

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ
Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций

На правах рукописи

Шайдуров Кирилл Дмитриевич

Динамика формирования сигнальных и шумовых
характеристик автодинных радиолокаторов
с амплитудной и частотной модуляцией

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Екатеринбург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	стр. 4
Глава 1. Системы ближней радиолокации (СБРЛ) с амплитудной (АМ) и частотной (ЧМ) модуляцией	16
1.1. Введение	16
1.2. Автодинные СБРЛ с амплитудной модуляцией	16
1.3. Автодинные СБРЛ с автомодуляцией	19
1.4. Сигнальные характеристики автодинных СБРЛ с ЧМ	20
1.5. Исследования шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ	26
1.6. Исследования динамических параметров автодинов	29
1.7. Обоснование цели и постановка задач исследований	33
1.8. Выводы	34
Глава 2. Математическая модель для расчета динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ	36
2.1. Введение	36
2.2. Эквивалентная схема и общие уравнения для анализа сигнальных и шумовых характеристик автодинов	37
2.3. Математическая модель автодина в случае одновременно АМ и ЧМ колебаний при произвольном законе модуляции	45
2.4. Общие выражения для расчета сигнальных характеристик автодинов при гармонической АМ и ЧМ	49
2.5. Математическая модель автодина с учетом ЧМ излучения и собственных шумов генератора	52
2.6. Выводы	57
Глава 3. Расчет и анализ динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ	59
3.1. Введение	59
3.2. Анализ влияния паразитной ЧМ на формирование сигнальных характеристик автодина с АМ	59
3.3. Исследование влияния паразитной АМ на формирование сигнальных характеристик автодина с ЧМ	67
3.4. Особенности формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ	74
3.5. Выводы	80
Глава 4. Результаты экспериментальных исследований сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и	

ЧМ	84
4.1. Введение	84
4.2. Результаты исследования сигнальных характеристик автодинов с АМ при наличии сопутствующей ЧМ	84
4.3. Результаты исследования сигнальных характеристик автодинов с ЧМ при наличии сопутствующей АМ	89
4.4. Результаты исследования шумовых характеристик автодинов с ЧМ	97
4.5. Выводы	101
Глава 5. Применение результатов диссертационных исследований	103
5.1. Введение	103
5.2. Определение параметров быстродействия автодинов методом биений	103
5.3. Применение СБРЛ с ЧМ в системах измерения скорости путевой навигации и обзора передней полусферы локомотива по геометрии ЖД пути	111
5.4. Борьба с помеховым сигналом прямого прохождения в СБРЛ с непрерывным излучением	118
5.5. Выводы	126
Заключение	129
Перечень сокращений	137
Перечень обозначений	138
Основные термины и определения	142
Список литературы	145
Приложение. Первые страницы описаний к патентам РФ на изобретения	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень разработанности темы

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

Конструктивная простота АД, тем не менее, контрастирует со сложностью описания и анализа процессов, протекающих в нем. Дело в том, что АД представляет собой единую автоколебательную систему «генератор – объект локации» [1]. В этой системе расстояние и скорость его изменения являются, по отношению к АД, «внешними» параметрами этой системы. Изменения этих параметров в соответствии с автодинным эффектом вызывают изменения собственных параметров генератора (амплитуды и частоты колебаний). Поэтому автодинные системы относятся к классу автопараметрических систем с запаздывающей обратной связью [2–4]. Адекватное описание всех сложных процессов в таких системах возможно только методами теории нелинейных колебаний. Понятно, что сложность анализа автодинной системы дополнительно возрастает при модуляции какого-либо параметра генератора – частоты, амплитуды и фазы, особенно, если учитывать реальную взаимную зависимость этих параметров между собой, а также их зависимость от изменения внешних параметров системы – скорости цели и расстояния до неё.

Очевидно, что зависимость упомянутых параметров от скорости объекта локации и, соответственно, частоты автодинного сигнала определяет

динамические характеристики автодинной системы. Вид этих характеристик зависит от инерционности автодинного генератора, характеризуемой постоянной времени автодинного отклика. Учёт динамических характеристик необходим при использовании АД в СБРЛ с различными видами модуляции, а также в случаях регистрации этими СБРЛ быстропротекающих процессов. Например, в экспериментальной физике и военном деле, в практике полигонных испытаний изделий и др.

Впервые на проблему быстродействия АД в 1946 году обратил внимание наш соотечественник И.Л. Берштейн [5], известный специалист по теории генераторов, талантливый ученик горьковской школы нелинейных колебаний А.А. Андропова. Из результатов его работы следует, что при неправильном выборе параметров автоколебательной системы инерционность генератора может вызвать ограничение диапазона доплеровских частот сигналов. Необходимо отметить, что в тот «ламповый» период развития радиотехники АД работали в диапазоне метровых и дециметровых волн и учет их «внутренней» инерционности был актуален.

Однако в период 70-80-х годов прошлого века в связи с появлением быстродействующих генераторов на полупроводниковых приборах (диодов Ганна, ЛПД и др.) и освоением СВЧ и КВЧ диапазонов при решении локационных задач более актуальным оказался учёт «внешней» инерционности автодинной системы. Эта инерционность, обусловленная конечным временем распространения зондирующего излучения до объекта локации и обратно, оказывает существенное влияние на формирование сигналов АД, особенно с укорочением длины волны излучения [6]. Для учета этой инерционности при анализе автодинных сигналов, как показано в диссертации [7], целесообразно привлечение методов теории систем с запаздыванием [8].

Необходимо отметить, что в период становления и развития данного научного направления и до последних дней значительный вклад в теорию и технику АД внесли отечественные и зарубежные ученые: Е.К. Алахов, И.Л. Берштейн, С.Д. Воторопин, Е.М. Гершензон, В.Н. Дамгов, Г.П. Ермак, И.М.

Коган, В.Я. Носков, С.М. Смольский, А.Ф. Терещенко, Б.Н. Туманов, Д.А. Усанов, Ю.Л. Хотунцев, Т. Itoh, Р.А. Jefford, М.Ј. Lasarus, S. Nagano, F.R. Pantoya, Y. Takayama и многие другие. В своих публикациях они значительно расширили круг задач, решаемых с помощью АД, а также исследовали различные типы, режимы работы, принципы построения и использования автодинных генераторов.

Современные мировые тенденции дальнейшего развития теории и техники СБРЛ связаны с созданием новых и более совершенных приемо-передающих модулей СВЧ и КВЧ диапазонов в монолитном и гибридно-интегральном исполнении и освоение все более высоких рабочих частот. В соответствии с этими тенденциями зарубежными фирмами разрабатывается широкая номенклатура таких модулей. При этом особый интерес представляют микросхемы приемо-передатчиков для поверхностного монтажа. Среди них значительную долю составляют автодинные модули, выполненные на основе диодов Ганна, полевых и биполярных транзисторов. Технические решения этих модулей и микросхем защищены большим числом патентов в первую очередь в передовых промышленно развитых странах: Япония, ЕС, США и Китай.

В нашей стране в АО «НИИПП» (г. Томск) в 90-е годы прошлого века были созданы гибридно-интегральные автодинные модули типа «Тигель-05» 5-мм диапазона для автомобильных радиолокационных спидометров и «Тигель-08М» 8-мм диапазона для широкого применения в СБРЛ различного назначения. Данные модули были выполнены на базе мезапланарных ганновских структур. Они в те годы по своим параметрам не уступали лучшим зарубежным образцам. Однако за прошедшие годы по известным причинам они оказались практически не востребованными не только на транспорте и промышленности, но и военном деле и медицинском приборостроении. Кроме того, учитывая временной разрыв в преемственности поколений специалистов и невозможности восстановления технологии изготовления, перспективы их массового производства безвозвратно утрачены. Сохранились только отдельные экземпляры опытной партии модулей.

Тем не менее, в последнее время в нашей стране возобновился интерес к развитию данного направления в связи с запросом промышленности приемо-

передающих модулей и интегральных схем СВЧ и КВЧ диапазонов для СБРЛ отечественного производства, отвечающих современным требованиям по электрическим и тактико-техническим характеристикам. В свете этого запроса автодинные модули, которые в наибольшей мере удовлетворяют указанным требованиям, имеют особые преимущества перед гомодинными модулями по габаритам, весу и стоимости при любой технологии их изготовления и поэтому востребованы.

Применение в АД частотной модуляции (ЧМ) излучения значительно расширяет функциональные возможности СБРЛ при решении задач обнаружения и измерения параметров движения объектов локации [9]. Эти СБРЛ обеспечивают возможность формирования, так называемых, «мертвых зон» и «зон селекции» цели на заданных расстояниях. Кроме того, ЧМ обеспечивает повышение помехоустойчивости СБРЛ к воздействию как активных, так и пассивных помех.

Очевидно, что для успешного применения автодинных СБРЛ с ЧМ необходимо учитывать динамические особенности формирования сигнальных и шумовых характеристик АД, отличающие их от хорошо изученных систем гомодинного типа. Эти особенности АД с ЧМ, как и обычных АД без модуляции, состоят в том, что в условиях «сильного сигнала» у них наблюдаются ангармонические искажения сигналов [10]. Данное явление создает проблемы при обработке сигналов, сужает динамический диапазон СБРЛ и ограничивает область применения АД, особенно в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Изучению сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ посвящено большое число работ. Однако на сегодня результаты выполненных исследований этих характеристик имеют ограниченную область применения. Они справедливы для условий относительно малых расстояний до объекта локации, при которых время запаздывания отражённого излучения значительно меньше периода автодинного сигнала. На практике данное неравенство может нарушаться. Например, в 8-мм диапазоне длин волн при девиации частоты 500 МГц, частоте модуляции 10 кГц и расстоянии до объекта локации 75 м время

запаздывания составляет $0,5 \cdot 10^{-6}$ с, а минимальный период сигнала равен $0,2 \cdot 10^{-6}$ с [11].

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

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

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

Цели и задачи диссертационной работы

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

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. На основе выполненного обзора литературы по СБРЛ с АМ и ЧМ показать актуальность темы диссертации, дать обоснование цели и задач исследования.
2. Разработать математическую модель для расчета динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ.
3. Произвести расчеты и анализ динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ.
4. Выполнить экспериментальные исследования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ с целью проверки результатов

теоретических исследований.

Представить обоснование метода биений для определения динамических характеристик АД. Кроме того, дать описание радиолокационных датчиков для систем измерения скорости, путевой навигации по геометрии железнодорожного пути и обзора передней полусферы локомотива.

Новизна защищаемых положений и результатов диссертации

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

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

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

4. Выполненные исследования позволили найти новые технические решения СБРЛ с ЧМ, предназначенных для определения параметров движения локомотива и повышения безопасности на ЖД транспорте.

Научная ценность защищаемых положений и результатов диссертации

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

сигналов и шумов.

Практическая значимость работы

Результаты выполненных в диссертации исследований позволяют, исходя из заданных параметров используемых генераторов, рассчитать динамические сигнальные и шумовые характеристики АД, необходимые для их правильного использования в перспективных СБРЛ. Кроме того, в диссертации сформулированы основные требования и рекомендации к автодинным модулям, предназначенным для СБРЛ с АМ и ЧМ. Предложенный метод биений обеспечивает снижение затрат на проведение исследований динамических свойств автодинных генераторов в лабораторных условиях без выполнения натуральных экспериментов. Технические решения радиолокационных датчиков, защищенные двумя патентами на изобретения, обеспечивают возможность определения параметров движения локомотива и повышения безопасности на ЖД транспорте.

Методология и методы диссертационного исследования

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

создаваемых в среде программирования LabVIEW.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

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

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

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

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

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

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

2.3. Выходные сигналы АД СБРЛ с ЧМ, соответствующие краям периода

ХАС, наблюдаются только на нулевой гармонике модуляции, т.е. в области доплеровских частот, вне зависимости от наличия сопутствующей АМ.

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

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

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

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

Апробация результатов работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, среди которых одна статья в переводном журнале, включённом в перечень ВАК, и учтенная международными библиографическими базами данных (БД) WoS и Scopus. Три статьи вышли в рецензируемых зарубежных журналах на английском языке и вошли в БД Scopus. Две статьи вышли в прочих журналах. Материалы 17 докладов доложены на различных конференциях, из них 8 вошли в БД Scopus, 6 включены в БД IEEE Conference Paper. Материалы работы отражены также в 4-х отчётах о НИР. Получено 2 патента РФ на изобретения.

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

Внедрение результатов диссертации и рекомендаций по их дальнейшему использованию

Результаты работы получены в ходе выполнения договора о научно-техническом сотрудничестве между Институтом Радиофизики и электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова и Уральским государственным техническим университетом; НИР «Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона» по договору о научно-техническом сотрудничестве между АО «НИИПП» (г. Томск) и ИРИТ-РТФ УрФУ № 3302-34/02 от 06 ноября 2013 г.; НИР «Исследование и разработка автодинных модулей

СВЧ и КВЧ диапазонов» по договору о научно-техническом сотрудничестве между АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) и УрФУ № 02-25/044 от 14 ноября 2018 г.; НИР «Исследование возможности создания малогабаритного интерферометра для диагностики быстропротекающих процессов» по договору между УрФУ и РФЯЦ-ВНИИТФ им. Академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск), а также в учебном процессе магистрантов на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций УрФУ в качестве лабораторной работы и демонстрационного стенда автодинного радиолокатора КВЧ диапазона с ЧМ. Кроме того, часть практических результатов диссертации получена автором при выполнении должностных обязанностей инженера компании ООО «НПО САУТ» (г. Екатеринбург). Факты использования результатов диссертации подтверждены соответствующими актами и справками (приложены в деле).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Перечисленные выше задачи исследований, новые научные результаты, полученные в диссертации и защищаемые положения, **соответствуют** следующим областям исследований для специальности 05.12.14 – радиолокация и радионавигация согласно её паспорту:

- пункту 1 – исследование новых явлений и процессов в радиоэлектронике, позволяющих повысить эффективность систем и устройств радиолокации и радионавигации;
- пункту 3 – разработка устройств генерирования, усиления, преобразования радиосигналов в радиолокационных и радионавигационных системах и устройствах. Создание методик их расчета и основ проектирования;
- пункту 4 – исследование и разработка новых систем и устройств радиолокации с целью увеличения дальности действия, точности и разрешающей способности, повышения помехозащищённости и помехоустойчивости;
- пункту 11 – разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиолокационных устройств и систем.

Личный вклад диссертанта

В диссертации представлены только те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющее участие. Основная часть работ опубликована в соавторстве с научным руководителем, д.т.н., доцентом В.Я. Носковым. В совместных работах диссертант принимал участие в разработке математических моделей, выполнении расчётов и экспериментов, при обсуждении работы осуществлял объяснение и интерпретацию результатов исследований. В остальных работах в составе 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 163 страницах, содержит 55 рисунков и одно приложение. Библиография состоит из 146 источников.

ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ С АМПЛИТУДНОЙ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

1.1. Введение

В настоящей главе выполнен обзор литературы, посвящённой в основном СБРЛ с АМ и ЧМ, использующим автодинный принцип построения СВЧ приемо-передатчиков. Цель обзора – определить современный уровень развития этого направления. При этом необходимо рассмотреть вопросы применения СБРЛ с АМ и ЧМ в решении задач обнаружения и измерения параметров движения объектов локации, конструктивного исполнения автодинных модулей, а также современного состояния исследований различных режимов и условий функционирования АД с АМ и ЧМ. Для этого в разделе 1.2 рассмотрены основные принципы построения и области применения СБРЛ с АМ и ЧМ. В разделе 1.3 выполнен обзор схемных и конструкторских решений автодинных модулей и устройств для СБРЛ. В разделе 1.4 представлены результаты изучения литературы, посвященной изучению особенностей формирования сигналов и шумов в АД с АМ и ЧМ. В разделе 1.5 поставлена цель диссертационного исследования и сформулированы задачи для достижения поставленной цели. В разделе 1.6 подведены итоги главы.

1.2. Автодинные СБРЛ с амплитудной модуляцией

Автодинные СБРЛ без какой-либо модуляции излучения благодаря эффекту Доплера обеспечивают возможность обнаружения объектов локации и измерения их скорости движения, параметров вибраций и малых перемещений [1, 6, 12–21]. Интегрирование данных о скорости позволяет вычислить пройденный путь, а их дифференцирование – ускорение [22, 23]. Кроме того, при определенных условиях приема и обработки автодинного отклика по форме сигналов или по их фазовым смещениям между собой можно определять направление относительного движения цели и СБРЛ [24, 25]. Для более надежного определения направления движения цели предпочтительно применение в АД квадратурного детектирования сигналов с помощью двух внешних детекторов [26, 27] или использование двух

автодинов, взаимно синхронизированных между собой при сильной связи [28–30].

Значительно расширяет функциональные возможности автодинных СБРЛ применение различных видов модуляции зондирующего излучения. Среди них нашли применение фазовая, частотная, амплитудная, импульсная и их комбинации [9–11, 14, 31–35]. Так же, как и в СБРЛ с гомодинным построением приёмо-передатчика, модуляция обеспечивает возможности измерения дальности до цели, селекции цели по дальности и скорости [1, 17]. При этом формирование, так называемых, «мертвых зон» и требуемых зон селекции (обнаружения) цели способствуют повышению помехоустойчивости СБРЛ по отношению к пассивным и активным помехам [1, 36].

Амплитудная модуляция (АМ), в отличие от модуляции импульсной, предполагает плавные изменения амплитуды колебаний АД без разрывов функции модуляции. В автодинных СБРЛ этот вид модуляции пока широко не используется. Известны публикации, в которых представлены результаты исследований АД с АМ [34, 35, 37]. В этих работах показано, что автодинный отклик в АД с АМ переносится также на гармоники частоты модуляции. Эффективность этого переноса повышается с увеличением глубины модуляции и зависит также от дальности до цели. Благодаря этому явлению АД с АМ на гармониках частоты модуляции обладают свойством амплитудной селекции объектов локации на определённых расстояниях, что востребовано при решении задач повышения помехоустойчивости СБРЛ.

Экспериментальные исследования АД с АМ в указанных работах [34, 35, 37] выполнялись на примере генераторного модуля 8-и миллиметрового диапазона «Тигель-08М», выполненного на планарном двухмезовом диоде Ганна. Для исключения влияния сопутствующей ЧМ использовалась синхронизация колебаний от внешнего источника. При этом АМ осуществлялась управлением добротностью резонансной системы с помощью чипа рin-диода, подключенного по СВЧ параллельно диоду Ганна. В работе [34] представлены интересные результаты экспериментальных исследований АД с АМ, которые в статье [37] получили свое дальнейшее развитие и обобщение. На рис. 1.1 приведены спектры

выходного излучения генераторного модуля (а) и выходного сигнала АД в цепи питания, выделяемого с помощью резистивной нагрузки (б), полученные в [34]. На рис. 1.2 показаны осциллограммы выходного сигнала АД в цепи питания (а) и его огибающей (б) в виде доплеровского сигнала после цифровой обработки и полного подавления сигнала АМ. Результаты измерения уровней полезного сигнала на доплеровской частоте и на первых двух гармониках частоты модуляции в нормированном виде (в виде характеристик амплитудной селекции – ХАС) представлены на рис. 1.3.

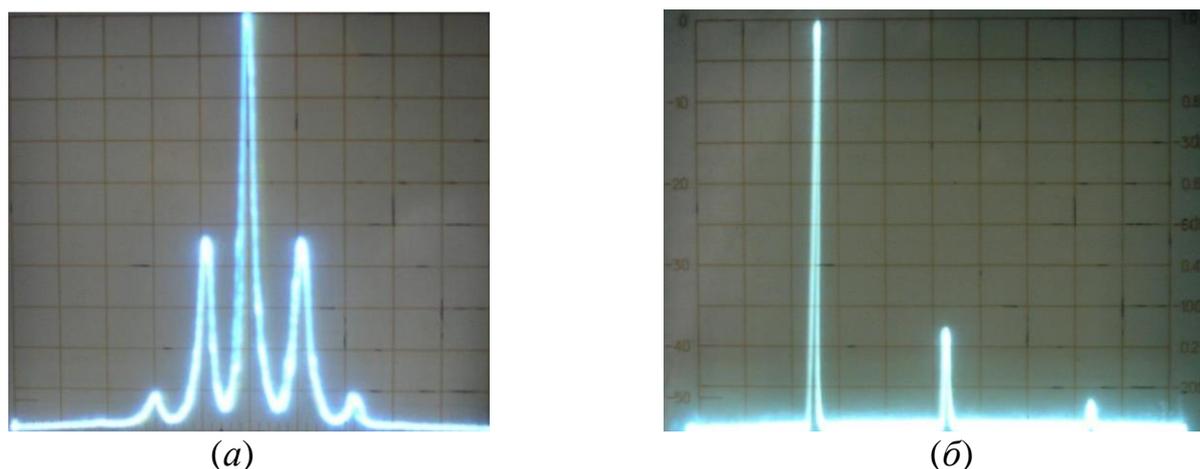


Рисунок 1.1. Спектры выходного излучения генераторного модуля «Тигель-08М» с АМ (а) и выходного сигнала в цепи питания модуля (б) с резистивной нагрузки [34].

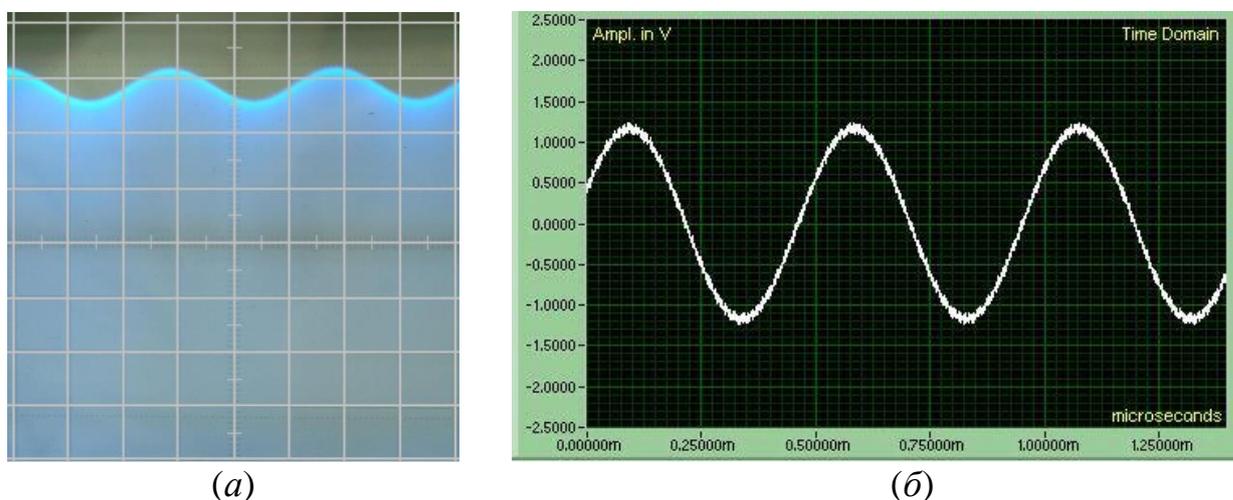


Рисунок 1.2. Осциллограммы выходного сигнала блока выделения БВ (а) на гармониках частоты модуляции и выходного доплеровского сигнала БЦОС (б) [34].

Как видно из полученных кривых на рис. 1.3, вершина ХАС находится на расстоянии около 6 м. Графики ХАС для сигналов на гармониках практически

совпадают. При этом смещение максимума экспериментальной ХАС на 1,5 м относительно теоретической (7,5 м) объясняется влиянием затухания излучения в волноводном тракте.

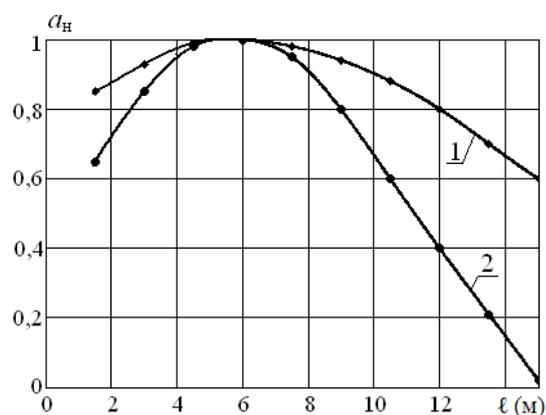


Рисунок 1.3. Графики нормированных зависимостей амплитуд автодинных сигналов в доплеровском канале (кривая 1), на первой и второй гармониках частоты модуляции (кривая 2) от расстояния до имитатора доплеровского сигнала [34].

В заключении работы [34] отмечено, что полученные экспериментальные данные подтвердили результаты теоретических исследований. Основная рекомендация, которая следует из этой работы, состоит в том, что проблема АД с АМ – необходимость исключения сопутствующей ЧМ, может быть решена при создании автодинного модуля, в котором для обеспечения стабилизации частоты основного генератора с помощью дополнительного маломощного генератора, выполненного, например, на слаботочном диоде Ганна [38–40]. Кроме того, отмечена перспективность создания монолитных и гибридно-монолитных АД на планарных линиях передач с использованием 3-мезового полупроводникового чипа [39]. При этом идея применения для уменьшения сопутствующей ЧМ автодинного генератора стабилизации частоты с помощью дополнительного высокочастотного резонатора в указанных публикациях не рассматривалась.

1.3. Автодинные СБРЛ с автомодуляцией

В ряде работ описаны интересные явления в СВЧ генераторах, которые возникают при определенных условиях работы в режиме автомодуляции колебаний [41–47]. Этот режим наблюдается, например, при подключении к цепи

питания генератора на диоде Ганна резонансного контура. Экспериментально показано, что в АД с автомодуляцией амплитуда автодинного отклика по мере увеличения расстояния убывает значительно слабее, чем у обычного АД [43, 47]. Наличие сильных отраженных сигналов при этом практически не влияет на чувствительность системы. Кроме того, перенос автодинного отклика на частоту автомодуляции за счет меньшего уровня фликкерных шумов на этой частоте обеспечивает повышение отношения сигнал-шум.

Более слабое убывание сигнала автомодулированного АД, как показано ниже в наших исследованиях, объясняется наличием кроме АМ также ЧМ колебаний, которая обычно неизбежно наблюдается при изменении напряжения питания СВЧ генератора на диоде Ганна. Данный способ модуляции, отличающийся своей простотой, широко применяется, например, в простых схемах автодинных СБРЛ для систем безопасности [48]. Теоретический анализ явлений, наблюдаемых при экспериментальных исследованиях таких автодинов, когда кроме АМ в генераторе присутствует сопутствующая ЧМ, по имеющейся информации до настоящего времени не проводился. Однако для определения потенциальных возможностей автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ, особенностей формирования сигналов в условиях взаимного влияния АМ и ЧМ, а также для расширения области их применения выполнение данных исследований представляется весьма актуальными.

1.4. Сигнальные характеристики автодинных СБРЛ с ЧМ

Наиболее широкое применение в автодинных СБРЛ, благодаря простоте реализации, находит ЧМ зондирующего излучения. Автодинные СБРЛ с ЧМ используются в качестве бесконтактных датчиков занятости путей, крышек заграждений на железнодорожных (ЖД) переездах и занятости стрелочных переводов на ЖД станциях, а также измерителей параметров движения отцепов на сортировочных горках и многого другого [14, 17, 48–50].

Первая публикация, в которой дан обстоятельный анализ работе АД с ЧМ, выполненного на основе транзисторного генератора, вышла в 1977 году [51]. В

ней авторы с позиций теории колебаний обосновали процесс формирования автодинного сигнала. Однако в этой работе, а также в статьях [32, 52], и монографиях [9, 53] рассмотрены условия работы СБРЛ, которые соответствуют диапазонам метровых и дециметровых волн, где дополнительный набег фазы отраженного от цели излучения мал и не вызывает появления ангармонических искажений сигналов. Поэтому полученные результаты анализа не описывают процесс формирования сигналов для коротковолнового и миллиметрового диапазонов волн.

Уточнение и расширение теории работы АД с ЧМ на случай учета этих искажений впервые выполнено в 1991 году в статье [54] на примере гармонической ЧМ. В случае использования линейной ЧМ (ЛЧМ) проявление автодинного эффекта в генераторах КВЧ диапазона, особенности формирования сигналов, модуляции и выделения сигналов рассмотрены в работах [55–59]. Формирование сигналов паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) из-за наличия при ЧМ сопутствующей АМ в АД исследовано в работах [60, 61]. Математическая модель для анализа АД с ЧМ, разработанная в статье [56], распространена на случай одновременной импульсной и частотной модуляции зондирующего излучения СБРЛ [62–64]. Такое сочетание видов модуляции значительно расширяет функциональные возможности СБРЛ.

Обобщение результатов более чем 30-летней деятельности в направлении исследований особенностей формирования автодинных сигналов и их спектров для различных видов ЧМ колебаний АД представлено в обзорной статье [10]. В ней показано, что эти особенности сигналов, отличающие АД от систем гомодинного типа, необходимо учитывать при создании автодинных СБРЛ с ЧМ диапазонов СВЧ и КВЧ. При этом получены в качестве математической модели АД с ЧМ выражения для относительных автодинных изменений амплитуды a и абсолютных значений текущей частоты ω генерации (в наших обозначениях) в виде [10]:

$$a = m_{\text{AM}} f_m(t) + \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (1.1)$$

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{ЧМ}} f_m(t) - \Gamma(t, \tau) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (1.2)$$

где $f_m(t)$ – нормированная модулирующая функция; K_a , L_a – коэффициенты автодинных усиления и девиации частоты; $m_{\text{АМ}}$ – коэффициент, определяющий относительную амплитуду ПАМ; ω_0 – частота стационарных колебаний автономного генератора; $\Delta\omega_{\text{ЧМ}}$ – девиация частоты вследствие ЧМ; ψ , θ – углы фазового смещения; $\Gamma(t, \tau)$, $\delta(t, \tau)$ – модуль и фаза мгновенного коэффициента отражения излучения от объекта локации, приведенного к нагрузке генератора.

В выражениях (1.1) и (1.2) последние слагаемые отображают формирование полезного сигнала. Слагаемое $m_{\text{АМ}} f_m(t)$ в (1.1), повторяющее закон модуляции, проявляется как ПАМ, мешающая составляющая выходного сигнала АД. Модуль $\Gamma(t, \tau)$ и фаза $\delta(t, \tau)$ мгновенного коэффициента отражения в общем случае описывают динамику одновременных автодинных изменений амплитуды и частоты излучаемых и отраженных колебаний. Благодаря разложению в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с текущим временем t в [10] показано, что для решения многих практических задач СБРЛ можно в этих разложениях ограничиться первым приближением, приняв $\Gamma(t, \tau) = \Gamma$ и $\delta(t, \tau) = \omega\tau$, где τ – время запаздывания зондирующего излучения до объекта локации и обратно. Тогда выражение для фазы с учетом (1.2) получено в виде:

$$\delta(t, \tau) = \omega_0\tau + \tau\Delta\omega_{\text{ЧМ}} f_m(t) - C_{\text{ОС}} \sin[\delta(t, \tau) + \theta] - \varphi_0, \quad (1.3)$$

где $C_{\text{ОС}} = \Gamma L_a \omega_0 \tau$ – параметр внешней обратной связи автодинной системы «генератор – объект локации» [6]; φ_0 – фаза коэффициента отражения излучения от объекта локации, который можно принять равным нулю. В [10] и многих иных предшествующих работах параметр $C_{\text{ОС}}$ принято называть параметром искажений автодинного сигнала [33–35, 37]. Данный параметр является очень важным при описании свойств автодинов, особенно СВЧ и КВЧ диапазонов. При этом необходимо отметить, что в [9, 51–53, 60] принято $\delta(t, \tau) = \omega_0\tau$, что ограничило применимость результатов работы.

Особый интерес представляют экспериментальные результаты работы [10],

выполненной на примере автодинных модулей «Тигель-08» и «Тигель-08ЧМ». Данные модули отличаются топологией диодной подложки [39]. На подложке модуля «Тигель-08ЧМ», выполненной из поликора, параллельно (по СВЧ) с развязкой цепей смещения установлены два чипа: диод Ганна и варикап. В автодинном модуле «Тигель-08» вставка имеет лишь чип двухмезового диода Ганна, установленного параллельно щелевому полуволновому резонатору. На рис. 1.4 представлены графики зависимостей рабочих параметров модулей от напряжений питания и смещения на варикапе, которые будут полезными при выборе режима работы в ходе выполнения экспериментальных исследований настоящей диссертации.

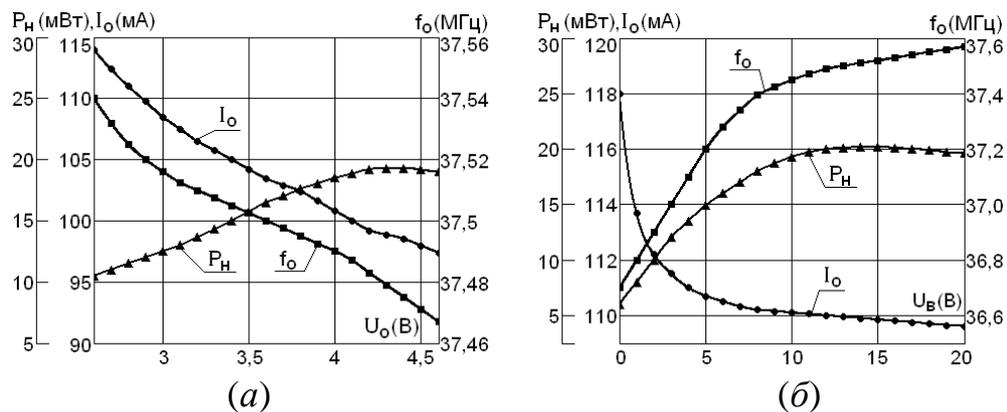


Рисунок 1.4. Экспериментальные зависимости величины потребляемого тока I_o , частоты генерации f_o и выходной мощности P_H от питающего напряжения U_0 генераторного модуля «Тигель-08» (а) и этих же параметров от напряжения смещения на варикапе U_B модуля «Тигель-08ЧМ» (б) [10].

Результаты экспериментальных исследований выходных сигналов АД с ЧМ по несимметричному и симметричному пилообразному закону представлены на рис. 1.5 и 1.6 соответственно в виде осциллограмм и спектров. Аналогичные осциллограммы и спектры выходных сигналов АД для случая гармонической ЧМ представлены на рис. 1.7.

Из сравнения полученных спектрограмм рис. 1.5, а и рис. 1.6, а видно, что закон симметричной пилообразной функции обеспечивает уровень ПАМ на 30...40 дБ ниже, чем несимметричный пилообразный закон. Кроме того, как видно из осциллограмм этих рисунков, частота автодинного сигнала в случае модуляции по симметричному пилообразному закону в 2 раза выше. При этом в

случае «сильного» отраженного сигнала от цели форма автодинного сигнала искажена, а наклон волн этих сигналов изменяется при смене знака производной модулирующей функции. Из рис. 1.6 и 1.7 видно, что случай применения симметричной пилообразной функции по характеру формирования сигналов весьма близок к случаю гармонической ЧМ, однако в последнем случае сигнал АД подвергнут непрерывной фазовой модуляции, вызывающей значительное расширение его спектра.

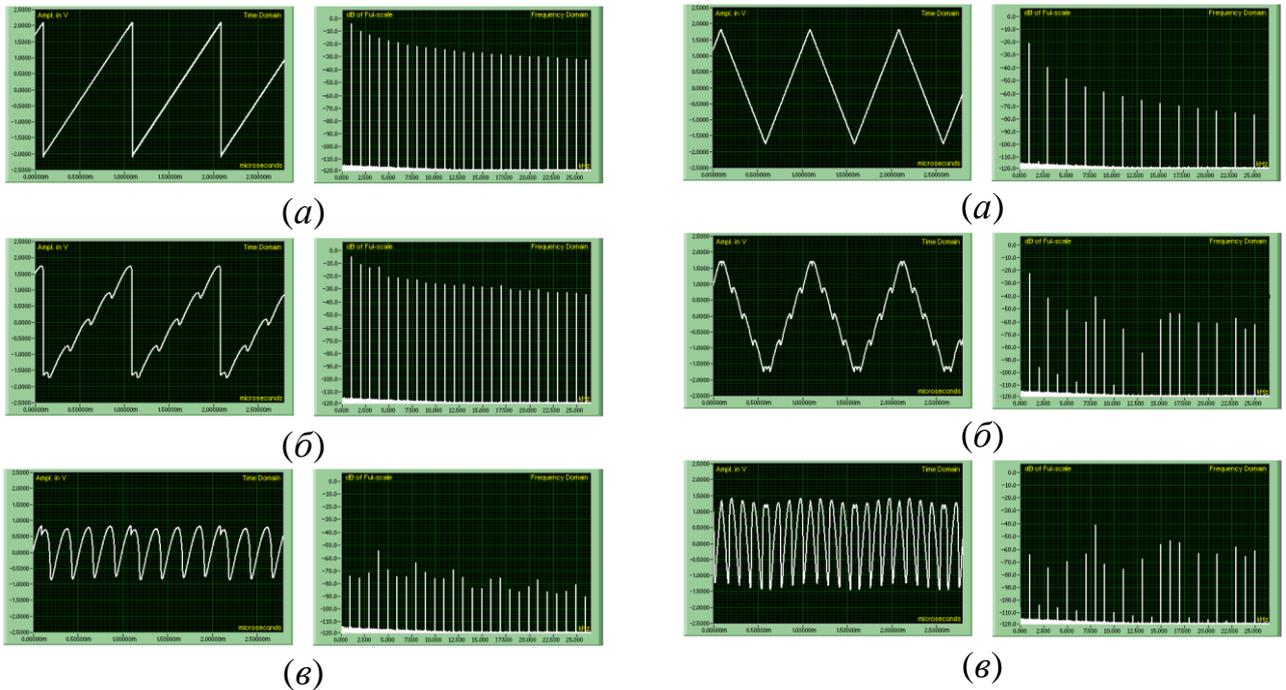


Рисунок 1.5. Осциллограммы (слева) и спектры (справа) напряжения несимметричной пилообразной модулирующей функции (а), выходных сигналов АД с ПАМ (б) и после первичного подавления ПАМ (в) [10].

Рисунок 1.6. Осциллограммы (слева) и спектры (справа) напряжения симметричной пилообразной модулирующей функции (а), выходных сигналов АД с ПАМ (б) и после первичного подавления ПАМ (в) [10].

Более полную информацию для выбора рабочей гармоники частоты модуляции и необходимой величины девиации частоты $\Delta\omega_{\text{ЧМ}}$ при известном расстоянии до объекта локации дают экспериментально полученные зависимости нормированных амплитуд a_n соответствующих компонентов в спектре сигнала АД с ЧМ. На рис. 1.8 они показаны различными символами [10, 49]. Следует отметить, что графики нормированных амплитуд на рис. 1.8 практически совпадают с зависимостями соответствующих функций Бесселя от значения

индекса ЧМ $p_M = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \Omega_M$, где Ω_M – частота модуляции; $p_M \equiv m_{\text{ЧМ}}$ – тоже в наших обозначениях. Кроме того, в работе [49] сделан вывод, что применение ЧМ изменением смещения на диоде Ганна обеспечивает выигрыш в чувствительности примерно в 10 раз по сравнению с автодином без ЧМ.

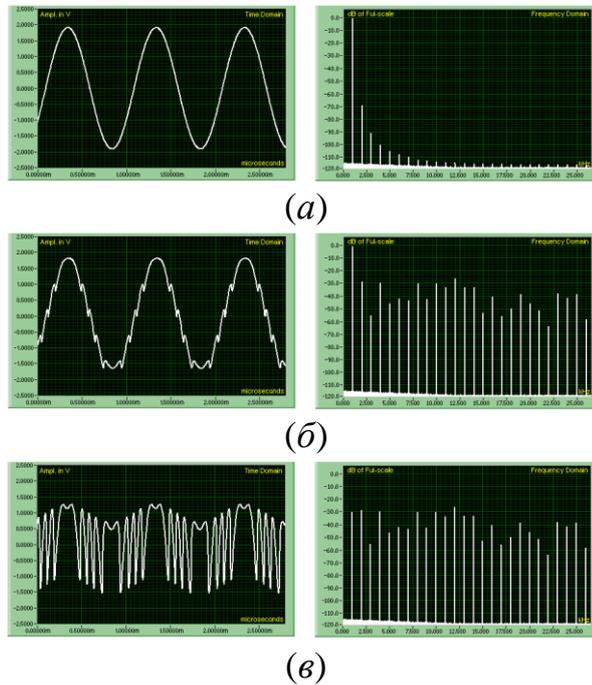


Рисунок 1.7. Осциллограммы (слева) и спектры (справа) напряжения гармонической модулирующей функции (а) и выходных сигналов автодина (с ПАМ) (б) и после первичного подавления ПАМ (в) [10].

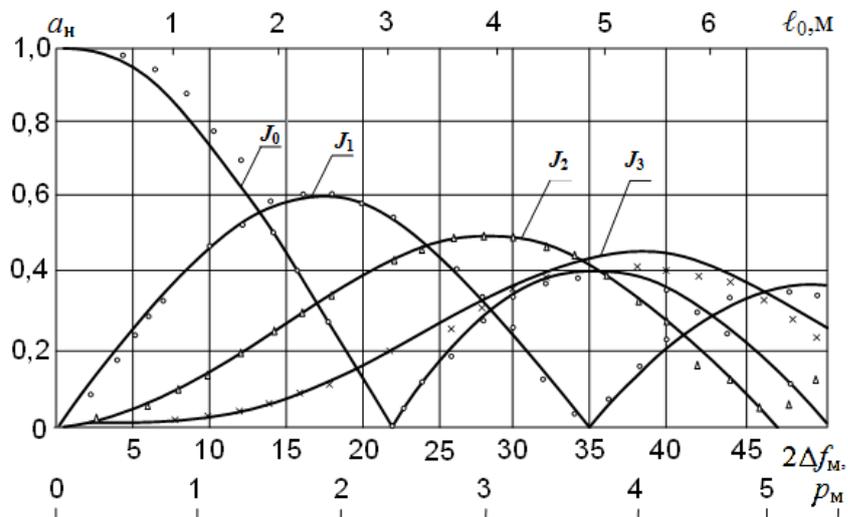


Рисунок 1.8. Экспериментальные зависимости нормированных амплитуд компонентов в спектре сигнала автодинной СБРЛ с гармонической ЧМ: l_0 – расстояние до цели; Δf_M – девиация частоты генерации АД (МГц) [10, 49].

Необходимо отметить, что полученные результаты исследований в

рассмотренных выше публикациях справедливы при выполнении условия, когда время запаздывания τ отраженного от цели излучения значительно меньше периодов автодинного сигнала $T_a = 2\pi / \Omega_a$ и модулирующей функции $T_m = 2\pi / \Omega_m$: $\tau \ll T_a$, $\tau \ll T_m$. Для случая, когда первое неравенство не выполняется, особенности формирования сигнальных характеристик с различными законами ЧМ исследованы в работах [11, 65–70]. Для этого в этих работах разработана математическая модель, которая предусматривает анализ взаимодействия автодинной СБРЛ с отражённым от объекта локации излучением при произвольном соотношении времени запаздывания τ отражённого излучения и периода T_a автодинного сигнала. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что «...в случае, когда период автодинного отклика соизмерим или даже меньше времени запаздывания отражённого излучения, уровень искажения автодинных сигналов при гипотетическом сохранении амплитуды отражённой волны уменьшается с увеличением дальности до отражающего объекта. Расчёты показали, что при величине параметра обратной связи, превышающей его граничное значение даже в несколько раз, в высших рабочих зонах автодинных СБРЛ с ЧМ может обеспечиваться устойчивая работа СВЧ генератора с формированием квазигармонических сигналов» (стр. 46–47, [68]). «Однако наличие искажений автодинных сигналов и обогащение спектра требуют своего учёта в устройствах обработки в условиях, когда расстояние до отражающего объекта мало, а величина параметра C_{oc} соизмерима с единицей» (стр. 46, [68]).

1.5. Исследования шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ

Следующей важной задачей анализа АД с ЧМ является необходимость учёта шумовых параметров и характеристик применяемых в качестве АД СВЧ генераторов. Решению данной задачи посвящен ряд работ [71–74]. В них разработана математическая модель АД с ЧМ, описывающая процесс взаимодействия в генераторе собственного отраженного от цели излучения и

внутренних шумов генератора. Более общая модель разработана в статье [74], она учитывает также шумы источника питания АД. Выражения для относительных автодинных изменений амплитуды $a(t)$ и частоты $\chi(t)$ колебаний, а также автодинного сигнала $u_0(t)$ в цепи питания СВЧ генератора имеют вид [74]:

$$a(t) = -m_{\text{AM}} f_m(t) + \Gamma K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi] + a_{\text{ш}}(t) - K_{\text{ам}} e_{\text{ш}}(t), \quad (1.4)$$

$$\chi(t) = -m_{\text{ЧМ}} f_m(t) - \Gamma L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta] - \chi_{\text{ш}}(t) - K_{\text{чм}} e_{\text{ш}}(t), \quad (1.5)$$

$$u_0(t) = -Z_{\text{пр}} \{m_{\text{пд}} f_m(t) - \Gamma K_0 \cos[\delta(t, \tau) - \psi_0] - i_{\text{ш}}(t) + K_{\text{пп}} e_{\text{ш}}(t)\}, \quad (1.6)$$

где $K_{\text{ам}}$, $K_{\text{чм}}$, $K_{\text{пп}}$ – коэффициенты «амплитудной модуляции», «частотной модуляции» и «прямой передачи», характеризующие процесс преобразования шумовых изменений напряжения смещения в вариации амплитуды и частоты колебаний генератора, а также среднего значения тока активного элемента (АЭ); K_0 – коэффициент автодетектирования; $m_{\text{пд}}$ – коэффициент «прямого детектирования», характеризующий процесс преобразования модуляционных изменений амплитуды и частоты колебаний генератора в средние значения тока АЭ; $a_{\text{ш}}(t)$, $\chi_{\text{ш}}(t)$, $i_{\text{ш}}(t)$ – составляющие относительного уровня амплитудных и частотных флуктуаций и флуктуаций тока АЭ, обусловленные действием внутренних источников шума генератора; $e_{\text{ш}}(t)$ – мгновенное значение относительного шума источника питания; ψ_0 – угол фазового смещения сигнала в цепи питания АЭ; $Z_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования изменений тока АЭ в выходное напряжение блока регистрации автодинного отклика; $\delta(t, \tau) = \omega\tau$ – набег фазы отраженного излучения:

$$\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau + C_{\text{ЧМ}} f_m(t) - p_{\text{ш}}(t) - s_{\text{ш}}(t) - C_{\text{ОС}} \sin[\delta(t, \tau) + \theta]; \quad (1.7)$$

$C_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} \tau$; $p_{\text{ш}}(t) = C_{\text{ОС}} \chi_{\text{ш}}(t) / \Gamma L_a$, $s_{\text{ш}}(t) = C_{\text{ОС}} K_{\text{чм}} e_{\text{ш}}(t) / \Gamma L_a$ – индексы модуляции фазы автодинного сигнала, обусловленные процессом модуляции, внутренними шумами генератора и шумами источника питания соответственно.

На рис. 1.9, а представлены результаты расчётов в соответствии с (1.4) – (1.7) графиков сигнальных характеристик $\chi_{\text{н}}(\tau_{\text{н}})$, $a_{1\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ и $u_{0\text{н}}(\tau_{\text{н}})$ для случая неподвижного объекта локации, находящегося на расстоянии $l_0 = 1,5$ м от

генератора. При этом величина параметра обратной связи C_{OC} принята равной 0,8. На рис. 1.9, б приведены графики относительных изменений среднеквадратических уровней флуктуаций частоты $q_\chi(\tau_n)$ и амплитуды $q_a(\tau_n)$ колебаний генератора, а также шумов $q_u(\tau_n)$ на выходе блока регистрации.

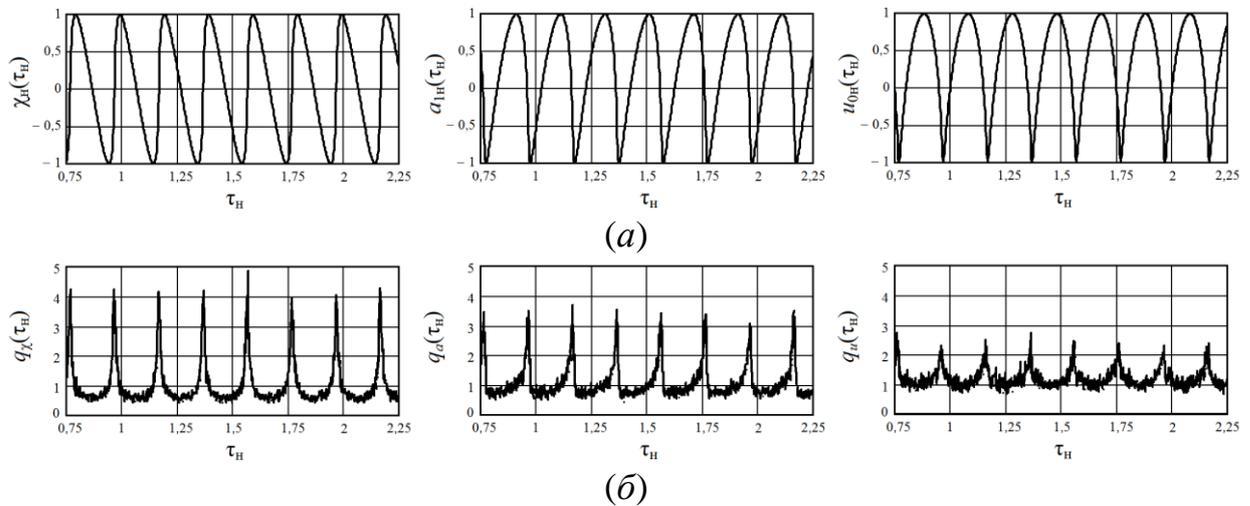


Рисунок 1.9. Графики сигнальных характеристик (а) $\chi_n(\tau_n)$, $a_{1n}(\tau_n)$, $u_{0n}(\tau_n)$ и среднеквадратических уровней флуктуаций частоты $q_\chi(\tau_n)$ и амплитуды $q_a(\tau_n)$ колебаний генератора, а также шумов $q_u(\tau_n)$ на выходе блока регистрации [74].

На рис. 1.10 представлены осциллограммы, на которых верхний след показывает форму выходного сигнала автодина, а нижний – шумовую дорожку. Для случая, приведенного на рис. 1.10, а реализованы условия экспериментов, при которых $C_{OC} \approx 0,8$, а на рис. 1.10, б – $C_{OC} \approx 0,1$.

В случае, представленном на рис. 1.10, а, видны ангармонические искажения сигнала и периодические «всплески» среднеквадратического уровня шума. В случае малого значения параметра C_{OC} сигнал имеет практически гармоническую форму, а уровень шума не изменяется, что подтверждает результаты теоретического анализа, выполненного в [74]. Выявленные особенности формирования сигнальных и шумовых характеристик необходимо учитывать при выборе типа генераторов в процессе создания автодинной СБРЛ с ЧМ, а также при обработке сигналов.

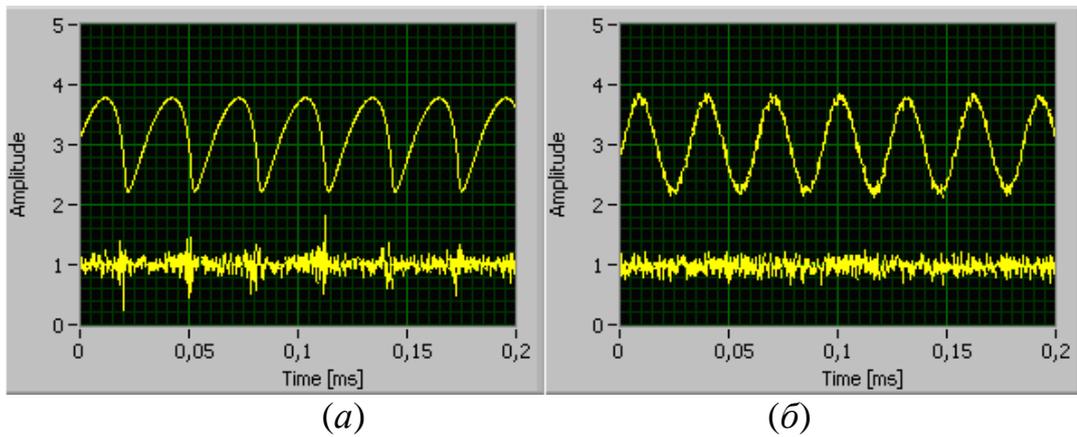


Рисунок 1.10. Осциллограммы сигналов АД с ЧМ (верхний след) и шумовой дорожки (нижний след), полученные при величинах параметра обратной связи $C_{OC} \approx 0,8$ (а) и $C_{OC} \approx 0,1$ (б) [74].

1.6. Исследования внутрдинамических параметров автодинов

Математические модели АД с АМ и ЧМ в рассмотренных выше работах не учитывают влияния на формирование сигнальных и шумовых характеристик внутренней инерционности генератора. Важность этого учета возникает в случае, например, применения АД в качестве радиоволновых датчиков быстропротекающих процессов [75–78]. Очевидно, что если эта инерционность достаточно велика по сравнению со скоростью изменения параметров генератора, то процессы его модуляции и регистрации автодинных сигналов могут быть искаженными. Поэтому в ходе разработки и создания автодинных СБРЛ при выборе вида и параметров модуляции, типа генератора и режима его работы необходимы знания о динамических параметрах генераторов. Эти параметры, которые непосредственно зависят от его внутренней инерционности, характеризуются постоянной времени автодинного отклика генератора [79–81].

Впервые на проблему необходимости учета быстродействия АД, как отмечалось выше, обратил внимание наш соотечественник И.Л. Берштейн [5, 82]. Из результатов его работы следует, что при неправильном выборе параметров автоколебательной системы инерционность генератора может вызвать ограничение диапазона доплеровских частот сигналов.

В современном понимании данная задача анализа АД ставится как учет влияния «внутрдинамических» параметров генератора на формирование

сигналов. Её решению посвящены работы [79, 81, 83–86], в которых рассмотрен режим малого сигнала, когда параметр внешней обратной связи АД $C_{OC} \ll 1$, а модуль коэффициента отражения $\Gamma(\tau, t) = \Gamma$. При движении отражателя с постоянной радиальной скоростью фаза коэффициента отражения $\delta(t, \tau)$ изменяется во времени практически по линейному закону: $\delta(t, \tau) = \Omega_D t$, где Ω_D – частота Доплера. Для этих исходных условий получены выражения для расчета сигнальных характеристик в виде [83]:

$$a(t) = \Gamma K_a K_{1\Omega} \cos(\Omega_D t - \psi_{1\Omega}), \quad (1.8)$$

$$\chi(t) = -\Gamma L_a L_\Omega \sin(\Omega_D t + \theta_\Omega), \quad (1.9)$$

где $K_{1\Omega}$, L_Ω – нормированные относительно собственных значений при $\Omega_D = 0$ частотно-зависимые составляющие коэффициентов автодинного усиления и девиации частоты соответственно:

$$K_{1\Omega} = \frac{1 - \rho \Omega_H}{\sqrt{1 + \rho^2 (1 + \Omega_H^2)} \cos \psi_\Omega}, \quad (1.10)$$

$$L_\Omega = \frac{1 + \gamma \Omega_H + (1 - \gamma \rho) \Omega_H^2}{\sqrt{1 + \gamma^2 (1 + \Omega_H^2)} \cos \theta_\Omega}, \quad (1.11)$$

ψ_Ω , θ_Ω – частотно-зависимые углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний генератора:

$$\psi_{1\Omega} = \arctg \frac{(\rho + \Omega_H)}{(1 - \rho \Omega_H)}, \quad (1.12)$$

$$\theta_\Omega = \arctg \frac{\gamma(1 - \rho \Omega_H)}{1 + \gamma \Omega_H + (1 - \gamma \rho) \Omega_H^2}, \quad (1.13)$$

$\Omega_H = \Omega_D \tau_a$ – нормированная частота автодинного отклика.

На рис. 1.11 и 1.12 представлены результаты расчётов частотных зависимостей автодинных параметров и углов их фазового смещения, выполненных по формулам (1.10) – (1.13) при различных значениях коэффициентов γ и ρ .

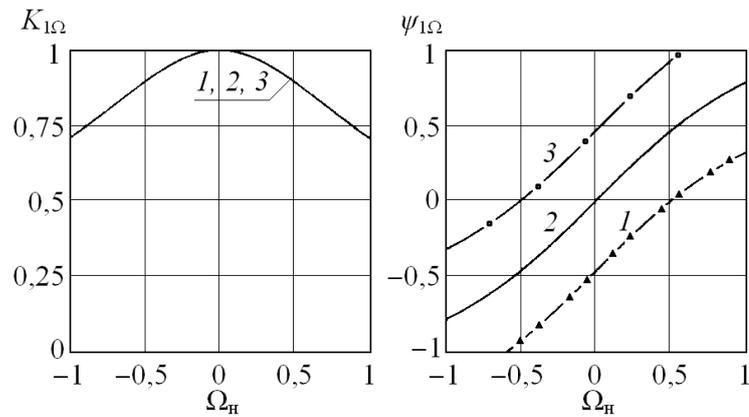


Рисунок 1.11. Графики частотных зависимостей коэффициентов автодинного усиления $K_{1\Omega}$ и угла фазового смещения $\psi_{1\Omega}$, рассчитанные при $\gamma=1$ и различных значениях коэффициента неизодромности ρ : $\rho = -0,5$ – кривые 1; $\rho = 0$ – кривые 2; $\rho = 0,5$ – кривые 3.

Из графиков рис. 1.11 видно, что частотная зависимость нормированного коэффициента автодинного усиления $K_{1\Omega}$ является симметричной функцией относительно $\Omega_D = 0$. Вид её напоминает амплитудно-частотную характеристику колебательного контура. При этом угол фазового смещения характеристики $\psi_{1\Omega}$ определяется только неизодромностью генератора.

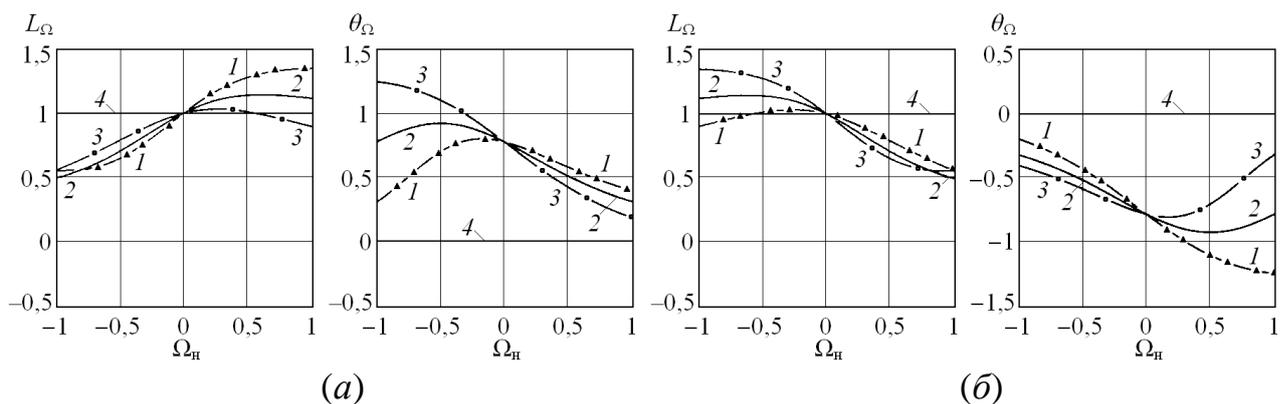


Рисунок 1.12. Графики частотных зависимостей нормированных коэффициентов девиации частоты L_{Ω} и углов фазового смещения θ_{Ω} , рассчитанные при $\gamma = 1$ (а) и $\gamma = -1$ (б) и различных значениях коэффициента неизодромности ρ : $\rho = -0,5$ – кривые 1; $\rho = 0$ – кривые 2; $\rho = 0,5$ – кривые 3 (графики 4 получены при величине $\gamma = 0$).

Из анализа выражения (1.10) следует, что если период $T_D = 2\pi/\Omega_D$ сигнала Доплера превышает значение постоянной времени τ_a , то амплитуда сигнала $a(t)$ резко падает, поскольку АД не успевает реагировать на быстрое изменение фазы.

Из (1.10) при условии $K_{1\Omega} = 1/2^{1/2}$ в [83] получено граничное значение частоты автодинного сигнала:

$$\Omega_{\text{гр}} = \frac{1}{\tau_a} = \frac{\alpha\omega_0(1-\gamma\rho)}{Q_n} = \frac{\omega_0\sqrt{1+\rho^2}}{K_a Q_{\text{вн}}}. \quad (1.14)$$

Полученное ограничение (1.14) по частоте необходимо учитывать не только в обычных «доплеровских» АД при регистрации быстропротекающих процессов, но и в АД с АМ и ЧМ. При определенных условиях выбора параметров модуляции, а также положении и скорости движения объектов локации в АД с АМ и ЧМ возможно нарушение работы СБРЛ.

Графики рис. 1.12 показывают, что величина частотной зависимости L_Ω при условии $\gamma \neq 0$ не является симметричной функцией относительно $\Omega_{\text{д}} = 0$. Она в окрестности $\Omega_{\text{д}} = 0$ имеет дисперсионную форму. Поэтому при анализе поведения динамических характеристик АД необходимо учитывать также этот фактор.

Оборудование для экспериментального исследования динамических характеристик АД в натуральных условиях отличается сложностью и громоздкостью, а его применение связано со значительными материальными затратами [87]. Поэтому для указанной цели реальные объекты локации обычно заменяются их макетами, что несколько снижает затраты. Однако наиболее продуктивно данные исследования, особенно на этапе разработки СБРЛ, проводить в лабораторных условиях, используя сигнальные эквиваленты.

Среди лабораторных методов исследования динамических характеристик АД известны два метода, использующие модуляцию генератора со стороны его нагрузки или по цепи питания, а также метод биений [88–91]. Два первых метода достаточно хорошо исследованы [83–86].

Третий метод основан на замене отраженного от цели сигнала сигналом от дополнительного генератора, частота которого находится за пределами полосы синхронизации АД. Принцип действия этого метода лежит в основе функционирования известных автодинных преобразователей частоты [92–94].

Однако применительно к исследованиям динамических свойств АД, используемых в СБРЛ, обоснование этого метода в известной нам литературе отсутствует. Поэтому данный метод требует своего дальнейшего изучения и научного обоснования.

1.7. Обоснование цели и постановка задач исследования

Автодинные приемопередатчики, как отмечалось выше, находят широкое применение в датчиках и измерителях параметров технологических процессов в промышленности и на транспорте, а также в различных научных приложениях, военном деле и медицине. Обработка полученных в АД сигналов обеспечивает возможность извлечения информации об электрофизических свойствах объектов локации и их кинематических характеристиках: расстоянии, скорости движения, ускорении, параметрах вибрации, величине перемещения и пр. Поэтому дальнейшее развитие теории АД, направленной на изучение свойств различных типов генераторов и схемных решений, поиск новых режимов работы и методов модуляции, а также особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик АД, расширение функциональных возможностей и области применения СБРЛ является актуальной задачей. При этом для теории и практики автодинных СБРЛ востребованными являются результаты исследования АД с АМ и ЧМ с учетом их взаимного влияния на сигнальные характеристики. Кроме того, практический интерес представляют результаты исследований шумовых характеристик, а также режима биений генератора для определения динамических свойств генераторов как АД. Поэтому основной целью диссертации, сформулированной выше, является «Исследование динамических особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ, а также изучение свойств АД при асинхронном воздействии излучения от стороннего источника». Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи исследований.

1. Прежде всего, на основе выполненного обзора литературы по СБРЛ с АМ и ЧМ показать актуальность темы диссертации, дать обоснование цели и задач

исследования.

2. Разработать математическую модель для расчета характеристик амплитудной селекции, динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ для случаев, когда время запаздывания τ отраженного от цели излучения соизмеримо или даже больше, чем периоды автодинного сигнала T_a и модулирующей функции T_m : $\tau \gg T_a$, $\tau \gg T_m$. При этом необходимо также учесть наличие искажений автодинных сигналов и обогащение спектра в условиях, когда величина параметра C_{oc} соизмерима с единицей.

3. Произвести расчеты и анализ динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ при различных условиях работы, приближенных к реальным условиям.

4. Выполнить экспериментальные исследования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ миллиметрового диапазона с целью проверки результатов теоретических исследований.

5. Представить обоснование метода биений для определения динамических характеристик АД. Кроме того, дать описание радиолокационных датчиков для систем измерения скорости, путевой навигации по геометрии железнодорожного пути и обзора передней полусферы локомотива. Представить научно обоснованные рекомендации по компенсации сигнала прямого прохождения излучения между двумя антеннами бистатической СБРЛ.

1.8. Выводы

На основе выполненного обзора литературы, посвященной исследованиям автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ, можно заключить следующее. Дальнейшее развитие теории АД, направленной на изучение свойств различных типов генераторов и схемных решений, поиск новых режимов работы и методов модуляции, а также особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик АД, расширение функциональных возможностей и области применения СБРЛ, является актуальной задачей. При этом необходимо отметить,

что для теории и практики автодинных СБРЛ востребованными являются результаты исследования АД с АМ и ЧМ с учетом их взаимного влияния на сигнальные характеристики. Кроме того, практический интерес представляют результаты исследований шумовых характеристик, а также режима биений генератора для определения динамических свойств генераторов как АД.

Поэтому основной целью диссертации, сформулированной выше, является «Исследование динамических особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ, а также изучение свойств АД при асинхронном воздействии излучения от стороннего источника». Для достижения указанной цели были поставлены сформулированные выше задачи исследований.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ СИГНАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОДИННЫХ СБРЛ С АМ И ЧМ

2.1. Введение

В настоящей главе на основе методов теории нелинейных колебаний разработана математическая модель автодинной СБРЛ в виде системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Полученные уравнения описывают функционирование автодинного генератора с различными видами модуляции, учитывают внутренние шумы генератора и воздействие отраженного от объекта локации излучения. Данные уравнения необходимы для расчета и анализа динамики формирования сигнальных и шумовых характеристик АД в условиях произвольного времени запаздывания отражённого излучения относительно периодов автодинного сигнала и модулирующей функции, как при сравнительно «низких», так и «высоких» скоростях движения объектов локации.

Для этого в разделе 2.2 на основе анализа эквивалентной схемы одноконтурной автоколебательной системы получены основные уравнения, описывающие процесс взаимодействия СВЧ генератора с собственным излучением, отражённым от объекта локации. При этом учтены также внутренние шумы активного элемента (АЭ) генератора. В разделе 2.3 получены общие выражения, описывающие процесс формирования сигнальных характеристик АД с одновременными изменениями амплитуды и частоты колебаний генератора для произвольного закона модуляции. В разделе 2.4 полученные в предыдущем разделе результаты конкретизированы на случай гармонического закона модуляции. В разделе 2.5 получены выражения для расчета и анализа особенностей формирования шумовых характеристик в автодинной СБРЛ с частотной модуляцией. Выводы по главе приведены в разделе 2.6.

Основные результаты выполненных в главе 2 исследований опубликованы в статьях [95–97], изложены в материалах научно-технических конференций [98–101], а также представлены в двух отчётах о НИР.

2.2. Эквивалентная схема и общие уравнения для анализа динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинов

Получим основные уравнения, описывающие формирование автодинного отклика в одночастотном генераторе с одноконтурной колебательной системой (КС) при воздействии отраженного от цели сигнала и собственных шумов активного элемента (АЭ), определяющего условия возбуждения и поддержание колебаний. Для этого рассмотрим представленную на рис. 2.1, *а* функциональную схему автодинного приемопередатчика.

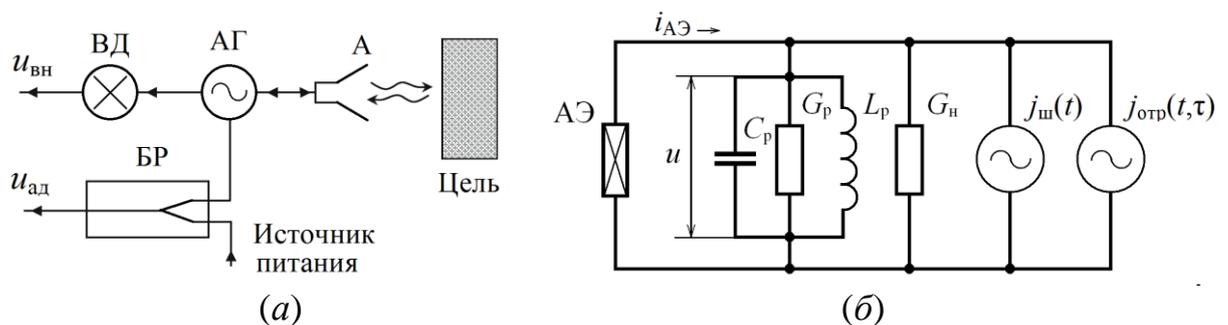


Рис. 2.1. Функциональная (*а*) и эквивалентная (*б*) схемы автодинного приемопередатчика.

Собственно АД представляет собой совокупность СВЧ генератора (АГ), непосредственно связанного с антенной А, и средств регистрации автодинного отклика. Генерируемые АГ колебания в виде электромагнитного СВЧ излучения антенной А направляются на объект локации (цель). Отраженное от цели СВЧ излучение принимается антенной А, преобразуются в СВЧ колебания, которые поступают далее в генератор АГ. В результате взаимодействия отраженных и собственных колебаний на АЭ АГ возникает автодинный эффект [79, 102–103], который состоит в изменениях амплитуды и частоты колебаний АГ. При этом изменения параметров автоколебаний преобразуются благодаря нелинейности АГ также в изменения практически всех токов и (или) напряжений смещения на его электродах [104].

При выделении автодинного отклика в цепи смещения АЭ посредством схемы блока регистрации (БР) обычно получают сигнал автодетектирования $u_{ад}$ [105]. Во многих применениях автодинов полезный сигнал выделяется с помощью

схемы внешнего детектирования (ВД) $u_{\text{вн}}$, которая преобразует автодинные изменения амплитуды или частоты колебаний в напряжение выходного сигнала низкой частоты [105, 106].

Эквивалентная схема АД с одноконтурной КС приведена на рис. 2.1, б. В ней СВЧ резонатор в окрестности частоты генерации представлен простейшим параллельным колебательным контуром, включающим пассивные параметры АЭ и состоящим из индуктивности L_p , ёмкости C_p и суммарной проводимости G : $G = G_p + G_n$, где G_p – проводимость собственных потерь резонатора, G_n – проводимость нагрузки.

Генератор $j_{\text{ш}}(t)$ на схеме рис. 2.1, б отображает эквивалентный источник мгновенного тока внутренних шумов АГ, которым обычно являются нестационарные процессы в АЭ. При этом полагаем, что шум является стационарным нормальным процессом с нулевым средним значением. Источник $j_{\text{отр}}(t, \tau)$ представляет воздействие собственного отражённого от цели излучения, которое запаздывает относительно текущего времени t на время $\tau = 2l/c$, где l – расстояние до цели; c – скорость распространения радиоволн.

Активный элемент АЭ (см. рис. 2.1, б) с вольт-амперной характеристикой N -типа (например, диод Ганна) по постоянному току непосредственно подключен к источнику напряжения смещения, а по переменному току – параллельно резонатору. Полагаем, что вольтамперная характеристика АЭ из-за конечности времени переноса зарядов в пространстве взаимодействия с полем резонатора в общем случае имеет гистерезис. Это означает, что мгновенный ток $i_{\text{АЭ}} \equiv i_{\text{АЭ}}(t)$ АЭ является функцией мгновенного напряжения $u \equiv u(t)$ и скорости его изменения $\dot{u} = du/dt$: $i_{\text{АЭ}} = i_{\text{АЭ}}(u, \dot{u})$. Полагаем также, что время релаксации АЭ существенно меньше характеристического времени изменения амплитуды генерируемых колебаний. С учётом сделанных замечаний для схемы на рис. 2.1, б запишем исходное дифференциальное уравнение:

$$d^2u/dt^2 + \omega_c^2 u = F(u, \dot{u}, t), \quad (2.1)$$

где $F(u, \dot{u}, t) = -\frac{\omega_c}{Q_H} \left\{ \left[1 + \frac{1}{G} \frac{di_{AЭ}(u, \dot{u})}{du} \right] \frac{du}{dt} - \frac{1}{G} \frac{dj_{отр}(t, \tau)}{dt} - \frac{1}{G} \frac{dj_{ш}(t)}{dt} \right\}$; $\omega_c = (L_p C_p)^{-1/2}$,

$Q_H = \omega_c C_p / G$ – собственная частота и нагруженная добротность КС соответственно.

Под воздействием тока АЭ и при условии выполнения баланса амплитуд и фаз в КС АД возникают незатухающие колебания $u(t)$. Учитывая достаточно высокое значение нагруженной добротности Q_H КС, естественно полагать [3, 107], что приближенное решение уравнения (2.1) является квазигармоническим:

$$u \equiv u(t) = A(t) \cos \Psi(t). \quad (2.2)$$

где $\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi(t)$ – полная фаза колебаний в окрестности частоты ω_0 , которую примем равной частоте стационарных колебаний автономного генератора; $A(t)$ и $\varphi(t)$ – медленно меняющиеся за период амплитуда и фаза автоколебаний. Тогда производную от (2.2) запишем в виде

$$\dot{u} = -\omega_0 A(t) \sin \Psi(t). \quad (2.3)$$

Из (2.2) и (2.3) следует [3], что переменные $A(t)$ и $\varphi(t)$ должны удовлетворять уравнению:

$$\frac{dA}{dt} \cos \Psi(t) - A \frac{d\varphi}{dt} \sin \Psi(t) = 0. \quad (2.4)$$

Учитывая малое значение величины относительной расстройки текущей частоты генерации ω и частоты ω_c , когда относительная расстройка $(\omega^2 - \omega_c^2) / \omega_c \ll 1$, исходное уравнение (2.1) перепишем в виде:

$$d^2 u / dt^2 + \omega^2 u = f(u, \dot{u}, t). \quad (2.5)$$

где $f(u, \dot{u}, t) = -\frac{\omega_c}{Q_H} \left[\frac{du}{dt} + \frac{1}{G} \frac{di_{AЭ}(u, \dot{u})}{du} - Q_H u \frac{\omega^2 - \omega_c^2}{\omega_c} - \frac{1}{G} \frac{dj_{отр}(t, \tau)}{dt} - \frac{1}{G} \frac{dj_{ш}(t)}{dt} \right]$.

Колебания эквивалентного источника тока $j_{отр}(t, \tau)$, имеющего амплитуду $J_{отр}(t, \tau)$ и полную фазу $\Psi(t, \tau)$ отражённого радиосигнала, являются также квазигармоническими. Тогда выражения для тока $j_{отр}(t, \tau)$ и его производной имеют вид:

$$j_{\text{отр}}(t, \tau) = J_{\text{отр}}(t, \tau) \cos \Psi(t, \tau), \quad d j_{\text{отр}}(t, \tau) / dt = - J_{\text{отр}}(t, \tau) \omega_0 \sin \Psi(t, \tau). \quad (2.6)$$

В правой части выражений (2.6) учтём энергетические соотношения для генераторов: $J_{\text{отр}}(t, \tau) = [8G_{\text{н}} P_{\text{отр}}(t, \tau)]^{1/2}$, где: $P_{\text{отр}}(t, \tau) = \Gamma_0^2 P_{\text{н}}(t, \tau)$ – мощность отраженного от объекта локации излучения; $P_{\text{н}}(t, \tau) = A^2(t, \tau) G_{\text{н}} / 2$ – выходная мощность на нагрузке генератора в момент времени $t - \tau$; Γ_0 – коэффициент, характеризующий затухание излучения по амплитуде при его распространении до цели и обратно.

Решая уравнение (2.5) при подстановке в него (2.2), (2.3) и (2.6), получим выражения для медленных переменных A и φ , которые в стандартной форме метода усреднения [3, 107] примут вид:

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{1}{Q_{\text{н}} \omega} f(A, \Psi, t) \sin \Psi(t), \quad (2.7)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{1}{Q_{\text{н}} A \omega} f(A, \Psi, t) \cos \Psi(t), \quad (2.8)$$

где

$$f(A, \Psi, t) = -\omega_c [-\omega A \sin \Psi(t)] + \omega_c \frac{1}{G} \frac{d i_{\text{АЭ}}(u, \dot{u})}{du} - \omega_c \left[Q_{\text{н}} \frac{\omega^2 - \omega_c^2}{\omega_c} A \cos \Psi(t) - \frac{2\Gamma_0 G_{\text{н}}}{G} \omega A(t, \tau) \sin \Psi(t, \tau) - \frac{1}{G} \frac{d j_{\text{ш}}(t)}{dt} \right].$$

Уравнения (2.7) и (2.8) в рамках квазигармонического приближения эквивалентны исходному уравнению (2.1). Дальнейший их анализ обычно приводит к укороченным уравнениям для амплитуды и фазы автоколебаний. Для этого ток АЭ представим в виде ряда Фурье:

$$i_{\text{АЭ}}(u, \dot{u}) = I_0(A, \omega) + \sum_{n=1}^{\infty} [I_{n\text{Re}}(A, \omega) \cos n\Psi(t) + I_{n\text{Im}}(A, \omega) \sin n\Psi(t)]. \quad (2.9)$$

где $I_0(A, \omega)$, $I_{n\text{Re}}(A, \omega)$, $I_{n\text{Im}}(A, \omega)$ – постоянная составляющая и амплитуды синфазных и ортогональных составляющих гармоник тока АЭ:

$$I_0(A, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{\text{АЭ}}(u, \dot{u}) d\Psi,$$

$$I_{n\text{Re}}(A, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{A\text{Э}}(u, \dot{u}) \cos n\Psi d\Psi,$$

$$I_{n\text{Im}}(A, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{A\text{Э}}(u, \dot{u}) \sin n\Psi d\Psi.$$

Учитывая среди составляющих (2.9) только первую гармонику тока, представим АЭ генератора в виде параллельного соединения средних за период колебаний двух проводимостей, имеющих соответственно «резистивный» $G_{A\text{Э}} \equiv G_{A\text{Э}}(A, \omega) = I_{1\text{Re}}(A, \omega) / A$ и «реактивный» $B_{A\text{Э}} \equiv B_{A\text{Э}}(A, \omega) = I_{1\text{Im}}(A, \omega) / A$ характер. Тогда из (2.7) и (2.8) после усреднения за период колебаний получим систему укороченных дифференциальных уравнений для амплитуды и фазы АД:

$$\frac{2GQ_{\text{н}}}{\omega_{\text{с}}} \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + G_{A\text{Э}} + G_{\text{кс}} = 2\Gamma(t, \tau) \eta G \cos \delta(t, \tau) + \frac{2}{A} i_{\text{с}}(t). \quad (2.10)$$

$$\frac{2GQ_{\text{н}}}{\omega_{\text{с}}} \frac{d\varphi}{dt} + B_{A\text{Э}} + 2GQ_{\text{н}} \frac{\omega - \omega_{\text{с}}}{\omega_{\text{с}}} = -2\Gamma(t, \tau) \eta G \sin \delta(t, \tau) - \frac{2}{A} i_{\text{с}}(t). \quad (2.11)$$

где $\eta = Q_{\text{н}} / Q_{\text{вн}}$, $Q_{\text{вн}}$ – кпд и внешняя добротность КС; $i_{\text{с}}(t)$, $i_{\text{с}}(t)$ – синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума генератора:

$$i_{\text{с}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} j_{\text{ш}}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) d(\omega_0 t),$$

$$i_{\text{с}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} j_{\text{ш}}(t) \sin(\omega_0 t + \varphi) d(\omega_0 t);$$

$\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0[A(t, \tau) / A(t)]$ – модуль и $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$ – фаза мгновенного значения коэффициента отражения, приведенного к нагрузке генератора [108]. В данном случае фаза $\delta(t, \tau)$ и квадратурные составляющие шума $i_{\text{с}}(t)$ и $i_{\text{с}}(t)$ после усреднения стали также медленно меняющимися функциями за период $T = 2\pi / \omega_0$ колебаний [3, 109].

Уравнения (2.10), (2.11) получены в рамках обычных приближений, применяемых для анализа автоколебательных систем [3, 110, 111]. Как показано ниже, эти уравнения довольно точно описывают динамику поведения как сигнальных, так и шумовых характеристик при произвольных значениях уровня

амплитуды воздействующего на него излучения, а также времени запаздывания отраженного от цели излучения относительно периода автодинного сигнала.

При условиях $\Gamma_0 = 0$ и $j_{\text{ш}}(t) = 0$ уравнения (2.10), (2.11) определяют работу автономного генератора, параметры стационарных колебаний которого при равенстве нулю производных в этих уравнениях и $B_{\text{АЭ}} = B_{\text{АЭ}}^0$, $G_{\text{АЭ}} = G_{\text{АЭ}}^0$, $\omega = \omega_0$, находятся из соотношений:

$$G + G_{\text{АЭ}}^0 = 0, \quad B_p^0 + B_{\text{АЭ}}^0 = 0. \quad (2.12)$$

где $G_{\text{АЭ}}^0 = G_{\text{АЭ}}(A_0, \omega_0)$, $B_{\text{АЭ}}^0 = B_{\text{АЭ}}(A_0, \omega_0)$; $B_p^0 = 2GQ_{\text{н}}\chi_0$ – реактивная составляющая пассивной части КС на частоте ω_0 ; $\chi_0 = (\omega_0 - \omega_c) / \omega_c$ – относительная расстройка частоты резонатора ω_c от частоты стационарных колебаний ω_0 автономного генератора. Частоту ω_0 можно вычислить, используя (2.12):

$$\omega_0 = \omega_c \left(1 + \frac{\text{tg}\Theta_{\text{АЭ}}}{2Q_{\text{н}}} \right), \quad (2.13)$$

где $\Theta_{\text{АЭ}} = \text{arctg}(B_{\text{АЭ}}^0 / G_{\text{АЭ}}^0)$ – угол запаздывания АЭ. Уравнения (2.12) и (2.13) стационарного режима хорошо известны в теории автоколебаний для определения амплитуды и частоты автономного СВЧ генератора [110, 111].

Поведение СВЧ генератора наиболее просто проанализировать в приближении малого сигнала, полагая $\Gamma_0 \ll 1$. Для этого представим амплитуду и частоту автоколебаний в виде: $A = A_0 + \Delta A$; $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, где ΔA и $\Delta\omega = d\varphi / dt$ – автодинные изменения стационарного режима генератора соответственно. Входящие в уравнения (2.10) и (2.11) параметры $G_{\text{АЭ}}$ и $B_{\text{АЭ}}$ при этом относительно стационарных значений $G_{\text{АЭ}}^0$ и $B_{\text{АЭ}}^0$ получают соответствующие приращения. Полагая внешнее воздействие достаточно малым, так что, $\Delta A \ll A_0$, $\Delta\omega \ll \omega_0$, запишем указанные параметры с учетом первых двух членов разложения в ряды Тейлора в окрестности стационарного режима автоколебаний:

$$G_{\text{АЭ}} = G_{\text{АЭ}}^0 + \left(\frac{\partial G_{\text{АЭ}}}{\partial A} \right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial G_{\text{АЭ}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega, \quad (2.14)$$

$$B_{AЭ} = B_{AЭ}^0 + \left(\frac{\partial B_{AЭ}}{\partial A} \right)_0 a + \left(\frac{\partial B_{AЭ}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega, \quad (2.15)$$

где частные производные взяты в окрестности стационарного режима колебаний генератора (индекс «0» около больших скобок).

Подставляя (2.14), (2.15) в (2.10), (2.11) и учитывая соотношения (2.12), получим систему неоднородных линеаризованных уравнений для определения относительных автодинных изменений амплитуды $a = \Delta A / A_0$ и частоты $\chi = \Delta\omega / \omega_0 = (d\varphi / dt) / \omega_0$ колебаний в виде:

$$\frac{Q_n}{\omega_0} \frac{da}{dt} + \alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (2.16)$$

$$\beta a + \xi \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau) - a_s(t), \quad (2.17)$$

где $\alpha = (A_0 / 2G)(\partial G_{AЭ} / \partial A)_0$ – крутизна резистивной проводимости АЭ генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла; $\varepsilon = \varepsilon_{KC} + \varepsilon_{AЭ}$ – параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через изменения параметров резистивной проводимости КС $\varepsilon_{KC} = (\omega_0 / 2G)(\partial G / \partial \omega)_0$ и электронной проводимости АЭ $\varepsilon_{AЭ} = (\omega_0 / 2G)(\partial G_{AЭ} / \partial \omega)_0$; $\beta = (A_0 / 2G)(\partial B_{AЭ} / \partial A)_0$ – параметр, определяющий неизохронность генератора; $\xi = \xi_{KC} + \xi_{AЭ}$ – параметр стабилизации частоты генератора, учитывающий частотную крутизну реактивных проводимостей КС $\xi_{KC} = (\omega_0 / 2G)(\partial B_{KC} / \partial \omega)_0$ и АЭ $\xi_{AЭ} = (\omega_0 / 2G)(\partial B_{AЭ} / \partial \omega)_0$, смысл последних – нагруженная добротность одноконтурной колебательной системы $\xi_{KC} = Q_n$ и добротность электронной проводимости АЭ $\xi_{AЭ} = Q_{AЭ}$ соответственно¹; $a_c(t) = i_c(t) / A_0 G$, $a_s(t) = i_s(t) / A_0 G$ – относительные синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума генератора.

Из уравнений (2.16), (2.17) видно, что основная инерционность автодинной системы связана с изменениями амплитуды колебаний генератора. Комбинируя

¹ Обычно в СВЧ генераторах выполняется сильное неравенство $\xi_{AЭ} \ll \xi_{KC} = Q_n$. Поэтому в дальнейшем будем полагать $\xi = Q_n$.

эти выражения при $a_c(t) = a_s(t) = 0$ и исключая переменную χ , получим:

$$\tau_a (da/dt) + a = \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (2.18)$$

где τ_a – постоянная времени (время релаксации) [79, 86] автодинного отклика, характеризующая скорость изменения процессов в автодине:

$$\tau_a = Q_n / [\omega_0 \alpha (1 - \gamma \rho)]; \quad (2.19)$$

$\gamma = \beta / \alpha = (\partial B_{AЭ} / \partial A) / (\partial G_{AЭ} / \partial A)$, $\rho = \varepsilon / Q_n = (\partial G_{KC} / \partial \omega) / (\partial B_{KC} / \partial \omega)$ – коэффициенты неизохронности и неизодромности генератора соответственно [109]; $\psi = \arctg(\rho)$ – угол фазового смещения автодинных изменений амплитуды; K_a – коэффициент автодинного усиления (амплитудной чувствительности автодина), показывающий во сколько раз амплитуда автодинного отклика превышает амплитуду приходящей к генератору отражённой волны [79]:

$$K_a = \eta \sqrt{1 + \rho^2} / \alpha (1 - \gamma \rho). \quad (2.20)$$

В работах [81, 83, 84, 113] и ниже (см. раздел 5.2) различными методами выполнены измерения постоянной времени τ_a автодинного отклика. Для генератора 8-мм диапазона на диоде Ганна она составила величину порядка $1 \cdot 10^{-9}$ с. Однако регистрируемые автодинными устройствами процессы, период сигналов T_c которых обычно не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ с, протекают значительно медленнее, чем скорость изменения параметров СВЧ генераторов: $T_c \gg \tau_a, \tau$. Кроме того, далее будем считать, что время корреляции τ_k шумов в генераторе также пренебрежимо мало по сравнению с периодом T_c автодинного отклика: $\tau_k \ll T_c$, но значительно превосходит постоянную времени τ_a и время τ распространения излучения до отражающей поверхности и обратно: $\tau_k \gg \tau_a, \tau$. Данные условия представляются достаточными, чтобы дальнейший анализ системы (2.16), (2.17) выполнять квазистатическим методом [112, 114].

С учётом принятых допущений, полагая производную в (2.16) равной нулю, получим искомые уравнения для дальнейшего анализа автодинов:

$$\alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(\tau, t) + a_c(t), \quad (2.21)$$

$$\beta a + Q_n \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(\tau, t) - a_s(t). \quad (2.22)$$

Полученные выражения (2.16), (2.17) и (2.21), (2.22) далее будут использованы для разработки математической модели автодинной СБРЛ с ЧМ. Они обладают достаточно широкой общностью, поскольку обеспечивают возможность анализировать автодинный эффект в СВЧ генераторах с любым типом АЭ (туннельные диоды, диоды Ганна, полевые и биполярные транзисторы). При этом первая пара выражений учитывает общий случай учета как внешней, так и внутренней инерционности автодинной системы «генератор – объект локации», а вторая пара – только внешнюю инерционность этой системы [83]. Кроме того, полученные выражения учитывают также такие внутренние параметры генератора, как неизохронность и неизодромность. Они совпадают с уравнениями, полученными в [115] методом Курокавы. Отметим, что в случае СВЧ генераторов, выполненных на ЛПД, у которых динамическая вольт-амперная характеристика S-типа, полученные результаты являются также справедливыми при условии дуальной замены основных понятий: ток \leftrightarrow напряжение, проводимость \leftrightarrow сопротивление и т.п.

2.3. Общие уравнения для анализа автодинов в случае одновременно

АМ и ЧМ колебаний при произвольном законе модуляции

Математическая модель АД в виде системы (2.21) и (2.22), в основе которой предполагается амплитудно-фазовое запаздывание отражённого от цели излучения, справедлива также и для случая АД с одновременной амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ). В этой модели без учета внутренних шумов генератора, когда $a_c(t) = a_s(t) = 0$, выражение для выходных квазигармонических колебаний, модулированных одновременно по амплитуде и частоте и излучаемых посредством антенны в направлении цели, в общем виде можно записать как:

$$u_{\text{изл}}(t) = A(t) \cos \Psi(t) = A_0 [1 + m_{\text{АМ}} f_M(t)] \cos \left[\omega_0 t + \omega_0 m_{\text{ЧМ}} \int_0^t f_M(t) dt \right], \quad (2.23)$$

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

генерации в процессе ЧМ; ΔA_{AM} – наибольшее отклонение амплитуды от стационарного значения A_0 при модуляции частоты генерации; $m_{ЧМ} = \Delta\omega_{ЧМ} / \omega_0$ – коэффициент ЧМ; $\Delta\omega_{ЧМ}$ – наибольшее отклонение (девиация) частоты колебаний генератора от его стационарного значения ω_0 вследствие ЧМ; $f_M(t)$ – нормированная модулирующая функция.

Отраженные от цели и принятые антенной колебания $u_{отр}(t, \tau)$ запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_{отр}(t, \tau) &= \Gamma_0 A(t, \tau) \cos \Psi(t, \tau) = \\ &= \Gamma_0 A_0 [1 + m_{AM} f_M(t, \tau)] \cos \left[\omega_0(t - \tau) + \omega_0 m_{ЧМ} \int_{t-\tau}^t f_M(t, \tau) dt + \varphi_0 \right], \end{aligned} \quad (2.24)$$

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

Решение системы (2.21), (2.22) с учетом (2.23), (2.24) для малосигнальных автодинных изменений амплитуды $A(t)$ и частоты $\omega(t)$ автоколебаний генератора, когда $\Gamma_0 \ll 1$, в квазистатическом приближении имеет вид:

$$A(t) = A_0 \{1 + m_{AM} f_M(t, \tau) + \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi]\}, \quad (2.25)$$

$$\omega(t) = \omega_0 \{1 + m_{ЧМ} f_M(t, \tau) - \Gamma(t, \tau) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta]\}, \quad (2.26)$$

где K_a , L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации [109]; $\psi = \arctg(\rho)$, $\theta = \arctg(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений; $\rho = \varepsilon / Q_H$, $\gamma = \beta / \alpha$ – коэффициенты неизодромности и неизохронности генератора соответственно.

Второе слагаемое в правой части уравнения (2.25) повторяет закон модуляции $m_{AM} f_M(t)$ и определяет уровень сопутствующей, так называемой, «паразитной» АМ (ПАМ) при регистрации автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний. При малом уровне ПАМ влиянием этого слагаемого на формирование полезного сигнала можно пренебречь. Однако в ряде случаев, например, при модуляции генератора по изменению напряжения питания, высокий уровень ПАМ может оказывать существенное и нежелательное влияние

на формирование автодинного сигнала.

Выполним анализ особенностей формирования сигналов для режима непрерывного АЧМ излучения, описываемых в (2.25), (2.26) третьими членами правой части. Для выявления функций запаздывающего воздействия $f_m(t, \tau)$, $A(t, \tau)$ и $\Psi(t, \tau)$ в этих выражениях выполним их разложение в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с текущим временем t [8, 116]. В результате получим:

$$f_m(t, \tau) = f_m(t) + \sum_{n=1}^N (-1)^n \frac{\tau^n}{n!} \frac{d^n f_m(t)}{dt^n}, \quad (2.27)$$

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 \frac{A(t, \tau)}{A(t)} = \Gamma_0 \left[1 - \frac{m_{AM}}{1+a(t)} M_{AM}(t) + \frac{a_m}{1+a(t)} M_{AD}(t, \tau) \right], \quad (2.28)$$

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau) = \omega_0 \tau + p_{ФМ}(\tau) F_{ЧМ}(t) - C_{OC} F_{AD}(t, \tau), \quad (2.29)$$

где n – здесь и далее порядковый номер членов разложений; $M_{AM}(t)$, $M_{AD}(t, \tau)$ – множители, обусловленные процессом АМ и автодинными изменениями амплитуды колебаний генератора соответственно:

$$M_{AM}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{\tau^n}{n!} \cdot \frac{d^n f_m(t)}{dt^n}, \quad (2.30)$$

$$M_{AD}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} H_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau) - \psi - \Phi_n(\Omega_a \tau)]; \quad (2.31)$$

$F_{ЧМ}(t)$, $F_{AD}(t, \tau)$ – множители, обусловленные процессом ЧМ и автодинными изменениями частоты колебаний генератора соответственно:

$$F_{ЧМ}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{\tau^{n-1}}{n!} \cdot \frac{d^{n-1} f_m(t)}{dt^{n-1}}; \quad (2.32)$$

$$F_{AD}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau) + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau)]; \quad (2.33)$$

$a(t, \tau) = m_{AM} f_m(t) + a_m \cos[\delta(t, \tau) - \psi]$; $\Omega_a = d[\delta(t, \tau)]/dt$ – мгновенная частота автодинного сигнала; $a_m = \Gamma_0 K_a$ – относительная глубина автодинных изменений амплитуды колебаний; $p_{ФМ}(\tau) = m_{ЧМ} \omega_0 \tau$ – индекс фазовой модуляции,

обусловленной ЧМ; $C_{OC} = \Delta\omega_a \tau$ – параметр внешней обратной связи (ОС) АД; $\Delta\omega_a = \Gamma_0 L_a \omega_0$ – автодинная девиация частоты колебаний; $H_n(\Omega_a \tau)$, $S_n(\Omega_a \tau)$ – коэффициенты и $\Phi_n(\Omega_a \tau)$ – их фазы:

$$H_n(\Omega_a \tau) = \frac{(\Omega_a \tau)^{2n-1}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega_a \tau}{2n}\right)^2}, \quad S_n(\Omega_a \tau) = \frac{(\Omega_a \tau)^{2(n-1)}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega_a \tau}{2n}\right)^2}, \quad (2.34)$$

$$\Phi_n(\Omega_a \tau) = \arctg(\Omega_a \tau / 2n); \quad (2.35)$$

Из выражений (2.29) и (2.33) видно, что в отношении $\delta(t, \tau)$ трансцендентное уравнение (2.29) является попережнему неявным. Для выявления (2.29) при условии его гладкости, когда $C_{OC} < 1$, находим $\delta(t, \tau)$ методом последовательных приближений. Данное решение в виде фазовой характеристики $\delta(t, \tau)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & \delta_{(0)} - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(1)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) - \\ & - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(2)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) - \dots \\ & \dots - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(k)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau)]] \dots], \end{aligned} \quad (2.36)$$

где $\delta_{(0,1,\dots,k)} = \omega_0 \tau + p_{ФМ}(\tau) F_{ЧМ}(t)$; индексами в круглых скобках около слагаемых δ обозначен порядок приближения.

При анализе обычных АД без модуляции в (2.28) и (2.29) нужно положить $m_{AM} = p_{ФМ} = 0$. Если при этом выполняется сильное неравенство $\Omega_a \tau \ll 1$, что свойственно большинству применений СБРЛ, то из (2.28), (2.29) получим $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0$ и $\delta(t, \tau) = \omega \tau$ [79, 112]. Для случая анализа АД с ЧМ в этих выражениях следует приравнять нулю m_{AM} [11], а для анализа АД с АМ необходимо положить $m_{ЧМ} = 0$ [37]. Таким образом, разработанная математическая модель АД для произвольного закона модуляции является более общей, чем модели, полученные в предшествующих работах.

2.4. Общие выражения для расчета сигнальных характеристик автодинов при гармонической модуляции амплитуды и частоты

Сигналы АД, как отмечалось выше, обычно регистрируются в цепи питания генератора (сигнал автодетектирования) или по изменению амплитуды его колебаний с помощью детекторного диода [105]. В формирование этих сигналов вносят свой вклад изменения амплитуды и фазы $\delta(t, \tau)$, обусловленные процессом модуляции и автодинными изменениями параметров генерации, а также запаздыванием отражённого сигнала из-за перемещения объекта локации. В данном разделе рассмотрим случай синусоидальной модуляции амплитуды и частоты колебаний генератора.

Основными достоинствами этого вида модуляции являются простота реализации и сравнительно низкий уровень высших гармоник сигнала модуляции. В связи с этим, выделение слабых сигналов на фоне основных составляющих сигнала выполняется довольно просто. Поэтому гармонический закон $f_m(t) = \sin(\Omega_m t)$ модулирующей функции, как известно [10, 11, 37], широко используется в автодинных системах для решения многих задач ближней радиолокации.

Для нормальной работы СБРЛ с АЧМ частота Ω_m модуляции должна значительно отличаться от частоты Ω_a автодинного сигнала [9, 53]. При таких условиях спектр сигнала и спектральные составляющие, обусловленные процессом АЧМ, не перекрываются, что упрощает задачу частотной селекции полезных составляющих спектра автодинного сигнала. Случай формирования сигнала при выполнении сильного неравенства $\Omega_m \ll \Omega_a$, когда составляющие полезного сигнала находятся в области выше частоты модуляции, рассмотрен в работе [37]. Здесь рассмотрим случай выполнения обратного неравенства $\Omega_m \gg \Omega_a$, когда основные спектральные составляющие полезного сигнала группируются не только в области низких «нулевых» частот, но и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции [9, 53]. При этом выясним закономерности формирования амплитуды полезного сигнала в зависимости от расстояния до

цели при вариации иных параметров СБРЛ с АЧМ.

Данную зависимость принято называть характеристикой амплитудной селекции (ХАС) цели по дальности. Основными уравнениями для анализа этой характеристики в настоящих исследованиях являются выражения (2.25) и (2.26) с учётом (2.36) и разложений в ряды (2.27) – (2.35). В этих выражениях реальное соотношение коэффициента АМ m_{AM} и амплитуды a_m автодинного отклика таково, что обычно $m_{AM} \gg a_m$ и влиянием автодинных изменений амплитуды колебаний на уровень отраженного излучения можно пренебречь. Поэтому выражение (2.25) для расчета ХАС можно значительно упростить. Это выражение для относительного уровня автодинного сигнала $a_{отн}(t)$ после выполнения его нормировки имеет вид:

$$a_{отн}(t) = \frac{a(t)}{a_m} = \left[1 - \frac{m_{AM} M_{AM}(t)}{1 + m_{AM} \sin(\Omega_m t)} \right] \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (2.37)$$

где

$$M_{AM}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} M_n(r_{hp}) \cos[(\Omega_m t) - \Psi_n(r_{hp})]; \quad (2.38)$$

$M_n(r_{hp})$ – коэффициенты и $\Psi_n(r_{hp})$ – фазовые углы членов разложения (2.38) в ряд:

$$M_n(r_{hp}) = \frac{(2\pi r_{hp})^{2n-1}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{hp}}{2n} \right)^2}, \quad \Psi_n(r_{hp}) = \operatorname{arctg} \frac{2\pi r_{hp}}{2n}, \quad (2.39)$$

$r_{hp} = \Omega_m \tau / 2\pi = l / (\Lambda_m / 2)$ – нормированное расстояние до цели; $\Lambda_m = 2\pi c / \Omega_m$ – длина модулирующей волны.

Здесь входящее в (2.37) выражение для фазовой характеристики $\delta(t, \tau)$ (2.36) перепишем с учетом нормировки расстояния до цели в виде:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & \delta_{(0)} - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{hp}) \sin[\delta_{(1)} + \\ & + \theta - \Phi_n(r_{hp}) - C_{OC} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{hp}) \sin[\delta_{(2)} + \theta - \Phi_n(r_{hp}) - \dots \end{aligned}$$

$$\dots - C_{\text{OC}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{\text{HP}}) \sin[\delta_{(k)} + \theta - \Phi_n(r_{\text{HP}})] \dots]; \quad (2.40)$$

где $\delta_{(0,1,2,\dots,k)} = 2\pi\tau_{\text{HB}} + 2\pi k_{\text{ЧМ}} r_{\text{HP}} F_{\text{ЧМ}}(t)$; $\tau_{\text{HB}} = \omega_0 \tau / 2\pi$ – нормированное время;
 $k_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \Omega_{\text{M}}$ – индекс ЧМ; $S_n(r_{\text{HP}})$ – коэффициенты и $\Phi_n(r_{\text{HP}})$ – фазовые углы членов разложения (2.40) в ряд:

$$S_n(r_{\text{HP}}) = \frac{(2\pi r_{\text{HP}} / z)^{2(n-1)}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\text{HP}}}{2nz}\right)^2}, \quad \Phi_n(r_{\text{HP}}) = \arctg \frac{2\pi r_{\text{HP}}}{2nz}; \quad (2.41)$$

$z = \Omega_{\text{M}} / \Omega_{\text{a}}$ – соотношение частот модуляции и автодинного сигнала;

$$F_{\text{ЧМ}}(t) = \sin(\Omega_{\text{M}} t) - \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} F_n(r_{\text{HP}}) \cos[(\Omega_{\text{M}} t) - \Theta_n(r_{\text{HP}})], \quad (2.42)$$

$F_n(r_{\text{HP}})$ – коэффициенты и $\Theta_n(r_{\text{HP}})$ – фазовые углы членов разложения (2.42):

$$F_n(r_{\text{HP}}) = \frac{(2\pi r_{\text{HP}})^{2n-1}}{2n!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\text{HP}}}{2n+1}\right)^2}, \quad \Theta_n(r_{\text{HP}}) = \arctg \frac{2\pi r_{\text{HP}}}{2n+1}. \quad (2.43)$$

Из анализа (2.37) с учётом (2.38) – (2.43) следует, что ХАС является периодической функцией нормированного расстояния r_{HP} до цели, определяемого периодом модулирующей функции $f_{\text{M}}(t)$. Поэтому далее ограничимся анализом только её основной составляющей, заключённой в интервале $0 < r_{\text{HP}} < 1$. Кроме того, для облегчения анализа полагаем, что z представляет собой натуральный ряд чисел, причём $z \gg 1$.

Если условия работы СБРЛ таковы, что необходимо рассматривать ХАС только вблизи антенны (начальный участок ХАС), где выполняется неравенство $r_{\text{HP}} \ll 1$, то выражение (2.37) упрощается и имеет вид:

$$a_{\text{отн}}(t) = \left[1 - \frac{2\pi r_{\text{HP}} m_{\text{AM}} \cos(\Omega_{\text{M}} t)}{1 + m_{\text{AM}} \sin(\Omega_{\text{M}} t)} \right] \cos[2\pi k_{\text{ЧМ}} r_{\text{HP}} \sin(\Omega_{\text{M}} t)]. \quad (2.44)$$

Однако с увеличением расстояния до цели, где применение выражения (2.44) становится неприемлемым, число требуемых для расчета членов рядов в (2.38) – (2.43) быстро растёт. Это значительно усложняет анализ ХАС. Например,

при выполнении неравенства $r_{\text{нр}} \leq 1$, которое означает, что время запаздывания τ отражённого излучения должно составлять величину не более шестой части полупериода модулирующей функции, необходимое число первых членов разложений (2.38) – (2.43) должно быть не менее пяти. Для корректного описания ХАС на всём её интервале $0 < r_{\text{нр}} < 1$, как показали расчёты, требуется значительно увеличить число N членов этого ряда: $N \geq 25$. В таких условиях в общем случае произвольного значения $r_{\text{нр}}$ выяснение особенностей формирования автодинных сигналов аналитическими методами представляется неприемлемым, поэтому далее для достижения поставленной цели воспользуемся численным методом.

В следующей главе, на основе полученных здесь выражений, с использованием пакета программ «MathCAD» выполнен численный анализ особенностей поведения АД с АЧМ для гармонического закона модулирующей функции. При выполнении этих вычислений приняты приближения, учитывающие реальные условия функционирования автодинных СБРЛ миллиметрового диапазона.

2.5. Математическая модель автодина с учетом ЧМ излучения и собственных шумов генератора

Для получения математической модели автодинной системы с учетом ЧМ излучения и собственных шумов генератора воспользуемся выражениями (2.16), (2.17), полученными выше в разделе 2.2. Рассмотрим случай перестройки частоты ω колебаний генератора при помощи варикапа, обеспечивающего обычно сравнительно низкий уровень ПАМ. В таком случае влиянием ПАМ можно пренебречь и при анализе полагать $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0$. Тогда система линеаризованных дифференциальных уравнений для относительных автодинных изменений амплитуды $a = (A - A_0) / A_0$, частоты $\chi = (\omega - \omega_0) / \omega_0$ колебаний имеет вид:

$$\frac{Q_{\text{н}}}{\omega_0} \frac{da}{dt} + \alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma_0 \eta \cos \delta(t, \tau) - \alpha m_{\text{АМ}} f_{\text{м}}(t) - \varepsilon m_{\text{ЧМ}} f_{\text{м}}(t) + a_{\text{с}}(t), \quad (2.45)$$

$$\beta a + Q_{\text{н}} \chi = -\Gamma_0 \eta \sin \delta(t, \tau) - \beta m_{\text{АМ}} f_{\text{м}}(t) - Q_{\text{н}} m_{\text{ЧМ}} f_{\text{м}}(t) - a_{\text{с}}(t). \quad (2.46)$$

В уравнениях (2.45), (2.46), в отличие от полученных в работах [9, 11, 53, 65, 67] выражений, учтены собственные шумы генератора, которые полагаем δ -коррелированными и представляющими собой стационарный случайный процесс с нулевым средним значением. Для решения этих уравнений используем квазистатический метод, критерием применимости которого, как отмечалось выше, является выполнение условий: $\tau_a, \tau_{\text{кор}} \ll T_a$ и $\tau_{\text{кор}} \gg \tau_a$, где $\tau_a = Q_n / [\alpha \omega_0 (1 - \gamma \rho)]$ – постоянная времени автодинного отклика; $\tau_{\text{кор}}$ – время корреляции шумов в генераторе [109]. Полагая производную в уравнении (45) равной нулю, согласно методу Крамера получим квазистатическое решение системы (2.45), (2.46) в виде:

$$a(t) = -m_{\text{AM}} f_m(t) + \Gamma_0 K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi] + a_{\text{ш}}(t), \quad (2.47)$$

$$\omega(t) = \omega_0 \{1 - m_{\text{ЧМ}} f_m(t) - \Gamma_0 L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta] - \chi_{\text{ш}}(t)\}, \quad (2.48)$$

где $K_a = \eta \sqrt{1 + \rho^2} / \alpha (1 - \gamma \rho)$, $L_a = \eta \sqrt{1 + \gamma^2} / Q_n (1 - \gamma \rho)$ – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации [79, 81]; $a_{\text{ш}}(t)$, $\chi_{\text{ш}}(t)$ – составляющие относительного уровня амплитудных и частотных флуктуаций, обусловленные действием внутренних источников шума АЭ генератора [115]:

$$a_{\text{ш}}(t) = \frac{a_c(t) + \rho a_s(t)}{\alpha (1 - \gamma \rho)}, \quad \chi_{\text{ш}}(t) = \frac{a_s(t) + \gamma a_c(t)}{Q_n (1 - \gamma \rho)}; \quad (2.49)$$

$\psi = \arctg(\rho)$, $\theta = \arctg(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний.

Из выражений (2.47), (2.48) видно, что при ЧМ генератора и одновременном воздействии на него отражённого излучения ($\Gamma_0 \neq 0$), автодинный отклик по изменению амплитуды $a(t)$ (2.47), кроме полезного сигнала (предпоследние слагаемые), содержит также составляющие сигнала, повторяющие закон модуляции $f_m(t)$. Крайние правые слагаемые в этих выражениях отображают присутствие в выходном отклике генератора аддитивных составляющих стационарного шума, обусловленного внутренними шумами генератора. При этом отметим, что формирование полезного сигнала автодинной СБРЛ с ЧМ согласно

(2.47), а также автодинных изменений частоты согласно (2.48) происходит через изменения мгновенного набега фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного от цели излучения, которые обусловлены процессом ЧМ генерации.

Автодинная система «генератор – объект локации» по своей сути относится к классу автопараметрических систем с запаздыванием [2–4]. 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 (2.47), (2.48) фаза $\delta(t, \tau)$ является неявной функцией. Для ее выявления выполним разложение полной фазы $\Psi(t, \tau)$ отражённого излучения в ряд Тейлора по времени запаздывания τ [8, 116]. Данное разложение, справедливое при условиях формирования гладких (отсутствие скачков) автодинных изменений параметров колебаний и выполнения сильного неравенства $\Omega_a \gg \Omega_m$, имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) \equiv \delta(t) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau) &= \frac{\tau \omega(t)}{1!} - \frac{\tau^2}{2!} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{\tau^3}{3!} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} - \dots = \\ &= \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \frac{\tau^n}{n!} \frac{d^{n-1}\omega(t)}{dt^{n-1}}. \end{aligned} \quad (2.50)$$

После подстановки (2.48) в (2.50), нормировки (2.47) и исключения из него составляющих паразитного отклика имеем следующие выражения:

$$a_n(t_n, \tau_n)_{(c+\text{ш})} = a(t) / \Gamma_0 K_a = \cos[\delta(t_n, \tau_n) - \psi] + a_{\text{ш}}(t_n) / \Gamma K_a, \quad (2.51)$$

$$\chi_n(t_n, \tau_n)_{(c+\text{ш})} = \chi(t) / \Gamma_0 L_a = -\sin[\delta(t_n, \tau_n) + \theta] - \chi_{\text{ш}}(t_n) / \Gamma_0 L_a, \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} \delta(t_n, \tau_n)_{(c+\text{ш})} &= 2\pi\tau_n + C_{\text{чМ}} f_m(t_n) - p_{\text{ш}}(t_n) - \\ &- C_{\text{OC}} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n) + \theta + \Theta_n(r_n)], \end{aligned} \quad (2.53)$$

где $C_{\text{чМ}} = C_{\text{OC}}(m_{\text{чМ}} / \Gamma_0 L_a)$ – индекс фазовой модуляции излучения автодина, обусловленный ЧМ; $p_{\text{ш}}(t_n) = C_{\text{OC}} \chi_{\text{ш}}(t) / \Gamma_0 L_a$ – индекс модуляции фазы автодинного сигнала, обусловленный внутренними шумами генератора; $C_{\text{OC}} = \Gamma_0 L_a \omega_0 \tau$ – параметр внешней обратной связи автодинной системы

«генератор – объект локации»; $r_n = \tau / T_a$ – параметр нормированного расстояния; $t_n = \Omega_m t / 2\pi$ – нормированное время модулирующей функции; Ω_m – частота модуляции; индексы в скобках (с+ш) около переменных означает, что выражения для них описывают совокупность «сигнал плюс шум»; $X_n(r_n)$, $\Theta_n(r_n)$ – амплитудные значения и фазовые сдвиги n -ых членов ($n = 0, 1, \dots, N$) рядов в выражении (2.53):

$$X_n(r_n) = \frac{(2\pi r_n)^{2n} \sqrt{4(n+1)^2 + (2\pi r_n)^2}}{2(n+1) \times (2n+1)!}, \quad \Theta_n(r_n) = -\operatorname{arctg} \frac{\pi r_n}{(n+1)}. \quad (2.54)$$

Решение трансцендентного уравнения (2.53) находим, как и ранее [83, 112], методом последовательных приближений. При условии, что параметр внешней обратной связи $C_{OC} < 1$, данное решение в виде фазовой характеристики автодина $\delta(t_n, \tau_n)$ k -го приближения имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(t_n, \tau_n)_{(c+ш)} &= (2\pi\tau_n)_{(0)} + C_{ЧМ} f_m(t_n) - p_{ш}(t_n) - \\ &- C_{OC} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[(2\pi\tau_n)_{(1)} + C_{ЧМ} f_m(t_n) - p_{ш}(t_n) + \theta + \Theta_n(r_n) - \dots \\ &\dots - C_{OC} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[(2\pi\tau_n)_{(k)} + C_{ЧМ} f_m(t_n) - p_{ш}(t_n) + \theta + \Theta_n(r_n)] \dots], \quad (2.55) \end{aligned}$$

где цифровыми индексами в круглых скобках около слагаемых $(2\pi\tau_n)$, как обычно, обозначен порядок приближения; $\tau_n = \omega_0 \tau / 2\pi$ – нормированное время запаздывания.

Вторые слагаемые в (2.51), (2.52) отображают присутствие в автодинном отклике генератора аддитивных составляющих стационарного шума, обусловленных его внутренними шумами. При этом первые слагаемые в этих выражениях за счёт шумовой модуляции фазы $p_{ш}(t_n)$ в (2.53), (2.55) вносят мультипликативные составляющие общего шума, которые проявляются только при наличии отраженного от объекта локации излучения. Поэтому рассмотрим поведение шумовых характеристик в условиях одновременного воздействия на автодинный генератор с ЧМ отражённого от объекта локации излучения,

используя для этого отработанный в [115] подход.

Исключим из выражений (2.51) – (2.53) и (2.55) составляющие, обусловленные действием шумов генератора, полагая $a_{ш}(t_n) = \chi_{ш}(t_n) = p_{ш}(t_n) = 0$. В результате получим выражения для амплитудной $a_n(t_n, \tau_n)$ (АХА), частотной $\chi_n(t_n, \tau_n)$ (ЧХА) и фазовой (ФХА) $\delta(t_n, \tau_n)$ характеристик² автодина с ЧМ. После этого находим результирующие шумовые составляющие $a_{ш}(t_n, \tau_n)$, $\chi_{ш}(t_n, \tau_n)$ и $\delta_{ш}(t_n, \tau_n)$ путём вычитания из совокупности выходных сигналов и шумов (2.51) – (2.53) их детерминированных составляющих:

$$a_{ш}(t_n, \tau_n) = a_n(t_n, \tau_n)_{(с+ш)} - a_n(t_n, \tau_n), \quad (2.56)$$

$$\chi_{ш}(t_n, \tau_n) = \chi_n(t_n, \tau_n)_{(с+ш)} - \chi_n(t_n, \tau_n), \quad (2.57)$$

$$\delta_{ш}(t_n, \tau_n) = \delta(t_n, \tau_n)_{(с+ш)} - \delta(t_n, \tau_n), \quad (2.58)$$

Выражения (2.56) – (2.58) справедливы при любом соотношении сигнал-шум. Для случая, когда амплитуда сигнала значительно превышает уровень собственных шумов, данные выражения для малых компонентов шума можно линеаризовать, разложив входящие в них трансцендентные функции в ряды Тейлора, ограничившись при этом двумя первыми членами. Тогда получим упрощённые выражения, допускающие расчет и физическую интерпретацию процесса формирования шумовых характеристик автодина:

$$a_{ш}(t_n, \tau_n) = \frac{a_{ш}(t_n)}{\Gamma_0 K_a} + \frac{\chi_{ш}(t_n)}{\Gamma_0 L_a} \frac{C_{OC} Z_s(t_n, \tau_n)}{1 + C_{OC} Z_c(t_n, \tau_n)}, \quad (2.59)$$

$$\chi_{ш}(t_n, \tau_n) = \frac{\chi_{ш}(t_n)}{\Gamma_0 L_a} \left[1 + \frac{C_{OC} Z_c(t_n, \tau_n)}{1 + C_{OC} Z_c(t_n, \tau_n)} \right], \quad (2.60)$$

$$\delta_{ш}(t_n, \tau_n) = \frac{\chi_{ш}(t_n)}{\Gamma_0 L_a} \frac{C_{OC} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n)}{1 + C_{OC} Z_c(t_n, \tau_n)}, \quad (2.61)$$

где $Z_s(t_n, \tau_n)$, $Z_c(t_n, \tau_n)$ – «синусные» и «косинусные» сомножители в выражениях (2.59) – (2.61):

² Эти характеристики определяют процесс формирования сигналов, поэтому в целом они называются сигнальными характеристиками автодинов.

$$Z_s(t_H, \tau_H) = \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_H) \sin[\delta(t_H, \tau_H) + \Theta_n(r_H)], \quad (2.62)$$

$$Z_c(t_H, \tau_H) = \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_H) \cos[\delta(t_H, \tau_H) + \theta + \Theta_n(r_H)]. \quad (2.63)$$

Выражения (2.56) – (2.58) с учетом (2.59) – (2.63) описывают поведение шумовых характеристик автодинной СБРЛ с произвольным законом ЧМ в условиях, когда период автодинного сигнала может быть меньше или соизмеримым с временем запаздывания отраженного от цели излучения. Это отличает разработанную здесь модель АД с ЧМ от модели, использованной в статье [74]. Дальнейший анализ разработанной модели выполнен численным методом в следующей главе.

2.6. Выводы

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

1. Обобщенная модель распространена на случай автодина с одновременной амплитудной (АМ) и частотной (ЧМ) модуляцией его колебаний по произвольному закону модулирующей функции. Полученные в результате решения уравнений выражения являются также достаточно общими. Они

описывают одновременно протекающие процессы генерации излучения, приема и взаимодействия с отраженным от объекта локации радиосигналом, а также выделения результата этого взаимодействия в виде автодинного отклика.

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

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

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИГНАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОДИННЫХ СБРЛ С АМ И ЧМ

3.1. Введение

В настоящей главе выполнены расчеты и анализ сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ на основании разработанной в главе 2 математической модели процессов, протекающих в системе «генератор – объект локации». Конкретно, в разделе 3.2 рассчитаны указанные характеристики для случая автодинной СБРЛ с АМ, в которой присутствует как паразитная (нежелательная) ЧМ излучения. В разделе 3.3 выполнены аналогичные расчеты для автодинной СБРЛ с ЧМ, в которой при ЧМ возникает сопутствующая паразитная АМ. Результаты расчетов шумовых характеристик автодинной СБРЛ с ЧМ представлены в разделе 3.4. Выводы по главе приведены в разделе 3.5.

Основные результаты настоящей главы опубликованы в журнальных статьях [95–97], в материалах докладов различных научно-технических конференций [99, 100, 117, 118] и в двух отчетах о НИР.

3.2. Анализ влияния паразитной ЧМ на формирование динамических сигнальных характеристик автодинов с АМ

На рис. 3.1 – 3.4 приведены результаты расчетов ХАС как нормированной функции двух переменных: коэффициента амплитудной модуляции m_{AM} (ось «модуляции») и нормированного на половину длины модулирующей волны расстояния до объекта локации r_n (ось «расстояния»). По вертикали на этих ХАС отложены относительные уровни $a_n(k)$ составляющих автодинного отклика на k -й гармонике частоты Ω_m модуляции. На «нулевой» гармонике эта ось обозначена как $a_n(0)$ (см. рис. 3.1). На первой гармонике частоты модуляции она обозначена как $a_n(1)$ (см. рис. 3.2), на второй – $a_n(2)$ (см. рис. 3.3), третьей – $a_n(3)$ (см. рис. 3.4). Расчеты выполнялись для нормированного полезного сигнала $a_n = a / \Gamma_0 K_a$ при разложении функции (2.37) с учетом (2.38) – (2.43) в гармонический ряд Фурье по периоду модулирующей функции $f_m(t)$. Для этих же ХАС на рис. 3.5 и

3.6 приведены семейства графиков их сечений при $m_{AM} = 0,8$ (см. рис. 3.5) и $r_H = 0,5$ (см. рис. 3.6).

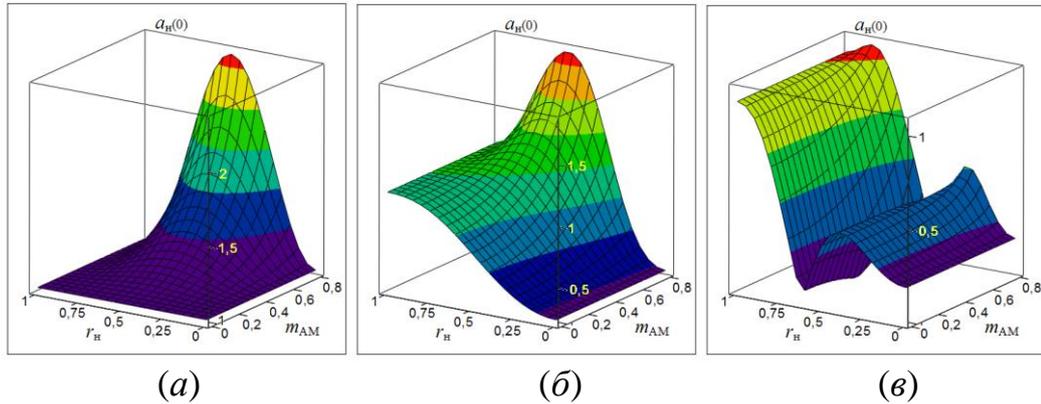


Рисунок 3.1. ХАС $a_H(0)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на нулевой гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений $p_{ЧМ}$: $p_{ЧМ} = 0$ (a), $p_{ЧМ} = 2$ (б) и $p_{ЧМ} = 5$ (в).

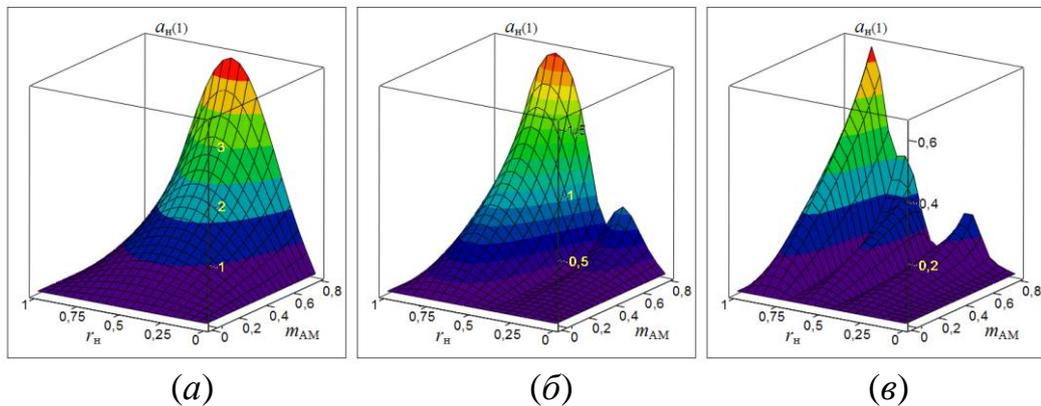


Рисунок 3.2. ХАС $a_H(1)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на первой гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений $p_{ЧМ}$: $p_{ЧМ} = 0$ (a), $p_{ЧМ} = 5$ (б) и $p_{ЧМ} = 10$ (в).

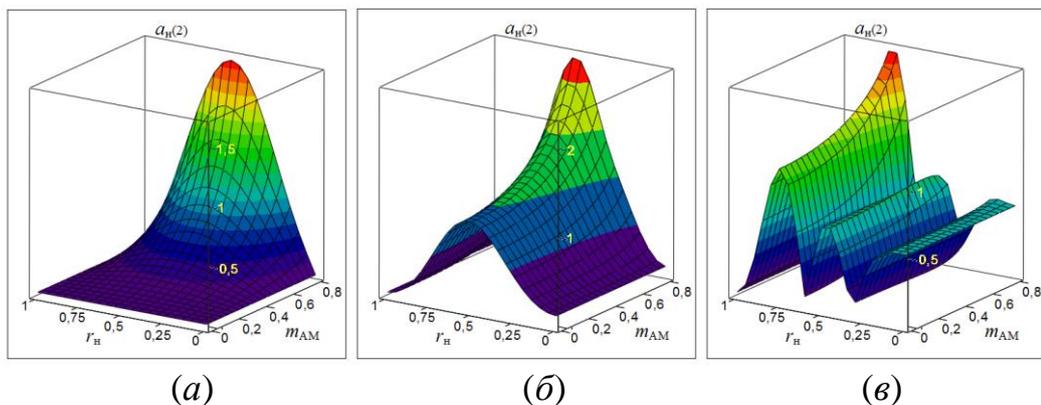


Рисунок 3.3. ХАС $a_H(2)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на второй гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений $p_{ЧМ}$: $p_{ЧМ} = 0$ (a), $p_{ЧМ} = 5$ (б), $p_{ЧМ} = 10$ (в).

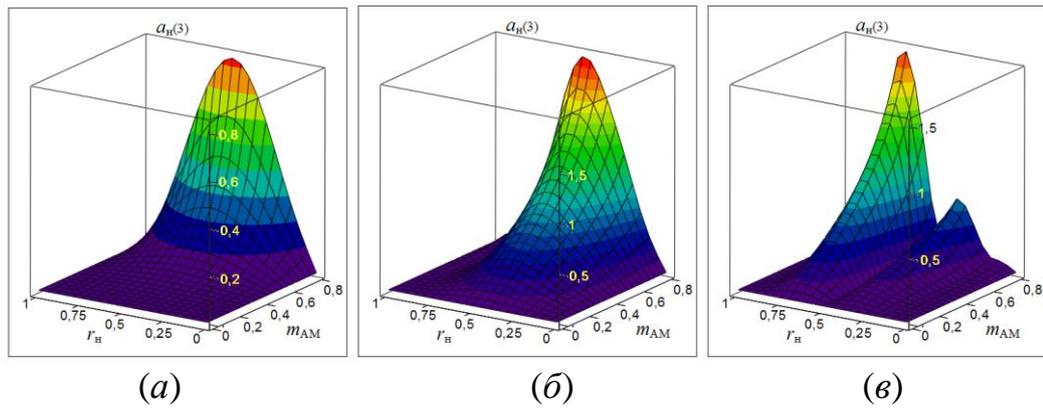


Рисунок 3.4. ХАС $a_n(3)$ автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний генератора с АЧМ на третьей гармонике частоты модуляции, рассчитанные для различных значений $p_{\text{чм}}$: $p_{\text{чм}} = 0$ (а), $p_{\text{чм}} = 5$ (б) и $p_{\text{чм}} = 10$ (в).

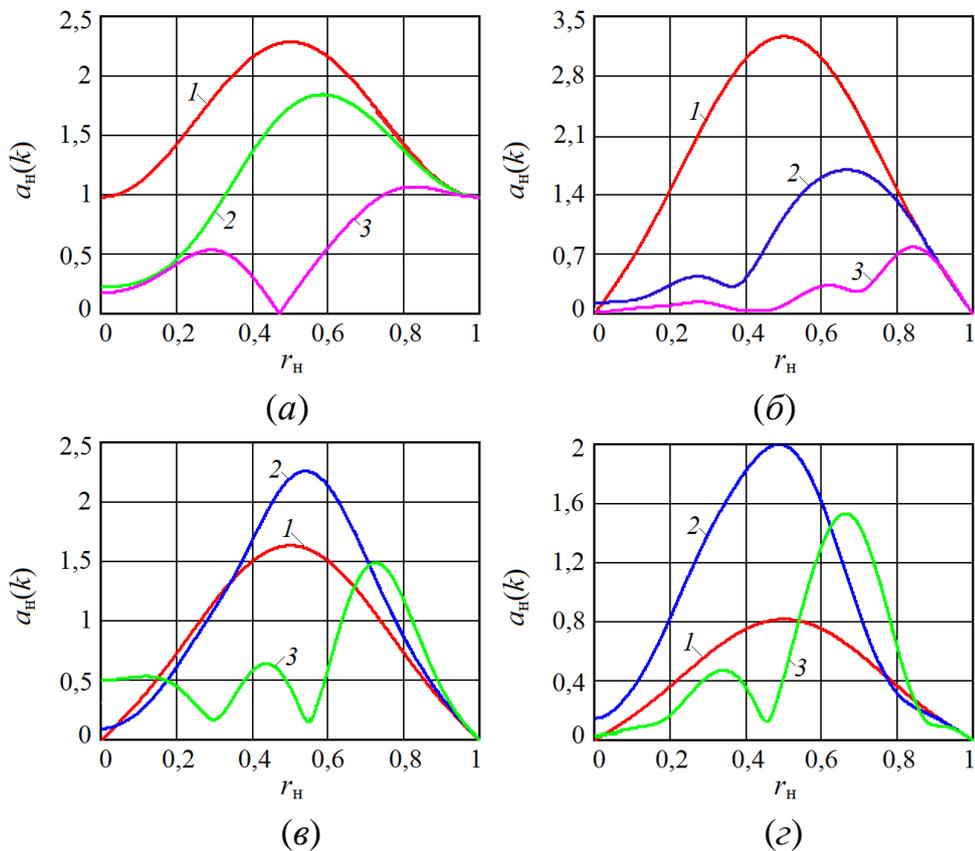


Рисунок 3.5. Графики сечения ХАС по оси r_n на нулевой $a_n(0)$ (а), первой $a_n(1)$ (б), второй $a_n(2)$ (в), третьей $a_n(3)$ (г) гармониках частоты модуляции, рассчитанные при $m_{\text{АМ}} = 0,8$ для различных значений $p_{\text{чм}}$: $p_{\text{чм}} = 0$ (кривая 1), $p_{\text{чм}} = 2$ (кривая 2), $p_{\text{чм}} = 5$ (кривая 3) (а); $p_{\text{чм}} = 0$ (кривая 1), $p_{\text{чм}} = 5$ (кривая 2), $p_{\text{чм}} = 10$ (кривая 3) (б); $p_{\text{чм}} = 0$ (кривая 1), $p_{\text{чм}} = 5$ (кривая 2), $p_{\text{чм}} = 10$ (кривая 3) (в), (г).

Для случая равномерного изменения нормированного времени τ_n на рис.

3.7 и 3.8 соответственно представлены результаты расчета временных $a_n(\tau_n)$ и спектральных $a_n(F_n)$ диаграмм автодинного сигнала, рассчитанных для генератора с АМ ($m_{AM} = 0,5$, $p_{ЧМ} = 0$) и с АЧМ ($m_{AM} = 0,5$, $p_{ЧМ} = 1$). Расчеты диаграмм выполнялись при соотношении частот Ω_m модуляции и Ω_a автодинного сигнала $z = 10$, углах смещения $\theta = 1$ и $\psi = 1$ для различных значений нормированного расстояния r_n (см. рис. 3.7 и 3.8 под литерами $a-d$).

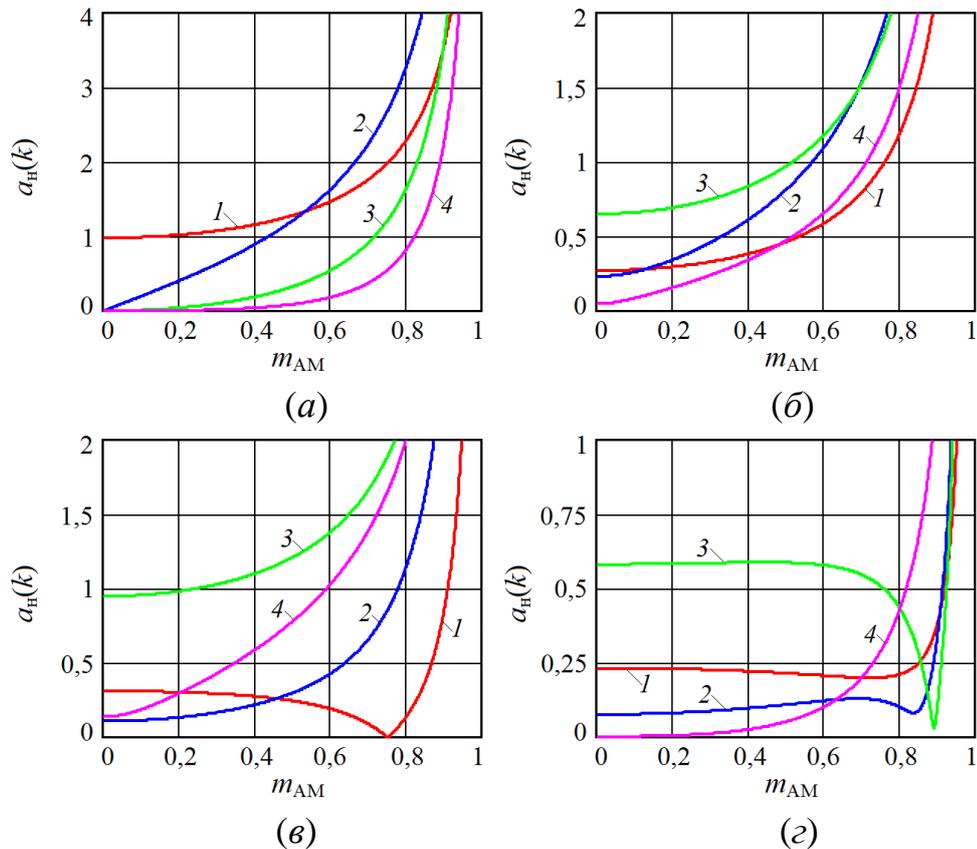
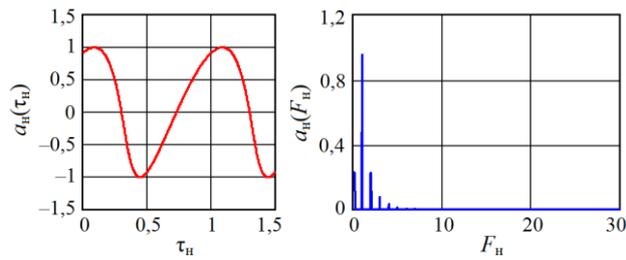


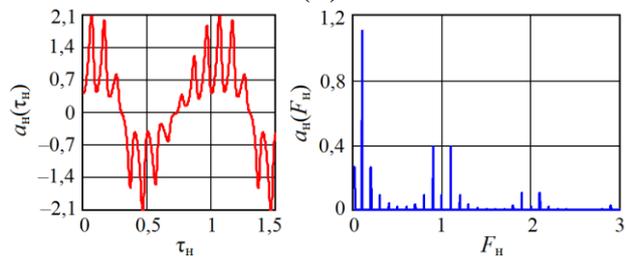
Рисунок 3.6. Графики сечения ХАС по оси m_{AM} на нулевой $a_n(0)$ (кривые 1), первой $a_n(1)$ (кривые 2), второй $a_n(2)$ (кривые 3) и третьей $a_n(3)$ (кривые 4) гармониках частоты модуляции, рассчитанные при $r_n = 0,5$ для различных значений $p_{ЧМ}$: $p_{ЧМ} = 0$ (а); $p_{ЧМ} = 3$ (б); $p_{ЧМ} = 5$ (в); $p_{ЧМ} = 10$ (з).

Из характеристик и графиков рис. 3.1 – 3.4, а и б, а также кривых 1 и 2 рис. 3.5 видно, что максимум АД отклика при отсутствии и сравнительно малом уровне ЧМ соответствует середине зоны ХАС ($r_n = 0,5$). Такой характер поведения автодинного отклика в середине ХАС при преобладании процесса АМ над ЧМ объясняется явлением регенерации сигнала в петле обратной связи «генератор – объект локации – генератор», когда процесс АМ колебаний и

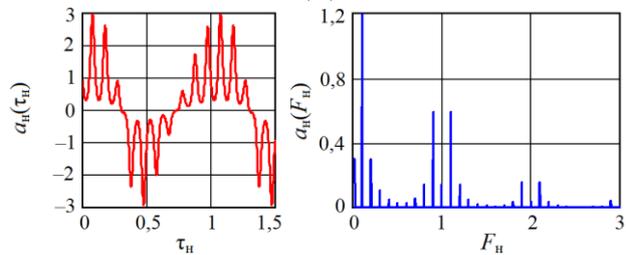
воздействие амплитуды отраженного излучения находятся в фазе.



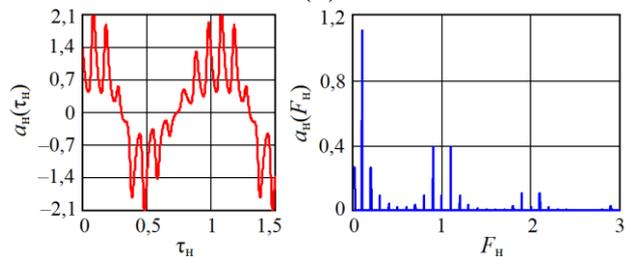
(a)



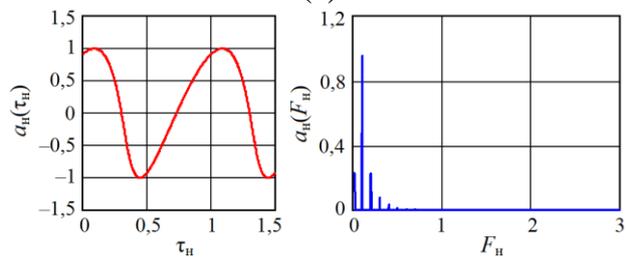
(б)



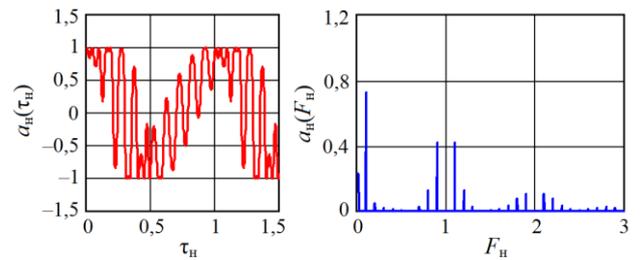
(в)



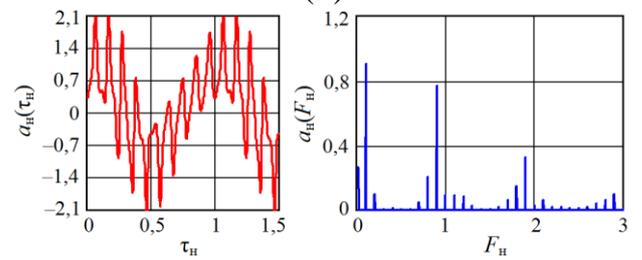
(г)



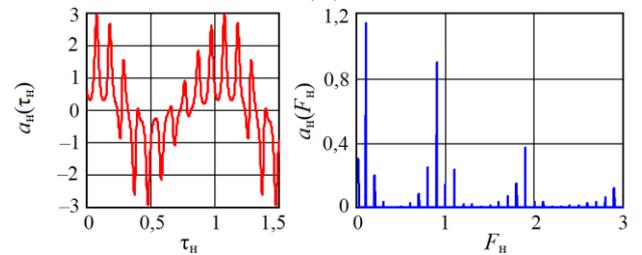
(д)



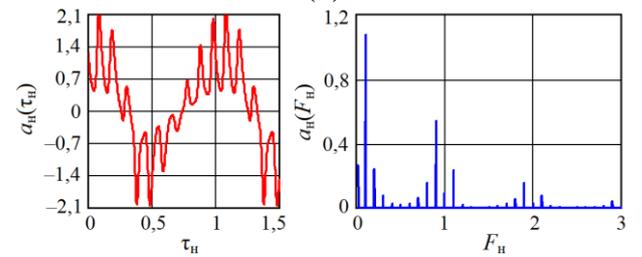
(a)



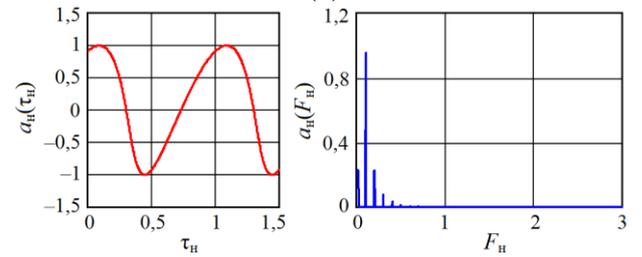
(б)



(в)



(г)



(д)

Рисунок 3.7. Временные $a_H(\tau_H)$ и спектральные $a_H(F_H)$ диаграммы сигнала автодина, рассчитанные для генератора с АМ при отсутствии ЧМ ($p_{\text{ЧМ}}=0$) и различных значениях r_H : $r_H=0$ (a); $r_H=0,25$ (б); $r_H=0,5$ (в); $r_H=0,75$ (г); $r_H=1$ (д)

Рисунок 3.8. Временные $a_H(\tau_H)$ и спектральные $a_H(F_H)$ диаграммы сигнала автодина, рассчитанные для генератора с АМ при наличии ЧМ ($p_{\text{ЧМ}}=1$) и различных значениях r_H : $r_H=0$ (a); $r_H=0,25$ (б); $r_H=0,5$ (в); $r_H=0,75$ (г); $r_H=1$ (д)

Подобного рода явления наблюдаются, например, в измерителях малых дальностей «рециркуляционного» типа [119–122]. В этих измерителях выделенное приемным устройством СБРЛ напряжение модуляции отраженного сигнала после усиления снова подается в необходимой полярности на модулятор передатчика. Подбором параметров элементов замкнутого контура (усиления и сдвига фазы), в который входят объект локации и среда распространения, можно добиться режима генерации на некоторой частоте, которая зависит от времени задержки отраженного излучения. Из результатов вычислений ХАС видно, что при гармонической АМ и низком уровне ЧМ наиболее выгодно использование больших значений коэффициента АМ, величина которого приближается к единице. При этом появляется возможность выделения сигналов на высших гармониках частоты модуляции.

В случае «высокого» уровня ЧМ происходит смещение области главного максимума в сторону, где $r_n > 0,5$, и появление многогорбой ХАС (см. рис. 3.1 – 3.4 под литерой *в*, кривые 3 рис. 3.5). При этом амплитуда отклика на всех гармониках Ω_m частоты модуляции, включая «нулевую», во всех случаях наличия или отсутствия сопутствующей ЧМ значительно возрастает с приближением коэффициента m_{AM} к единице (см. рис. 3.6). Интересно отметить также, что при отсутствии АМ, когда $m_{AM} = 0$, но наличии ЧМ на нулевой и четных гармониках Ω_m наблюдается формирование многогорбых ХАС (см. рис. 3.1 и 3.3 под литерами *б* и *в*).

ХАС автодинного отклика на гармониках частоты модуляции существенно отличаются от ХАС, формируемой в области «нулевых» (доплеровских) частот (см. рис. 3.1 и рис. 3.2 – 3.4). Это отличие состоит в наличии «мертвых» зон в ХАС на гармониках, где наблюдается подавление сигналов, отраженных от объектов, находящихся на определенных расстояниях от СБРЛ. Одна из таких важнейших зон находится в непосредственной близости от СБРЛ, где $r_n = 0$. В этой зоне появление сравнительно мелких отражающих объектов, например, насекомых, капель дождя и других, вызывает появление мощных отраженных

сигналов, которые в ряде применений нарушают нормальную работу СБРЛ. В данном случае наличие мертвой зоны вблизи антенны СБРЛ с АМ и ЧМ при выделении сигналов на гармониках частоты модуляции является весьма важным свойством этих систем, обеспечивающим их повышенную помехоустойчивость.

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

Временные диаграммы $a_n(\tau_n)$, как видно на рис. 3.7, содержат медленную (доплеровскую) и быструю составляющие. Медленная составляющая, в чистом виде показанная на рис. 3.7, *a*, аналогична амплитудной характеристике (АХА) обычного немодулированного автодина [112]. Из графиков рис. 3.7, *a* и *d* видно, что как в начале, так и в конце каждой ХАС автодинный отклик на выходе АД с АМ представлен только в виде доплеровского сигнала. Отклик на гармониках частоты модуляции Ω_m в этих случаях отсутствует. При смещении в среднюю область ХАС происходит наложение на доплеровскую составляющую сигнала дополнительных составляющих в форме «пиков», обусловленных процессом взаимодействия отраженных АМ колебаний с излучаемыми, также «промодулированными» по амплитуде с частотой Ω_m (см. рис. 3.7, *b–z*). Эти дополнительные составляющие вызывают соответствующий рост уровня сигнала как на нулевой, так и на гармониках частоты модуляции Ω_m . Как показали расчеты, амплитуда пиков существенно возрастает с приближением коэффициента m_{AM} к единице, а также при переходе в область средней части

ХАС, где $r_n = 0,5$. Из полученных на рис. 3.7 спектрограмм видно, что спектральные составляющие, полученные в АД с АМ на частотах, кратных частоте модуляции Ω_m , при движении объекта локации распадаются на две составляющие половинной амплитуды. Данные составляющие смещены от частоты, кратной Ω_m , на величину частоты Ω_a автодинного сигнала, равной частоте Доплера.

Наличие дополнительной ЧМ, сопутствующей процессу АМ, как видно на графиках рис. 3.8, *a*, вызывает фазовую модуляцию доплеровского сигнала в начале ХАС, где $r_n = 0$, и перенос сигнала на гармоники частоты Ω_m модуляции. Однако в конце каждой ХАС автодинный отклик на выходе автодина с АЧМ представлен только в виде доплеровского сигнала и отклик на гармониках частоты Ω_m модуляции в этих случаях отсутствует (см. рис. 3.8, *d*). В средней части ХАС происходит наложение на составляющие сигнала, обусловленные процессом АМ, дополнительных составляющих, связанных с процессом ЧМ (см. рис. 3.7, *b–z*). Отличия по фазе этих составляющих вызывают заметную асимметрию спектра сигналов на гармониках частоты модуляции, тогда как составляющая сигнала на «нулевой» доплеровской частоте имеет практически прежнюю амплитуду.

Наличие ангармонических искажений на временных диаграммах и высших гармоник частоты автодинного сигнала в его спектре (см. рис. 3.7, *a*, *d* и 3.8, *d*) объясняется известной нелинейностью набега фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного излучения, вызванной автодинными изменениями частоты генерации АД [112]. Степень этих искажений сигналов определяется преимущественно величиной параметра обратной связи C_{oc} . Так при $C_{oc} \ll 1$ автодинные изменения являются практически гармоническими, а с его увеличением – значительно отличаются от синусоидальных, приобретая «наклон волн» автодинного сигнала. «Направление» этого наклона зависит от знака и величины параметров неизохронности (через угол θ) и неизодромности (через угол ψ), генератора и относительного направления движения объекта локации. Данные искажения являются причиной

появления высших гармоник доплеровского сигнала как в области низких (доплеровских) частот, так и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции.

3.3. Исследование влияния паразитной АМ на формирование динамических сигнальных характеристик автодинов с ЧМ

На рис. 3.9 приведены результаты расчётов объемных ХАС как нормированных функций $J_m(k_{\text{ЧМ}}, r_{\text{нр}})$ двух переменных: величины индекса частотной модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ (ось «модуляции») и нормированного на половину длины модулирующей волны расстояния до цели $r_{\text{нр}}$ (ось «расстояния»). Значения функций $J_m(k_{\text{ЧМ}}, r_{\text{нр}})$, отложенные по вертикальной оси, представляют собой разложение в гармонический ряд Фурье функции (2.16) с учётом (2.17) – (2.21) по периоду модуляции $f_m(t)$. На «нулевой» гармонике по этой оси отложены значения J_0 (строка 1). На первой гармонике частоты модуляции эта ось обозначена как J_1 (строка 2), на второй – J_2 (строка 3), третьей – J_3 (строка 4), четвертой – J_4 (строка 5). При этом ХАС, рассчитанные для различных значений коэффициента АМ, когда $m_{\text{АМ}} = 0$, $m_{\text{АМ}} = 0,2$ и $m_{\text{АМ}} = 0,4$, соответственно представлены в столбцах *a*, *b* и *в*.

На рисунках 3.10 и 3.11 приведены семейства графиков поперечного сечения ХАС по осям расстояния $r_{\text{нр}}$ и модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ соответственно, полученные для различных значений индекса ЧМ $k_{\text{ЧМ}}$, коэффициента АМ $m_{\text{АМ}}$ и параметра ОС $C_{\text{ОС}}$. Ввиду симметрии ХАС по оси $r_{\text{нр}}$ характеристики $J_m(r_{\text{нр}})$ на рис. 3.10 показаны для области значений $r_{\text{нр}} \in 0, 0,5$.

Для случая равномерного изменения нормированного времени $\tau_{\text{нв}}$ на рис. 3.12 и 3.13 при величине параметра ОС $C_{\text{ОС}} = 0,5$ и индекса ЧМ $k_{\text{ЧМ}} = 2$ представлены результаты расчёта временных $a_{\text{отн}}(\tau_{\text{нв}})$ и спектральных $a_{\text{отн}}(F_{\text{нч}})$ диаграмм автодинного сигнала, полученные для АД с ЧМ ($m_{\text{АМ}} = 0$) и АЧМ ($m_{\text{АМ}} = 0,2$) соответственно (здесь $F_{\text{нч}} = \Omega / \Omega_m$ – нормированная частота).

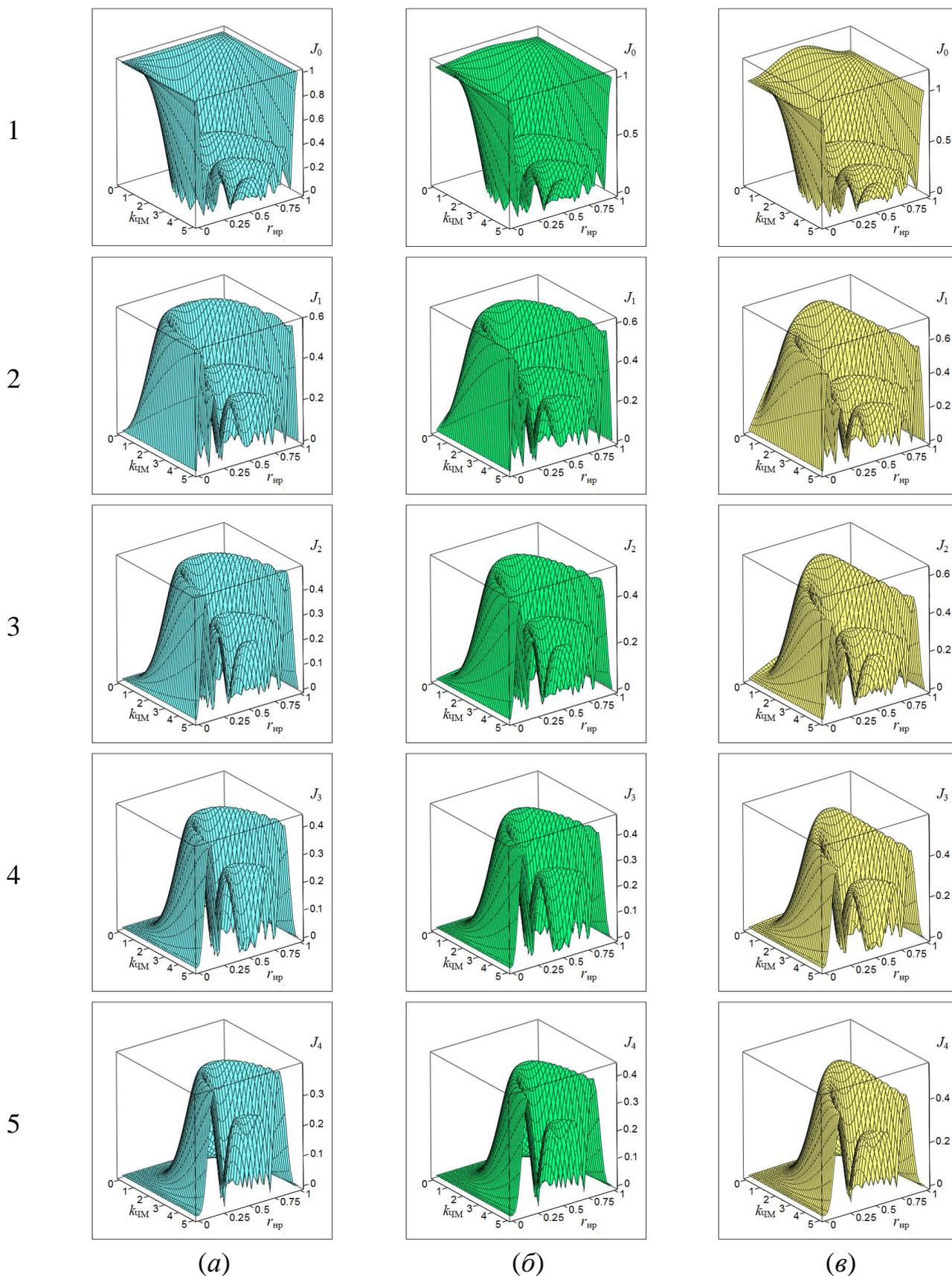


Рисунок 3.9. ХАС сигнала по изменению амплитуды колебаний АД с АЧМ на нулевой J_0 (строка 1), J_1 первой (строка 2), второй J_2 (строка 3), третьей J_3 (строка 4) и четвертой J_4 (строка 5) гармониках модуляции, при значениях m_{AM} : $m_{AM} = 0$ (столбец *a*), $m_{AM} = 0,2$ (столбец *б*) и $m_{AM} = 0,4$ (столбец *в*).

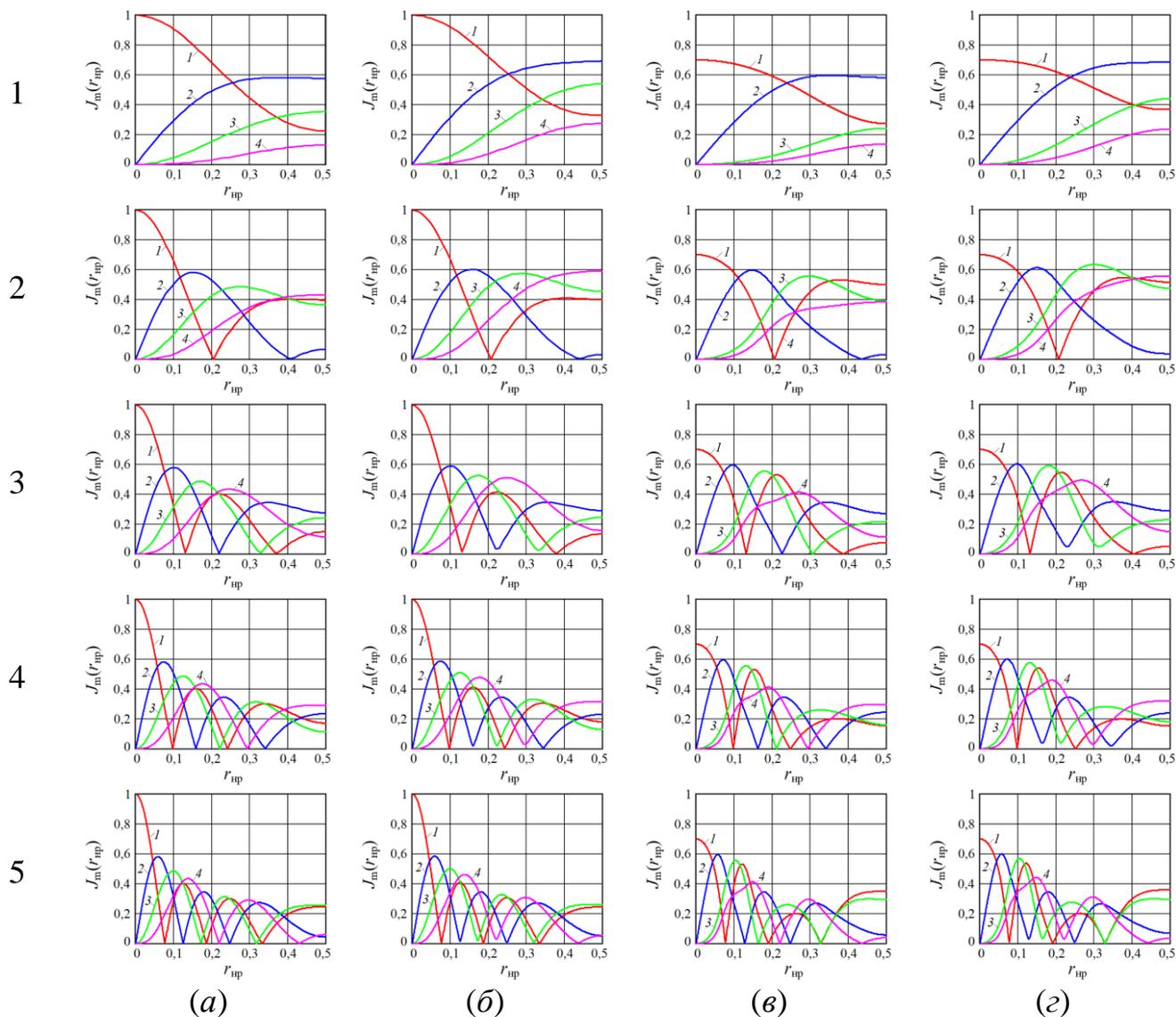


Рисунок 3.10. Графики сечений ХАС вдоль оси r_{np} $J_m(r_{np})$ на нулевой J_0 (кривые 1), первой J_1 (кривые 2), второй J_2 (кривые 3) и третьей J_3 (кривые 4) гармониках модуляции, рассчитанные для случаев $k_{\text{чМ}}=1$ (строка 1), $k_{\text{чМ}}=2$ (строка 2), $k_{\text{чМ}}=3$ (строка 3), $k_{\text{чМ}}=4$ (строка 4) и $k_{\text{чМ}}=5$ (строка 5) при различных значениях $m_{\text{АМ}}$ и $C_{\text{ОС}}$: $m_{\text{АМ}}=0$, $C_{\text{ОС}}=0$ (столбец а); $m_{\text{АМ}}=0,4$, $C_{\text{ОС}}=0$ (столбец б); $m_{\text{АМ}}=0$, $C_{\text{ОС}}=0,4$ (столбец в); $m_{\text{АМ}}=0,4$, $C_{\text{ОС}}=0,4$ (столбец г).

Расчеты диаграмм выполнялись для соотношения частот $z=10$, углов смещения фаз $\theta=1$, $\psi=0,1$ и при различных значениях нормированного расстояния r_{np} (см. рис. 3.12 и 3.13 под литерами а – д).

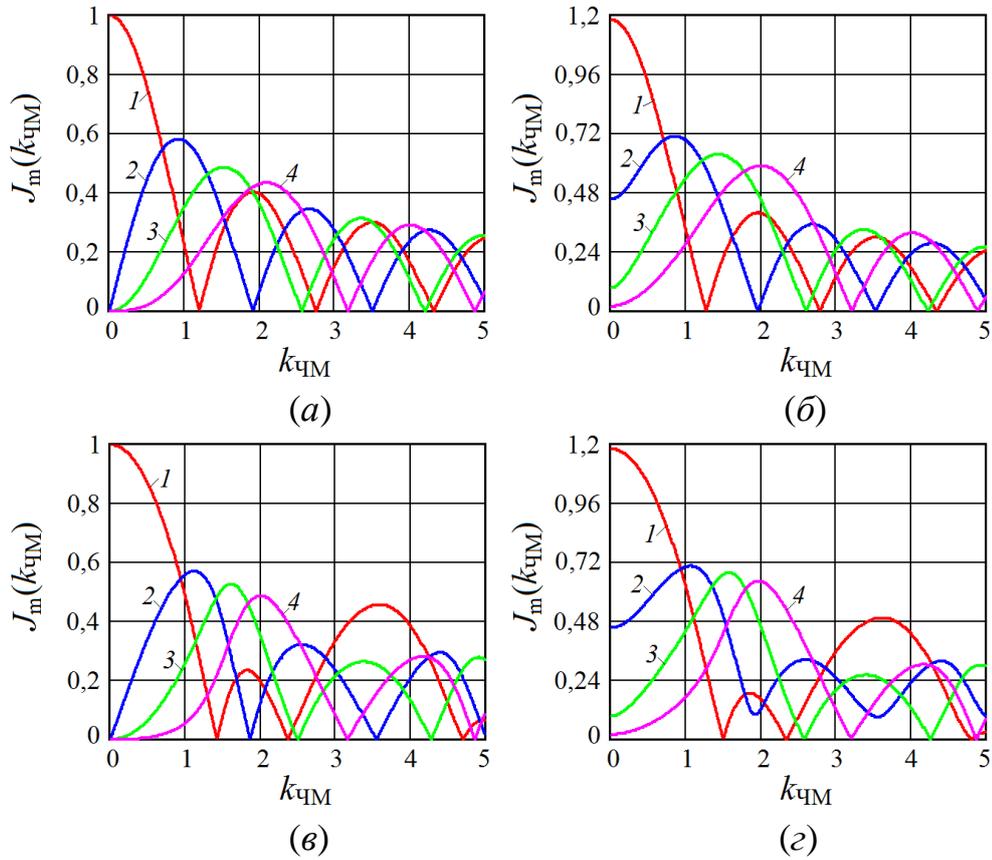
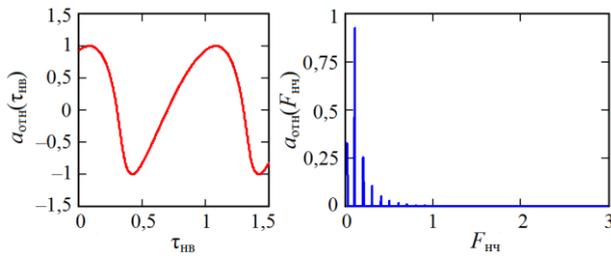
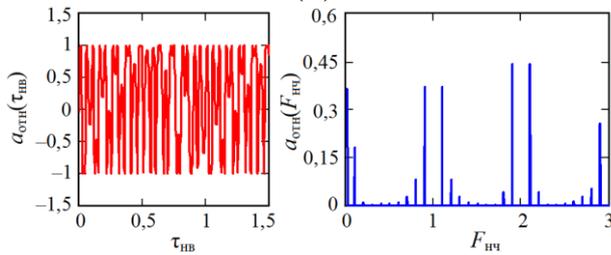


Рисунок 3.11. Графики сечения ХАС вдоль оси индекса модуляции $k_{\text{чм}}$ на нулевой J_0 (кривые 1), первой J_1 (кривые 2), второй J_2 (кривые 3) и третьей J_3 (кривые 4) гармониках модуляции, рассчитанные при $r_{\text{нр}}=0,5$ и различных значениях $m_{\text{ам}}$ и $C_{\text{ос}}$: $m_{\text{ам}}=0$, $C_{\text{ос}}=0$ (а); $m_{\text{ам}}=0,4$, $C_{\text{ос}}=0$ (б); $m_{\text{ам}}=0$, $C_{\text{ос}}=0,4$ (в); $m_{\text{ам}}=0,4$, $C_{\text{ос}}=0,4$ (г).

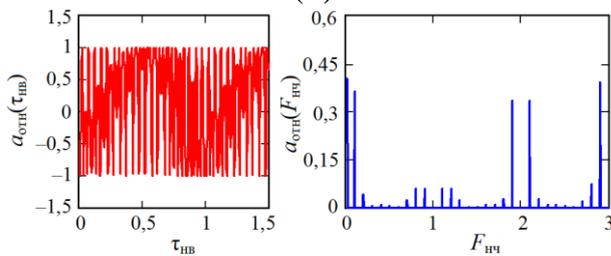
Из характеристик, представленных на рис. 3.9, видно, что наличие АМ излучения АД вызывает некоторый рост уровня сигнала на нулевой гармонике частоты модуляции в средней части ХАС (см. рис. 3.9, 1-б и 1-в, а также кривые 1 на рис. 3.10). На гармониках модуляции это явление также заметно, если сравнить кривые 2...4 на рис. 3.10, полученные при отсутствии АМ (рис. 3.10, а и в) и ее наличии (рис. 3.10, б и г). Этот рост объясняется явлением регенерации сигнала в петле обратной связи «генератор – цель – генератор», когда процесс АМ колебаний и воздействие амплитуды отражённого излучения находятся в фазе. Подобное явление наблюдается, как отмечалось выше, в измерителях малых дальностей «рециркуляционного» типа [119–122].



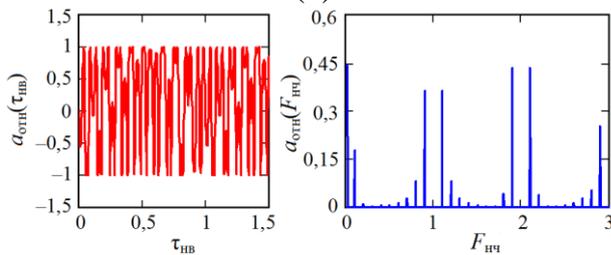
(a)



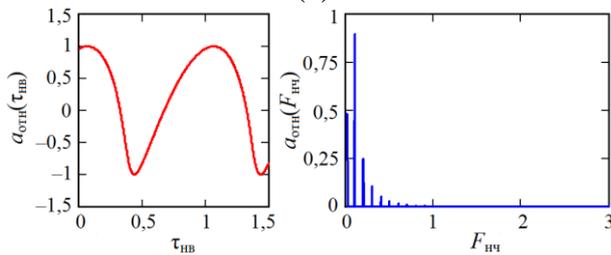
(б)



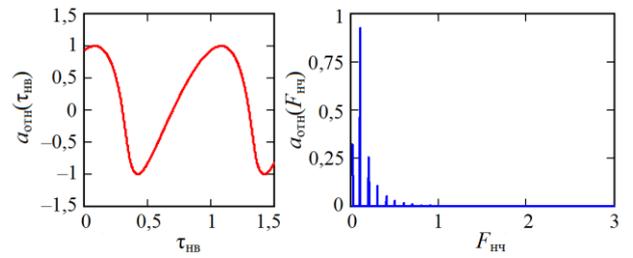
(в)



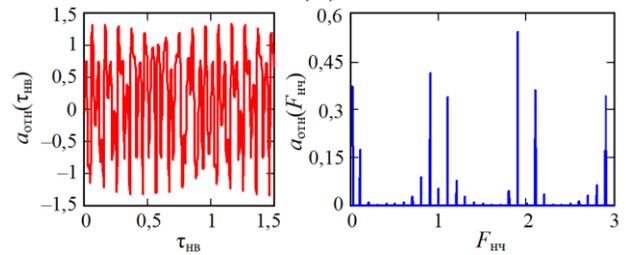
(г)



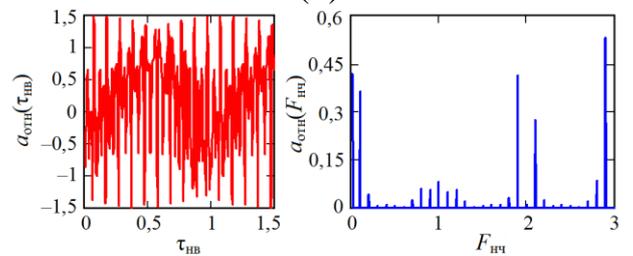
(д)



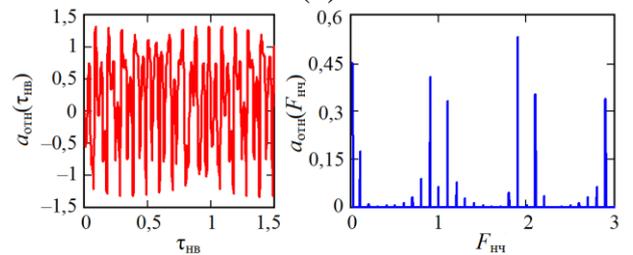
(a)



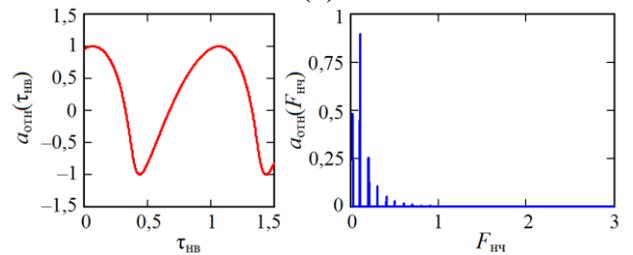
(б)



(в)



(г)



(д)

Рисунок 3.12. Временные $a_{отн}(\tau_{нв})$ и спектральные $a_{отн}(F_{нч})$ диаграммы сигнала автодина, рассчитанные для генератора с ЧМ при $k_{чм} = 2$, $m_{ам} = 0$, $C_{ос} = 0,5$ и различных значений $r_{нр}$: $r_{нр} = 0$ (a); $r_{нр} = 0,25$ (б); $r_{нр} = 0,5$ (в); $r_{нр} = 0,75$ (г); $r_{нр} = 1$ (д).

Рисунок 3.13. Временные $a_{отн}(\tau_{нв})$ и спектральные $a_{отн}(F_{нч})$ диаграммы сигнала автодина, рассчитанные для генератора с АЧМ при $k_{чм} = 2$, $m_{ам} = 0,2$, $C_{ос} = 0,5$ и различных значений $r_{нр}$: $r_{нр} = 0$ (a); $r_{нр} = 0,25$ (б); $r_{нр} = 0,5$ (в); $r_{нр} = 0,75$ (г); $r_{нр} = 1$ (д).

Графики сечений ХАС вдоль оси r_{np} , представленные на рис. 3.10, столбец a , назовем «стандартными». Они соответствуют случаю, который можно назвать случаем «идеального» автодина, у которого гипотетически отсутствуют ПАМ ($m_{AM} = 0$) при ЧМ и автодинные изменения частоты ($C_{OC} = 0$) при воздействии отраженного от цели излучения. Для выяснения влияния ПАМ на вид ХАС сравним между собой графики столбцов a и b на рис. 3.10. Из этого сравнения видим, что наличие ПАМ вызывает изменение уровня сигнала $J_m(r_{np})$ лишь в средней части сечения ХАС, где $0 < r_{np} < 1$.

При этом крайние значения сечения ХАС, где $r_{np} = 0$ и $r_{np} = 1$, остаются неизменными. Заметные изменения относительно стандартного вида сечения ХАС $J_m(r_{np})$ наблюдаются преимущественно на нулевой $J_0(r_{np})$ и на низших гармониках частоты модуляции. Из кривых 2 – 4 на графиках рис. 3.11 видно, что ПАМ колебаний вызывает отклик АД на гармониках $J_m(k_{ЧМ})$ модуляции даже в области значений, где $k_{ЧМ} \rightarrow 0$. Расчеты при иных значениях параметров показали, что с увеличением номера гармоники m и индекса модуляции $k_{ЧМ}$ влияние ПАМ на вид сечения ХАС АД с ЧМ существенно ослабевает.

Из сравнения представленных в столбцах a , b и c , d графиков рис. 3.10 не трудно видеть, что на форму сечения ХАС значительно сильнее, чем ПАМ, оказывают влияние автодинные изменения частоты. Эти изменения, которые мы учитываем в расчетах соответствующим выбором значения параметра C_{OC} , вызывают значительные изменения не только внутри сечения ХАС, но и на ее краях. Этот вывод подтверждается также ходом одноименных кривых на графиках рис. 3.11.

Временные диаграммы $a_{отн}(\tau_{нв})$ отклика АД с ЧМ, как видно из рис. 3.12, содержат медленную и быструю составляющие. Медленная составляющая в «чистом» виде показана на рис. 3.12, a и d . Она совпадает с амплитудной характеристикой АД без модуляции [109]. Из этих графиков видно, что как в начале ($r_{np} = 0$), так и в конце ($r_{np} = 1$) каждой ХАС автодинный отклик

представлен только в виде доплеровского сигнала, но с присущими АД искажениями при $C_{OC} \neq 0$. Отклик на гармониках частоты модуляции Ω_m в этих случаях отсутствует. При смещении цели в среднюю область ХАС, где $0 < r_{np} < 1$, происходит наложение на доплеровскую составляющую сигнала дополнительных «быстрых» осцилляций, обусловленных процессом взаимодействия отражённых ЧМ колебаний с излучаемыми, которые также промодулированы по частоте (см. рис. 3.12, б – г). Эти осцилляции вызывают зависимость уровня сигнала на гармониках частоты модуляции Ω_m в соответствии с функциями Бесселя (см. рис. 3.11, а).

Из представленных на рис. 3.12 спектров видно, что спектральные составляющие, полученные в АД на частотах, кратных частоте модуляции Ω_m , при движении цели распадаются на две составляющие половинной амплитуды. Данные составляющие смещены от частоты, кратной Ω_m , на величину частоты Ω_a автодинного сигнала, равной частоте Доплера. Наличие ангармонических искажений на временных диаграммах и высших гармоник частоты автодинного сигнала в его спектре (см. рис. 3.12) объясняется известной нелинейностью набега фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного излучения, вызванной автодинными изменениями частоты генерации АД [109]. Степень этих искажений сигналов, как отмечалось выше, определяется преимущественно величиной параметра обратной связи C_{OC} . Так при $C_{OC} \ll 1$ автодинные изменения являются практически гармоническими, а с его увеличением – значительно отличаются от синусоиды. Степень этих искажений также зависит от внутренних параметров генератора, таких как добротность колебательной системы, знаки и величины параметров неизохронности (через угол θ) и неизодромности (через угол ψ) генератора.

В целом, как видно из временных и спектральных диаграмм рис. 3.12 и 3.13, формирование автодинного отклика на выходе АД с АЧМ происходит аналогично, как в случае АД с ЧМ. Например, в начале ($r_{np} = 0$) и в конце ($r_{np} = 1$) каждой ХАС автодинный отклик представлен в виде доплеровского сигнала, а

отклик на гармониках частоты Ω_m модуляции отсутствует. Основные отличия в формировании сигналов на выходе АД с АЧМ имеют место в средней части ХАС, где $0 < r_{np} < 1$. Здесь формирование сигналов как в области доплеровских частот, так и на гармониках модуляции обусловлено не только процессом ЧМ колебаний АД, но и процессом АМ. При этом вклад АМ на временных диаграммах рис. 3.13, $b - d$ выглядит в виде пиков (выбросов), выходящих за пределы амплитуды сигнала, при ЧМ. Очевидно, что за счет этих пиков происходит дополнительное перераспределение энергии спектральных составляющих сигнала и появление гармоник на частотах, кратных частоте Ω_m модуляции. Кроме того, это перераспределение вызывает заметную асимметрию спектра сигналов на гармониках частоты модуляции, а также изменения в поведении уровня сигнала на гармониках частоты модуляции Ω_m , которое становится отличным от поведения функций Бесселя (см. рис. 3.11, $b-d$).

Как видно из рис. 3.9 и 3.10, ХАС автодинного отклика на определённых расстояниях r_{np} от СБРЛ имеют «мёртвые» зоны по дальности, где наблюдается подавление сигналов, отражённых от целей. Одна из таких зон находится в непосредственной близости от СБРЛ, где $r_{np} = 0$. В этой зоне, как отмечалось выше, появление сравнительно мелких отражающих объектов, например, насекомых, капель дождя и других, вызывает появление мощных отражённых сигналов, которые в ряде применений нарушают нормальную работу СБРЛ. В данном случае наличие мёртвой зоны вблизи антенны СБРЛ с ЧМ при выделении сигналов на гармониках частоты модуляции является весьма важным и полезным свойством этих систем, обеспечивающим их повышенную помехоустойчивость.

3.4. Особенности формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ

Дальнейший анализ шумовых характеристик (2.56) – (2.58) с учетом (2.55) выполним с привлечением численных методов, используя следующие значения внутренних и модуляционных параметров генератора: частота генерации

$\omega_0 = 2\pi \cdot 37,5 \cdot 10^9$; девиация частоты $\Delta\omega_{\text{ЧМ}} = 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6$; частота модуляции $\Omega_m = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^3$; коэффициенты $\gamma = 1$ и $\rho = -0,2$. Начальное расстояние от автодинной СБРЛ с ЧМ до объекта локации $l_0 = 1,5$ м. Оно соответствует начальному участку первой рабочей зоны нормированного расстояния $r_n \ll 1$. Значения остальных коэффициентов в (2.56) – (2.58) примем равными единице, что не влияет на качественную сторону расчетов и результатов анализа.

В этих расчётах для ортогональных составляющих $a_c(t)$ и $a_s(t)$ используем входящую в пакет MathCAD подпрограмму моделирования случайных процессов, для запуска которой примем число отсчётов мгновенных значений шума на каждом периоде модулирующей функции равным $1 \cdot 10^5$. При этом примем среднеквадратическое значение уровня шума 0,025.

На рисунках 3.14, 3.15 и 3.16 представлены вид модулирующих функций и результаты расчётов графиков $\chi_n(t_n, \tau_n)$ и $a_n(t_n, \tau_n)$ при различных значениях параметра $C_{\text{ос}}$ и неподвижном отражателе для случаев соответственно несимметричного пилообразного, симметричного пилообразного и гармонического законов ЧМ. На этих же рисунках приведены графики относительных изменений среднеквадратических уровней частотного $q_\chi(t_n, \tau_n)$ (УЧШ) и амплитудного $q_a(t_n, \tau_n)$ (УАШ) шума генератора, рассчитанных по следующим формулам:

$$q_\chi(t_n, \tau_n) = \frac{\overline{|\chi_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{10}|}}{\overline{|\chi_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{\text{пм}}|}}, \quad q_a(t_n, \tau_n) = \frac{\overline{|a_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{10}|}}{\overline{|a_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{\text{пм}}|}}.$$

В этих формулах $\overline{|\chi_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{10}|}$ и $\overline{|a_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{10}|}$ – среднеквадратические значения уровней шума, усредняемых на интервалах ± 5 отсчётов (индекс «10») мгновенных значений шума; $\overline{|\chi_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{\text{пм}}|}$ и $\overline{|a_{\text{ш}}(t_n, \tau_n)_{\text{пм}}|}$ – тоже, но усреднение выполняется за период модуляции (индекс «пм»).

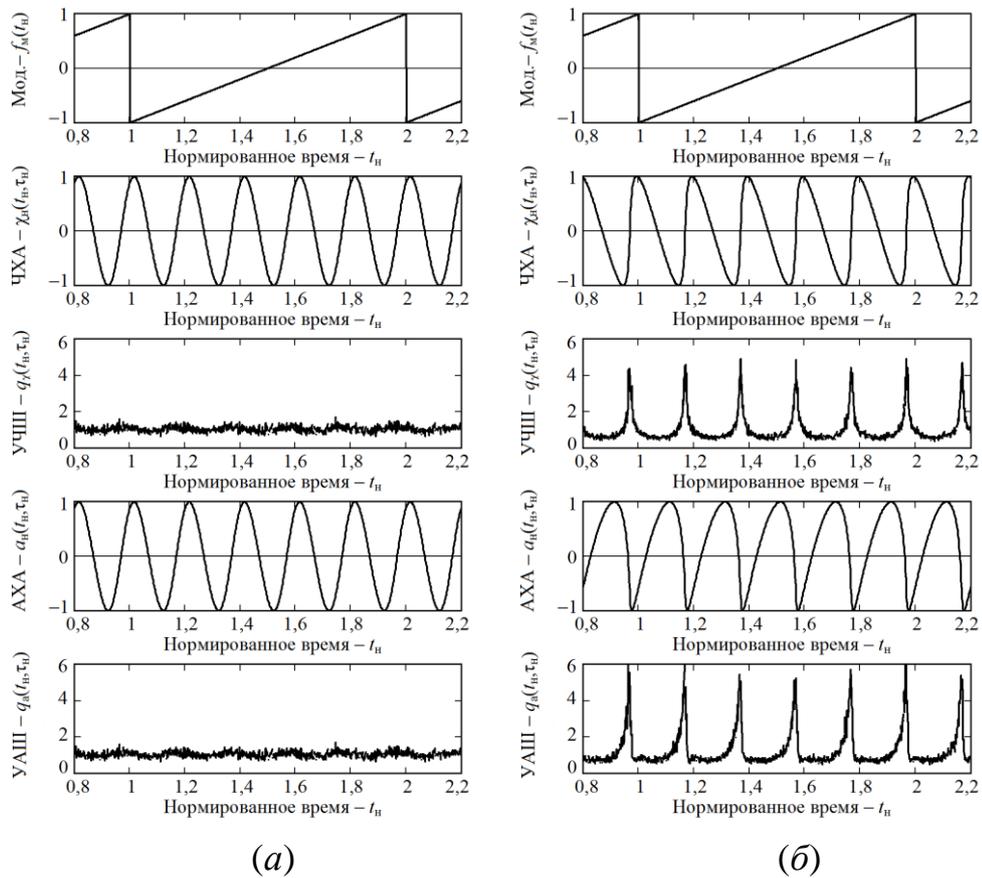


Рисунок 3.14. Временные диаграммы модулирующей функции $f_m(t_n)$, сигнальных $\chi_n(t_n, \tau_n)$, $a_n(t_n, \tau_n)$ и шумовых $q_\chi(t_n, \tau_n)$, $q_a(t_n, \tau_n)$ характеристик при значениях параметра $C_{OC} = 0,08$ (а) и $C_{OC} = 0,8$ (б) автодинной СБРЛ с несимметричной пилообразной ЧМ для случая неподвижного объекта локации.

На рисунках 3.17 – 3.19 соответственно представлены временные диаграммы модулирующих функций по несимметричному и симметричному пилообразному законам, а также закону гармонической функции, АХА $a_n(t_n, \tau_n)$ и относительных уровней амплитудных $q_a(t_n)$ флуктуаций АД для случаев приближающегося (а) и удаляющегося (б) объекта локации при величине параметра внешней обратной связи $C_{OC} = 0,8$.

Из диаграмм рисунков 3.14 – 3.16 видно, что в случае слабой внешней обратной связи, когда значение параметра $C_{OC} \ll 1$, сигнальные характеристики имеют вид гармонической функции, а шумовые характеристики являются стационарными. В случае сильной внешней обратной связи, когда величина C_{OC} соизмерима с единицей, сигнальные характеристики приобретают характерные искажения. При этом у автодинной СБРЛ с ЧМ так же, как и у обычных АД, при

изменении набега фазы $\delta(t_n, \tau_n)_{(c)}$ отражённого излучения на 2π уровни шумов периодически изменяются (см. кривые на рисунках 3.14 – 3.16 под литерой б).

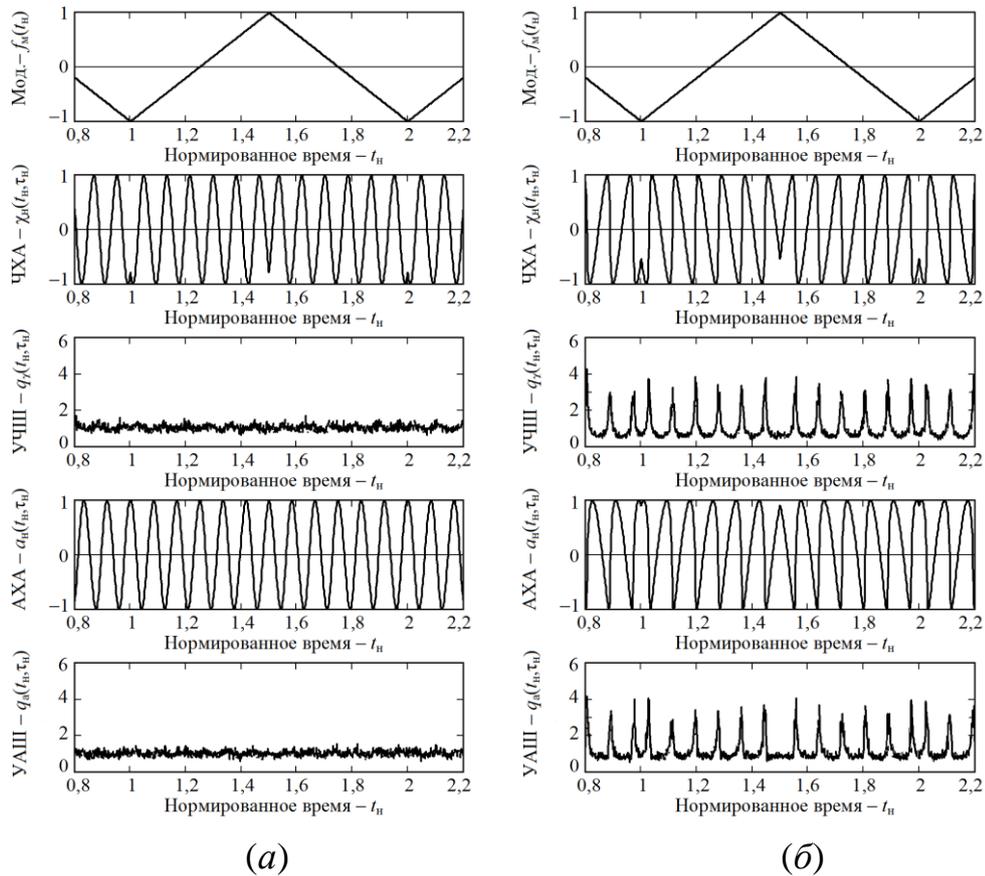


Рисунок 3.15. Временные диаграммы модулирующей функции $f_m(t_n)$, сигнальных $\chi_n(t_n, \tau_n)$, $a_n(t_n, \tau_n)$ и шумовых $q_\chi(t_n, \tau_n)$, $q_a(t_n, \tau_n)$ характеристик при значениях параметра $C_{OC} = 0,08$ (а) и $C_{OC} = 0,8$ (б) автодинной СБРЛ с симметричной пилообразной ЧМ для случая неподвижного объекта локации.

Из сопоставления сигнальных и шумовых характеристик рисунков 3.14 – 3.16 видно, что положения по оси времени t_n максимума уровней шумов совпадают и соответствуют области «крутого» перехода ЧХА $\chi_n(t_n, \tau_n)$ через нуль. При этом уровень пика шумов резко возрастает с приближением величины параметра внешней обратной связи C_{OC} к единице. Участкам с «пологим» переходом ЧХА соответствует «плато» с минимумом частотных $q_\chi(t_n, \tau_n)$ и амплитудных $q_a(t_n, \tau_n)$ шумов, а также шумов $q_u(t_n, \tau_n)$ в цепи смещения АЭ, которые находятся ниже (в 1,5...2 раза), чем уровень шумов автономного генератора.

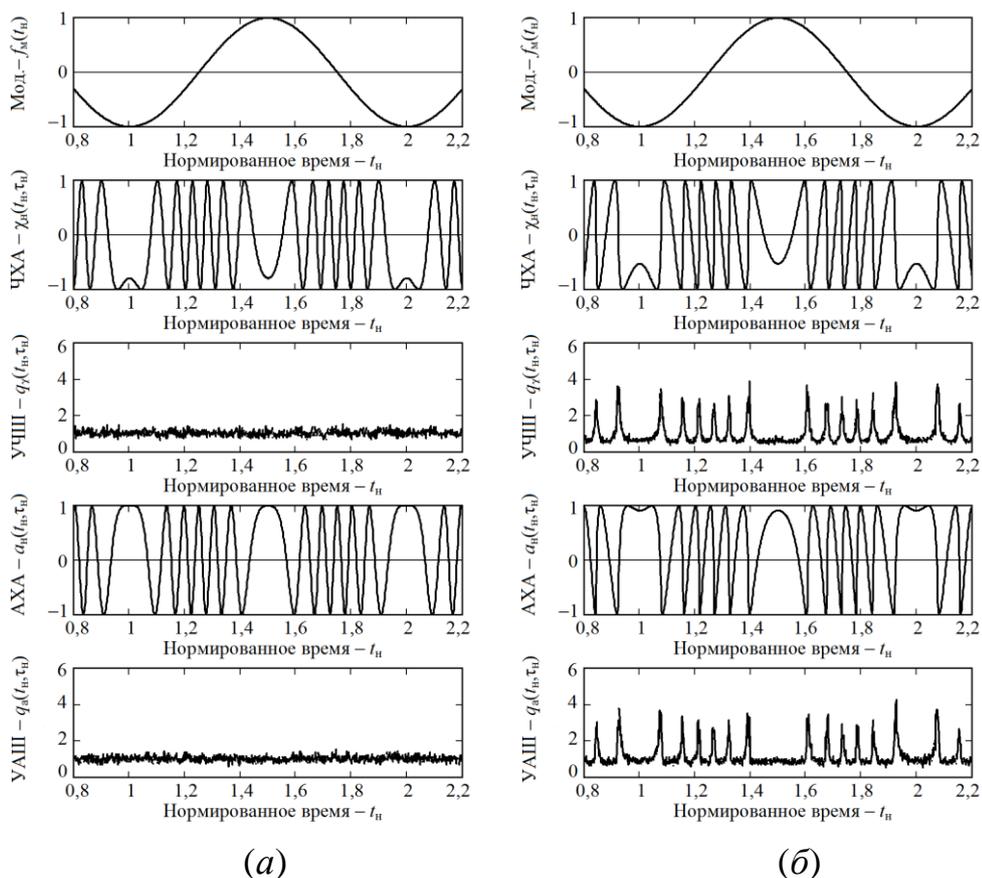


Рисунок 3.16. Временные диаграммы модулирующей функции $f_m(t_n)$, сигнальных $\chi_n(t_n, \tau_n)$, $a_n(t_n, \tau_n)$ и шумовых $q_\chi(t_n, \tau_n)$, $q_a(t_n, \tau_n)$ характеристик при значениях параметра $C_{OC} = 0,08$ (а) и $C_{OC} = 0,8$ (б) автодинной СБРЛ с гармонической ЧМ для случая неподвижного объекта локации.

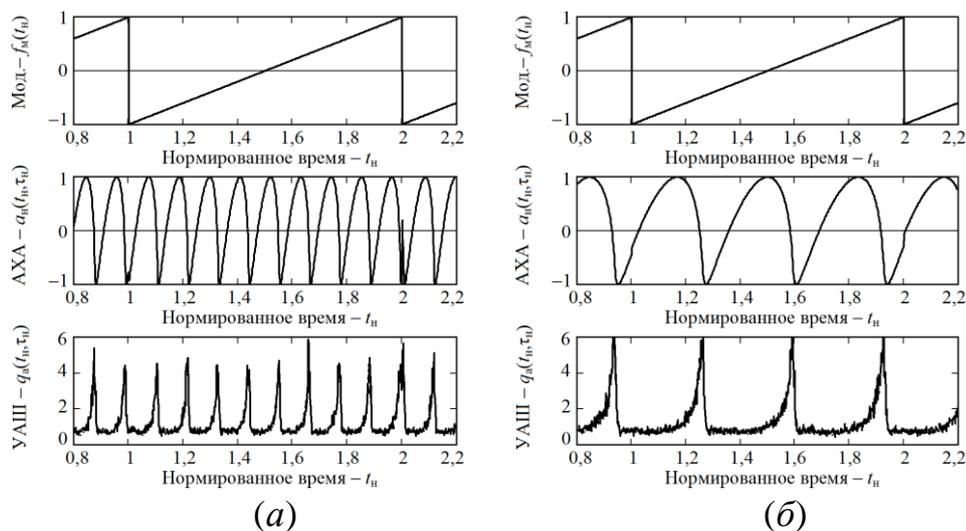


Рисунок 3.17. Временные диаграммы модулирующей функции $f_m(t_n)$, АХА $a_n(t_n, \tau_n)$ и УАПШ $q_a(t_n, \tau_n)$ при величине параметра $C_{OC} = 0,8$ автодинной СБРЛ с несимметричной пилообразной ЧМ для случаев приближающегося (а) и удаляющегося (б) объектов локации.

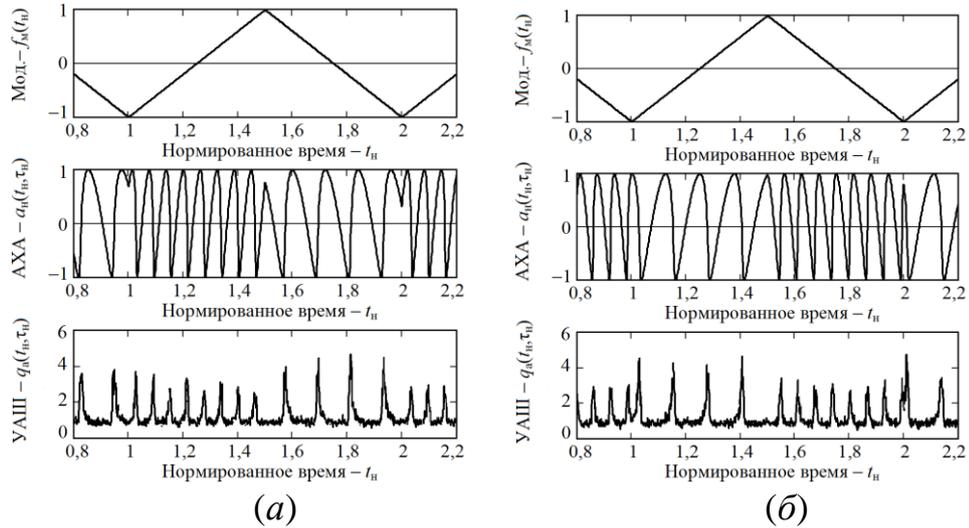


Рисунок 3.18. Временные диаграммы модулирующей функции $f_m(t_n)$, АХА $a_n(t_n, \tau_n)$ и УАШ $q_a(t_n, \tau_n)$ при значении параметра $C_{OC} = 0,8$ автодинной СБРЛ с симметричной пилообразной ЧМ для случаев приближающегося (а) и удаляющегося (б) объектов локации.

Такое поведение шумов при условии сильной внешней обратной связи объясняется периодической неравномерностью набега фазы $\delta(t_n, \tau_n)$ отражённого излучения из-за автодинных изменений частоты $\chi_n(t_n, \tau_n)$ генерации АД. Эти неравномерности, как видно из знаменателей последних сомножителей в выражениях (2.59) – (2.61), служат своего рода коэффициентом передачи в замкнутой цепи внешней обратной связи «генератор – объект локации», зависящим от текущего набега фазы $\delta(t_n, \tau_n)$ отражённого излучения. Частотные шумы генератора трансформируются в фазовые шумы отраженного от объекта локации излучения. Последние, воздействуя на генератор через время запаздывания τ_n , преобразуются в мультипликативные составляющие частотного и амплитудного шума. При одном значении фазы $\delta(t_n, \tau_n)$ запаздывающая обратная связь является положительной, вызывая увеличение (регенерацию) любых вариаций в системе, а при других – отрицательной запаздывающей обратной связью, при которой всякие вариации в системе подавляются. Необходимо отметить также, что в положениях по оси абсцисс, где производные сигнальных характеристик равны нулю, шумовые характеристики по уровню соответствуют шумам автономного генератора и мультипликативные

составляющие шума отсутствуют.

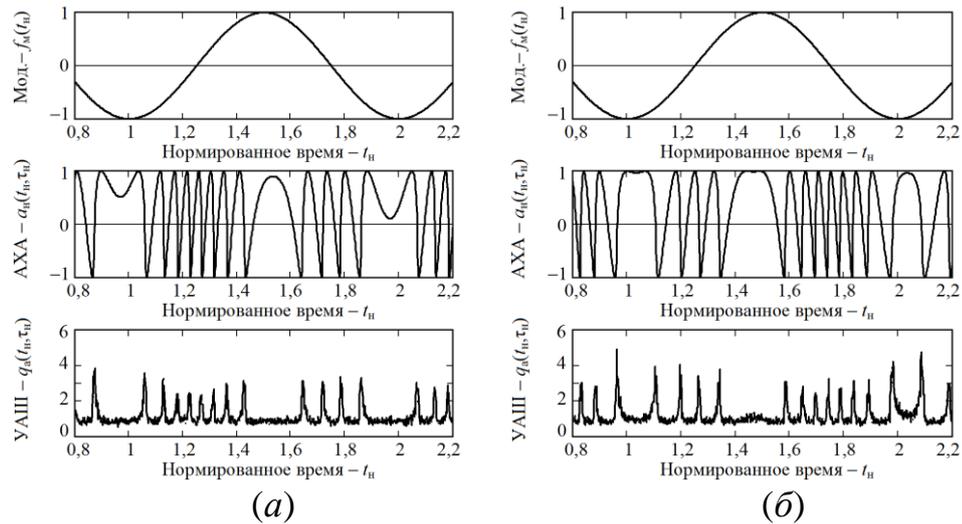


Рисунок 3.19. Временные диаграммы модулирующей функции $f_m(t_n)$, АХА $a_n(t_n, \tau_n)$ и УАШ $q_a(t_n, \tau_n)$ при значении параметра $C_{OC} = 0,8$ автодинной СБРЛ с гармонической ЧМ для случаев приближающегося (а) и удаляющегося (б) объектов локации.

Из сравнения временных диаграмм рис. 3.14 – 3.16 с соответствующими диаграммами рис. 3.17 – 3.19 сигнальных характеристик видно, что в случае приближения объекта локации к СБРЛ на участках с возрастающей частотой излучения частота автодинного сигнала возрастает, а на участках, где частота генерации уменьшается, – частоты сигнала уменьшается. В случае удаляющегося объекта наблюдается обратное явление. Поведение полученных здесь сигнальных характеристик полностью соответствует известным положениям теории и практики гомодинных и автодинных СБРЛ [9, 53, 123]. Из сравнения временных диаграмм шумовых характеристик рисунков 3.14 – 3.16 и 3.17 – 3.19 видно, что их поведение не зависит от относительного направления движения объекта локации.

3.5. Выводы

1. В автодинных СБРЛ с АМ при отсутствии или сравнительно малой сопутствующей девиации частоты генерации максимум автодинного отклика соответствует середине зоны амплитудной селекции. С увеличением сопутствующей девиации частоты происходит смещение области главного максимума в сторону больших значений нормированного расстояния r_n и

появление многогорбой ХАС, характерной СБРЛ с ЧМ. При этом амплитуда отклика на всех гармониках Ω_m частоты модуляции, включая нулевую, во всех случаях наличия или отсутствия сопутствующей ЧМ значительно возрастает с приближением коэффициента m_{AM} амплитудной модуляции к единице.

Отличительные особенности АД с АЧМ состоят в том, что автодинный отклик переносится также на гармоники частоты Ω_m модуляции, причем эффективность этого переноса повышается с увеличением глубины АМ и зависит от величины сопутствующей девиации частоты генерации, а также от расстояния до объекта локации. Благодаря этому АД с АЧМ на гармониках частоты модуляции обладают свойством амплитудной селекции объектов локации на определенных расстояниях, что обеспечивает повышение помехоустойчивости СБРЛ, выполненных на их основе.

В случае, когда величина параметра C_{oc} обратной связи соизмерима с единицей, автодинам с АЧМ как и обычным (немодулированным) АД свойственны ангармонические искажения сигналов. Эти искажения необходимо учитывать при выборе параметров автодинных генераторов, а также при обработке сигналов в таких СБРЛ.

2. В результате выполненных расчетов автодинных характеристик АД с ЧМ на примере гармонического закона модуляции установлено влияние сопутствующей АМ, а также величины параметра C_{oc} внешней обратной связи на формирование сигналов автодинной СБРЛ с ЧМ. Основные результаты исследований сводятся к следующим.

На краях зоны амплитудной селекции цели автодинный отклик генератора как при ЧМ, так и при АЧМ наблюдается только на нулевой гармонике модуляции, т.е. в области доплеровских частот. В средней части зоны амплитудной селекции в генераторе с ЧМ (без ПАМ) формирование автодинного отклика при малой величине параметра C_{oc} внешней обратной связи, когда $C_{oc} \ll 1$, аналогично формированию сигнала в гомодинных СБРЛ с ЧМ. Формирование сигналов в этой части зоны селекции происходит как на нулевой

гармонике, так и на гармониках более высокого порядка. При этом амплитуды огибающей сигналов при гармонической ЧМ формируются в соответствии с функциями Бесселя. Наличие ПАМ излучения генератора вызывает некоторые изменения в амплитудных значениях сигналов, причем при малых значениях коэффициента АМ, когда $m_{AM} \leq 0,5$, влиянием ПАМ можно пренебречь. Однако с приближением величины коэффициента АМ к единице такое пренебрежение становится недопустимым, поскольку амплитуда отклика на всех гармониках частоты Ω_m модуляции, включая нулевую, резко возрастает. Влияние ПАМ на формирование ХАС в автодинной СБРЛ с ЧМ значительно уменьшается с ростом номера гармоники, на которой производится выделение сигнала.

Попутно установлено, что особенно сильное влияние на формирование ХАС цели оказывает величина параметра C_{OC} внешней обратной связи автодинной системы «генератор – объект локации». При выполнении сильного неравенства, когда $C_{OC} \ll 1$, формируемые сигналы имеют гармонический вид, а ХАС полностью совпадают с характеристиками гомодинных СБРЛ с ЧМ. Однако в случае приближения величины параметра C_{OC} к единице имеют место сильные изменения спектрального состава автодинного отклика. Эти изменения приводят к искажению формы ХАС на всех гармониках, включая нулевую гармонику, что может явиться причиной нарушения нормальной работы СБРЛ со спектральной обработкой сигналов.

Поэтому при создании перспективных автодинных приемопередающих модулей для СБРЛ с ЧМ необходимо учитывать отмеченные обстоятельства. Прежде всего, должны приниматься меры по снижению уровня ПАМ и причин искажения сигналов из-за автодинных изменений частоты. Кроме того, модули должны обеспечить требуемую линейность закона ЧМ в широкой полосе частот и повторяемость модуляционных характеристик в условиях серийного производства.

3. Выполненные расчёты сигнальных и шумовых характеристик АД с ЧМ при различных формах модулирующей функции показали, что частота выходного

сигнала АД с ЧМ как в случае движущегося, так и неподвижного объекта локации соответствует частоте сигнала, получаемого в случае гомодинной СБРЛ с ЧМ [123]. При этом форма сигналов практически синусоидальная, а шумовые характеристики являются стационарными.

Отличия сигналов этих автодинных и гомодинных систем имеют место в случаях, когда параметр C_{oc} внешней обратной связи «генератор с ЧМ – объект локации» соизмерим с единицей. В этом случае наблюдаются искажения и обогащение спектра сигнала АД, а также особенности шумовых характеристик – периодическая нестационарность среднеквадратического уровня шума. Эти особенности АД с ЧМ необходимо учитывать в устройствах обработки сигналов при функционировании СБРЛ в определенных условиях.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИГНАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОДИННЫХ СБРЛ С АМ И ЧМ

4.1. Введение

В настоящей главе представлены результаты экспериментальных исследований сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ. Цель этих исследований – проверка выводов теоретического анализа, выполненного в главах 2 и 3. Для этого в разделе 4.2 дано описание экспериментального стенда и представлены результаты исследования сигнальных характеристик автодина на диоде Ганна с АМ при наличии сопутствующей ЧМ. В разделе 4.3 также описан стенд, порядок выполнения экспериментов и приведены результаты исследований автодинных модулей на диодах Ганна 8-мм диапазона с ЧМ при сопутствующей АМ. Модуляция выполнялась двумя способами: изменением напряжения смещения на варикапе и в цепи смещения диода Ганна. В разделе 4.4 рассмотрены особенности формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинов с ЧМ. Итоги выполненных исследований подведены в разделе 4.5.

Основные результаты настоящей главы опубликованы в журнальных статьях [95–97], в материалах докладов научно-технических конференций [100, 124], представлены в двух отчётах о НИР.

4.2. Результаты исследования сигнальных характеристик автодинов с АМ при наличии сопутствующей ЧМ

Экспериментальные исследования влияния сопутствующей (паразитной) модуляции частоты в автодинных СБРЛ с АМ выполнялись на примере генераторного модуля «Тигель-08М» 8-миллиметрового диапазона (см. рис. 4.1, а), который был изготовлен по гибридно-интегральной технологии на основе двухмезового диода Ганна [39]. На подложке этого модуля в щелевой резонатор

параллельно (по СВЧ) установлены чипы планарного диода Ганна и детекторный диод с барьером Шоттки, развязанные по цепям смещения (показаны на рис. 4.1, б цифрами «1» и «2» соответственно). Одна из мез диода Ганна выполнена большого сечения. Плотность тока в ней недостаточна для возбуждения доменов сильного поля, поэтому она является пассивной. Вторая меза малого сечения, является активной и создает условия для возбуждения колебаний в генераторе. Детекторный диод предназначен для выделения автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний.

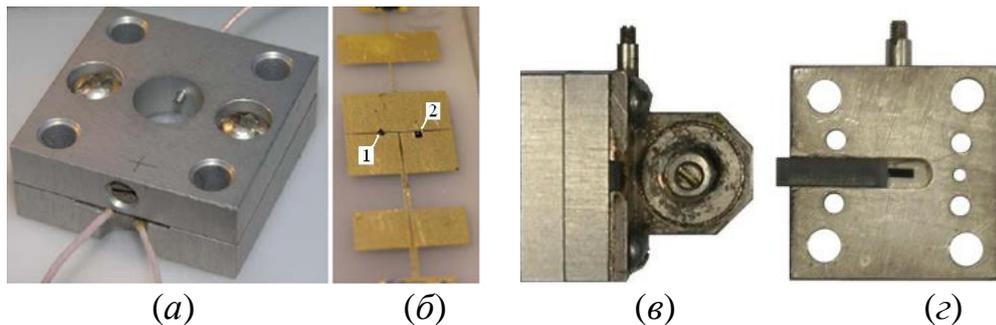


Рисунок 4.1. Внешний вид модуля «Тигель-08М» (а), топологии диодной вставки (б), АГ со стабилизирующим резонатором (в) и элемента резистивной связи с резонатором (z).

В конструкции модуля «Тигель-08М» подложка помещается между двух пластин, образующих его корпус (см. рис. 4.1, а). В центре лицевой пластины предусмотрено отверстие круглой формы для вывода СВЧ-излучения, а задняя пластина – глухая с винтом для регулировки частоты. С целью стабилизации частоты генерации к задней стенке модуля пристыковывался дополнительный высокодобротный резонатор (см. рис. 4.1, в). Связь между рабочим и стабилизирующим резонаторами выполнена через сквозную прорезь в задней стенке в виде отрезка волноводного канала. Стабилизирующий резонатор, изготовленный из суперинвара и работающий на волне H_{011} , имел собственную добротность порядка $5 \cdot 10^3$. Резистивная связь обеспечивалась введением в окно связи с резонатором клиновидной вставки из поглотителя, положение которой в процессе настройки можно регулировать (см. рис. 4.1, z).

Предварительно модуль настраивался в режим максимальной автодинной чувствительности без стабилизации частоты по изложенной в [125] методике с

использованием имитатора доплеровского сигнала. Для этого изменялась величина связи с нагрузкой путем вариации положения предусмотренного в конструкции модуля винта и подбиралась величина напряжения смещения U_0 на диоде Ганна. Оптимальная величина этого напряжения для исследуемого модуля была выбрана в пределах $U_0 = 3,6...4$ В, ток потребления составил 0,2 А. Частота генерации модуля 37,5 ГГц, его выходная мощность 15 мВт.

При настройке в режим максимальной автодинной чувствительности стабилизированного модуля корректировалась также связь между рабочим и стабилизирующим резонаторами посредством изменения положения поглощающей вставки и размеров отверстия связи. Данная связь устанавливалась такой величины, чтобы выходная мощность генератора уменьшалась не более чем на 5–10 % от номинального значения. Совпадение частоты генерации с собственной частотой стабилизирующего резонатора контролировалось по моменту «захвата частоты», когда автодинная девиация частоты генерации имела минимальное значение.

Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.2. В ней предусмотрена регистрация автодинного отклика при изменении расстояния до отражателя-имитатора, скорости его перемещения, уровня отраженного сигнала и других факторов.

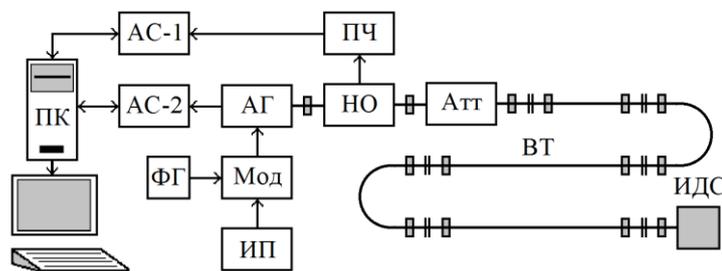


Рисунок 4.2. Функциональная схема стенда для исследований АД с АМ: АГ – автодинный генератор; АС-1 и АС-2 – анализаторы спектра; Атт – аттенюатор; ВТ – волноводный тракт; ИДС – имитатор доплеровского сигнала; ИП – источник питания; Мод – модулятор; НО – направленный ответвитель; ПК – персональный компьютер; ПЧ – переносчик частоты сигнала; ФГ – функциональный генератор.

Исследуемый автодинный генератор АГ (см. рис. 4.2) связан с имитатором доплеровского сигнала ИДС [125] волноводным трактом ВТ, в котором находятся

также направленный ответитель НО и переменный аттенюатор Атт. Волноводный тракт ВТ требуемой протяженности предназначен для моделирования запаздывания отраженного излучения, а аттенюатор Атт – затухания излучения, распространяющегося в пространстве до объекта локации и обратно. Боковое плечо направленного ответителя НО подключено к входу переносчика частоты ПЧ, выход которого соединен с входом первого анализатора спектра АС-1. Выходной сигнал встроенного в АГ детектора поступает на вход второго анализатора спектра АС-2. Оба анализатора спектра типа USB-SA44B связаны с персональным компьютером ПК через USB-кабели. Питание от стабилизированного источника питания ИП на исследуемый генератор АГ поступает через модулятор Мод, выполненный на биполярном транзисторе. На управляющий вход модулятора Мод синусоидальное напряжение частотой 10 МГц поступает от функционального генератора ФГ. При этом требуемый коэффициент АМ автодинного генератора АГ контролируется анализатором спектра АС-1.

В экспериментах были реализованы следующие условия: длина волноводного тракта ВТ сечением $7,2 \times 3,4$ мм² между генератором АГ и имитатором ИДС (см. рис. 4.2) равнялась $l_b = 9,6$ м, т. е. время запаздывания отраженного излучения в волноводе, рассчитанное по формуле $\tau = 2l_b / c \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}$, где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны волновода, составляло $\tau = 75 \cdot 10^{-9}$ с. Данное расстояние примерно соответствует при выбранной частоте модуляции 10 МГц середине ХАС. Переменным аттенюатором Атт в тракте устанавливалась величина коэффициента отражения Γ_0 , при которой автодинная девиация частоты составляла $\Delta\omega_a = 2\pi \cdot 1,5 \cdot 10^6$, а расчетное значение параметра обратной связи $C_{OC} = 0,5$. Величина девиации частоты $\Delta\omega_a$ оценивалась с помощью анализатора спектра АС-1 при работающем ИДС по ширине спектра СВЧ излучения АГ.

На рис. 4.3, а представлена картина спектра СВЧ колебаний генератора АГ, полученного от стабилизированного по частоте модуля с АМ глубиной около 50

%. Величина АМ оценивалась по соотношению основной и боковых составляющих спектра, полученного с помощью анализатора спектра АС-1 (см. рис. 4.2). Спектр СВЧ колебаний нестабилизированного по частоте этого же модуля при прежней глубине АМ представлен на рис. 4.3, б. Асимметрия спектра в последнем случае указывает на наличие сопутствующей ЧМ.

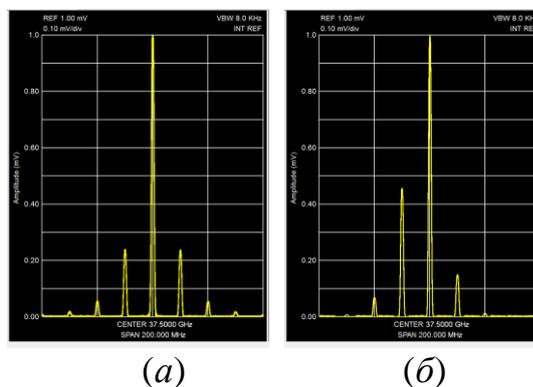


Рисунок 4.3. Спектры СВЧ колебаний выходных сигналов стабилизированного (а) и обычного (б) (нестабильного) генераторов

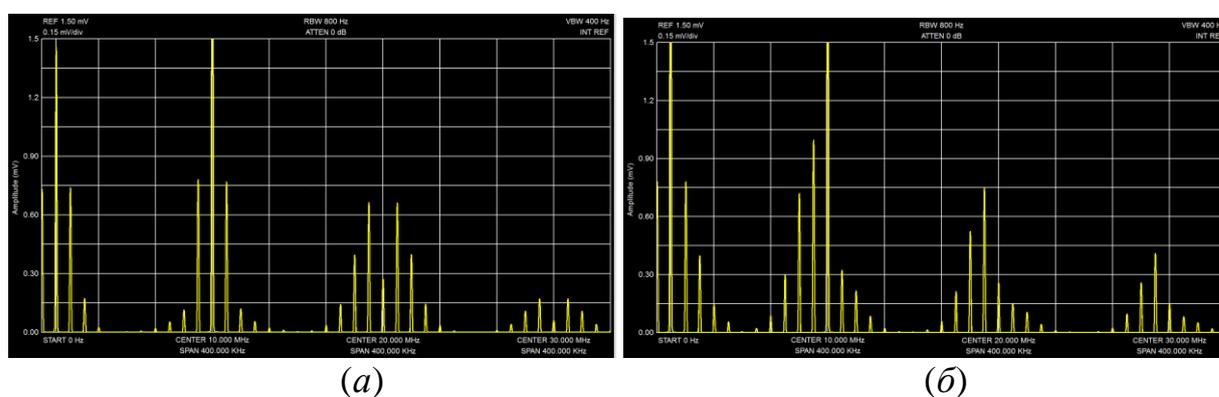


Рисунок 4.4. Спектры автодинного сигнала, полученные для стабилизированного по частоте генератора на диоде Ганна с АМ (а) и для обычного (нестабильного) генератора, в котором присутствует сопутствующая ЧМ (б).

При указанных выше условиях эксперимента с помощью анализатора спектра АС-2 (см. рис. 4.2) были получены спектры автодинных сигналов для стабилизированного и обычного генераторных модулей, которые представлены на рис. 4.4, а и б соответственно. При этом скорость движения отражателя имитатора ИДС поддерживалась постоянной, при которой частота автодинного сигнала составляла 10 кГц. На спектрах представлены области нулевой и первых трех гармоник частоты модуляции. Наличие высших гармоник частоты Доплера в

указанных областях спектра обусловлено ангармоническими искажениями сигналов. Эти искажения, как известно [112], наблюдаются, когда величина параметра обратной связи C_{oc} соизмерима с единицей. В случае уменьшения величины этого параметра, например, увеличением затухания аттенюатора A_{tt} на 10–20 дБ, высшие гармоники частоты Доплера практически исчезают, и сигнал становится синусоидальным. Из спектров рис. 4.4 также видно, что уровень первой гармоники ПАМ значительно превышает уровень гармоник более высокого порядка. Существенные отличия вида спектра исследуемых генераторных модулей состоят в асимметрии спектров в окрестности гармоник частоты модуляции в случае нестабилизированного генераторного модуля, у которого уровень сопутствующей ЧМ излучения значительно больше, чем у стабилизированного модуля (см. рис. 4.4, б).

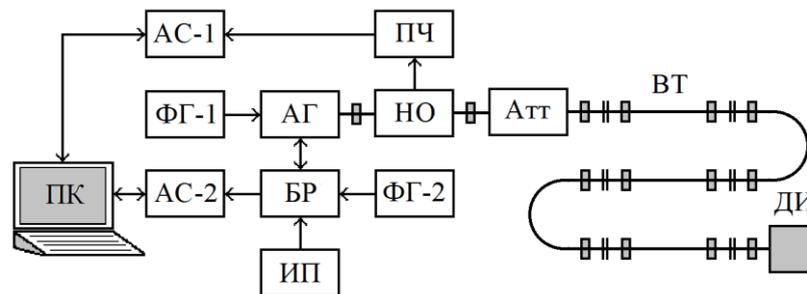
Из сравнения рассчитанных выше спектральных диаграмм, представленных на рис. 3.7, и 3.8 под литерой *в*, и экспериментальных спектров, приведенных на рис. 4.4, видно их качественное соответствие. Таким образом, полученные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной математической модели в отношении влияния на формирование сигналов АД с АМ сопутствующей ЧМ.

4.3. Результаты исследования сигнальных характеристик автодинов с ЧМ при наличии сопутствующей АМ

Для экспериментальных исследований использовался генераторный модуль «Тигель-08М» 8-мм диапазона (см. рис. 4.1, *а*), изготовленный по гибридно-интегральной технологии на основе двухмезового диода Ганна [125]. На подложке этого модуля в щелевой резонатор параллельно (по СВЧ) установлены чипы планарного диода Ганна и варикапа, развязанные по цепям смещения (показаны на рис. 4.1, *б* цифрами «1» и «2» соответственно). Варикап в данном случае (вместо детекторного диода с барьером Шоттки) предназначен для управления частотой генерации модуля. Выделение автодинного сигнала

производилось в цепи смещения диода Ганна с помощью специальной схемы блока регистрации, преобразующего изменения среднего значения тока в напряжение [101]. Напряжение смещения на диоде Ганна было выбрано $U_0 = 3,9\text{ В}$, ток потребления составлял $0,2\text{ А}$. Частота генерации модуля $37,5\text{ ГГц}$, его выходная мощность 15 мВт .

Функциональная схема экспериментальной установки, представленная на рис. 4.5, несколько отличается от схемы стенда, приведенного на рис. 4.2. Поэтому дадим ее краткое описание.



Расшифровка аббревиатур

АГ	Автодинный генератор	ПК	Персональный компьютер
Атт	Аттенюатор	ИП	Источник питания
НО	Направленный ответвитель	БР	Блок регистрации
ДИ	Доплеровский имитатор	АС-1	Анализатор спектра-1
ПЧ	Переносчик частоты	АС-2	Анализатор спектра -2
ФГ-1,2	Функциональный генератор	ВТ	Волноводный тракт

Рисунок 4.5. Функциональная схема экспериментальной установки

Исследуемый автодинный генератор (см. рис. 4.5) АГ связан с доплеровским имитатором ДИ волноводным трактом ВТ, в котором находятся также направленный ответвитель НО и переменный аттенюатор Атт. Волноводный тракт ВТ требуемой протяженности, как обычно [125], предназначен для моделирования запаздывания отраженного излучения, а аттенюатор Атт – затухания распространяющегося в пространстве до объекта локации и обратно излучения. Боковое плечо направленного ответвителя НО подключено к входу переносчика частоты ПЧ, выход которого соединен с входом первого анализатора спектра АС-1.

Напряжение от источника питания ИП на исследуемый генератор АГ поступает через блок регистрации БР. Синусоидальное напряжение частотой 10 МГц по первому варианту модуляции частоты генерации автодинного генератора АГ поступает от функционального генератора ФГ-1 на варикап АГ. По второму варианту этот же функциональный генератор, указанный как ФГ-2, подключается к блоку регистрации БР для модуляции частоты автодинного генератора АГ по цепи питания. Выходной сигнал этого блока подается на вход второго анализатора спектра АС-2. Оба анализатора спектра типа USB-SA44B связаны с персональным компьютером ПК через USB-кабели.

В экспериментах были реализованы следующие условия: длина волноводного тракта ВТ сечением $7,2 \times 3,4$ мм² между генератором АГ и имитатором ДИ (см. рис. 4.5) равнялась $l_{\text{в}} = 9,6$ м, т.е. время запаздывания отраженного излучения в волноводе составляло $\tau = 75 \times 10^{-9}$ с. Данное расстояние примерно соответствует при выбранной частоте модуляции 10 МГц середине ХАС, где $r_{\text{нр}} = 0,5$. Переменным аттенуатором АтТ в тракте в зависимости от условий эксперимента устанавливалась величина коэффициента отражения Γ_0 , при которой автодинная девиация частоты составляла $\Delta\omega_{\text{а}} = 2\pi \times 0,84 \times 10^6$, $\Delta\omega_{\text{а}} = 2\pi \times 0,42 \times 10^6$ или $\Delta\omega_{\text{а}} = 2\pi \times 0,05 \times 10^6$, что соответствует расчетным значениям параметра обратной связи $C_{\text{ос}} = 0,4$, $C_{\text{ос}} = 0,2$ или $C_{\text{ос}} = 0,02$. Величина девиации частоты $\Delta\omega_{\text{а}}$ оценивалась с помощью анализатора спектра АС-1 при работающем имитаторе ДИ по ширине спектра СВЧ излучения генератора АГ в режиме без модуляции.

На рис. 4.6 – 4.8 представлены графики относительных уровней сигнала на нулевой J_0 , первой J_1 , второй J_2 и третьей J_3 гармониках модуляции в зависимости от величины индекса модуляции $k_{\text{чМ}}$, полученные при различных условиях экспериментов. Величина этого индекса изменялась от значения $k_{\text{чМ}} = 0,2$ до $k_{\text{чМ}} = 4$ с шагом 0,2. Кривые 1 на рис. 4.6 получены для случая модуляции частоты генерации с помощью варикапа, при этом ПАМ излучения

практически отсутствует ($m_{AM} = 0$). Кривые 2 на этом же рисунке получены для случая модуляции по цепи питания, при этом коэффициент $m_{AM} = 0,46$.

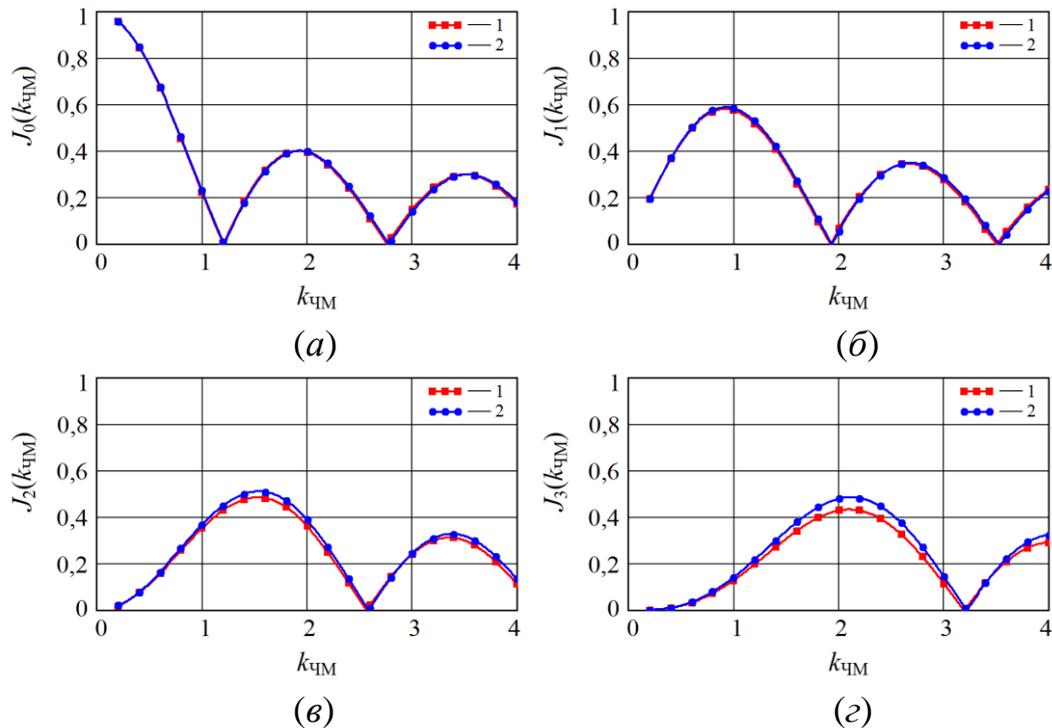


Рисунок 4.6. Экспериментальные графики зависимостей относительной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{чм}$, полученные при $l_B = 9,6$, $C_{OC} = 0,02$ и различных значениях m_{AM} : $m_{AM} = 0$ (кривые 1), $m_{AM} = 0,46$ (кривые 2).

На рис. 4.7 представлены графики относительных уровней сигнала на гармониках при модуляции частоты генерации с помощью варикапа ($m_{AM} = 0$) для различных значений C_{OC} : $C_{OC} = 0,02$ (кривые 1), $C_{OC} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{OC} = 0,2$ (кривая 3). Аналогичные графики представлены на рис. 4.8, но при модуляции СВЧ излучения модуля «Тигель-08М» по цепи питания, когда имеет место ПАМ ($m_{AM} = 0,46$).

Графики зависимостей относительных амплитуд сигнала на указанных выше гармониках модуляции от длины волноводного тракта l_B представлены на рис. 4.9. Длина волноводного тракта изменялась от 0,4 до 9,6 м с шагом 0,4 м. Графики получены при величине индекса модуляции $k_{чм} = 4$ для различных значений C_{OC} : $C_{OC} = 0,02$ (кривые 1) и $C_{OC} = 0,4$ (кривые 2).

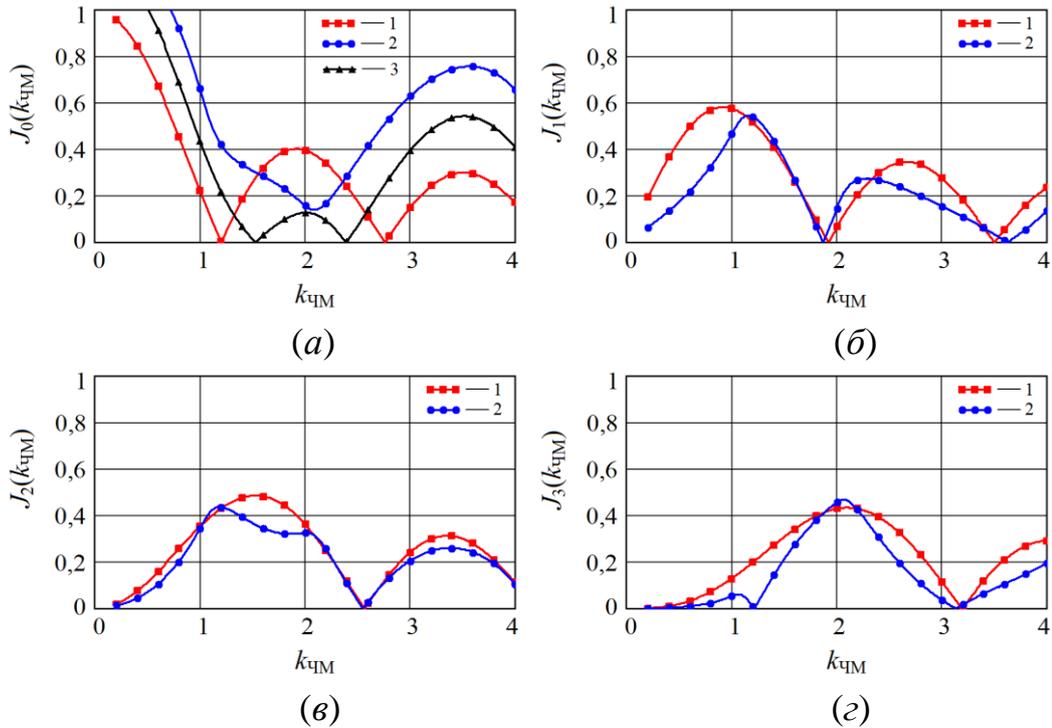


Рисунок 4.7. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\text{чМ}}$, полученные при $l_{\text{в}} = 9,6$, $m_{\text{АМ}} = 0$ и различных значениях $C_{\text{ос}}$: $C_{\text{ос}} = 0,02$ (кривые 1), $C_{\text{ос}} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{\text{ос}} = 0,2$ (кривая 3).

На рис. 4.10, а представлен спектр СВЧ колебаний модуля «Тигель-08М», полученный с помощью анализатора спектра АС-1 при гармонической модуляции напряжения смещения на варикапе. Величина индекса $k_{\text{чМ}} = 4$, частота модуляции 10 МГц. Спектр СВЧ колебаний этого же модуля при модуляции напряжения питания диода Ганна при прежних значениях индекса и частоты модуляции представлен на рис. 4.10, б. Асимметрия спектра в последнем случае указывает на наличие сопутствующей АМ с величиной коэффициента $m_{\text{АМ}}$ около 0,46.

При указанных здесь условиях эксперимента с помощью анализатора спектра АС-2 (см. рис. 4.5) нами были получены спектры автодинных сигналов на выходе блока регистрации БР для случаев модуляции модуля «Тигель-08М» по изменению напряжения смещения на варикапе и на диоде Ганна, представленные на рис. 4.11, а и б соответственно. При этом скорость движения отражателя имитатора ДИ поддерживалась постоянной, при которой частота автодинного

сигнала составляла 10 кГц. На спектрах представлены области нулевой и первых трех гармоник частоты модуляции.

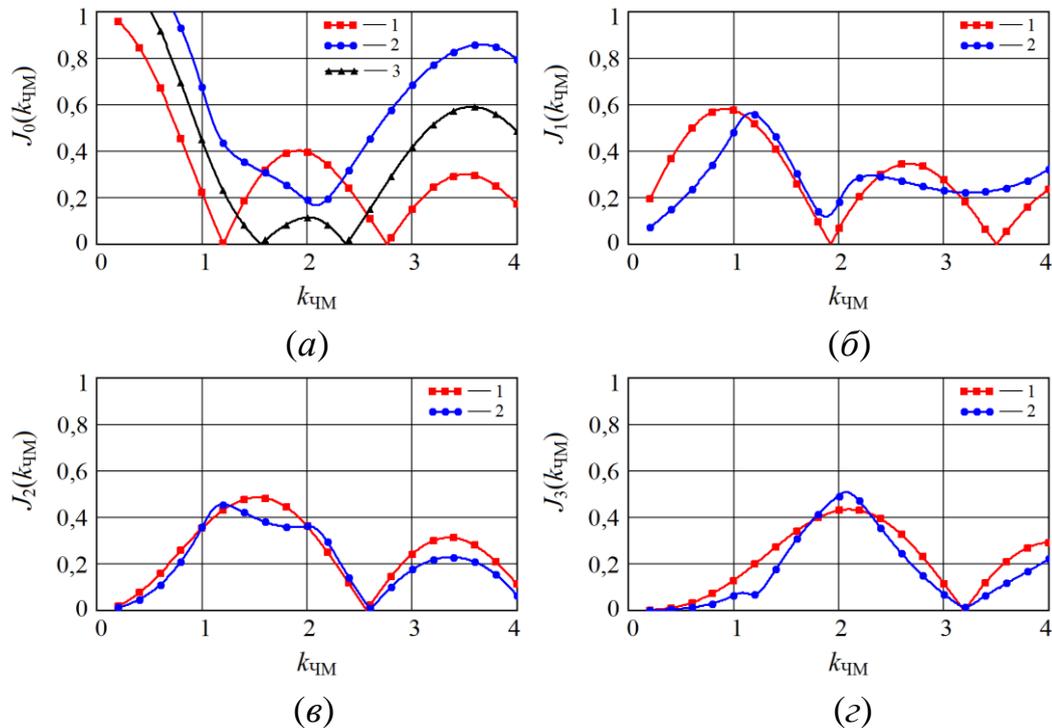


Рисунок 4.8. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\text{чМ}}$, полученные при $l_{\text{в}} = 9,6$, $m_{\text{AM}} = 0,46$ и различных значениях C_{oc} : $C_{\text{oc}} = 0,02$ (кривые 1), $C_{\text{oc}} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{\text{oc}} = 0,2$ (кривая 3).

Из спектров рис. 4.11 видно, что уровень первой гармоники ПАМ значительно превышает уровень гармоник более высокого порядка. Существенные отличия вида спектра исследуемых способов модуляции генераторных модулей состоит в асимметрии спектров в окрестности гармоник частоты модуляции в случае модуляции генераторного модуля по цепи питания, у которого уровень сопутствующей АМ излучения значительно больше, чем в случае модуляции по изменению смещения на варикапе (см. рис. 4.11, б).

Наличие высших гармоник частоты Доплера в указанных областях спектра на рис. 4.11 обусловлено ангармоническими искажениями сигналов. Эти искажения, как известно [108], наблюдаются в условиях, когда величина параметра обратной связи C_{oc} соизмерима с единицей. В случае уменьшения величины этого параметра, например, увеличением затухания аттенюатора АтТ на

10...20 дБ, высшие гармоники частоты Доплера практически исчезают, и автодинный сигнал при этом становится практически синусоидальным. Из сравнения рассчитанных выше спектральных диаграмм, представленных на рис. 3.12 и 3.13, и экспериментальных спектров, приведенных на рис. 4.11 видно их качественное соответствие.

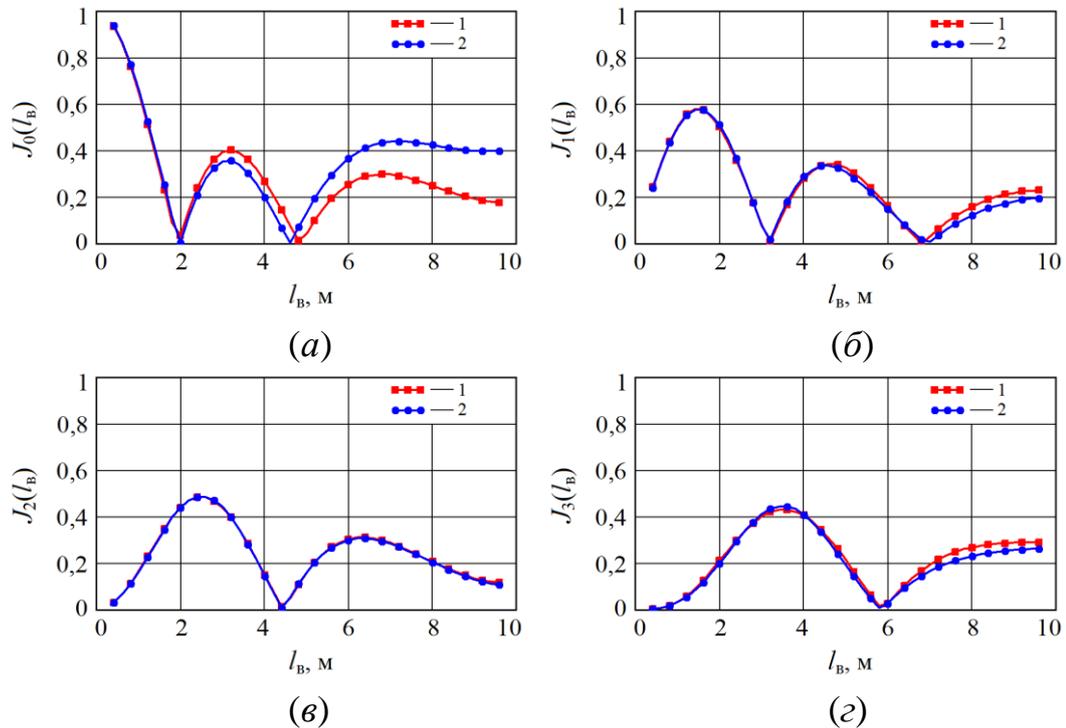


Рисунок 4.9. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от длины волноводного тракта l_B , полученные при $k_{\text{ЧМ}} = 4$ и различных значениях C_{OC} : $C_{\text{OC}} = 0,02$ (кривые 1) и $C_{\text{OC}} = 0,4$ (кривые 2).

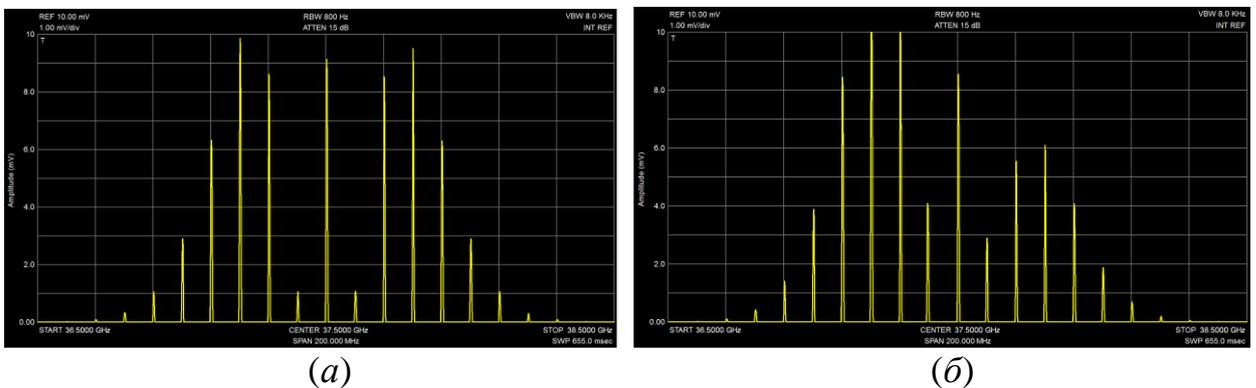


Рисунок 4.10. Спектры колебаний на выходе СВЧ модуля «Тигель-08М», полученные при модуляции напряжения смещения на варикапе (а) и смещения на диоде Ганна (б).

Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 4.6, а – г видно, что полученные зависимости уровня автодинного сигнала для случаев модуляции частоты

генерации с помощью варикапа и по цепи питания практически не отличаются между собой. Эти графики полностью соответствуют рассчитанным выше графикам сечения ХАС вдоль оси индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ на различных гармониках модуляции (см. рис. 3.11, *а*), полученным для гипотетического случая отсутствия ПАМ. Отличия «теоретических» кривых рис. 3.11, *б* и экспериментальных, представленных кривыми 2 на рис. 4.6, объясняются тем, что в реальном генераторе связь между уровнем ПАМ и амплитудой модулирующей функции прямая. Этот фактор не учитывался в исходных данных при расчетах и построении кривых рис. 3.11, *б*. Аналогично объясняются причины отличий в поведении графиков рис. 3.11, *з* и рис. 4.7 и 4.8, полученных для случаев, когда параметр $C_{\text{OC}} \neq 0$.

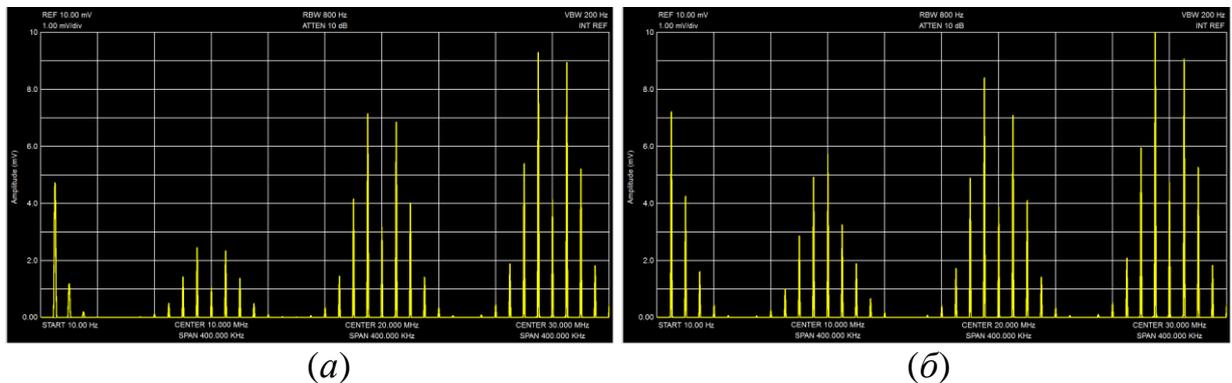


Рисунок 4.11. Спектры автодинного сигнала на выходе блока регистрации БР, полученные для случаев модуляции модуля «Тигель-08М» по изменению напряжения смещения на варикапе (*а*) и смещения на диоде Ганна (*б*).

Еще одно отличие результатов численного моделирования и экспериментальных данных видно из поведения графиков сечения ХАС вдоль оси нормированного расстояния $r_{\text{нр}}$ до цели, представленных на рис. 3.10, *а – з* (см. строка 4) и графиков рис. 4.9, полученных при изменении длины $l_{\text{в}}$ волноводного тракта. Это отличие также объясняется прямой пропорциональностью, но в данном случае зависимости величины параметра обратной связи C_{OC} от расстояния до цели, что следует из смысла расшифровок к выражениям (2.27) – (2.29). В целом, с учетом сделанных замечаний, экспериментальные графики качественно подтвердили результаты расчетов основных характеристик АД с АЧМ при гармоническом законе модуляции.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной математической модели автодинов в отношении влияния на формирование сигналов АД с ЧМ сопутствующей ПАМ.

4.4. Результаты исследования шумовых характеристик автодинов с ЧМ

Экспериментальные исследования особенностей сигнальных и шумовых характеристик автодинов с ЧМ проводились с генераторным модулем 8-мм диапазона в составе автодинной СБРЛ, предназначенной для контроля занятости стрелочных переводов на сортировочных горках [17]. Автодинный генератор выполнен на основе диода Ганна типа АА727А и варикапа 3А637А-6 в корпусном исполнении. Выходная мощность излучения 25 мВт, центральная частота 36,5 ГГц, частота модуляции 10 кГц. Генератор обеспечивал перестройку частоты по несимметричному пилообразному закону с девиацией 500 МГц.

Структурная схема СБРЛ с ЧМ приведена на рис. 4.12. Штатная рупорно-линзовая антенна СБРЛ была заменена на двухзеркальную антенну с эллиптическим малым зеркалом (антенна типа АДЭ), имеющую ширину диаграммы направленности $1,4 \times 1,4$ градуса и коэффициент усиления около 42 дБ. Антенна стыковалась через переменный аттенюатор с автодинным модулем. Для регистрации сигнала в цепи питания АД использовался датчик тока в виде широкополосного трансформатора.

Для формирования напряжения ЧМ и обработки сигналов в СБРЛ использовался цифровой сигнальный процессор (ЦСП) TMS320F2808 фирмы Texas Instrument. В составе этого процессора использовались следующие блоки: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) сигнала; приемо-передатчик шины SPI, управляющий работой цифро-аналогового преобразователя (ЦАП); универсальный асинхронный приемо-передатчик (УАПП) шины SCI, который осуществлял обмен информацией с блоком индикации и управления; высокоскоростное вычислительное ядро, выполняющее все функции цифровой

обработки сигнала (спектральный анализ, цифровую фильтрацию сигнала, анализ сигнала и формирование данных для индикации). Блок ЦАП предназначен для формирования пилообразного закона модулирующего напряжения, подаваемого на варикап автодинного модуля через усилитель.

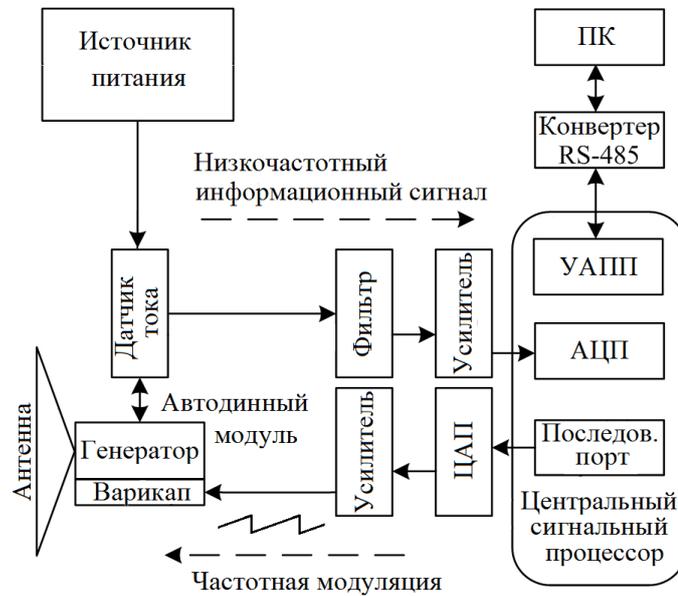


Рисунок 4.12. Функциональная схема автодинной СБРЛ с ЧМ.

Формируемый в автодинном модуле радиосигнал, имеющий одновременно паразитную амплитудную модуляцию и полезную ЧМ, излучается антенной. Излучение, отраженное от объекта локации, попадает обратно в приемопередающий модуль и вызывает в нём автодинный эффект – изменения амплитуды и частоты колебаний, а также среднего значения тока диода Ганна. Изменения тока с помощью широкополосного датчика тока преобразуются в напряжение выходного сигнала.

Вычислительным ядром ЦСП производилась цифровая обработка полученного сигнала (фильтрация и Фурье-анализ), результаты которой передавались через УАПЧ на персональный компьютер ПК, используемый в качестве системы отображения радиолокационной информации с помощью виртуальных приборов, создаваемых в среде LabVIEW 8.6. Когда в диаграмме направленности антенны СБРЛ находится отражающий объект, на выходе одного из фильтров анализатора спектра ЦСП присутствует сигнал. Амплитуда его

характеризует отражающую способность наблюдаемого объекта, а номер фильтра, в котором присутствует сигнал, характеризует расстояние от СБРЛ до объекта локации.

Для исключения из спектра принятого сигнала компонентов, связанных с паразитным откликом генератора на модуляцию и отражением от ближних объектов, информация от которых не представляет интереса, перед преобразованием Фурье в ЦСП применяется предварительная фильтрация сигнала. Для этого к исходному сигналу применяется алгоритм «скользящее среднее», который выступает в качестве фильтра нижних частот. После выделения низкочастотных составляющих этим фильтром они вычитаются из исходного сигнала, в результате чего вблизи СБРЛ до расстояния порядка одного метра формируется «мёртвая зона». Оставшиеся на выходе фильтра высокочастотные составляющие сигнала, соответствующие «зоне селекции цели» содержат информацию об отражающих объектах, находящихся в требуемом диапазоне дальностей. Соответствующая доработка программы работы ЦСП позволила отдельно от сигнала выделить высокочастотные составляющие выходного шума автодинного генератора.

На рис. 4.13 представлены осциллограммы, на которых верхний след показывает форму выходного сигнала СБРЛ, а нижний – высокочастотного шума при установке в поле излучения антенны уголкового отражателя на различных расстояниях: 10 м (*a*), 30 м (*б*), 50 м (*в*) и 60 м (*г*). Частота преобразованного сигнала составляла около 640 кГц (*a*), 2,0 МГц (*б*), 3,5 МГц (*в*) и 4,0 МГц (*г*) соответственно, при этом расчетные значения нормированных расстояний получены следующие $r_{\text{н}}$: $r_{\text{н}} = 0,04$ (*a*), $r_{\text{н}} = 0,40$ (*б*), $r_{\text{н}} = 1,16$ (*в*) и $r_{\text{н}} = 1,60$ (*г*). Сигналы и шумы регистрировались в средней части периода модулирующей функции. Уровень сигнала на различных расстояниях выравнивался выбором уголкового отражателя с подходящей эффективной площадью рассеяния и величины затухания аттенюатора, установленного между антенной и автодинным модулем. Во всех случаях обеспечивалась величина параметра внешней обратной

связи C_{oc} около 0,8.

В первых двух случаях (см. рис. 4.13, *a* и *б*) на осциллограммах сигнала видны характерные ангармонические искажения сигнала, причем характер этих искажений (наклон «волн») разный. В двух следующих случаях (см. рис. 4.13, *в* и *г*) мы видим, что при увеличении расстояния до объекта локации и сохранении прежним уровня отраженного излучения сигналы на выходе автодина имеют практически гармонический вид. Хотя нестационарность среднеквадратического уровня шума с увеличением расстояния до отражателя сохраняется, однако ее характер заметно изменяется. Если в первом случае (см. рис. 4.13, *a*) наблюдается формирование периодических шумовых «пиков», то в остальных случаях неравномерности шума выглядят сглаженными. При уменьшении уровня отраженного излучения и, соответственно, величины параметра внешней обратной связи C_{oc} , путем введения дополнительного затухания аттенюатора порядка 10 дБ во всех случаях отмечалось формирование гармонических сигналов и исключение нестационарности уровня шума.

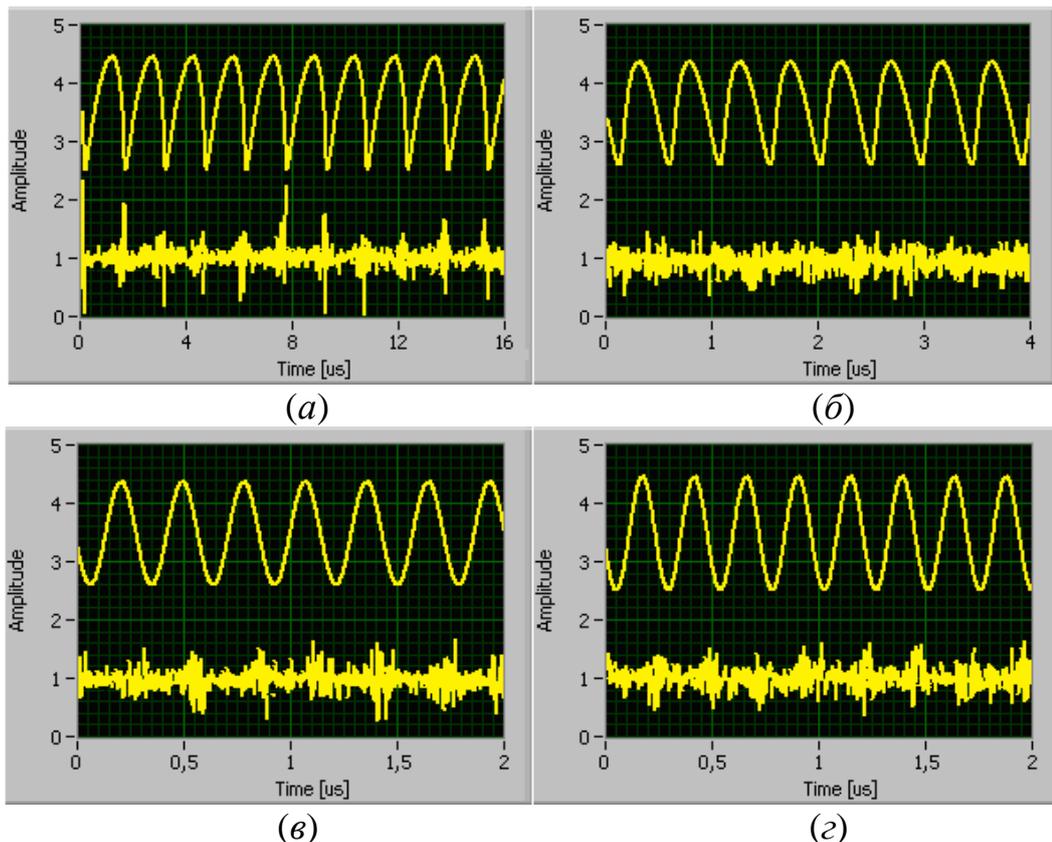


Рисунок 4.13. Осциллограммы сигналов (верхний след) и шумовых дорожек (нижний след) автодинной СБРЛ с ЧМ.

Из сравнения полученных осциллограмм рис. 4.13 и временных диаграмм, представленных на рис. 3.14 и 3.17 видно их качественное соответствие. Отсюда следует, что полученные экспериментальные данные подтвердили адекватность разработанной выше математической модели для анализа и расчёта сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ при произвольном соотношении времени запаздывания и периода автодинного сигнала. Дополнительным подтверждением валидности разработанной модели автодина с ЧМ является успешное функционирование ряда радиолокационных датчиков и измерителей для автоматизации процессов на железнодорожном транспорте, созданных на базе СВЧ генераторов на диодах Ганна 8-мм диапазона [17].

4.5. Выводы

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

В качестве объектов исследований при изучении сигнальных характеристик АД с АМ и ЧМ использовались гибридно-интегральные стабилизированные по частоте внешним высокодобротным резонатором и без мер стабилизации частоты модули «Тигель-08М», а при изучении сигнальных и шумовых характеристик – обычная объемно-волноводная генераторная камера на диодах Ганна в составе автодинной СБРЛ с ЧМ. Основная часть исследований взаимного влияния АМ и ЧМ на сигнальные характеристики автодинных СБРЛ выполнялась на лабораторном стенде, в котором пространство взаимодействия автодинного генератора и объекта локации моделировалось волноводной линией требуемой протяженности, а затухание излучения – переменным аттенуатором.

Исследования сигнальных и шумовых характеристик в зависимости от расстояния до объекта локации выполнялись на примере действующей СБРЛ с ЧМ в открытом пространстве.

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

Попутно экспериментально установлено, что по сравнению с обычными одноконтурными АД, у которых отсутствует стабилизация частоты, стабилизированные автодинные генераторы обеспечивают значительное уменьшение сопутствующей девиации частоты и, соответственно, степени искажения сигналов. Эти результаты, дополняющие и развивающие предшествующие исследования АД в данном направлении [125], показали преимущества АД со стабилизацией частоты перед обычными (нестабилизированными) АД.

ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Введение

В настоящей главе описаны примеры, в которых использованы результаты выполненных выше диссертационных исследований и при этом также получены новые научные и практические результаты. В разделе 5.2 на основе разработанной выше математической модели выполнены исследования режима биений на предмет его использования для определения динамических параметров генераторов. Варианты решения проблемы использования СБРЛ в системе путевой навигации, измерения скорости по геометрии железнодорожного пути и обзора передней полусферы локомотива представлены в разделе 5.3. Вопрос борьбы с просачиванием паразитных сигналов между антеннами в СБРЛ с ЧМ рассмотрен в разделе 5.4. Выводы по главе приведены в разделе 5.5.

Основные результаты данных исследований опубликованы в журнальных статьях [11, 126, 127], изложены в материалах научно-технических конференций [128–135] и описаниях к патентам на изобретения [136, 137], а также представлены в двух отчётах о НИР.

5.2. Определение параметров быстродействия автодинов методом биений

Полученные в главах 2 – 4 результаты исследований сигнальных и шумовых характеристик не учитывают внутреннюю инерционность АД. Важность этого учета возникает в случае, например, применения АД в качестве радиоволновых датчиков быстропротекающих процессов [75–78]. Очевидно, что если эта инерционность достаточно велика по сравнению со скоростью изменения параметров генератора, то процессы его модуляции и регистрации автодинных сигналов могут быть искаженными. Поэтому при выборе типа генератора в качестве быстродействующего автодина и поиске оптимального режима его работы необходимы знания о динамических параметрах АГ [80, 81].

Здесь рассмотрим так называемый «метод биений», который применяется для экспериментального определения чувствительности АД [83, 138]. Он основан на замене отраженного от цели сигнала сигналом от дополнительного генератора, частота которого находится за пределами полосы синхронизации АД. Принцип действия этого метода лежит в основе функционирования широко известных автодинных преобразователей частоты [92–94]. По амплитуде выходного сигнала биений в условиях производства судят о пригодности того или иного АГ в качестве датчика близости. Однако применительно к исследованиям динамических свойств радиолокационных АД обоснование этого метода в известной нам литературе отсутствует.

Для получения основных выражений для анализа АГ в режиме биений в выражениях (2.16), (2.17) выполним замены $\Gamma(t, \tau) \rightarrow k_{\text{вн}}$ и $\delta(t, \tau) \rightarrow \varphi$ и положим $a_c(t) = a_s(t) = 0$. Тогда система уравнений для относительных изменений амплитуды $a = \Delta A / A_0$ и абсолютных изменений фазы φ колебаний АГ примет вид:

$$\frac{da}{dt} + \frac{a}{\tau_a} = k_{\text{вн}} \frac{\omega_0}{Q_{\text{вн}}} \cos \varphi, \quad (5.1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} + \beta \frac{\omega_0}{Q_{\text{н}}} a + \Delta_{\text{н}} = -k_{\text{вн}} \frac{\omega_0}{Q_{\text{вн}}} \sin \varphi, \quad (5.2)$$

Поведение входящей в выражения (5.1), (5.2) фазы φ зависит от соотношения величины начальной расстройки $\Delta_{\text{н}} = \omega_{\text{вн}} - \omega_0$. Вдали от полосы захвата, фаза $\varphi(t)$ изменяется практически линейно и частота биений постоянна $\Omega_{\text{б}} \approx \omega_{\text{вн}} - \omega_0$ [111]. Тогда решение этих уравнений при $\varphi = \Omega_{\text{б}} t$ для динамических относительных изменений амплитуды $a(t)$ и частоты $\chi_{\text{нр}} = \Omega_{\text{б}} / \omega_0$ колебаний значительно облегчается и имеет вид:

$$a(t) = k_{\text{вн}} K_a k_a(\Omega_{\text{б}}) \cos [\Omega_{\text{б}} t - \psi_a(\Omega_{\text{б}})], \quad (5.3)$$

$$\chi_{\text{нр}}(t) = k_{\text{вн}} L_a l_a(\Omega_{\text{б}}) \sin [\Omega_{\text{б}} t + \theta(\Omega_{\text{б}})], \quad (5.4)$$

где K_a , L_a – коэффициенты усиления и девиации частоты генерации в режиме биений:

$$K_a = \eta(1 + \rho^2)^{1/2} / \alpha(1 - \gamma\rho), \quad (5.5)$$

$$L_a = (1 + \gamma^2)^{1/2} / Q_{\text{вн}}(1 - \gamma\rho), \quad (5.6)$$

$\psi_a = \arctg \rho$, $\theta = \arctg \gamma$ – углы фазового смещения изменений амплитуды и частоты колебаний сигнала биений.

В (5.4) произведение $k_{\text{вн}} L_a = \Delta\omega_{\text{син}} / \omega_0 = (\omega_{\text{вн}} - \omega_0) / \omega_0 = \chi_c$ определяет величину относительных максимальных отклонений мгновенной частоты $\omega = d\Psi / dt$ возмущенного генератора от частоты автономных колебаний ω_0 под воздействием внешнего сигнала; $k_a(\Omega_6)$, $l_a(\Omega_6)$ – нормированные коэффициенты частотной зависимости коэффициента автодинного усиления и девиации частоты генерации соответственно:

$$k_a(\Omega_6) = \sqrt{\frac{(1 - \rho \Omega_6^{\text{H}})^2 + (\rho + \Omega_6^{\text{H}})^2}{(1 + \rho^2)[1 + (\Omega_6^{\text{H}})^2]^2}}, \quad (5.7)$$

$$l_a(\Omega_6) = \frac{1 + \gamma \Omega_6^{\text{H}} + (1 - \gamma\rho)(\Omega_6^{\text{H}})^2}{\sqrt{(1 + \gamma^2)[1 + (\Omega_6^{\text{H}})^2]} \cos \theta(\Omega_6^{\text{H}})}, \quad (5.8)$$

$\psi_a(\Omega_6)$, $\theta(\Omega_6)$ – углы относительных фазовых смещений автодинных изменений амплитуды колебаний и частоты биений соответственно:

$$\psi_a(\Omega_6) = \arctg \frac{\rho + \Omega_6^{\text{H}}}{1 - \rho \Omega_6^{\text{H}}}, \quad (5.9)$$

$$\theta(\Omega_6) = \arctg \frac{\gamma(1 - \rho \Omega_6^{\text{H}})}{1 + \gamma \Omega_6^{\text{H}} + (1 - \gamma\rho)(\Omega_6^{\text{H}})^2}, \quad (5.10)$$

$\Omega_6^{\text{H}} = \Omega_6 \tau_a$ – нормированная частота биений; τ_a – характеристическая постоянная времени (время релаксации) автодинного отклика:

$$\tau_a = \frac{Q_{\text{н}}}{\alpha \omega_0 (1 - \gamma\rho)}. \quad (5.11)$$

Из сравнения полученных здесь выражений (5.3) – (5.11) для АД в режиме преобразования частоты с соответствующими выражениями (2.27) – (2.36),

полученными для случая радиолокационного АД в работе [81], видно их формально полное совпадение. Однако физические явления, лежащие в основе их работы, разные. Отличие этих явлений состоит в том, что в первом случае частота выходного сигнала АД, определяемая в соответствии с эффектом Доплера относительной скоростью движения радара и объекта, может изменяться от нуля (объект неподвижен) до максимальной граничной частоты $\Omega_{гр}$ [81, 83]. Тогда как в случае автодинного преобразователя частота биений снизу ограничена величиной полосы синхронизации $\Delta\omega_{син}$, которая определяется, как следует из (5.4), величиной автодинной девиации частоты: $\Delta\omega_{син} = k_{вн} L_a l_a (\Omega_6) \omega_0$. Наличие одновременно амплитудной (5.3) и частотной (5.4) модуляции колебаний генератора, безусловно, усложняет форму выходного сигнала [111]. Однако характер этих искажений принципиально иной и не связан с явлением запаздывания отражённого излучения, как у радиолокационных АД [112].

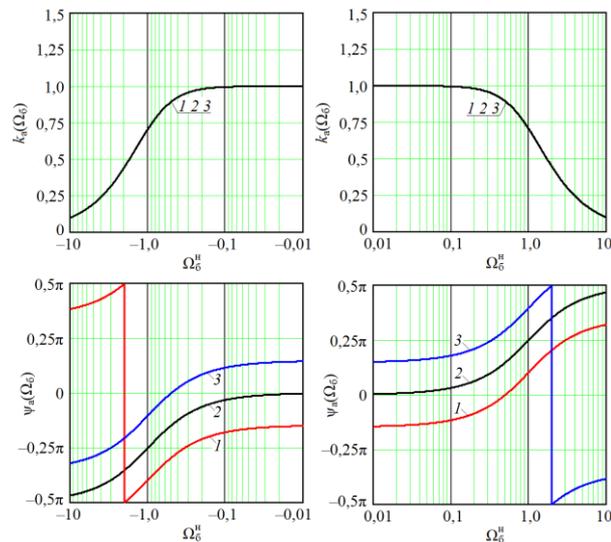


Рисунок 5.1. Графики частотных зависимостей коэффициентов автодинного усиления $k_a(\Omega_6)$ и угла фазового смещения $\psi_a(\Omega_6)$, рассчитанные при $\gamma = 1, 2$ и различных значениях коэффициента ρ : $\rho = -0,5$ (кривые 1); $\rho = 0$ (кривые 2); $\rho = 0,5$ (кривые 3).

Поскольку выражения (5.7) – (5.11) являются достаточно сложными, то их анализ выполним с привлечением численных методов. На рис. 5.1, 5.2 представлены результаты расчетов полулогарифмических частотных зависимостей как для отрицательных (слева), так и положительных (справа)

значений частоты Ω_{σ}^H , выполненных при различных величинах коэффициентов γ и ρ .

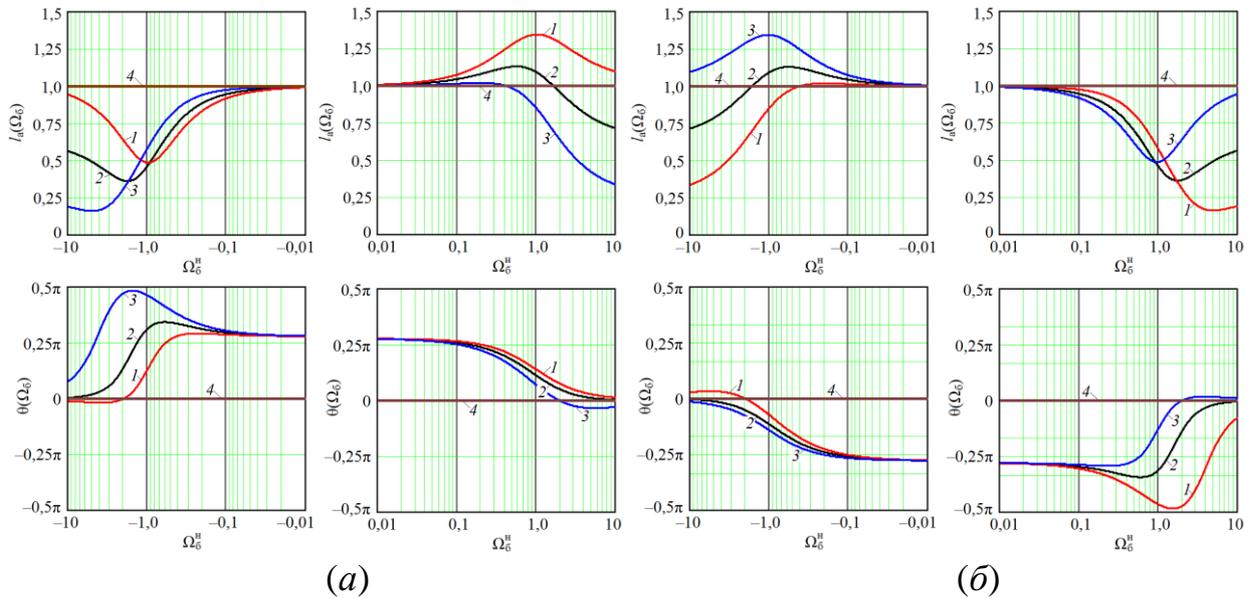


Рисунок 5.2. Графики частотных зависимостей нормированных коэффициентов девиации частоты $l_a(\Omega_{\sigma})$ и углов фазового смещения $\theta(\Omega_{\sigma})$, рассчитанные при $\gamma = 1,2$ (а) и $\gamma = -1,2$ (б) и различных значениях коэффициента неизодромности ρ : $\rho = -0,5$ (кривые 1); $\rho = 0$ (кривые 2); $\rho = 0,5$ (кривые 3). При этом кривые 4 получены при $\gamma = 0$.

Из графиков рис. 5.1 видно, что частотная зависимость нормированного коэффициента автодинного усиления $k_a(\Omega_{\sigma})$, обусловленного инерционностью изменений амплитуды колебаний, является симметричной функцией относительно $\Omega_{\sigma} = 0$. Вид ее напоминает амплитудно-частотную характеристику колебательного контура и не зависит от величин коэффициентов γ и ρ . При этом угол фазового смещения характеристики $\psi_a(\Omega_{\sigma})$ определяется только неизодромностью генератора ($\rho \neq 0$), вызывающей её смещение по оси ординат. Зависимость $k_a(\Omega_{\sigma})$ от величин коэффициентов γ и ρ прослеживается в абсолютных значениях частоты автодинного отклика Ω_{σ} . Так, из анализа выражения (5.7) следует, что если период $2\pi/\Omega_{\sigma} < \tau_a$, то величина амплитуды автодинного сигнала $a(t)$ резко уменьшается, поскольку АД не успевает реагировать на быстрое изменение фазы φ . Из (5.7) при условии $k_a(\Omega_{\sigma}) = 1/2^{1/2}$ находим граничное значение частоты автодинного сигнала

$$\Omega_{\text{гр}} = \frac{1}{\tau_a} = \frac{\alpha\omega_0(1-\gamma\rho)}{Q_n} = \frac{\omega_0\sqrt{1+\rho^2}}{K_a Q_{\text{вн}}}. \quad (5.12)$$

Выражение (5.12) полностью совпадает с выражением, полученным для граничной частоты доплеровского сигнала радиолокационного АД (см. (1.14), [81]).

В отличие от частотной зависимости $k_a(\Omega_{\sigma})$, зависимость $l_a(\Omega_{\sigma})$ (см. рис. 5.2) при условии $\gamma \neq 0$ не является симметричной функцией относительно $\Omega_{\sigma} = 0$, а имеет в окрестности нуля дисперсионную форму. Вид этой гипотетической функции в значительной степени определяется величиной и знаком коэффициентов неизохронности γ и неизодромности ρ . При смене знака при коэффициенте γ , как видно из сравнения соответствующих кривых рис. 5.2, *a* и *б*, кривые $l_a(\Omega_{\sigma})$ на графиках в окрестности значений $\Omega_{\sigma} = 0$ также меняют знак производной. При этом кривые $\theta(\Omega_{\sigma})$ поворачиваются на угол примерно π относительно начала координат, как точки центральной симметрии. Крутизна S_{Ω} дисперсионной зависимости $l_a(\Omega_{\sigma})$ в окрестности частоты $\Omega_{\sigma} = 0$

$$S_{\Omega=0} = \left(\frac{dl_a(\Omega_{\sigma})}{d\Omega_{\sigma}^H} \right)_{\Omega=0} = \frac{\gamma(1-\gamma\rho)}{1+\gamma^2} \quad (5.13)$$

имеет наибольшее значение при $\gamma = \pm 1$, как показано также в работе [80] для случая радиолокационного АД. При этом, как видно из (5.13), неизодромность генератора увеличивает крутизну $S_{\Omega=0}$ при условии, если знаки при коэффициентах γ и ρ различные. При других значениях коэффициента γ эффект частотной дисперсии проявляется в меньшей степени и в случае изохронного генератора ($\gamma = 0$) он полностью отсутствует (см. графики рис. 5.2), а при этом фазовый сдвиг $\theta(\Omega_{\sigma}) = 0$.

Таким образом, на величину автодинной девиации частоты оказывают влияние два основных фактора. Первый и определяющий связан с изменениями частоты генерации непосредственно от воздействия внешнего сигнала. Второй обусловлен преобразованием автодинных изменений амплитуды $a(t)$ в изменения

частоты колебаний вследствие неизохронности генератора. В случае синфазного сложения этих факторов при увеличении частоты Ω_6^H одного знака автодинная девиация возрастает; в противном случае противофазного сложения при увеличении частоты Ω_6^H другого знака она уменьшается. В этом состоит физический смысл явления частотной дисперсии автодинной девиации частоты [81]. В рассматриваемом случае неизодромного генератора ($\rho \neq 0$) составляющая, обусловленная его неизохронностью, определяется ещё одним, дополнительным фактором. Он связан с наличием в СВЧ генераторах внутренней обратной связи через его неизохронность и неизодромность, она определяется через входящее в (5.5), (5.6) и (5.11) произведение $\gamma\rho$ как петлевое усиление [81].

Выявленные нами особенности формирования сигнала ограничивают применение метода биений. Этот метод может использоваться для измерения предельной чувствительности АД, как радиоприёмного устройства. Он позволяет определить коэффициенты автодинного усиления K_a и девиации частоты L_a . Кроме того, исходя из определения граничной частоты $\Omega_{гр}$ при снятии характеристики $k_a(\Omega_6)$, этот метод дает возможность определить постоянную времени автодинного отклика τ_a .

Экспериментальные исследования частотной зависимости коэффициента усиления методом биений выполнялись с генераторным модулем «Тигель-08», изготовленным по гибридно-интегральной технологии на планарном двухмезовом диоде Ганна 8-мм диапазона длин волн [81]. Частота генерации 37,5 ГГц, выходная мощность 15 мВт. На исследуемый модуль сигнал от измерительного генератора Г4-175 подавался через развязывающий вентиль и переменный аттенюатор ДЗ-37. Выходная мощность генератора Г4-175 составляла 1 мВт. Затухание аттенюатора устанавливалось 20 дБ во всем диапазоне отстройки частот.

Часть выходной мощности генераторного модуля «Тигель-08» отводилась через направленный ответвитель на вход анализатора спектра С4-60. С помощью анализатора спектра выполнялись измерения уровня сигнала биений по глубине

модуляции амплитуды СВЧ колебаний. Вид частотных характеристик сигнала биений, нормированных относительно их максимальных значений, представлен в виде графиков на рис. 5.3 для различных положений регулировочного винта связи с нагрузкой.

Граничная частота $\Omega_{гр} / 2\pi$ характеристики 1 (см. рис. 5.3) составила 110 МГц, для 2 – 80 МГц и 3 – 60 МГц. При этом значения постоянной времени τ_a автодинного отклика исследуемого генераторного модуля составили: для характеристики 1 – 1,4 нс, 2 – 2,0 нс и 3 – 2,6 нс. Сравнение полученных результатов расчета τ_a с представленными в [28, 29] данными показывает их близость.

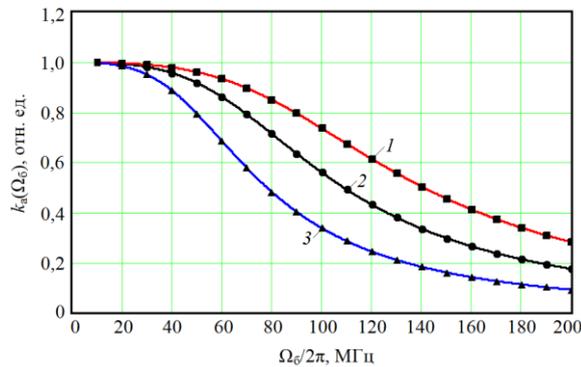


Рисунок 5.3. Графики частотной зависимости нормированного коэффициента автодинного усиления генератора на диоде Ганна 8-мм диапазона, полученные для различных положений регулировочного винта связи: полностью выведен (кривая 1), введен наполовину (кривая 2), полностью введен (кривая 3).

Значения внутренних параметров модуля «Тигель-08» следующие: $\rho = -0,187$, $\gamma = 0,92$ и $\alpha = 0,15$ [127]. Эти данные позволяют согласно (5.5), (5.6) и (5.12) рассчитать коэффициент автодинного усиления $K_a = 5,4$ и внешнюю добротность генераторного модуля. Так, для каждого случая связи модуля с нагрузкой в выбранном режиме работы имеем: для характеристики 1 – $Q_{вн} = 70$, для 2 – $Q_{вн} = 90$ и для 3 – $Q_{вн} = 130$.

Простота снятия характеристик частотной зависимости – одно из достоинств метода биений. Этот метод особенно востребован при выполнении лабораторных исследований большого числа различных генераторов с целью их отбора и оптимизации режима колебаний в качестве АД. Результаты данных

исследований использованы в учебном процессе ИРИТ-РТФ УрФУ по курсу «Применение СВЧ и КВЧ устройств в радиосистемах» для магистрантов второго курса по направлению «Радиотехника» при выполнении лабораторной работы «Определение параметров быстродействия автодинов методом биений».

5.3. Применение радиолокационных датчиков в системах измерения скорости, путевой навигации по геометрии железнодорожного пути и обзора передней полусферы локомотива

Первое изобретение [136] относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения основных кинематических параметров движения локомотива по железной дороге (ЖД), а именно, скорости, ускорения и направления движения. Также на основании измерения скорости движения выполняется счисление пройденного пути. Помимо этого, благодаря способности определять характер отражения радиоволн от подстилающей поверхности, изобретение способно классифицировать попадающие в зону облучения радиоволнами элементы верхнего строения пути, как то: межшпальный балласт, шпалы со шпальными подкладками, остряки и контррельсы, протяжённые участки загрязнения железнодорожного полотна (подтопление, обледенение и др).

Общей проблемой бесконтактного измерения кинематических параметров движения является влияние на их результаты погодных условий: дождь, снег, туман, обледенение, а также поднимающаяся при движении, особенно на больших скоростях, пыль от балласта полотна и пр. В то же время, преимуществом бесконтактного радиолокационного метода измерения скорости является независимость результатов измерений от явлений проскальзывания, пробуксовки колёсных пар и износа бандажей колёс локомотива. Перечисленные явления оказывают крайне негативное воздействие на показатели точности и надёжности работы применяемых в наше время на локомотивах одометрических измерителей скорости. Задачей изобретения является повышение точности измерения параметров движения и создание системы, не требующей установки каких-либо дополнительных опорных элементов инфраструктуры вдоль

рельсового пути или приема сигналов спутниковых навигационных систем. Технический результат достигается за счет использования СБРЛ с высокой разрешающей способностью по дальности за счет использования широкополосных зондирующих сигналов, а в качестве объекта локации и отслеживания – подкладки для крепления рельсов к шпалам.

Для решения поставленной задачи предложен способ путевой навигации и измерения линейной скорости локомотива по геометрии железнодорожного пути. Способ основан на применении радиолокационного датчика малой дальности действия. Для этого предложено использовать два идентичных устройства приёма отраженного СВЧ излучения и одно устройство передачи зондирующего СВЧ излучения (см. рис. 5.4). Устройство располагается под днищем локомотива, причём два приёмных устройства разнесены друг от друга вдоль направления движения на фиксированное расстояние, при этом передающее устройство располагается посередине между приёмными. Использование двух приёмных устройств позволяет фиксировать факт прохождения каждой отдельной шпальной подкладки методом корреляционной обработки. Зная расстояние (базу) между приёмными устройствами, можно вычислять скорости. Также можно осуществлять подсчёт пройденных железнодорожным составом шпал, начиная с момента старта, что позволяет осуществлять автономную навигацию состава в линейных железнодорожных координатах, основываясь на некоей электронной карте путей, содержащей информацию об эпюрах шпал на всех участках железнодорожного пути. Комплексование разнородных источников навигационных данных, а именно, данных от спутников ГНСС, данных о пройденном пути и скорости (корреляционный метод) и данных о пройденном пути (счёт шпал в рамках эпюры шпал), способно значительно повысить точность и надёжность работы систем управления, контроля и безопасности движения транспортных средств на железной дороге.

Сам способ заключается в непрерывном зондировании радиосигналом с ЛЧМ подстилающей поверхности пути вдоль монорельса, а также приеме отраженного СВЧ излучения и непрерывном измерении информативного

параметра. Этот параметр в принятом сигнале характеризует одно из
к внешним потребителям

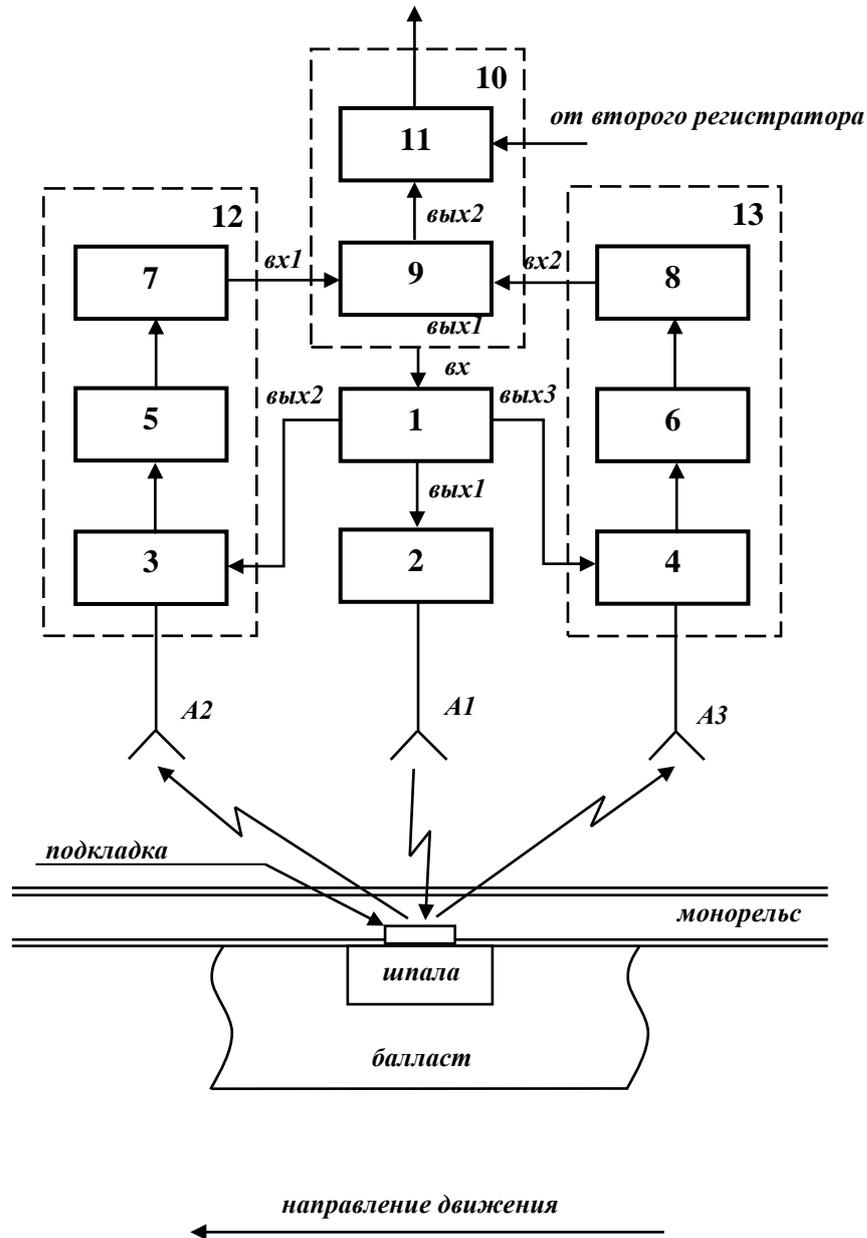


Рисунок 5.4. Блок-схема радиолокационного датчика с ЧМ непрерывного излучения радиоволн для определения параметров движения локомотива относительно ЖД полотна: 1 – СВЧ генератор; 2 – передатчик; 3 – первый приемник; 4 – второй приемник; 5, 6 – первый и второй измерители амплитуды сигнала соответственно; 7, 8 – схемы нормирования амплитуды (первая и вторая соответственно); 9 – блок вычитания; 10 – микропроцессор; 11 – арифметическо-логическое устройство; 12, 13 – первый и второй каналы регистрации соответственно; *A1* – излучающая антенна; *A2* и *A3* – принимающие антенны.

периодически изменяющего вдоль пути свойства элементов конструкции железнодорожного полотна, а именно радиояркость различных элементов верхнего строения пути. Периодическое изменение радиояркости в пределах верхнего строения пути обеспечивается облучением радиоволнами пространства вблизи подошвы рельса. В этой области вдоль направления движения состава периодически чередуются шпалы, несущие на себе металлические пластины для фиксации рельса, называемые шпальными подкладками, и межшпальное пространство, заполненное балластом (чаще всего, щебёнкой). В качестве измеряемого информативного параметра выбирают время между проходами регистраторов над одной подкладкой, вычисляемое корреляционным способом.

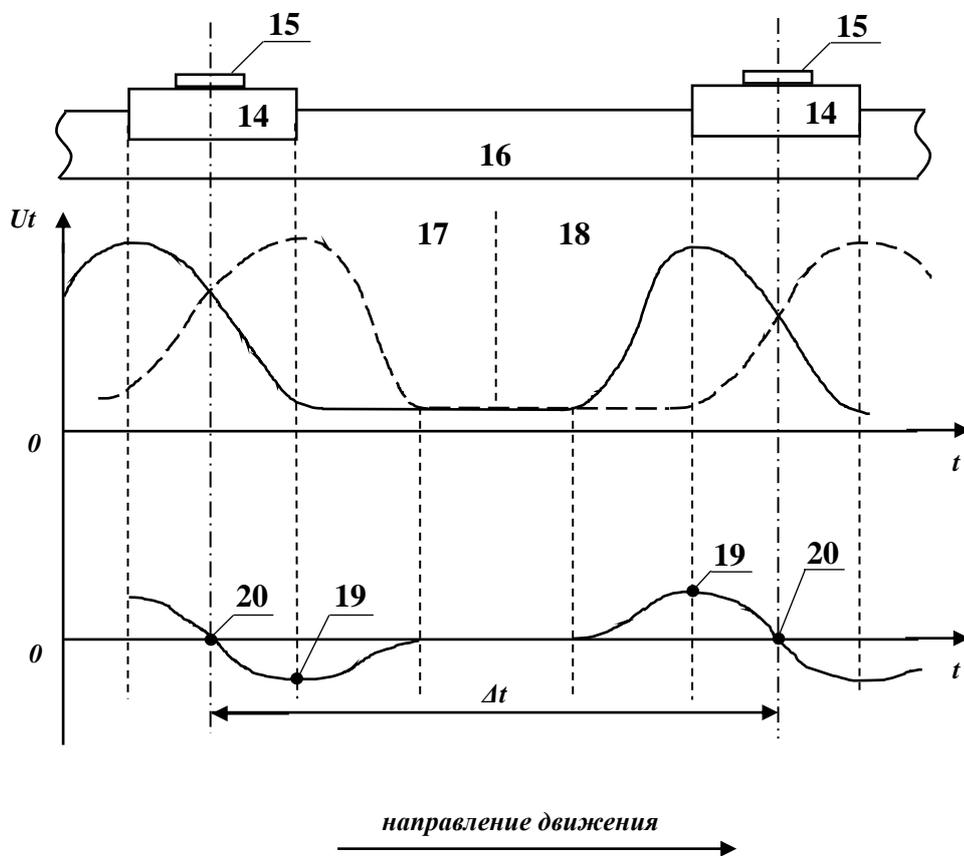


Рисунок 5.5. Схема рельсового пути и временные диаграммы выходных сигналов радиолокационного датчика с ЧМ непрерывного излучения радиоволн для определения параметров движения локомотива относительно ЖД полотна: 14 – шпалы; 15 – подкладки; 16 – балласт (основание); 17 и 18 – вид кривых напряжения на выходе схем нормирования 7 и 8 по временной оси t (регистраторы 12 и 13) при прохождении подкладок 15.

На рис. 5.5 показаны временные диаграммы выходных сигналов 17 и 18 измерителей амплитуд 5 и 6 первого и второго каналов регистрации, полученные от подкладок и разность этих сигналов 19 и 20, формируемая на выходе блока вычитания 7. Арифметическо-логическое устройство 11 радиолокационного датчика формирует сигнал прохода подкладки по моменту перехода сигналами 19 и 20 через нулевой уровень, который по времени соответствует середине шпалы. При этом зная расстояние между двумя регистраторами, определяют линейную скорость по простейшей формуле $V=S/\Delta t$, где: S – расстояние между приемниками; Δt – время прохода между серединами двух соседних подкладок. Фиксируя моменты прохода каждой подкладки, производится их последовательный счет за все время от начала пути. Используя эти данные, по дорожной карте определяется местоположение локомотива на местности, что необходимо для его навигации при автоматизированном управлении поездов.

В настоящее время опытный образец радиолокационного датчика с ЧМ непрерывного излучения радиоволн для определения параметров движения локомотива относительно ЖД полотна проходит испытания на Московском центральном кольце.

Второе изобретение [137] относится к радиотехнике, а именно к радиолокации. Оно может быть использовано на ЖД для определения параметров движения локомотива таких, как мгновенная скорость, пройденный путь от начала движения, количество пройденных шпал и координаты нахождения локомотива в данный момент времени. Кроме того, оно предназначено для контроля дорожной обстановки перед локомотивом на расстоянии до одного-двух километров, что особенно важно для предотвращения возможного возникновения внештатных ситуаций.

Общей проблемой на пути следования ЖД состава является своевременное обнаружение возникших препятствий, помех, могущих привести к предпосылке аварийной ситуации. Особенно часто такими препятствиями является различная транспортная техника, которая имеет свойство заглухнуть именно на пересечении

дорог, чаще всего на нерегулируемом переезде. Ещё одним фактором риска

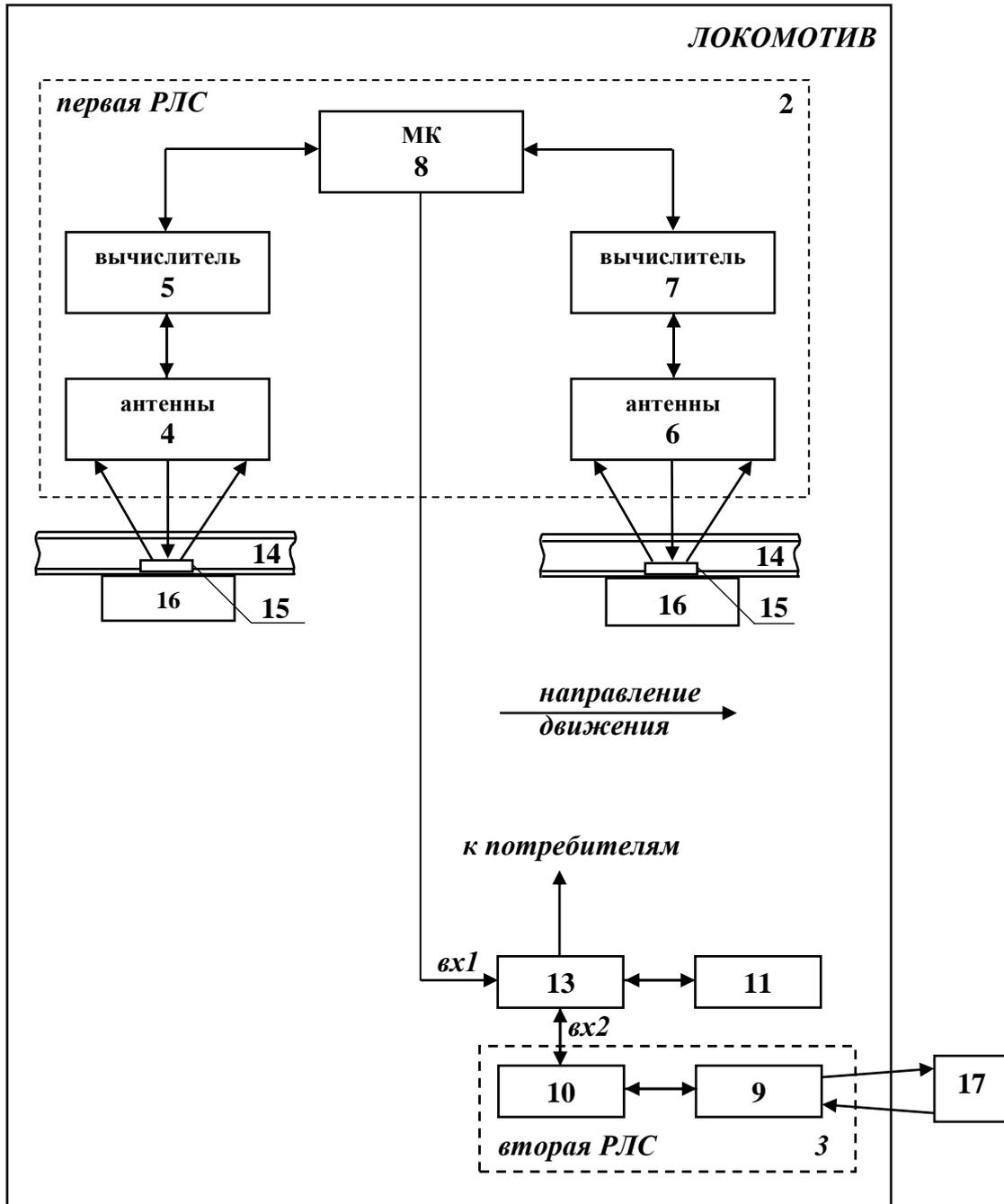


Рисунок 5.6. Блок-схема бортового радиолокационного комплекса для определения параметров движения и контроля передней полусферы локомотива: 1 – комплекс в целом; 2 – первая навигационная СБРЛ; 3 – вторая СБРЛ для обзора передней полусферы; 4 и 6 – блоки приемо-передающих антенн первой СБРЛ; 5 и 7 – вычислители первой СБРЛ; 8 – микроконтроллер первой СБРЛ; 9 – блок антенн второй СБРЛ типа ММО для обзора передней полусферы по ходу движения локомотива; 10 – электронное ядро второй СБРЛ; 11 – цифровая дорожная карта; 13 – центральный процессор; 14 – монорельс; 15 – подкладка для крепления монорельса к шпале; 16 – шпала; 17 – отражающие предметы на ЖД

к более и по обе стороны от нее впереди локомотива.

являются пешеходы, переходящие железнодорожные пути в неположенных местах, зачастую в условиях плохой видимости.

Технической задачей изобретения является повышение точности и достоверности измерения параметров движения и создание системы для определения координат локомотива на ЖД пути, а также контроля передней полусферы на пути движения локомотива на расстоянии до 1,5-2,0 км при плохих погодных условиях.

Для решения поставленной задачи предложен способ путевой навигации и обзора передней полусферы локомотива по геометрии железнодорожного пути. На рис. 5.6 показана общая структурная схема радиолокационного комплекса, реализующего данное изобретение. Способ основан на использовании двух СБРЛ. Первая выполнена в соответствии с описанным выше патентом. Она предназначена для измерения скорости и пройденного пути по факту обнаружения шпал на фоне подстилающей поверхности, а также при использовании дорожной карты – для решения навигационной задачи определения текущих координат локомотива. В настоящее время опытный образец этой СБРЛ, как отмечено выше, проходит испытания на Московском центральном кольце.

Вторая СБРЛ предназначена для сканирования передней полусферы по пути следования локомотива. Эта СБРЛ реализует известный принцип ММО (Multiple Input – Multiple Output, что означает, множественный вход – множественный выход). В основу работы второй СБРЛ положен принцип радиолокатора с синтезированной апертурой и формирования зондирующего сигнала с широкополосной линейной ЧМ. В приемнике реализована корреляционно-фильтровая обработка отраженного от цели сигнала с внутренней когерентностью. Это позволяет получить высокую разрешающую способность по дальности, высокое угловое разрешение за счет синтеза апертуры при использовании малогабаритных антенн в составе ММО-линеек или антенных матриц.

Вторая СБРЛ с реализацией принципа ММО позволяет определять радиолокационные ориентиры непосредственно на рельсовом пути и по обе стороны от него. Полученные при этом результаты сканирования передней полусферы привязываются к текущим координатам локомотива, определяемые первой СБРЛ. Полученные данные обеих СБРЛ непрерывно сравниваются с дорожной картой. В случае разногласия этих данных выдается сигнал опасности. При этом вторая СБРЛ одновременно строит визуальное 3D изображение передней полусферы в пределах прямой видимости в реальном масштабе времени. Совместная работа этих двух СБРЛ позволяет значительно увеличить надежность контроля дорожной обстановки на пути движения локомотива и повысить безопасность движения.

5.4. Борьба с помеховым сигналом прямого прохождения в СБРЛ с непрерывным излучением

Очевидно, что применение описанной выше структуры СБРЛ в виде одного передатчика и двух идентичных приёмников СВЧ радиоволн требует использовать супергетеродинную схему обработки принимаемых сигналов. Непрерывная линейная ЧМ радиосигнала в широкой полосе частот обеспечивает радиолокационной системе высокую разрешающую способность по дальности. При этом пространственный разнос передающей и приёмных антенн создаёт «базу» корреляционного измерителя скорости. Однако такой принцип построения радиолокатора несёт в себе существенный недостаток, заключающийся в наличии помехового сигнала, возникающего из-за проникновения части излучаемых радиоволн непосредственно в приёмную антенну, используя ближнюю зону излучения радиолокатора. Причинами этого могут быть как частичное перекрытие боковых лепестков диаграмм направленности антенн, так и дифракция радиоволн на различных предметах и элементах конструкции в зоне расположения радиолокатора, что особенно характерно для СБРЛ. В отличие от полезного сигнала, являющегося собой отражение от цели, описываемый помеховый сигнал испытывает намного меньшее затухание, а также чаще всего

имеет отличное от полезного сигнала время распространения. Поэтому, далее обозначим его, как помеховый сигнал прямого прохождения, подразумевая не связанное с отражением от цели проникновение части излучаемой мощности радиоволн в приёмник. В результате, в приёмном тракте радиолокатора происходит образование дополнительных, неинформативных продуктов преобразования частоты, а также наблюдается подавление приёмного тракта помеховым сигналом прямого прохождения, зачастую превосходящим полезный, отражённый от цели сигнал по мощности на несколько порядков.

Из экспериментов с макетом СБРЛ замечено, что мощность отражения от хорошо проводящего объекта на небольшой дальности примерно на 25...30 дБ меньше мощности просачивающегося сигнала. Имея 16-битный АЦП и настраивая усилитель промежуточной частоты по уровню помехового сигнала прямого прохождения, мы неэффективно используем участок динамического диапазона АЦП, оцифровывающий 25...30 дБ помехового. По примерной оценке, составляющей 6,02 дБ/бит, потеря разрядности составляет 4...5 бит, а также влечёт за собой снижение уровня сигнал/шум при дальнейшей обработке полезного сигналов в цифровом виде.

Борьбе с помеховым сигналом прямого прохождения в СБРЛ с линейной ЧМ посвящен ряд трудов [139-142], однако, современные технологии цифровой обработки сигналов открывают новые возможности в решении этой проблемы. Ниже приводятся результаты компьютерного моделирования предложенной схемы подавления помехового сигнала прямого прохождения в СБРЛ с линейной ЧМ.

Описание модели. Модель предлагаемой схемы обработки сигнала радиолокатора с линейной ЧМ была построена в системе проектирования AWR Microwave Office на функциональном уровне.

Построенная схема была разбита на отдельные модули. Общая схема изображена на рис. 5.7. Здесь присутствуют следующие блоки:

- Блок S1 «transmitted» – генератор, формирующий сигнал с линейной ЧМ $\{F_H+f_{ЛЗ}, F_B+f_{ЛЗ}\}$, который далее поступает в передающую антенну.

Модулирующая функция этого генератора содержит добавку $f_{ЛЗ}$, выполняющую роль линии задержки в тракте передатчика.

- Блок A1 – канал распространения сигнала в свободной среде. Содержит три канала S_i , каждый из которых характеризуется относительным затуханием и сдвигом частоты: $S_0(0 \text{ dB}, 0,4 \text{ MHz})$, $S_1(25 \text{ dB}, 1,07 \text{ MHz})$, $S_2(35 \text{ dB}, 1,53 \text{ MHz})$, где, очевидно, S_0 – канал прохождения помехового сигнала, S_1 и S_2 – каналы прохождения полезных, отражённых от цели, сигналов.
- Блок S2 «basic_LO» – генератор, формирующий опорный сигнал с линейной ЧМ $\{F_H, F_B\}$. Схема блока аналогична схеме блока S1, отличие заключается в отсутствии сдвига модулирующей функции $f_{ЛЗ}$, имитирующего линию задержки.
- Блок S3 «IF_loop» – канал оценки частоты помехового сигнала прямого прохождения. Схема блока приведена на рис. 5.8. Смесь помехового и полезных сигналов после преобразования на промежуточную частоту фильтруется от высокочастотных составляющих спектра фильтром F1 и через АЦП попадает в субблок A9 «MATLAB», в котором происходит оценка частоты помехового сигнала $f_0^э$ по максимуму амплитудного спектра. Далее данная оценка пересчитывается в сигнал управления генератором, суммируется с «опорной» модулирующей функцией и поступает на вход второго/третьего генератора.
- Блок S4 «IF_signal» – канал оценки частот полезных сигналов. Этот канал является «основным», т.к. на его выходе наблюдаются результаты измерений параметров полезных сигналов, а именно, их частот, которые несут радиолокационную информацию о параметрах цели. Данный блок состоит из фильтра нижних частот F4 для устранения высокочастотных составляющих спектра после преобразования частоты в смесителе, блока A10 «CHANGE_FS» понижения частоты дискретизации, и полосно-заграждающего фильтра-«пробки» F7, подавляющего помеховый сигнал прямого прохождения на частоте f_0 .
- Блоки A7 и A8 являются смесителями с параметрами, соответствующими реально применяемым смесителям.

Логика работы схемы следующая. Генератор блока S1 формирует

излучаемый сигнал с линейной ЧМ, включая частотную поправку $f_{ЛЗ}$, эквивалентную наличию линии задержки. По сути, внесение постоянной линии задержки эквивалентно повышению промежуточной частоты на величину $f_{ЛЗ}$, что необходимо для увеличения числа переходов через ноль при анализе достаточно низкочастотных полезных сигналов. Сформированный сигнал, характеризуемый диапазоном частот $\{F_H + f_{ЛЗ}, F_B + f_{ЛЗ}\}$, проходит через модель канала распространения А1, в котором приобретает пропорциональные дальности сдвиги частот f_0, f_1 и f_2 , а также относительные затухания.

Далее, в смесителе А7 происходит демодуляция принимаемого из канала А1 сигнала с помощью опорного сигнала с линейной ЧМ из блока S2, не формирующего никаких задержек ($\{F_H, F_B\}$). Таким образом, область частот спектра сигналов, включая $\{f_0, f_1, f_2\}$, оказывается на промежуточной частоте $f_{ЛЗ}$. При этом помеховый сигнал, оказавшийся на частоте $f_{ЛЗ} + f_0$, по уровню мощности значительно больше уровня полезных сигналов.

Следующим шагом в канале оценки частоты помехового сигнала S3 происходит фильтрация и оцифровка узкой полосы частот полезных сигналов. При этом усилитель промежуточной частоты настраивается по уровню помехового сигнала, и динамический диапазон АЦП используется неэффективно с точки зрения обработки слабых отражённых сигналов. Оценка частоты помехового сигнала f_0^{\ominus} осуществляется с помощью кратковременного дискретного преобразования Фурье (short-time fourier transform, STFT), после чего переводится в управляющий сигнал генератора и суммируется с модулирующим сигналом. Генерируется второй опорный сигнал с линейной ЧМ, характеризуемый диапазоном частот $\{F_H + f_0^{\ominus}, F_B + f_0^{\ominus}\}$.

На последнем этапе происходит перемножение принимаемого и второго опорного сигналов, в результате чего помеховый сигнал «центрируется» на выбранной нами промежуточной частоте $f_{ЛЗ}$:

$$f_0^C = (F_H + f_{ЛЗ} + f_0) - (F_H + f_0^{\ominus}) \approx f_{ЛЗ}.$$

При этом, соответственно, все интересующие нас полезные сигналы буду

иметь следующие частоты:

$$f_i^C \approx f_{\text{ЛЗ}} + (f_i - f_0^{\text{э}}).$$

где f_i – реальная частота i -го отражения, $f_0^{\text{э}}$ – оценка частоты помехового сигнала и f_i^C – оцифрованная частота i -го отражения с учётом смещения к нулевой дальности по частоте помехового сигнала.

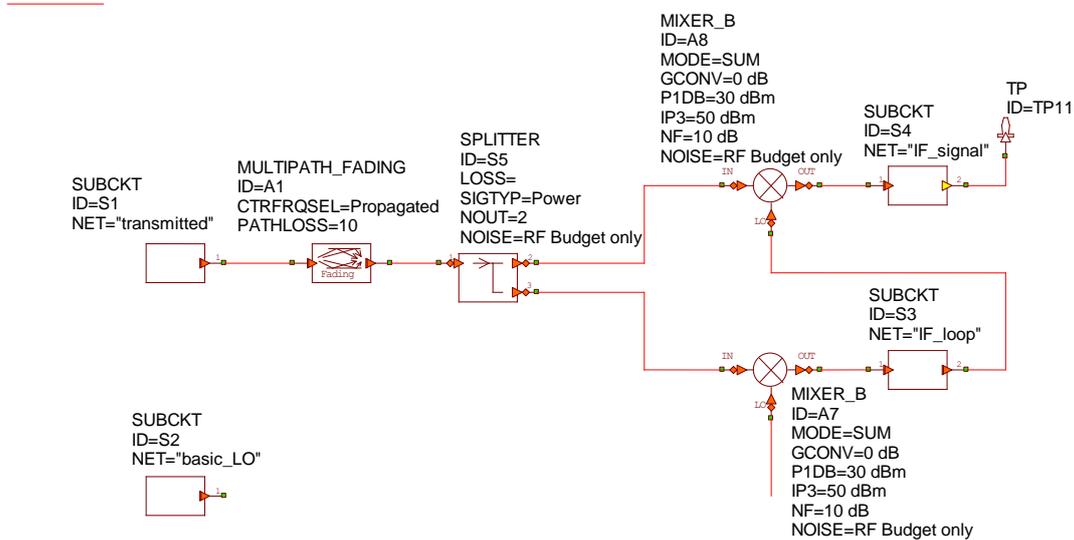


Рисунок 5.7. Функциональная модель схемы подавления помехового сигнала прямого прохождения.

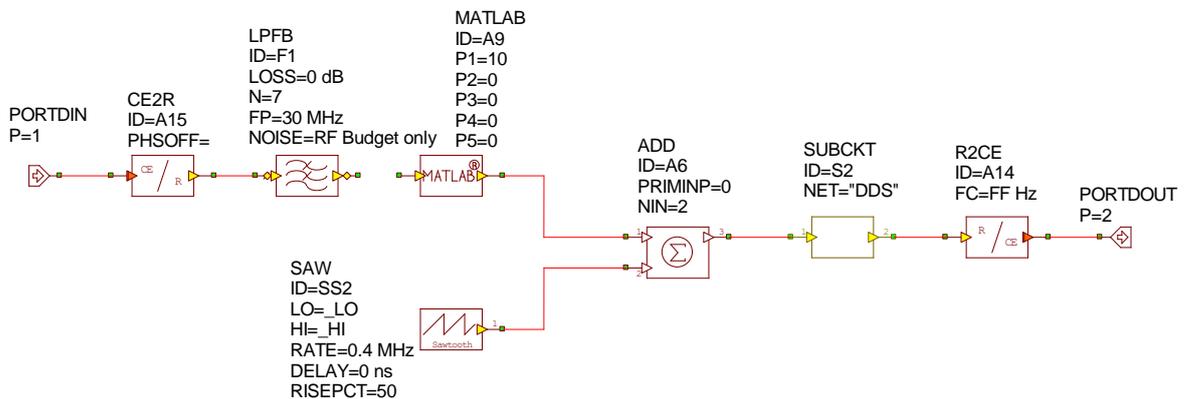


Рисунок 5.8. Схема блока S3 «IF_loop».

Результаты моделирования.

Каналы сигналов высокой частоты. Для моделирования заданы три канала

распространения радиоволн $\{S_0, S_1, S_2\}$ с эквивалентными времени задержки частотами $\{0,4 \text{ MHz}, 1,07 \text{ MHz}, 1,53 \text{ MHz}\}$ и затуханием в канале $\{0 \text{ dB}, 25 \text{ dB}, 35 \text{ dB}\}$. Очевидно, первый канал соответствует помеховому сигналу прямого прохождения, второй и третий – полезным сигналам отражения от целей. Частоты намеренно выбраны не кратными частоте дискретизации. Затухание в каналах полезных сигналов выбрано равным 25 дБ и 35 дБ на основе экспериментов с макетом СБРЛ с линейной ЧМ, показавших разницу между уровнями помехового сигнала прямого прохождения и сигналов, соответствующих отражениям от целей, не менее 30 дБ.

Модуляция излучаемого сигнала с линейной ЧМ имеет также частотную добавку $f_{ЛЗ} = 10,7 \text{ МГц}$, что эквивалентно смещению спектра полезных сигналов на данную промежуточную частоту. Частота 10,7 МГц выбрана как одна из стандартных частот, на которые производятся высокодобротные фильтры на поверхностных акустических волнах и керамические фильтры, что позволяет произвести узкополосную фильтрацию на промежуточной частоте с использованием современной элементной базы.

Спектр принимаемого сигнала с линейной ЧМ с учётом частотной добавки $f_{ЛЗ}$ и задержек в канале распространения показан на рис. 5.9 розовой линией. На том же графике можно наблюдать спектр опорного сигнала с линейной ЧМ, показанного синей линией. Он не содержит никаких частотных добавок и применяется для демодуляции сигнала в канале оценки частоты помехового сигнала прямого прохождения. Маркерами обозначены границы исходного сигнала с линейной ЧМ в пределах 50...140 МГц, получаемого от генератора по аналогии с экспериментальным макетом СБРЛ с линейной ЧМ.

Канал оценки частоты помехового сигнала. По невыясненным причинам модель генератора, применяемая в AWR VSS, обладает аддитивной ошибкой управляющего сигнала. Вследствие этого, при наличии управляющего сигнала, соответствующего частоте 10,7 МГц, на выходе имеется частота 10,74 МГц, что будет учтено далее.

На вход смесителя канала оценки частоты помехового сигнала поступают

опорный сигнал с линейной ЧМ без смещения и принимаемый из свободного пространства (канала А1) принятый сигнал. На выходе смесителя присутствуют результаты переноса сигнала на промежуточную частоту, а также высокочастотные продукты перемножения сигналов с линейной ЧМ, как показано на рис. 5.9 чёрной линией. После применения фильтра нижних частот с полосой 20 МГц, устраняющего все высокочастотные составляющие спектра, получаем сигнал со спектром, показанный на рис. 5.9 красной линией. Спектр сигнала на промежуточной частоте более детально изображён на рис. 5.10 синей линией. Маркер m1 на этом рисунке обозначает максимальную спектральную составляющую помехового сигнала прямого прохождения с частотой 11,13 МГц, что примерно соответствует ожидаемой частоте $f_{ЛЗ} + f_0 = 10,74 + 0,4 = 11,14$ МГц. Следующие спектральные компоненты, соответствующие полезным сигналам, имеют частоты 11,82 МГц и 12,28 МГц при ожидаемых значениях $f_{ЛЗ} + f_1 = 10,74 + 1,07 = 11,81$ МГц и $f_{ЛЗ} + f_2 = 10,74 + 1,53 = 12,27$ МГц.

Далее отфильтрованная смесь сигналов на промежуточной частоте поступает в блок MATLAB, осуществляющий вычисления в среде MATLAB через .m-файл. Оценка частоты f_0^3 преобразуется в управляющий сигнал генератора и поступает на сумматор модулирующей функции.

Канал оценки частоты полезных сигналов. На вход смесителя канала оценки частот полезных сигналов поступают опорный сигнал с линейной ЧМ, имеющий частотную поправку, соответствующую оценке частоты паразитного сигнала, а также сигнал, принимаемый из свободного пространства (канала А1). На выходе смесителя наблюдается практически та же смесь паразитного и полезных сигналов и высокочастотных продуктов преобразования в области промежуточной частоты. После применения фильтра нижних частот с полосой 20 МГц получаем спектр, приведённый на рис. 5.9 зелёной линией, и рис. 5.10. зелёной линией. Отличия в спектре, естественно, видно лишь на более детализированном спектре рис. 5.10. Наблюдается спектральный пик помехового сигнала прямого прохождения с частотой 10,73 МГц, показанный маркером m2.

Ожидаемая частота $f_{\text{ЛЗ}} + f_0 - f_0^{\ominus} = 10,74 + 0,4 - 0,4 = 10,74$ МГц. Таким образом, можно заключить, что область спектра, содержащего смесь помехового и полезных сигналов, сместилась таким образом, что частотный пик помехового сигнала оказался на частоте 10,74 МГц (10,7 МГц при идеальном генераторе), что принимается за нулевую дальность при дальнейшей обработке полезных сигналов.

Последним этапом реализуется фильтрация сигнала с помощью полосно-заграждающего фильтра 10-го порядка с характеристикой Чебышева 1 типа, центральная частота которого 10,7 МГц и намеренно не перестраивается под полученную с ошибкой промежуточную частоту 10,74 МГц. Результат фильтрации изображён на рис. 5.10 красной линией. Видно, что, несмотря на рассогласование, спектральный пик помехового сигнала подавлен в значительной степени. Уверенно выделяются спектральные пики с частотами 11,4 МГц и 11,87 МГц (см. маркеры m3 и m4 соответственно). При этом ожидаемые частоты

$$f_1^C \approx f_{\text{ЛЗ}} + (f_1 - f_0^{\ominus}) = 10,74 + (1,07 - 0,4) = 11,41 \text{ (МГц)}.$$

$$f_2^C \approx f_{\text{ЛЗ}} + (f_2 - f_0^{\ominus}) = 10,74 + (1,53 - 0,4) = 11,87 \text{ (МГц)}.$$

Мощность амплитудных составляющих спектра, соответствующих полезным сигналам, составляет -64 дБм и -69 дБм соответственно (см. маркеры m3 и m4), тогда как мощность составляющих спектра помехового сигнала снизилась с -30 дБм (см. маркер m1) до уровня шума. Таким образом, ослабление полезных сигналов составило не более 10 дБ, тогда как подавление помехового сигнала прямого прохождения составило более 100 дБ. При таком соотношении мощностей очевиден выигрыш в энергетическом потенциале приёмника бистатического СБРЛ с линейной ЧМ.

Также можно наблюдать прошедшую до выхода схемы составляющую спектра с частотой 9,937 МГц (см. маркер m5), являющуюся продуктом преобразования в канале оценки частот полезных сигналов. Данная составляющая может быть отфильтрована как аналоговым фильтром, так и цифровым, а также просто может не учитываться при обработке сигналов, как частота, лежащая ниже

нулевой дальности (10,74 МГц), так как обладает малой амплитудой и не снижает динамический диапазон АЦП.

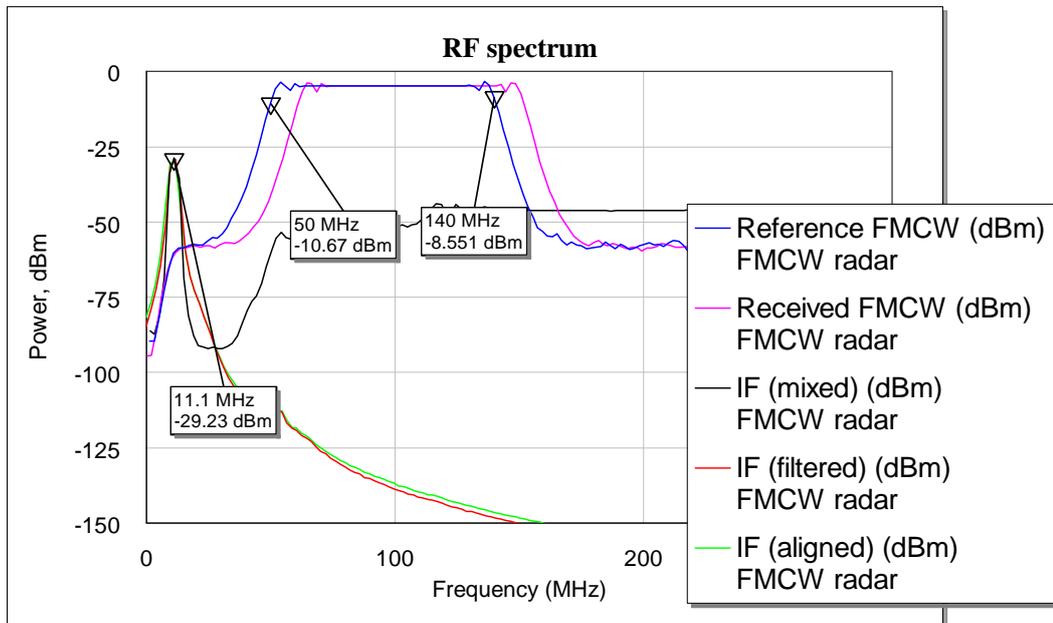


Рисунок 5.9. Высокочастотные спектры сигналов до и после демодуляции.

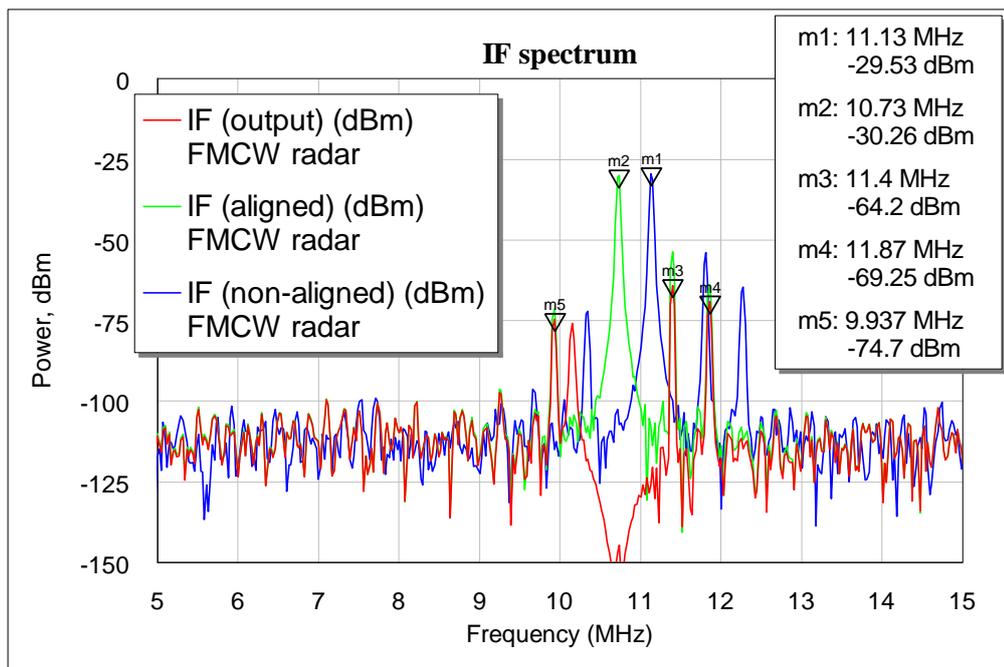


Рисунок 5.10. Спектры сигналов на промежуточной частоте.

5.5. Выводы

Таким образом, в настоящей главе получены новые научные результаты исследований автодинов и даны примеры, в которых использованы или могут

быть использованы эти и иные результаты выполненных в настоящей диссертации исследований. Эти результаты состоят в следующем.

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

Результаты данных исследований использованы в учебном процессе ИРИТ-РТФ УрФУ по курсу «Применение СВЧ и КВЧ устройств в радиосистемах» для магистрантов второго курса по направлению «Радиотехника» при выполнении лабораторной работы «Определение параметров быстродействия автодинов методом биений».

2. В ходе выполнения диссертационных исследований предложены два способа и реализующие их СБРЛ и радиолокационный комплекс для измерения скорости, путевой навигации по геометрии железнодорожного пути и обзора передней полусферы локомотива, предназначенные для внедрения в состав устройств контроля, управления и безопасности железнодорожного подвижного состава, в том числе, в ходе создания перспективных высокоавтоматизированных, вплоть до беспилотных, поездов будущего. В настоящее время опытный образец радиолокационного датчика с ЧМ непрерывного излучения радиоволн для определения параметров движения локомотива относительно элементов верхнего строения пути ЖД полотна проходит испытания на Московском центральном кольце.

3. Представлены результаты компьютерного моделирования схемы подавления помехового сигнала прямого прохождения в бистатической СБРЛ непрерывного излучения с линейной ЧМ. Показано, что модель построена из блоков, соответствующих промышленно выпускаемым и доступным на рынке устройствам – АЦП, генераторы, смесители, фильтры с постоянными параметрами, то есть потенциально реализуемые на основе элементов с сосредоточенными параметрами. В процессе моделирования продемонстрирован перенос помехового сигнала на фиксированную, заранее выбранную частоту, что позволяет строить не перестраиваемый по частоте полосно-заграждающий фильтр и эффективно подавлять данную помеху. В условиях компьютерного эксперимента для представленной схемы СБРЛ подавление помехового сигнала составило порядка 100 дБ, при этом выигрыш по динамическому диапазону составил порядка 90 дБ.

Стоит отметить, что указанная простота и эффективность схемы подавления реализуема только при значительном отдалении обнаруживаемых целей от радиолокатора, что выражается в частотном разнесении спектральных составляющих, соответствующих помеховому и полезным сигналам, на достаточную величину. В случае сближения или частичного перекрытия областей спектра перечисленных сигналов значительно ухудшаются условия для работы описанной схемы и существенно возрастают требования к характеристикам режекторного фильтра. Можно сделать вывод о том, что предложенная схема подавления помехового сигнала прямого прохождения рекомендована к применению лишь при больших дальностях до цели. Это в целом согласуется с идеей о том, что целесообразной областью применения супергетеродинной схемы приёмопередатчиков радиолокатора является область «дальней» радиолокации, тогда как в задачах построения СБРЛ разумнее применять автодинную схему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты диссертации состоят в следующем.

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

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

2.1. Обобщенная модель распространена на случай автодина с одновременной амплитудной (АМ) и частотной (ЧМ) модуляцией его колебаний по произвольному закону модулирующей функции. Полученные в результате решения уравнений выражения являются также достаточно общими. Они описывают одновременно протекающие процессы генерации излучения, приема и взаимодействия с отраженным от объекта локации радиосигналом, а также выделения результата этого взаимодействия в виде автодинного отклика.

2.2. Выполнен переход от общих выражений к конкретным выражениям для

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

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

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

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

В случае отсутствия или сравнительно малой величины сопутствующей девиации частоты генерации максимум автодинного отклика соответствует середине зоны амплитудной селекции. С увеличением сопутствующей девиации частоты происходит смещение области главного максимума в сторону больших

значений нормированного расстояния и появление многогорбой ХАС, характерной СБРЛ с ЧМ. Амплитуда отклика АД с АМ на всех гармониках частоты модуляции, включая нулевую гармонику, асимптотически возрастает с приближением коэффициента АМ к единице как при наличии, так и отсутствии сопутствующей ЧМ. Эффективность переноса сигнала на гармоники частоты модуляции уменьшается с увеличением номера гармоники у АД с АМ, но эта эффективность несколько возрастает при сопутствующей ЧМ.

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

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

гармоники, на которой производится выделение сигналов.

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

Поэтому при создании перспективных автодинных приемопередающих модулей для СБРЛ с ЧМ необходимо учитывать отмеченные обстоятельства. Прежде всего, должны приниматься меры по снижению уровня сопутствующей АМ и причин искажения сигналов из-за автодинных изменений частоты. Кроме того, автодинные модули должны обеспечить требуемую линейность закона ЧМ в широкой полосе частот и повторяемость модуляционных характеристик в условиях серийного производства.

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

4. Выполнены экспериментальные исследования особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ с ЧМ и АМ миллиметрового диапазона длин волн. Получены зависимости сигнальных и шумовых характеристик от расстояния до объекта локации и величин параметров модуляции и внешней обратной связи системы «генератор – объект локации», а также осциллограммы и спектры автодинных сигналов. Данные эксперименты подтвердили результаты теоретических исследований и адекватность разработанных моделей автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ. Дополнительным подтверждением валидности разработанной модели автодинных СБРЛ с АМ и ЧМ является успешное функционирование ряда радиолокационных систем, датчиков и измерителей, созданных на базе СВЧ и КВЧ генераторов на диодах Ганна 8-мм диапазона.

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

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

5.1. Разработана математическая модель одноконтурного СВЧ генератора, находящегося под воздействием сигнала от стороннего источника СВЧ излучения. На основе этой модели рассмотрено формирование динамических характеристик СВЧ генераторов в режиме биений. Анализ полученных характеристик показал, что только характеристика модуляции амплитуды колебаний совпадает с амплитудной характеристикой автодина и может

использоваться для определения постоянной времени автодинного отклика, которая характеризует его динамические свойства. Экспериментальные исследования динамических характеристик генераторов «Тигель-08М» методом биений подтвердили адекватность разработанной модели и показали, что все известные на сегодня методы дают близкие результаты оценки постоянной времени автодинного отклика.

5.2. В ходе выполнения диссертационных исследований предложены два способа и реализующие их СБРЛ и радиолокационный комплекс для измерения скорости, путевой навигации и обзора передней полусферы локомотива, предназначенные для внедрения в состав устройств контроля, управления и безопасности подвижного состава. В настоящее время опытный образец радиолокационного датчика с ЧМ непрерывного излучения радиоволн для определения параметров движения локомотива проходит испытания на Московском центральном кольце. Дополнительный источник информации о скорости движения локомотива позволит повысить безопасность эксплуатации железнодорожного транспорта, что говорит об актуальности проведённых исследований. Однако не менее перспективным видится проведение исследований и разработок устройства для измерения скорости локомотива на основе автодинного генератора и приёмопередающей антенны вытекающей волны [143,144].

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

Сформулированные выше основные научные и практические результаты настоящей диссертации, по мнению ее автора, можно квалифицировать как **решение научной задачи, имеющей существенное значение** для дальнейшего

развития теории и техники СБРЛ с автодинным принципом построения приемопередающих устройств.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке перспективных автодинных модулей и СБРЛ на их основе в АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск), ОА «НИИПП» (г. Томск), АО «УПКБ Деталь» (г. Каменск-Уральский), АО «НПП Дельта» (г. Москва), АО «НПП Импульс» (г. Москва) и других.

Перспективы дальнейшего развития данного научного направления, по мнению автора диссертационной работы, состоят в целесообразности продолжения исследований автодинов при синхронном и асинхронном воздействии сигнала от стороннего источника, а также создания новых типов монолитных и гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона волн, стабилизированных по частоте дополнительным резонатором или сигналом от стороннего источника. При этом более перспективными к исследованию и разработке принципов построения и основ конструирования автодинных генераторов автор считает АД, стабилизированные по частоте высокочастотным внешним резонатором либо синхронизированные сигналом от внешнего источника [145].

Для реализации таких модулей возможно использование в качестве активного, управляющего и детекторного элемента многофункционального 3-х мезового чипа, а применение в качестве колебательной системы – управляемых по частоте резонаторов, выполненных в виде распределённых отражателей Брэгга [146]. Кроме того, перспективной представляется разработка автодинных модулей на базе связанных генераторов в одном корпусе микросхемы. Это позволяет создать новый тип генераторно-излучающих устройств, которые значительно расширят область применения и возможности в реализации различных СБРЛ, в том числе, в виде фазированных антенных решеток.

В завершение настоящей работы автор выражает благодарность научному руководителю Носкову Владиславу Яковлевичу, д.т.н., профессору кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций ИРИТ-РТФ за многочисленные ценные советы и рекомендации, а также предоставленную возможность работы в данном направлении исследований.

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АД	Автодин, автодинный генератор, автодинный датчик
АГ	Автогенератор
АМ	Амплитудная модуляция
АХА	Амплитудная характеристика автодина – зависимость изменений амплитуды колебаний генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта
АЧХ	Амплитудно-частотная характеристика
АЭ	Активный элемент
БР	Блок регистрации (автодинного отклика в цепи питания АЭ)
ГИС	Гибридно-интегральная схема
ДГ	Диод Ганна
КВЧ	Крайне высокие частоты, крайне высокочастотный
КС	Колебательная система
ЛПД	Лавинно-пролётный диод
НИР	Научно-исследовательская работа
РЛС	Радиолокационная система
СБРЛ	Система ближней радиолокации
СВЧ	Сверхвысокие частоты, сверхвысокочастотный
ФХА	Фазовая характеристика автодина – зависимость набега фазы отражённого ЭМ излучения автодинного генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта
ХАД	Характеристика автодетектирования автодина – зависимость изменений автосмещения на АЭ генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта
ЧХА	Частотная характеристика автодина – зависимость изменений частоты колебаний генератора в зависимости от расстояния до отражающего объекта
ЧМ	Частотная модуляция

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

α – приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла;

β – параметр, который определяет неизохронность АГ;

γ – коэффициент неизохронности, учитывающий зависимость частоты колебаний генератора от амплитуды колебаний;

Γ_0 – приведённый к «зажимам» генератора коэффициент отражения, характеризующий затухание излучения по амплитуде при его распространении до отражающего объекта и обратно;

$\delta(t, \tau)$ – общее обозначение набега фазы отражённой волны за время τ ;

$\delta(\tau_n)$ – фазовая характеристика АД (ФХА);

$\Delta\omega$ – изменения частоты генерации относительно частоты стационарных колебаний автономного генератора;

$\Delta\omega_m$ – величина автодинной девиации частоты колебаний автодинного генератора;

ω – текущее значение частоты генерации автодинного генератора;

ω_0 – частота генерации автономного генератора;

ΔA – изменения амплитуды A колебаний генератора относительно их стационарных значений A_0 в режиме автономного генератора;

ε – параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через проводимость АЭ и (или) параметры КС;

η – КПД колебательной системы;

θ – угол фазового смещения автодинных изменений частоты автоколебаний;

λ – длина волны излучения в свободном пространстве;

ξ – параметр стабилизации частоты, учитывающий частотную крутизну реактивной проводимости активного элемента, а также колебательной системы генератора;

ρ – коэффициент неизодромности, учитывает влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через электронную проводимость АЭ;

τ – время запаздывания отражённого от объекта излучения;

τ_a – постоянная времени (время релаксации) автодинного отклика;

τ_n – нормированное время запаздывания отражённого от объекта излучения;

φ – медленно меняющаяся за период колебаний фаза в текущий момент времени;

χ – относительное изменение автодинного отклика по частоте;

χ_m – максимальное (амплитудное) относительное автодинное изменение частоты генерации;

$\chi_n(\tau_n)$ – нормированная относительно максимальных значений частотная характеристика АД (ЧХА);

$\Psi(t)$ – полная фаза колебаний в текущий момент времени t ;

ψ – угол относительного фазового смещения автодинных изменений амплитуды колебаний;

Ω_d – частота доплеровского сигнала, полученная от движущегося объекта в свободном пространстве;

ω – текущая частота колебаний генератора;

ω_0 – частота стационарных колебаний генератора;

ω_c – собственная частота колебательной системы;

A – медленно меняющаяся за период колебаний амплитуда в текущий момент времени t ;

A_0 – амплитуда стационарных колебаний автономного генератора;

a_{1m} – амплитудное значение автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний;

$a_c(t)$ – синфазная составляющая уровня амплитудного шума;

$a_s(t)$ – ортогональная составляющая уровня амплитудного шума;

$a_n(\tau_n)$ – нормированная относительно максимальных значений амплитудная характеристика автодина (АХА);

$a_{\text{шн}}(t)$ – составляющая нормированного относительно максимальных значений автодинного отклика уровня амплитудного шума генератора;

$B_{\text{КС}}$ – реактивная проводимости КС;

$B_{\text{АЭ}}$ – реактивная проводимость активного элемента;

c – скорость распространения электромагнитного СВЧ излучения;

$C_{\text{ОС}}$ – параметр внешней обратной связи автодинной системы;

$G_{\text{КС}}$ – резистивная и реактивная проводимости КС;

$G_{\text{П}}$ – проводимость собственных потерь резонатора;

$G_{\text{Н}}$ – проводимость нагрузки;

$G_{\text{П1}}$ – проводимость потерь основного рабочего резонатора;

$G_{\text{АЭ}}$ – резистивная проводимость активного элемента;

$i_c(t)$ – синфазная составляющая нормированного внутреннего шума генератора;

$i_s(t)$ – ортогональная составляющая нормированного внутреннего шума генератора;

$J_{\text{отр}}(t, \tau)$ – амплитуда эквивалентного источника мгновенного тока воздействия собственного отражённого от объекта излучения, которое запаздывает относительно текущего времени;

$j_{\text{отр}}(t, \tau)$ – эквивалентный источник мгновенного тока воздействия собственного отражённого от объекта излучения, которое запаздывает относительно текущего времени;

$j_{\text{ш}}(t)$ – эквивалентный источник мгновенного тока внутренних шумов генератора;

K_a – коэффициент автодинного усиления (амплитудной чувствительности автодина), показывающий, во сколько раз амплитуда автодинного отклика превышает амплитуду приходящей к генератору отражённой волны;

L_a – коэффициент автодинной девиации частоты генерации;

l – расстояние до отражающей поверхности;

$P(t, \tau)$ – выходная мощность на нагрузке генератора в момент времени $t - \tau$;

P_0 – колебательная мощность активного элемента в режиме стационарных колебаний автономного генератора;

$P_{\text{отр}}(t, \tau)$ – мощность отраженного от объекта излучения, приходящая в резонатор генератора в момент времени $t - \tau$;

$p_{\text{ш}}(t)$ – индекс модуляции фазы, обусловленный частотными шумами автодинного генератора;

$Q_{\text{н}}$ – нагруженная добротность;

$Q_{\text{вн}}$ – внешняя добротность колебательной системы;

$q_{\chi}(\tau_{\text{н}})$ – относительные изменения среднеквадратического уровня частотного шума;

$q_{\text{а}}(\tau_{\text{н}})$ – относительные изменения среднеквадратического уровня амплитудного шума;

t – текущее время.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Автодины, автодинные генераторы – это открытые информационно-измерительные автоколебательные системы, использующие для своего функционирования автодинный эффект. В отличие от обычных генераторов автодины содержат дополнительные средства для выделения (регистрации) автодинного отклика.

Открытая система – это система, доступная к каким-либо физическим (ток или напряжение), параметрическим и (или) информационным внешним воздействиям.

Автодинный эффект – явление изменения параметров автоколебательной системы, таких как амплитуда и частота колебаний, а также ток или напряжение смещения активного элемента генератора, под воздействием излучения, полученного от внешнего стороннего источника или собственного отражённого от объекта исследований.

Автодинный отклик – реакция автогенератора в виде автодинного эффекта на воздействие излучения, полученного от внешнего стороннего источника или собственного отражённого от объекта исследований.

Изохронный (isochronic – от греческого isos – одинаковый, равный и chronos – время) **генератор** – автогенератор, у которого частота колебаний не зависит от изменений амплитуды генерации. **Неизохронный генератор** предполагает наличие данной зависимости. Характеризуется **коэффициентом неизохронности**.

Изодромный (isodromic – от греческого isos – одинаковый, равный и dromos – бег) **генератор** – автогенератор, у которого амплитуда колебаний не зависит от изменений частоты генерации. **Неизодромный генератор** предполагает наличие

данной зависимости. Характеризуется *коэффициентом неизодромности*.

Коэффициент внутренней обратной связи автодина – коэффициент, определяемый как произведение коэффициентов неизохронности и неизодромности, который показывает степень внутренней устойчивости автодинного генератора при условии одинаковых знаков при данных коэффициентах.

Коэффициент внешней обратной связи автодина – коэффициент, определяемый как произведение величины автодинной девиации частоты колебаний на время запаздывания отражённого от объекта излучения.

Коэффициент автодинного усиления – коэффициент, который показывает, во сколько раз амплитуда автодинного отклика по изменению амплитуды колебаний превышает амплитуду приходящего в резонатор генератора излучения; синоним этого термина – *коэффициент амплитудной чувствительности автодина*.

Коэффициент автодинной девиации частоты – коэффициент, который показывает степень влияния на амплитуду автодинных изменений частоты колебаний генератора воздействия приходящего в его резонатор излучения; синоним этого термина – *коэффициент частотной чувствительности автодина*.

Амплитудная характеристика автодина (АХА) – зависимость изменений амплитуды колебаний генератора, находящегося под воздействием отражённого излучения, от времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

Частотная характеристика автодина (ЧХА) – зависимость изменений частоты колебаний генератора, находящегося под воздействием отражённого

излучения, от времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

Амплитудно-частотная характеристика автодина (АЧХ) – зависимость изменений амплитуды колебаний генератора, находящегося под воздействием отражённого излучения, от изменений частоты автоколебаний при изменении времени запаздывания отражённого излучения или расстояния до объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган, И.М. Ближняя радиолокация. – М.: Советское радио, 1973. – 272 с.
2. Дамгов В.Н. Нелинейни и параметрични явления в радиофизически системи. – София: Академично издателство «Проф. М. Дринов», 2000. – 451 с.
3. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. – М.: Книжный дом «Либроком», 2010. – 552 с.
4. Кальянов Э.В. Автопараметрическая система с запаздыванием и инерционностью. Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 8. С. 1–5.
5. Малыкин Г.Б., Носков В.Я., Смольский С.М. У истоков автодинной тематики в СССР. Радиотехника. 2012. № 6. С. 20–23.
6. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 2003. 312 с.
7. Носков В.Я. Автодины на полупроводниковых приборах СВЧ и их применение: диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени д.т.н. – М.: МГТУ ГА, 1995. – 76 с.
8. Солодов А.В., Солодова Е.А. Системы с переменным запаздыванием. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
9. Комаров, И.В., Смольский С.М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. – М.: Горячая линия–Телеком, 2010. – 392 с.
10. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией. Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 3. С. 3–50.
11. 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. V. 26. No. 4. P. 1182–1190.

12. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э. Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 130–134.
13. Усанов Д.А., Постельга А.Э. Восстановление сложного движения участка тела человека по сигналу радиоволнового автодина. Медицинская техника. 2011. Т. 45. № 1. С. 8–10.
14. Ermak G.P., Popov I.V., Vasiliev A.S., Varavin A.V., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Radar Sensors for Hump Yard and Rail Crossing Applications. Telecommunication and Radio Engineering. 2012. V. 71, № 6. P. 567–580.
15. Носков В.Я. Автодинная радиоблокировка 8-мм диапазона для проведения баллистических испытаний. 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2013. С. 1041.
16. Носков В.Я. Автодинная система для определения скорости изделий с траекторией вблизи поверхности земли. 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2014. С. 1031–1032.
17. 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.
18. Данилин А. И., Воторопин С. Д., Чернявский А. Ж. Использование автодинных приемопередающих модулей на диодах Ганна для определения деформаций лопаток турбомашин. 11-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер; 2001. С. 654–656.
19. Грецков, А.А. Доплеровские преобразователи перемещений элементов вращающихся узлов турбоагрегатов: диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. – Самара, СНИУ им. С.П. Королёва, 2016. – 147 с.

20. Мирсаитов, Ф.Н. Радиолокационный метод функциональной диагностики ротора газотурбинного авиадвигателя: диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. – Екатеринбург, УрФУ, 2014. – 192 с.
21. Болознев В.В., Мирсаитов Ф.Н., Носков В.Я. Сигнальные и шумовые характеристики автодинов в решении задач вибродиагностики газотурбинных двигателей. 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2014. С. 1019–1022.
22. Григорин-Рябов, Вериго А.М., Шелухин О.И., Шелухин В.И.. Радиотехнические железнодорожные устройства. – М.: Транспорт, 1986. – 160 с.
23. Использование радара для измерения пройденного пути и скорости (обзор). Железные дороги мира. 2000. № 10. С. 51–56.
24. Lazarus, M.J., Pantoja FP., Somekh M. at all. New direction-of-motion Doppler detector. Electronics Letters. 1980. V. 16. No. 25. P. 953–954.
25. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Автодинный радиолокатор с определением направления движения отражающих объектов. 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2006. С. 888–890.
26. Yasuda A., Kuwashima S., Kanai Y. A shipborne-type wave-height meter for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1985. V. 10. No. 2. P. 138–143.
27. 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. V. 76. No. 16. P. 1463–1475.
28. Носков В.Я. Двухдиодный автодинный приёмопередатчик. Приборы и техника эксперимента. 2015. № 4. С. 65–70.
29. 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.

30. 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.
31. Ветрова Ю. В., Дорошенко А. А., Постельга А. Э., Усанов Д. А. Дистанционный контроль движения поверхности объекта с использованием двухканального СВЧ автодинного генератора. Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 4. С. 387–395.
32. Jefford, P. A., Howes, M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. IEEE Transaction of Microwave Theory and Technique. 1985. V. 31. No. 8. P. 613–624.
33. Носков, В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 6. Исследования радиоимпульсных автодинов. Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 6. С. 3–51.
34. Носков В.Я., Смольский С.М. Гибридно-интегральные автодины миллиметрового диапазона с амплитудной модуляцией. Труды III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ РАН. 2009. С. 792–810.
35. Носков В. Я., Смольский С. М. Особенности автодинного отклика в синхронизированных генераторах с амплитудной модуляцией. Радиотехнические тетради. – М.: МЭИ-ТУ, 2010. № 41. С. 43–51.
36. Коган, И.М. Теория информации и проблемы ближней радиолокации.– М.: Советское радио, 1968. – 144 с.
37. Носков, В.Я., Смольский С.М. Автодинный эффект в генераторах с амплитудной модуляцией. Радиотехника. 2011. № 2. С. 21–36.
38. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Приёмопередающие модули на слаботочных диодах Ганна для автодинных систем. Электронная техника. Серия. СВЧ-техника. 1993. № 4. С. 70–72.
39. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового

- диапазонов и их применение. Ч. 1. Конструкторско-технологические достижения. Успехи современной радиоэлектроники. 2006. №12. С. 3–30.
40. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Применение внешней синхронизации для исследования внутренних свойств СВЧ генераторов по их автодинным характеристикам. Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 9/2. С. 159–163.
 41. Бородовский П. А., Булдыгин А. Ф., Уткин К. К. Автодинный смеситель на диоде Ганна. Известия вузов. Радиоэлектроника. 1974. № 12. С. 82–84.
 42. Носков В.Я. Анализ автодинного генератора с цепью автосмещения второго порядка. Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. 1992. № 1. С. 8–10.
 43. Острейковский А.В. О повышении автодинной чувствительности генератора на диоде Ганна. Электродинамика и физика СВЧ. – Днепропетровск: ДГУ. 1985. С. 6–8.
 44. Острейковский А.В. Особенности низкочастотной неустойчивости генераторов Ганна. Радиотехника. 1989. № 6. С. 19–22.
 45. Барташевский Е.Л., Острейковский А.В., Привалов Е.Н., Хоменко В.И.. Способ настройки автодинного генератора на диоде Ганна. Авт. свидет. SU1246859. Заявл. 04.01.1984.
 46. Труфакин Э.В. Особенности работы СВЧ генератора на диоде Ганна при одновременном возбуждении в нем НЧ и СВЧ колебаний: диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. – Саратов: СГУ, 2002. – 110 с.
 47. Острейковский А.В. Применение автомодуляции в автодинных СВЧ генераторах ММ-диапазона. 13-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2003. С. 170–171.
 48. Armstrong В.М., Brown R., Rix F., Stewart J.A.C. Use of microstrip impedance-measurement technique in the design of a BARITT duplex Doppler sensor. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1980. V. 28. No. 12. P. 1437–1442.
 49. Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. Автодинные датчики для железнодорожных поездов. 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-

- техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2010. С. 1072-1076.
50. Носков, В.Я. Радиолокационный датчик для автономной системы управления грузовым парашютом. Радиотехнические системы (навигации, связи), средства измерения и новые информационные технологии. – Красноярск, 1992. Ч. 2. С. 56-57.
51. Смольский С.М., Соловьев М.А. Малосигнальная теория транзисторного автодина с частотной модуляцией. Радиопередающие и радиоприемные устройства. – М.: Труды МЭИ. 1977. № 317. С. 12–14.
52. Смольский С.М., Воторопин С.Д., Савков Н.Н., Плещеев В.И., Трофилеев А.А., Остапенков П.С., Федотов А.М.. Автодинные ЧМ-локаторы КВЧ-диапазона с непрерывным излучением. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. Одесса, Украина. 2005. Т. 55. № 1. С. 7–13.
53. Igor V. Komarov, Sergey M. Smolskiy. Fundamentals of Short-Range FM Radar. – Artech House, Norwood, MA, USA 2003. – 289 p.
54. Закарлюк Н.М. Спектр автодинного отклика генератора с частотной модуляцией. Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. – Харьков: ИРЭ АН Украины, 1991. С. 56–65.
55. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Особенности сигнала автодинного радиолокатора с ЛЧМ. 2-я ВНТК «Радиовысотометрия-2007». – Екатеринбург: ИД «Третья столица», 2007. С. 262–267.
56. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Анализ автодинного эффекта генераторов с линейной частотной модуляцией. Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 6. С. 54-60.
57. Varavin A.V., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Popov I.V. Autodyne Gunn-Diode Transceiver with Internal Signal Detection for Short-Range Linear FM Radar Sensor. Telecommunication and Radio Engineering. 2010. V. 69. No. 5. P. 451-458.
58. Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Попов И.В. Автодинный радиолокатор миллиметрового диапазона с линейной модуляцией частоты. 18-я Международная

- Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2008. С. 807-808.
59. Варавин, А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Попов И.В. Автодинный приёмо-передающий модуль на диоде Ганна с внутренним детектированием сигнала для радиолокационного датчика с линейной модуляцией частоты. Радиофизика и электроника. Харьков. 2008. Т. 13. № 3. С. 546-551.
60. Остапенков П. С. Радиосигналы с комбинированной частотно-амплитудной модуляцией для быстродействующих радиотехнических устройств: диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Москва: МЭИ, 2006. 207 с.
61. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Исследования сигналов ПАМ в автодинных СБРЛ с ЧМ на диодах Ганна миллиметрового диапазона. 14-я МНТК «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC–2008). – Воронеж, 2008. Т. 3. С. 1892–1898.
62. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Сигналы автодинных СБРЛ с одновременной импульсной и частотной модуляцией. 14-я МНТК «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC–2008). – Воронеж, 2008. Т. 3. С. 1882–1891.
63. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Анализ автодинного эффекта радиоимпульсного генератора с частотной модуляцией. Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 7. С. 80–89.
64. Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 6. Исследования радиоимпульсных автодинов. Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 6. С. 3–51.
65. 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. V. 75. № 17. P. 1551–1566.
66. Ignatkov K.A., Noskov V.Ya., Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Signals from a moving object of autodyne radars with linear frequency modulation. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org). Proceedings of the 3rd

- International Young Scientists Conference on Information Technologies, Telecommunications and Control Systems 2016 (ITTCS 2016), UrFU, Institute of Social and Political Sciences. – Yekaterinburg, Russia, 2016. V. 1909. P. 61–73.
67. 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, Seriy Radiotekh. radioaparatorobuduv.* 2016. № 67. P. 50–57.
68. 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.
69. Kryzhanovskyi 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.
70. 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.
71. 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.
72. 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 and Submillimeter Waves (MSMW'16).* Kharkov, Ukraine, 2016. A-9.
73. 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 and Submillimeter Waves (MSMW'16).* Kharkov, Ukraine, 2016. A-10.

74. 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.
75. Физика быстропротекающих процессов. Перевод под ред. Н.А. Златина. Том 1. – М.: Мир. 1971. – 519 с.
76. Поршнева С.В. Радиолокационные методы измерений экспериментальной баллистики. – Екатеринбург: УрО РАН. 1999. – 211 с.
77. Лушев В.П., Воторопин С.Д., Дерябин Ю.Н. и др. Автодинные СВЧ датчики перемещения для измерения скорости горения высокоэнергетических композиционных материалов. 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер. 2005. С. 831–833.
78. Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. Бортовые автодинные датчики скорости для аэробаллистических испытаний. 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2010. С. 1065–1068.
79. Гершензон Е.М., Туманов Б.Н., Бузыкин В.Т. и др. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах. Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 1. С.104–112.
80. Носков В.Я. Динамические особенности автодинного отклика СВЧ генератора. Известия вузов. Радиоэлектроника. 1992. Т. 35. № 9. С. 9–16.
81. Носков В.Я., Игнатков К.А. Влияние внутренних параметров автодинных СВЧ генераторов на их динамические характеристики. Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2012. № 3. С. 23–40.
82. Берштейн И.Л. Об одной схеме с автомодуляцией. Радиотехника. 1946. Т. 1. № 9. С. 63–66.
83. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 7. Динамика формирования автодинных и

- модуляционных характеристик. Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 3–52.
84. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Dynamic Autodyne and Modulation Characteristics of Microwave Oscillators. Telecommunication and Radio Engineering. 2013. V. 72. No. 10. P. 919–934.
85. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Autodyne signals in case of random delay time of the reflected radiation. Telecommunication and Radio Engineering. 2013. V. 72. No. 16. P. 1521–1536.
86. Носков В.Я., Игнатков К.А. Динамические особенности автодинных сигналов. Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 4. С. 56–64.
87. Page C.H., Astin A.V. Survey of Proximity Fuze Development. American Journal of Physics. 1947. V. 15. № 2. P. 95–110.
88. Носков В.Я., Игнатков К.А. Экспериментальные исследования автодинных и модуляционных характеристик СВЧ генераторов. 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2012. С. 891–892.
89. Носков В.Я., Игнатков К.А. Характеристики СВЧ генераторов при модуляции коэффициента отражения. 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2012. С. 887–888.
90. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Автодинный сигнал при модуляции величины коэффициента отражения. 17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2007. С. 748–750.
91. Носков В.Я., Игнатков К.А. Характеристики СВЧ генераторов при модуляции по цепи питания. 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер. 2012. С. 889–890.
92. Алексеев Ю.И. Автодинный частотный преобразователь миллиметрового диапазона. Радиотехника. 2003. № 2. С. 76–78.

93. Минаев М.И., Ценципер Б.Л. Исследование автодинного смесителя частоты на диоде Ганна с большим динамическим диапазоном изменения мощности внешнего сигнала. *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. 1987. №. 4. С. 30–33.
94. Минаев М.И. Низкочастотный спектр автодинного преобразователя частоты. *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. 1989. №. 7. С. 12–14.
95. Носков В.Я., Богатырев Е.В., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Уральский радиотехнический журнал*. 2020. Т. 4. № 2. С. 127–166.
96. Noskov V.Ya., Ermak G.P., Bogatyrev E.V., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. The influence of accompanying AM on the formation of signals from autodyne short-range sensors with FM. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2020. V. 79. No. 16, p. 1397-1424. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i16.10
97. 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. V. 79. No. 6. P. 493–508. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i6.40
98. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Mathematical model of the autodyne for analysis of its noise characteristics at the high speed of targets' motion. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2020. Yekaterinburg, Russia. 4 p. DOI: 10.1109/USBREIT48449.2020.9117765 (IEEE Conference Paper)
99. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D., Ermak G.P., Vasiliev A.S. Calculation of signal and noise characteristics of an autodyne at high speed of targets' motion. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2020. Yekaterinburg, Russia. 4 p. DOI: 10.1109/USBREIT48449.2020.9117778 (IEEE Conference Paper)
100. Fatieiev A., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D., Ermak G.P., Varavin A.V. Autodyne Response Formation in Injection-Locked Microwave Oscillators. 2020 IEEE

- Ukrainian Microwave Week. Vol. 3. 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), (2020 IEEE Ukrainian Microwave Week Kharkiv, Ukraine, September 21–25, p. 884–887. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252739 (IEEE Conference Paper)
101. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Математическая модель автодина с комбинированной амплитудно-частотной модуляцией излучения. 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). – Севастополь, СевГУ, 2020. С. 384–385.
102. Гершензон Е.М., Левит Б.И., Носков В.Я., Туманов Б.Н. Автодинный эффект в двухчастотных генераторах. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1983. № 11. С.11–16.
103. Носков В.Я. Автодинный эффект в многочастотных автогенераторах. Известия вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 9. С. 778–789.
104. Kittipute, K., Saratayon, P., Srisook, S., and Wardkein, P. Homodyne detection of short-range Doppler radar using a forced oscillator model, Scientific Reports. 2017. V. 7. Article number: 43680.
105. 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.
106. Kotani M., Mitsui S., Shirahata K. Load-variation detector characteristics of a detector-diode loaded Gunn oscillator. Electronics and Communications in Japan. 1975. V. 58-B. No. 5. P. 60–66.
107. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука: 1974. – 504 с.
108. Бычков С.И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. – М.: Советское радио, 1967. – 216 с.
109. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах.– М.: Наука, 1968. – 660 с.

110. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Электровacuумные приборы СВЧ. Том 2. – М.: Высшая школа, 1972.– 376 с.
111. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. Proceedings of the IEEE. 1973. V. 61. No. 10. P. 1386–1410.
112. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. Радиотехника. 2012. № 6. С. 24–42.
113. Гершензон Е. М., Калыгина В. М., Левит Б. И., Туманов Б. Н. Резонанс релаксационных колебаний в автодинных генераторах. Известия вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 8. С. 1028–1034.
114. Носков В.Я., Игнатков К.А. О применимости квазистатического метода анализа автодинных систем. Известия вузов. Радиоэлектроника. 2014. Т. 57. № 3. С. 44–56.
115. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи. Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 12. С. 112–124.
116. Митропольский Ю.А., Мартынюк Д.И. Периодические и квазипериодические колебания систем с запаздыванием. – Киев: Вища школа, 1979. – 248 с.
117. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Расчет автодинного отклика амплитудно-модулированного СВЧ генератора при наличии частотной модуляции излучения. 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). – Севастополь, СевГУ, 2020. С. 386–387.
118. Носков В.Я., Смольский С.М., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Отклик автодина с частотной модуляцией при наличии паразитных изменений амплитуды колебаний. 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). – Севастополь, СевГУ, 2020. С. 388–389.
119. Woodyard J. R. Radio system for distance and velocity measurement. Pat. US2424263, filed Feb. 23, 1943.

120. Шаров Ю.В., Кислов О.А. Об одном способе измерения малых дальностей. Радиоприёмные устройства. – М.: МЭИ, 1972. № 110. С. 63–67.
121. Разгоняев Ю.В. Об определении расстояния до движущегося объекта рециркуляционным методом. Методы и устройства формирования и обработки сигналов. – М.: Труды МЭИ, 1979. Вып. 418. С. 21–24.
122. Sutphin E. Self-Modulating Remote Moving Target Detector. Patent US6633254B1, Date of Patent Oct. 14, 2003.
123. Атаянц Б. А., Давыдочкин В. М., Езерский В. В., Паршин В. С., Смольский С. М. Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения. – М.: Радиотехника; 2012. – 505 с.
124. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Результаты экспериментальных исследований автодина на диоде Ганна с амплитудно-частотной модуляцией. 30-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). – Севастополь, СевГУ, 2020. С. 390–391.
125. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 8. Автодины со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором. Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 12. С. 3–42.
126. 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.
Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Autodyne Effect in Microwave Oscillators with Injection Locking. Journal of Communications Technology and Electronics. 2020. V. 65. № 6. P. 651–658. 0,5 п.л. / 0,15 п.л. (Scopus, Web of Science). DOI: 10.1134/S1064226920050113
127. 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.
128. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Autodyne Signal Features of Frequency-

- Locked Microwave Oscillators. ITM Web of Conferences. 2019.Vol. 30. DOI: 10.1051/itmconf/20193012012 (Proceedings Paper)
129. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Dynamic Characteristics of Frequency-Locked Autodynes. ITM Web of Conferences. 2019. Vol. 30. DOI: 10.1051/itmconf/20193012009 (Proceedings Paper)
130. Ermak G.P., Vasiliev A.S., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Autodyne Response of Injection-Locked Microwave Oscillators for Changing Output Power. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia. 2020. 4 p. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166074 (Proceedings Paper)
131. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D., Ermak G.P., Varavin A.V. Autodyne Radar Signals in the Presence of Asynchronous Influence. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia. 2020. 4 p. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166065 (Proceedings Paper)
132. Noskov V.Ya., Ermak G.P., Vasiliev A.S., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Features of noise characteristics of frequency-modulated autodyne radars. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. Vol. 2. 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2020), (2020 IEEE Ukrainian Microwave Week Kharkiv, Ukraine, September 21–25), p. 245–248. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252576 (IEEE Conference Paper)
133. Калмыков А.А., Шайдуров К.Д. Схема подавления сигнала прямого прохождения в ЛЧМ георадаре. 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2017). – Севастополь, 2017. С. 160.
134. Калмыков А.А., Шайдуров К.Д. Моделирование схемы подавления сигнала прямого прохождения в ЛЧМ георадаре. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках форума молодых ученых «ИТ: глобальные вызовы и новые решения». – Москва, 2017. С. 245–255.
135. Kalmykov An. A., Shaidurov K. D. Evaluating the performance of several types of

- antennas in a holographic radar with continuous wave. 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. 2014. Conference Paper 14772406. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959830 (IEEE Conference Paper)
136. Головин В.И., Наговицын В.С., Ципп А.Л., Калмыков А.А., Калмыков А.А., Шайдуров К.Д. Способ путевой навигации и обзора передней полусферы локомотива по геометрии железнодорожного пути. Патент на изобретение RU2679491C1, 11.02.2019. Заявка № 2018100852 от 10.01.2018.
137. Головин В.И., Наговицын В.С., Ципп А.Л., Калмыков А.А., Калмыков А.А., Шайдуров К.Д. Способ путевой навигации и измерения скорости локомотива по геометрии железнодорожного пути. Патент на изобретение RU2679268C1, 06.02.2019. Заявка № 2017139680 от 14.11.2017.
138. Хотунцев, Ю.Л., Тамарчак Д.Я. Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах. – М.: Радио и связь. 1982. – 240 с.
139. Smith P.G. Leakage Rejection in Beam-Switched CW Radars. IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics. 1962. V. ANE-9. No. 4. P. 241–250.
140. Li, Zhaolong, Wu K. On the leakage of FMCW radar front-end receiver. Global Symposium on Millimeter Waves. Proceeding, GSMM 2008. 127–130.
141. Борисов А.В., Поздняков Е.С. Исследование возможности применения компенсационного метода расширения динамического диапазона в ММО-системах радиовидения. 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2016. С. 2125–2131.
142. Кузнецов П.В. Адаптивное увеличение динамического диапазона цифрового приемника. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. Т. 1. № 1. С. 62–71.
143. Noskov V.Ya., Shaidurov K.D. Near-Field Modelling of the Leaky-Wave Antenna. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), 2020, Yekaterinburg, Russia, 4 p. DOI: 10.1109/USBREIT48449.2020.9117779 (IEEE Conference Paper)
144. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Оценка погрешности бортового

радиолокационного датчика скорости с протяженной антенной вытекающей волны. 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019). – Севастополь, СевГУ, 2019. С. 157–158.

145. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Shaidurov K.D. Frequency Deviation of Injection-Locked Microwave Autodynes. *Radioengineering*. 2019. V. 28. № 4. P. 721–728. DOI: 10.13164/re.2019.0721
146. Song B.-S., Itoh T. Distributed Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1979. V. 27. No. 12. P. 1019–1022.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Первые страницы описаний к патентам РФ на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 679 268**⁽¹³⁾ **C1**
 (51) МПК
G01P 3/64 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01P 3/64 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017139680, 14.11.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 14.11.2017

Дата регистрации:
 06.02.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.11.2017

(45) Опубликовано: 06.02.2019 Бюл. № 4

Адрес для переписки:
 620103, г. Екатеринбург, ОПС - 103, Окружная
 - 8, а/я 13, Дудину Дмитрию Николаевичу

(72) Автор(ы):

Головин Владимир Иванович (RU),
 Наговицын Виктор Степанович (RU),
 Ципп Андрей Леонардович (RU),
 Калмыков Алексей Андреевич (RU),
 Калмыков Андрей Алексеевич (RU),
 Шайдуров Кирилл Дмитриевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
 "Научно-производственное объединение
 САУТ" (ООО "НПО САУТ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2378654 C1, 10.01.2010. RU
 2280580 C2, 27.07.2006. RU 101839 U1,
 27.01.2011. WO 1980001418 A1, 10.07.1980.

(54) СПОСОБ ПУТЕВОЙ НАВИГАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЛОКОМОТИВА ПО
 ГЕОМЕТРИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения основных параметров движения локомотива (состава) по железнодорожной дороге (ЖД). Сущность изобретения заключается в том, что используется РЛС малой дальности с высоким разрешением по дальности за счет использования широкополосных зондирующих

сигналов, а в качестве реперов отражающей поверхности используются подкладки с болтами для крепления рельсов к шпалам или к специальному основанию по всей длине пути. Технический результат – повышение точности измерения параметров движения. 1 з.п. ф-лы, 2 ил.

RU 2 679 268 C1

RU 2 679 268 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 679 491**⁽¹³⁾ **C1**
 (51) МПК
G01S 13/88 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01S 13/88 (2006.01); *G01S 13/04* (2006.01); *G01S 13/50* (2006.01); *G01S 13/58* (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2018100852, 10.01.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.01.2018

Дата регистрации:
11.02.2019

Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 10.01.2018

(45) Опубликовано: 11.02.2019 Бюл. № 5

Адрес для переписки:
 620103, г. Екатеринбург, ОПС-103, Окружная
 - 8, а/я 13, Дудину Дмитрию Николаевичу

(72) Автор(ы):

Головин Владимир Иванович (RU),
 Наговицын Виктор Степанович (RU),
 Ципп Андрей Леонардович (RU),
 Калмыков Алексей Андреевич (RU),
 Калмыков Андрей Алексеевич (RU),
 Шайдуров Кирилл Дмитриевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
 "Научно-производственное объединение
 САУТ" (ООО "НПО САУТ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: CARLSON G. Horisjn profile
 checkpoint for low-altitude aircraft. IEEE
 Transaction jn Aerospace and Electronic
 Systems, 1976, v.AES-12, N2. RU 116862 U1,
 10.06.2012. RU 2145423 C1, 10.02.2000. RU
 2579606 C1, 10.04.2016. RU 89250 U1,
 27.11.2009. GB 2127543 A, 11.04.1984. WO
 2005119630 A1, 15.12.2005.

(54) СПОСОБ ПУТЕВОЙ НАВИГАЦИИ И ОБЗОРА ПЕРЕДНЕЙ ПОЛУСФЕРЫ ЛОКОМОТИВА ПО ГЕОМЕТРИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к радиотехнике, а именно к радиолокации, и может быть использовано на железных дорогах (ж/д) для определения параметров движения локомотива, таких как мгновенная скорость, пройденный путь от начала движения, количество пройденных шпал и координаты нахождения локомотива в данный момент времени, и контроля дорожной обстановки перед локомотивом на расстоянии до одного-двух километров, особенно при возможности возникновения внештатных

ситуаций. Достижимый технический результат - повышение точности и достоверности измерения параметров движения. Технический результат достигается за счет применения: радиолокации малой дальности; четырех каналов измерения по два последовательных на каждый монорельс; широкополосных зондирующих сигналов с высоким разрешением по дальности; оптимальной обработки отраженных сигналов. 3 з.п. ф-лы, 5 ил.

RU 2 679 491 C 1

RU 2 679 491 C 1