

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(БГУИР)

УДК 621.317.61:621.396.62
№ госрегистрации 20113911
Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе БГУИР
д-р техн. наук, проф.
_____ А.П. Кузнецов
« ____ » _____ 2013 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЕМНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
МАЛЫХ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕННОСТИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ»

(заключительный)

ГБЦ № 11-3077

Науч. руководитель _____ Н.М. Наумович

Отв. исполнитель _____ В. Т. Ревин

Минск 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Науч. руководитель,
зав. НИЛ 1.6,
канд. техн. наук

Н.М. Наумович
(общая редакция отчета,
реферат, введение,
заключение)

Отв. исполнитель,
канд. техн. наук,
доцент

В.Т. Ревин
(главы 1, 2, 3, 5
приложения А, Б.)

Исполнители темы:

Ст. науч. сотр.,
канд. техн. наук

В.И. Журавлев
(глава 2, приложение Г)

Мл. науч. сотр.

В.В. Кизименко
(глава 1, 3, прил. А)

Мл. науч. сотр.

А.П. Юбко
(глава 4)

Аспирант

О.А. Муравьев
(глава 5, прил. Б)

Магистрант

А.А. Бурак
(глава 1,3)

Студент

Ю.С. Алькевич
(глава 1. 5, прил. В)

Студент

М.А. Грицель
(глава 1, 4)

Студент

С.Л. Лазакович
(глава 1. 5)

Студент

О.С. Мальцев
(глава 3)

Студент

В.А. Симоненко
(глава 2, 5)

Нормоконтролер

Л.А. Шичко

РЕФЕРАТ

Отчет 96 с., 32 рис. 12 табл., 26 источников, 4 приложения

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК, АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА, АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом разработки является разработка и исследование приемного устройства миллиметрового диапазонов длин волн для измерения малых уровней мощности и напряженности электромагнитного поля.

Цель работы: разработка СВЧ узлов, структурных и принципиальных схем, алгоритмов работы, разработка, настройка и проведение экспериментальных исследований приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн.

В результате проведенной работы разработаны:

- структурная схема приемного устройства миллиметрового диапазона, предназначенного для измерения малых уровней мощности и напряженности электромагнитного поля;
- алгоритм функционирования приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн;
- СВЧ узлы приемного устройства (рупорная антенна, смеситель на основной частоте гетеродина, ПУПЧ, полосовые фильтры);
- программное обеспечение управления гетеродином, обработки измерительного сигнала и отображения информации;
- проведены предварительные испытания приемного устройства миллиметрового диапазона.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Современное состояние развития измерительной аппаратуры для измерения частоты и уровней сигналов	9
1.1 Измерительный приемник	9
1.2 Анализатор спектра	19
1.3 Селективные вольтметры	26
2 Измерительное приемное устройство миллиметрового диапазона.	30
Обоснование принципа действия	
2.1 Векторный анализатор сигналов <i>NI PHe-5663</i>	38
3 Алгоритм функционирования измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона	46
4 Программа и методика метрологической аттестации измерительного приемного устройства	52
4.1 Вводная часть	52
4.2 Рассмотрение технической документации	53
4.3 Экспериментальные исследования	54
5 Экспериментальные исследования измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона	68
Заключение	77
Список используемых источников	79
Приложение А. Справка об известном нормативном обеспечении разработки	82
Приложение Б. Форма протокола	83
Приложение В. Форма свидетельства о метрологической аттестации	85
Приложение Г. Описание программного обеспечения для управления генератором сигналов качающейся частоты	86

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АС – анализатор спектра
Атт – аттенюатор
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
БУ – блок управления
ВУ – входное устройство
ВЧ – высокая частота
Г – гетеродин
ГКЧ – генератор качающейся частоты
ГПЧ – генератор промежуточной частоты
ГР – генератор развертки
ГТИ – генератор тактовых импульсов
ГУН – генератор, управляемый напряжением
ГШ – генератор шума
Д – демодулятор
ЗГ – задающий генератор
ЗИ – знаковый индикатор
ИУ – индикаторное устройство
К – коммутатор
КЛ – ключ
ЛЗ – линия задержки
МА – метрологическая аттестация
МХ – метрологическая характеристика
НД – нормативная документация
НДС – налог на добавленную стоимость
НР – научный руководитель
ОГ – опорный генератор
ОИ – ответственный исполнитель
ПК – персональный компьютер
ПМА – программа и методика метрологической аттестации
ПрУ – приемное устройство
ПФ – полосовой фильтр
ПЧ – промежуточная частота
РЛС – радиолокационная станция
РМ – рабочее место
РУ – регистрирующее устройство
СВЧ – сверхвысокая частота
СИ – средство измерения
СМ – смеситель
СП – синхронный переключатель
СЧ – счетчик
ТЗ – техническое задание
УВО – усилитель вертикального отклонения
УГО – усилитель горизонтального отклонения

УПЧ – усилитель промежуточной частоты
УУ – устройство управления
УЧМ – усилитель частоты модуляции
ФД – фазовый детектор
ФНЧ – фильтр низких частот
ФПЧ – фильтр промежуточной частоты
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь
ЧМГ – частотно модулированный гетеродин
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка
ЭМС – электромагнитная совместимость
ЭП – электронный переключатель

Библиотека БГУИР

ВВЕДЕНИЕ

Анализ современного состояния измерительного оборудования, выпускаемого в нашей стране и за рубежом [1, 2], показал, что в трехмиллиметровом диапазоне длин волн отсутствуют измерительные приемники, позволяющие производить измерения частоты и мощности малых уровней входного сигнала. Более того, в настоящее время отсутствуют генераторы трехмиллиметрового диапазона длин волн, позволяющие обеспечить электрическую перестройку частоты в диапазоне от 78,33 до 118,1 ГГц для использования в тракте гетеродина измерительного приемника. Погрешность установки частоты выходного сигнала в серийных генераторах трехмиллиметрового диапазона длин волн не удовлетворяет требованиям технического задания. Это обстоятельство приводит к необходимости разработки нестандартных технических решений для построения измерительных приемных устройств.

Анализ современного состояния элементной базы в диапазоне частот до 110 ГГц показал [3], что в настоящее время имеется большая номенклатура комплектующих изделий, позволяющих произвести разработку и изготовление синтезаторов частот в диапазоне до 18 ГГц. Для использования таких синтезаторов в разрабатываемом приемном устройстве необходима разработка умножителей частоты в качестве источников гетеродинного сигнала. Широкополосные умножители частоты имеют небольшие значения выходной мощности в диапазоне частот 78 – 118 ГГц. Поэтому при разработке и изготовлении макета приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн принято решение использовать линейку источников гетеродинного сигнала, имеющих определенный сдвиг по частоте., а в совокупности перекрывающие весь частотный диапазон.

Разработка всех элементов приемного устройств миллиметрового диапазонов длин волн для измерения малых уровней мощности и

напряженности электромагнитного поля проведена в лаборатории «Радиотехнические устройства СВЧ и КВЧ диапазонов» НИЛ 1.6 БГУИР.

Библиотека БГУИР

1 Современное состояние развития измерительной аппаратуры для измерения частоты и уровней сигналов

Для измерения уровня сигнала на определенной частоте могут использоваться измерительный приемник, анализатор спектра и измеритель уровня.

1.1 Измерительный приемник

Измерительный приемник – радиоприемник с нормированными метрологическими характеристиками измерения уровня и частоты радиосигналов. Основное назначение их – селективное измерение напряжения или мощности слабых сигналов, у многих современных приемников есть также дополнительные функции, например: анализ спектра сигнала, измерение параметров модулированных сигналов, сканирование по диапазону частот с целью выявления каналов, на которых ведется передача или для отслеживания помех. Для определения параметров радиоизлучения в пространстве, измерительный приемник используется совместно с измерительными антеннами. От измерительных приемников следует отличать приёмник-компаратор и приёмник сигналов точного времени, которые не измеряют параметры радиосигнала, а принимают измерительную информацию, передаваемую специальными радиостанциями [4].

Область применения измерительных приёмников:

- измерение уровня полезных сигналов и радиопомех;
- точное измерение частот;
- радиоконтроль и радиоразведка;
- анализ электромагнитной обстановки;
- анализ эксплуатационных характеристик сетей радиосвязи;
- отслеживание использования каналов и диапазонов частот;
- работа в составе измерительных систем в комплексе с измерительными антеннами;
- работа в составе подвижных лабораторий контроля электромагнитной совместимости.

Измерительные приёмники построены по принципу приёмников супергетеродинного типа, поскольку они должны иметь большую чувствительность и высокую селективность. По исполнению измерительные приёмники бывают стационарные, носимые и предназначенные для передвижных лабораторий. По способу обработки и представления измерительной информации приёмники разделяются на аналоговые и цифровые.

Для выполнения задач радиоконтроля в части анализа загрузки радиодиапазона, измерения напряженности поля и параметров радиосигналов используются разные виды оборудования, в том числе сканирующие радиоприемные устройства (РПУ), селективные микровольтметры, цифровые анализаторы спектра, панорамные радиоприемные устройства, панорамные измерительные приемники. В таблице 1.1 приведены некоторые отличительные признаки указанных приборов.

Таблица 1.1 – Отличительные признаки измерительного оборудования, используемого для радиоконтроля

Наименование оборудования	Ширина полосы пропускания	Отображение спектров	Наличие калибровки	Измерение параметров сигналов
Сканирующий радиоприемник	определяется полосами сигналов, для приема которых предназначен приемник	обычно – нет	нет	нет
Селективный микровольтметр	настраиваемая	обычно – нет	да	да

Продолжение таблицы 1.1

Наименование оборудования	Ширина полосы пропускания	Отображение спектров	Наличие калибровки	Измерение параметров сигналов
Анализатор спектра	обычно настраиваемая	да	обычно – да	да
Панорамный радиоприемник	широкая (обычно от сотен килогерц до десятков мегагерц)	да	нет	обычно – да
Панорамный измерительный радиоприемник	настраиваемая (от десятков герц до десятков мегагерц)	да	да	да

Для сканирующего приемника характерны высокие реальная чувствительность и избирательность, помехоустойчивость и надежность в условиях воздействия сильных импульсных, флуктуационных и сосредоточенных по спектру помех. Сканирующие радиоприемники используются в основном для измерения загрузки радиоканалов, их применение для измерений напряженности поля и параметров радиосигналов не рекомендуется, поскольку они не имеют стабильных метрологических характеристик.

Селективный микровольтметр – это измерительный прибор, снабженный перестраиваемым узкополосным фильтром и благодаря этому измеряющий напряжение в полосе частот, вплоть до отдельных гармоник спектра сигнала. Наиболее совершенные селективные микровольтметры отличаются от

анализаторов спектра лишь ручной перестройкой и отсутствием панорамного отображения. Селективные микровольтметры позволяют измерять уровень сигналов на выходе антенного тракта в заданной полосе для широкого рабочего диапазона частот при условии согласования волновых сопротивлений антенного тракта и входа селективного вольтметра.

Анализатор спектра – универсальный измерительный прибор, предназначенный для исследования спектрального состава сигналов и измерения их параметров. Структура анализатора спектра обычно совпадает со структурой супергетеродинного приемника. При дополнительном подключении между антенной и входом первого смесителя фильтров предварительной селекции такой анализатор способен выполнять задачи панорамного измерительного радиоприемника.

Панорамный радиоприемник – это радиоприемное устройство с широкой полосой пропускания (от сотен килогерц до нескольких десятков мегагерц), с возможностью отображения спектрального состава сигналов и высокой скоростью спектрального анализа в рабочем диапазоне частот (от сотен мегагерц до десятков гигагерц в секунду), высокой селективностью по побочным каналам приема, высокой чувствительностью и линейностью характеристик. Панорамный приемник, как правило, имеет демодуляторы сигналов с АМ, ЧМ, ФМ, ОМ, возможность подключения к ПЭВМ.

Панорамный измерительный радиоприемник – это панорамный приемник с высокими метрологическими характеристиками измерения уровня, частоты и других необходимых параметров радиосигналов. В состав измерительного приемника, как правило, входит набор из пикового, квазипикового и среднеквадратического детекторов, предназначенный для измерения уровней сигналов. Панорамный измерительный приемник обычно обеспечивает при спектральном анализе сигналов частотное разрешение от нескольких герц до десятков килогерц и работает под управлением ПЭВМ.

В основном измерительные приемники построены по принципу приемников супергетеродинного типа, так как они должны иметь большую

чувствительность и высокую селективность. Приемники супергетеродинного типа основаны на принципе преобразования принимаемого сигнала в сигнал с фиксированной промежуточной частотой (ПЧ) с последующим его усилением и детектированием.

Упрощенная структурная схема супергетеродинного приемника с однократным преобразованием частоты показана на рисунке 1.1. Радиосигнал из антенны подается на вход усилителя высокой частоты (усилитель ВЧ), а затем на вход смесителя, осуществляющего операцию преобразования сигнала по частоте. На второй вход смесителя подается сигнал с локального малоомощного генератора высокой частоты – гетеродина. Колебательный контур гетеродина перестраивается одновременно с входным контуром смесителя – обычно конденсатором переменной емкости, реже катушкой переменной индуктивности. Таким образом, на выходе смесителя образуются сигналы с частотой, равной сумме и разности частот гетеродина и принимаемой радиостанции. Разностный сигнал постоянной промежуточной частоты выделяется с помощью полосового фильтра и усиливается в усилителе ПЧ, после чего поступает на демодулятор, восстанавливающий сигнал низкой частоты.

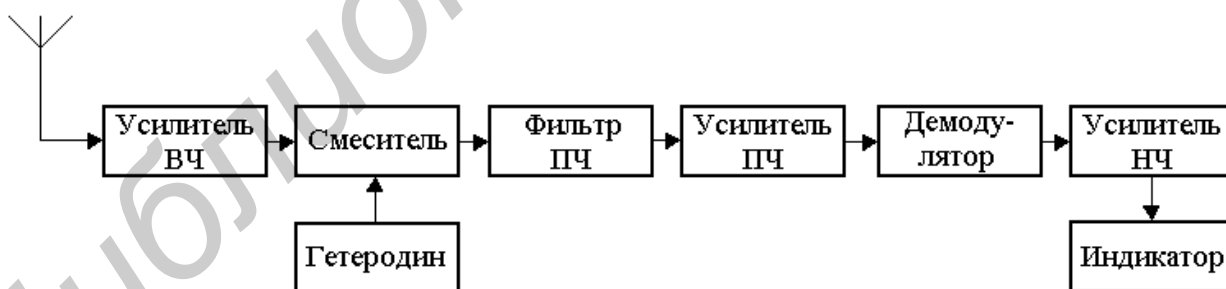


Рисунок 1.1 – Упрощенная структурная схема супергетеродинного приемника

Если в цепь демодулятора подключить вольтметр для измерения выходного напряжения промежуточной частоты, то получим супергетеродинный измерительный приемник. Обобщенная структурная схема такого приемника представлена на рисунке 1.2.

В связанных и высококлассных приемниках применяют двойное, а иногда тройное, преобразование частоты. Это решение позволяет получить высокая чувствительность и избирательность.

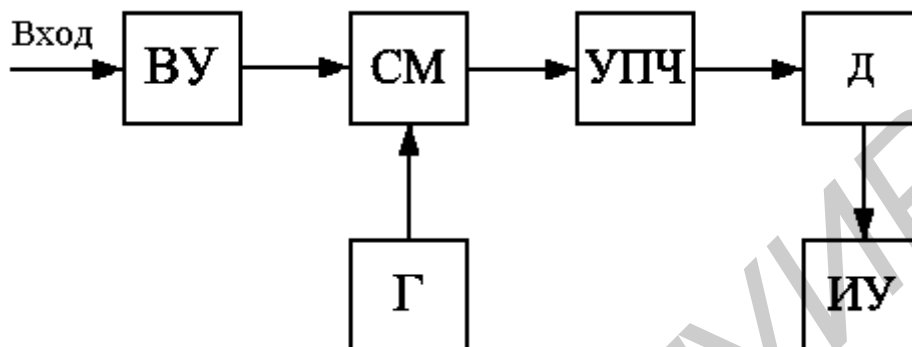


Рисунок 1.2 – Упрощенная структурная схема измерительного приемника

Примером измерительного приемника для сигналов СВЧ диапазона может служить измерительный приемник с модуляцией сигнала посредством электронного переключателя, представленный на рисунке 1.3 [5].

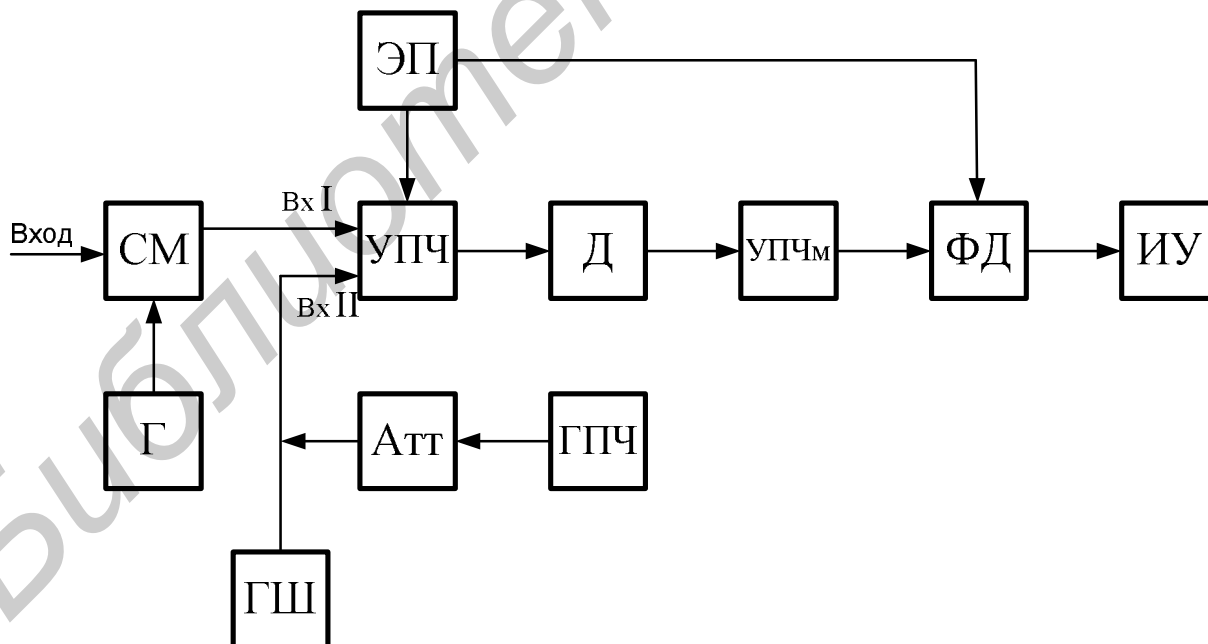


Рисунок 1.3 – Структурная схема измерительного приемника для сигналов СВЧ диапазона

Особенностью этого приемника служит применение шумового генератора, служащего для противофазной компенсации паразитной модуляции

собственных шумов приемника возникающих при модуляции сигнала на входе усилителя промежуточной частоты.

Основными узлами данного гетеродинного измерительного приемника являются гетеродин (Г), смеситель (СМ), усилитель промежуточной частоты (УПЧ), детектор (Д) и индикаторное устройство (ИУ).

Электронный переключатель (ЭП) попеременно со входов I и II подает сигналы на вход УПЧ. При неравенстве сигналов детектор на выходе УПЧ выделяет переменную составляющую сигнала на частоте модуляции. Импульсы напряжения с детектора через узкополосный усилитель поступают на фазовый детектор и вызывают отклонение нулевого индикатора.

Генератор шума (ГШ) предназначен для противофазной компенсации модуляции собственных шумов приемника.

Генератор промежуточной частоты (ГПЧ) с включенным на его выходе образцовым предельным аттенуатором предназначен для точного измерения перепада мощности на входе смесителя.

Еще одним примером может служить супергетеродинный измерительный приемник с компенсацией паразитной модуляции собственных шумов [6]. В предлагаемом супергетеродинном измерительном приемнике для уменьшения нестабильности компенсации паразитной модуляции шумов смесителя, в качестве источника шумов компенсационного канала, использованы шумы смесителя, не совмещенные со спектром сигнала. Для этого предварительный усилитель промежуточной частоты компенсационного канала выполнен на промежуточной частоте, отличной от промежуточной частоты основного канала, а для последующего совмещения промежуточных частот в нем установлен сдвигающий преобразователь частоты.

Структурная схема описываемого измерительного приемника изображена на рисунке 1.4.

СВЧ сигналы подаются на смеситель (СМ), используемый в качестве вспомогательного противофазно-модулированного источника шума. К гетеродинному входу смесителя подключен гетеродин (Г), служащий для

получения на выходе смесителя сигнала промежуточной частоты. Спектр шумов смесителя через синхронный переключатель (СП) поочередно поступает на входы различаемых по частоте предварительных усилителей промежуточной частоты ПрУ_1 и ПрУ_2 .

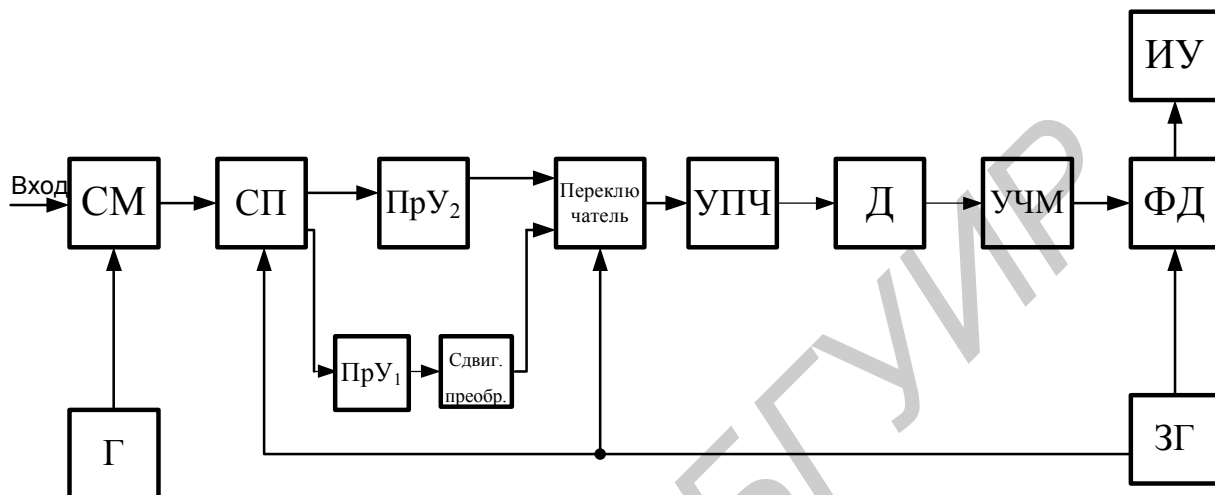


Рисунок 1.4 – Структурная схема супергетеродинного измерительного приемника

Предварительный усилитель ПрУ_1 промежуточной частоты компенсационного канала настроен на промежуточную частоту f_1 отличную от промежуточной частоты f_2 основного канала. Усиленные шумы с выходов предварительных усилителей через переключатель, синхронно работающий с синхронным переключателем СП, поочередно поступают на вход усилителя промежуточной частоты (УПЧ), настроенного на частоту предварительного усилителя промежуточной частоты ПрУ_2 . Для последующего совмещения промежуточных частот f_1 и f_2 , между выходом усилителя ПрУ_1 и входом переключателя установлен сдвигающий преобразователь, преобразующий шумы частоты f_2 , в шумы относительно частоты f_1 . Таким образом, на входы переключателя поступают шумы относительно одной и той же частоты f_1 . Регулируя коэффициент передачи сдвигающего преобразователя, добиваются равенства мощностей на входах переключателя, исключая паразитную модуляцию шумов смесителя по УПЧ. В качестве индикатора равенства мощностей шумов на входах переключателя служит индикаторное устройство,

нулевое положение стрелки которого характеризует отсутствие переменной составляющей частоты модуляции на выходе детектора, образующего совместно с усилителем промежуточной частоты, усилителем частоты модуляции (УЧМ), фазовым детектором измерительный приемник СВЧ диапазона. Для подачи напряжения на фазовый детектор и коммутации синхронных переключателей служит задающий генератор.

Примером приемника с двойным преобразованием частоты может служить СВЧ-приемник, структурная схема которого приведена на рисунке 1.5 [7].

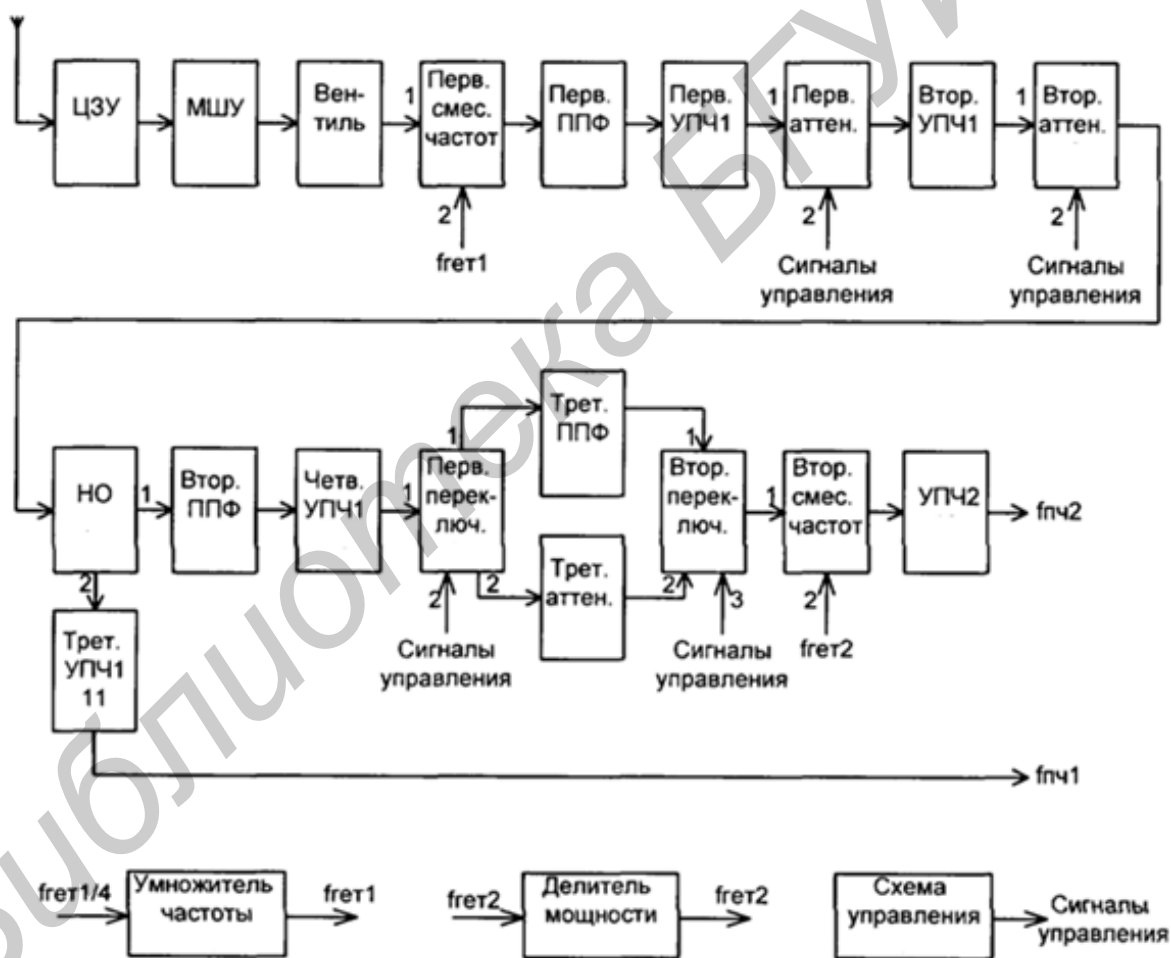


Рисунок 1.5 – Структурная схема СВЧ-приемника с двойным преобразованием частоты

Изобретение относится к радиотехнике, а именно к СВЧ-приемникам, применяемым в бортовых и наземных РЛС, в системах связи и навигации.

Достижимый технический результат – обеспечение быстродействующей автоматической защиты приемных каналов от воздействия мощных входных сигналов, расширение функциональных возможностей, улучшение технических характеристик СВЧ-приемника с двойным преобразованием частоты. Заявляемый СВЧ-приемник с двойным преобразованием частоты содержит n идентичных приемных каналов ($n > 1$), умножитель частоты, обеспечивающий формирование сигналов первого гетеродина для каждого приемного канала; делитель мощности, обеспечивающий формирование сигналов второго гетеродина для каждого приемного канала; схему управления, обеспечивающую управление работой аттенюаторов и переключателей каждого приемного канала.

В настоящее время на смену устаревшей аналоговой технике приходят цифровые панорамные измерительные приборы. При этом использование панорамных измерительных приемников для эфирного контроля источников радиоизлучения представляется наиболее предпочтительным, поскольку эти приборы разработаны непосредственно для целей радиоконтроля и имеют технические характеристики, обеспечивающие успешное решение задач по обнаружению радиосигналов и измерению их параметров: напряженности поля, ширины спектра, загрузки радиодиапазона, частоты и параметров модуляции.

Цифровое радиоприемное устройство – это устройство, в котором осуществляется обработка сигналов в аналоговой и цифровой формах [2]. К цифровым радиоприемным устройствам относят приборы, осуществляющие предварительную фильтрацию сигнала в аналоговом виде, его усиление, преобразование частоты сигнала на промежуточную частоту. Сигнал промежуточной частоты подвергается аналого-цифровому преобразованию, и вся дальнейшая обработка осуществляется в цифровом виде. Обобщенная структурная схема цифрового радиоприемного устройства включает в себя несколько функциональных блоков, приведенных на рисунке 1.6.

Усилительно-преобразовательный тракт принимает сигнал от антенны, отфильтровывает от помех, смещает спектр входного сигнала на

промежуточную частоту, на которой производится аналого-цифровое преобразование. В состав усилительно-преобразовательного тракта могут входить вспомогательные узлы – система автоматической регулировки усиления, аттенюаторы, ограничители, влияющие на амплитудную характеристику усилительного тракта, но не вносящие искажений в измерительную информацию.

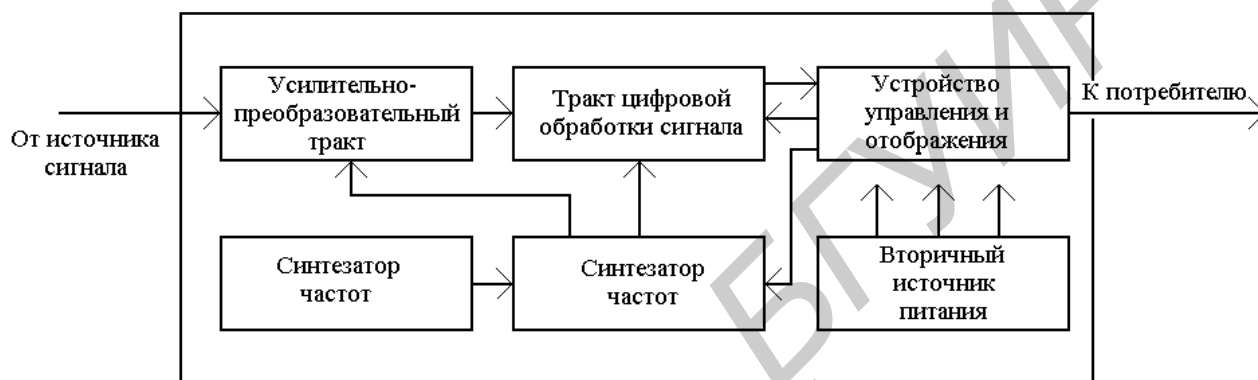


Рисунок 1.6 – Обобщенная структурная схема цифрового радиоприемного устройства

В тракте цифровой обработки сигналов (ЦОС) производится цифровая фильтрация, в значительной степени определяющая помехоустойчивость приемного устройства, цифровая демодуляция, цифровой спектральный анализ (ЦСА). Синтезатор частот преобразует частоту внешнего или собственного опорного генератора и формирует из него сетку частот, необходимых для работы, перестраивает цифровое радиоприемное устройство в диапазоне рабочих частот.

Устройство управления и отображения реализует в автономном режиме заданный алгоритм работы приемного устройства (включение, выключение, поиск и выбор сигнала, адаптацию к меняющимся условиям работы и т.п.), позволяет пользователю вручную или в автоматическом режиме управлять приемным устройством.

К важнейшим характеристикам ЦРПУ, определяющим его качество и возможность применения для задач радиоконтроля, относят рабочий диапазон частот, дискретность настройки по частоте, коэффициент шума, максимальный уровень входного сигнала, свойства аттенюатора, относительную погрешность частоты настройки, температурную нестабильность, время настройки синтезатора, избирательность и динамический диапазон, точки пересечения по интермодуляции второго и третьего порядка, неравномерность коэффициента передачи, потребляемую мощность, массу и габариты [2].

1.2 Анализатор спектра

Анализатор спектра (АС) – прибор для наблюдения и измерения относительного распределения энергии электрических (электромагнитных) колебаний в полосе частот.

Анализаторы бывают параллельного и последовательного типа (чаще параллельного) и предназначены для работы в диапазонах частот от нескольких герц до сотен килогерц. Используются в акустике, например, при исследовании характеристик шума, при разработке и обслуживании аудиоаппаратуры и в других целях. Анализаторы, используемые для контроля качества питающей электросети, иначе называются анализаторами гармоник [8].

Большинство радиочастотных анализаторов являются широкополосными, позволяют работать в полосе от нескольких килогерц до единиц – сотен гигагерц, как правило, это анализаторы последовательного типа. Применяются для анализа свойств радиосигналов, для исследования характеристик радиоустройств.

Типовая структурная схема анализатора спектра фильтрового типа последовательного действия представлена на рисунке 1.7.

Работа данного анализатора спектра основана на принципе супергетеродинного приема. При анализе спектра, перестраивая гетеродин электрическим способом, перемещают спектр относительно фиксированной

частоты настройки. Для автоматизированной настройки можно использовать генератор качающейся частоты (ГКЧ). пилообразное напряжение, управляющее частотой ГКЧ, может использоваться для формирования частотной оси на экране ЭЛТ.

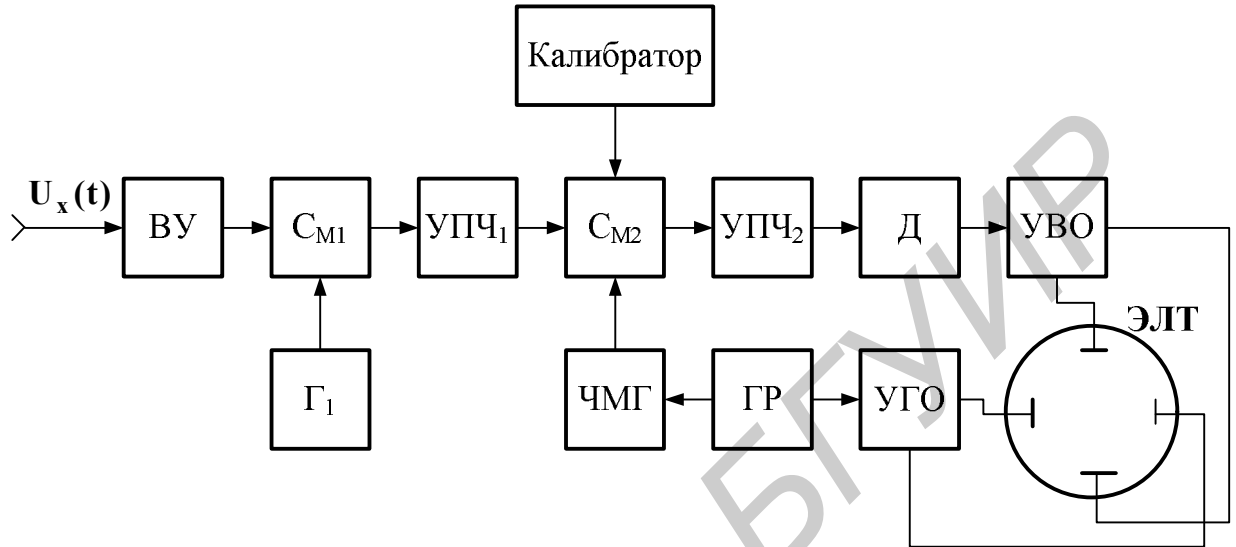


Рисунок 1.7 – Структурная схема анализатора спектра фильтрового типа последовательного действия

Однако диапазон рабочих частот АС ограничивается в этом случае пределами перестройки ГКЧ. Так как широкодиапазонные ГКЧ достаточно сложны, при проектировании автоматических АС более оптимально разделение функций гетеродина на два: гетеродин с ручной перестройкой частоты, перемещающий анализируемый спектр из любого участка рабочего диапазона частот на некоторую промежуточную частоту, и ГКЧ с фиксированной настройкой на эту промежуточную частоту.

Как видно из рисунка преобразование частоты осуществляется с помощью гетеродина (Г1) и смесителя (СМ1). Гетеродин имеет точную шкалу частот, по которой можно определять частоту $U_x(t)$. Полоса пропускания УПЧ1 должна быть больше максимальной ширины исследуемого спектра, а сама первая промежуточная частота – больше верхней частоты спектра (для подавления помех по зеркальному каналу) [9].

Бурное развитие цифровой, интегральной и вычислительной техники привело к созданию цифровых анализаторов спектра. Цифровой метод анализа спектра состоит в преобразовании исследуемого сигнала в цифровой код и вычислении составляющих спектра с помощью специализированных микропроцессоров. Цифровые АС по совокупности дискретных отсчетов (выборок) аналогового сигнала вычисляют спектральную плотность $S(j\omega)$ путем замены интеграла на конечную сумму из некоторого числа выборок. Такие вычисления осуществляются с помощью алгоритмов дискретного и быстрого преобразований Фурье.

В современных цифровых анализаторах специфические функции многочисленных приборов моделируются с помощью набора компьютерных программ. Это позволяет менять характер измерений без аппаратурных перестроек устройств и систем, содержащихся в анализаторе.

Обобщенная структурная схема цифрового анализатора представлена на рисунке 1.8.

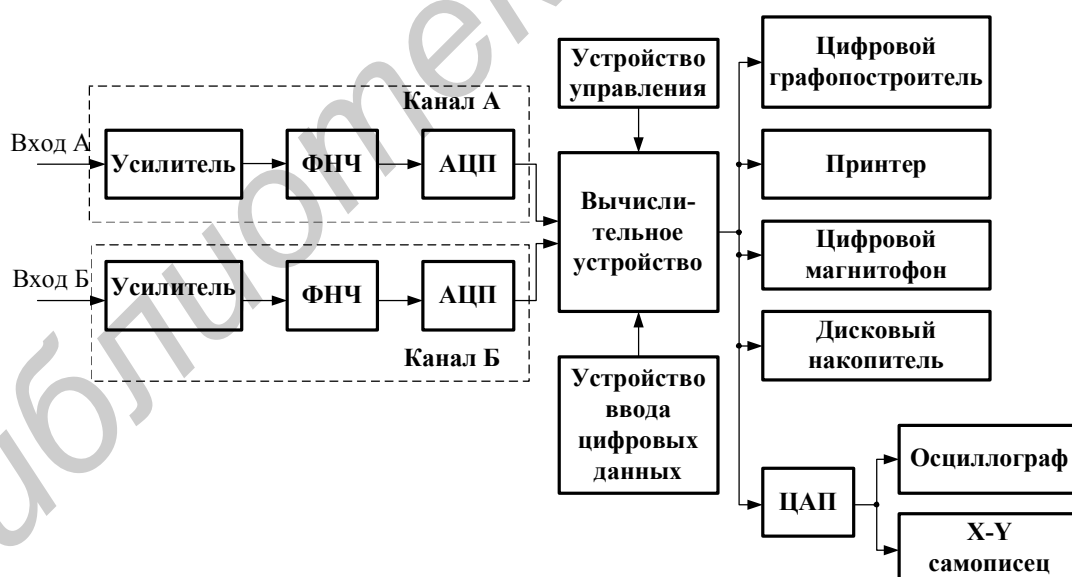


Рисунок 1.8 – Структурная схема цифрового анализатора спектра

Исследуемые аналоговые сигналы по одному или двум (входы А и Б) каналам подаются на соответствующие усилители с переменным коэффициентом усиления, которые приводят различные уровни входных

сигналов к одному стандартному значению, необходимому для нормальной работы всех последующих устройств анализатора. Затем сигналы поступают на ФНЧ, который выделяет полосу частот, подлежащую анализу. Оператор может менять полосу частот ФНЧ, а так же выключить ФНЧ из тракта. С выхода фильтров сигналы поступают на АЦП, где они преобразуются в параллельный десятиразрядный двоичный код.

Частота выборки определяется кварцевым генератором и определяет также отсчетный масштаб анализатора во временной и частотной области.

Каналы А и Б от входа усилителей до выхода АЦП имеют калиброванные значения коэффициента передачи во всем диапазоне частот и уровней напряжений. Информация о значении коэффициента передачи и частота выборки вводятся в цифровое вычислительное устройство (микропроцессор) и учитываются при формировании конечного результата.

В качестве примера анализатора спектра может служить анализатор, представленный на рисунке 1.9 [10].

Данный анализатор спектра можно отнести к числу цифровых анализаторов спектра. В отличие от анализаторов спектра частот, содержащих гетеродин (Г), смеситель (СМ), фильтр промежуточной частоты (ФПЧ), усилитель промежуточной частоты, детектор, блок управления и устройство регистрации предлагаемый анализатор отличается тем, что в нем выход детектора соединен с аналогово-цифровым преобразователем.

Выход детектора через ключ 1, подключенный также к логическому устройству, и линию задержки подсоединен к аналогово-цифровому преобразователю. Выход преобразователя соединен с регистрирующим устройством, а блок управления через схему задержки подключен к генератору тактовых импульсов, выход которого через ключ 2, подсоединенный также к логическому устройству, связан со счетчиком импульсов. Это позволяет регистрировать результаты в цифровой форме, автоматически сокращать в процессе анализа избыточную информацию и получать кодовые эквиваленты результатов для ввода в цифровые устройства.

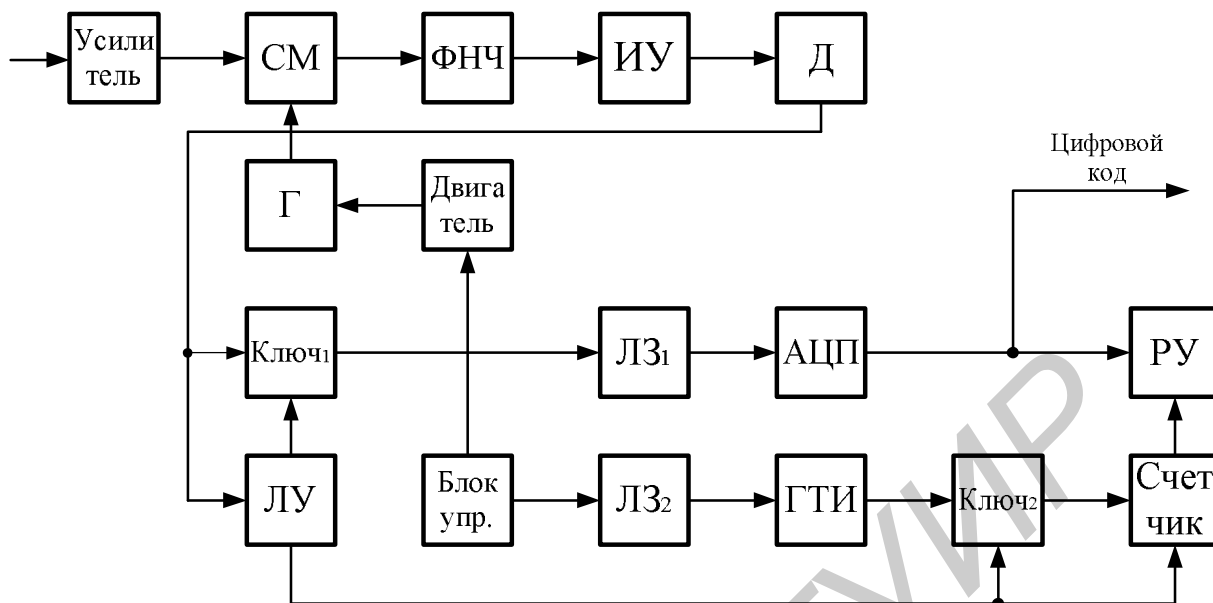


Рисунок 1.9 – Структурная схема анализатора спектра

С целью автоматического выделения момента настройки анализатора на максимум частотной составляющей, его логическое устройство содержит первый дифференцирующий элемент, подсоединенный к детектору, выход которого через усилитель-ограничитель подключен ко второму дифференцирующему элементу с выходом, соединенным с диодным ограничителем формирования импульса управления печатью.

Работа собственно анализирующей части прибора, является типовой для гетеродинных анализаторов, сводится к следующему.

При воздействии на смеситель анализируемого сигнала, усиленного усилителем, и напряжения гетеродина, на выходе смесителя возникают напряжения комбинационных частот. Одно из них с частотой, равной разности частот гетеродина и сигнала, используется в качестве напряжения промежуточной частоты.

Постоянство величины $f_{\text{лп}}$ при анализе в рабочем диапазоне частот сигнала от f_{min} до f_{max} достигается изменением частоты гетеродина от, $f_{\text{Гmin}}$ до $f_{\text{Гmax}}$ так, что для любой составляющей спектра разность оказывается постоянной. Напряжение промежуточной частоты после прохождения фильтра усиливается в усилителе и детектируется детектором.

расширенном диапазоне на входе блока декад, входящего в состав цифрового табло, включен коммутируемый блок пересчета частоты.

Анализатор спектра с фазовой компенсации шумов представлен на рисунке 1.11 [12].

Анализатор спектра включает в себя частотный преобразователь, фильтр нижних частот (ФНЧ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), процессор, дисплей и блок управления. Анализ спектра входного сигнала осуществляется перебором частот шаг за шагом. Блок управления на каждом шаге перестройки частоты в полосе качания управляет процессом преобразования частоты и выделяет амплитудные значения отдельных спектральных составляющих анализируемого спектра входного сигнала.

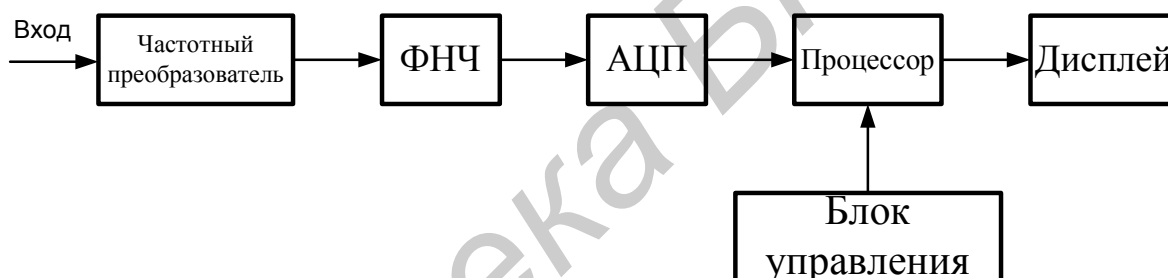


Рисунок 1.11 – Структурная схема анализатора спектра с фазовой компенсации шумов

1.3 Селективные вольтметры

Для измерения уровня сигналов еще используют селективный вольтметр. Он способен выделять отдельные гармонические составляющие сигнала сложной формы и определять среднеквадратичное значение их напряжения. По устройству и принципу действия этот вольтметр аналогичен супергетеродинному радиоприёмнику без системы АРУ, в качестве низкочастотных цепей которого используется электронный вольтметр постоянного тока. Как в случае с измерительным приемником частотная селекция осуществляется за счет перестраиваемого гетеродина, смесителя и узкополосного преобразователя частоты.

В качестве примера может служить селективный микровольтметр с автоматической калибровкой [13]. Данный микровольтметр работает в двух режимах: автокалибровки и измерения. Структурная схема селективного микровольтметра, показана на рисунке 1.12.

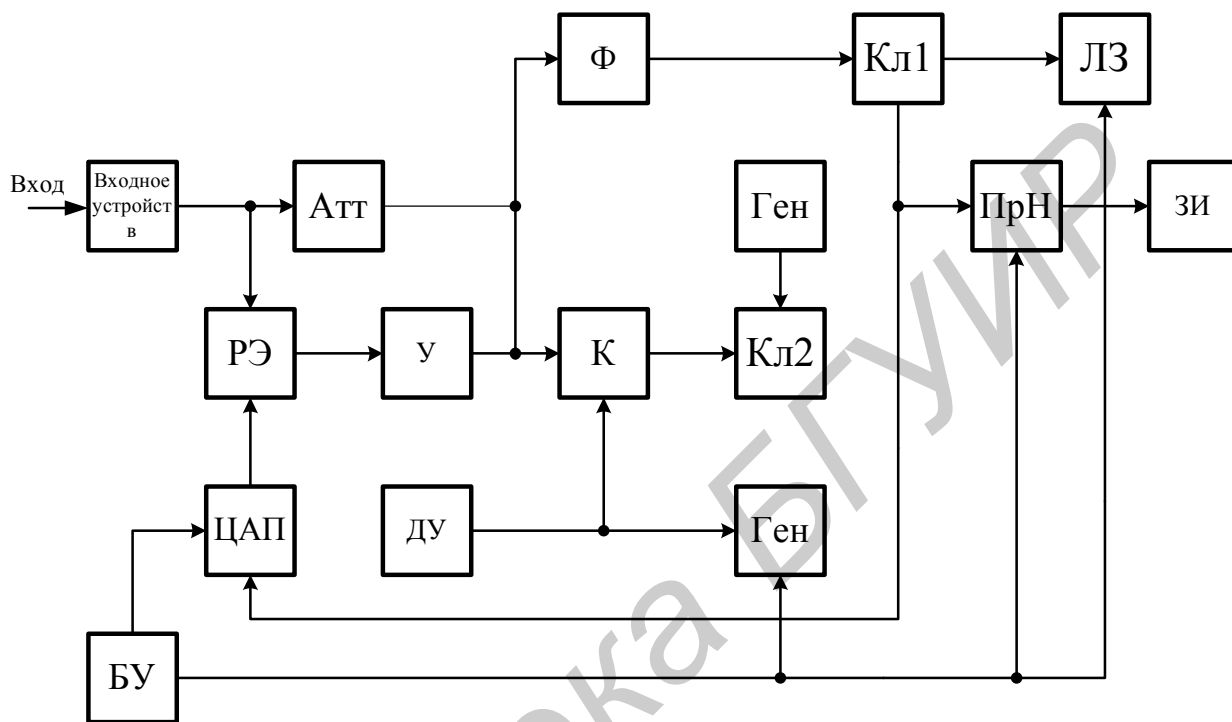


Рисунок 1.12 – Структурная схема селективного микровольтметра

Режим автокалибровки необходим только при перестройке селективного усилителя по частоте, поэтому органы перестройки этого усилителя электрически или механически связаны с двухпозиционным переключателем через блок управления. Эту связь может осуществлять и оператор, воздействуя при необходимости непосредственно на двухпозиционный переключатель. При автокалибровке контакты этого переключателя находятся в положении, при котором, измеряемый сигнал на селективный усилитель не поступает, а регулируемый элемент, усилитель и эталонный аттенюатор образуют петлю положительной обратной связи, усиление которой выбирается достаточным для возникновения автоколебаний на частоте максимального усиления (настройки) селективного усилителя. Автоколебания поступают на компаратор и их амплитуда сравнивается с выходным напряжением датчика уровня.

Когда амплитуда автоколебаний превосходит этот уровень, на выходе компаратора появляется сигнал, отпирающий электронный ключ, который начинает пропускать на цифро-аналоговый преобразователь импульсы тактового генератора. Цифро-аналоговый преобразователь предварительно сбрасывается в ноль.

По мере увеличения выходного напряжения цифро-аналогового преобразователя уменьшается коэффициент передачи регулируемого элемента, что приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний в петле положительной обратной связи. В результате наступает динамическое равновесие при котором с точностью, определяемой числом градаций цифро-аналогового преобразователя, коэффициент усиления последовательно соединенных регулируемого элемента и селективного усилителя равен величине обратной коэффициенту передачи эталонного аттенюатора.

В режиме измерения работа аналогична известным вольтметрам с время-импульсным преобразованием. Выходное напряжение селективного усилителя сравнивается в компараторе с калибровочным напряжением линейного генератора и с момента запуска этого генератора до момента, когда линейно нарастающее на его выходе напряжение сравнивается с амплитудой выходного напряжения селективного усилителя, первый ключ пропускает импульсы тактового генератора на преобразователь напряжения.

Показания индикатора при отсутствии помех пропорционально амплитуде входного сигнала. Индикатор выполнен в виде цифрового табло.

Анализ методов измерения малых уровней и частоты сигналов можно сделать следующие выводы:

- измерительные приемники должны иметь большую чувствительность и высокую селективность;

- у приемника прямого усиления, основным недостатком является сложность перестройки с одной частоты на другую. Выполнить фильтр со стабильными параметрами при его перестройке в диапазоне частот практически невозможно;

– в измерительных приемниках супергетеродинного типа, данный недостаток устранен, за счет преобразование частоты принимаемого сигнала в сигнал фиксированной промежуточной частоты;

– для повышения чувствительности и избирательности, применяется двойное, а иногда тройное преобразование частоты;

– для повышения точности измерений и более универсального использования в измерительных приемниках используется цифровой метод измерений.

Таким образом, для измерения уровня сигнала, будем использовать цифровой измерительный приемник, построенный по принципу супергетеродина с двойным преобразованием частоты. За счет двойного преобразования частоты можно проводить измерения в широком диапазоне частот. Использование цифрового метода позволит автоматизировать процесс измерения. Это достаточно значительно упрощает процесс проведения измерений и увеличивает точность.

2 Измерительное приемное устройство СВЧ диапазона.

Обоснование принципа действия

К важнейшим задачам совершенствования систем радиоконтроля относится необходимость повышения точности измерения частотных и временных параметров радиосигналов. К таким параметрам относятся значения несущей частоты и уровня, ширина полосы и др. Разработка и производство отечественных систем и комплексов радиоконтроля начались не вчера. Ведущими государственными организациями и коммерческими фирмами было разработано большое количество ныне представленных на рынке технических средств с функциями радиоконтроля, панорамного и спектрального анализа, обработки и анализа сигналов, пеленгования. По мере роста потребностей пользователей в последнее время также переживает подъем направление разработки и производства измерительных средств.

Анализ результатов патентных исследований позволяет сделать вывод, что для измерений слабых сигналов в заданном в техническом задании частотном диапазоне требуется разработка измерительного приемника, который обладал бы заданной чувствительностью на частотах до 118 ГГц.

Анализ параметров имеющейся современной элементной базы, проведенное макетирование и моделирование отдельных узлов измерительного комплекса, позволили произвести разработку обобщенной структурной схемы измерительного приемника СВЧ диапазона.

Обобщенная структурная схема разработанного приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн приведена на рисунке 2.1.

В соответствии с исследованиями методов измерения малых уровней мощности основными элементами высокочувствительных СВЧ устройств являются модулятор, балансный смеситель с усилителем промежуточной частоты и синтезатор частоты с кварцевой стабилизацией частоты выходного сигнала, используемый в качестве источника гетеродинного сигнала.

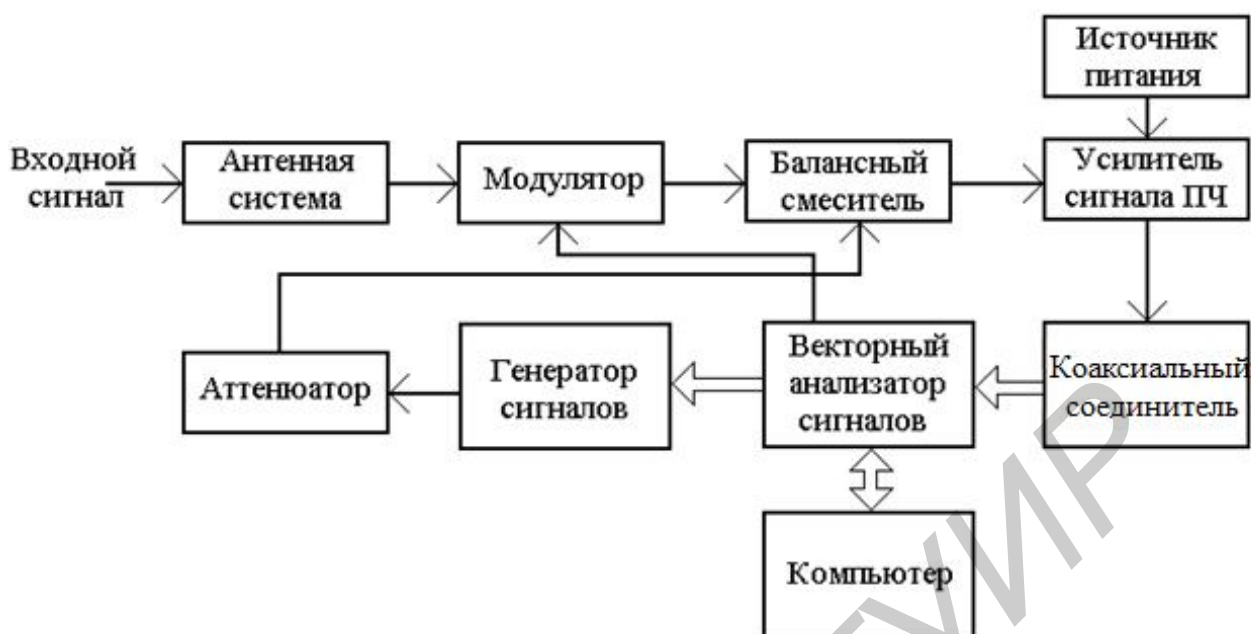


Рисунок 2.1 – Обобщенная структурная схема приемного измерительного устройства трехмиллиметрового диапазона

Как видно из рисунка 2.1, измеряемый сигнал поступает на антенную систему и далее через волноводный *p-i-n* модулятор поступает на волноводный сигнальный вход балансного смесителя. Балансный смеситель работает на 1 гармонике частоты гетеродина и имеет отдельные волноводный вход для подачи сигнала гетеродина и коаксиальный выход сигнала промежуточной частоты.

Современные измерительные генераторы трехмиллиметрового диапазона длин волн не позволяют обеспечить точность установки частоты 10^{-4} , что не позволяет обеспечить точность измерения частоты измеряемого сигнала. Поэтому в приемном устройстве в качестве гетеродина используется синтезатор частот, программного управляемый от персонального компьютера.

Сигнал гетеродина подается на гетеродинный вход балансного смесителя через поляризационный аттенюатор, служащий для регулировки уровня мощности гетеродинного сигнала, что необходимо для установки оптимального режима работы балансного смесителя. Внешний вид волноводного *p-i-n* модулятора показан на рисунке 2.2, а его основные технические характеристики приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры *p-i-n* модулятора

Диапазон частот, ГГц	78,33 – 118,1
Ослабление сигнала в выключенном состоянии, дБ	0,5
Ослабление сигнала в выключенном состоянии, дБ	35,0
Напряжение питания	+ 9 В, -5 В стабилизированное
Ток питания	50 мА

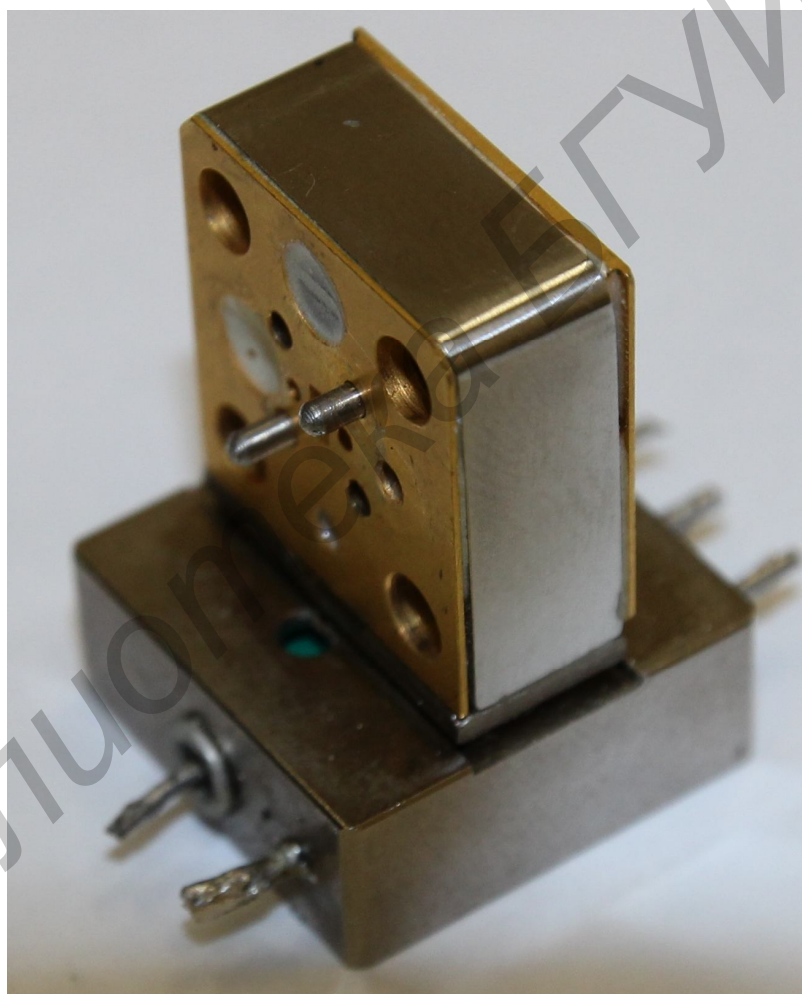


Рисунок 2.2 – Внешний вид волноводного *p-i-n* модулятора

Технические характеристики балансного смесителя, используемого в приемном устройстве в качестве преобразователя частоты, приведены в

таблице 2.2, схема его включения – на рисунке 2.3, а его внешний вид представлен на рисунке 2.3.

Таблица 2.2 – Основные параметры балансного смесителя

Диапазон рабочих частот по входам RF и LO	78,33 – 118,1 ГГц
Диапазон промежуточных частот (IF)	0,3 – 6 ГГц
Потери преобразования (Lс)	6 – 7 дБ
Коэффициент усиления ПУПЧ	33 – 35 дБ
Сквозной коэффициент передачи (RF – IF)	26 – 29 дБ
Уровень выходной мощности ПЧ при компрессии – 1 дБ	~ 10 мВт
Напряжение питания ПУПЧ	+ 5 В 80 мА
Мощность гетеродина (PLO)	10 - 15 мВт

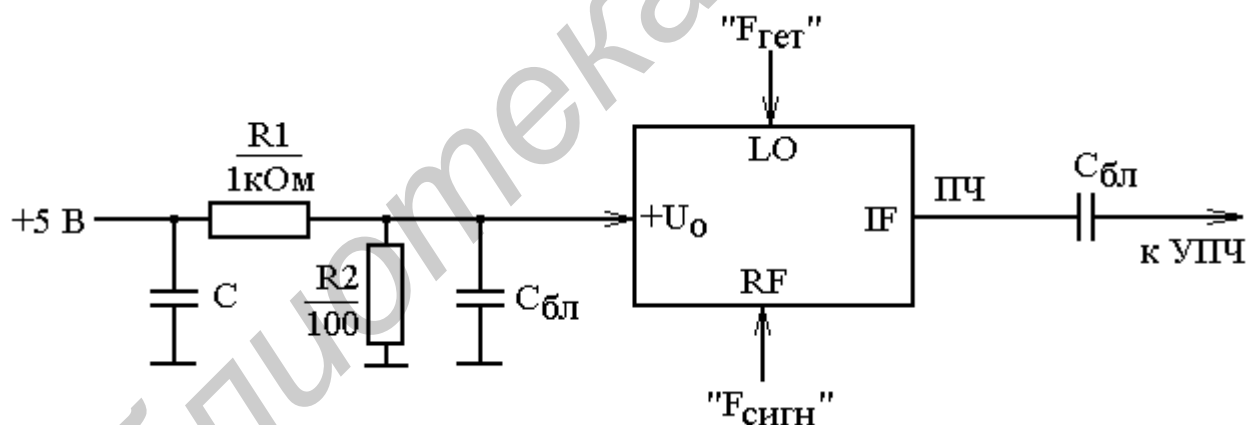


Рисунок 2.3 – Схема включения балансного смесителя миллиметрового диапазона

Основа конструкции балансного смесителя – последовательное соединение двух микрополосковых фильтров: входного полосового (на связанных полуволновых резонаторах или шлейфового – в зависимости от диапазона частот) и выходного ФНЧ, начинающегося (со стороны диодов) индуктивной секцией. К точке соединения фильтров подключена пара смесительных диодов (разнополярно), другие выводы диодов заземлены.



Рисунок 2.3 – Внешний вид балансного смесителя

Для противофазного возбуждения диодов сигналом гетеродина он формируется щелевым резонатором (электрическая длина $\lambda_r/2$), выполненным с обратной стороны подложки в экране плат фильтров так, чтобы точки заземления выводов диодов были расположены по разным сторонам резонатора, на краях и посередине длины резонатора. Сигнал гетеродина

подаётся по микрополосковой линии (МПЛ) и возбуждает резонатор с помощью короткозамкнутой перемычки из фольги или разомкнутым шлейфом (в виде антенны). Конструкция смесителя обеспечивает хорошую развязку между каналом гетеродина и входом СВЧ сигнала (выходом ПЧ) за счет симметрии и ортогональности электромагнитных полей в линиях. Конструкция удобна для настройки в рабочем режиме.

Расчет характеристик смесителей и его конструктивных элементов проведён с помощью пакета программ автоматизированного расчета СВЧ-устройств Serenade. Выбор структуры входного микрополоскового фильтра, типа и толщины подложки определяется возможностью его практической реализации с потерями в полосе пропускания 1 дБ и уровнем ослабления в требуемых полосах запираения не менее 45 дБ.

Технические характеристики СВЧ усилителя приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики усилителя СВЧ

Диапазон рабочих частот	1 – 6 ГГц
Коэффициент усиления	30 ± 1 дБ
Коэффициент шума	1 – 2 дБ
Уровень выходной мощности	~ 10 мВт
Напряжение питания	+ 5 В, стабилизированное
Ток питания	65 мА

В соответствии с разработанной структурной схемой измерительного приемного устройства преобразователь частоты работает на 1 гармонике частоты гетеродина. Для диапазона частот входного сигнала 78,0 – 118,0 ГГц и промежуточной частоты 330 МГц – 6 ГГц, значения выходных частот гетеродина будут расположены от 79,2 до 119,2 ГГц.

Для формирования гетеродинного сигнала используется синтезатор частот, оконечный каскад одного из элементов которого представлен на рисунке 2.4.

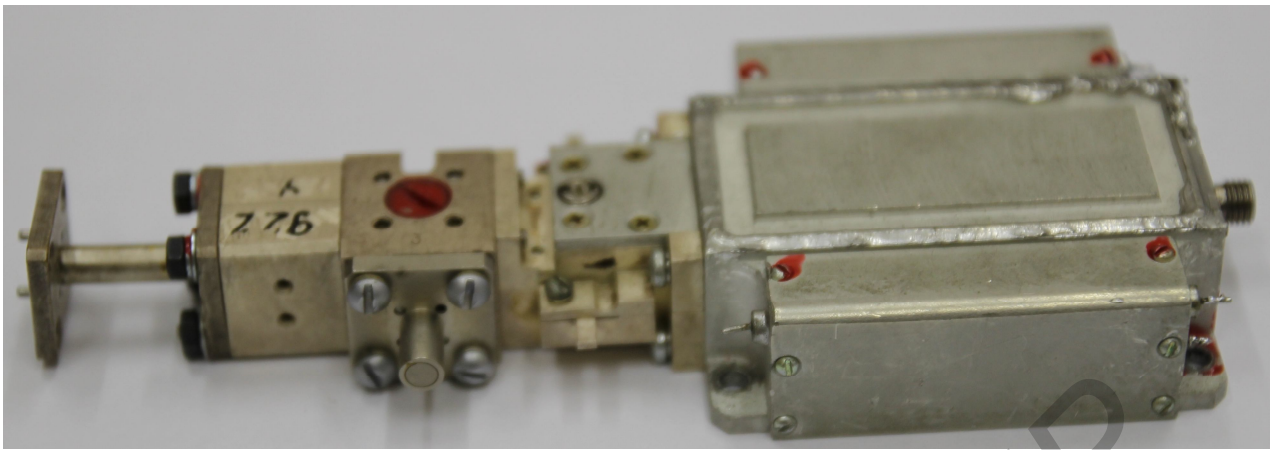


Рисунок 2.4 – Источник гетеродинного сигнала

Переключение синхронизированных источников гетеродинного сигнала осуществляется в соответствии со схемой соединений на основе волноводного электрически управляемого переключателя. Схема источника гетеродинного сигнала представлена на рисунке 2.5.

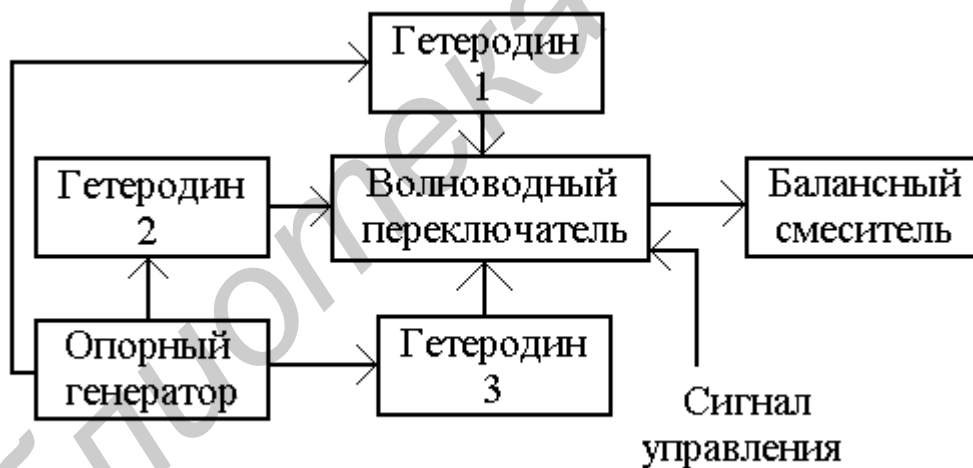


Рисунок 2.5 – Схема источника гетеродинного сигнала

Внешний вид одного из основных элементов источника гетеродинного сигнала – электрически управляемого волноводного переключателя представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Внешний вид электрически управляемого волноводного переключателя

На выходе балансного смесителя выделяется разностный сигнал – сигнал промежуточной частоты. Сигнал ПЧ, несущий измерительную информацию о

параметрах исследуемого сигнала, усиливается усилителем сигнала ПЧ и через соединительный калиброванный коаксиальный кабель поступает на вход векторного анализатора сигналов.

В качестве источника гетеродинного сигнала используется сверхвысокочастотный генератор сигналов, предназначенный для генерирования гармонических немодулированных и модулированных сигналов в режиме ручной, автоматической и цифровой дистанционной перестройки частоты. Генератор имеет большой выбор типов модуляции, функции качания по частоте и обладает широким диапазоном частот. Параметры качания устанавливаются с высокой точностью и стабильностью под управлением компьютера через интерфейс векторного анализатора сигналов. Диапазон рабочих частот данного генератора от 78,33 до 118,1 ГГц.

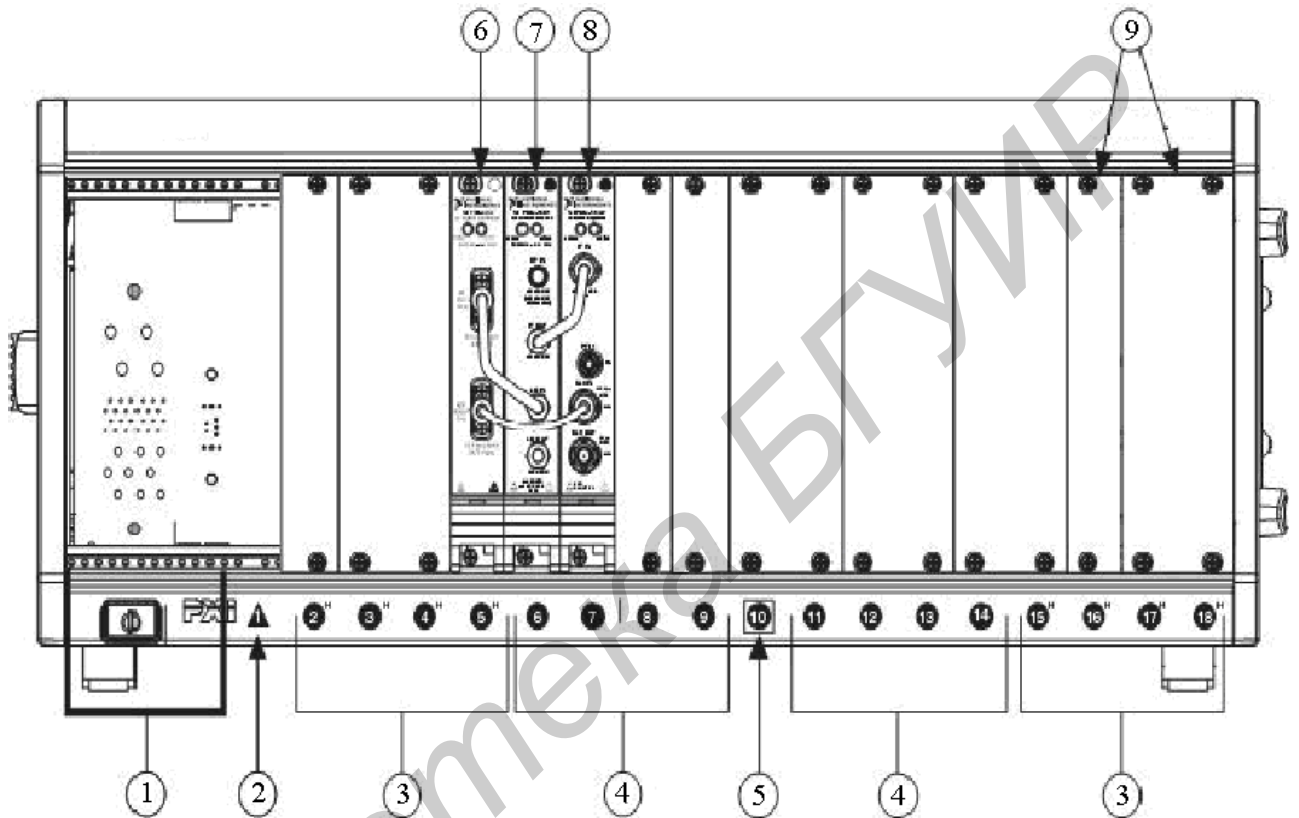
2.1 Векторный анализатор СВЧ сигналов NI PXIe-5663

Компанией *National Instruments*, лидером в области разработки и производства аппаратно-программных средств автоматизации измерений, был разработан измерительный приемник способный работать в нужном частотном диапазоне и удовлетворять нашим требованиям к чувствительности. Векторный анализатор ВЧ сигналов NI PXIe-5663 является виртуальным прибором – революционной концепцией, изменившей подходы и методики проведения измерений и разработки систем автоматизации.

Данный анализатор сигналов состоит из модуля понижающего преобразователя частоты NI PXIe-5601, модуля аналого-цифрового демодулятора NI PXIe-5622 и модуля высокочастотного генератора NI PXIe-6552.

На рисунке 2.4 представлен один из возможных вариантов установки модулей анализатора сигналов на шасси NI PXIe-1082. Данные модули устанавливаются на шасси NI PXIe-1082. Восьмислотовое шасси NI PXIe-1082 разработано в соответствии с широким спектром требований, предъявляемых для промышленных систем измерений и испытаний. Шасси оснащено

микросхемой, обеспечивающей соединение с каждым слотом посредством интерфейса *PCI Express*. Оно предназначено для работы совместно с модулями *PXI Express*, а также поддерживает подключение совместимых гибридных модулей *PXI* к четырем слотам.



1 – слот для установки контроллера системы; 2 – слот для установки контроллера системы; 3 – Гибридные слоты; 4 – *PXI Express* слоты; 5 – слот для синхронизации системы; 6 – гетеродин; 7 – понижающий преобразователь; 8 – аналого-цифровой преобразователь ПЧ *NI PXIe-5622*; 9 – Декоративные панели *PXI/PXI Express*

Рисунок 2.4 – Схема установки модулей анализатора сигналов на шасси *NI PXIe-1082*

Конструктивно модули векторного анализатора сигналов выполнены в виде экранированной печатной платы, на которой закреплена передняя панель с коаксиальными разъемами для присоединения сигнальных кабелей. Модуль *NI PXIe-5652* устанавливается в гибридный слот шасси *PXI Express*. Модули *NI PXIe-5601* и *NI PXIe-5622* устанавливаются в стандартные или в гибридные слоты шасси *PXI Express*.

В качестве контроллера служит специализированный компьютер, к которому подключен модульный анализатора сигналов по средством интерфейса *PXI*. На экране монитора отображается передняя панель приемного устройства.

Выходной сигнал поступает на высокочастотный вход понижающего преобразователя частоты, внутренний генератор которого управляется с выхода высокочастотного генератора, используемого в качестве гетеродина. Сигнал промежуточной частоты с выхода понижающего преобразователя частоты подается на вход аналого-цифрового демодулятора, который синхронизируется от высокочастотного генератора. В аналого-цифровом демодуляторе производится квадратурная демодуляция сигнала с преобразованием его в цифровой код.

Управление режимами и обработка измерительной информации производится, установленным в шасси контроллером. Наблюдаемый сигнал и результаты измерений отображаются на мониторе контроллера в виде виртуальной панели. На рисунке 2.6 представлена передняя панель приемного устройства миллиметрового диапазона.

Переднюю панель условно можно разделить на две части. В первой отображается измеряемый сигнал и его параметры, а во второй находятся органы управления.

Сигнал отображается в координатах частота/уровень. Шкала уровня регулируется автоматически, либо задаются верхнее и нижнее значение уровня. Полоса частот входного сигнала, отображаемая на графическом мониторе, определяется значением несущей частоты и полосы сканирования. Частота несущей и полоса сканирования задаются в ручном режиме. Для удобства и увеличения точности проведения измерений на координатной оси имеется возможность использовать маркеры, а над координатной осью указывается значение измеряемого параметра.

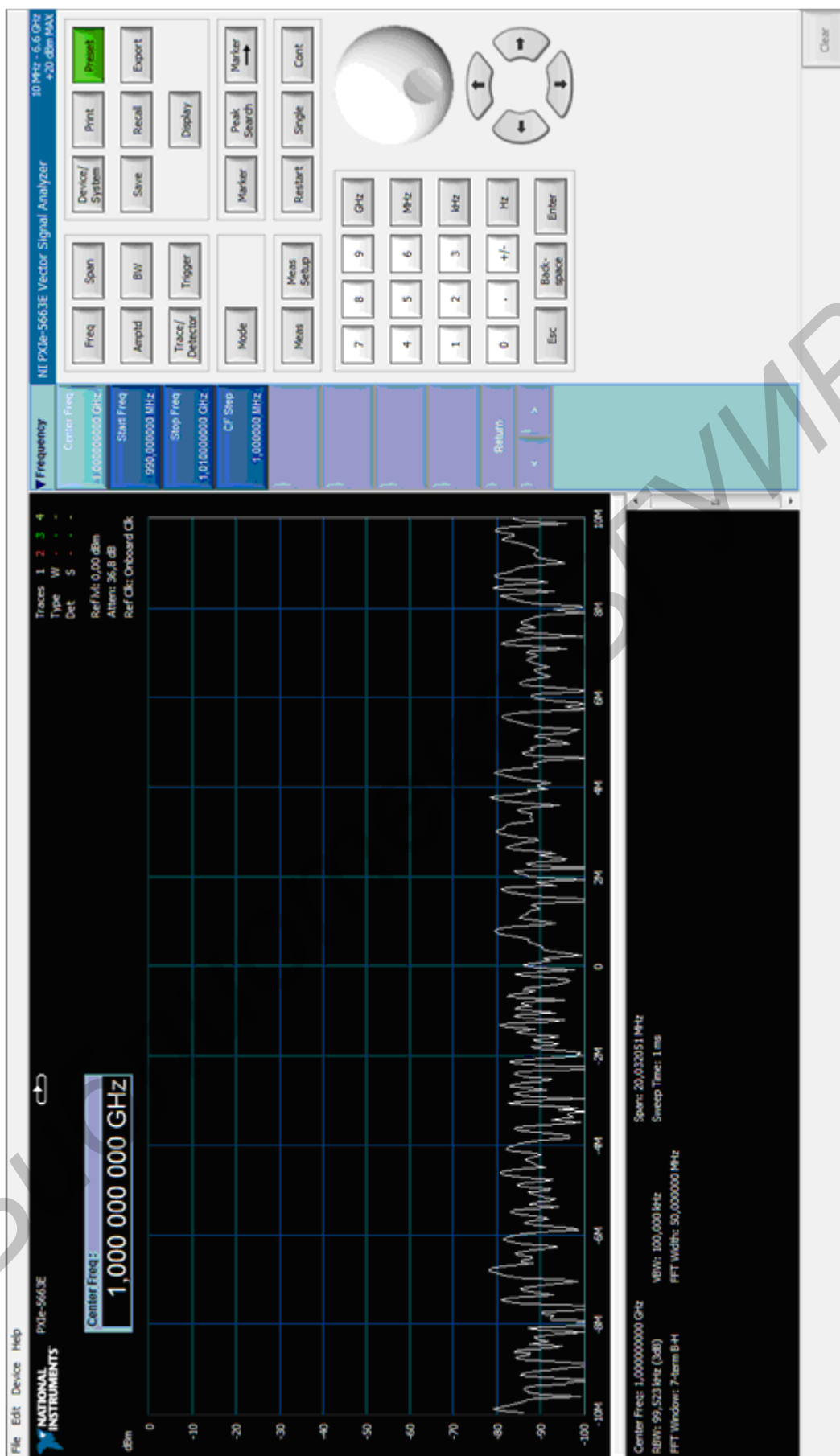


Рисунок 2.6 - Передняя панель приемного устройства миллиметрового диапазона

На передней панели находятся кнопки выбора начальных параметров, которые устанавливаются перед проведением измерения. Органы управления включают в себя виртуальную цифровую клавиатуру от 0 до 9 и кнопки выбора множителей (*GHz*, *MHz*, *kHz*, *Hz*) для дискретного ввода значений и ручку управления для плавной настройки параметров векторного анализатора сигналов. Так же имеются кнопки выбора режимов измерения, сохранения результатов, вывод на печать.

LabVIEW используется в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами.

Измерения параметров спектра сигнала, а так же анализ и вычисление параметров сигналов с различными видами модуляции осуществляются при помощи лицензионных программ, написанных в среде *LabVIEW*. *LabVIEW* – это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G», фирмы *National Instruments*.

Программное обеспечение *LabVIEW* является виртуальным средством измерения и состоит из двух частей:

- блочной диаграммы, описывающей логику работы приемного устройства;
- передней панели, описывающей внешний интерфейс приемного устройства.

Блочная диаграмма содержит функциональные узлы, являющиеся источниками, приемниками и средствами обработки данных. Также компонентами блочной диаграммы являются терминалы и управляющие структуры. Функциональные узлы и терминалы объединены в единую схему линиями связей [16].

Разработкой программ занимаются специалисты компании *National Instruments* в процессе проектирования приборов. Однако разработку и использование программ можно проводить самому, при наличии необходимых компонентов.

Упрощенная блок-диаграмма программного кода, описывающая работу векторного анализатора ВЧ сигналов в составе приемного устройства миллиметрового диапазона, представлена на рисунке 2.7.

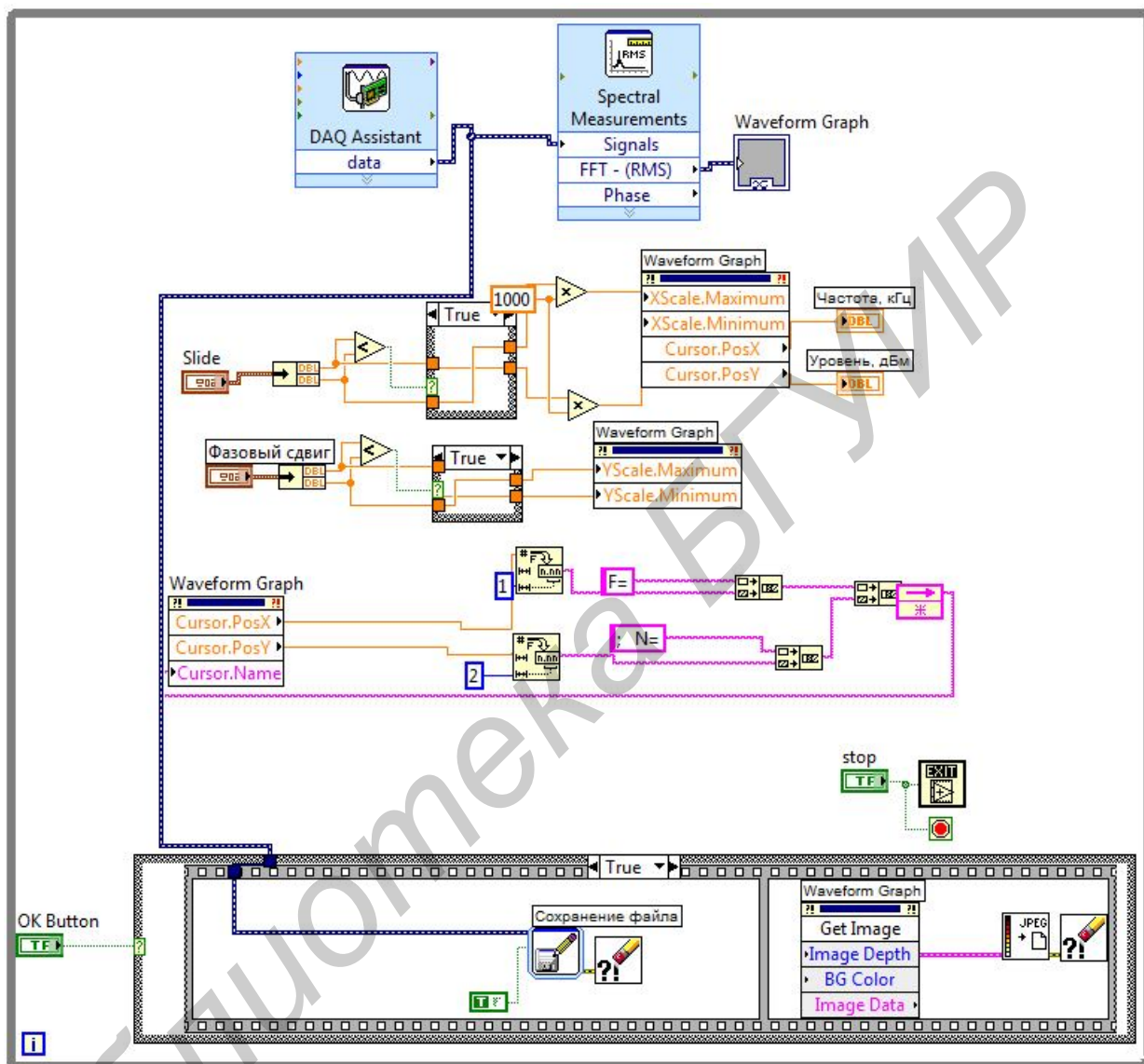


Рисунок 2.7 – Упрощенная блок-диаграмма программы работы приемного устройства миллиметрового диапазона

Данная программа является виртуальным инструментом, однако, это не только имитация и моделирование. Имеющиеся программы управления реальных приборов дают возможность генерировать и измерять реальные физические сигналы. Каждая операция является отдельным блоком. В данной схеме сигнал через блок *DAQ Assistant* с модуля АЦП поступает для дальнейшей обработки и измерения. Блок *Spectral Measurements* служит для

выделения спектра сигнала и его отображения на, подключенном к нему, графическом индикаторе. Блоки регулировок «*Slide*» и «фазовый сдвиг», служат для установки пределов измерения по частоте и амплитуде. Блок *Waveform Graphs* является графическим монитором с настраиваемой шкалой. Результаты измерения отображаются на передней панели и могут сохраняться в файл. Вся программа заключена в цикл и производит непрерывные измерения, пока не будет нажата кнопка «*stop*».

Библиотека БГУИР

3 Алгоритм функционирования измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона

На первом этапе алгоритма проводится калибровка измерительного приемного устройства с целью определения неравномерности уровней входного сигнала в заданном диапазоне частот. При завершении данного этапа результаты измерений уровня сигнала эталонного источника сигнала заносятся в память компьютера в виде базы данных. Полученные результаты калибровки используются затем для корректировки функции преобразования измерительного приемного устройства в режиме измерения.

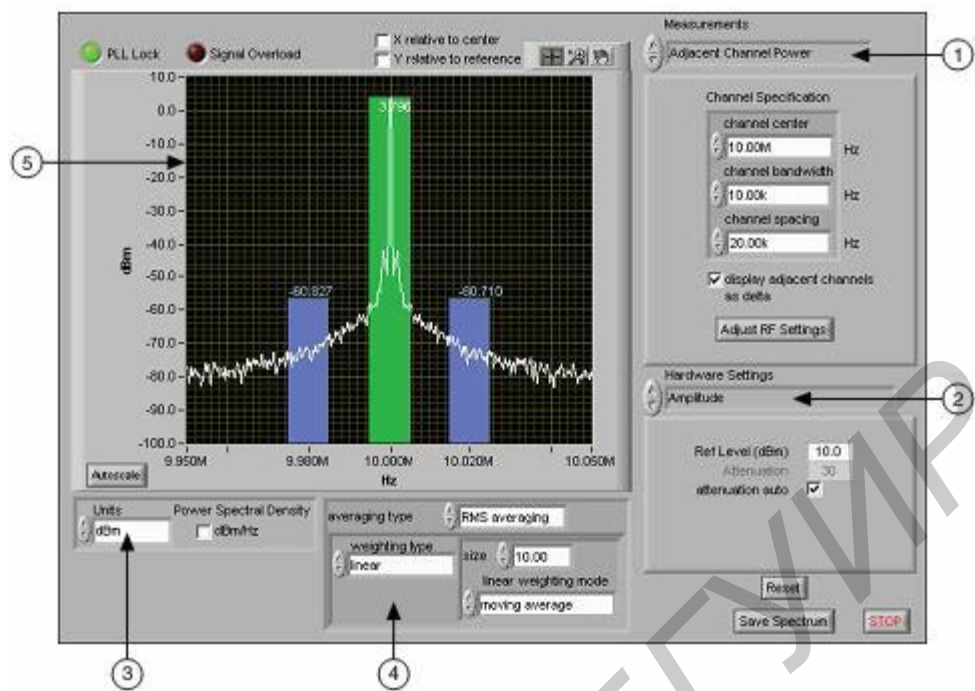
Вводятся исходные настройки работы измерительного приемного устройства.

Для осуществления измерений и интерактивного сбора данных с помощью векторного анализатора ВЧ сигналов используется утилита *RFSA Demo Panel*. Эта программа вызывается из *MAX* следующим образом: *Tools»Soft Front Panels»NI5660 - RFSA Demo Panel* или из меню «Пуск»: Пуск»Все программы»*National Instruments»NI-RFSA»5660 Demo Panel*.

Если источник внешнего сигнала отсутствует, для проверки работы векторного анализатора ВЧ сигналов и *RFSA Demo Panel*, может быть использован сигнал с выхода “10 MHz OUT” понижающего преобразователя ВЧ *NI 5600*. Для использования этого сигнала соедините выходной разъем «10 MHz OUT» со входным разъемом «INPUT» понижающего преобразователя ВЧ *NI 5600*.

Утилита *RFSA Demo Panel* (её окно показано на рисунке 3.1), обеспечивает программный интерфейс, с помощью которого можно осуществлять взаимодействие с аппаратными средствами векторного анализатора ВЧ сигналов для осуществления спектрального анализа и фазовых измерений.

Для использования этой утилиты необходимо выполнить следующие действия:



1 Элементы управления измерением. 2 Элементы управления настройками аппаратуры. 3 Элементы управления усреднением.
 4 Выбор единиц измерения. 5 График
 Рисунок 3.1 – Утилита *RFS Demo Panel*

3.1 Задайте настройки работы аппаратуры

- частотные параметры (*Frequency*);
- амплитуда (*Amplitude*);
- постоянные времени (*Timing*);
- дополнительные спектральные параметры (*Advanced Spectral Parameters*);
- устройства (*Devices*);

3.2 Выберите необходимый вид измерения с помощью элемента управления «*Measurements*».

- поиск максимума (*Peak Search*);
- ширина максимума (*Delta Peak*);
- мощность в полосе (*Power in Band*);
- внеполосная мощность (*Adjacent Channel Power (ACP)*);
- ширина занятой полосы частот (*Occupied Bandwidth*);
- фазовые измерения (*IQ Data*).

3.4 Выберите тип усреднения

Рисунок 3.2 иллюстрирует иерархию способов усреднения.

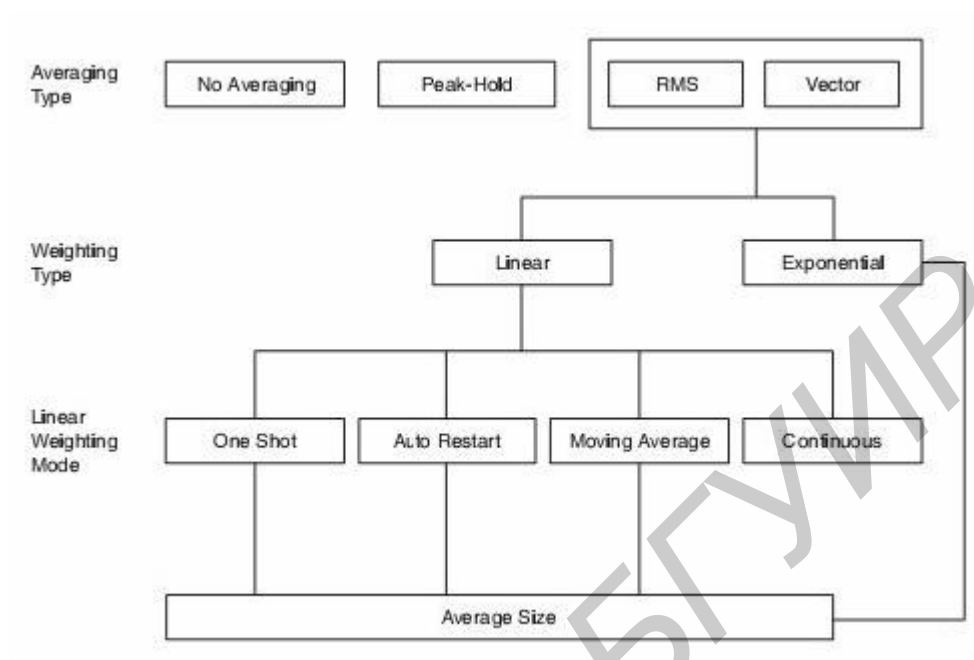


Рисунок 3.2 – Варианты усреднения

3.5 Единицы измерения задаются элементом управления *Units*. Возможен выбор наиболее часто употребляемых единиц измерения.

Для проведения частотных измерений вызвать подпрограмму частотных измерений, блок схема которой представлена на рисунке 3.3.

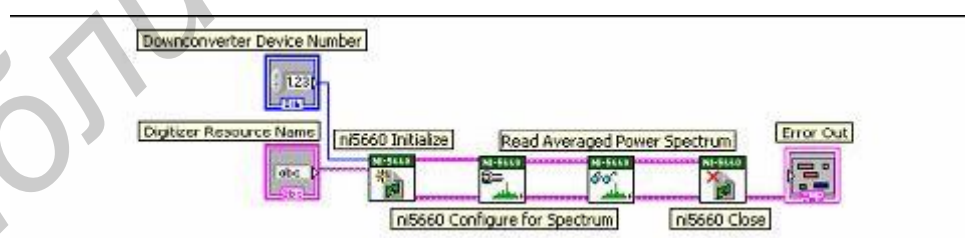


Рисунок 3.3 – Чтение спектральной характеристики

На рисунках 3.3 и 3.4 показаны примеры программ, предназначенных для однократного и измерения фазовой характеристики. В ней использованы виртуальные приборы для передачи векторному анализатору сигналов настроек, необходимых для фазовых измерений, и чтения результатов фазовых измерений.

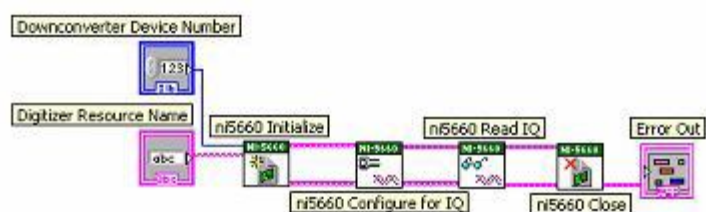


Рисунок 3.3 – Однократное измерение фазовой характеристики



Рисунок 3.4 – Многократное измерение фазовой характеристики

При установке набора инструментов Spectral Measurements Toolkit (SMT). Можно проводить анализ параметров модулированных сигналов с использованием векторного анализатора ВЧ сигналов. При этом используются виртуальные приборы и функции для осуществления спектрального анализа, измерений, отображения их результатов с помощью векторного анализатора ВЧ сигналов. SMT имеет следующие функциональные возможности:

- быстрое преобразование Фурье и усреднение спектральной характеристики;
- измерение таких спектральных параметров как мощность в полосе частот, мощность вне полосы частот, частота и мощность пиков.
- отображение и анализ спектральной характеристики;
- настройка аппаратных модулей векторного анализатора ВЧ сигналов для проведения измерений в частотной области.

Аппаратные модули векторного анализатора ВЧ сигналов могут быть запрограммированы индивидуально, используя вызовы функций, собранных в набор инструментов *Spectral Measurements Toolkit* или индивидуальные драйверы аппаратных модулей.

Алгоритм функционирования измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн приведен на рисунке 3.5.

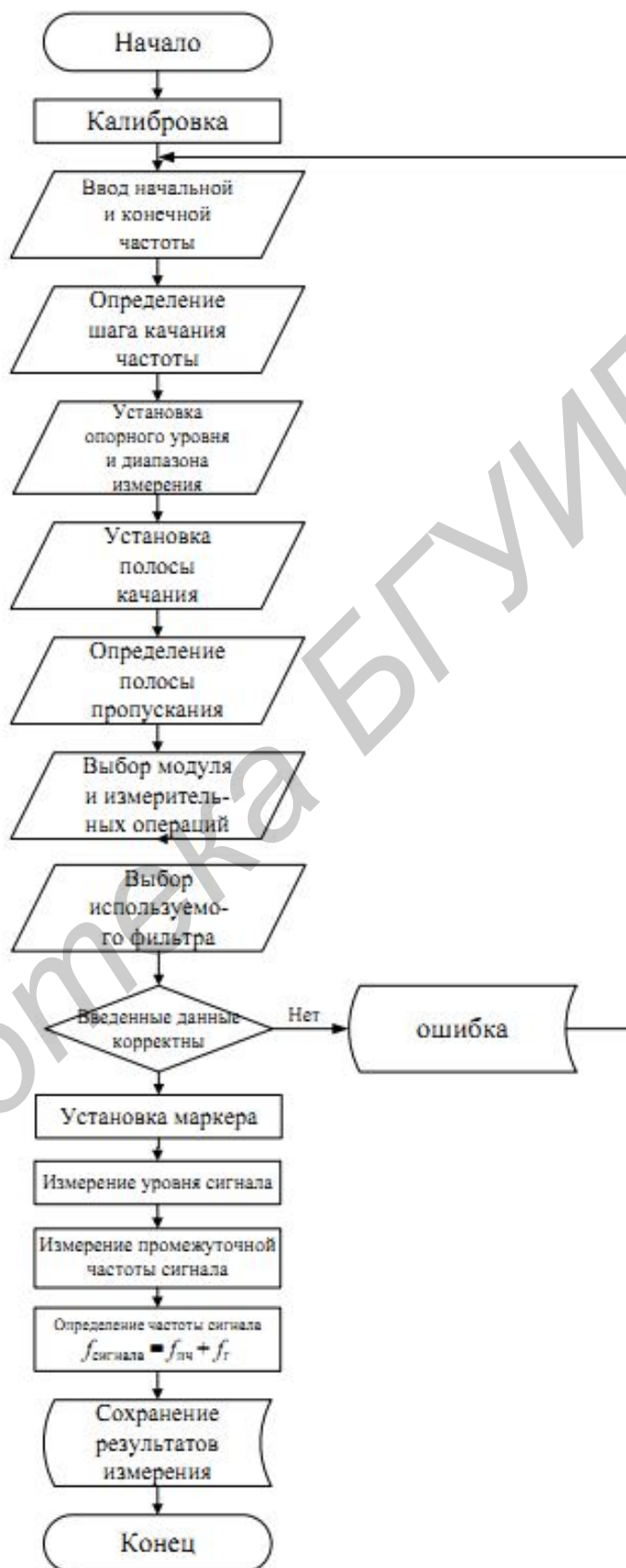


Рисунок 3.5 – Алгоритм функционирования измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона

Сначала устанавливаются частотные настройки. Начальная и конечная частоты измерения, а так же шаг качания при перестройке частоты. В нашем случае значение центральной частоты 1,5 ГГц и шаг качания равные 80 кГц. При настройке амплитудных характеристик устанавливаем значение опорного уровня 0 дБм и диапазон измерений равный 100 дБм. Затем устанавливаем настройки полосы качания. Полосу пропускания устанавливаем 1,49 ГГц. Значение полосы качания выбираем 2 МГц. Затем выбирается модуль, который будет использоваться для измерения, измерительные операции, фильтры. В нашем случае используется модуль «Анализ спектра» с соответствующим фильтром. После настройки измерительного приемника производятся измерения. Для измерений удобно использовать курсор. После нажатия клавиши «*Marker*» на виртуальной панели прибора на мониторе появится курсор, который с помощи мыши устанавливается на исследуемый сигнал. При нажатии кнопки «*Peak Search*» маркер автоматически устанавливается на максимальном значении исследуемого сигнала. Можно одновременно использовать несколько маркеров и измерять уровень сигнала в разных точках.

4 Программа и методика метрологической аттестации измерительного приемного устройства

Основными задачами метрологической аттестации измерительного приемного устройства являются:

- определение исследуемых метрологических характеристик и их оценка;
- установление соответствия метрологических характеристик требованиям технического задания, или технических условий, или нормам точности измерений, заданных в стандартах;
- установление номенклатуры метрологических характеристик измерительного приемного устройства, подлежащего контролю при поверке и калибровке, и опробование методики поверки;
- установление межповерочных интервалов измерительного приемного устройства.

Метрологическую аттестацию проводят по следующим этапам:

- рассмотрение представленной документации;
- согласование и утверждение программы аттестации;
- проведение экспериментальных исследований;
- рассмотрение результатов аттестации и составление протокола аттестации.

4.1 Вводная часть

1 Настоящая программа метрологической аттестации распространяется на измерительное приемное устройство миллиметрового диапазона длин волн, и устанавливает содержание и методику метрологической аттестации (далее МА).

2 Измерительное приемное устройство миллиметрового диапазона предназначено для измерения параметров спектра радиотехнических сигналов. Применяется в процессах разработки, монтажа и эксплуатации радиотехнической и телекоммуникационной аппаратуры.

3 Настоящая программа метрологической аттестации разработана в соответствии с требованиями СТБ 8004-2003, ГОСТ 8.009-94, ГОСТ 22261-94.

При изучении настоящей программы и методики метрологической аттестации необходимо дополнительно руководствоваться следующей эксплуатационной документацией: руководство по эксплуатации *NI PXIe-5663*.

4.2 Рассмотрение технической документации

Экспертиза эксплуатационной документации проводится в последовательности согласно таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Последовательность проведения экспертизы эксплуатационной документации

Требования к рассмотрению эксплуатационной документации	Указания по методике выполнения
1 Проверка соответствия указанных в эксплуатационной документации метрологических характеристик аттестуемого измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона требованиям технического задания и распространяющихся на него НД	Проводят сличением требований, указанных документах
2 Проверка правильности наименования и способа выражения метрологических характеристик, нормированных в эксплуатационной документации	Проверка проводится на соответствие их требованиям ГОСТ 8.009-94
3 Проверка правильности методов и выбора средств поверки, изложенных в эксплуатационной документации	Определяется по действующим поверочным схемам и методам, используемым для аналогов

Продолжение таблицы 4.1

Требования к рассмотрению эксплуатационной документации	Указания по методике выполнения
4 Соответствие требованиям стандартов ЕСКД и системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь	Проверяется комплектность, построение и содержание эксплуатационной документации

4.3 Экспериментальные исследования

4.3.1 Операции и действия, выполняемые при метрологической аттестации

Операции и действия, проводимые в процессе метрологической аттестации измерительного приемника СВЧ диапазона, отражены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Операции и действия, проводимые при метрологической аттестации

Наименование операции	Номер пункта
1	2
1 Установление метрологических характеристик, определяемых в процессе аттестации	4.3.2
2 Требования к условиям проведения исследований, эталонам (образцовым средствам измерений)	4.3.3
3 Установление точек, в которых определяют значения метрологических характеристик	4.3.4
4 Определение количества наблюдений в каждой исследуемой точке	4.3.5
5 Установление исходных данных и условий определения погрешности средства измерений	4.3.6

Продолжение таблицы 4.2

1	2
6 Представление погрешности средства измерений	4.3.7
7 Подготовка к исследованиям	4.3.8
8 Внешний осмотр	4.3.9
9 Проверка функциональных возможностей	4.3.10
10 Определение погрешности средства измерений	4.3.11
11 Обработка результатов измерений	4.3.12
12 Установление межповерочного интервала	4.3.13
13 Оформление результатов аттестации	4.3.14

4.3.2 Установление метрологических характеристик, определяемых в процессе аттестации.

Перечень нормированных метрологических характеристик приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Перечень нормированных метрологических характеристик

Наименование и обозначение метрологической характеристики	Нормированное значение метрологической характеристики	Номер пункта подраздела
Уровень сигналов в диапазонах частот: от 78 до 94 ГГц от 94 до 118 ГГц	Погрешность измерения: не более $\pm 2,2$ дБм не более $\pm 1,7$ дБм	4.3.11.1
Частота сигнала	Погрешность измерения не более ± 100 кГц	4.3.11.2

В процессе метрологической аттестации проводятся испытания на электробезопасность, электромагнитную совместимость, уровень

индустриальных радиопомех и помехоустойчивость к радиочастотному электромагнитному полю.

4.3.3 Требования к условиям проведения исследований, эталонам (образцовым средствам измерений)

4.3.3.1 Экспериментальные исследования проводятся в нормальных условиях эксплуатации:

- температура окружающей среды (23 ± 5) °C;
- относительная влажность от 30 до 90 %;
- атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа;
- напряжение питающей сети (230 ± 23) В;
- частота питающей сети ($50 \pm 0,5$) Гц.

4.3.3.2 Перед проведением метрологической аттестации измерительный приемник СВЧ диапазона, должен быть выдержан не менее тридцати минут при нормальных условиях.

4.3.3.3 Средства измерений, используемые для аттестации измерительного приемника СВЧ диапазона, должны быть выдержаны в условиях, оговоренных для проведения метрологической аттестации, прогреты и подготовлены к работе в соответствии с их инструкциями по эксплуатации.

4.3.3.4 Перед проведением метрологической аттестации ознакомиться с инструкцией по эксплуатации на аттестуемый измерительный приемник СВЧ диапазона.

4.3.3.5 Перечень эталонных и вспомогательных средств измерений, необходимых для проведения метрологической аттестации измерительного приемника СВЧ диапазона с указанием их основных характеристик, приведен в таблице 4.4.

4.3.4 Установление точек, в которых определяют значения метрологических характеристик

Значения метрологических характеристик проверяются в точках диапазона, установленных, для каждого контролируемого параметра.

4.3.4.1 Определение систематической составляющей и среднеквадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности в режиме измерения уровня сигнала, проводится при значениях входного сигнала $X_1 = 0,05 X_K$; $X_2 = 0,5 X_K$; $X_3 = 0,9 X_K$ на каждом частотном диапазоне.

Таблица 4.4 – Эталонные и вспомогательные средства измерений, необходимые для проведения метрологической аттестации

Наименование средств измерений	Тип средств измерений	Наименование и значение метрологической характеристики
1 Генератор сигналов высокочастотный	РГ4-14	Диапазон частот от 78,33 до 118,1 ГГц Диапазон установки уровня от 0,1 до 100 мВт
2 Ваттметр СВЧ	МЗ-75/5	Диапазон частот от 78,33 до 118,1 ГГц Погрешность измерения в диапазоне от минус 35 до 10 дБм не более $\pm 0,45$ дБ
3 Измерительный аттенюатор	DA-03R	Диапазон частот от 78,33 до 118,1 ГГц Диапазон ослаблений от 0 до 60 дБ Точность установки ослабления: $\pm 0,2$ дБ при $A = 0 \div 10$ дБ $\pm 0,02 \cdot A$ дБ при $A = 10 \div 50$ дБ $\pm [1 + 0,08 \cdot (A - 50)]$ дБ при $A = 50 \div 60$ дБ
4 Частотомер	РЧ5-29	Диапазон частот от 78,33 до 118,1 ГГц Погрешность не более $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ Гц
5 Погодная станция	Ea2 BL508	Погрешность измерения атмосферного давления не более ± 1 кПа Погрешность измерения температуры не более $\pm 0,5$ °C Погрешность измерения влажности не более ± 5 %

Примечания:

1 Допускается применение измерительных приборов, отличных от указанных согласно таблице 4.4, но обеспечивающих аттестацию требуемых параметров и заданную точность измерения.

2 Все средства измерений должны иметь действующие клейма и (или) свидетельства о прохождении поверки.

3 Нормальные условия эксплуатации выбранных эталонов и вспомогательных средств измерений должны соответствовать условиям экспериментальных исследований аттестуемого СИ.

4.3.4.2 Определение систематической составляющей и среднеквадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности в режиме измерения значения частоты входного сигнала в диапазоне частот от 78 до 118 ГГц, проводится при значении входного сигнала минус 10 дБм на частотах 78, 88, 98, 108 и 118 ГГц.

4.3.5 Установление количества наблюдений (n) в исследуемых точках диапазона измерений

Количество наблюдений $n = 5$ в каждой исследуемой точке контролируемого параметра.

4.3.6 Установление исходных данных и условий определения погрешности средства измерения

При определении погрешности принимаются следующие исходные данные:

– доверительная вероятность $P = 0,95$;

– коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности равной $P_g = 0,95$ и числе результатов наблюдений $n = 5$, принимается равным 2,57;

– исходными данными для определения метрологических характеристик являются результаты наблюдений в каждой исследуемой точке диапазона измерений.

4.3.7 Представление погрешности средства измерений

Формы представления результатов измерений и их погрешностей должны соответствовать МИ 1317-86.

Границы интервала $\Delta_{H(B)}$ или $\delta_{H(B)}$, в котором с заданной доверительной вероятностью P находятся абсолютные или относительные погрешности измерительного приемного устройства СВЧ диапазона, определяются по формулам

$$\Delta_{H(B)} = M[\Delta_S] \pm K_p \sigma(\Delta); \quad (4.1)$$

$$\delta_{H(B)} = M[\delta_S] \pm K_p \sigma(\delta), \quad (4.2)$$

где $M[\Delta_S]$, $M[\delta_S]$ – оценки математического ожидания систематической составляющей абсолютной и относительной погрешности;

K_p – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности.

$\sigma(\Delta)$, $\sigma(\delta)$ – оценки среднеквадратического отклонения случайной составляющей абсолютной и относительной погрешности.

4.3.8 Подготовка к исследованиям

Перед проведением исследований следует выполнить подготовительные работы по созданию необходимых условий для проведения метрологической аттестации.

4.3.8.1 Проверить соответствие условий аттестации требованиям п. 4.3.3.

4.3.8.2 Установить приборы, позволяющие в процессе исследований контролировать изменения влияющих факторов – температуру, атмосферное давление, влажность.

4.3.8.3 Проверить соответствие пределов измерения и класса точности применяемых средств аттестации требованиям п. 4.3.3, а также проверить наличие аттестатов метрологической поверки средств аттестации.

4.3.8.4 Проверить состояние и комплектность эксплуатационных документов на измерительный приемник СВЧ диапазона.

4.3.8.5 Подготовить к работе контрольно-измерительные средства согласно их эксплуатационной документации.

4.3.8.6 Прогреть измерительный приемник СВЧ диапазона и контрольно-измерительные средства согласно их эксплуатационной документации.

4.3.8.7 Записать в протоколе исследований заводской номер средства измерения, подвергающегося исследованию, заводские номера образцовых и вспомогательных средств измерений, применяемых при исследовании.

4.3.9 Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра проверить соответствие измерительного приемника СВЧ диапазона следующим требованиям.

4.3.9.1 Органы управления и индикации должны быть испытаны, надежно закреплены и не иметь механических повреждений.

4.3.9.2 Маркировка на лицевых панелях составных частей измерительного приемника СВЧ диапазона должна быть четкой и соответствовать требованиям конструкторской документации.

4.3.9.3 Наличие внутри измерительного приемника СВЧ диапазона незакрепленных, шатающихся предметов.

4.3.10 Проверка функциональных возможностей

4.3.10.1 Включить измерительный приемника СВЧ диапазона и убедиться в соответствии положений переключателя режимов работы и пределов измерений показаниям на мониторе.

4.3.10.2 Подать на вход измерительного приемника СВЧ диапазона сигнал с частотой 82 ГГц и с уровнем мощности минус 10 дБм и произвести измерение, для проверки индикации результата измерения.

4.3.10.3 Неисправный измерительный приемник СВЧ диапазона бракуется и дальнейшей аттестации не подлежит.

4.3.11 Определение погрешности средства измерений

4.3.11.1 Определение погрешности уровня сигналов в диапазонах частот.

При определении погрешности измерения уровня сигнала, измерения проводятся методом прямых измерений в следующей последовательности:

1) подготовить эталонный высокочастотный генератор РГ4-14 сигналов и измерительный аттенюатор *DA-03R* к работе в соответствии с их инструкциями по эксплуатации;

2) подготовить ваттметр СВЧ МЗ-75/5 к работе в соответствии с его инструкцией по эксплуатации;

3) собрать измерительную установку в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.1;

4) установить на измерительном аттенюаторе *DA-03R* нулевое значение ослабления сигнала;

5) на высокочастотном генераторе РГ4-14 установить значение частоты сигнала 82 ГГц;

6) поворотом ручки «МОЩНОСТЬ» на высокочастотном генераторе РГ4-14 установить мощность выходного сигнала 1 мВт;

7) провести отсчет показаний ваттметра, P_3 ;

8) для точки минус 5,5 дБм установить на измерительном аттенюаторе *DA-03R* ослабление сигнала 5,5 дБм;

9) подключить аттестуемый измерительный приемник СВЧ диапазона в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.1;

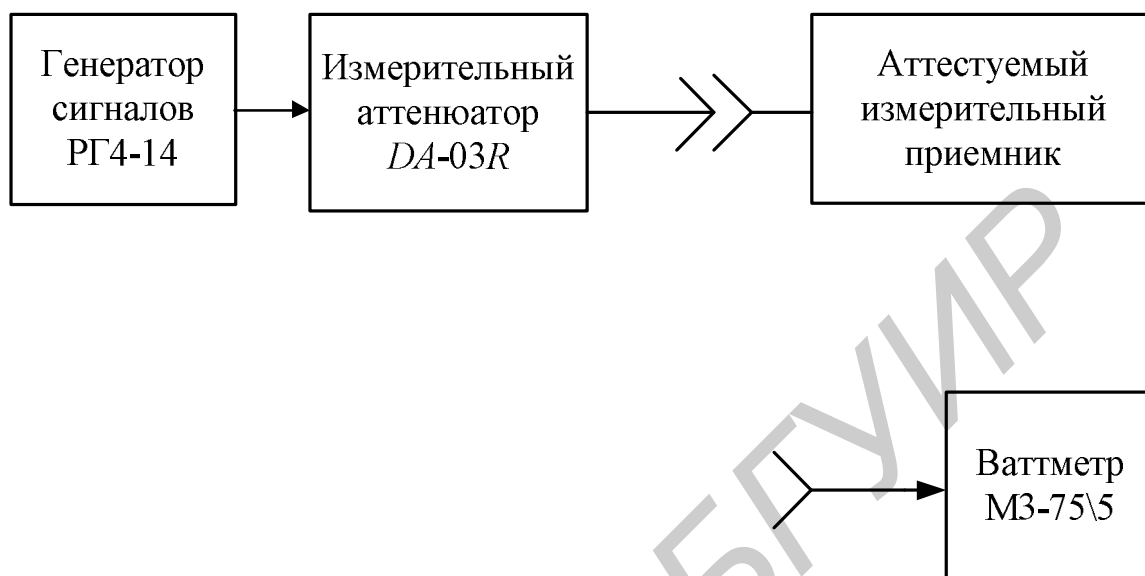


Рисунок 4.1 – Схема соединений при определении основной погрешности измерения уровня сигнала

10) включить измерительный приемник в режим измерения уровня сигнала на частоте 82 ГГц;

11) провести отсчет 5 показаний аттестуемого измерительного приемника, P_i ;

12) провести обработку результатов измерений в соответствии с п. 4.3.12.

Повторить измерения пункта 4.3.11.1 для всех точек частотного диапазона от 78 до 94 ГГц, приведенных в таблице 4.5.

Измерения в диапазоне частот от 94 до 118 ГГц проводятся в соответствии с пунктом 4.3.11.1 на частоте сигнала 98 ГГц.

4.3.11.2 Определение погрешности измерения частоты сигнала

При определении погрешности измерения частоты сигнала, измерения производится методом прямых измерений в следующей последовательности:

1) подготовить эталонный высокочастотный генератор сигналов РГ4-14 к работе в соответствии с его инструкцией по эксплуатации;

2) подготовить частотомер СВЧ РЧ5-29 к работе в соответствии с его инструкцией по эксплуатации;

Таблица 4.5 – Аттестуемые точки, необходимые для проведения метрологической аттестации

Диапазон частот	Аттестуемая точка, N_0 , дБм	Предел допускаемой основной погрешности, $\pm \Delta_{0p}$
78 – 94 ГГц	минус 5,5 дБм	$\pm 2,2$ дБ
	минус 55 дБм	
	минус 99 дБм	
94 – 118 ГГц	минус 5,5 дБм	$\pm 1,7$ дБ
	минус 55 дБм	
	минус 99 дБм	

3) установить уровень выходного сигнала на высокочастотном генераторе РГ4-14 минус 10 дБм и частоту сигнала равную 78 ГГц;

4) подключить частотомер СВЧ РЧ5-29 в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.2;

5) провести отсчет показаний частотомера СВЧ РЧ5-29, f_3 ;

6) подключить аттестуемый измерительный приемник в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.2;

7) включить измерительный приемник в режим измерения частоты;

8) провести отсчет 5 показаний аттестуемого измерительного приемника, f_i ;

9) провести обработку результатов измерений в соответствии с п. 4.3.12.

Повторить операции п. 4.3.11.2 для всех точек, приведенных в таблице 4.6.

4.3.11.3 Испытание на электробезопасность и ЭМС

Испытание измерительного приемника СВЧ диапазона на электробезопасность и ЭМС проводится в научно-исследовательском испытательном центре.

Проводятся следующие виды испытаний:

– контроль устойчивости к электростатическим разрядам – на соответствие СТБ ГОСТ Р 51317.4.2 – 2001 (МЭК 61000-4-2);

– требование к защите от поражения электрическим током, требование к электрической прочности изоляции, требование к металлическим доступным частям в нормальных условиях и условиях единичного нарушения – на соответствие ГОСТ 12.2.091, ГОСТ 12.2.007.0.

Таблица 4.6 – Аттестуемые точки, необходимые для проведения метрологической аттестации

Диапазон частот, ГГц	Аттестуемая точка, ГГц	Предел допускаемой основной погрешности, $\pm \Delta_{0f}$
78 – 118	78	± 100 кГц
	88	
	98	
	108	
	118	

4.3.12 Обработка результатов измерений

4.3.12.1 Обработка результатов метрологической аттестации проводится для каждой точки диапазона измерения. Формулы приводятся для обработки результатов наблюдений одной точки диапазона.

4.3.12.2 Определяем точечную оценку математического ожидания измеренных величин – среднее арифметическое результатов наблюдений

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i. \quad (4.3)$$

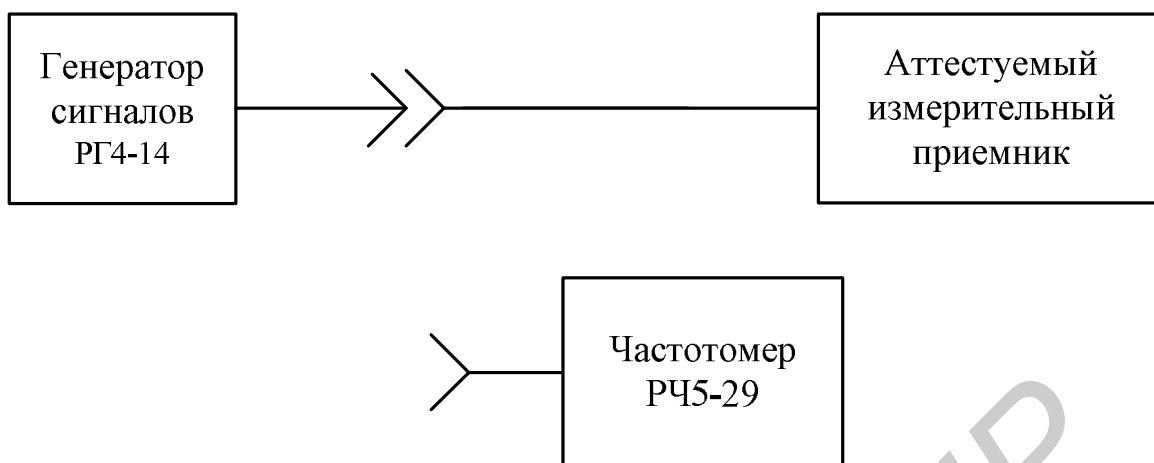


Рисунок 4.2 – Схема соединений при определении основной погрешности измерения частоты

4.3.12.3 Вычисляем случайные отклонения результатов наблюдений

$$V_{p_i} = P_i - \bar{P}. \quad (4.4)$$

4.3.12.4 Определяем оценку среднего квадратического отклонения (с.к.о.) результатов наблюдений

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_{p_i}^2}{n-1}}. \quad (4.5)$$

4.3.12.5 Определяем оценку с.к.о. результатов измерений

$$\sigma_{\bar{P}} = \frac{\sigma_p}{\sqrt{n}}. \quad (4.6)$$

4.3.12.6 Определяем коэффициент Стьюдента исходя из значений количества наблюдений и доверительной вероятности $P = 0,95$: $t_p = 2,57$.

4.3.12.7 Вычисляем доверительную границу случайной составляющей погрешности результата измерений

$$\overset{\circ}{\Delta} = t_p \cdot \sigma_{\bar{p}}. \quad (4.7)$$

4.3.12.8 Определяем суммарную не исключенную систематическую составляющую погрешности

$$\Delta_s = \pm K \sqrt{\sum_{j=1}^n \Delta_j^2}, \quad (4.8)$$

где Δ_j^2 – доверительные границы отдельных не исключенных систематических погрешностей ($j = 1, \dots, m$); K – поправочный коэффициент ($K = 1,1$ при $P = 0,95$).

4.3.12.9 Проводим суммирование не исключенных случайной и систематической составляющих погрешности. Для этого определим соотношение

$$R = \frac{\Delta_s}{\sigma_{\bar{p}}}. \quad (4.9)$$

Если $R > 8$, то за погрешность результата измерения принимают неисключенную систематическую составляющую погрешности измерения.

Если $R < 0,8$, то за погрешность результата измерения принимают случайную составляющую погрешности результата измерения.

Если $0,8 > R > 8$, то доверительная граница погрешности результата измерения

$$\Delta = K (\Delta_s + \overset{\circ}{\Delta}). \quad (4.10)$$

Результаты аттестации считаются удовлетворительными, если во всех аттестуемых точках, погрешности измерения уровня сигнала удовлетворяют неравенству:

$$\Delta \leq \Delta_{0P} \quad (4.11)$$

где Δ_{0P} – погрешность измерения, указанная в таблице 4.5, для каждого диапазона частот;

Δ – погрешность измерения уровня, полученная в результате проведения МА.

4.3.13 Установление межповерочного интервала

Величина межповерочного интервала устанавливается, исходя из принципа действия измерительного приемника СВЧ диапазона, опыта работы в данной области измерений и аналогов аттестуемого средства измерений. Межповерочный интервал устанавливается равным 12 месяцам.

4.3.14 Оформление результатов аттестации

4.3.14.1 Результаты метрологической аттестации оформляются протоколом, согласно СТБ 8004-93. Форма протокола приведена в Приложении Б. Протокол должен содержать данные об аттестуемом средстве измерений, средства и методику аттестации, условия проведения, результаты измерений и алгоритм обработки экспериментальных данных.

4.3.14.2 Положительные результаты метрологической аттестации удостоверяются нанесением оттиска поверительного клейма на измерительный приемник СВЧ диапазона и выдачей свидетельства об аттестации по форме приведенной в Приложении В.

4.3.14.3 В случае, если результаты метрологической аттестации измерительного приемника СВЧ диапазона не удовлетворяют предъявляемым к нему требованиям, выдается заключение о непригодности с указанием всех причин несоответствия установленным требованиям настоящей программы и методики метрологической аттестации.

5 Экспериментальные исследования измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона

Для определения параметров разработанного в ходе выполнения ГБЦ № 11-3077 и определения соответствия их заданным в техническом задании характеристикам были проведены экспериментальные исследования измерительного приемного устройства трехмиллиметрового диапазона длин волн. Для решения данной задачи была собрана экспериментальная установка, структурная схема которой приведена на рисунке 5.1, а ее внешний вид показан на рисунке 5.2.

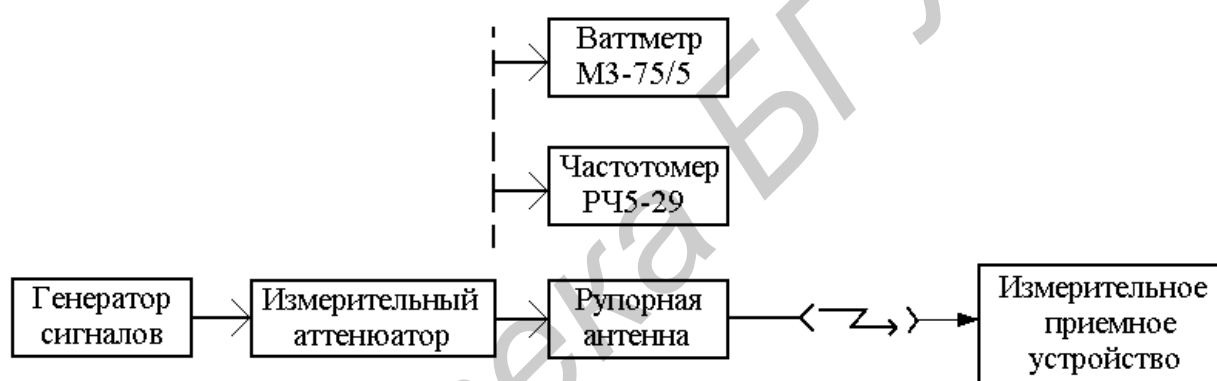


Рисунок 5.1 – Структурная схема экспериментальной установки для определения параметров и характеристик измерительного приемного устройства

В состав экспериментальной установки вошли генератор сигналов качающейся частоты РГ4-14 (генератор сигналов), служащий источником измерительного сигнала; измерительный поляризационный аттенюатор *DA-03R* с диапазоном изменения ослабления от 0 до минус 70 дБ, рупорная измерительная антенна с волноводным входом сечением 2,4×1,2 мм со стандартными присоединительными фланцами и выходным волноводным раскрытием 15×11 мм; преобразователь частоты миллиметрового диапазона РЧ5-29, работающий в режиме измерения частоты, и ваттметр МЗ-75/5 с трехмиллиметровым измерительным преобразователем.

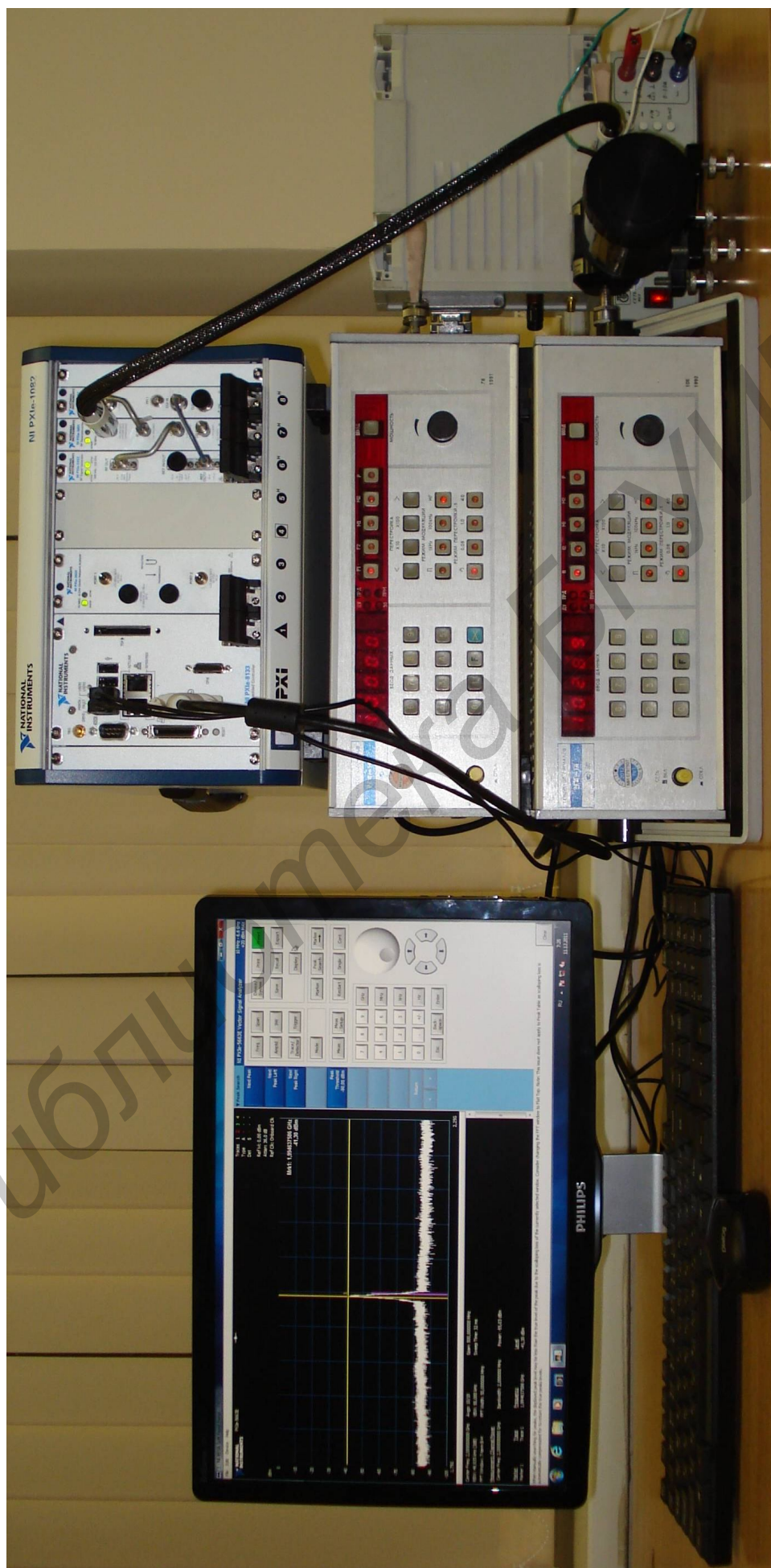


Рисунок 5.2 – Внешний вид экспериментальной установки для проведения исследований приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн

В состав измерительного приемного устройства, представленного на рисунке 5.2, входят рупорная измерительная антенна с волноводным выходом сечением $2,4 \times 1,2$ мм со стандартными присоединительными фланцами и выходным волноводным раскрытием 15×11 мм, волноводный *p-i-n* аттенуатор, волноводный балансный смеситель с конструктивно встроенным в него предварительным усилителем промежуточной частоты (ПУПЧ), блок питания с цифровым управлением для питания ПУПЧ, волноводный поляризационный аттенуатор *DA-03R* и генератор сигналов качающейся частоты РГ4-14, служащий источником гетеродинного сигнала.

Сигнал промежуточной частоты, частота которого может изменяться в диапазоне частот от 330 МГц до 6,6 ГГц, посредством калиброванного коаксиального кабеля подается на вход векторного анализатора сигналов, работающего в частотном диапазоне до 6,6 ГГц.

Векторный анализатор сигналов конструктивно состоит из 8-ми элементного крейта (корзины) в составе специализированного компьютера и трех блоков векторного анализа. Отдельно располагаются ЖКИ дисплей, клавиатура и манипулятор «Мышь», подключаемые к компьютеру с помощью стандартных разъемов.

В качестве источника измерительного СВЧ сигнала был использован генератор сигналов качающейся частоты РГ4-14, работающий в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц и имеющий выходную мощность в режиме непрерывных колебаний не менее 2 мВт, внешний вид которого показан на рисунке 5.3. На выходе генератора РГ4-14 был установлен измерительный поляризационный аттенуатор *DA-03R*, обеспечивающий ослабление выходного сигнала генератора в пределах от 0 до минус 70 дБ. На выходном фланце аттенуатора была установлена рупорная антенна 3-х миллиметрового диапазона длин волн.

Перед проведением измерений параметров исследуемого сигнала с помощью преобразователя частоты РЧ5-29, работающего в режиме частотомера, на выходе генератора устанавливалось требуемое значение

частоты выходного сигнала, а с помощью ваттметра МЗ-75/5 при нулевом ослаблении аттенюатора DA-03R устанавливалась выходная мощность генерируемого сигнала 1 мВт.



Рисунок 5.3 – Внешний вид источника сигнала

Перед проведением измерений измерительное приемное устройство устанавливалось в панорамный режим, обеспечивающий поиск исследуемого сигнала в полосе частот 12 ГГц. Волноводный СВЧ переключатель устанавливался в режим, при котором к гетеродинному входу балансного смесителя был подключен модуль гетеродина с частотой генерации 92 ГГц. В этом случае полоса обзора измерительного приемного устройства устанавливалась в пределах от 86 до 98 ГГц.

Принцип формирования частотного диапазона измерительного приемного устройства поясняется рисунком 5.4.

При попадании частоты генерируемого с помощью генератора PG4-14 в полосу обзора приемного устройства на экране монитора наблюдалась спектрограмм, вид которой приведен на рисунке 5.5.



Рисунок 5.4 – Принцип формирования полосы обзора измерительных приемным устройством

При нажатии клавиши «*Peak Search*» маркер устанавливался на вершину максимальной гармоники сигнала. В правом верхнем углу экрана указывались значения сигнала промежуточной частоты в ГГц и уровень исследуемого сигнала в *dBm*. При желании можно изменить единицы измерения уровня сигнала, выполнив операции, указанные в руководстве по эксплуатации измерительного приемного устройства (*dBμV*, *dBmV*, *Volts*, *Volts Squared*, *Watts*). Маркер отслеживает флуктуации исследуемого сигнала, перемещаясь вместе с выбранной спектральной составляющей. При этом будет изменяться текущая частота, индицируемая на экране монитора.

После обнаружения исследуемого сигнала в режиме панорамного обзора (режим низкой чувствительности измерительного приемного устройства) измерительное приемное устройство переводится в режим измерения параметров исследуемого сигнала. путем запуска соответствующего программного обеспечения *LabView*

- . При этом необходимо выполнить следующие действия:
 - с помощью поляризационного аттенюатора, включенного на выходе генератора сигналов качающейся частоты РГ4-14, уменьшается уровень генерируемого сигнала. При этом наблюдается уменьшение амплитуды спектральной составляющей, отмеченной маркером;
 - пользуясь руководством по эксплуатации приемного устройства, необходимо добиться высокой чувствительности приемного устройства путем

уменьшения полосы обзора, полосы пропускания полосового и числа усреднений исследуемого сигнала при анализе его спектра.

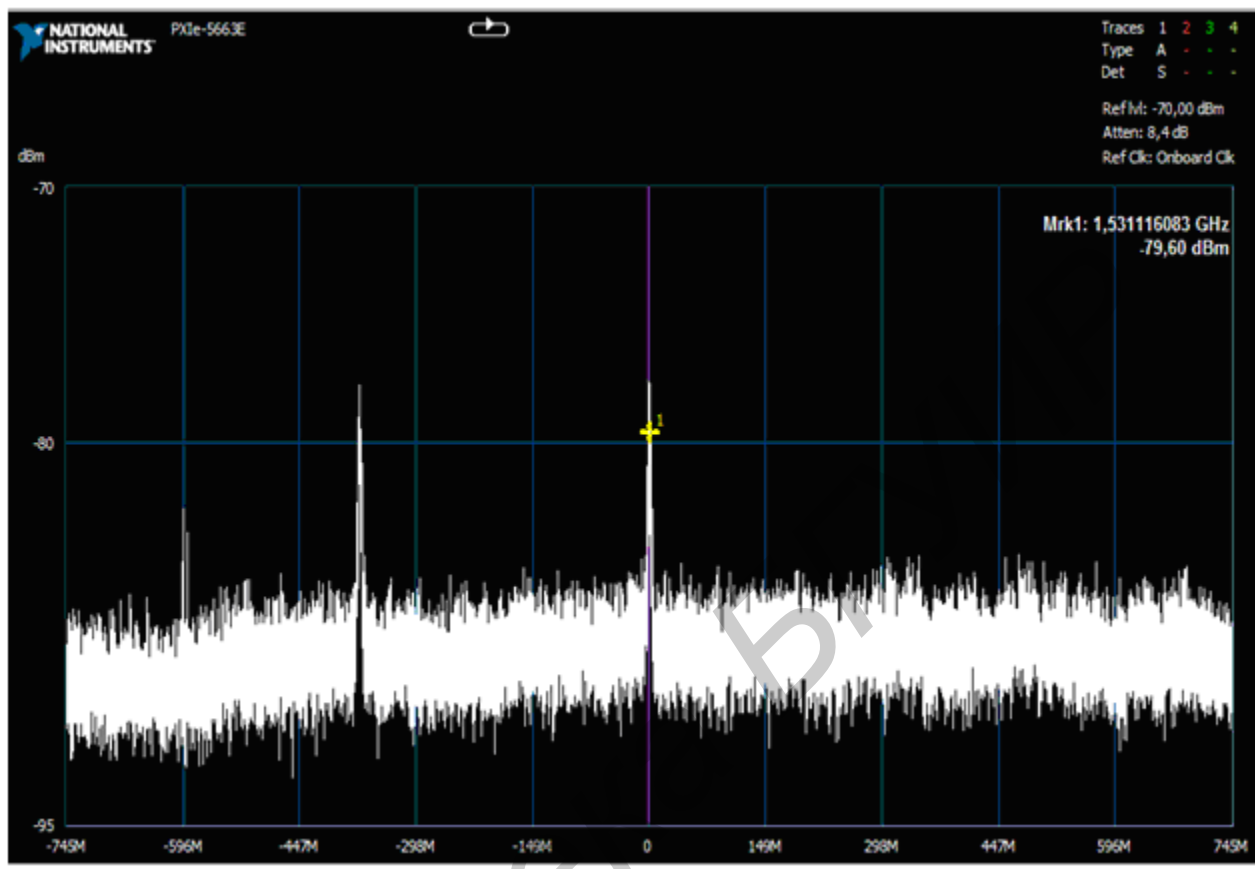


Рисунок 5.5 – Вид графического монитора при попадании исследуемого сигнала в полосу обзора приемного устройства

После загрузки программы при помощи органов управления на передней панели измерительного приемника устанавливаем исходные настройки, необходимые для проведения измерений.

Результаты измерений отображаются на дисплее в виде спектра сигнала. При этом в верхней части экрана дисплея индицируется спектрограмма в координатах частота → амплитуда, а в нижней части дисплея – приводятся все исходные данные, а так же значение уровня и частоты сигнала в точке, в которой установлен маркер. Значение измеряемого сигнала дублируется в правом верхнем углу. Внешний вид графического монитора с результатами испытаний представлен на рисунке 5.6.

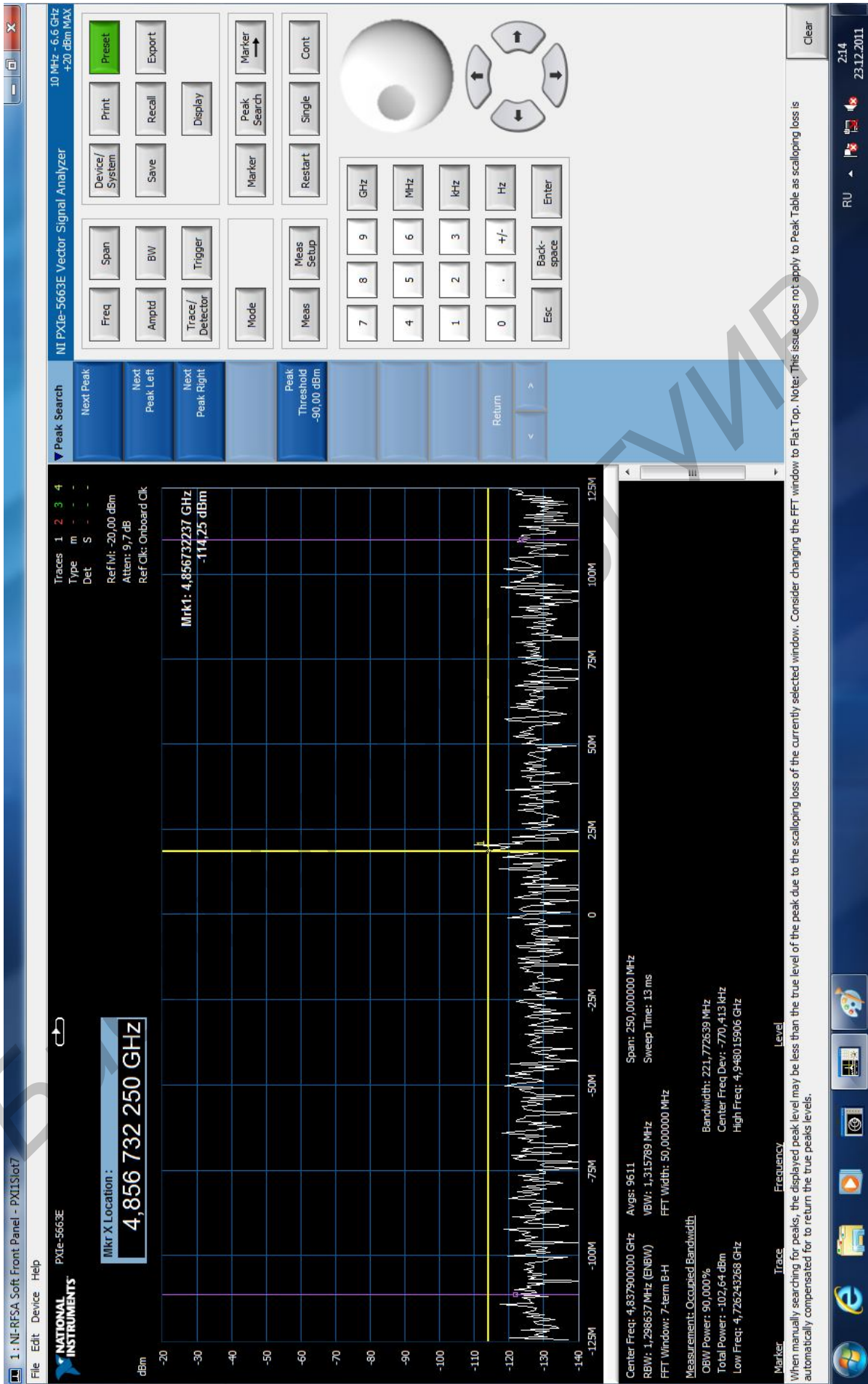


Рисунок 5.6 – Результаты измерения параметров исследуемого сигнала

Результаты эксперимента при помощи кнопки «*Save*» затем могут быть сохранены в файле или же нажатием кнопки «*Print*» отправлены на печать.

Так как проводилось измерение разностной компоненты сигнала промежуточной частоты, полученного на выходе смесителя, к результату измерения частоты сигнала, надо добавить значение частоты гетеродина.

При проведении эксперимента результаты измерений оформляются в виде

$$f = f_{и} \pm \Delta f; \quad (5.1)$$

$$P = P_{и} \pm \Delta P. \quad (5.2)$$

Как видно из рисунка 5.6 уровень гармонической составляющей исследуемого гармонического сигнала на промежуточной частоте 4,85 ГГц составляет минус 114,25 дБм, что вполне удовлетворяет требованиям технического задания на разрабатываемый макет измерительного приемного устройства. Следует отметить, что данные результаты получены при подаче на гетеродинный вход балансного смесителя миллиметрового диапазона гетеродинного сигнала частотой 90 ГГц уменьшенной мощности.

При проведении экспериментальных исследований проводились измерения развязки между гетеродинным и исследуемым каналами балансного смесителя. Наилучшие результаты были получены при подаче на гетеродинный вход смесителя сигнала мощностью от 5 до 7 мВт. При более высоких уровнях гетеродинного сигнала наблюдался «пролаз» сигнала гетеродина на выход канала промежуточной частоты.

Экспериментальные характеристики разработанного измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн приведены в таблице 5.1.

Проведя анализ графического изображения спектра исследуемого сигнала, представленного на рисунке 5.5, можно сделать вывод, динамический диапазон разработанного измерительного приемника превышает заданный в

техническом задании как минимум на три дБ. Следует отметить, что данный результат получен в режиме панорамного обзора, т.е. минимальной чувствительности приемного тракта.

Таблица 5.1 – Характеристики приемного устройства миллиметрового диапазона

Наименование объекта	Наименование технических показателей	Единица измерения	Значение показателя	
			Планируемого	Разработанного
Макет приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн	Диапазон рабочих частот	ГГц	78,33 – 98,3	78,33 – 118,1
	Пределы измерения мощности синусоидальных сигналов	Вт	$10^{-12} - 10^{-6}$	$10^{-12} - 10^{-6}$
	Динамический диапазон в процессе измерения	дБ	не менее 30	33

Данные результаты измерения оформлены в виде протоколов испытаний измерительного приемного устройства и будут использованы при проведении метрологической аттестации разработанного экспериментального образца.

Таким образом, давая краткую оценку эксплуатационным показателям разработанного измерительного приемного устройства миллиметрового диапазона, можно сделать вывод, что в результате проведенной работы достигнуто расширение полосы рабочих частот и динамического диапазона измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы «Разработка и исследование приемных устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн для измерения малых уровней мощности и напряженности электромагнитного поля» получены следующие результаты.

Разработаны:

- структурная схема и алгоритмы работы приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн;
- балансный смеситель миллиметрового диапазона длин волн, работающий на первой гармонике частоты гетеродина;
- предварительный усилитель промежуточной частоты, работающий в частотном диапазоне 6,2 ГГц;
- *p-i-n* аттенюатор, работающий в диапазоне частот 78,33 – 118,1 ГГц;
- волноводный электрически управляемый СВЧ переключатель на три направления, работающий в диапазоне частот 78,33 – 118,1 ГГц;
- синтезатор частот в диапазоне частот 330 МГц – 6,6 ГГц;
- источник СВЧ гетеродинного сигнала частоты 92 ГГц;
- программа и методика метрологической аттестации приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн;
- программное обеспечение обработки и отображения информации, написанное на графическом языке *LabVIEW* версии 9.0.

Проведено:

- моделирование параметров и характеристик основных узлов приемного устройства миллиметрового диапазона;
- настройка и отладка макета приемного устройства миллиметрового диапазона;
- измерение основных характеристик приемного устройства миллиметрового диапазона.

В результате проведенных измерений установлено:

- приемное устройства миллиметрового диапазона длин волн позволяет производить измерение параметров СВЧ сигналов, антенных устройств, частоты и мощности входного сигнала в диапазоне частот 78,33 – 118,1 ГГц;
- погрешность измерения частоты входного сигнала не превышает 0,4 %;
- динамический диапазон мощностей измеряемого сигнала $10^{-11} - 10^{-6}$ Вт;
- погрешность измерения мощности входного сигнала не превышает $\pm 0,5$ дБ.

Разработка приемного устройства миллиметрового диапазона длин волн проведена на современной элементной базе. Для обеспечения перестройки приемного устройства по частоте использован набор стабилизированных по частоте от одного источника СВЧ генераторов, позволяющие обеспечить требуемый диапазон перестройки приемного устройства и высокую точность измерения частоты входного сигнала.

Разработанное программное обеспечение и автоматическое переключение источников гетеродинного сигнала позволит после проведения опытно-конструкторских работ использовать его для проведения мониторинга электромагнитной обстановки в трехмиллиметровом диапазоне длин волн в панорамном режиме.

В результате выполнения ГБЦ №11 – 3077:

- проведено исследование методов построения СВЧ аппаратуры для измерения малого уровня мощности и напряженности электромагнитного поля миллиметрового диапазонов длин волн;
- разработаны методы моделирования и проектирования широкополосных элементов и приемных устройств СВЧ;
- проведены макетирование и экспериментальные исследования широкополосных приемных устройств миллиметрового диапазона;
- разработан экспериментальной образец приемного устройства миллиметрового диапазона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Цифровой образовательный ресурс [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://school-collection.edu.ru/>.
- [2] Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ. / Д.М. Сазанов – М.: Высшая школа, 1981.-295 с.
- [3] СТБ 8004-93. СОЕИ РБ. Метрологическая аттестация средств измерений.
- [4] Википедия [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Измерительный_приемник.
- [5] Аблязов, В. С. Измерительный приемник для сверхвысоких частот / Аблязов В.С. – Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР, 1957 г.
- [6] Аблязов, В. С. Супергетеродинный измерительный приемник / Аблязов В.С. – Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР, 1966 г.
- [7] СВЧ-приемник с двойным преобразованием частоты / Зеленюк Ю.И. [и др.]. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2008 г.
- [8] Википедия [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Анализатор_спектра.
- [9] Елизаров, А. С. Электрорадиоизмерения. Учебник для вузов. / Елизаров А.С. – Мн.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
- [10] Патент номер: 174709 МПК G01R23/16 Анализатор спектра частот. Заявитель: Всесоюзный научно исследовательский институт электроизмерительных приборов. Заявка: 908060.
- [11] Анализатор спектра / Блинов В.Ф., [и др.]. – Самсунг Электроникс, Компани., 1995 г.
- [12] *Spectrum analyzer with phase noise compensation / Serguei Pantchenko Anatoli Tease. – Technical Enterprises, 2004 г.*

[13] Крисилов, Ю. И. Селективный микровольтметр с автоматической калибровкой / Крисилов Ю. И. – Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР, 1980 г.

[14] Пейч, Л. И. *LabVIEW* для новичков и специалистов / Л. И. Пейч, Д. А. Точилин, Б. П. Поллак. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004 – 384 с.

[15] Измерители параметров ВЧ и СВЧ сигналов. <http://www.astena.ru>.

[16] Каталог продукции фирмы Agilent Technologies. <http://www.ingservis.ru>.

[17] Рембовский, А.М., Ашихмин, А.В., Козьмин, В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под редакцией А.М. Рембовского. – М: Горячая линия – Телеком, 2006. – 492 с.

[18] Рембовский, А. М., Ашихмин, А. В., Сергиенко, А. Р. Построение многофункциональных систем радиомониторинга на основе семейства малогабаритных цифровых радиоприемных устройств и модулей / Специальная техника, 2005, № 4.

[19] [Каталог компании «ИРКОС»](#), Москва, 2010.

[20] Ашихмин, А.В., Козьмин, В.А., Кочкин, Д.Е. и др. Использование цифрового измерительного приемника АРГАМАК-ИМ для измерения напряженности поля в мобильных станциях радиомониторинга/ Специальная техника, 2006, № 3, с. 35 – 44.

[21] Бегишев, М.Р., Двоглазова, С.В., Козьмин, В.А., Кочкин, Д.Е., Савельев, С.И. Автоматизированный мониторинг интенсивности электромагнитного поля / Специальная техника, 2007, № 2, с. 34 – 39.

[22] Ашихмин, А. В., Каюков, И. В., Козьмин, В. А., Манелис, В. Б. Анализатор базовых станций GSM сетей на базе панорамного измерительного приемника АРГАМАК-ИМ/ Специальная техника, 2008, № 1, с. 31 – 39.

[23] Ашихмин, А. А., Сергеев, В. Б., Сергиенко, А. Р. Радиоприемные тракты комплексов автоматизированного радиоконтроля: особенности, решения и перспективы. / Специальная техника. 2002. Специальный выпуск, с. 57 – 64.

[24] Калинин, А. В. Многочастотные методики измерения характеристик антенн и аттестации измерительных установок. Антенны. Выпуск 12 (91), 2004. – с. 28.

[25] Калинин, А. В. Экспериментальные исследования возможностей многочастотных антенных измерений на типовой установке в безэховой камере. Антенны. Выпуск 12 (91), 2004. – с. 34.

[26] Розанов, Б. А., Розанов, С. Б. Приемники миллиметровых волн. М.: Радио и связь, 1989. – 168 с.

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справка об известном нормативном обеспечении разработки

А.1 Международные и межгосударственные стандарты, методические указания и рекомендации по метрологии.

1 ГОСТ 2.001-93. ЕСКД. Общие положения.

2 ГОСТ 2.105-95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

3 ГОСТ 2.106-96. ЕСКД. Текстовые документы.

4 ГОСТ 2.109-73. ЕСКД. Основные требования к чертежам.

5 ГОСТ 19.404-79. ЕСПД. Пояснительная записка. Требования к содержанию и оформлению.

6 ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.

7 ГОСТ 8.009-84 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

8 ГОСТ 12.2.091-2002 Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Часть 1. Общие требования.

9 ГОСТ 8.207-76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.

А.2 Национальные стандарты и руководящие документы.

1 СТБ 8004-93. СОЕИ РБ. Метрологическая аттестация средств измерений.

А.3 Технические условия, технические описания, руководства по эксплуатации.

1 Векторный анализатор ВЧ сигналов *NI PXIe-5663*. Техническое описание.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Форма протокола
(рекомендуемая)

ПРОТОКОЛ № _____

Метрологической аттестации измерительного приемного устройства № _____

Наименование организации заказчика: _____

Наименование лаборатории, проводившей поверку: _____

Дата аттестации: начало _____ окончание _____

Эталонное оборудование:

Наименование и тип СИ	Заводской номер	Метрологические характеристики	Дата последней поверки
1			
2			

Наименование и обозначение НД: Программа и методика метрологической аттестации

Условия проведения аттестации: температура, °С _____
влажность, % _____
давление, кПа _____

Результаты аттестации:

1. Внешний осмотр: (соответствует / не соответствует) требованиям ПМА
2. Определение метрологических характеристик:

Таблица Б.1 – Пример заполнения таблицы данными метрологической аттестации

Номер	Диапазон частот	Аттестуемая точка	Результаты измерений	Не исключенная систематическая погрешность Δ_s	Случайная составляющая погрешности, Δ	Доверительные границы погрешности, Δ
1						
2						
3						
4						
5						

Заключение: _____

Аттестацию проводил: _____

Должность
Расшифровка подписи

Подпись

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Форма свидетельства о метрологической аттестации

наименование субъекта хозяйствования (организации), проводившего аттестацию

СВИДЕТЕЛЬСТВО № _____ от _____ 20__ г.

о метрологической аттестации средства измерения

наименование, обозначение, заводской номер, дата изготовления

принадлежащего

наименование субъекта хозяйствования или организации

Назначение средства измерений

краткая характеристика объекта, для которого предназначено средство измерений и условия эксплуатации

наименование измеряемых величин

Результаты метрологических исследований*

Наименование метрологических характеристик	Полученное значение метрологических характеристик	Тип, разряд образцовых средств измерений, применяемых при определении метрологических характеристик

* При большем числе определяемых метрологических характеристик допускается отражать результаты исследований только в протоколе, прилагаемом к свидетельству.

По результатам метрологической аттестации протокол № _____ от _____ 20__ г.

наименование средства измерений
признано соответствующим

наименование технической документации,

содержащей сведения о метрологических характеристиках

Поверку проводить в соответствии с

наименование и обозначение документа на методику поверки

или эксплуатационного документа, содержащего раздел "Поверка"

Поверку провести не позднее _____ 20__ г.

Руководитель субъекта хозяйствования, проводившего аттестацию

МП

личная подпись

расшифровка подписи

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Описание программного обеспечения для управления генератором сигналов качающейся частоты

Для реализации управления генератором используется динамическая библиотека. В ней каждая из команд протокола реализована в виде отдельной функции. Кроме того, библиотека содержит дополнительные функции, предназначенные для настройки порта.

Функции *DLL*

Список функций библиотеки *RG414usb.dll* приведен ниже:

1 Функция *RG414_OpenDevice*

Открывает *USB*-устройство с именем «*RG4-14*».

bool RG414_OpenDevice(void)

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

2 Функция *RG414_CloseDevice*

Закрывает открытое ранее *USB*-устройство.

bool RG414_CloseDevice(void)

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

3 Функция *RG414_GetLastError*

Чтение строки с информацией о последней ошибке обмена с устройством.

void RG414_GetLastError(LPCSTR &lpcStr)

Возвращает указатель на строку, которая содержит информацию о последней ошибке.

Если предыдущая операция обмена с устройством прошла без ошибок, возвращается указатель на пустую строку.

4 Функция *PG414_GetInfo*

Чтение информации об устройстве.

bool PG414_GetInfo(LPCSTR &lpcStr)

Возвращает указатель на строку, которая содержит информацию об устройстве. В данном случае строка выглядит следующим образом: «RG4-14 V1.0», где «RG4-14» – тип генератора, «V1.0» – версия *firmware* 1.0.

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

5 Функция *RG414_SetMode*

Установка режима управления генератором.

bool RG414_SetMode(int mode)

Функция имеет следующие параметры:

mode – режим управления генератором, содержит набор управляющих битов. Бит *mode.0* – блокировка местного управления. Если равен единице, местное управление отключено. Если равен нулю, местное управление работает. Остальные биты параметра не используются.

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

6 Функция *RG414_GetMode*

Чтение режима управления генератором.

bool RG414_GetMode(int &mode)

Возвращает режим управления генератором *mode*, формат аналогичен параметру

функции *RG414_SetMode*.

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

7 Функция *RG414_SetPar*

Установка значения параметра генератора.

bool RG414_SetPar(int ch, int par, int val)

Функция имеет следующие параметры:

ch – номер канала

par – номер параметра

val – значение параметра

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

8 Функция *RG414_GetPar*

Чтение значения параметра генератора.

bool RG414_GetPar(int ch, int par, int & val)

Функция имеет следующие параметры:

ch – номер канала

par – номер параметра

Возвращает значение параметра *val*.

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

9 Функция *RG414_GetSelPar*

Чтение значения параметра, выбранного в меню генератора.

bool RG414_GetSelPar(int &ch, int &par, int &val)

Возвращает следующие значения:

ch – номер выбранного канала

par – номер выбранного параметра

val – значение выбранного параметра.

В случае успешного выполнения возвращает *true*.

Описание параметров

Функции управления генератором *RG414_SetPar*, *RG414_GetPar* и *RG414_GetSelPar*

используют номер канала, номер параметра и значение параметра.

Управление логически разделено на несколько каналов:

ch = OUT_A (0) – канал управления выходом «A»;

ch = OUT_B (1) – канал управления выходом «B»;

ch = SYNC (2) – канал управления входом внешней синхронизации;

ch = SETUP (3) – канал настроек генератора.

Для каждого из каналов имеется свой набор параметров.

1. Параметры каналов *OUT_A* и *OUT_B*

Для управления выходными сигналами генератора (*ch = OUT_A* или *ch = OUT_B*)

используются следующие параметры:

par = PAR_H (0) – управление формой выходного сигнала

val = SH_P (0) – генерация положительного логического импульса

$val = SH_N (1)$ – генерация отрицательного логического импульса
 $val = SH_M (2)$ – генерация меандра
 $val = SH_L (3)$ – низкий статический уровень
 $val = SH_H (4)$ – высокий статический уровень
 $par = PAR_Y (1)$ – выбор вида синхронизации
 $val = AUTO_A (0)$ – синхронизация от автогенератора «A»
 $val = AUTO_B (1)$ – синхронизация от автогенератора «B»
 $val = EXT_R (2)$ – внешняя синхронизация по фронту
 $val = EXT_F (3)$ – внешняя синхронизация по спаду
 $par = PAR_P (2)$ – период автогенератора «A» или «B»
 $val = 2 \dots 999999999 [x10 ns]$
 $par = PAR_W (3)$ – длительность импульса для канала «A» или «B»
 $val = 1 \dots 999999999 [x10 ns]$
 $par = PAR_D (4)$ – длительность задержки для канала «A» или «B»
 $val = 0 \dots 999999999 [x10 ns]$
 $par = PAR_S (5)$ – смещение выходного сигнала для канала «A» или «B»
 $val = -500 \dots +1000 [x10 mV]$
 $par = PAR_A (6)$ – амплитуда выходного сигнала для канала «A» или «B»
 $val = -1500 \dots +1500 [x10 mV]$
 $par = PAR_R (7)$ – управление аттенюатором канала «A» или «B»
 $val = REL_OFF (0)$ – реле аттенюатора выключены PG-872
 $val = REL_20DB (1)$ – аттенюатор $-20 dB$
 $val = REL_0DB (2)$ – аттенюатор $0 dB$

2. Параметры канала SYNC

Для управления входом внешней синхронизации ($ch = SYNC$) используются следующие параметры:

$par = PAR_L (0)$ – порог компаратора
 $val = -500 \dots +500 [x10 mV]$
 $par = PAR_F (1)$ – управление цифровым фильтром
 $val = 0$ – цифровой фильтр выключен

$val = 1$ – цифровой фильтр включен
 $par = PAR_E (2)$ – время ожидания
 $val = 0 \dots 999999999$ [x10 ns]
 $par = PAR_F (3)$ – управление измерителем периода
 $val = 0$ – измеритель периода выключен
 $val = 1$ – измеритель периода включен
 $par = PAR_T (4)$ – время измерения периода
 $val = 0 \dots 999999999$ [x10 ns]

3. Параметры канала *SETUP*

Для осуществления общего управления генератором используется специальный код канала ($ch = SETUP$). Для общего управления используются следующие параметры:

$par = SAVE_P (0)$ – команда сохранения пресета (только запись)
 $val = 0 \dots 9$ – номер регистра
 $par = READ_P (1)$ – команда чтения регистра (только запись)
 $val = 0 \dots 9$ – номер регистра
 $par = LCD_C (2)$ – установка контраста *LCD* (только запись)
 $val = 0 \dots 127$ – контраст *LCD*
 $par = OFFS_A (3)$ – калибровка смещения канала «A» (только запись)
 val (байт 1) = $-127 \dots +127$ – смещение низкого уровня канала «A»
 val (байт 2) = $-127 \dots +127$ – смещение высокого уровня канала «A»
 $par = OFFS_B (4)$ – калибровка смещения канала «B» (только запись)
 val (байт 1) = $-127 \dots +127$ – смещение низкого уровня канала «B»
 val (байт 2) = $-127 \dots +127$ – смещение высокого уровня канала «B»
 $par = SAVE_S (5)$ – команда сохранения настроек (только запись)
 val – игнорируется
 $par = PER_A (6)$ – период синхронизации канала «A» (только чтение)
 $val = 0 \dots 999999999$ [x10 ns]
 $par = PER_B (7)$ – период синхронизации канала «B» (только чтение)
 $val = 0 \dots 999999999$ [x10 ns]

Команда *SAVE_P* требует для своего выполнения до 2 с. Ответ на эту команду передается генератором сразу же, но одновременно запускается процесс записи данных в *EEPROM*, поэтому генератор в течение некоторого времени не воспринимает команды компьютера.

Команда *READ_P* производит считывание всех параметров из *EEPROM* в память генератора, но в компьютер новые значения не передаются. Поэтому после выполнения команды *READ_P* следует считать все параметры из генератора.

Период синхронизации (для $par = PER_A$ и $par = PER_B$) представляет собой измеренное значение периода синхронизации для канала «A» или «B». Используется для индикации периода внешней синхронизации.

4. Модификаторы кода номера параметра

При записи в генератор значений параметров можно применять модификаторы кода номера параметра. При этом выполняются дополнительные функции.

DRAW = 0x80 – требование перерисовки меню

BEEP = 0x40 – требование генерации звукового сигнала

Модификаторы добавляются к коду номера параметра с помощью функции «логическое или».

Если добавлен модификатор *DRAW*, то при получении генератором команды от компьютера производится перерисовка меню. Это используется для получения соответствия выбранных параметров между компьютером и генератором. Нужно учитывать, что перерисовка всего дисплея генератора занимает около 20 мс. Если добавлен модификатор *BEEP*, то при получении генератором команды от компьютера производится генерация короткого звукового сигнала.

4. Описание протокола обмена

4.1. Команды протокола

Генератор подключается к компьютеру с помощью интерфейса *USB*.

Команды передаются в виде пакетов согласно протоколу *WAKE*, скорость обмена 250 Кбод.

Инициатором обмена всегда выступает компьютер. В ответ на каждую команду устройство передает пакет, который содержит тот же номер команды, а в качестве первого байта данных передается код ошибки (за исключением команд *CMD_ECHO* и *CMD_INFO*). Код ошибки *00h* означает успешное выполнение команды. Любой отличный код – наличие ошибки (см. описание кодов ошибок ниже). В поле данных каждой команды передаются параметры. Для разных команд число параметров может быть разным, есть команды, которые не имеют параметров вообще.

4.1.1. Команда *Cmd_Nop*

Команда *CMD_NOP* не выполняет никакой операции. Она используется для внутренних целей и никогда не передается в устройство или компьютер.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0

00h 0 - 00h 0 -

4.1.2. Команда *Cmd_Err*

Устройство передает команду *CMD_ERR* в качестве ответа на любую команду, если произошла ошибка приема пакета. Параметр *Error Code* для этой команды всегда равен

ERR_TX.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0

01h 0 - 01h 1 Error Code

4.1.3. Команда *Cmd_Echo*

Команда *CMD_ECHO* используется для запроса возврата пакета. Пакет может содержать до 16 байт произвольных данных. В ответ на эту команду устройство передает пакет в неизменном виде обратно. Команда используется для проверки связи с устройством.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
02h X Byte1 02h X Byte1

... ..

ByteN ByteN

4.1.4. Команда *Cmd_Info*

Команда *CMD_INFO* представляет собой запрос информации о типе устройства и версии встроенного программного обеспечения (*firmware*). В ответ передается пакет, содержащий 12 байт данных, которые представляют собой строку в коде *ASCII*: «*RG-872*»

V1.0», где «*RG-872*» – тип устройства, «*V1.0*» – версия *firmware* 1.0. В качестве разделителей используются пробелы (код 20h). Строка заканчивается байтом 00h.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
03h 0 - 03h 12 String: "V1.0", 00h

4.1.5. Команда *Cmd_SetMode*

Команда *CMD_SETMODE* служит для установки режима управления генератором. Команда имеет единственный параметр *mode*, который содержит битовые поля:

- Если бит $L = 1$, местное управление отключено. Если $L = 0$, местное управление работает.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
06h 1 - - - - - L 06h 1 Error Code

4.1.6. Команда *Cmd_GetMode*

Команда *CMD_GETMODE* служит для считывания текущего режима управления генератором.

Команда возвращает значение *mode*, аналогичное по формату параметру команды *CMD_SETMODE*.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
07h 0 - 07h 2 Error Code

-----L

4.1.7. Команда *Cmd_SetPar*

Команда *CMD_SETPAR* служит для установки значения параметра генератора.

Команда имеет следующие параметры:

ch – номер канала генератора

par – номер параметра генератора

val – значение параметра, представляющее собой 32-разрядное целое число. Первым передается младший байт (*byte 1*).

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
08h 6 ch 08h 1 Error Code

par

val (byte 1)

val (byte 2)

val (byte 3)

val (byte 4)

4.1.8. Команда *Cmd_GetPar*

Команда *CMD_GETPAR* служит для считывания значения параметра генератора. Команда имеет следующие параметры:

ch – номер канала генератора

par – номер параметра генератора

Команда возвращает следующие значения:

val – значение выбранного параметра генератора, которое полностью аналогично параметру команды *CMD_SETPAR*.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
09h 2 ch 09h 5 Error Code

par

val (byte 1)

val (byte 2)

val (byte 3)

val (byte 4)

4.1.9. Команда *Cmd_GetSelPar*

Команда *CMD_GETSELPAR* служит для считывания значения параметра, выбранного в меню генератора.

Команда возвращает следующие значения:

ch – номер выбранного канала генератора

par – номер выбранного параметра генератора

val – значение выбранного параметра генератора, которое полностью аналогично параметру команды *CMD_SETPAR*.

TX RX

CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 CMD N D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0

0Ah 0 - 0Ah 7 Error Code

ch

par

val (byte 1)

val (byte 2)

val (byte 3)

val (byte 4)

4.1.10. Коды ошибок

При выполнении команд могут возникать ошибки. Код ошибки возвращается в виде параметра *Error Code* в ответе на каждую команду. Если при выполнении команды, которая должна возвращать некоторое количество значений, произошла ошибка, то возвращается всего один байт – код ошибки. Коды стандартных ошибок, определенных для протокола *WAKE*, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коды ошибок.

Имя ошибки	Код ошибки	Наименование ошибки
<i>Err_No</i>	00h	Нормальное завершение команды
<i>Err_Tx</i>	01h	Ошибка обмена с устройством
<i>Err_Bu</i>	02h	Устройство занято
<i>Err_Re</i>	03h	Устройство не готово
<i>Err_Pa</i>	04h	Ошибка значений параметров
<i>Err_Nr</i>	05h	Нет ответа
<i>Err_Nc</i>	06h	Нет приема