

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

На правах рукописи



ИГНАТКОВ Кирилл Александрович

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

2.2.16. Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург – 2023

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 консультант: 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)», профессор кафедры радиоэлектронных систем;

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

ШИРОКОВ Игорь Борисович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», профессор кафедры электронной техники

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 13:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.2.04.12 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=5237>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Сергей Николаевич Шабунин

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.). На основе этих данных в СБРЛ вырабатывались различного рода команды, которые далее передавались исполнительным устройствам или в центр управления полетом (подрыв, торможение, маневрирование и пр.).

Возможности бесконтактного обнаружения объектов посредством электромагнитного излучения, определение координат и параметров их движения, которые обеспечивают СБРЛ, оказались востребованными также в иных областях человеческой деятельности. Среди них – решение задач ближней навигации, охраны объектов и безопасности, контроля и регулирования на транспорте, а также использование СБРЛ в различных технологических процессах промышленного производства и в научных исследованиях.

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 систем сверхближней радиолокации (ССБРЛ)².

Во-вторых, условия функционирования СБРЛ обычно таковы, что диапазоны изменения дальности до объекта локации, эффективной поверхности рассеяния цели имеют значительно большие 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 локации, бли-

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.

зость 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 приемо-передатчика 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.

В настоящее время АСБРЛ, также как и гомодинные системы, широко используются для самых разнообразных приложений. Примерами их применения являются решения различных задач военного назначения, на автомобильном и железнодорожном транспорте и в системах безопасности, в научных исследованиях, измерительной технике и электронной промышленности для контроля параметров материалов. Кроме того, они используются в бортовых измерителях параметров движения носителя относительно подстилающей поверхности, в датчиках вибраций и скорости вращения вала судовых дизельных двигателей, в аппаратуре для диагностики работы турбоагрегатов, а также в приборах для физиологических и медицинских исследований и пр.

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.

Еще одна особенность АД как радиолокатора связана с совмещением функций

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

передатчика и приемника в одном каскаде – автогенераторе. При его анализе отдельное 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 радиолокации.

Создание новых и более совершенных приемно-передающих модулей сверхвысоких (СВЧ) и крайне высоких (КВЧ) диапазонов в монолитном и гибридно-интегральном исполнении, с учетом всех отмеченных факторов и особенностей функционирования СБРЛ находится в русле общих тенденций развития современной радиоэлектроники. В соответствии с этой тенденцией к настоящему времени зарубежными фирмами создана широкая номенклатура радиокомпонентов СВЧ и КВЧ диапазонов для систем связи и радиолокации, среди которой значительную долю составляют генераторные и генераторно-излучающие (автодинные) модули, в том числе, в виде готовых микросхем для поверхностного монтажа. Схемные и конструкторские решения этих модулей защищены большим числом патентов в наиболее развитых странах мира: Японии, ЕС, США и Китай.

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.

Возможности использования АД в продукции как военного (например, в радио-взрывателях), так и гражданского, в том числе в медицине и на транспорте, открывало перспективы массового производства этих модулей. В дальнейшем, несмотря на объективные трудности 90-х годов, эти модули были усовершенствованы, появлялись новые типы и расширился их диапазон частот. 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, Е.К. Завойский, С.И. Зилитинкевич, И.М. Коган, О.В. Лосев, Н.Н. Миролюбов, А.Ф. Терещенко и др. Значительный вклад в развитие данной тематики в нашей стране внесли научные коллективы под руководством В.М. Богачёва, В.В. Болознева, 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 ближнего зарубежья являются: Ю.Е. Гордиенко, А.С. Васильев, Г.П. Ермак, К.А. Лукин, И.И. Соколовский, А.Г. Яцуненко (Украина). В дальнем зарубежье к числу ведущих ученых и специалистов по автодинной тематике можно отметить W.A.S. Butement, E.S. Shire, A.F.H. Thomson, M.A. Tuve, R.B. Roberts, M.J. Lasarus, M.G. Somekh, S. Novak, F.R. Pantoja, S.A. Alidoost, R. Sadeghzade, R. Fatemi, S. Nagano, Y. Akaiwa, Y. Takayama, T. Itoh, M. Kotani, S. Mitsui, K. Shirahata, M.-S. Gupta, G. I. Haddad и многих других.

Таким образом, автодинные СБРЛ и ССБРЛ 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 для систем ближней радиолокации 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 режимов 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 искажения (являются ангармоническими), причём характер этих искажений зависит также от направления движения отражающего объекта. В свое время были предприняты попытки объяснения этого явления с различных позиций. Анализ этих объяснений свелся к выяснению вопроса, какие параметры отражённого излучения определяют формирующийся в автогенераторе автодинный отклик? При этом 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.

В ряде работ предполагается, что автодинный отклик обусловлен доплеровским сдвигом частоты отражённого излучения и этот метод анализа даже внесён в название устройства – «доплеровские автодины». В других работах в основу рассмотрения положено фазовое запаздывание отражённого излучения, и формирование автодинного отклика определяется фазой возвращённого в резонатор колебания. Очевидно, «частотный» подход более удобен и обоснован для анализа работы автодинных преобразователей частоты и автогенераторов с внешней синхронизацией, где расстройка частоты определяется параметрами системы и контролируется в эксперименте. Однако его применение для анализа АД радиолокационного приложения оказалось непродуктивным.

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 численным интегрировании нелинейных дифференциальных уравнений.

Необходимо отметить, что автодинная система «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 входящая 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 квазистатистическом приближении, т.е. без учета внутренней инерционности генератора, выполнен анализ АД с импульсной модуляцией (радиоимпульсных АД). 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 «зажимам» 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 предыстории 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.

Поэтому 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 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 необходим также учет внутренней инерционности 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 и ССБРЛ. Совокупность указанных задач диссертационных исследований, по нашему мнению, представляет собой **научную проблему, имеющую важное значение** для теории и техники СБРЛ и ССБРЛ с автодинным принципом построения приемо-передающих устройств.

Объектом исследования диссертации являются радиотехнические системы и устройства ближней радиолокации с автодинным принципом построения приемо-передатчика. **Предметом исследования** – модели и методы анализа, принципы построения и применения автодинных устройств для радиотехнических 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.

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 АД с частотной модуляцией для общего случая произвольного соотношения времени запаздывания отраженного от объекта локации излучения и периода автодинного сигнала.

4. 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.

5. Дать описание СБРЛ и ССБРЛ, предназначенных для контроля параметров движения, вибраций, малых перемещений, размеров металлических изделий и диагностики объектов локации, а также для решения задач радиозондирования атмосферы, 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 частотной модуляцией (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 дифференциальных уравнений.

При анализе АД в условиях слабого воздействия на генератор отраженного 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 натурального 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.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Внедрение в теорию АД 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 АД. Эти методы позволяют учитывать динамику перемещения объекта локации и инерционность процессов в автодинном генераторе, а также устранить принципиальные ограничения предшествующей теории автодинных систем.

1.1. Математическая модель АД с непрерывным излучением, включающая АД с ЧМ, в которой учитываются высшие члены разложений в ряды Тейлора функций за-

паздывающего воздействия по малому времени запаздывания относительно текущего времени, обеспечивает расчет «гладких» автодинных характеристик при произвольном соотношении величин времени запаздывания отраженного излучения и периода автодинного отклика. При этом необходимо выполнение условия, что величина параметра C_{oc} внешней обратной связи не превышает единицу.

В случае «слабого» воздействия отраженного излучения, когда значение параметра C_{oc} внешней обратной связи значительно меньше единицы, сигнальные характеристики имеют вид гармонической функции, а шумовые характеристики являются стационарными. В случае «сильного» воздействия отраженного излучения, когда значение параметра C_{oc} соизмеримо с единицей, сигнальные характеристики приобретают характерные ангармонические искажения, а среднеквадратические уровни шумов изменяются с периодом автодинного отклика. Максимумы уровней частотных и амплитудных шумов совпадают и соответствуют области «крутого» перехода частотной характеристики АД через нуль, при этом уровень пика шумов резко возрастает с приближением величины параметра внешней обратной связи C_{oc} к единице. Участкам с «пологим» переходом частотной характеристики соответствует «плато» с минимумом частотных и амплитудных шумов, которые находятся ниже (в 1,5...2 раза), чем уровень шумов автономного генератора.

С увеличением расстояния между АД и объектом локации при высоких скоростях движения последнего, когда время запаздывания отражённого от объекта локации излучения и период автодинного отклика становятся соизмеримыми, степень ангармонических искажений сигналов и высота пиков среднеквадратических уровней шума асимптотически уменьшаются. При этом степень искажения сигнальных характеристик неизохронных генераторов зависит как от скорости движения объекта локации, так и от направления его перемещения. В случае, когда отношение времени запаздывания отраженного излучения и периода автодинного отклика, определяемое как нормированное расстояние r_n , кратно целому числу ($r_n = 1, 2, \dots$), ангармонические искажения сигнальных характеристик и пики среднеквадратических уровней шума АД практически отсутствуют, при этом уровни шума АД соответствуют уровням автономного генератора.

1.2. Применение квазистатического метода А.Н. Малахова⁴ при анализе АД обеспечивает существенное снижение погрешности вычислений сигнальных характеристик при значительном расширении диапазона частот автодинного отклика, а также учет внутренней инерционности генератора и дисперсионной зависимости автодинной девиации частоты. Модернизация квазистатического метода А.Н. Малахова путем учета высших членов разложений функций запаздывающего воздействия согласно п. 1.1 позволяет учитывать как внешнюю инерционность автодинной системы «генератор – объект локации», так и инерционность изменений амплитуды колебаний и частотную дисперсию автодинной девиации частоты.

1.3 Использование метода пошагового интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих функционирование АД 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».

На участках значений набега фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного от объекта локации излучения, где производная частотной характеристики АД по времени запаздывания боль-

⁴ А.Н. Малахов. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968. стр. 642.

ше нуля, в системе «генератор – объект локации» действует положительная запаздывающая обратная связь, которая стимулирует дальнейший рост величины автодинных изменений частоты, вызывает релаксационный характер установления автодинного отклика и затягивает его завершение. На участке спада частотной характеристики АД, где упомянутая производная отрицательна, в системе «генератор – объект локации» действует отрицательная запаздывающая обратная связь, которая вызывает «противоположные» воздействия на автодинные изменения частоты в последующем шаге и ступенчатый апериодический закон установления автодинного отклика.

В случае «безынерционного» АД, когда величины постоянной времени автодинного отклика значительно меньше времени запаздывания отраженного излучения, продолжительность процесса установления автодинного отклика определяется величиной параметра внешней обратной связи, причем с увеличением параметра C_{oc} процесс установления, выражаемый в числе «шагов», все более затягивается, переходя при превышении C_{oc} единицы в неустойчивый. В случае «инерционного» АД, когда величина постоянной времени автодинного отклика больше времени запаздывания отраженного излучения, продолжительность переходного процесса установления автодинного отклика полностью определяется величиной этой постоянной времени.

2. Стабилизация частоты автодинного генератора с помощью внешнего высокодобротного резонатора обеспечивает значительное уменьшение степени искажений сигналов и уровня частотных шумов, что способствует улучшению такого важного параметра АСБРЛ, как динамический диапазон. Выигрыш в динамическом диапазоне, определяемом величиной коэффициента стабилизации частоты, может составлять при сильной связи между резонаторами 20...30 и более дБ.

3. 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 разность фаз, которая определяется относительным разносом между диодами в передающей линии.

4. Автодинные изменения частоты генерации системы двух связанных между собой парциальных генераторов в процессе перемещения объекта локации вызывают нелинейность набега фазы отраженного излучения и, соответственно, ангармонические искажения изменений амплитуд колебаний парциальных генераторов и разности фаз между ними. Степень этих искажений зависят от амплитудных и фазовых соотношений компонентов автодинного отклика, и определяются значениями внутренних параметров парциальных генераторов, таких как, их неизохронность, амплитудное и частотное детектирование, а также добротности колебательных систем и величина параметра внешней обратной связи системы «генератор – объект локации». Степень искажения сигналов системы двух связанных между собой парциальных генераторов может быть значительно меньшей, чем у обычных (одиночных) АД за счет различия степени влияния отраженного излучения на режимы работы парциальных генераторов.

Парциальный генератор, у которого добротность колебательной системы или амплитуда колебаний больше (он является ненагруженным), чем у второго парциального генератора, связанного с нагрузкой (антенной), является стабилизирующим, он вызывает уменьшение величины автодинной девиации частоты генерации и, тем самым, степени искажения сигналов и расширение динамического диапазона автодинной системы. При этом фазовое смещение между откликами парциальных генераторов определяется условиями взаимной связи между парциальными генераторами и значением относительной расстройки собственных частот парциальных генераторов. Формирование сдвинутых по фазе двух сигналов дает возможность определять знак радиальной

скорости отражающих объектов и использовать методы квадратурной обработки сигналов.

5. Синхронизация АД от внешнего генератора исключает характерные обычным (нестабилизованным) АД ангармонические искажения сигналов, что способствует расширению их динамического диапазона. При внесении начальной расстройки между частотой внешнего генератора и собственной частотой АД в пределах полосы синхронизации имеется возможность значительного увеличения коэффициента передачи автодинного сигнала.

Инерционность процесса фазовой синхронизации автодинного генератора вызывает неравномерность формирования амплитудно-частотной характеристики коэффициента передачи в области высоких частот автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний. Однако эта неравномерность при правильном выборе параметров синхронизации не является препятствием для регистрации сигналов во всем диапазоне существующих на практике скоростей движения объектов локации.

6. При проведении вибрационных измерений с помощью АД в условиях сильной обратной связи из-за наличия ангармонических искажений сигнальных характеристик необходимо учитывать не только значительные отличия величины чувствительности датчика и ширины динамического диапазона в различных рабочих точках, но и отличия в этих точках уровней шума и продуктов нелинейного преобразования.

Новизна защищаемых положений и результатов диссертации

1. Впервые внедрен в теорию АД, как с непрерывным, так и с радиоимпульсным излучением, включая АД с частотной модуляцией, концептуальный подход к анализу, основанный на описании функций отраженного от объекта локации излучения математическими методами теории систем с запаздыванием [6-8,27]. Этот подход явился основой для разработки новых методов расчета сигнальных и шумовых параметров и характеристик АД, которые позволили учитывать динамику перемещения объекта локации, а также как внешнюю, так и внутреннюю инерционность системы «генератор – объект локации». Внедрение нового подхода устранило принципиальные ограничения предшествующего этапа развития теории АД и значительно расширило область ее приложения для расчета параметров и характеристик АСБРЛ, в том числе с частотной модуляцией [30,31,33,44].

2. Впервые для расчета автодинных характеристик предложено использовать квазистатический метод А.Н. Малахова [7,8,11]. В отличие от обычного квазистатического метода, применявшегося ранее для анализа АД, метод А.Н. Малахова учитывает внутреннюю инерционность генератора и дисперсионную зависимость автодинной девиации частоты в широком диапазоне частот автодинного сигнала. Предложенная нами модернизация метода А.Н. Малахова позволяет учитывать в расчетах также внешнюю инерционность автодинной системы «генератор – объект локации» [7,8].

3. Впервые выполнены основополагающие исследования АД со стабилизацией частоты генератора с помощью внешнего высокодобротного резонатора, которые показали преимущества перед обычными (нестабилизованными) АД и перспективность их применения в АСБРЛ [2,4,10,15,37–39]. Предшествующие исследования АД с внешним резонатором ограничивались лишь получением экспериментальных данных.

4. Впервые при анализе приемно-передающих модулей, содержащих диодные секции в линии передачи между генератором и антенной (без развязывающих элементов), учтено влияние автодинного эффека [21,35,46].

5. Первые исследования автодинов в виде системы двух взаимно синхронизованных парциальных генераторов были выполнены в 80-х годах 20-го столетия в работах коллектива авторов, руководимого С.М. Смольским. В работах [13,14,16,19,21] и настоящей диссертации впервые представлены результаты исследований особенностей

формирования сигналов в зависимости от внутренних параметров парциальных генераторов и условий взаимной связи между ними.

6. Результаты выполненных исследований АД в режиме захвата частоты внешним генератором позволили впервые выяснить особенности формирования сигналов в зависимости от внутренних параметров генераторов, условий их синхронизации, скорости перемещения объекта локации и показать преимущества таких АД перед обычными АД без синхронизации, а также перспективы их применения в АСБРЛ миллиметрового диапазона [25,95,96]. При этом показано, что результаты анализа для случая «медленного» перемещения объекта локации согласуются с результатами, полученными в пионерских работах коллектива авторов, руководимого С.М. Смольским в 80-х годах 20-го столетия.

7. Выполненные исследования особенностей формирования сигнальных и шумовых параметров и характеристик автодинных устройств, предназначенных для систем ближней радиолокации, и принципов их построения позволили найти ряд новых технических решений и прикладных задач, в которых нашли применение результаты диссертационных исследований. К ним относятся:

— автодинный радиолокатор для измерения параметров движения вагонов на парковых путях сортировочной станции, выполненный на базе стабилизированного дополнительным высокодобротным резонатором двухдиодного автодина [13,62,73,85,116];

— автодинные датчики вибраций и малых перемещений, выполненные на основе обычных или двухдиодных генераторов [14,66-68];

— автодинные датчики для бесконтактного измерения наружных и внутренних размеров металлических изделий, выполненные на основе обычных или двухдиодных генераторов [16,99,100,146];

— применение двухдиодных АД в решении задач диагностики турбоагрегатов, машин и механизмов, а также контроля состояния лопаток турбовентиляторных двигателей [14,94];

— применение АД в радиолокационных датчиках с манипуляцией частоты для определения параметров движения объектов локации, например, грузовой платформы парашютной системы относительно поверхности земли [13,101];

— применение автодинного генератора в качестве бортового приёмоответчика для аэрологических радиозондов [12,63-65,98].

Достоверность защищаемых положений и результатов 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 положений и результатов 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 элемен-

тов 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 АД и АД 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 системах ближней радиолокации, дистанционного радиозондирования атмосферы и других.

2. Применение 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 базы потребителей.

3. Разработанные образцы автодинных радиолокаторов для определения параметров движения вагонов на сортировочной станции за счёт применения автодинного приёмо-передающего модуля обеспечивают более низкую себестоимость их изготовления по сравнению с радиолокатором с гомодинным построением приёмо-передатчика. Предложены технические решения по созданию СБРЛ с манипуляцией частоты для измерения параметров движения объектов локации, например, грузовой платформы парашютной системы относительно подстилающей поверхности.

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 и положения, полученные в диссертации, **соответствуют** пунктам

1 и 6 из перечня областей исследований для специальности 2.2.16. – Радиолокация и радионавигация согласно её паспорту.

Внедрение результатов диссертации и рекомендаций по их дальнейшему использованию

Результаты работы были использованы в ходе выполнения ряда работ:

1. договор № 13.G25.31.0008 от 07 сентября 2010 г. «Создание и производство технических средств радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС с целью модернизации технологической базы аэрологической сети Росгидромета» и НИОКР № 57/03111 от «07» июля 2010 г.;

2. «Исследование и разработка системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых платформ GPS/ГЛОНАСС, модернизация радиозондов типа МРЗ-3 для аэрологической сети Росгидромета», проводимых в рамках государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218;

3. Договор № 919 от 28 сентября 2012 года, НИР «Исследование и экспериментальная проверка возможности применения сканирующих лазерных дальномеров для определения координат вагонов в парках станции («СКАЛА»)), 2.083; (Заказчик ОАО «Российские железные дороги», г. Москва, исполнитель ООО «ОКО-НТЦ»)

4. НИР «Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона» по договору о научно-техническом сотрудничестве между АО «Научно-исследовательским институтом полупроводниковых приборов» (АО «НИ-ИПП», г. Томск) и Институтом радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ (ИРИТ-РТФ) УрФУ № 3302-34/02 от 06 ноября 2013 г.;

5. НИР «Исследование и разработка автодинных модулей СВЧ и КВЧ диапазонов» по договору о научно-техническом сотрудничестве между АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» (АО «НПП» Радиосвязь», г. Красноярск) и Уральским федеральным университетом (УрФУ) № 02-25/044 от 14 ноября 2018 г.;

6. Договор № Н764.210.030/17 от 09.02.2018 НИР «Исследование возможности создания малогабаритного интерферометра...» между УрФУ и РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск;

7. Договор № Н764.210.003/18 от 09.01.2019 НИР «Расчетно-экспериментальное моделирование систем диагностики...» между УрФУ и РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск;

8. Договор № Н764.210.033/20 от 01.04.2021 НИР «Моделирование радиоволновых измерительных ...» между УрФУ и РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск.

9. Договор № 01/21/П764.210.001/21 от 21.01.2021 СЧ НИР «Разработка и научное обоснование принципов построения бортового радиолокационного датчика для ...» между УрФУ и АО «НПП «Радиосвязь», г. Красноярск.

А также в ходе инициативной работы «Создание радиолокационного датчика для контроля параметров движения грузовой платформы парашютной системы» для Государственного унитарного предприятия республики Крым «Научно-исследовательский институт аэроупругих систем» (ГУП РК «НИИ АУС», г. Феодосия) в соответствии с Протоколом о намерениях между ГУП РК «НИИ АУС» и ИРИТ-РТФ УрФУ от 28.10.2015г.; в процессе обучения студентов на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций в качестве демонстрации работы автодинного радиолокатора КВЧ диапазона.

Большинство результатов диссертационного исследования, в ходе выполнения указанных выше НИОКР и НИР в период 2010–2021 гг., доведены до инженерных ре-

шений, использованных при разработке образцов автодинных датчиков, и практических рекомендаций по созданию более совершенных автодинных приемопередатчиков, переданных в АО «НИИПП», АО «НПП «Радиосвязь», ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» в виде отчетов выполнения НИР. Получено три акта.

Апробация результатов работы и публикации

По теме диссертационного исследования опубликовано 106 научных работ, в том числе 45 работ в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 38 работ — в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных, системы цитирования Scopus и WoS; 5 патентов РФ. Материалы работы отражены также в 7 отчетах о НИР и НИОКР.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах и конференциях: 3-я, 4-я и 5-я Всеросс. научно-технич. конф. «Радиовысотометрия», г. Каменск-Уральский, 2010, 2013 и 2016 гг.; 9-я Междун. научно-практ. конф. «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments-2010», г. Москва, 2010 г.; 17-я Междун. научно-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2011 г.; Междун. научно-практич. конф. «СВЯЗЬ-ПРОМ-2011», г. Екатеринбург, 2011 г.; с 21-ой по 29-ю Междун. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2011-2019 гг.; 10-я и 11-я Междун. научно-технич. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Самара, 2011 г., г. Екатеринбург, 2012 г.; 19-й Междун. симп. «Радиолокация», Варшава, 2012 г.; 8-й и 9-й Междун. харьковский симп. «Физика и техника СВЧ, мм- и субмм- волн», Харьков, 2013 и 2016 гг.; 2-ая Междун. конф. «Транспортная информация и безопасность» (ICTIS-2013), Ухань, Китай, 2013 г.; 10-я, 11-я и 12-я Междун. молодежная научно-технич. конф. «РТ-2014, -2015, -2016», Севастополь, 2014, 2015, 2016 гг.; Всеросс. научно-технич. конф. «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», Самара, 2015 и 2016 гг.; Всеросс. научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», Саратов, 2016 и 2018 гг.; 13-я и 14-я Междун. научно-технич. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения «APEIE-2016», Новосибирск, 2016, 2018 гг.; 2-я Междун. конф. «Промышленное проектирование, применение и производство», ICIEAM-2016, Челябинск, 2016 г.; 3-я Междун. конф. молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» (ITTCIS 2016), Екатеринбург, 2016 г.; 3, 4 и 6-я Всеросс. научно-техн. конф. «Системы связи и радионавигации». Красноярск, 2016, 2017, 2019 гг.; 11-я Междун. конф. «Теория и техника антенн» (ICATT), Киев, 2017 г.; Симп. IEEE «Техника СВЧ, радиолокация и дистанционное зондирование» (MRRS), Киев, 2017 г.; Междун. конф. «Информационные и телекоммуникационные технологии и радиоэлектроника «УкрМиКо», Одесса, 2017 г.; Междун. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «RSEMW», Геленджик, 2017 г.; 3-й Междун. семинар «Радиоэлектроника и информационные технологии» (REIT-2018), Екатеринбург, 2018 г.; Междун. конф. «Актуальные проблемы электронной техники» (APEDE), Саратов, 2018 г.; Уральский симпозиум «Биомедицинская инженерия, радиоэлектроника и информационные технологии» (USBREIT), Екатеринбург, 2018 и 2020 гг.

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. Результаты экспериментов АСБРЛ с ЧМ получены коллегами ИРЭ АН Украины (г. Харьков) при совместном обсуждении методики и результатов исследований. Экспериментальные исследования автодинных приемо-передатчиков для аэрологического зонда выполнены совместно с к.т.н., доцентом С.И. Кудиным. В остальных работах в составе научных групп 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, 5 глав и заключения. Она изложена на 377 страницах, содержит 127 рисунков, 2 таблицы и 7 приложений. Библиография содержит 372 источника.

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 и ССБРЛ. При этом рассмотрены области применения, задачи и условия их функционирования. Систематизированы основные понятия и определения, приведена обобщенная структурная схема АД. Представлен также обзор моделей представления и методов анализа АД. Кроме того, рассмотрены существующие параметры и характеристики АД, выполнен обзор основных принципов построения автодинных приемо-передающих 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» для эквивалентной схемы генератора (см. рисунок 1) с одноконтурной КС, находящейся под воздействием собственных отраженного от объекта локации излучения и шумов, в разделе 2.2 получена система линеаризованных уравнений для определения относительных вариаций амплитуды a и частоты генерации χ в виде:

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

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

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 посто-

янной 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; $\rho = \epsilon_{11} / Q_n$ – коэффициент неизодромности, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний.

Невозможность раздельного рассмотрения сигнальных, с большим временем корреляции, и шумовых, с малым временем корреляции, составляющих в совокупности с малостью вариаций амплитуды и частоты относительно стационарных значений определяет выбор метод линеаризации для решения дифференциальных уравнений⁵.

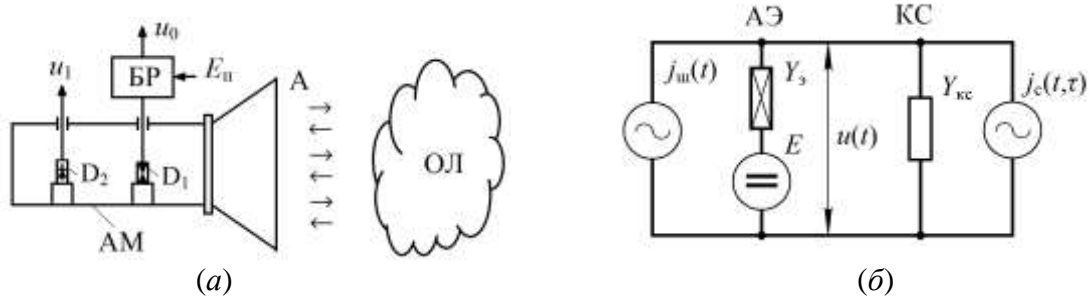


Рисунок 1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы одноконтурного автодинного модуля: А – антенна; АМ – автодинный модуль, БР – блок регистрации сигнала; ОЛ – объект локации.

Полагая в системе (3), (4) $da/dt = 0$ и $a_c(t) = a_s(t) = 0$, 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 автодинного отклика; ψ_1 , θ – углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний, зависящие от внутренних параметров генератора. Полученные 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; $\Delta\omega_{ma} = \Gamma_0 \omega_0 L_a$ – 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» концеп-

⁵ Стратонович, Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. - Москва : Сов. радио, 1961. - 558 с.

ции 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) (сигнальных характеристик) в виде:

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

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

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

где $C_{эkv} = C_{oc} Y_{ад}$ – эквивалентный параметр внешней обратной связи автодинной 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 расчетах 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. Ре-

зультаты 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 этот (модернизированный) метод получил в разделе 2.7. Модернизированный метод А.Н. Малахова на случай АД обеспечивает комплексный учёт как внутренней, так и внешней инерционности автодинной системы «генератор – объект локации» при расчёте автодинных сигналов.

Шумовые характеристики АД с непрерывным излучением без модуляции излучения исследованы в разделе 2.8. Для случая малого сигнала, когда амплитуда автодинного отклика $a_m = \Gamma K_a \ll 1$ и коэффициент K_A в (13) можно положить равным нулю, после нормировки (9) – (11) с учетом шумов имеем следующие выражения, описывающие сигнальные и шумовые характеристики АД:

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

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

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

где индексы в скобках (с+ш) около переменных в (16) – (18) означают, что эти выражения описывают совокупность «сигнал плюс шум»; $a_{\text{ш}}(t) = a_c(t) + \rho a_s(t)$, $\chi_{\text{ш}}(t) = a_s(t) + \gamma a_c(t)$, $p_{\text{ш}}(t) = C_{\text{oc}} \chi_{\text{ш}}(t) / \Gamma_0 L_a$ – составляющие амплитудного, частотного шума генератора и фазы автодинного сигнала 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 (фазы коэффициента отражения $\delta(t, \tau_n)$, соответственно, на 2π) уровни шумов периодически изменяются (см. временные диаграммы на рисунке 2).

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 уровень пика шумов возрастает с приближением величины параметра внешней 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 сильной внешней обратной

связи, когда параметр C_{oc} соизмерим с единицей, 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 $Y_{ад}$ параметра внешней обратной связи. Этот множитель с ростом r_n быстро затухает, достигая некоторого значения «плато».

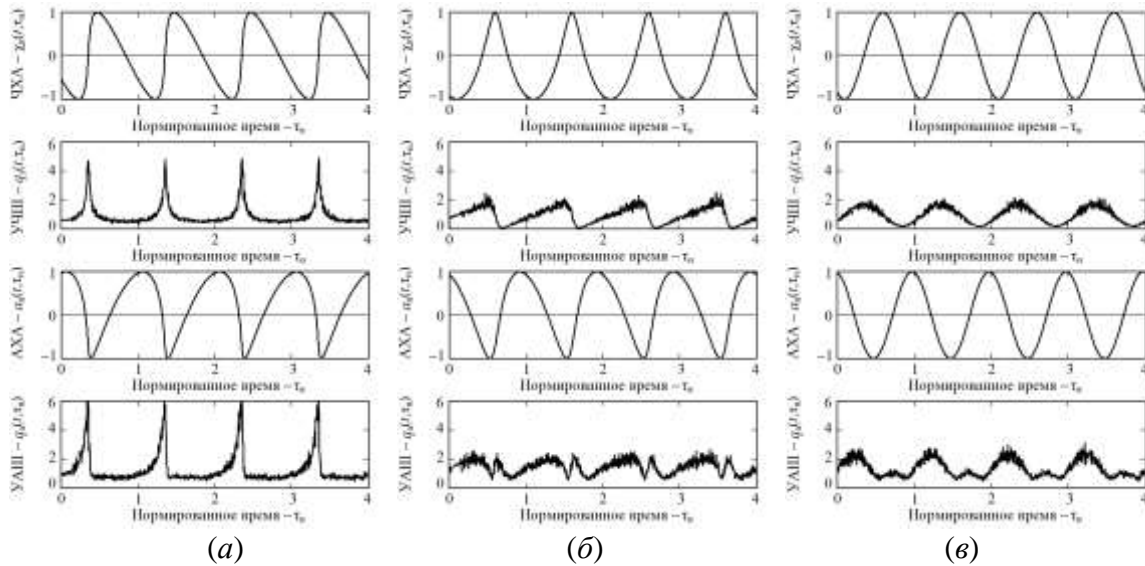


Рисунок 2. Временные диаграммы сигнальных $\chi_n(t, \tau_n)$, $a_n(t, \tau_n)$ и шумовых $q_\chi(t, \tau_n)$, $q_a(t, \tau_n)$ характеристик АД, рассчитанных при значении параметра внешней обратной связи $C_{oc} = 0,8$ и различных значениях нормированного расстояния r_n : $r_n = 0$ (а); $r_n = 0,5$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

В разделе 2.9 выполнено исследование процесса установления автодинного отклика при появлении объекта локации методом пошагового интегрирования уравнений с запаздыванием. На рисунке 3 для случая неподвижного объекта локации, когда время запаздывания τ имеет фиксированные значения, представлены результаты расчета процесса установления автодинного отклика радиоимпульсного генератора. Приведены графики мгновенных значений фазы $\delta(n)$, нормированных относительных амплитуды $a_n(n)$ и частоты $\chi_n(n)$ для различных начальных значений нормированного к периоду колебаний времени $\tau_n = \omega_0 \tau / 2\pi$: $\tau_n = 0,15$ (кривые 1); $\tau_n = 0,35$ (кривые 2); $\tau_n = 0,6$ (кривые 3); $\tau_n = 0,75$ (кривые 4). При этом графики рисунка 3 построены при $C_{oc} = 0,8$, $\gamma = 1$, $\rho = -0,2$ и различных значениях нормированной постоянной времени $\tau_{ан} = \tau_a / \tau$ автодинного отклика: $\tau_{ан} = 0,1$ (а), $\tau_{ан} = 1,0$ (б) и $\tau_{ан} = 10$ (в). По горизонтали на графиках отложены порядковые номера n парциальных отражений (номера шагов) СВЧ излучения, полученного от объекта локации. Каждому n -му шагу соответствует временной интервал с протяжённостью, равной τ , границы которого находятся в промежутке времени $n\tau < t < (n+1)\tau$. Как видно из графиков, на определённых участках значений

дывающая обратная связь, вызывающая «противоположные» воздействия на систему в последующем шаге. В этом случае наблюдается ступенчатый апериодический закон установления автодинного отклика (см. кривые 2). В случае «инерционного» АД, когда выполняется неравенство $\tau_{ан} \gg 1$, в процессе установления автодинного отклика изменения амплитуды $a_n(n)$ сглаживаются, и продолжительность переходного процесса полностью определяется абсолютной величиной постоянной времени τ_a автодинного отклика.

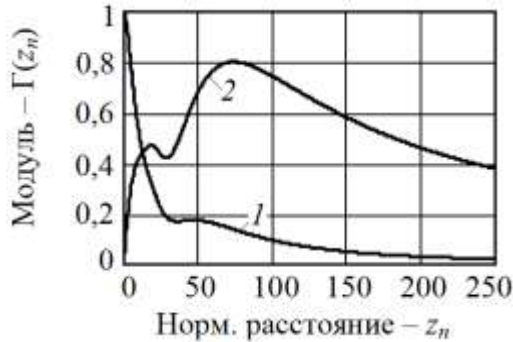


Рисунок 4. Характеристики модуля $\Gamma(z_n)$ коэффициента отражения (кривая 1) и параметра $C_{oc}(z_n)$ внешней обратной связи автодина (кривая 2).

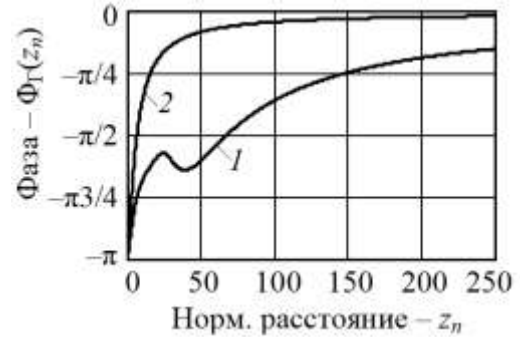


Рисунок 5. Характеристики фазы $\Phi_\Gamma(z_n)$, которые получены для объекта локации с размерами $2d \times 2d = 10\lambda \times 10\lambda$ (кривая 1) и для точечного объекта (кривая 2).

В главе 3 «Развитие теории автодинных систем ближней радиолокации с частотной модуляцией» на основе разработанных выше методов представления функций запаздывающего воздействия отраженного от объекта локации излучения выполнены исследования АСБРЛ 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. Для этого в разделе 3.2 получены для эквивалентной схемы одноконтурного генератора (см. рисунок 6) основные уравнения для анализа АД с ЧМ. Квазистатическое решение этих уравнений, полученное в разделе 3.3, имеет вид:

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

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

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

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

Из выражений (19), (20) видно, что при ЧМ генератора и одновременном воздействии на него отраженного 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.

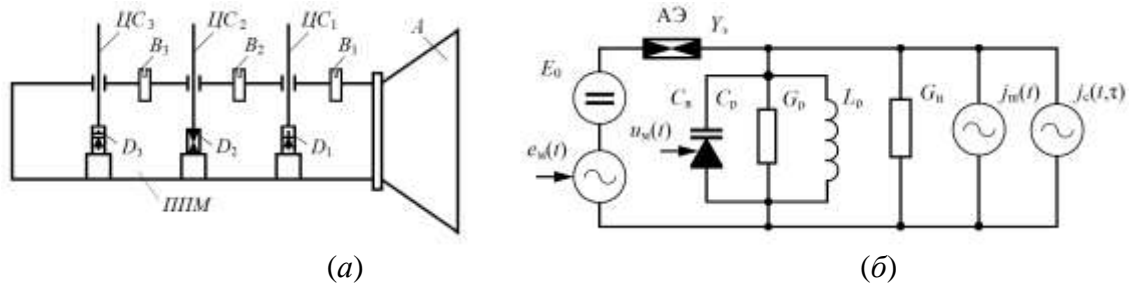


Рисунок 6. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы автодинного модуля с частотной модуляцией: ППМ – приемно-передающий модуль; ЦС – цепи смещения диодов.

Формирование сигналов в АСБРЛ 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:

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

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

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, укладывающихся 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 $C_{\text{ос}} < 1$, находим методом последовательных приближений:

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

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:

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

где $\tau_{0н} = \omega_0 \tau_0 / 2\pi$ – 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; $\chi_{чм} = (\Delta\omega_{чм} / \omega_0)$ – 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 «Новые принципы построения автодинных устройств ближней радиолокации» представлены результаты исследований параметров и характеристик, а также особенностей функционирования автодинных приемо-передающих устройств. Среди них АД со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором. В разделе 4.2 выполнены теоретические исследования стабилизированных АД, получены основные выражения для анализа и расчета их параметров и характеристик. На рисунках 7 и 8 представлены результаты сравнительных экспериментов с использованием нестабилизированного и стабилизированного генераторных модулей 8-мм диапазона, выполненных на диодах Ганна. На рисунке 7 приведены спектрограммы СВЧ колебаний АД, находящихся под воздействием отраженного излучения от движущегося объекта локации при сохранении одной и той же величины затухания, а на рисунке 8 – соответствующие осциллограммы и спектрограммы автодинного отклика.

В разделе 4.3 выполнен анализ АД интерференционного типа, использующего для регистрации сигналов диодные детекторы, помещаемые без развязывающих элементов в передающую линию между генератором и антенной. На рисунке 9 представлены осциллограммы сигналов с выходов диодных детекторов.

В разделе 4.4 выполнены исследования автодинных характеристик системы двух взаимно синхронизированных парциальных генераторов при наличии сильной связи между ними (так называемых, двухдиодных автодинов – ДДА). На рисунке 10 представлен внешний вид ДДА и осциллограммы сигналов, полученные в цепи питания активных элементов.

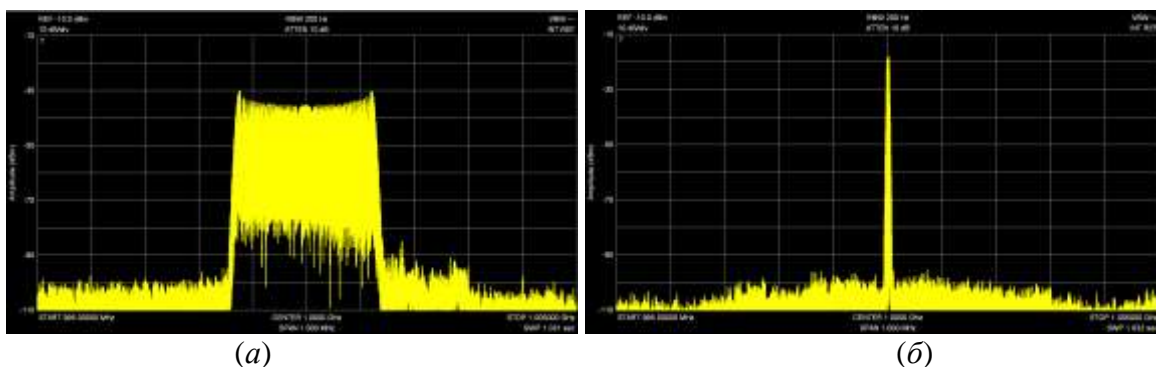


Рисунок 7. Спектрограммы СВЧ колебаний выходных сигналов обычного (а) и стабилизированного (б) автодинов, полученные от движущегося отражателя.

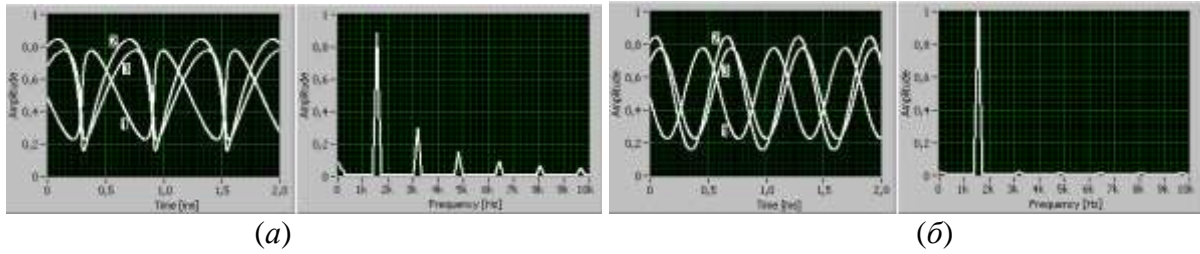


Рисунок 8. Осциллограммы (слева) автодинного отклика по изменению частоты генерации (кривые 1), амплитуды колебаний (кривые 2), сигнала автодетектирования (кривые 3) и спектрограммы (справа) для отклика по изменению амплитуды колебаний обычного (а) и стабилизированного (б) автодинов, полученные от движущегося отражателя.

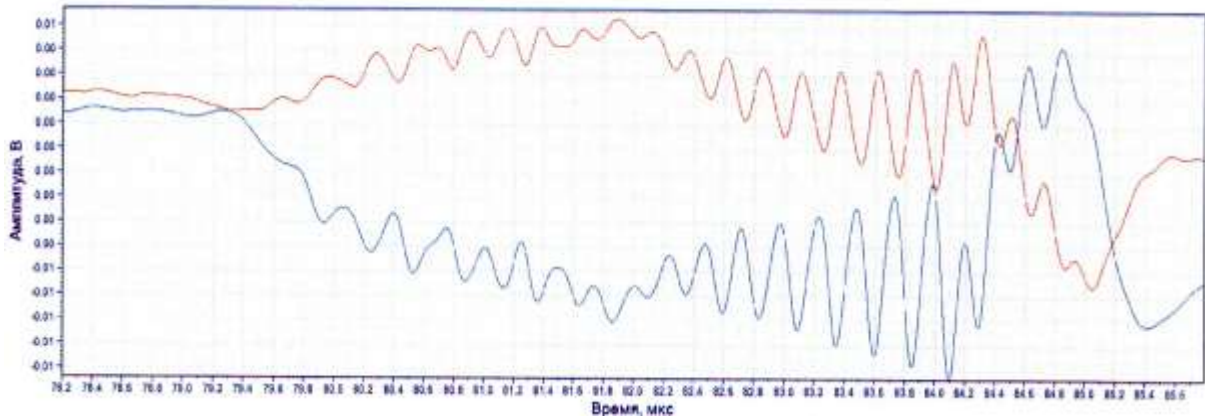


Рисунок 9. Осциллограммы сигналов на выходах детекторов автодинного модуля с двумя детекторными диодами между генератором и антенной.

В разделе 4.5 представлены результаты исследования синхронизированного АД (СХАД) радиосигналом от стороннего генератора в режиме захвата частоты. При этом получена система дифференциальных уравнений для автодинных относительных изменений амплитуды a и абсолютных изменений фазы $\tilde{\varphi}$ колебаний генератора:

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

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

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 с учётом его автодинного усиления; Ω_d – частота Доплера; $k_{\text{вн}}$ – коэффициент, характеризующий относительный уровень внешнего воздействия на генератор; τ_a , τ_φ – постоянные времени изменений (релаксации) амплитуды и фазы соответственно: $\tau_a = Q_{\text{н}} / \alpha_{11} \omega_0$, $\tau_\varphi = Q_{\text{вн}} / k_{\text{вн}} \omega_0 \cos \varphi_0$; φ_0 – установившееся значение разности фаз внешнего воздействия и собственных колебаний АД.

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:

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

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

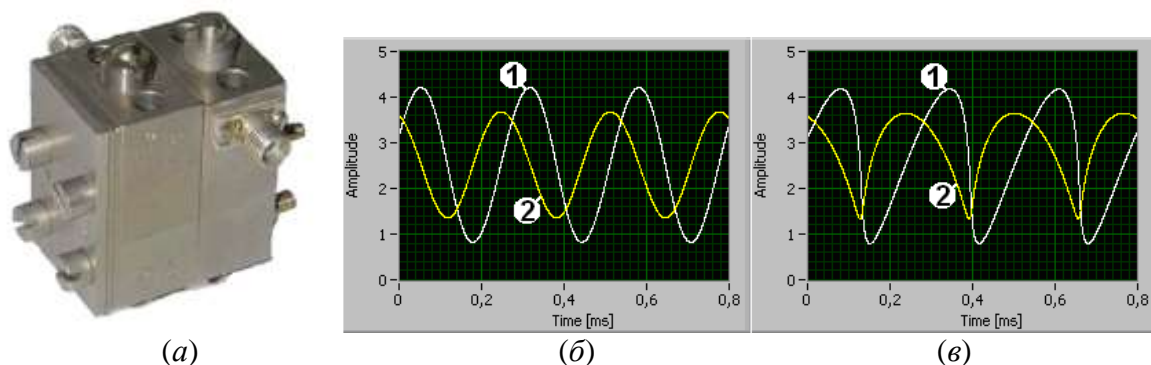


Рисунок 10. Внешний вид (а) и осциллограммы сигналов двухдиодного автодина, полученные в цепи питания первого 1 и второго 2 диодов Ганна при $C_{\text{oc}} \approx 0,08$ (б) и $C_{\text{oc}} \approx 0,8$ (в).

В главе 5 «Применение автодинных устройств в системах ближней радиолокации» дано описание примеров, в которых использованы результаты выполненных выше диссертационных исследований и при этом также получен ряд новых научных результатов. В разделе 5.2 представлены результаты сравнительных испытаний обзорных радио и лазерных локаторов на сортировочных горках, дано описание предлагаемой системы для определения положения вагонов на путях накопления, а также опытных образцов автодинных датчиков и измерителей для решения задач автоматизации технологических процессов на железнодорожных станциях и сортировочных горках (см. рисунок 11).

В разделе 5.3 рассмотрены особенности формирования и обработки сигналов АД при использовании их в качестве дистанционных датчиков вибраций и малых перемещений. В разделе 5.4 предложено для определения параметров вибраций и перемещений объектов локации использовать двухдиодные автодины. Применение двухдиодных автодинов в решении задач диагностики турбоагрегатов, машин и механизмов рассмотрено в разделе 5.5. Моделирование сигналов автодинных датчиков контроля лопаток турбовентиляторных двигателей (ТВРД) выполнено в разделе 5.6. При моделировании в зоне Френеля антенны в качестве модели электромагнитного поля (ЭМП) используем двумерный пучок Гаусса-Эрмита нулевого порядка. Внешний вид объекта моделирования и его модель приведены на рисунке 12.

Применение двухдиодных АД в системах контроля внешних размеров металлических изделий рассмотрено в разделе 5.7, а в разделе 5.8 – представлено описание двух автодинных датчиков для бесконтактного контроля внутренних размеров металлических изделий. В разделе 5.9 приведено описание структурной схемы радиолокационного, в том числе автодинного датчика с манипуляцией частоты для определения параметров движения объектов локации, например, грузовой платформы парашютной си-

стемы относительно поверхности земли. В разделе 5.10 представлены результаты исследований возможности применения автодинного приёмо-передающего модуля в качестве бортового приёмоответчика аэрологического шара-зонда в системе радиозондирования атмосферы. Функциональная схема автодинного приёмо-передатчика (АПП) приведена на рисунке 13.



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

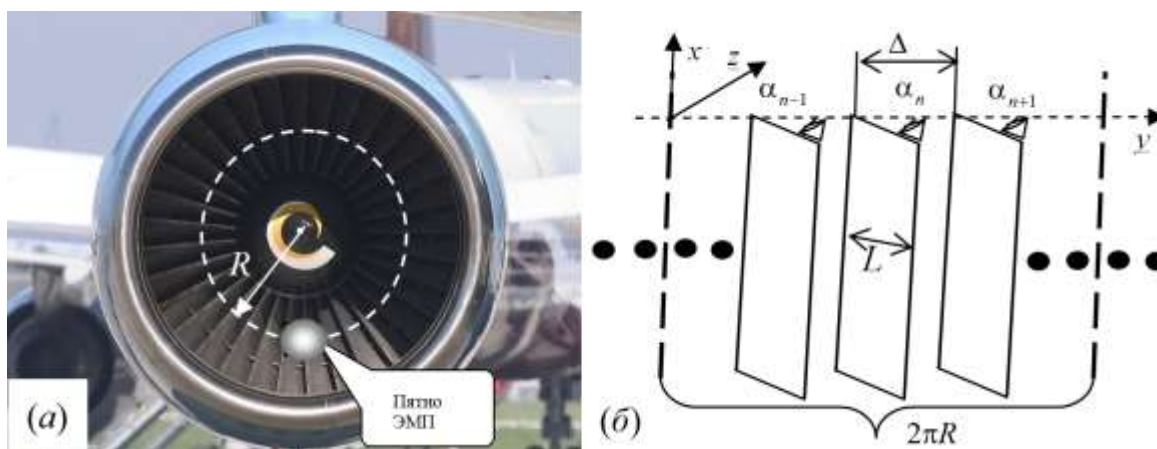


Рисунок 12. Внешний вид лопаток вентилятора ТВРД с пятном ЭМП (а) и развертка сечения лопаток по центру пятна ЭМП в координатах xuz (б).

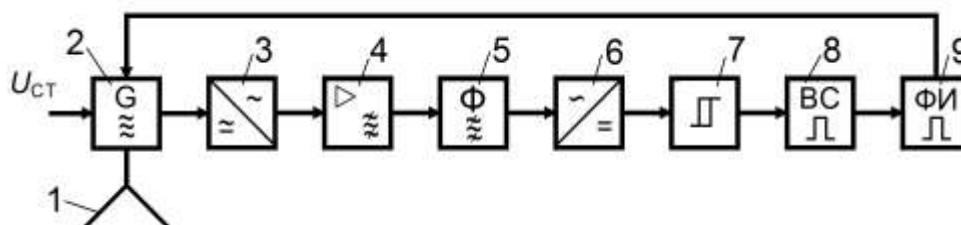


Рисунок 13. Функциональная схема АПП: 1 – антенна; 2 – СВЧ генератор АПП; 3 – блок выделения автодинного сигнала; 4 – усилитель; 5 – полосовой фильтр; 6 – детектор огибающей радиоимпульса; 7 – компаратор; 8 – временной селектор импульсов; 9 – формирователь импульса ответной паузы.

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

2. Анализ методов расчёта автодинных параметров и характеристик показал, что широко используемый квазистатический метод обеспечивает удовлетворительную точность инженерного расчёта автодинного отклика в частотном диапазоне порядка 20% от его граничной частоты. При этом в расчётах не учитываются такие особенности АД диапазона КВЧ, 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 АД 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, учитывающих динамику перемещения объектов локации и собственную инерционность процессов в автодинном генераторе. Разработанные методы устранили отмеченные выше принципиальные ограничения предшествующей теории автодинных систем.

На основе новых методов расчета сигнальных и шумовых параметров и характеристик АД выполнены исследования одноконтурной модели автодинного генератора как системы с запаздывающим воздействием собственного отражённого от объекта локации излучения с учетом их как внутренней, так и внешней инерционности. При этом получены следующие научные результаты и положения.

2.1. Для математической модели АД с непрерывным излучением и одноконтурной колебательной системой, включая АД с ЧМ, предложен новый метод расчёта сигнальных характеристик, основанный на представлении отраженного излучения в виде чистого транспортного запаздывания на время его распространения до объекта локации и обратно. Учет высших членов разложения в ряды Тейлора функций запаздывающего воздействия снимает указанные выше ограничения и обеспечивает более адекватное представление процессов в АД. По сравнению с известными методами он обладает более высокой точностью вычислений и позволяет в своих модификациях учитывать как внешнюю инерционность автодинной системы, связанную со временем распространения излучения до объекта локации и обратно, так и ее внутреннюю инерционность, обусловленную конечным значением постоянной времени автодинного отклика. Данный метод, не требующий интегрирования дифференциальных уравнений автоколебательной системы, учитывает специфические искажения автодинного отклика, обусловленные автодинными изменениями частоты колебаний и частотной дисперсией их девиации, а также внутренние параметры генератора.

Исследования сигнальных характеристик показали, что с увеличением расстояния до отражающего объекта при высоких скоростях его движения, когда время запаздывания отражённого излучения и период автодинного отклика становятся величинами соизмеримыми, степень ангармонических искажений сигналов, которая характеризуется эквивалентным параметром внешней обратной связи автодинной системы, уменьшается. Установлено, что степень искажения сигнальных характеристик, рассчитанных для неизохронных СВЧ генераторов с учетом их внутренней инерционности, зависит как от скорости движения отражающего объекта, так и от направления его перемеще-

ния.

Такие внутренние свойства СВЧ генераторов, как неизохронность, неизодромность и частотное детектирование, в условиях быстрого перемещения объекта локации оказывают влияние также на дополнительные (динамические) фазовые смещения компонентов автодинного отклика. Однако влияние этих внутренних свойств генератора на форму автодинного отклика при высоких скоростях объектов локации проявляется лишь в условиях больших значений эквивалентного параметра $C_{\text{экв}}$ внешней обратной связи, соизмеримых с единицей.

В случае слабой внешней обратной связи, когда значение параметра $C_{\text{ос}}$ внешней обратной связи значительно меньше единицы, сигнальные характеристики имеют вид гармонической функции, а шумовые характеристики являются стационарными. В случае сильной внешней обратной связи, когда величина $C_{\text{ос}}$ соизмерима с единицей, сигнальные характеристики приобретают характерные ангармонические искажения, а уровни шумов периодически изменяются. При этом максимумы уровней шумов совпадают и соответствуют области «крутого» перехода частотной характеристики через нуль, а уровень пика шумов резко возрастает с приближением величины параметра $C_{\text{ос}}$ внешней обратной связи к единице. Участкам с «пологим» переходом частотной характеристики соответствует «плато» с минимумом частотных и амплитудных шумов, которые находится 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 $r_n \ll 1$, при условиях сильной внешней обратной связи, когда параметр $C_{\text{ос}}$ соизмерим с единицей, соответствуют случаю, когда время запаздывания отраженного излучения значительно меньше периода автодинного сигнала. С увеличением нормированного расстояния r_n высота пиков среднеквадратических уровней шума существенно снижается. Особенно заметна такая тенденция в первой рабочей зоне, где $0 \leq r_n \leq 1$. В случае, когда r_n кратно целому числу ($r_n = 1, 2, \dots$), пики среднеквадратических уровней шума практически отсутствуют и уровни шума соответствуют уровням автономного генератора.

Выявленные особенности формирования автодинных и шумовых характеристик генераторов необходимо учитывать при расчёте энергетического потенциала систем и при обработке выходных сигналов автодинных датчиков и измерителей. Например, при работе АСБРЛ в условиях высокого уровня отраженного излучения и (или) большого расстояния до объекта ангармонические искажения сигналов и зависимость уровня шума АД от положения отражателя могут быть причинами, которые снижают точность измерений параметров движения объектов и ограничивают дальность их действия.

Применение квазистатического метода А.Н. Малахова обеспечивает существенное снижение погрешности вычислений автодинных характеристик с учетом внутренней инерционности генератора при значительном расширении диапазона доплеровских частот, а также учёт дисперсионной зависимости автодинной девиации частоты. При этом разработанный нами метод расчёта динамических характеристик автодинных СВЧ генераторов, основанный на модернизации квазистатического метода А.Н. Малахова, учитывает как внешнюю инерционность автодинной системы, так и инерционность изменений амплитуды колебаний и частотную дисперсию автодинной девиации частоты.

Показано, что уровень искажений характеристик зависит не только от внутренних свойств генератора, величины параметра внешней обратной связи, но и направления движения объекта локации. Анализ тонких особенностей формирования автодинных сигналов в устройствах их обработки с учётом условий устойчивости АД обеспе-

чивает расширение динамического диапазона СБРЛ на 10...20дБ и её функциональных возможностей, например, определением направления движения объектов локации.

Полученные результаты анализа сигнальных и шумовых параметров и характеристик АСБРЛ существенно развивают и дополняют результаты известных исследований, опубликованных в предшествующей литературе.

2.2. В результате исследования динамики установления автодинного отклика методом пошагового интегрирования дифференциальных уравнений с учётом инерционности изменений амплитуды колебаний генератора установлено, что на определённых 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. Поэтому на этих участках значений набега фазы наблюдается релаксационный процесс установления автодинного отклика. На участке спада частотной характеристики, где упомянутая производная отрицательна, и в системе действует отрицательная запаздывающая обратная связь, вызывающая «противоположные» воздействия на систему в последующем шаге. В этом случае наблюдается ступенчатый апериодический закон установления автодинного отклика.

В связи с полученными результатами исследования АД с импульсной модуляцией нами введено понятие продолжительности процесса установления автодинного отклика. Будем говорить об установившемся процессе, если мгновенные значения низкочастотного автодинного отклика достигают своего состояния, при котором последующие парциальные воздействия отражённого излучения не вызывают их изменение в заданное число раз, например 0,1 от амплитуды. В качестве меры продолжительности этого процесса в случае «безынерционного» автодина, когда величины постоянной времени автодинного отклика значительно меньше времени запаздывания отраженного излучения, можно принять число парциальных отражений, т.е. требуемое число шагов процесса установления. В случае «инерционного» АД, когда выполняется обратное неравенство, в процессе установления автодинного отклика продолжительность переходного процесса полностью определяется абсолютной величиной постоянной времени автодинного отклика.

Из результатов исследований переходных процессов в автодинном генераторе следует, что для нормального функционирования радиоимпульсной СБРЛ постоянная времени автодинного отклика генератора должна быть значительно меньше периода автодинного сигнала. Особенно важно учитывать это требование в отношении систем радиоволнового контроля быстропротекающих процессов.

Выполненные исследования динамики установления автодинного отклика с учётом инерционности изменений амплитуды колебаний значительно расширили известные представления о процессах, происходящих в радиоимпульсных СВЧ и КВЧ генераторах при воздействии на них собственного отражённого излучения. Кроме того, полученные результаты позволили показать процесс зарождения и причины появления квазихаотизации режима АД при увеличении параметра обратной связи, а также определить более корректно границу, так называемого, «квазистационарного» режима АД, когда на его выходе формируется квазипериодический сигнал доплеровской частоты.

2.3. Выполненные исследования особенностей формирования сигналов от объектов, находящихся в ближней зоне антенны, представлением излучения антенны в виде двумерного пучка Гаусса-Эрмита показали следующее. При использовании СБРЛ для выполнения радиоволновых измерений параметров объектов, находящихся в промежуточной и ближней зоне антенны, необходимо учитывать не только явление «уста-

новления» фазы коэффициента отражения с увеличением расстояния до объекта локации, но и явление дифракции излучения на объекте. В АСБРЛ автодинные изменения частоты генерации вызывают дополнительные вариации фазы коэффициента отражения. Для уменьшения этих вариаций целесообразно применение стабилизированных по частоте генераторов с помощью, например, дополнительного высокочастотного резонатора. Кроме того, перспективным представляется использование двухдиодных и синхронизированных АД.

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

3.1. Выполненные расчёты и экспериментальные исследования сигналов АСБРЛ с ЧМ показали, что частота автодинного сигнала как для движущегося, так и неподвижного отражателя при выполнении условия $C_{oc} < 1$ точно соответствует частоте преобразованного сигнала, получаемого в случае гомодинной системы. Однако наличие искажений и обогащение спектра автодинных сигналов, а также особенности поведения шумовых характеристик в случае, когда параметр внешней обратной связи C_{oc} соизмерим с единицей, требуют своего учёта в устройствах обработки сигналов.

3.2. Установлено, что в первой рабочей зоне на малых расстояниях до отражающего объекта, где выполняется сильное неравенство $r_n \ll 1$ и, соответственно, время запаздывания отражённого излучения значительно меньше периода автодинного сигнала ($\tau \ll T_a$), полученные результаты анализа стыкуются с результатами предшествующих исследований. В этой зоне при величине параметра внешней обратной связи C_{oc} соизмеримой с единицей наблюдаются ангармонические искажения автодинных сигналов, обогащение их спектра и появление периодической нестационарности уровня шумов, как и в АСБРЛ без модуляции частоты. При этом «крутым» переходам частотной характеристики через нуль соответствуют максимумы уровня шума, которые могут в несколько раз превышать уровень шумов автономного генератора. «Пологим» переходам соответствуют минимальные уровни частотных и амплитудных шумов, которые в 1,5...2 раза ниже уровня шума автономного генератора. Данная периодичность соответствует набегу фазы отражённого излучения на 2π и проявляется как при изменении частоты излучения вследствие ЧМ, так текущего расстояния до объекта локации вследствие его перемещения. Периодическая зависимость уровня шума АСБРЛ с ЧМ при сильной обратной связи свойственна всем видам модулирующих функций и не зависит от направления движения объекта локации. При этом уровень максимума шумов значительно возрастает с приближением величины параметра внешней обратной связи к единице.

3.3. С увеличением нормированного расстояния r_n при гипотетическом сохранении амплитуды отражённого от объекта локации излучения значение

эквивалентного параметра $C_{\text{экв}}$ внешней обратной связи автодинной системы значительно уменьшается. При этом угол динамического смещения фазы $\Delta\delta_d$ автодинного отклика после его существенных вариаций в первой рабочей зоне получает установившееся значение в последующих зонах. Это приближает фазовую характеристику АД к линейной зависимости от времени запаздывания, что значительно уменьшает степень ангармонических искажений сигналов. Особенно заметна данная закономерность в первой рабочей зоне при приближении значения нормированного расстояния r_n к единице. В случае значений нормированного расстояния r_n , кратных целому числу, сигнальные характеристики имеют практически синусоидальный вид. Расчёты показали, что при величине параметра внешней обратной связи, превышающей его граничное значение даже в несколько раз, в высших рабочих зонах АСБРЛ с ЧМ может обеспечиваться устойчивая работа генератора с формированием сигналов без ангармонических искажений.

3.4. Полученные экспериментальные данные подтвердили адекватность разработанной выше математической модели для анализа и расчёта сигнальных, спектральных и шумовых характеристик АСБРЛ с ЧМ. Дополнительным подтверждением валидности разработанной модели АСБРЛ с ЧМ является успешное функционирование ряда систем, созданных на базе СВЧ и КВЧ генераторов на диодах Ганна 8-мм диапазона.

3.5. В свете выполненных исследований представляется перспективным использование в АСБРЛ с ЧМ генераторов, стабилизированных посредством перестраиваемого по частоте внешнего высокочастотного резонатора. По сравнению с обычными генераторами стабилизированные генераторы, как показано в главе 4, благодаря значительно меньшей автодинной девиации частоты обеспечивают улучшение формы сигнальных характеристик при тех же уровнях отражённого излучения. Кроме того, их известное достоинство, – пониженный уровень частотного шума, способствует исключению периодической нестационарности уровня шумов, что является существенным для улучшения качественных показателей АСБРЛ с ЧМ и расширения области их применения.

3.6. Полученные результаты анализа сигнальных и шумовых параметров и характеристик АСБРЛ с ЧМ существенно развивают и дополняют результаты известных исследований, опубликованных в предшествующей литературе.

4. В плане поиска новых принципов построения автодинных устройств для систем ближней радиолокации в диссертации выполнен комплекс исследований, которые позволили получить следующие научные результаты и положения.

4.1. В результате выполненных исследований АД, стабилизированного внешним дополнительным высокочастотным резонатором, установлено, что основные параметры стабилизированных АД (САД), такие как коэффициенты автодетектирования и автодинного усиления у них практически такие же, как и у обычных (не стабилизированных) АД. Кроме того, им также свойственны искажения сигналов, как и обычным АД, но уровень этих искажений существенно ниже вследствие меньшего значения величины автодинной девиации частоты, что существенно расширяет динамический диапазон АСБРЛ.

Степень уменьшения девиации частоты и параметра внешней обратной связи САД предложено характеризовать коэффициентом стабилизации, который показывает во сколько раз величина автодинной девиации частоты исследуемого генератора меньше, чем у обычного АД при одном и том же уровне отражённого излучения. Данный параметр, характеризующий выигрыш САД по ряду основных параметров автодинной системы, является одним из важнейших.

Стабилизация частоты АД с помощью дополнительного высокочастотного ре-

зонатора способствует исключению нестационарности шумовых характеристик и улучшению иных технических показателей автодинных систем при одном и том же уровне отражённого излучения. Например, введением некоторой расстройки стабилизирующего резонатора относительно частоты генерации можно несколько увеличить потенциал системы, поскольку при этом амплитудная и автодетекторная чувствительность АД к отражённому сигналу возрастает, а уровень шумов сохраняется практически прежним.

Полученные результаты исследований показали преимущества АД со стабилизацией частоты перед обычными (нестабилизованными) АД и целесообразность разработки и производства новых типов монолитных и гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона, стабилизированных дополнительным высокочастотным резонатором.

4.2. Разработана математическая модель автодинного приемо-передатчика с внешними детекторами. Получены основные соотношения для расчёта его сигнальных характеристик при регистрации сигналов в цепи питания генератора и с помощью внешних детекторов, устанавливаемых в передающей линии между генераторной секцией и антенной.

Из результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований следует, что формирование сигналов, снимаемых с внешнего детектора, а также их фазовые сдвиги относительно сигналов, регистрируемых в цепи питания генератора, зависят как от величины коэффициента автодинного усиления генератора, так и от фазового расстояния между секциями.

Установлено, что в автодинном модуле с двумя внешними детекторами, помещёнными между генератором и антенной, в случае высокого значения коэффициента автодинного усиления оба сигнала, регистрируемые на выходах детекторов, находятся в одной фазе. В случаях малой величины коэффициента автодинного усиления выходные сигналы детекторных диодов имеют разность фаз, которая определяется относительным разносом между диодами в передающей линии. Аналогичная зависимость сдвига фаз сигналов имеет место в случае развязки генераторной и детекторной секций. Тогда при условии разноса диодов между собой на расстояние, кратное нечётному числу в одну восьмую длины волны излучения в линии передачи, сдвиг фаз между сигналами находится в квадратуре.

Для уменьшения степени искажения сигналов целесообразно снижение величины автодинной девиации частоты. Это достигается или увеличением эквивалентной добротности колебательной системы (применением стабилизации частоты с помощью дополнительного высокочастотного резонатора) или установкой развязывающего вентиля между секцией генератора и диодной секцией. Кроме того, для этой цели возможно применение АД с синхронизацией частоты от дополнительного маломощного СВЧ генератора.

Из результатов выполненных исследований следует вывод о перспективности разработки интегральных автодинных модулей с квадратурным детектированием. При этом необходимо дополнительно решить конструкторско-технологические вопросы, связанные с освоением монолитных интегральных схем квадратурных детекторов, а также СВЧ генераторов на диоде Ганна, интегрированных с высокочастотным резонатором. Это позволит свести технологию изготовления приёмопередающих модулей к принципу «поставил и забыл», что значительно снижает их себестоимость.

4.3. В результате проведенных исследований автодинного эффекта системы двух взаимно синхронизированных парциальных генераторов при сильной связи, установлено следующее.

Воздействие на один из генераторов собственного излучения, полученного от

движущегося отражающего объекта, вызывает формирование автодинного отклика в виде периодических изменений параметров автоколебательной системы, таких как, амплитуд колебаний и величин смещения на активных элементах парциальных генераторов, а также разности фаз этих колебаний и частоты генерации.

Автодинные изменения частоты генерации системы связанных генераторов в процессе перемещения отражающего объекта вызывают нелинейность набега фазы отраженного излучения и, соответственно, ангармонические искажения всех указанных изменений параметров автоколебательной системы, как и у обычных автодинов. Однако степень и вид этих искажений в данной системе зависят от амплитудных и фазовых соотношений компонентов автодинного отклика, и определяются значениями внутренних параметров парциальных генераторов, таких как, их неизохронность, амплитудное и частотное детектирование. Кроме того, степень искажений определяется также условиями внутренней взаимной связи между парциальными генераторами, значением относительной расстройки собственных частот парциальных генераторов и величиной параметра внешней обратной связи системы «генератор – объект локации».

Установлено, что парциальный генератор, у которого собственная добротность колебательной системы или выходная мощность больше, чем у второго парциального генератора, является стабилизирующим, он вызывает уменьшение величины автодинной девиации частоты генерации и, тем самым, степени искажения сигналов.

По сравнению с обычными автодинными системами, выполненными на основе одиночных генераторов, системы взаимно синхронизированных АД обладают рядом положительных свойств. Благодаря значительно меньшей девиации частоты они обеспечивают улучшение формы сигналов при тех же уровнях отраженного излучения и расширение динамического диапазона автодинной системы.

Формирование сдвинутых по фазе двух сигналов дает возможность определять знак радиальной скорости отражающих объектов и использовать методы квадратурной обработки сигналов. Данные возможности значительно расширяют область применения АД при решении задач радиоволнового контроля параметров движения в физике быстротекущих процессов, ближней радиолокации и измерительной технике.

4.4. Разработана математическая модель автодинного приемо-передатчика, стабилизируемого по частоте сигналом от дополнительного генератора. Получены основные соотношения для расчета его сигнальных характеристик как при квазистатически медленном перемещении объекта локации, так и при высоких скоростях движения, когда период автодинного сигнала соизмерим с постоянными времени автодинного отклика. При этом получены следующие научные результаты.

Установлено, что синхронизация АД от внешнего генератора исключает характерные обычным (нестабилизированным) АД ангармонические искажения сигналов, что способствует расширению их динамического диапазона. Показано, что в синхронизированном АД путем внесения начальной расстройки между частотами внешнего генератора и собственной частотой АД в пределах полосы синхронизации имеется возможность значительного увеличения коэффициента передачи автодинного сигнала по сравнению с обычными АД.

Установлено также, что инерционность процесса фазовой синхронизации генератора вызывает неравномерность формирования амплитудно-частотных характеристик коэффициента передачи синхронизированного АД по изменению амплитуды колебаний в области высоких частот. Однако эта неравномерность при правильном выборе параметров синхронизации не является препятствием для регистрации сигналов во всем диапазоне существующих на практике скоростей движения объектов локации.

Результаты выполненных экспериментальных исследований подтвердили адек-

ватность разработанной математической модели синхронизированного АД в отношении анализа автодинных параметров и характеристик как при квазистатически малых, так и больших скоростей движения объектов локации. Из результатов выполненных исследований следует также вывод о перспективности разработки интегральных автодинных модулей с синхронизацией частоты от дополнительного маломощного генератора. Особую актуальность такое техническое решение имеет в диапазоне миллиметровых и более коротких волн.

5. В плане практического применения результатов диссертации выполнен ряд исследований прикладного характера и разработаны автодинные радиолокаторы, датчики и измерители различного назначения. При этом получены новые научные результаты, состоящие в следующем.

5.1. Приемно-передающий автодинный модуль, выполненный на базе двух взаимно синхронизированных генераторов, один из которых связан с дополнительным высокодобротным резонатором, а другой находится под воздействием отраженного от объекта локации излучения, обеспечивает повышение стабильности частоты как за счет взаимной синхронизации парциальных генераторов, так и действия стабилизирующего резонатора. Степень искажений сигналов такого модуля из-за автодинных изменений частоты может быть получена значительно меньшей, чем у обычного автодина, что соответственно расширяет динамический диапазон АСБРЛ и рабочую дальность ее действия.

Применение двухдиодных АД в системах ближней радиолокации обеспечивает улучшение их качественных показателей и расширение функциональных возможностей. Наличие двух автодинных сигналов с относительным сдвигом фаз 90° позволяет использовать их квадратурную обработку и определять направление движения объектов локации. В качестве примеров такого использования можно указать автодинные датчики для диагностики состояния турбоагрегатов и лопаток турбовентиляторных двигателей, а также измерения параметров технологических процессов: вибраций и перемещений, внутренних и наружных размеров металлических изделий, параметров движения локомотива относительно полотна дороги, вагонов на сортировочной горке и многих других.

5.2. На основе результатов выполненных исследований особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных генераторов сформулирован ряд общих положений и рекомендаций при использовании различных автодинных приемопередатчиков в приборах и устройствах диагностики, а также контроля и измерения параметров технологических параметров:

– при проведении контроля виброперемещений удалённых объектов и в условиях высокого уровня отражённого излучения необходимо учитывать возможность появления специфических искажений дискриминационной характеристики;

– правильным выбором рабочей точки АД в условиях искажений дискриминационной характеристики можно получить выигрыш в динамическом диапазоне по сравнению с гомодинными датчиками. При этом особый интерес представляет вариант регистрации автодинного сигнала по изменениям частоты, обеспечивающий более высокую линейность дискриминационной характеристики и почти двукратный выигрыш по максимальной величине амплитуды вибраций, хотя техническая реализация этого варианта представляется наиболее сложной;

– для исключения или значительного уменьшения искажений дискриминационной характеристики и улучшения ряда параметров АД целесообразно применение стабилизации частоты СВЧ и КВЧ генераторов, например, с помощью внешнего высокодобротного резонатора. Такое решение особенно оправдано в случае реализации АД с регистрацией сигнала по изменению амплитуды колебаний или сигнала автодетектиро-

вания, как наиболее простого в конструктивном отношении. В таком случае характеристики автодинного датчика максимально приближаются к характеристикам датчиков с гомодинным построением приёмо-передатчика;

– при проведении контроля малых перемещений и вибраций с помощью автодинных датчиков необходимо учитывать возможность появления также явления зависимости уровня шума АД от выбранной рабочей точки. При правильном выборе рабочей точки можно получить существенный выигрыш в разрешающей способности и динамическом диапазоне АД. Особый интерес при этом представляют рабочие точки с пониженной крутизной дискриминационной характеристики, обеспечивающей более высокую её линейность и меньший уровень шумов.

– благодаря формированию двух ортогональных сигналов и значительно меньшей девиации частоты генерации двухдиодные АД обеспечивают повышение точности измерений и расширение функциональных возможностей приборов на их основе. Например, возможно создание радиоволновых измерителей с автоматической калибровкой, исключающих влияние изменений уровня отраженного СВЧ излучения на точность измерений и приборов, у которых отсутствует требование к выбору рабочей точки.

5.3. В ходе выполнения диссертационных исследований предложен способ и устройство радиолокационного датчика с манипуляцией частоты при непрерывном излучении. В этом устройстве могут использоваться приёмо-передающие устройства как с гомодинным, так и автодинным построением. Датчик предназначен для обнаружения движущихся объектов локации, измерения расстояния до них, а также определения скорости и направления движения, в частности, для систем автоматизированного управления снижением грузовой платформы парашютной системы.

5.4. Полученные результаты выполненных исследований АД дали положительный ответ на вопрос принципиальной возможности замены свёрхрегнеративного приёмопередатчика на автодинный в перспективных системах радиозондирования атмосферы. В ходе выполнения этих исследований предложена новая структурная схема бортового приёмответчика для аэрологического радиозонда.

Таким образом, показана перспективность применения стабилизированных по частоте внешним резонатором, двухдиодных и синхронизированных АД в различных СБРЛ и ССБРЛ, предназначенных для решения задач обнаружения, измерения параметров движения объектов локации, а также радиоволнового контроля параметров технологических процессов и диагностики.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования

Таким образом, результаты диссертационных исследований показали перспективность дальнейших исследований АД с применением математического аппарата систем с запаздывающим воздействием. Данные перспективы связаны с более точным расчетом параметров и характеристик АД, в том числе энергетического потенциала системы при заданном динамическом диапазоне уровней воздействия отраженного излучения, а также анализом шумовых характеристик с учетом флуктуаций источника смещения. Данные исследования необходимы для разработки инженерных методов расчёта автодинных режимов работы генераторов, дальнейшего улучшения качественных показателей СБРЛ, выполненных на основе АД с различными видами модуляции и типами АЭ, и расширения области их применения. При этом в качестве АЭ перспективных автодинных модулей целесообразно использование не только ганновских структур, но и полевых транзисторов, частота генерации которых на сегодня значительно превосходит частотный диапазон диодов Ганна и ЛПД.

Полученные результаты исследований показали преимущества АД со стабилизацией частоты дополнительным внешним высокочастотным резонатором, АД с внешними детекторами, взаимно синхронизированных АД и АД с внешней синхронизацией в режиме захвата частоты и целесообразность разработки и производства новых типов монолитных и гибридно-интегральных автодинных модулей СВЧ и КВЧ диапазонов.

В качестве колебательной системы таких АД представляется интересным применение интегрированных с АЭ генератора высокочастотных резонансных структур, выполненных в виде распределённых брэгговских отражателей. Данная структура, широко используемая в настоящее время в лазерах, обеспечивает, с одной стороны, стабилизацию частоты генерации благодаря ее высокой частотной селективности и, с другой стороны, – возможность параметрического «электронного» управления частотой генерации. Однако вопрос конструкторско-технологического воплощения этой идеи требует своего дополнительного изучения.

Кроме того, перспективным представляется продолжение исследований АД на основе взаимно синхронизированных генераторов в плане возможностей их функционирования в составе ФАР. Интерес представляет также изучение автодинных свойств синхронизированных генераторов с учетом собственных шумов и шумов сигнала внешнего воздействия, а также режима биений, когда частота сигнала внешнего генератора находится за пределами полосы захвата.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

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.
Носков В.Я., **Игнатков К.А.** Динамика формирования автодинного отклика СВЧ генераторов // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2013. Т. 56, № 5. С. 21–41. Е
2. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Dynamic features of autodyne signals // *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 4, p. 420–428. (WoS) 0,56 п.л./0,28 п.л.
Носков В.Я., **Игнатков К.А.** Динамические особенности автодинных сигналов // *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56, № 4. С. 56–64.
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. Ermak G.P., Vasiliev A.S., Varavin A.V., Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Radar sensors for hump yard and rail crossing applications // 8-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'13). – Kharkov, Ukraine, 2013. P.337–339; (Scopus) 0,18 п.л./0,03 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.
Носков В.Я., **Игнатков К.А.** О применимости квазистатического метода анализа автодинных систем // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. – 2014. – Т. 57, № 3 – С. 44–56.

6. Иванов В.Э. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России / Иванов В.Э., Гусев А.В., **Игнатков К.А.**, Кудинов С.И., Малыгин И.В., Носков В.Я., Плохих О.В., Рысев В.В., Черных О.А. // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 9. С. 3–49; 2,93 п.л./0,32 п.л.
7. 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.
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.
Носков В.Я., **Игнатков К.А.** Шумовые характеристики автодинов со стабилизацией частоты внешним высокодобротным резонатором // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 9. С. 905–918.
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.
Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Применение двухдиодных автодинов в устройствах радиоволнового контроля размеров изделий // Измерительная техника. 2016. № 7. С. 24–28
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. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Calculation of autodyne radar noise parameters // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016. E-26. P.1–4; (Scopus, WoS) 0,25 п.л./0,06 п.л.
14. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P. Particularities of double-diode autodyne characteristics // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016. A-23. P.1–3; (Scopus, WoS) 0,18 п.л./0,04 п.л.

15. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P., Varavin A.S., Fateev A.V. Application of double-diode autodynes in control systems for technological processes // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016, E-7. P.1–3; (Scopus, WoS) 0,18 п.л./0,03 п.л.
16. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Mathematical model of FM autodyne radar // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016. A-25. P.1–4; (Scopus, WoS) 0,25 п.л./0,05 п.л.
17. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Main expressions for analysis of signals and noise of autodyne FM radar // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter & Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016. A-9. P.1–4; (Scopus, WoS) 0,25 п.л./0,05 п.л.
18. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Peculiarities of signal and noise characteristics of FMCW autodyne radar // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter & Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016. A-10. P.1–4; (Scopus, WoS) 0,25 п.л./0,05 п.л.
19. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P., Fateev A.V., Varavin A.V. Experimental studies of the 8-mm Gunn diode autodynes // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016. E-8. P.1–2; (Scopus, WoS) 0,12 п.л./0,02 п.л.
20. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Mathematical model of a double-diode autodyne // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16). – Kharkov, Ukraine, 2016. E-28. P.1–3; (Scopus, WoS) 0,18 п.л./0,03 п.л.
21. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P. Features of autodynes taking into consideration the noise of a power supply // 13-th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering APEIE-2016. Novosibirsk, 2016. Vol. 1. Part 1. P.492–496; (Scopus) 0,31 п.л./0,15 п.л.
22. **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.
23. 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.
Носков В.Я., Васильев А.С., Ермак Г.П., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2017. – Т. 60, № 3 – С. 154–165.

24. 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.
25. 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.
26. Ermak G.P., Vasiliev A.S., Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Smolskiy S.M. Influence of the autodyne oscillator coupling degree with an antenna upon its transfer and noise characteristics // *XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. – Kyiv, Ukraine, 2017. P.348–353; (Scopus, WoS) 0,37 п.л./0,06 п.л.
27. Ermak G.P., Vasiliev A.S., Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Smolskiy S.M. Signal analysis of a double-diode autodyne // *XI International Conference Antenna Theory & Techniques (ICATT)*. Kyiv, Ukraine, 2017. P.338–342; (Scopus, WoS) 0,31 п.л./0,05 п.л.
28. Ermak G.P., Vasiliev A.S., Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Smolskiy S.M. Autodyne effect application for stability analysis of the steady-state mode of UHF oscillating systems // *XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. – Kyiv, Ukraine, 2017. P.332–337; (Scopus, WoS) 0,37 п.л./0,06 п.л.
29. Kryzhanovskiy V.S., Ermak G.P., Vasiliev A.S., Varavin A. V., Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Smolskiy S.M. Signals from a moving object of autodyne radars with linear frequency modulation // *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*. – Kyiv, Ukraine, 2017. P.93–98; (Scopus, WoS) 0,37 п.л./0,04 п.л.
30. Ermak G.P., Vasiliev A.S., Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Moving object signal peculiarities of an autodyne radar with symmetric saw-tooth FM law // *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*. – Odesa, Ukraine, 2017. P.1–4; (Scopus, WoS) 0,25 п.л./0,06 п.л.
31. Noskov V.Ya., Ivanov V.E., **Ignatkov K.A.**, Kudinov S.I., Chupahin A.P., Smolskiy S.M. Influence of coupling between an oscillator and an antenna on autodyne transponder features in the frequency locking mode // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. – Gelendzhik, Russia, 2017. AHFD-3-8. P.345–348; (Scopus, WoS) 0,25 п.л./0,04 п.л.
32. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Smolskiy S.M. Shtykov V.V. Diffraction influence of reflected emission from the radar object upon autodyne radar signal formation // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. – Gelendzhik, Russia, 2017. EMWS-3-6. P.209–212; (Scopus) 0,25 п.л./0,06 п.л.
33. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.** Chupahin A.P. Autodyne Effect of the System Involving Two Mutually Synchronized Oscillators under Strong Coupling // *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.
Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Автодинный эффект системы двух взаимно синхронизированных генераторов при сильной связи // *Радиотехника и электроника*. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 200–208.

34. 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.
35. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Smolskiy S.M. Shtykov V.V. Signal modeling of the autodyne short-range radar system at presence of the radar target in the antenna near-zone // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russia, 2018. P.91–95; (Scopus) 0,31 п.л./0,07 п.л.
36. Mirsaitov F.N., **Ignatkov K.A.** Gas turbine engine in-flight diagnostics using 3D vibration spectra // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – Yekaterinburg, Russia, 2018. P.275–278; (Scopus) 0,25 п.л./0,12 п.л.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Shaydurov K.D. Autodyne signal features of frequency-locked microwave oscillators // ITM Web of Conferences. Vol. 30, 2019. 29th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019). No. 12012. 7 p. Applied Aspects of Microwave Technology. Published online 27 November 2019. ; (WoS) 0,43 п.л./0,14 п.л.
42. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Shaydurov K.D. Dynamic characteristics of frequency-locked autodynes // ITM Web of Conferences. Vol. 30, 2019. 29th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019). No. 12009. 7 p. Applied Aspects of Microwave Technology. Published online 27 November 2019. ; (WoS) 0,43 п.л./0,14 п.л.
43. 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.

44. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Shaidurov K.D. Autodyne Effect in Microwave Oscillators with Injection Locking // Journal of Communications Technology and Electronics (Radio-tekhnika i Elektronika), 2020, vol. 65, no. 6, pp. 651–658. (Scopus) 0,56 п.л./0,18 п.л.
Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Шайдуров К.Д. Автодинный эффект СВЧ генераторов с внешней синхронизацией // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 6. С. 612–620.
45. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Shaidurov K.D., Ermak G.P., Vasiliev A.S. The dynamics of autodyne signal and noise characteristic formation at high target speeds // Telecommunication and Radio Engineering, 2020, vol. 79, no. 6, P.493–508; (Scopus) 1 п.л./0,2 п.л.

Патенты РФ:

46. Патент РФ RU2578703C1 от 27.03.2016. Бюлл. № 9-2016. Система определения координат вагонов в парке станции / В.Я. Носков, Л.Г. Аверьянов, **К.А. Игнатков**. МКИ B61L 25/02. (7 с.)
47. Патент РФ RU2624993C1 от 30.05.2016. Бюлл. № 20-2017. Автодинный приёмопередатчик системы радиозондирования атмосферы / В.Я. Носков, В.Э. Иванов, **К.А. Игнатков**, С.И. Кудинов, А.В. Гусев. МКИ G01S13/74. (12 с.)
48. Патент РФ RU2634546C1 от 30.05.2016. Бюлл. № 31-2017. Автодинный датчик для бесконтактного измерения отклонений от номинального значения внутренних размеров металлических изделий / В.Я. Носков, **К.А. Игнатков**, А.П. Чупахин. МКИ G01B 15/00. (11 с.)
49. Патент РФ RU2634785C1 от 30.05.2016. Бюлл. № 31-2017. Автодинный измеритель отклонений от номинального значения внутренних размеров металлических изделий / В.Я. Носков, **К.А. Игнатков**, А.П. Чупахин. МКИ G01B 15/00. (15 с.)
50. Патент РФ RU2695799 от 29.07.2019. Бюлл. № 22-2019. Способ определения параметров движения объектов локации в радиолокационных датчиках с частотной манипуляцией непрерывного излучения радиоволн и устройство для его реализации / В.Я. Носков, **К.А. Игнатков**. МКИ G01S 13/50, G01S 13/32, G01S 13/56. (20 с.)

Другие публикации:

51. **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.
52. 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; 0,43 п.л./0,14 п.л.
53. Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Анализ сигналов от движущегося объекта автодинных локаторов с линейными видами модуляции частоты // Уральский радиотехнический журнал. 2017. Т. 1. № 1. С.25–54; 1,87 п.л./0,62 п.л.

54. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Fateev A.V., Smolskiy S.M. Signals features from distributed targets of autodyne SRR with simultaneous pulse amplitude and linear frequency modulations // *Visnik NTUU KPI, Ser. Radiotekh. Radioaparotobuduv.* 2017. № 71. P.28–35; 0,5 п.л./0,08 п.л.
55. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Mishin D.Ya., Smolskiy S.M., Chupahin A.P. Signal and noise parameters of autodynes with the soft impedance characteristic of the active element (review) // *Infocommunications and Radio Technologies.* 2018. Vol. 1. № 1. P.29–47; 1,18 п.л./0,23 п.л.
56. Носков В.Я., Смольский С.М., **Игнатков К.А.**, Чупахин А.П. Сигналы автодинных модулей с внешним детектированием // *Уральский радиотехнический журнал.* 2018. Т. 2. № 4. С.20–40; 1,31 п.л./0,32 п.л.
57. Носков В.Я., **Игнатков К.А.**, Шайдуров К.Д. Определение динамических параметров автодинов методом биений // *Уральский радиотехнический журнал.* 2019. Т. 3. № 3. С.261–285; 1,56 п.л./0,52 п.л.
58. Noskov V.Ya., **Ignatkov K.A.**, Chupahin A.P., Vasiliev A.V., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation // *Visnik NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.* 2019. № 67. P.50–57; 0,5 п.л./0,08 п.л.
59. Носков В.Я., Смольский С.М., **Игнатков К.А.** Влияние сопутствующей модуляции частоты колебаний амплитудно-модулированного генератора на формирование автодинных сигналов // *Уральский радиотехнический журнал.* 2020. Т. 4. № 1. С.51–83; 2,06 п.л./0,68 п.л.

Материалы еще 47 докладов опубликованы на прочих региональных и отраслевых конференциях.

Подписано в печать __.__.20__. Формат 60×84 ¹/₁₆
Бумага для множительных аппаратов. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 2,0. Тираж _____ экз. Заказ № _____