СВЧ колебаний выходных сигналов обычного (а) и стабилизированного (б) автодинов, полученные от движущегося отражателя

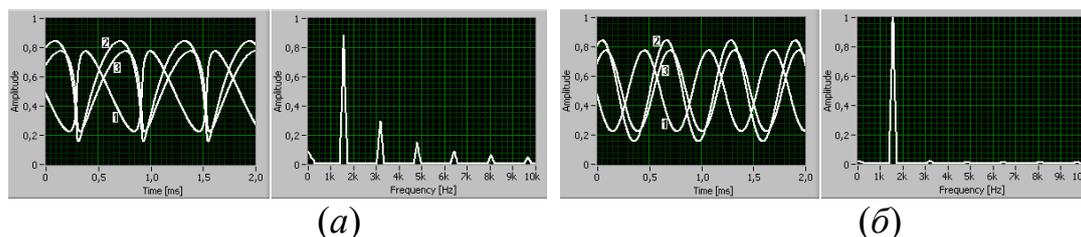


Рисунок 7. Осциллограммы (слева) автодинного отклика по изменению частоты генерации (кривые 1), амплитуды колебаний (кривые 2), сигнала автодетектирования (кривые 3) и спектры (справа) для отклика по изменению амплитуды колебаний обычного (а) и стабилизированного (б) автодинов, полученные от движущегося отражателя – имитатора доплеровского сигнала

В разделе 5.3 выполнен анализ АД интерференционного типа, использующего для регистрации сигналов диодные детекторы, помещаемые без развязывающих элементов в передающую линию между генератором и антенной. На рисунке 8 представлены экспериментальные сигналы во временной области.

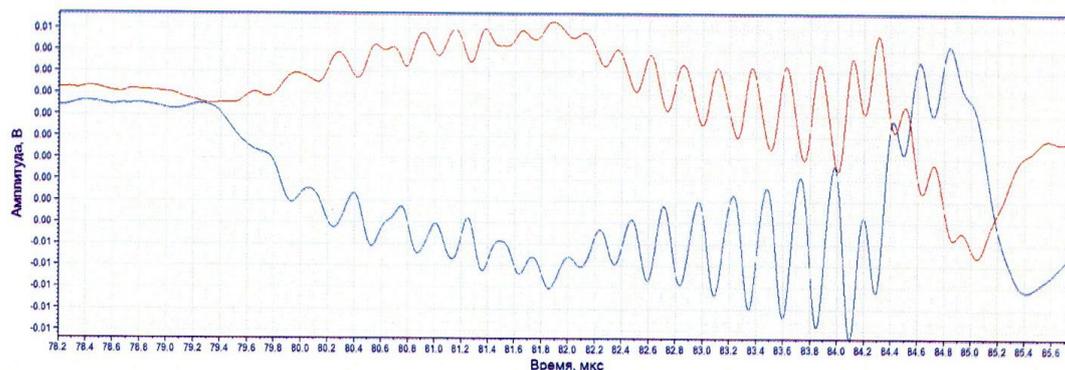


Рисунок 8. Запись сигналов на выходах детекторов автодинного модуля с двумя детекторными диодами между генератором и антенной

В разделе 5.4 получена система уравнений, описывающая автодинный эффект в автоколебательной системе из двух парциальных генераторов при наличии сильной связи между ними (так называемого двухдиодного автодина – ДДА). На рисунке 9 представлен внешний вид ДДА и осциллограммы полученных сигналов.

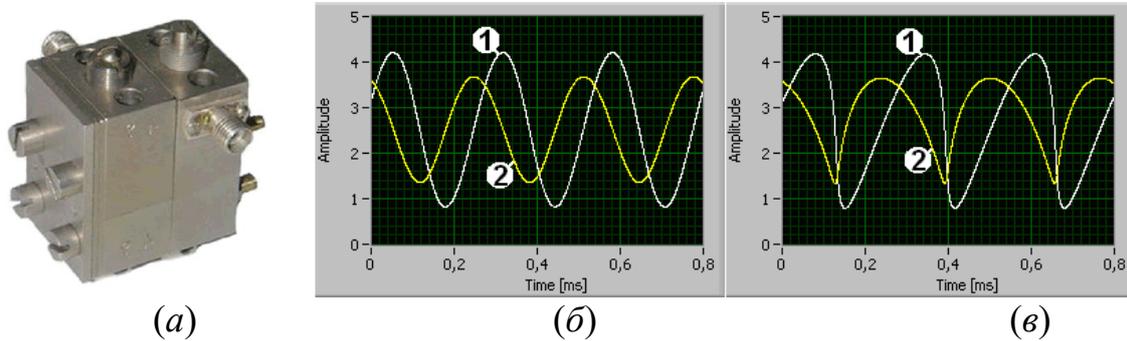


Рисунок 9. Внешний вид (а) и осциллограммы сигналов двухдиодного автодина, полученные в цепи питания первого 1 и второго 2 диодов Ганна при $C_{oc} \approx 0,08$ (б) и $C_{oc} \approx 0,8$ (в)

В разделе 5.5 представлены результаты исследования синхронизированного АД (СХАД) радиосигналом от стороннего генератора в режиме захвата частоты. При этом получена система уравнений для автодинных относительных изменений амплитуды a и абсолютных изменений фазы $\tilde{\varphi}$ колебаний генератора в виде:

$$\frac{d^2 a}{dt^2} + \frac{\tau_a + \tau_\varphi}{\tau_a \tau_\varphi} \frac{da}{dt} + \frac{1 - \gamma \operatorname{tg} \varphi_0}{\tau_a \tau_\varphi} a = \frac{\Gamma_0 K_a}{\tau_a \tau_\varphi} \left[\cos \Omega_d t + (\operatorname{tg} \varphi_0 - k_\Omega \Omega) \sin \Omega_d t \right], \quad (26)$$

$$\frac{d^2 \tilde{\varphi}}{dt^2} + \frac{\tau_a + \tau_\varphi}{\tau_a \tau_\varphi} \frac{d\tilde{\varphi}}{dt} + \frac{1 - \gamma \operatorname{tg} \varphi_0}{\tau_a \tau_\varphi} \tilde{\varphi} = -\frac{\Gamma_0 K_a}{\tau_a^2} \left[\sin \Omega_d t + (\gamma + \Omega) \cos \Omega_d t \right], \quad (27)$$

где $k_\Omega = \Omega_\varphi / \Omega = 1 / U_{\text{вн}} \cos \varphi_0$ – коэффициент, характеризующий соотношение нормированных частот $\Omega = \tau_a \Omega_d$ и $\Omega_\varphi = \tau_\varphi \Omega_d$; $U_{\text{вн}} = k_{\text{вн}} K_a$ – относительный уровень внешнего воздействия; $k_{\text{вн}}$ – коэффициент, характеризующий относительный уровень внешнего воздействия; τ_a , τ_φ – постоянные времени изменений (релаксации) амплитуды и фазы соответственно: $\tau_a = Q_n / \alpha_{11} \omega_0$, $\tau_\varphi = Q_{\text{вн}} / k_{\text{вн}} \omega_0 \cos \varphi_0$; φ_0 – установившееся значение разности фаз внешних и собственных колебаний.

В результате решения уравнений (26) и (27), расчета автодинных характеристик и их анализа установлено, что при одном и том же уровне отражённого СВЧ излучения величина автодинной девиации частоты СХАД и обычного АД определяется следующим приближенным соотношением:

$$\frac{\Delta \omega_{\text{АД}}}{\Delta \omega_{\text{СХАД}}} \approx \frac{\omega_0 k_{\text{вн}} \cos \varphi_0}{\Omega_d Q_{\text{вн}}} = \frac{c k_{\text{вн}} \cos \varphi_0}{2 Q_{\text{вн}} V_{\text{рад}}}, \quad (28)$$

где $V_{\text{рад}}$ – радиальная составляющая относительной скорости объекта

локации; c – скорость распространения излучения. Расчёт по формуле (28) при значениях $Q_{\text{вн}} = 150$, $k_{\text{вн}} = 0,1$, $V_p = 1000 \text{ м/с}$ и $\cos \varphi_0 = 1$ дает выигрыш от применения СХАД $\Delta\omega_{\text{АД}} / \Delta\omega_{\text{САД}} = 100$. Таким образом, внешняя синхронизация АД генератора значительно уменьшает величину девиации частоты и, тем самым, эффективно решает проблему борьбы с ангармоническими искажениями сигналов АД.

В главе 6 «Применение автодинных устройств в СБРЛ» дано описание примеров, в которых использованы результаты выполненных выше диссертационных исследований и при этом также получен ряд новых научных результатов.

Особенности формирования автодинных сигналов от объектов локации, находящихся в ближней зоне антенны (зоне Френеля), рассмотрены в разделе 6.1. При этом в качестве математической модели распределения поля на объекте использован двумерный пучок Гаусса-Эрмита нулевого порядка. Результаты расчета зависимости модуля $\Gamma(z_n)$ и фазы $\Phi_\Gamma(z_n)$ коэффициента отражения представлены на рисунках 6.6 и 6.7 в диссертации.

В разделе 6.2 рассмотрены особенности формирования и обработки сигналов двухдиодных автодинов (ДДА), используемых в качестве дистанционных датчиков вибраций и малых перемещений, в частности, в решении задач диагностики турбоагрегатов, машин и механизмов. Представлены также результаты испытаний на сортировочной горке предлагаемой СБРЛ на базе ДДА для решения задач автоматизации технологических процессов на сортировочных горках. Функциональная схема автодинного датчика и внешний вид присоединённого к фланцу антенны ДДА 8-мм диапазона, выполненного на основе генераторных модулей «Тигель-08», показан на рисунке 10.

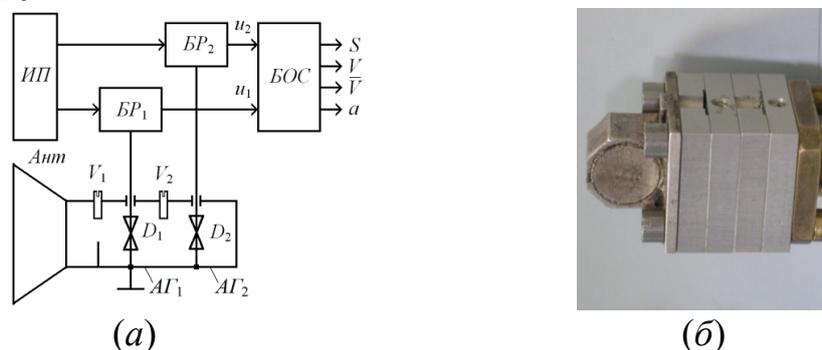


Рисунок 10. Функциональная схема (а) автодинного датчика и внешний вид (б) стабилизированного ДДА: ИП – источник питания; БР – блок регистрации автодинного сигнала; БОС – блок обработки сигналов

На рисунке 11 представлены фотографии внешнего вида (а) образца автодинного радиолокатора со стороны раскрыва антенны, установленного на рабочем месте проведения испытаний, и вид парка формирования поездов сортировочной станции (б). Результаты натурных испытаний показали принципиальную возможность использования радиолокаторов на базе ДДА

для контроля параметров движения вагонов на путях накопления сортировочной горки.



(а)

(б)

Рисунок 11. Внешний вид (а) автодинного радиолокатора на базе ДДА и панорама (б) парка формирования (вертикальной стрелкой указан контролируемый путь)

Сущность предложения использовать ДДА в системах контроля внутренних размеров металлических изделий (труб) поясняется представленной на рисунке 12а структурной схемой автодинного датчика, а принцип действия – эпюрами напряжений на рисунке 12б.



(а)

(б)

Рисунок 12. Блок-схема (а) автодинного датчика отклонений от номинального значения внутренних размеров металлических изделий и эпюры (б), поясняющие принцип действия: 1 и 2 – автодинные СВЧ генераторы; 3 и 4 – блоки выделения автодинного сигнала; 5 – циркулятор; 6 и 7 – излучатели (антенны); 8 – контролируемое изделие; O_1 и O_2 – положения рабочих точек на характеристиках датчика

Среднеквадратическая погрешность $\sigma_{ш}$ измерений определяется эффективным значением относительных флуктуаций $i_{ш\text{эф}}$ величины смещения тока активного элемента генератора, а также зависит от уровня автодинного сигнала $\Gamma K_{0n} K_{пр}$ и крутизны $D(l_0)$ дискриминационной характеристики в рабочей точке O_1 . Выражение для составляющей погрешности $\sigma_{ш}$, обусловленной шумами, имеет вид:

$$\sigma_{ш} = i_{ш\text{эф}} / [\Gamma K_{0n} K_{пр} D(l_0)] = (\lambda / 4\pi) \gamma_{ш}, \quad (29)$$

где $\gamma_{ш} = 1 / q_{с/ш}$ – относительный уровень шума на выходе АД;

$q_{с/ш} = (P_c / P_{ш})^{1/2}$ – отношение сигнал/шум; $P_c = P_0 \Gamma^2$, $P_{ш} = k T_{ш} M_{ш} \Delta F$ – мощности сигнала отражённого излучения и собственных шумов генератора соответственно; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T_{ш}$ – эквивалентная шумовая температура АЭ; $M_{ш}$ – мера шума; ΔF – полоса анализируемых частот.

Из (6.29) видно, что потенциальная точность измерений растёт с уменьшением длины волны λ излучения и увеличением отношения сигнал/шум $q_{с/ш}$. Кроме шумовой составляющей $\gamma_{ш}$ погрешности имеются также погрешности, обусловленные изменениями уровня отражённого излучения в зависимости от качества обработки поверхности изделий $\gamma_{\Gamma} = \Delta \Gamma / \Gamma$, нестабильностями коэффициента автодетектирования $\gamma_K = \Delta K_0 / K_0$ и частоты $\gamma_{\omega} = \Delta \omega_0 / \omega_0$ генерации автодинного генератора. Выражение для оценки абсолютной погрешности σ_a автодинного метода измерения размеров имеет вид:

$$\sigma_a = (\lambda / 4\pi) \sqrt{\gamma_{ш}^2 + \gamma_{\Gamma}^2 + \gamma_K^2 + \gamma_{\omega}^2}, \quad (30)$$

Нестабильность частоты ДДА в диапазоне температур $\pm 50^\circ\text{C}$ получена $\gamma_{\omega} = 3,2 \cdot 10^{-4}$, относительные изменения коэффициента автодетектирования в этом диапазоне температур составили $\gamma_K = 0,5 \cdot 10^{-3}$. Влияние изменений коэффициента отражения Γ можно корректировать введением автоматической калибровки непосредственно при выполнении измерения сигналом ортогонального канала ДДА, поэтому составляющей γ_{Γ} в (30) пренебрежём. При величине $q_{с/ш} = 60$ дБ расчётное значение относительного уровня шумов составляет $\gamma_{ш} = 1 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, в диапазоне 8-мм расчётное значение погрешности σ_a согласно (30) составляет: $\sigma_a = 0,74 \cdot 10^{-3}$ мм. Результаты экспериментальных испытаний макетного образца автодинного датчика, выполненных с партией из 10 калиброванных изделий, показали, что разработанное устройство обеспечивает возможность бесконтактного контроля внутреннего диаметра изделий с погрешностью не более 25 мкм.

В разделе 6.3 дано описание РЛД для фиксации момента отделения отцепа от состава, что востребовано для автоматизации процесса роспуска и формирования составов на сортировочной горке. На рисунке 16 представлена структурная схема автодинного РЛД с внешней синхронизацией их колебаний.

В разделе 6.4 приведено описание структурной схемы автодинного РЛД с манипуляцией частоты для определения параметров движения объектов локации, например, грузовой платформы парашютной системы относительно поверхности земли. В этом же разделе описан РЛД с повышенной устойчивостью к воздействию активных помех. На рисунке 13 представлена

функциональная схема последнего РЛД и временная диаграмма, поясняющие принцип его действия.

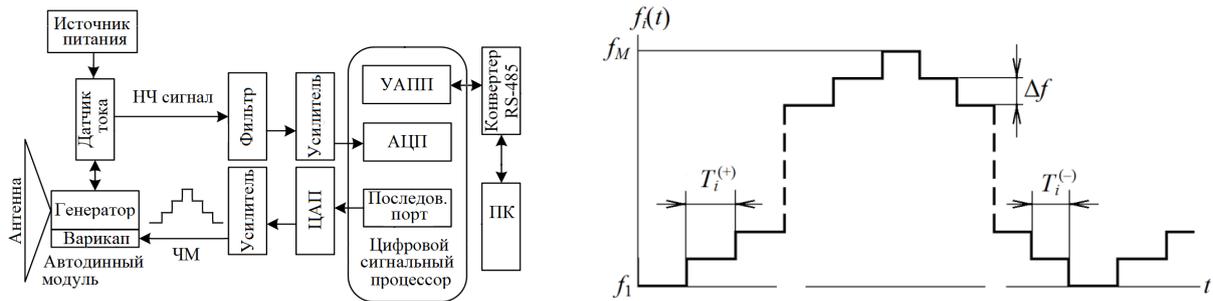


Рисунок 13. РЛД с повышенной помехоустойчивостью (слева) и временная диаграмма переключения частоты излучения (справа)

В разделе 6.5 дано описание автодинных СБРЛ, выполненных на основе радиопотонных технологий. На рисунке 14 представлена структурная схема радиопотонного автодина (РФА), выполненного на основе схемы оптоэлектронного генератора (ОЭГ), и характеристика модулятора Маха-Цендера.

РФА включает в себя оптическую, электронную и радиоволновую части. Радиоволновая часть РФА представлена пространством между антенной и объектом локации, в котором посредством электромагнитного излучения происходит взаимодействие РФА и объекта локации.

В разделе 6.6 диссертации приведены описания автодинных СБРЛ с импульсной модуляцией излучения. На рисунке 15 представлена структурная схема РЛД для определения параметров движения отцепов на сортировочной горке. В диссертации на рисунке 6.38 приведены схемы гомодинного и автодинного вариантов выполнения ППБ. Гомодинный вариант ППБ содержит СВЧ-генератор, циркулятор и смеситель, а автодинный – только СВЧ-генератор.

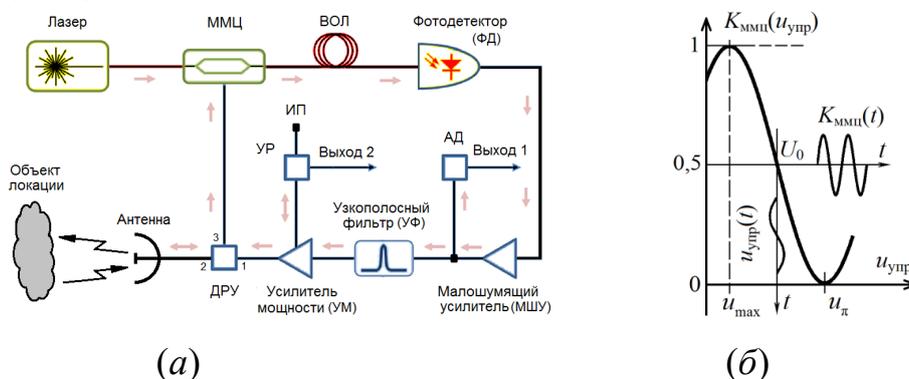


Рисунок 14. Структурная схема (а) РФА и характеристика (б) $K_{\text{ММЦ}}(u_{\text{упр}})$ модулятора Маха-Цендера

На рисунке 16 приведены временные диаграммы процессов формирования и обработки сигналов в РЛД для определения параметров движения

отцепов на сортировочной горке: (а) – выходное напряжение $u_{им}(t)$ импульсного модулятора; (б) – напряжение зондирующего $u_{зонд}(t)$ радиосигнала; (в) – напряжение $u_{отр.1}(t)$ радиосигнала, полученного от первой «блестящей» точки движущегося отцепа; (г) – напряжение $u_{отр.2}(t)$ радиосигнала, полученного от второй «блестящей» точки движущегося отцепа; (д) – напряжение преобразованного $u_{пр}(t)$ сигнала на выходе смесителя СМ или автодинного СВЧ-генератора; (е) – напряжение тактовых импульсов $u_{ти}(t)$ на третьем выводе ПБСУ; (ж) – напряжение $u_{в-3}(t)$ сигналов после операции выборка-запоминание (хранение); (з) – напряжение $u_{выч}(t)$ сигналов после операции вычитания из текущих значений отсчетов предыдущих.

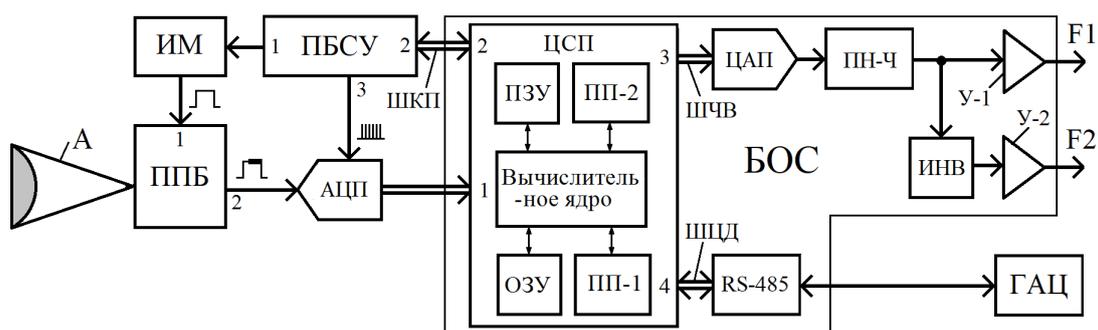


Рисунок 15. Структурная схема РЛД для определения параметров движения отцепов на сортировочной горке

Предложенное техническое решение позволило смесь доплеровских сигналов на выходе ППБ, полученную от «блестящих» точек на поверхности движущегося отцепа, разделить на отдельные независимые парциальные сигналы от точечных отражателей. Этим достигается исключение основного недостатка используемого на сети сортировочных горок скоростемера РИС-ВЗМ – замирания (пропадания) сигналов, что повышает точность определения параметров движения отцепов.

В разделе 6.6 представлено описание метода повышения разрешающей способности по дальности радиоимпульсных датчиков для СБРЛ, автодинного радиоимпульсного датчика с частотной модуляцией, метода импульсно-доплеровской радиолокации и РЛД с автодинным приёмопередатчиком для его реализации, способа радиолокации с перестройкой несущей частоты от импульса к импульсу, автодинного датчика для контроля двух зон селекции цели по дальности. На оригинальные технические решения получено 16 патентов на изобретения.

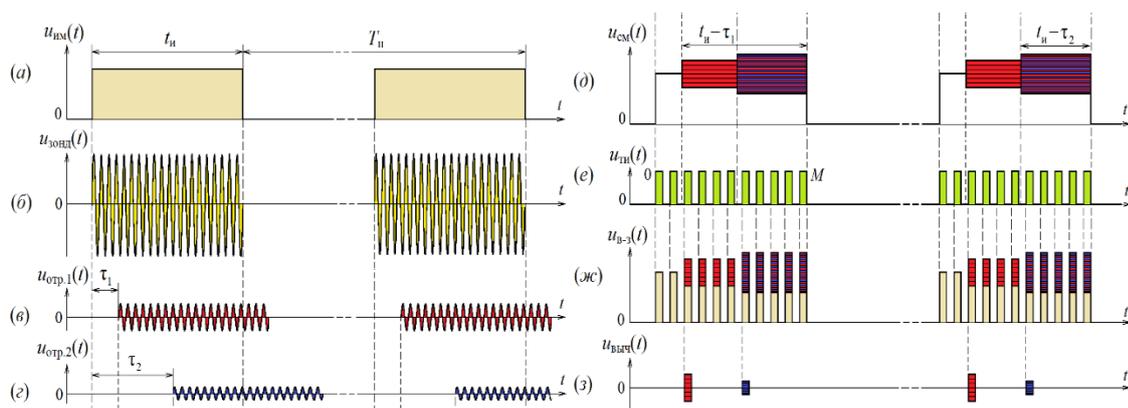


Рисунок 16. Временные диаграммы процессов формирования и первичной обработки сигналов в РЛД

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические выводы и результаты, которые в совокупности можно квалифицировать как решение **научной проблемы, имеющей важное значение** для теории и техники СБРЛ миллиметрового диапазона с автодинным принципом построения приемопередающих устройств.

Основные выводы и результаты диссертации состоят в следующем

1. На основе выполненного обзора литературы, посвященной исследованиям автодинных устройств и их применению в системах ближней радиолокации, поставлена цель диссертационного исследования «развитие методов анализа, принципов построения и применения автодинных устройств для систем ближней радиолокации миллиметрового диапазона» и сформулированы задачи исследований. В итоге завершения диссертационных исследований цель диссертации достигнута. При этом получены научные результаты и сформулированы положения, а также вытекающие из них рекомендации.

2. Широко используемый квазистатический метод расчёта автодинных параметров и характеристик обеспечивает удовлетворительную точность инженерного расчёта автодинного отклика в частотном диапазоне порядка 20% от его граничной частоты. При этом в расчётах не учитываются такие особенности автодинного СВЧ генератора, как частотная дисперсия автодинной девиации частоты и инерционность изменений амплитуды автоколебаний при высоких скоростях движения объектов локации. Кроме того применимость данного метода ограничена условием малости времени запаздывания отражённого излучения по сравнению с периодом автодинного отклика.

Внедрение в теорию автодинов нового концептуального подхода к их анализу, основанного на описании отраженного от объекта локации излучения математическими методами теории систем с запаздыванием, позволило разработать новые методы расчета сигнальных и шумовых параметров и характеристик. Эти методы, учитывающие динамику перемещения объектов локации и собственную инерционность процессов в автодинном генераторе,

устранили отмеченные выше принципиальные ограничения предшествующей теории автодинных систем. При этом получены следующие научные результаты и положения.

3. Разработана обобщенная математическая модель автодинной СБРЛ с ЧМ для анализа особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик как для случая неподвижного, так и движущегося отражающего объекта локации при использовании произвольных законов ЧМ излучения. Модель предусматривает анализ взаимодействия СБРЛ с отражённым от объекта локации излучением при любом соотношении времени запаздывания τ отражённого излучения и периода T_a автодинного сигнала. Для описания свойств сигналов СБРЛ с ЧМ введены понятия нормированного расстояния r_n до отражающего объекта, номера рабочей зоны, эквивалентного параметра $C_{\text{экв}}$ внешней обратной связи автодинной системы и угла динамического смещения фазы $\Delta\delta_d$ автодинного отклика. При выполнении исследований СБРЛ с ЧМ получены следующие научные результаты, положения и вытекающие из них рекомендации.

4. В радиоимпульсном автодине, находящемся под воздействием отраженного от цели излучения, на участках значений набега фазы отраженного излучения, где производная частотной характеристики по времени запаздывания больше нуля, в системе «генератор – объект локации» действует положительная запаздывающая обратная связь, стимулирующая дальнейший рост величины автодинных изменений частоты и формирование релаксационного процесса установления автодинного отклика. На участке спада частотной характеристики, где упомянутая производная отрицательна, и в системе действует отрицательная запаздывающая обратная связь, вызывающая в последующем шаге «противоположные» воздействия на систему, наблюдается ступенчатый аperiodический закон установления автодинного отклика. Для нормального функционирования радиоимпульсной СБРЛ, особенно в случаях контроля быстропротекающих процессов, постоянная времени автодинного отклика генератора должна быть значительно меньше периода автодинного отклика.

5. В результате поиска новых принципов построения автодинных устройств для СБРЛ миллиметрового диапазона в диссертации выполнен комплекс исследований, которые позволили получить ряд новых научных результатов.

6. Разработана математическая модель автодинных сигналов от объектов, находящихся в ближней зоне антенны. Предложены автодинные радиолокаторы, датчики и измерители различного назначения, которые содержат оригинальные технические решения, основанные на результатах диссертационных исследований. В этих устройствах использованы различные виды частотной, импульсной и совмещенной модуляции. Найден ряд техни-

ческих решений, основанных на радиодифракционных технологиях. При этом получены новые научные результаты.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ:

1. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Dynamics of autodyne response formation in microwave generators // *Radioelectronics and Communications Systems*, 2013, vol. 56, no. 5, p. 227–242. (Scopus) 1,31 п.л./0,65 п.л.
2. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Peculiarities of Noise Characteristics of Autodynes under Strong External Feedback // *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 12, p. 1445–1460. (WoS) 1 п.л./0,5 п.л.
3. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Dynamic autodyne and modulation characteristics of microwave oscillators // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2013. Vol. 72. № 10. P.919–934; (Scopus) 1 п.л./0,5 п.л.
4. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Smolskiy S.M. The impact of resonator detuning on autodyne characteristics of stabilized microwave generators // *Radioelectronics and Communications Systems*. 2011. V. 54, No. 11. P. 625–637. (Scopus) 0,81 п.л./0,27 п.л.
5. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** About applicability of quasi-static method of autodyne systems analysis // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2014. – V. 57, № 3. – P. 139–148. (Scopus) 0,81 п.л./0,4 п.л.
6. Носков В.Я., Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Закарлюк Н.М., **Игнатков К.А.**, Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 9. Радиолокационное применение автодинов // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. № 3. С.32–86; 3,43 п.л./0,49 п.л.
7. Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 7. Динамика формирования автодинных и модуляционных характеристик // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2013. № 6. С. 3–52. 3,12 п.л./1,04 п.л.
8. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Noise Characteristics of Autodynes with Frequency Stabilization by Means of an External High-Q Cavity // *Journal of Communications Technology and Electronics (Radiotekhnika i Elektronika)*. 2016. V. 61. № 9. P. 1052–1063. (Scopus, WoS) 0,87 п.л./0,43 п.л.
9. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P. Application of Two-Diode Autodynes in Devices for Radiowave Control of Product Dimensions // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59, № 7. P. 715–721. (Scopus) 0,31 п.л./0,1 п.л.
10. Noskov V.Ya., Vasiliev A.S., Ermak G.P., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P.

- Parameters' calculation of autodyne sensors taking into account the noise of the power source // Telecommunication and Radio Engineering. 2016. Vol. 75. № 5. P.441–454; (Scopus) 0,87 п.л./0,17 п.л.
11. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Signals of autodyne radars with frequency modulation according to symmetric saw-tooth law // Telecommunication and Radio Engineering. 2016. Vol. 75. № 17. P.1551–1566; (Scopus) 1 п.л./0,16 п.л.
 12. Noskov V.Ya., Vasiliev A.S., Ermak G.P., **Ignatkov K.A.** Mishin D.Ya., Smolskiy S.M., Chupahin A.P. Output, signal and noise parameters of autodynes with a rigid conductance characteristic of an active element // Telecommunication and Radio Engineering. 2016. Vol. 75. № 20. P.1857–1873; (Scopus) 1,06 п.л./0,15 п.л.
 13. **Ignatkov K.A.**, Noskov V.Ya. Experimental research of railway carriage location methods at classification yards // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings (19-20 May 2016, SUSU, Chelyabinsk, Russia), 2016. Article 7911708. P.1–4; (Scopus, WoS) 0,25 п.л./0,12 п.л.
 14. Noskov V.Ya., Vasiliev A.S., Ermak G.P., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P. Fluctuation characteristics of autodyne radars with frequency modulation // Radioelectronics and Communications Systems, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 123–131. (Scopus) 0,75 п.л./0,15 п.л.
 15. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Signals of autodyne sensors with sinusoidal frequency modulation // Radioengineering. 2017. Vol. 26. № 4. P.1182–1190; (Scopus, WoS) 0,56 п.л./0,09 п.л.
 16. Noskov V.Ya., Smolskiy S.M., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P. Features of autodyne signal formation with external detector // Telecommunication and Radio Engineering. 2017. Vol. 76. № 16. P.1463–1475; (Scopus) 0,81 п.л./0,2 п.л.
 17. **Игнатков К.А.** Особенности автодинов миллиметрового диапазона // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 3. С. 189-196. 0,5 п.л./0,5 п.л.
 18. Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Двухдиодный автодин в системах радиоволнового контроля динамических процессов // Датчики и системы. 2016. № 6 (204). С. 31–37. 0,44 п.л./0,15 п.л.
 19. Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 8. Автодины со стабилизацией частоты внешним высокодобротным резонатором // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 12. С. 3–42. 2,4 п.л./0,81 п.л.
 20. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Chupahin A.P. Autodyne Effect of the System Involving Two Mutually Synchronized Oscillators under Strong Cou-

- pling // Journal of Communications Technology and Electronics (Radiotekhnika i Elektronika), 2018, vol. 63, no. 2, pp. 180–188. (Scopus) 0,56 п.л./0,18 п.л.
21. Носков В.Я., Смольский С.М., **Игнатков К.А.**, Мишин Д.Я., Чупахин А.П. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 10. Основы анализа и расчёта параметров автодинов с учётом шумов // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 3. С.18–52; 2,18 п.л./0,43 п.л.
 22. Носков В.Я., Смольский С.М., **Игнатков К.А.**, Мишин Д.Я., Чупахин А.П. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 11. Основы реализации автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 2. С.5–33; 1,81 п.л./0,36 п.л.
 23. Носков В.Я., Смольский С.М., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 12. Сигналы одноконтурных автодинов при сильном отражённом излучении // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 5. С.5–19; 0,93 п.л./0,23 п.л.
 24. Носков В.Я., Богатырев Е.В., **Игнатков К.А.** Принцип построения бортового радиолокационного датчика для обнаружения быстро движущихся целей // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 12. С.16–22; 0,43 п.л./0,14 п.л.
 25. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Shaydurov K.D. Frequency deviation of injection-locked microwave autodynes // Radioengineering. 2019. V. 28. № 4. P.721–728; (Scopus, WoS) 0,5 п.л./0,16 п.л.
 26. Носков В.Я., Смольский С.М., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 13. Стабилизированные внешним резонатором автодины при сильном отражённом излучении // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 1. С.5–21; 1,06 п.л./0,26 п.л.
 27. Noskov V.Ya., Galeev R.G., Bogatyrev E.V., **Ignatkov K.A.**, Shaidurov K.D. Autodyne Sensor Signals with Amplitude-Frequency Modulation of Radiation // Sensors, 2020. V. 20(24), No. 7077, 18 p. (Scopus) 1,12 п.л./0,22 п.л.
 28. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Shaidurov K.D. Autodyne Effect in Microwave Oscillators with Injection Locking // Journal of Communications Technology and Electronics (Radiotekhnika i Elektronika), 2020, vol. 65, no. 6, pp. 651–658. (Scopus) 0,56 п.л./0,18 п.л.
 29. Носков В.Я., Богатырев Е.В., **Игнатков К.А.**, Черных О.А., Шайдуров К.Д. Метод повышения помехоустойчивости радиолокационных датчиков с переключением частоты. Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5. № 3. С. 284–304. 1,31 п.л./0,26 п.л.

30. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Shaidurov K.D., Bogatyrev E.V., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Peculiarities of signals from a moving target using autodyne short-range radars with LFM // Telecommunication and Radio Engineering. 2022. V. 81. No. 7. P. 1–22. 1,38 п.л./0,23 п.л
31. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., **Игнатков К.А.**, Шайдуров К.Д. Принцип действия автодинного оптоэлектронного приемопередатчика для систем ближней радиолокации. Ural Radio Engineering Journal. 2022. Т. 6. № 3. С. 269–295. 1,69 п.л./0,34 п.л
32. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., **Игнатков К.А.**, Шайдуров К.Д. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 15. Сигнальные и шумовые характеристики автодинов с частотной модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 9. С. 15–54. 2,5 п.л./0,5 п.л
33. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., **Игнатков К.А.**, Черных О.А. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 16. Автодинный эффект синхронизированных генераторов // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77. № 1. С. 5–36. 2 п.л./0,4 п.л
34. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., **Игнатков К.А.**, Вишняков Д.С. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 17. Переходные процессы радиоимпульсных автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77. № 11. С. 5–36. 2 п.л./0,4 п.л
35. Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., **Игнатков К.А.**, Лучинин А.С. Носков В.Я. Перспективы применения радиофотонных генераторов в системах ближней радиолокации и связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 1. С. 19–31. 0,81 п.л./0,16 п.л

Получено 16 патентов РФ на изобретения.