

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой РЗИ  
\_\_\_\_\_ А.В. Фатеев  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Устройства приема и обработки  
дискретных и аналоговых сигналов**

Методические указания по выполнению лабораторных работ  
для студентов направлений 11.04.01 «Радиотехника» и  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Разработчики  
Профессор кафедры РСС, д.ф.-м.н..  
\_\_\_\_\_ А. С. Задорин;  
Ст.преподаватель кафедры РСС,  
\_\_\_\_\_ А.В.Максимов  
доцент кафедры РСС, к.т.н.  
\_\_\_\_\_ И.Ю. Кузьменко  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю.** Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС). Методические указания по выполнению лабораторных работ: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 74 с.

Приводятся описания лабораторных работ по дисциплине «Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов» для студентов-магистрантов направлениям 11.04.01 «Радиотехника» и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

© Задорин А. С., Максимов А.В., Кузьменко И.Ю, 2019.

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	3
Введение .....	6
Тема 1. Исследование приемников цифровых сигналов радиорелейных систем связи .....	9
Краткие теоретические сведения .....	9
Максимальная длина линии связи РРЛ .....	9
Ослабление сигнала в тракте РРЛ.....	10
Описание интерференционных замираний сигналов в канале ЦРРЛ .....	11
Энергетический бюджет усиления РРЛ .....	14
Помехоустойчивость РРЛ.....	15
Эквалайзирование АЧХ тракта ЦРРС .....	18
Сигнальное созвездие цифрового сигнала .....	18
Глазковая диаграмма .....	19
Рекомендуемая литература .....	20
1. Лабораторная работа .....	21
Исследование приемной аппаратуры радиорелейной системы связи «МИК-РЛР+» .....	21
Цель работы .....	21
Домашнее задание к работе.....	21
Описание лабораторного макета.....	21
Лабораторное задание .....	23
Содержание отчета .....	23
Порядок выполнения работы .....	23
Контрольные вопросы.....	24
Рекомендуемая литература .....	24
2. Лабораторная работа .....	26
Исследование двухлучевой интерференции в канале ЦРРС.....	26
Цель работы .....	26
Домашнее задание к работе.....	26
Описание лабораторного макета.....	27
Лабораторное задание .....	28
Порядок выполнения работы .....	28
Контрольные вопросы.....	30
Рекомендуемая литература .....	30
3. Лабораторная работа .....	31
Исследование помехоустойчивости цифровых приемников ЦРРС .....	31
Цель работы .....	31
Домашнее задание к работе.....	31
Описание лабораторного макета.....	31
Лабораторное задание .....	31
Порядок выполнения работы .....	31
Контрольные вопросы.....	32
Рекомендуемая литература .....	32
Тема 2. Исследование узлов аналогового радиоприемника с помощью автоматизированной информационно – измерительной системы.....	33
Описание лабораторного макета.....	33
4. Лабораторная работа .....	37
Исследование входных цепей РПрУ.....	37
Цель работы .....	37
Домашнее задание к работе.....	37
Лабораторное задание .....	38
Порядок выполнения работы .....	38
Содержание отчета .....	39

Контрольные вопросы.....	39
Рекомендуемая литература.....	39
5. Лабораторная работа.....	41
Исследование преобразователя частоты РПрУ.....	41
Цель работы.....	41
Домашнее задание к работе.....	41
Лабораторное задание.....	41
Порядок выполнения работы.....	42
Контрольные вопросы.....	43
Рекомендуемая литература.....	43
6. Лабораторная работа.....	45
Исследование тракта промежуточной частоты РПрУ.....	45
Цель работы.....	45
Домашнее задание к работе.....	45
Лабораторное задание.....	45
Порядок выполнения работы.....	46
Контрольные вопросы.....	47
Рекомендуемая литература.....	47
7. Лабораторная работа.....	48
Исследование АЧХ тракта РПрУ с помощью генератора шума.....	48
Цель работы.....	48
Домашнее задание к работе.....	48
Лабораторное задание.....	48
Порядок выполнения работы.....	49
Контрольные вопросы.....	51
Рекомендуемая литература.....	51
8. Лабораторная работа.....	52
Исследование избирательности РПрУ по соседнему каналу.....	52
Цель работы.....	52
Домашнее задание к работе.....	52
Лабораторное задание.....	52
Порядок выполнения работы.....	53
Контрольные вопросы.....	54
Рекомендуемая литература.....	54
Тема 3. Прототипирование цифровых и аналоговых РПрУ по технологии программно определяемой радиосистемы.....	56
Общие сведения об универсальном устройстве USRP.....	56
Таблица 1. Технические характеристики USRP-2920.....	59
Таблица 2. Разъемы передней панели модуля NI USRP-2920.....	59
Таблица 3. Светодиодные индикаторы модуля USRP-2920.....	60
Рекомендуемая литература.....	61
9. Лабораторная работа.....	63
Прототипирование системы передачи аудиосигнала по каналу с АМ модуляцией в УКВ диапазоне.....	63
Цель работы.....	63
Домашнее задание к работе.....	63
Лабораторное задание.....	63
Порядок выполнения работы.....	64
Последовательность выполнения лабораторного задания.....	69
Контрольные вопросы.....	70
Рекомендуемая литература.....	70
Приложение 1. Аппаратный состав лабораторного макета.....	72

Рекомендуемая литература ..... 74

## **Введение**

Современное радиоприемное устройство (РПрУ) представляет собой сложную систему, характеризуемую большим числом взаимосвязанных параметров, поэтому для освоения студентами методологии и техники разработки и исследования РПрУ целесообразно использовать комплексный подход, важной частью которого является формирование у студентов соответствующих практических навыков. Такую возможность, по мнению авторов, дает предлагаемый курс лабораторных работ по дисциплине «Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов (УПО-ДАС)».

Предлагаемый курс лабораторных работ позволяет закрепить теоретические знания, полученные студентами на лекциях, практических занятиях, и создает предпосылки для самостоятельного углубленного изучения дисциплины.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны научиться проводить анализ работы исследуемого устройства и приобрести навыки по выполнению основных технологических операций, настройки, регулировки РПрУ, применения измерительных приборов общего и специального назначения.

Выполнение лабораторных работ предусматривает предварительную домашнюю подготовку, проведение экспериментальных исследований в лаборатории, обработку полученных результатов, составление отчета и защиту работы.

### **1. Подготовка к выполнению лабораторных работ**

В процессе домашней подготовки следует изучить описание лабораторной работы, схему исследуемой установки, методику измерений, ознакомиться с правилами пользования измерительными приборами, необходимыми для выполнения данной работы, проработать соответствующие теоретические разделы курса, выполнить расчеты, предусмотренные описанием, заготовить форму для отчета с выделением места для экспериментальных графиков, таблиц, выводов. Результаты домашних расчетов должны быть сведены в таблицы, полученные функциональные зависимости представлены в виде графиков, выполненных с указанием расчетных или экспериментальных точек.

### **2. Выполнение работы в лаборатории и обработка результатов**

Перед выполнением очередной работы каждый студент представляет все материалы, подготовленные к проведению работы (расчеты, графики, схемы). Готовность студентов к занятиям проверяется преподавателем путем их опроса по контрольным вопросам или собеседования.

При выполнении лабораторных работ студенты обязаны строго выполнять правила техники безопасности.

Для предварительного ознакомления с характером экспериментальных зависимостей рекомендуется сначала без каких-либо записей при соблюдении всех требований, относящихся к эксперименту, произвести опыт, оценив общий ход зависимости и ее соответствие ожидаемой кривой. Затем следует снять необходимую зависимость, занеся наиболее характерные точки, описывающие ход кривой, в заготовленные таблицы и построить график. Расчеты, связанные с обработкой экспериментальных данных, выполняются в лаборатории в процессе работы с применением вычислительной техники.

По полученным результатам следует сделать выводы, в которых особое внимание необходимо уделить объяснению возможных отличий экспериментальных данных от теоретических.

После окончания работы бригада представляет преподавателю экспериментальный материал в виде графиков, осциллограмм и других результатов, полученных после проведения работы.

Работа считается законченной после проверки и утверждения представленных материалов преподавателем.

По окончании работы студенты должны выключить все источники питания и приборы, участвовавшие в экспериментах, и сдать рабочее место преподавателю.

### **3. Составление отчета**

Отчет по лабораторной работе составляется каждым студентом в электронной форме в формате Word. Графики включаются в отчет. На графиках указываются размерности откладываемых по осям величин. На поле графика следует также указывать те величины, которые характеризуют условия эксперимента. Под каждым рисунком ставится его порядковый номер. Оформление отчета должно удовлетворять требованиям ЕСКД.

Отчет по каждой лабораторной работе должен содержать:

- расчет элементов схемы, характеристик и их графики в соответствии с заданием;
- структурную схему исследуемого системы, устройства или схемы;
- экспериментальные данные, полученные в лаборатории;
- выводы.

### **4. Сдача отчета и защита результатов**

Лабораторная работа должна быть оформлена в течение времени, отводимого на подготовку к следующей очередной работе. Отчет по работе и ее защита должны проводиться в начале следующего лабораторного занятия, либо в часы консультаций преподавателя.

Результатом успешной защиты работы является ее оценка преподавателем в форме рейтингового балла, который выставляется в отчете и журнале учета выполнения лабораторных работ. Отчет следует хранить до момента формирования общего семестрового рейтинга по допуску к экзамену.

В пособии используется пораздельная нумерация литературных ссылок, рисунков и формул. Ссылки на рисунки и формулы из других разделов оформляются с указанием соответствующего раздела, отделенного от номера формулы точкой. Например, формула (2.18) и т.п.

## Тема 1. Исследование приемников цифровых сигналов радиорелейных систем связи

### Краткие теоретические сведения

**Радиорелейная связь** (от англ. *Relay* — передавать, транслировать) — один из видов радиосвязи, образованной цепочкой приёмо-передающих (ретрансляционных) радиостанций (рис.1).

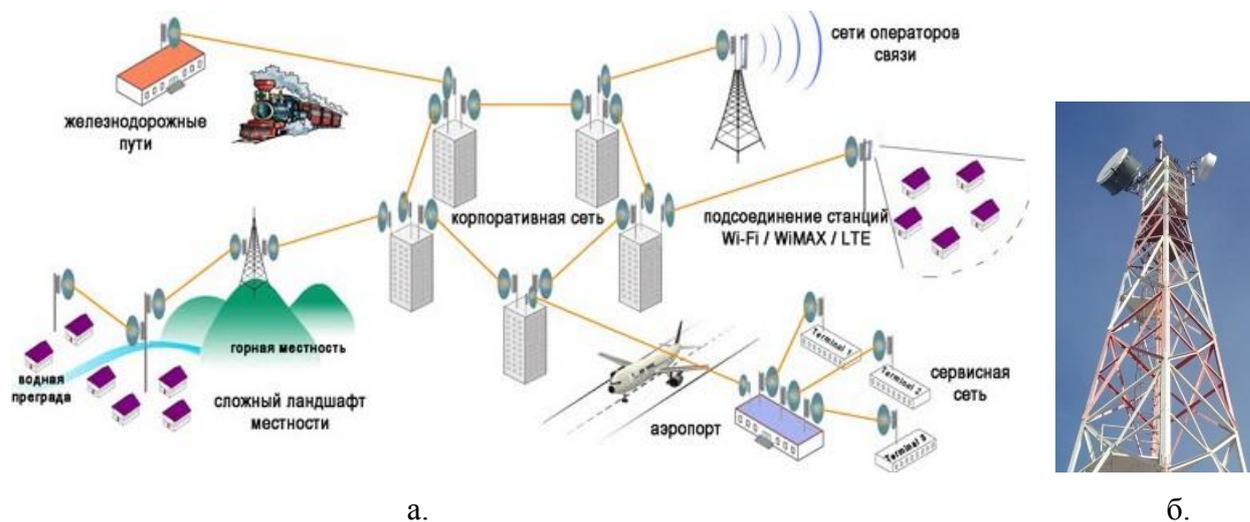


Рис. 1.1 Системы радиорелейной связи прямой видимости (а). Вышка ретранслятора (б)

Наземная радиорелейная связь осуществляется обычно на **деци-** и **сантиметровых** волнах (от сотен мегагерц до десятков гигагерц).

### Максимальная длина линии связи РРЛ

РРЛ обычно работают в сантиметровом диапазоне волн. Сигналы на этих частотах распространяются в пределах радиогоризонта, т.е. расстояния прямой видимости (рис.2), являющегося пределом распространения пространственной волны

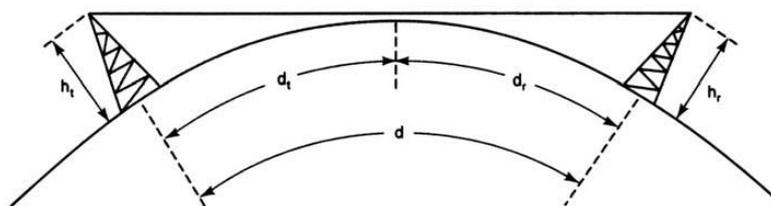


Рис. 1.2. Пространственные волны и радиогоризонт

Из-за атмосферной рефракции, радиогоризонт превышает обычное оптическое расстояние прямой видимости, ограниченное кривизной Земли и составляет примерно 4/3 оптического горизонта. Радиогоризонт увеличивается подъемом передающей и приемной антенн над поверхностью Земли на мачты, на вершины гор или на высокие здания (рис.1).

С учетом указанных факторов максимальное расстояние между передатчиком и приемником при работе над местностью с усредненными параметрами может быть приближенно выражено как:

$$d_{max} = \sqrt{17h_1} + \sqrt{17h_2} \quad (1)$$

где  $d$  максимальное расстояние между передатчиком и приемником (км);  $h_t$  высота передающей антенны над уровнем моря (метры);  $h_r$  - высота приемной антенны над уровнем моря (метры). Из (1) следует, что для обеспечения радиорелейной связи на равнинной местности в пределах прямой видимости, необходимо поднять антенны над уровнем Земли на башнях или мачтах (рис.1б). Высоты антенных опор могут достигать 50 - 100 м, в зависимости от длины каждого пролета и его профиля между соседними ретрансляционными станциями РРЛ. Когда станция расположена на естественной возвышенности, антенны могут быть установлены на крыше здания, в котором находится приемопередающая аппаратура.

### Ослабление сигнала в тракте РРЛ

Рассмотрим структурную схему одного пролета РРЛ (рис.3). Здесь:  $G$  - коэффициент усиления антенн РРЛ,  $D$  – длина пролета РРЛ.

Мощность полезного сигнала на входе приемника РРЛ определяется как:

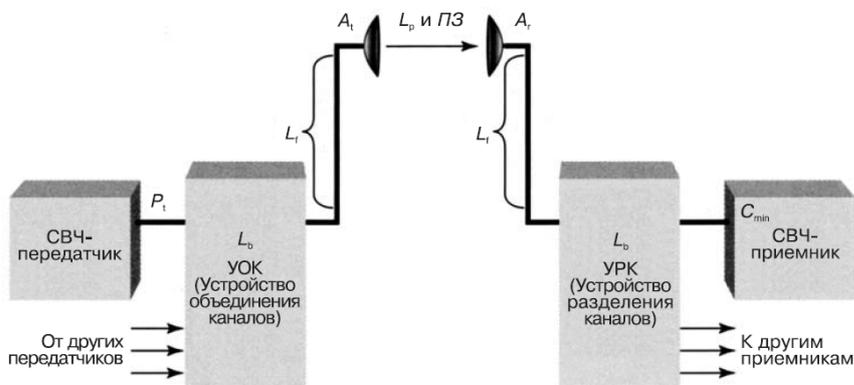


Рис. 1.3. Структурная схема пролета цифровой РРЛ

Для расстояния, измеряемого в километрах и частоты  $f$  - в МГц., потери сигнала  $L_p$  на распространение в свободном пространстве  $D$  между мачтами РРЛ составят (в дБ) [3]:

$$L_p[\text{дБ}] = 32,4 + 20 \log(f) [\text{МГц}] + 20 \log(D)[\text{км}] \quad (2)$$

Для оценки энергетического запаса РРЛ на многолучевые замирания (фединг)  $F_m$ , обеспечивающего устойчивую работу радиолинии, можно воспользоваться уравнением надежности Барнетта- Вигнанта:[3,4]

$$F_m = \underbrace{30 \log D}_{\text{Влияние многолучевости}} + \underbrace{10 \log(6ABf)}_{\text{Влияние поверхности}} - \underbrace{10 \log(1 - R)}_{\text{Показатели надежности}} - \underbrace{70}_{\text{Постоянная}},$$

(3)

где  $F_m$  – глубина замираний (дБ);  $D$  – расстояние связи (км);  $f$  – частота (ГГц);

$R$  – коэффициент готовности, выраженный в долях единицы;

$A$  – коэффициент неравномерности,

$A = 4$  при прохождении над водой или очень гладкой поверхностью,

$A = 1$  над средней местностью;

$A = 0,25$  для горной местности;

$B$  – коэффициент пересчета вероятности наихудшего месяца в годовую,

$B = 1$  для преобразования годовой готовности в готовность худшего месяца;

$B = 0,5$  для жарких влажных районов;

$B = 0,25$  для средних континентальных местностей;

$B = 0,125$  для очень сухих или горных местностей.

Произведение коэффициентов ( $C = A \cdot B$ ) в уравнении (3) иногда обозначают как коэффициент  $C$ . Распределение данного параметра модели по различным регионам Земли показано на рис.4

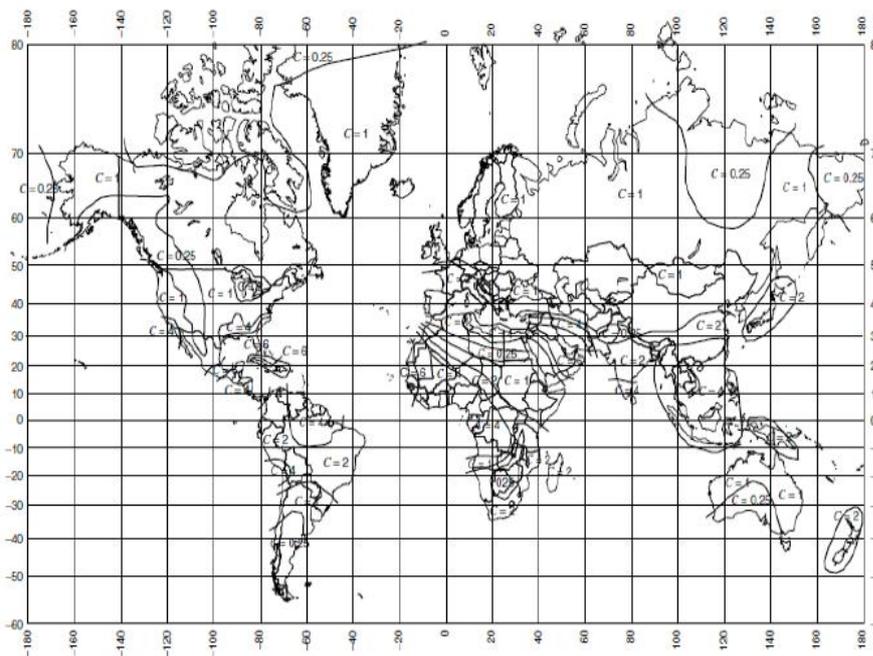


Рис. 4. Карта условий атмосферного распространения для модели Барнета-Виганта.

### Описание интерференционных замираний сигналов в канале ЦРРЛ

Из рисунка 2 видно, что штатный режим работы ЦРРС обеспечивается в пределах прямой видимости. В данных условиях основной механизм замираний (фединга)

электромагнитного поля в точке приема связан со случайным характером интерференции прямой и отраженных от подстилающей поверхности и др. объектов волн [5-8]. Такого рода интерференционные искажения сигнала в радиоканале наиболее просто моделируются двухлучевой моделью фединга, в рамках которой сигнальная напряженность поля в точке приема формируется в результате интерференции двух волн, прямой и отраженная от земной поверхности. Модуль  $k$  и фаза  $\Delta\varphi$  соответствующего амплитудного коэффициента отражения от земной поверхности могут оказывать существенное влияние на помехоустойчивость ЦРРС [2-7]. На практике данная модель используется для измерения **сигнатуры** – характеристики, определяющей устойчивость системы к селективным замираниям, а именно зависимости критических значений глубины интерференционных замираний от частоты при заданном коэффициенте ошибок [2-7].

Рассмотрим механизм этих искажений. В условиях двухлучевой интерференции Комплексный коэффициент передачи канала может быть записан в виде:

$$H(f) = 1 + k \cdot \exp\{-j[2\pi \cdot (f - f_c) \cdot \tau + \Delta\varphi]\} \quad (4)$$

где  $\tau$  - время запаздывания отражённой волны на центральной частоте сигнала  $f_c$ . Величину  $\tau$  удобно измерять относительно  $T$  – длительности символа цифрового радиосигнала.

На рис. 11 показан вид описываемой формулой (12) АЧХ  $H(f)$  канала, а также спектр сигнала ЦРРС.

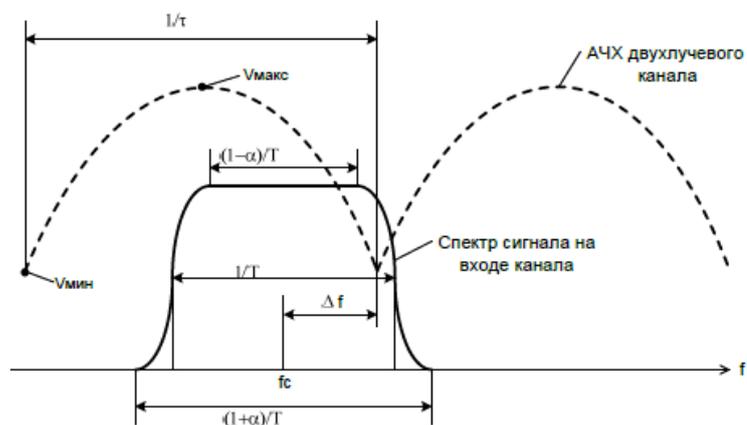


Рис.5. Спектр сигнала и АЧХ двухлучевого радиоканала РЛЛ [6]

Из рис.5 видно, что АЧХ канала имеет интерференционные минимумы и максимумы с периодом  $1/\tau$ . В реальных условиях незначительное изменение траектории отражённого луча приводит к существенному сдвигу фазы и положение интерференционного минимума может попадать в полосу частот, занимаемую спектром сигнала. В эти моменты времени наблюдаются наибольшие искажения, связанные не только с деформацией АЧХ канала, но и резким изменением его группового времени запаздывания

(ГВЗ). Из 12 несложно установить глубину интерференционного минимума. Например, при  $\tau=0,1 \cdot T$  графики  $H(f)$ , построенные в логарифмическом масштабе для различных  $k$ , имеют вид, показанный на рис.6а [6].

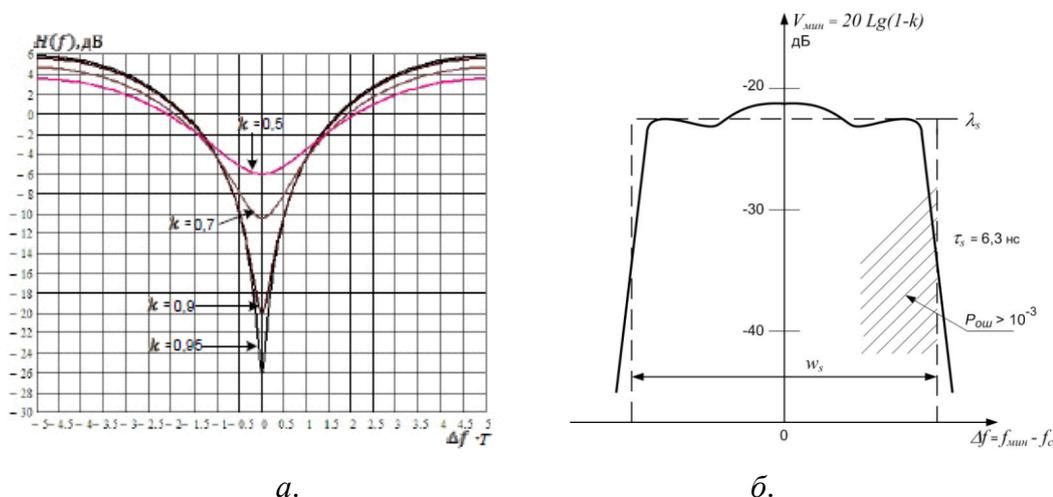


Рис.6. АЧХ двухлучевого радиоканала (а) и график сигнатуры ЦРРС

Интерференционные искажения АЧХ и ГВЗ проявляются на графиках ДСС и ГД (рис.12,13).

Измерение сигнатуры ЦРРС производится с использованием имитатора замираний. Обычно принято проводить измерения со стандартной задержкой  $\tau=6,3 \text{ нс}$ . Можно также проводить измерения с величиной задержки отражённого луча  $\tau=(0,1 \div 0,4)T_s$ , где  $T_s$  - длительность символа цифрового радиосигнала.

Сигнатуры измеряются при достаточно высоком уровне сигнала, чтобы влияние теплового шума на коэффициент ошибок было пренебрежимо малым. Примерный график сигнатуры показан на рис.6б [6]. На нем по оси абсцисс откладываются значения расстройки частоты интерференционного минимума относительно центральной частоты в спектре сигнала. По оси ординат на этом графике в логарифмическом масштабе указаны значения глубины провала АЧХ  $V_{\min}$ , при которых наступает срыв связи (обычно  $K_{\text{ош}}=10^3$ ). Таким образом, область под графиком сигнатуры соответствует параметрам радиоканала, при которых связь нарушается.

Сигнатуры современных ЦРС почти прямоугольные, а их ширина  $w$  приблизительно равна скорости передачи символов  $V_s=1/T_s$ . Высота сигнатуры  $\lambda_s$  зависит от формата модуляции (вида модуляции, методов обработки сигнала на передаче и приёме), скорости передачи символов и наличия адаптивных корректоров (эквалайзеров). Обычно форму сигнатуры считают прямоугольной и аппроксимируют, как это показано пунктирными линиями на рис.6б.

Основные свойства сигнатур.

- 1) процент времени нарушения связи на пролёте ЦРРС пропорционален площади сигнатуры  $\lambda_s \cdot w$ ;
- 2) сигнатуру можно "нормализовать", т.е. пересчитать к стандартным условиям измерения (одинаковой скорости передачи, и времени задержки  $\tau_s = 6,3$  нс.). При этом площадь сигнатуры будет зависеть только от формата модуляции. Величину этой площади называют нормализованной сигнатурой  $K_n$ . Согласно [8],

$$K_n = (w \cdot m) \cdot (T_s)^2, \text{ где } m = \lambda_s / \tau. \quad (5)$$

Учитывая, что в модели лабораторной работы все частоты и длительности задаются относительно  $T_s$ , приведём **пример нормализации** сигнатуры.

Пусть в результате построения графика получились следующие значения:

- высота сигнатуры соответствует уровню  $V$  дБ,
- нормализуем ширину  $w$  сигнатуры:  $W = w \cdot T_s$ ;
- Сигнатура измерена при  $\tau/T_s = 0,1$ , т.е.  $\tau = 0,1 T_s$ .

- 1) Определяем  $\lambda_s = (1-k) = 10^{0,05 \cdot (-V)}$ ;

- 2) определяем  $m = \lambda_s / \tau = 10^{0,05 \cdot (-V)} / [(\tau/T_s) \cdot T_s]$ ;

- 3) находим: 
$$K_n = (\tau/T_s) \cdot W \cdot 10^{0,05 \cdot (-V)} \quad (6)$$

Например, при  $\tau/T_s = 0,1$ ,  $W = 1,2$  и  $V = -21$  дБ., из (14) получаем  $K_n = 10 \cdot 1,2 \cdot 0,089 = 1,07$ .

В заключение отметим, что описанные выше селективные замирания относятся к замираниям **минимально-фазового** типа, так как комплексный коэффициент радиоканала имеет минимально-фазовую характеристику. В природе часто (с равной вероятностью) возникают условия, при которых характеристика радиоканала становится неминимально-фазовой. Это, например, происходит при трёхлучевом распространении, когда амплитуда прямого сигнала может оказаться меньше запаздывающих.

В данной лабораторной работе можно имитировать условия неминимальной фазы, задавая время запаздывания отражённого луча со знаком "минус" и измерять сигнатуру для замираний неминимально-фазового типа [6].

### Энергетический бюджет усиления РРЛ

Энергетический бюджет (баланс) усиления РРЛ (в дБ.)  $G_s$  определяется как разность между мощностью передатчика РРЛ и чувствительности его приемника, а также потерь различного рода в линии связи и соединителях [3],

$$G_s = P_t - C_{min} \quad (7)$$

где  $P_t$  - мощность на выходе передатчика;  $C_{min}$  минимальная мощность на входе передатчика, необходимая для обеспечения требуемых надежности и качества работы системы. В правильно спроектированной системе величина  $G_s$ , очевидно, должна

превышать разность системных потерь, к которым, кроме описанных выше факторов  $L_p$  и  $F_m$ , должны быть добавлены дополнительные потери  $L_b$  в устройствах объединения и разделения каналов РРЛ (дБ), и факторов системного усиления. Последние включают в себя коэффициенты усиления передающей ( $A_t$ ) и приемной ( $A_r$ ) антенн (в дБ), измеренных относительно изотропного излучателя. Таким образом, необходимо выполнение неравенства:

$$G_s[\text{дБ}] = P_t - C_{min} \geq F_m[\text{дБ}] + L_p[\text{дБ}] + L_b[\text{дБ}] - A_t[\text{дБ}] - A_r[\text{дБ}] \quad (8)$$

Усиления включают:  $A_t$  коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя (дБ);  $A_r$  – коэффициент усиления приемной антенны (дБ).

### Помехоустойчивость РРЛ

Цифровые радиорелейные системы используют цифровые виды модуляции, в которых изменяются один или несколько параметров немодулированного несущего колебания  $s(t)=A(t) \cdot \cos(\omega(t)t+\phi(t))$  в соответствии с изменением информационного сигнала.

Основным энергетическим показателем такого сигнала является величина  $(E_b/N)$ , называемым *отношением энергии бита к плотности мощности шума* (т.е. мощности шума, отнесенной к 1 Гц полосы частот). Энергия бита, это энергия, необходимая для передачи одного бита информации и равная произведению мощности передатчика на длительность бита.

Другим важным энергетическим показателем канала является **частотная эффективность** полосы частот канала  $\beta$  [1-3]. Для выбранного типа цифровой модуляции  $\beta$  находится из таблицы 1 [3]:

**Таблица 1.**

Вид модуляции	Схема кодирования	Число состояний	Минимальная полоса частот	Битрейт, [бод/с.]	$\beta$
АМН (ASK)	1 бит	2	$f_b$	$f_b$	1
ЧМН (FSK)	1 бит	2	$f_b$	$f_b$	1
ФМН (ФМ2) (BPSK)	1 бит	2	$f_b$	$f_b$	1
ФМ4 (QPSK)	2 бита	4	$f_b/2$	$f_b/2$	2
ФМ8 (8-PSK)	3 бита	8	$f_b/3$	$f_b/3$	<b>3</b>
КАМ-8 (8-QAM)	3 бита	8	$f_b/3$	$f_b/3$	3
КАМ-16 (16-QAM)	4 бита	16	$f_b/4$	$f_b/4$	4
ФМ16 (16-PSK)	4 бита	16	$f_b/4$	$f_b/4$	4
ФМ32 (32-PSK)	5 бит	32	$f_b/5$	$f_b/5$	5
КАМ-32 (32-QAM)	5 бит	32	$f_b/5$	$f_b/5$	5
ФМ64 (64-PSK)	6 бит	64	$f_b/6$	$f_b/6$	6
КАМ-64 (64-QAM)	6 бит	64	$f_b/6$	$f_b/6$	6
ФМ128 (128-PSK)	7 бит	128	$f_b/7$	$f_b/7$	7
КАМ-128 (128-QAM)	7 бит	128	$f_b/7$	$f_b/7$	7

Помехоустойчивость указанных в таблице видов модуляции характеризуется коэффициентом битовых ошибок (bit error rate-BER)  $P$ . Связь уровня  $P$  с отношением сигнал/шум на бит, для каждого типа цифровой модуляции и отношения сигнал/шум на бит можно найти из графиков рис.5-7 [1-3].

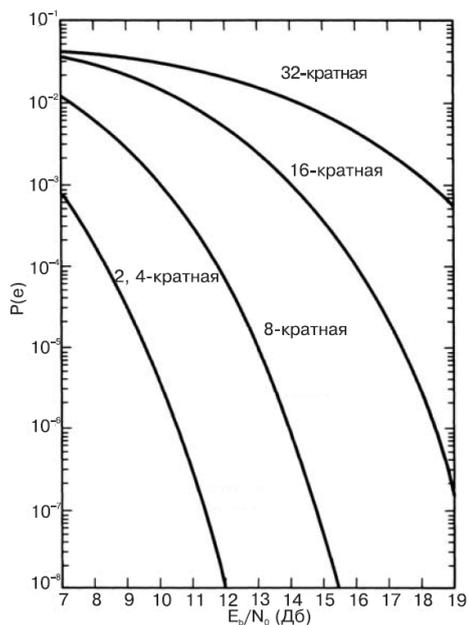


Рис.7 Зависимость коэффициента битовых ошибок  $P_b$  от отношения сигнал/шум на бит для k-кратной ФМН [3]

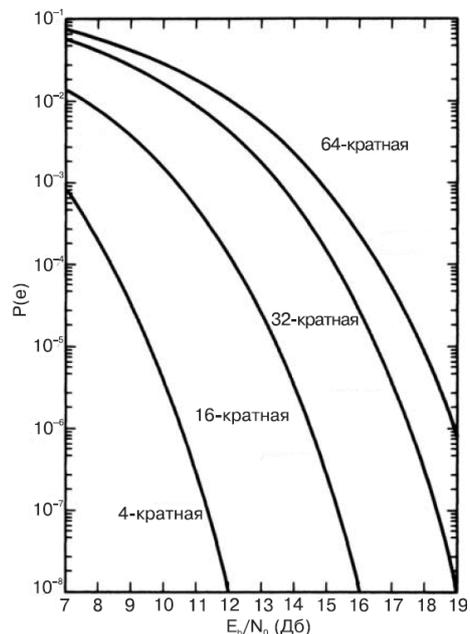


Рис.8 Зависимость коэффициента битовых ошибок  $P_b$  от отношения сигнал/шум на бит для k-кратной КАМ [3]

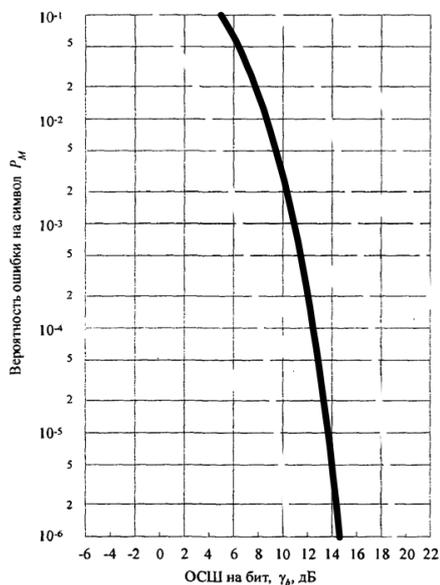


Рис.9 Зависимость коэффициента битовых ошибок  $P_b$  от отношения сигнал/шум на бит для двухуровневой ASK [3]

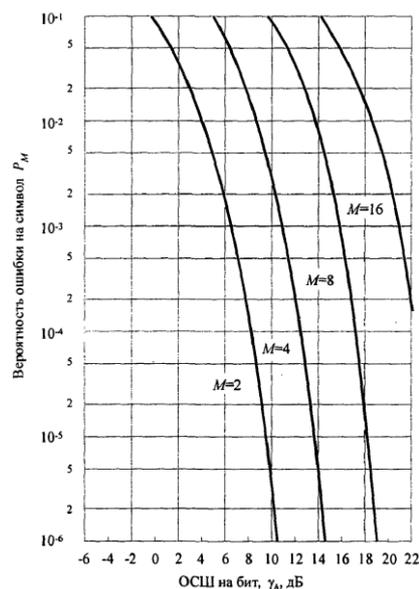


Рис.10 Зависимость коэффициента битовых ошибок  $P_M$  от отношения сигнал/шум на бит для M-уровневой ASK [3]

Связь вероятности  $P$  битовых ошибок и *коэффициента битовых ошибок* для M-позиционных ASK и PSK определяется формулой [3]:

$$P_b = P_M / \log_2(M) \quad (9)$$

Частотную эффективность полосы частот  $\beta=(E_b/N)$  можно выразить через отношение сигнал-шум  $(C/N)$  на входе компаратора приемника РРЛ,

$$10 \log C - 10 \log N = 10 \log(E_b / N_0) + 10 \log(\beta) \quad (10)$$

Соотношение (10) определяет необходимое для данного формата передачи цифровых данных отношение сигнал/шум  $(C/N)$ . Подставляя (10) в (8), получим **основное расчетное соотношение для моделирования РРЛ:**

$$P_t[\text{дБ}] - (F_m[\text{дБ}] + L_p[\text{дБ}] + L_b[\text{дБ}] - A_t[\text{дБ}] - A_r[\text{дБ}]) - N[\text{дБ}] \geq 10 \log(E_b / N_0) + 10 \log(\beta) \quad (11)$$

Пороговый уровень шума РРЛ  $N[\text{дБ}]$  в формуле (11) называется пороговой чувствительностью приемника, и определяется формулой,

$$N = 4kT_0R_A\Pi_{\text{ш}}(K_{\text{ш}} + t_a) \quad (12)$$

где  $\Pi_{\text{ш}}$  - шумовая полоса пропускания;  $t_a=T_A/T_0$  - относительная шумовая температура антенны;  $T_0, T_A, K_{\text{ш}}$  - температура, шумовая температура антенны и коэффициент шума приемника ТКС;  $k$  - постоянная Больцмана.

В логарифмическом масштабе, для температуры  $T_A=290\text{К}$  средний уровень шума определяется формулой:

$$N[\text{дБм}] = -174 \text{ дБм} + 10 \log(\Pi_{\text{ш}}/1[\text{Гц}]) + K_{\text{ш}} + t_a \quad (13)$$

Значение  $-174 \text{ дБм}$  (на  $1 \text{ Гц}$ ) соответствует мощности теплового шума, действующего на омическом сопротивлении в полосе  $1 \text{ Гц}$  при средней температуре  $290 \text{ К}$ , т.е. это уровень собственного шума или абсолютный минимальный уровень шума при данной температуре.

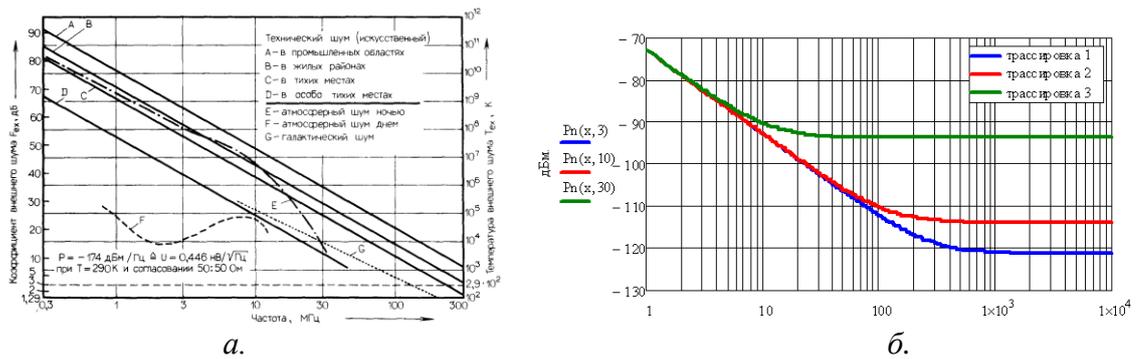


Рис.11 Частотная зависимость шумовой температуры антенны, а. справочные данные для  $K_{\text{ш}}$  [4], б. данные расчета  $L_{\text{инд.ш}}(f)$

Частотная зависимость  $t_A(f)$  в различных радиодиапазонах является справочной характеристикой. Пример такой зависимости приведен на рис.11.а [3]. При расчете РПрУ, в качестве предварительной оценки  $t_A(f)$ , можно воспользоваться эмпирическим соотношением,

$$2t_A = 2T_e/T = [(500/f)^2 + 1.5]. \quad (15)$$

На рис.11б показан ход таких зависимостей  $L_{\text{инд.ш}}(f)$  при различных уровнях  $K_{\text{ш}}$ , т.е. внутренних шумах приемника.

### Эквалайзирование АЧХ тракта ЦРРС

Как известно, ограничение спектра сигнала с цифровой модуляцией в тракте ЦРРС приводит к искажению его формы. В общем случае это искажение сводится к “расплыванию” каждого передаваемого бита во времени. В результате этого каждый символ накладывается на соседние, что приводит к межсимвольным искажениям (**межсимвольной интерференции** - МСИ), в результате которых повышается вероятность ошибки на бит в системе. Для передачи сигналов по каналу связи без межсимвольных искажений необходимо, чтобы его АЧХ  $H(f)$  удовлетворяла условиям Найквистовской фильтрации [1-6], которая сводится к симметрии результирующая АЧХ  $H(f)$  относительно частоты Найквиста  $f_N$  (среза).

Одной из наиболее часто используемых функций, удовлетворяющих данным условиям является функция приподнятого косинуса, АЧХ которого имеет вид:

$$|H(f)| = \begin{cases} 1, & 0 \leq f < f_N(1-\alpha); \\ \frac{1}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\pi}{2\alpha} \left[ \frac{f}{f_N} - 1 \right] \right], & f_N(1-\alpha) \leq f < f_N(1+\alpha) \\ 0, & f > f_N(1+\alpha) \end{cases} \quad (16)$$

Величина  $\alpha$  в (10) называется **коэффициентом скругления** фильтра и имеет значения от 0 до 1. Чем меньше  $\alpha$ , тем меньше полоса пропускания фильтра, но больше дрожание фронтов сигнала (**джиттер**). Это приводит трудностям синхронизации. При  $\alpha=0$  получается нереальный фильтр с минимальной шириной полосы  $\Delta f=f_N$ . При  $\alpha=1$  ширина полосы в два раза больше минимальной теоретической полосы  $\Delta f=2f_N$ , но дрожание фронтов отсутствует. На практике часто используется значение  $\alpha=0.35$ . С этой целью в состав тракта системы вводят специальные адаптивные корректоры (эквалайзеры), обеспечивающие соответствие АЧХ  $H(f)$  соотношению (10) с требуемым коэффициентом скругления.

### Сигнальное созвездие цифрового сигнала

Диаграмма сигнального созвездия (ДСС) (англ. constellation diagram) цифрового сигнала представляет собой визуальный формат представления модулированного цифрового сигнала  $s(t)$ ,

$$s(t) = I(t) \cos(\omega t) - Q(t) \sin(\omega t) \quad (17)$$

в виде диаграммы из множества возможных значений его значений его квадратурных  $I(t)$  и  $Q(t)$  компонент на декартовой плоскости, по оси абсцисс которой отложены значения синфазной составляющей  $I(t)$ , а по оси ординат – квадратурной  $Q(t)$  (рис.12).

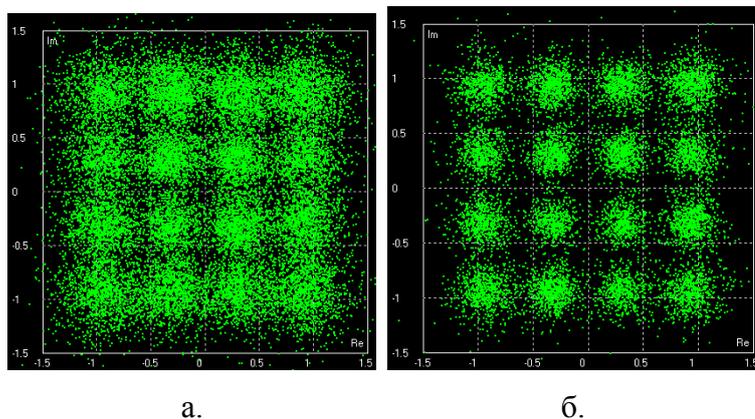


Рис.12 Созвездия QAM-16 при наличии помех, а.  $S/N = 13,5$  дБ; б.  $S/N = 17$  дБ

Общее количество  $M$  различных состояний концов вектора  $s(t)$  на ДСС конечно и совпадает с числом уровней дискретного сигнала. Точками на ДСС отображены значения огибающей  $s(t)$  в отсчётные моменты времени.. Из рис.12 видно, что при наличии шумов эти точки рассеиваются помехой. Таким образом, ДСС позволяют оценить степень амплитудных и фазовых искажений сигнала.

### Глазковая диаграмма

Глазковая диаграмма (ГД) (на англ. "eye pattern" или "eye diagram") представляет собой еще один визуальный формат представления  $s(t)$  в виде множества возможных реализаций случайного цифрового сигнала (ЦС), наложенных друг на друга при условии их синхронизации с частотой следования символов. Она может быть получена на экране осциллографа с памятью при наблюдении случайного или псевдослучайного ЦС и синхронизации развёртки импульсами тактовой частоты ЦС. Пример ГД двухуровневого ЦС показан на рис. 13.

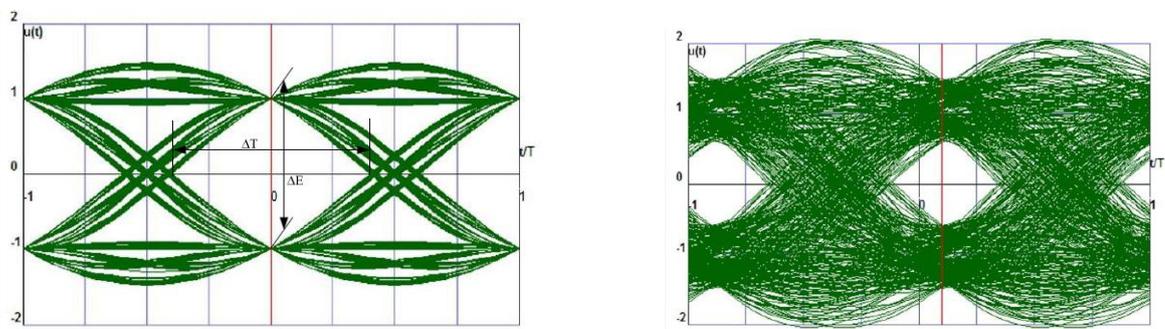


Рис.13. ГД неискажённого ЦС и при наличии помех

На рис.13 выделены значения комплексной огибающей в отсчётные моменты времени, соответствующие максимальному  $\Delta E$  раскрыву ГД. ГД позволяет оценить степень искажений сигнала во временной области.

### Рекомендуемая литература

1. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ.; Под ред. Д. Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 2000.
2. В.В. Марков. Радиорелейная связь/- М.: Связь, 2012. - 368 с.
3. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
4. W. T. Barnett, «Multipath propagation at 4, 6 and 11 GHz,» Bell System Technical Journal, vol. 51, no. 2, pp. 321{361, February 1972; A. Vigants, «Space diversity engineering,» Bell System Technical Journal, vol. 54, no. 1, pp. 103{142, January 1975.
5. А.В. Просин, А.Н. Цветков. Радиорелейные линии связи/- М.: АН СССР, 2009. - 108 с.
6. Изучение принципов построения однопролетных ЦРРС и основных эксплуатационных измерений в них: Описание лабораторной работы № 11 / М.М. Маковеева, С.С. Тарасов / МИС. – М.: 1989. – стр. 11 – 21
7. Справочник по цифровым радиорелейным системам//Международный союз электросвязи, Бюро радиосвязи, Женева, 1996. – 395с
8. ГОСТ Р 53363-2009 Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета.
9. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
10. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
11. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

## 1. Лабораторная работа.

### Изучение приемной аппаратуры радиорелейной системы связи «МИК-РЛР+»

#### Цель работы

1. Изучить принципы многоканальной передачи сигналов в цифровых радиорелейных системах (ЦРРС) [1].
2. Ознакомиться с назначением и принципами работы основных узлов аппаратуры, а также методами организации цифровых стволов ЦРРС на примере «МИК-РЛР+» [1].
3. Ознакомиться с методами контроля достоверности передачи сигналов в ЦРРС.
4. Исследовать зависимость вероятности ошибок в каналах ЦРРС от соотношения сигнал-шум на входе приемника.

#### Домашнее задание к работе

1. Изучить назначение основных элементов структурной схемы цифровой радиорелейной системы (ЦРРС) «МИК-РЛР+» и основные характеристики линейного цифрового сигнала (ЛЦС).
2. В среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS), интегрированной в NI AWR (Applied Wave Research) Design Environment [9,10], провести моделирование ЦРРС «МИК-РЛР+» для известных мощности передатчика, КПД приемного и передающего фидеров, коэффициентам усиления антенн, запасу на замирания, диапазону работы провести моделирование ЦРРС «МИК-РЛР+». Рассчитать протяженность пролета РРЛ, при котором достигается вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}=10^{-5}$ . Постройте диаграммы ДСС и ГД, аналогичные рис.9,10, для указанной помехоустойчивости РРЛ. Для выполнения данного пункта задания воспользуйтесь разделом «Обработка сигналов с цифровой модуляцией в тракте УПО-ДАС» методических рекомендаций по практическим занятиям [3,4].
3. Изучить структурную схему лабораторного стенда и назначение его основных элементов по приложению 1.
4. Изучить принцип регенерации ЛЦС и метод оценки воздействия помех на процесс принятия решения в регенераторе по глазковой-диаграмме.
5. Изучить основные технические данные ЦРРС «МИК-РЛР+»
6. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.

#### Описание лабораторного макета

Работа проводится на лабораторной установке РРЛ «МИК-РЛ Р+», позволяющей исследовать воздушный канал пролета ЦРРС. Аппаратный состав РРЛ «МИК-РЛ Р+» приведен в приложении 1.

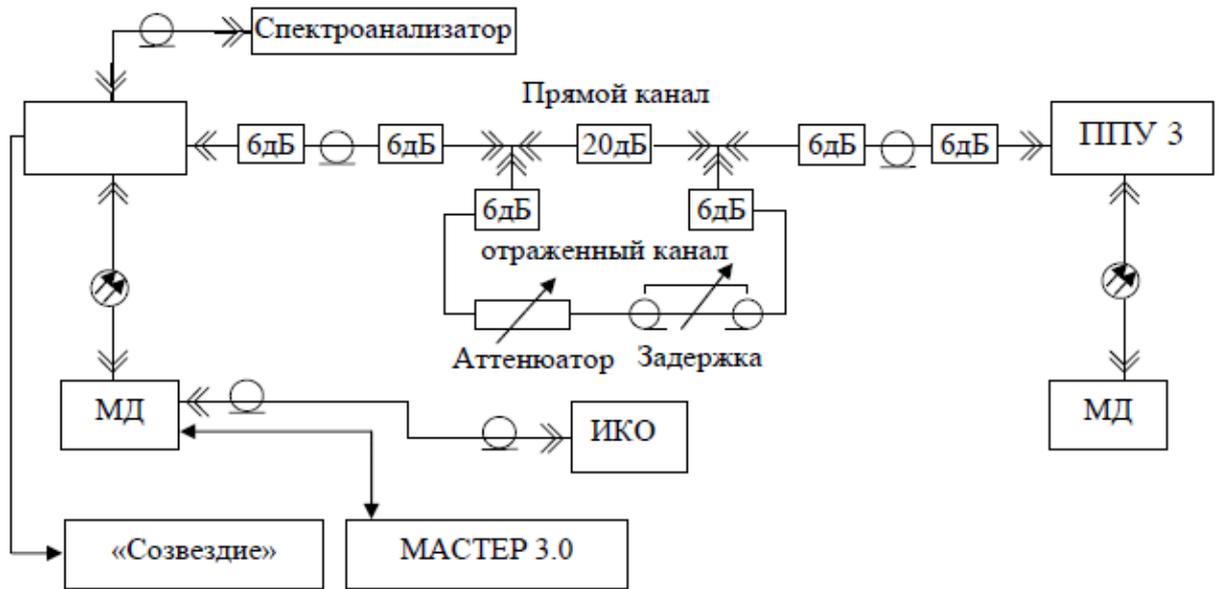


Рис. 1. Структурная схема лабораторного макета ЦРРС

Структурная схема установки показана на рис.1. На рис. 2. показан ее общий вид. На рис.12 использованы следующие сокращения;

- ППУ2 – приемопередающее устройство, осуществляет прием сигнала на частоте 8248 МГц, передачу сигнала на частоте 7982 МГц;
- ППУ4 – приемопередающее устройство, осуществляет прием сигнала на частоте 7982 МГц, передачу сигнала на частоте 8248 МГц;
- МД – модуль доступа МД1-1 Р +, осуществляет мультиплексирование - демultipлексирование входных - выходных данных в один информационный поток, и обратно (до 179 Мбит/с);
- AIDA32-slave - компьютер, с активной программой AIDA32, в режиме slave, выводит векторную диаграмму принятого ППУ1 сигнала;
- AIDA32-master - компьютер, с активной программой AIDA32, в режиме master, посылает тестовый сигнал для AIDA32-slave;
- МАСТЕР3.0 – персональный компьютер с активной программой управления МАСТЕР3, осуществляет телеметрию и управления РРЛ.



Рис. 2 Общий вид лабораторной установки на основе РСС «МИК-РЛ Р+»

### Лабораторное задание

1. Изучить конструктивное выполнение приемно-передающей и каналообразующей аппаратуры лабораторного стенда ЦРРС «МИК-РЛР+» (рис.1).
2. Изучить назначение узлов и элементов оборудования;
3. Провести измерение параметров оборудования;
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

### Содержание отчета

1. Структурная схема приемно-передающей и каналообразующей аппаратуры ЦРРС «МИК-РЛР+».
- 1 Результаты расчетов по п.п. 2 домашнего задания;
2. Структурная схема цифрового приемника лабораторного стенда ЦРРС «МИК-РЛР+»;
- 3 Схемы измерений;
- 4 Результаты измерений в виде таблиц и графиков;
- 5 Выводы по результатам измерений.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить к работе лабораторный макет:
  - проверить соединения ППУ и МД;
  - проверить соединения линий имитирующих прямой и отраженный каналы;
  - поставить затухания ДН1 на максимум;
  - включить питание преобразователя напряжения;

- тумблеры питания МД и ИКО перевести в положение ВКЛ;
- Через некоторое время (около 30 секунд) система должна синхронизироваться: светодиодные индикаторы МД, соответствующие волноводному каналу должны гореть постоянным зеленым светом;
- запустить компьютеры с программами AIDA32 и МАСТЕР3.0;
- используя МАСТЕР3.0 отключить воздушный канал.

Устанавливая затухание отраженного сигнала делителем напряжения ДН1 и задержку блоком ФК2-18, добиться провала в спектре принятого сигнала. Контролировать изменение провала спектрограммы и ДСС сигнала, фиксируемых AIDA32-slave при изменении параметров отраженного сигнала.

Используя ИКО зафиксировать указанное преподавателем количество значений коэффициента ошибок, увеличивая мощность отраженного сигнала вплоть до потери синхронизации для положений провала, соответствующего средней и крайним частотам спектрограммы. Момент потери синхронизации определяется по нарушению структуры ДСС сигнала.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните назначение основных элементов структурной схемы ЦРПС.
2. Поясните назначение основных элементов структурной схемы стенда.
3. Что представляет собой сигнал на выходе аппаратуры разделения каналов с ИКМ? Какими параметрами он характеризуется?
4. Нарисуйте вид радиосигнала на выходе передатчика ЦРПС при различных видах модуляции.
5. Поясните, почему существует оптимальное значение порога РУ регенератора, оптимальное значение фазы СИ, полосы пропускания приемника?
6. С какой целью на ЦРПС применяют многоуровневые методы манипуляции?
7. Как определяют эффективность использования полосы частот при различных методах манипуляции?
8. Что такое глаз-диаграмма? Как оценить искажения ЛЦС по глаз-диаграмме? Как правильно выбрать порог РУ?

### **Рекомендуемая литература**

1. Аппаратура цифровых радиорелейных станций «МИК-РЛ Р+». Руководство по эксплуатации. ЖНКЮ.464429.028 РЭ// ООО НПФ «Микран». Томск 2007г. -50с.
2. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))

3. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
4. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

## 2. Лабораторная работа.

### Исследование двухлучевой интерференции в канале ЦРРС

#### Цель работы

1. Изучить способ формирования цифрового сигнала с ограниченным спектром и свойства сигнала при использовании фильтра Найквиста с ограничением спектра функцией "приподнятый косинус" при различных коэффициентах скругления  $\alpha$ .
2. Ознакомиться с методом оценки межсимвольных искажений цифрового сигнала по глаз-диаграмме и СС-диаграмме.
3. Ознакомление с влиянием интерференционных помех на характеристики ЦРРС.
4. Изучить методику измерения сигнатуры ЦРРС и обработки результатов измерений.

#### Домашнее задание к работе

1. Изучить модель исследуемой системы радиосвязи и двухлучевого радиоканала, зарисовать ее в отчет.
2. Изучить метод оценки по глаз-диаграмме уровня МСИ и снижения помехозащищенности.
3. Изучить способ формирования цифрового сигнала с ограниченным спектром и свойства сигнала при использовании фильтра Найквиста.
4. Изучить методику измерения сигнатуры ЦРРС и обработки результатов измерений.



Рис.1а. Структурная схема лабораторного макета

Сокращения к рис.1:

- ППУ1 – приемопередающее устройство, осуществляет прием сигнала на частоте 8192 МГц, передачу сигнала на частоте 7926 МГц;

- ППУЗ – приемопередающее устройство, осуществляет прием сигнала на частоте 7926 МГц, передачу сигнала на частоте 8192 МГц;

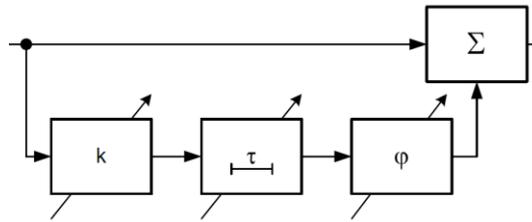


Рис.1б. Модель двухлучевого канала распространения волны в РРС.

- МД – модуль доступа МД1-1 Р+, осуществляет мультиплексирование - демultipлексирование входных - выходных данных в один информационный поток, и обратно (до 179 Мбит/с);
- Спектроанализатор – прибор GSP-830 9кГц – 3ГГц, отображающий спектр сигнала, выводимого с приемного тракта ППУ1, после 2-го преобразования (135МГц);
- ИКО – измеритель коэффициента ошибок ИКО-155Е, осуществляет прием-передачу тестового сигнала, измеряет его коэффициент ошибок;
- Атенюатор – ступенчатый аттенюатор, осуществляет ослабление сигнала в отраженном канале, диапазон принимаемых значений 0-31дБ;
- Задержка – регулируемая линия задержки, осуществляет задержку сигнала в отраженном канале;
- AIDA32-slave - компьютер, с активной программой AIDA32, в режиме slave, выводит векторную диаграмму принятого ППУ1 сигнала;
- AIDA32-master - компьютер, с активной программой AIDA32, в режиме master, посылает тестовый сигнал для AIDA32-slave;
- МАСТЕР3.0 – компьютер, с активной программой управления МАСТЕР3, осуществляет телеметрию и управления РРЛ.

### Описание лабораторного макета

Работа проводится на лабораторной установке РРЛ «МИК-РЛ Р+», позволяющей исследовать воздушный канал пролета ЦРРС. (рис.1). Более подробно аппаратный состав РРЛ «МИК-РЛ Р+» приведен в приложении 1.

Лабораторная установка, позволяет смоделировать механизм двухлучевого распространения сигнала. С этой целью она дополняется, показанной на рис.1б физической моделью канала распространения отраженной волны. Данное устройство состоит из регулируемых аттенюатора, линии задержки и фазовращателя. С его помощью формируется требуемый уровень интерференционного провала в АЧХ  $H(f)$ , в соответствии с формулой (1-12).

### Лабораторное задание

1. В среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS), интегрированной в NI AWR (Applied Wave Research) Design Environment [9,10], провести моделирование ЦППС «МИК-РЛР+» для известных мощности передатчика, КПД приемного и передающего фидеров, коэффициентам усиления антенн, запасу на замирания, диапазону работы провести моделирование ЦППС «МИК-РЛР+». Для различных значений коэффициента скругления спектра  $\alpha$  в диапазоне от 1.0 до 0.1 при  $k=0$  исследовать зависимость таких параметров, как длительность отклика фильтра, величина горизонтального раскрыва ГД, допустимая погрешность отклонения момента принятия решения при увеличении энергетических потерь на 1 дБ.. Построить графики этих зависимостей от  $\alpha$ . По результатам исследования сделать выводы и записать их в отчет по работе.
2. Изучить метод оценки уровня МСИ по глаз-диаграмме, а также снижения помехозащищенности системы.
3. Для заданных преподавателем значений  $\alpha$  и  $\tau/T$  моделировать ГД при различных значениях фазы отражённого сигнала  $\Delta\phi$  и величины коэффициента отражения  $k$ , обеспечивающих попадание интерференционного минимума в область расстроек  $\Delta f = 0 \pm 1/T$ . Увеличивая глубину интерференционного минимума последовательным увеличением  $k$  от 0.5 до 0.999, наблюдать на ГД и КД увеличение МСИ. Считая, что снижение раскрыва ГД до величины меньшей 0.2 приводит к нарушению связи.
4. Нормализовать сигнатуру. Сделать выводы и занести их в отчет.

### Порядок выполнения работы

Для выполнения расчетной части работы по п.п. 1,3 и выполнения п.2 настоящего описания следует запустить на выполнение файл программы Exempl TK\_System.emp. При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [4]. При выполнении п. 1 и п.2 величина  $E$  определяется визуально по графику глаз-диаграммы на экране дисплея с помощью горизонтальной линии визирования. Горизонтальный раскрыв ГД определяется с помощью вертикальной линии визирования.

Экспериментальная часть работы начинается с подготовки лабораторного макета:

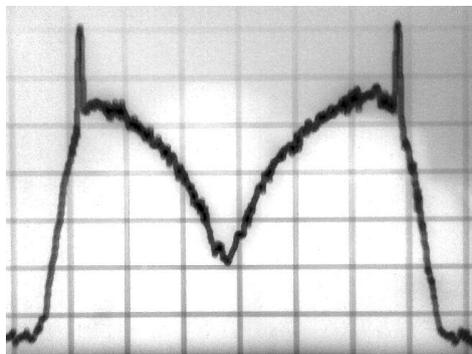
- проверить соединения ППУ и МД;
- проверить соединения линий имитирующих прямой и отраженный каналы;
- поставить затухания ДН1 на максимум;
- включить питание преобразователя напряжения;
- тумблеры питания МД и ИКО перевести в положение ВКЛ;

- Через некоторое время (около 30 секунд) система должна синхронизироваться: светодиодные индикаторы МД, соответствующие волноводному каналу должны гореть постоянным зеленым светом;
- запустить компьютеры с программами AIDA32 и МАСТЕР3.0;
- используя МАСТЕР3.0 отключить воздушный канал.

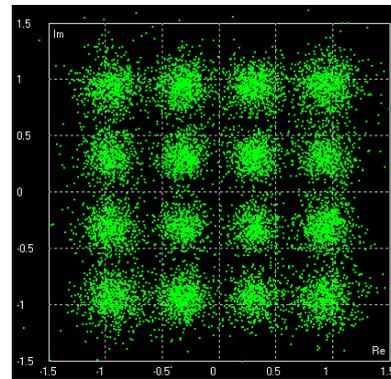
Устанавливая затухание отраженного сигнала делителем напряжения ДН1 и задержку блоком ФК2-18, добиться провала в спектре принятого сигнала. Контролировать изменение провала спектрограммы и ДСС сигнала, фиксируемых AIDA32-slave при изменении параметров отраженного сигнала.

Используя ИКО зафиксировать указанное преподавателем количество значений коэффициента ошибок, увеличивая мощность отраженного сигнала вплоть до потери синхронизации для положений провала, соответствующего средней и крайним частотам спектрограммы. Момент потери синхронизации определяется по нарушению структуры ДСС сигнала.

Следуя указаниям к рис.1-2, измерить сигнатуру оборудования [1]. Для этого необходимо зафиксировать провал в центре спектра сигнала (рис.2), увеличить его мощность, и снижая уровень затухания отраженного канала, зафиксировать величину провала в (дБ) для  $K_{\text{ош}}=10^{-3}$ .



а.)



б.)

Рис.2. а) Искажение АЧХ канала ЦРРС вследствие двухлучевой интерференции;

б.) Созвездия QAM-16 при отношении  $S/N = 17$  дБ

Принять  $\tau/T=0.1$ . В ходе моделирования добиваться максимального раскрыва ГД, подстраивая сначала фазу опорного напряжения демодулятора (движком "фаза" возле графика КД) а затем момент принятия решения (движком " $t/T$ " возле графика ГД). Для удобства отсчёта малых значений раскрыва ГД можно также регулировать масштаб обоих графиков.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему интерференционные замирания искажают частотный спектр?
2. Каковы условия наибольшего искажения сигнала? Приведите пример.
3. Какие меры позволяют снизить вероятность появления интерференционных замираний?
4. Как связана характеристика РРС сигнатура с интерференционными искажениями.

### **Рекомендуемая литература**

1. Изучение принципов построения однопролетных ЦППС и основных эксплуатационных измерений в них: Описание лабораторной работы № 11 / М.М. Маковеева, С.С. Тарасов / МИС. – М.: 1989. – стр. 11 – 21
2. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
3. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
4. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

### 3. Лабораторная работа.

#### Исследование помехоустойчивости цифровых приемников ЦРРС

##### Цель работы

1. В среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS) провести расчетное моделирование взаимосвязи достижимой скорости передачи данных по каналу связи ЦРРС «МИК-РЛР+» с шириной спектра цифрового сигнала станции и отношением сигнал – шум;
2. Экспериментально исследовать взаимосвязь достижимой скорости передачи данных по каналу связи с шириной спектра цифрового сигнала и отношением сигнал – шум;
3. Получить практические навыки дистанционного контроля программой контроля Мастер 3.0 ЦРРС «МИК-РЛР+»;

##### Домашнее задание к работе

1. Ознакомиться с методикой расчета скорости передачи данных по каналу связи ЦРРС, ширины спектра цифрового сигнала для различных отношений сигнал – шум в среде моделирования систем связи AWR Visual System Simulator (AWR VSS) [1-4].

##### Описание лабораторного макета

Работа проводится на лабораторной установке РРЛ «МИК-РЛ Р+», позволяющей исследовать воздушный канал пролета ЦРРС. Аппаратный состав РРЛ «МИК-РЛ Р+» приведен в приложении 1. Структурная схема установки показана на рис.1-ЛР2.

##### Лабораторное задание

1. Провести исследования взаимосвязи помехоустойчивости и скорости передачи данных ЦРРС «МИК-РЛР+» для различных видов цифровой модуляции;
2. Провести сопоставление расчетных и экспериментальных результатов. Сделать выводы.

##### Порядок выполнения работы

Для выполнения расчетной части работы по п.п. 1,3 и выполнения п.2 настоящего описания следует запустить на выполнение файл программы Exempl ТК\_System.emp. При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [4]. При выполнении п. 1 и п.2 величина  $E$  определяется визуально по графику глаз-диаграммы на экране дисплея с помощью горизонтальной линии визирования. Горизонтальный раскрыв ГД определяется с помощью вертикальной линии визирования.

Экспериментальная часть работы начинается с подготовки лабораторного макета:

- Проверить соединения ППУ и МД;
- Установить максимальный уровень затухания ДН;

- Устанавливая затухание отраженного сигнала делителем напряжения ДН1 и задержку блоком ФК2-18, добиться провала в спектре принятого сигнала. Контролировать изменение провала спектрограммы и ДСС сигнала, фиксируемых AIDA32-slave при изменении параметров отраженного сигнала. Используя ступенчатый аттенюатор, и регулируемую линию задержки, установить величину провала в спектре сигнала ~5 дБ. Привести систему в состояние модуляция QAM 64, ширина полосы 28 МГц, пропускная способность 78,4 Мбит/с.
- Зафиксировать диаграммы ГД и ДСС, а также с помощью программы контроля Мастер 3.0 измерить уровни BER ( $P_{\text{ош}}$ ) для настроек системы (полоса частот -  $\Delta f$  [МГц.]; пропускная способность -  $B$  [Мбит/с]):
  - QAM 64;  $\Delta f=28$ ;  $B=78.4$ ;
  - QAM 64;  $\Delta f=28$ ;  $B=39.2$ ;
  - QAM 16;  $\Delta f=28$ ;  $B=39.2$ ;
  - QAM 16;  $\Delta f=28$ ;  $B=19.4$ ;
  - QAM 16;  $\Delta f=14$ ;  $B=19.6$ ;
- Увеличить величину интерференционного провала в спектре принятого сигнала до 10 дБ. Повторить измерения предыдущего пункта лабораторных исследований.

### Контрольные вопросы

1. Объясните закономерность экспериментальных и теоретических зависимостей  $P_{\text{ош}}(S/N)$ .
2. На основе приведенных экспериментов назовите параметры ЦРПС «МИК-РЛР+», при которых достигается наибольшая помехоустойчивость.
4. На основе приведенных экспериментов назовите параметры ЦРПС «МИК-РЛР+», при которых достигается наибольшая пропускная способность.

### Рекомендуемая литература

1. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
2. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
3. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
4. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

## Тема 2. Исследование узлов аналогового радиоприемника с помощью автоматизированной информационно – измерительной системы

В данном разделе пособия дано описание **пяти** лабораторных работ по исследованию узлов макета аналогового радиоприемного устройства (устройства приема и обработки сигналов - УПОС) в лабораторной установке на основе автоматизированной информационно – измерительной системы (ЛУ-ИИС).

### Описание лабораторного макета

Структурная схема лабораторной установки показана на рис.1.

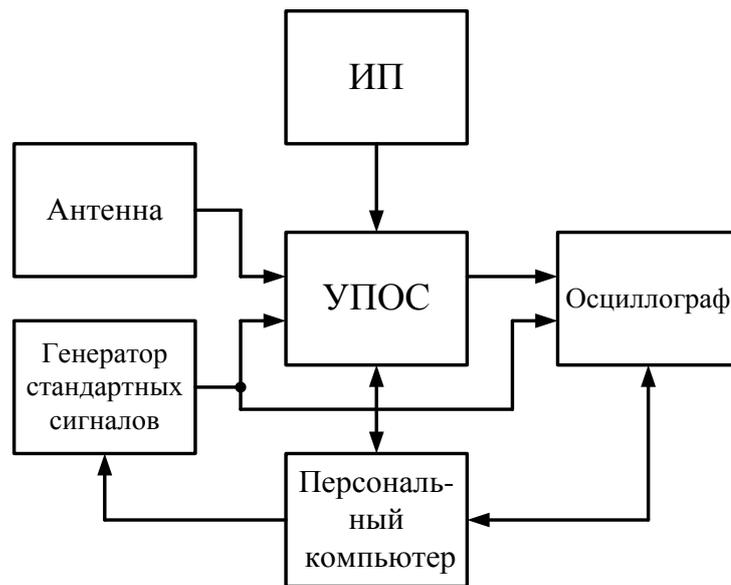


Рис.1. Структурная схема лабораторной установки по исследованию УПОС

Общий вид установки дан на рис.2.

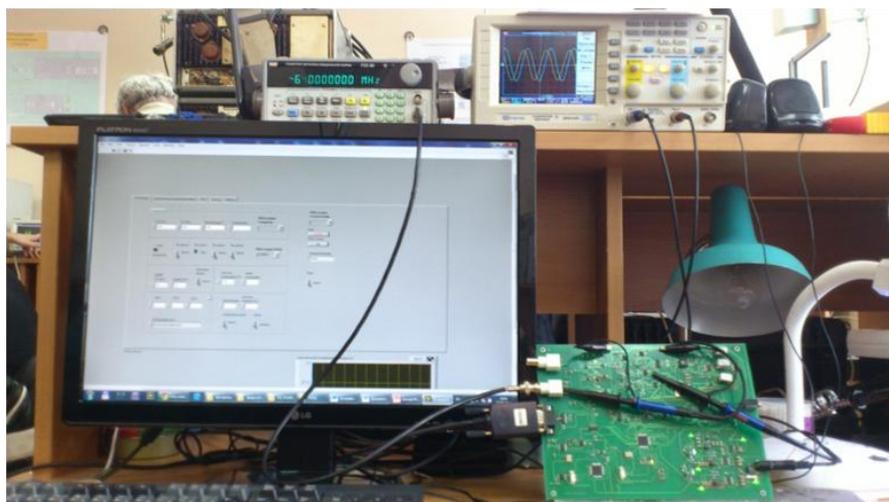


Рис.2. Общий вид лабораторной установки по исследованию УПОС

В состав ЛУ-ИИС входит плата исследуемого модуля УПОС (рис.3), содержащая набор контрольных точек в тракте приемника, персональный компьютер с портами

управления и установленным программным обеспечением, генератор стандартных сигналов и осциллограф (управляемые кодами языка SCPI).

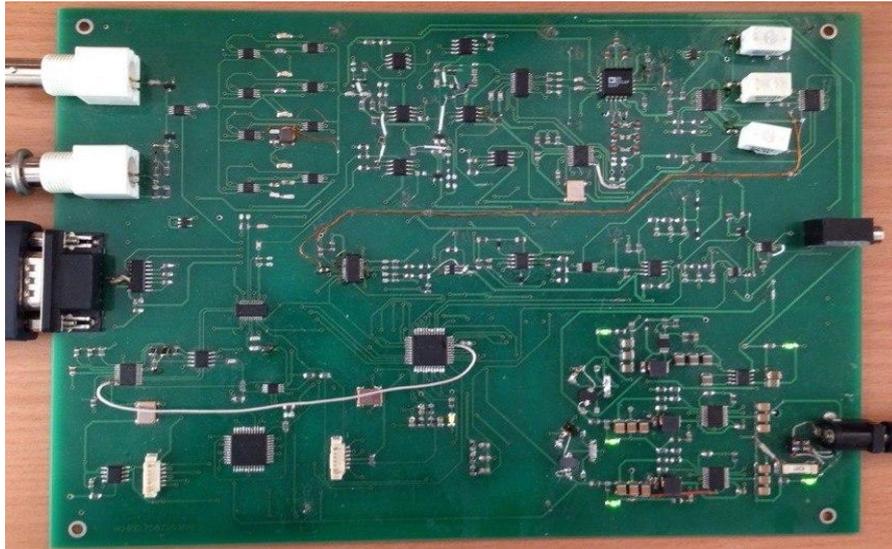


Рис.3. Плата исследуемого модуля УПОС.

Управление всей ИИС, включая модуль УПОС и виртуальные приборы, осуществляется программным модулем, разработанным в среде LabView (National Instruments). Разработанный программный модуль позволяет автоматизировать измерительный процесс при проведении работ.

Модуль УПОС оснащен разъемами для подключения сетевого адаптера 12 В, внешнего генератора или антенны, выходного устройства (динамика) и последовательного интерфейса RS-232.

Для исследовательских целей модуль УПОС предусматривает реализацию трех структурных схем приемника: прямого преобразования, прямого усиления и супергетеродинного типа.

Модуль содержит следующие узлы:

- - входные цепи;
- - усилитель сигнала радиочастоты (УРЧ);
- - балансный смеситель;
- - синтезатор частот (гетеродин);
- - усилитель сигнала промежуточной частоты (УПЧ);
- - детектор;
- -усилитель сигнала звуковой частоты (УЗЧ);
- -выходное устройство;
- -микроконтроллер.

Структурная схема модуля УПОС показана на рисунке 4.

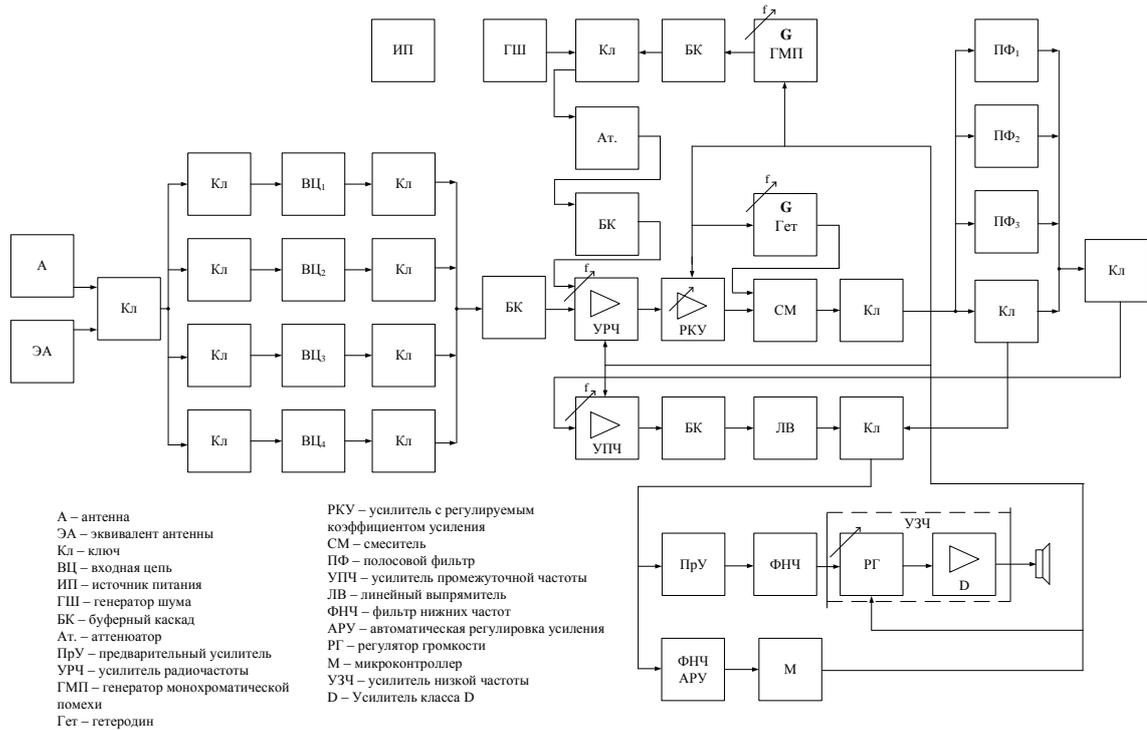


Рис.4. Структурная схема модуля УПОС

В состав модуля УПОС входят также имитаторы сигналов соседних станций и генератор шума.

Входная цепь модуля УПОС связывает антенну с усилителем радиочастоты.

Усилитель сигнала радиочастоты (УРЧ) состоит из буферного каскада и предварительного усилителя, реализованных на операционном усилителе (ОУ) *ADA4857-1*, и регулируемого усилителя, реализованного на микросхеме *AD8324*.

Первый синтезатор частот выполняет функцию гетеродина, а второй – эмулирует станцию соседнего канала. Для реализации этих устройств использован метод прямого цифрового синтеза, реализованный на микросхеме *AD9834*.

В качестве УПЧ используется регулируемый усилитель *AD8324*. Для согласования дифференциального выхода усилителя *AD8324* и несимметричного входа детектора использован каскад с дифференциальным входом на ОУ *LMH661* фирмы *National Semiconductor*.

Микроконтроллер обеспечивает преобразование управляющих кодов SCPI в биты коммутации ключей и коды последовательной шины SPI, образующей внутренний канал между микроконтроллером и отдельными микросхемами, а также формирует сигналы с широтно – импульсной модуляцией (ШИМ), для управления напряжениями перестройки варикапов.

Модуль оснащен набором следующих контрольных точек:

- коэффициента передачи входной цепи (КТ 4);

- коэффициента передачи УРЧ (КТ 6,7);
- работы смесителя в различных режимах (КТ 10);
- сигналов, вырабатываемых генераторами помех (КТ 1,5);
- отношения сигнал-шум, в зависимости от полосы пропускания фильтра УПЧ (КТ 12,11);
- сигнала линейного детектора (КТ 13);
- сигнала после ФНЧ (КТ 14);
- сигнала после ФНЧ АРУ (КТ 15);
- усилителя звуковой частоты (КТ 17);
- выделение постоянной составляющей сигнала ШИМ (КТ 3).

По периметру платы рим.3 расположены контрольные точки заземления (КТ 20; КТ 23; КТ24; КТ 25; КТ 21; КТ 19; КТ 18; КТ22).

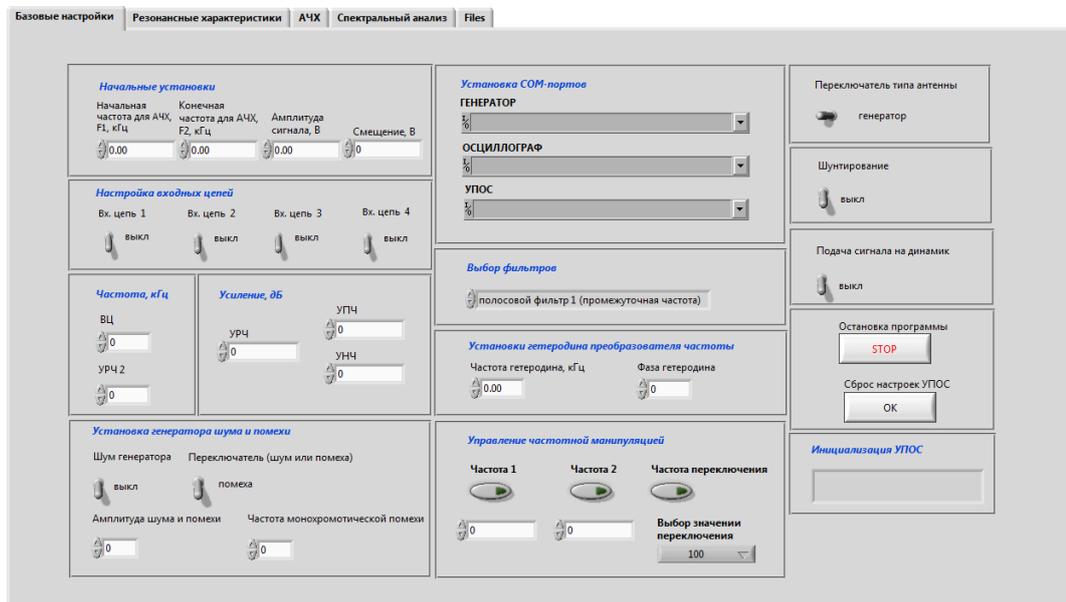


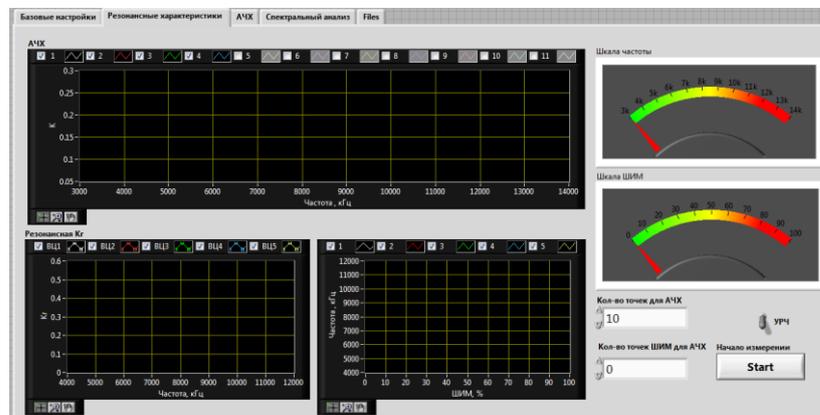
Рис.5. Пользовательский интерфейс для управления модулем УПОС

Управление модулем УПОС осуществляется по последовательному интерфейсу, RS-232 с помощью ПО, установленного на ПК, реализующего следующие функции:

- выбор антенного входа или входа с генератора сигналов;
- переключение типов входных цепей;
- управление усилением трактов РЧ и ПЧ;
- настройка входных цепей и усилителя РЧ;
- настройка тракта ПЧ;
- настройка балансного смесителя;
- настройка генератора шума;
- управление частотой синтезатора гетеродина;
- усиление тракта НЧ.

На рис.5 приведен пользовательский интерфейс модуля УПОС в режиме установки «Базовых настроек».

Результаты измерений выводятся в файлы, а также на экран монитора. Примеры интерфейсов для исследования АЧХ блоков тракта УПОС (а), и спектральных характеристик сигналов на выходе данных блоков (б) показаны на рис.6.



а.



б.

Рис.6. Интерфейс модуля УПОС для регистрации результатов измерений

#### 4. Лабораторная работа.

##### Исследование входных цепей РПРУ

###### Цель работы

1. Экспериментальное исследование одноконтурных входных цепей (ВЦ) с электронной перестройкой резонансной частоты контура с различными схемами связи с антенной.
2. Моделирование характеристик ВЦ в пакете MultiSim.

###### Домашнее задание к работе

1. Ознакомиться с назначением и методикой расчета ВЦ, освоить технику моделирования ВЦ в среде MultiSim. [1-5].

### Лабораторное задание

1. В среде MultiSim провести моделирование АЧХ ВЦ по рис.1.
2. На лабораторной установке рис.2.2,3 исследовать АЧХ трех типов ВЦ по рис.1.

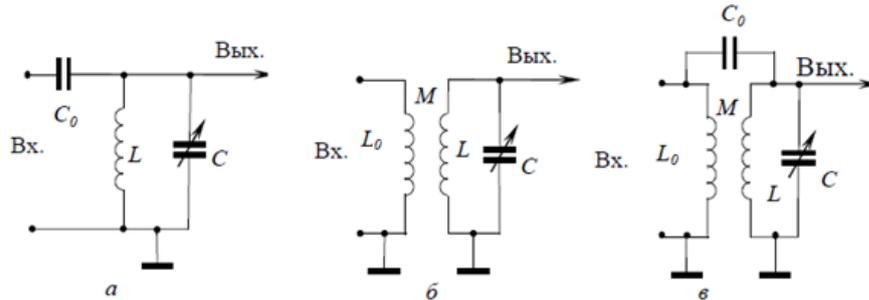


Рис.1. Виды ВЦ с антенной: а – емкостная; б – трансформаторная; в – комбинированная.

### Порядок выполнения работы

Для выполнения расчетной части работы и выполнения п.1 задания на ЛР следует запустить на выполнение файл программы «ОУ-LC-ППФ Пр-1.ms12». При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [6].

Выполнение п.2 задания на ЛР следует провести в следующей последовательности.

1. Подготовить к работе ИИС:

1.1. Подключить выход «вывод» генератор к разъему «эквивалент антенны» модуля УПОС. Включить генератор. Установить частоту и модуляцию сигнала по указанию преподавателя.

1.2. Подготовить осциллограф. Канал 1 – сигнальный зажим к разъему «эквивалент антенны», земляной зажим к земляной точке. Канал 2 – сигнальный зажим к контрольной точке, соответствующей исследованию; земляной зажим к одной из земляных точек.

1.3. Подключить разъем последовательного интерфейса RS-232 к модулю УПОС.

1.4. Подключить разъем адаптера питания к модулю УПОС, предварительно подключив адаптер к сети 220В.

1.5. Включить персональный компьютер с установленным программным модулем.

1.5.1. Запустить программу «YPOS» (рис.2.5)

1.5.2. Активировать кнопку остановки программы «STOP» (рис.2.5)

1.5.3. На интерфейсе пользователя установить следующие настройки:

- В поле «Visa session general» установить № COM - порта «4»;
- В поле «Visa session oscilloscope» установить № COM - порта «3»;
- В поле «Visa session YPOS» установить № COM - порта «5»;

1.5.4. Активировать кнопку начала измерений «Running»;

1.5.5. Выбрать исследуемый тип антенны (generation или antenna).

2. Включить тумблер «Входная цепь 2» (рис.1).

3. По указанию преподавателя, с помощью опций «Начальная частота»; «Конечная частота» и «Амплитуда сигнала», установить диапазон частот и амплитуду сигнала.
4. Подобрать значения «Уровень ШИМ ВЦ» так, чтобы уровень выходного сигнала на контрольной точке №4 был максимальным.
5. Выбрать вкладку «Резонансные характеристики» (рис. 2.6);
  - 5.1. Установить тумблер переключения режимов исследования (режим «VCh» - исследование входных цепей; режим «YRCh» - исследование УРЧ) в положения «VCh»;
  - 5.2. Установить значения «Количество точек на АЧХ» по указания преподавателя;
  - 5.3. Выбрать значение «количество точек ШИМ» 10-ти;
  - 5.4. На индикаторе «Шкала частот» установить диапазон частот, выбранный в п. 3;
  - 5.5. Активировать кнопку начала измерений «Start»;
6. Выключить тумблер «Входная цепь 2», включить тумблер «Входная цепь 1» (рис.1), проделать действия, описанные в п.5.
7. Выключить тумблер «Входная цепь 1», включить тумблер «Входная цепь 3» (рис.1), проделать действия, описанные в п.5.
8. Выключить тумблер «Входная цепь 3», включить тумблер «Входная цепь 4», проделать действия, описанные в п.5.
9. Составить отчет по лабораторной работе.

### **Содержание отчета**

1. Структурная схема лабораторной установки на основе автоматизированной информационно – измерительной системы (ЛУ-ИИС)
2. Результаты расчетов по п. 2 домашнего задания;
3. Результаты измерений в виде таблиц и графиков;
4. Выводы по результатам измерений.

### **Контрольные вопросы**

1. Каково назначение УРЧ в РПрУ?
2. Каковы основные характеристики УРЧ?
3. Перечислите факторы, определяющие коэффициент шума УРЧ.

### **Рекомендуемая литература**

1. Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с.
2. Остапенков П.С., Смольский С.М. Особенности обработки сигналов в современных измерительных системах: учеб. пособие / - М.: КУРС, 2018. - 208 с.

3. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
4. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. Схемы, блоки, 50-омная техника / Пер. с нем. – М.: 1990.
5. Шестеркин, А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10 [Электронный ресурс] /– М.: ДМК Пресс, 2012. - 360 с.
6. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

## 5. Лабораторная работа.

### Исследование преобразователя частоты РПрУ

#### Цель работы

1. Экспериментальное исследование двойного балансного преобразователя частоты РПрУ.
2. Моделирование характеристик преобразователя частоты (ПЧ) в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).

#### Домашнее задание к работе

1. Ознакомиться с назначением и методикой расчета ПЧ, освоить технику моделирования ПЧ в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS). [3,4].

#### Лабораторное задание

В макете ЛУ-ИИС в качестве преобразователя частоты используется схема двойного балансного смесителя - смеситель Гильберта, представленная на рис. 1.

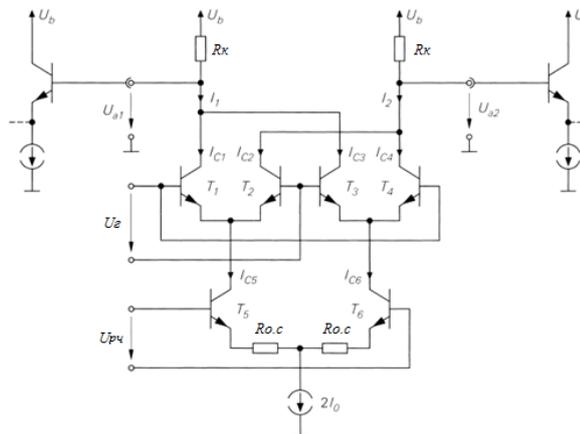


Рис.1. Двойной балансный преобразователь частоты РПрУ

Данный преобразователь состоит из двух балансных смесителей, выходы которых связаны между собой транзисторами:  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_5$ , а также  $T_3$ ,  $T_4$  и  $T_6$ . Схемы с общим эмиттером и обратной связью по току ( $T_5$ ,  $T_6$ ), работающие как преобразователь напряжение – ток, подключены к дифференциальному усилителю с обратной связью по току и противофазно управляются напряжением сигнала радиочастоты  $U_{рч}$ . Благодаря этому точка соединения обоих резисторов цепи обратной связи  $R_{o.c}$  служит точкой виртуальной земли. Ток покоя задается источником тока  $2I_0$  благодаря тому, что  $I_{C5,A} = I_{C6,A} = I_0$ . Напряжение гетеродина  $U_2$ , в идеале имеющее прямоугольную форму, противофазно подается на дифференциальный усилитель ( $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ,  $T_4$ ), работающий в режиме переключателя.

В лабораторной установке преобразователь частоты состоит из двойного балансного смесителя и гетеродина, представленного синтезатором частоты. Возможна реализация трех типов РПрУ, в зависимости от которых, выбирается режим работы балансного смесителя.

В случае супергетеродинного приемника балансный смеситель работает в режиме с преобразованием частоты. Здесь частота гетеродина выбирается так, что, при  $f_{pч} > f_z$ ,  $f_z = f_{pч} - f_{np}$ , где  $f_{np} = f_{pч} - f_z$ . При  $f_z > f_{pч}$  частота гетеродина выбирается как:  $f_z = f_{pч} + f_{np}$ , где  $f_{np} = f_z - f_{pч}$ .

В приемнике прямого преобразования балансный смеситель работает в режиме с преобразованием частоты. Частота гетеродина выбирается как:  $f_z = f_{pч}$ .

В приемнике прямого усиления балансный смеситель работает в режиме усилителя с широким диапазоном частот усиления. Частота гетеродина в этом случае  $f_z = 0$ .

Таким образом, лабораторное задание данной работы состоит в следующем:

1. Моделирование характеристик преобразователя частоты (ПЧ) в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).
2. На лабораторной установке рис.2.2,3 исследовать спектральные характеристики выходного сигнала ПЧ для трех типов РПрУ – приемника прямого усиления, супергетеродинного приемника и приемника прямого преобразования.

### **Порядок выполнения работы**

Для выполнения расчетной части работы и выполнения п.1 задания на ЛР следует запустить на выполнение файл программы «Exempl Rs\_.emp.». При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [5].

Выполнение п.2 задания на ЛР следует провести в следующей последовательности.

1. Выполнить действия, описанные в п.1 лабораторной работы №4. На генераторе выбрать частоту и модуляцию сигнала аналогичную частоте, взятой в лабораторной работе №4.
2. В программе «YPOS», вкладка «Базовые настройки», включить тумблер «Входная цепь 2».
3. Значения опций «Уровень ШИМ ВЦ» и «Уровень ШИМ УРЧ» установить в соответствии с указаниями к п.4 лабораторной работы №4 по настройке преселектора РПрУ.
4. Установить значения коэффициента усиления усилителя (вкладка «УРЧ» в блоке «Усилители») по указанию преподавателя

#### **5.1. Исследование приемника супергетеродинного типа;**

5.1.1. Установить частоту гетеродина (вкладка «Частота гетеродина») так, чтобы разностный сигнал гетеродина и несущей был 455 кГц. ( $f_{nc} = f_{pc} - f_c$ , где  $f_{nc} = 455$  кГц);

5.1.2. Выбрать вкладку «Спектр»; (рис. 2.6б)

5.1.3. Воспользовавшись опциями «Вкладка» - «Выбор канала осциллографа» установить канал осциллографа для отображения исследуемого сигнала (канал 1 или канал 2);

5.1.4. Исследуемый сигнал снимается на контрольной точке №10;

5.1.5. Активировать кнопку начала измерений «Start»;

5.1.6. Зафиксировать полученные на виртуальном осциллографе и спектроанализаторе графики.

### **5.2 Исследование приемника прямого преобразования;**

5.2.1. Установить частоту гетеродина, равной частоте несущего сигнала. ( $f_{pc} = f_c$ );

5.2.2. Повторить действия пунктов 5.1.1-5.1.6.

### **5.3. Исследование приемника прямого усиления;**

5.3.1. Установить нулевую частоту гетеродина ( $f_c=0$ ), а фазу гетеродина 90 градусов (вкладка «Фаза гетеродина»);

5.3.2. Повторить действия пунктов 5.1.1 – 5.1.6.

6. Составить отчет по лабораторной работе

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы принципы построения и схемы преобразователей частоты РПрУ?
2. Какие искажения сигналов типичны для преобразователей частоты в РПрУ?
3. Как выбирается промежуточная частота приемника?
4. Объясните появление побочных каналов приема при супергетеродинном приеме?
5. Назовите достоинства и недостатки балансных смесителей в РПрУ.

### **Рекомендуемая литература**

1. Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с.
2. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
3. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
4. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
5. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ:

учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

## 6. Лабораторная работа.

### Исследование тракта промежуточной частоты РПрУ

#### Цель работы

3. Экспериментальное исследование тракта промежуточной частоты РПрУ.
4. Моделирование характеристик тракта промежуточной частоты в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).

#### Домашнее задание к работе

2. Ознакомиться с назначением и методикой расчета характеристик тракта промежуточной частоты, освоить технику моделирования УПЧ в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS). [3,4].

#### Лабораторное задание

Структурная схема тракта УПЧ макета ЛУ-ИИС показана на рис.1.

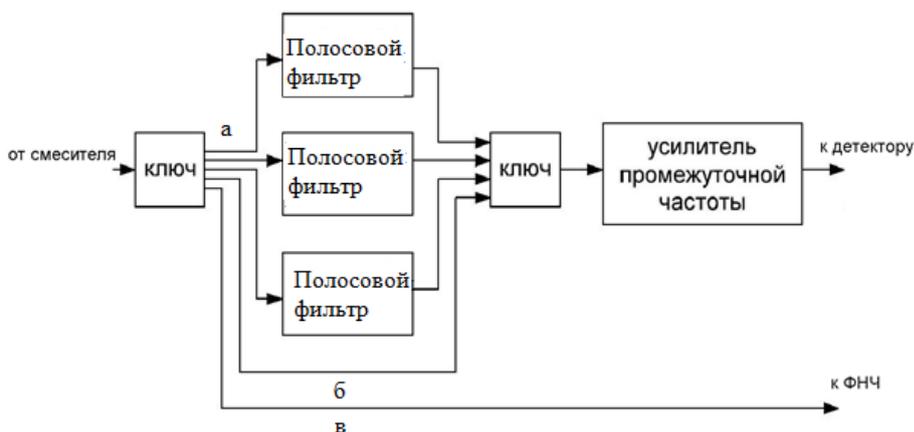


Рис.1. Структурная схема тракта УПЧ макета ЛУ-ИИС

В соответствии с рис.1, в зависимости от типа схемной реализации приемника реализуется, усиление сигнала происходит на промежуточной или несущей частоте сигнала.

Для приемника супергетеродинного типа разностный сигнал выделяется одним из ППФ- фильтров с различной шириной полосы пропускания (6 кГц; 20 кГц; 38 кГц) и усиливается в усилителе с регулируемым коэффициентом усиления.

В приемнике прямого усиления входной радиосигнал проходит в обход ППФ и поступает на устройство детектирования.

В приемнике прямого преобразования, сигнал с выхода смесителя поступает непосредственно на ФНЧ, минуя полосовые фильтры, усилитель ПЧ и выпрямитель.

В качестве усилителя ПЧ сигнала используется регулируемый усилитель *AD8324*. Для согласования дифференциального выхода усилителя *AD8324* и несимметричного входа детектора использован ОУ *LMH661* фирмы *National Semiconductor*.

Таким образом, лабораторное задание данной работы состоит в следующем:

1. Моделирование характеристик усилителя промежуточной частоты (УПЧ) в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).
2. На лабораторной установке рис.2.2,3 исследовать АЧХ выходного сигнала ПЧ для трех типов РПрУ – приемника прямого усиления, супергетеродинного приемника и приемника прямого преобразования.

### **Порядок выполнения работы**

Для выполнения расчетной части работы и выполнения п.1 задания на ЛР следует запустить на выполнение файл программы «Exempl Rs\_.emp». При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [5].

Выполнение п.2 задания на ЛР следует провести в следующей последовательности.

1. Выполнить действия, описанные в п.1 лабораторной работы №4.
2. В программе «YPOS», вкладка «Базовые настройки», включить «Входная цепь 2».
3. Выбрать тип ППФ №1 (Вкладка «Выбор фильтров»).
3. Выполнить указания по настройке преселектора в соответствии с п.4 ЛР №4.
4. Установить значения УРЧ (вкладка «УРЧ» в блоке «Усилители») аналогично выбранным в лабораторной работе №5 З (значение «30» соответствует усилению на 0 дБ).
5. Установить значения УПЧ (вкладка «УПЧ» в блоке «Усилители») по указанию преподавателя (значения «30» соответствует усилению на 0 дБ).
6. Установить диапазон частот  $\pm 50$ кГц от промежуточной частоты («Начальная частота» и «Конечная частота»).

### **7.1 Исследование приемника супергетеродинного типа;**

7.1.1 Установить частоту гетеродина так (вкладка «Частота гетеродина»), чтобы разностный сигнал гетеродина и несущей был 455 кГц. ( $f_{np} = f_{pч} - f_{г}$ , где  $f_{np} = 455$  кГц);

7.1.2 Выходной исследуемый сигнал снимается на контрольной точке №11(12);

7.1.3 Выбрать вкладку «АЧХ» (рис. 1.6);

7.1.4 Установить значения «Количество точек на АЧХ» по указания преподавателя;

7.1.5 На индикаторе «Шкала частот» установить выбранный диапазон частот;

7.1.6 Активировать кнопку начала измерений «Start»;

7.1.7 После завершения расчетов, программа предложит сохранить полученные результаты в отдельный файл.

8. Выбрать полосовой фильтр №2 (Вкладка «Выбор фильтров»).
9. Прodelать действия п. 7.1. Полученные результаты сохранить в файл по п. 7.1.7.
10. Выбрать полосовой фильтр №3 (Вкладка «Выбор фильтров»).
11. Повторить действия п. 7.1. Полученные результаты сохранить в файл по п. 7.1.7.
12. В программе «YPOS» открыть вкладку «Файлы»;
13. Установить значения «Количество точек на АЧХ» 100-м;
14. Установить значения «Количество графиков» n;
15. Открыть файл, в который были совершены предыдущие сохранения (п. 11);
16. Зафиксировать полученные графики.

Примечание.

В режиме приемника прямого усиления, сигнал усиливается в УПЧ и в обход ППФ поступает на устройство детектирования. Его осциллограмма доступна в контрольной точке №33.

В режиме приемника прямого преобразования преобразованный сигнал поступает на ФНЧ в обход трактов ПЧ и детектирования.

### **Контрольные вопросы**

1. Каково основное предназначение тракта промежуточной частоты в РПрУ?
2. В чем отличие тракта первой ПЧ от тракта 2-й ПЧ в инфрадинном РПрУ?
3. Как выбирается значение ПЧ инфрадинного РПрУ?
4. Что такое зеркальный канал? Назовите способы подавления зеркального канала?

### **Рекомендуемая литература**

6. Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с.
7. У. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
8. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
9. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
10. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

## 7. Лабораторная работа.

### Исследование АЧХ тракта РПрУ с помощью генератора шума

#### Цель работы

1. Экспериментальное исследование воздействия широкополосного белого шума на тракт РПрУ.
2. Моделирование шумовых характеристик тракта РПрУ в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).

#### Домашнее задание к работе

1. Ознакомиться с методами формирования псевдослучайных двоичных последовательностей (ПСП) и использования их для создания эталонных генераторов шума.
2. Ознакомиться с назначением и методикой расчета шумовых характеристик тракта промежуточной частоты, освоить технику моделирования УПЧ в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS). [3,4].

#### Лабораторное задание

В состав платы исследуемого модуля УПОС лабораторной установки ЛУ-ИИС входит (рис.2.1-3) включен узел генератора шума, построенный на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) *EPM3032* из семейства *MAX3000* фирмы *Altera Devices*.

Алгоритм генерации псевдослучайной двоичной последовательности (ПСП) в данном устройстве выполнен программно, на основе стандартной процедуры формирования последовательности максимальной длины, с помощью массива сдвиговых регистров с обратными связями и вентиля «исключающее ИЛИ». Последующая цифровая фильтрация полученной ПСП позволяет сформировать шумовой сигнал с равномерной спектральной плотностью в пределах диапазона  $\Delta P_{ш}$  в несколько мегагерц и заданной, регулируемой мощностью.

Таким образом, лабораторное задание данной работы состоит в следующем:

1. Моделирование шумовых характеристик тракта исследуемого модуля УПОС в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).
2. На лабораторной установке рис.2.2,3 исследовать фильтрацию шумового спектра генератора шума трактами приемников прямого усиления, прямого преобразования и супергетеродинного приемника.

## Порядок выполнения работы

Для выполнения расчетной части работы и выполнения п.1 задания на ЛР следует запустить на выполнение файл программы «Ехemp2 Rs\_.emp.». При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [5].

Выполнение п.2 задания на ЛР следует провести в следующей последовательности.

### 1. Подготовить к работе ИИС:

1.1. Включить осциллограф. Щуп одного из двух каналов осциллографа подключить: сигнальный зажим к контрольной точке, соответствующей исследованию, а второй - к одной из точек заземления.

1.2. Подключить разъем последовательного интерфейса RS-232 к модулю УПОС.

1.3. Подключить разъем адаптера питания к модулю УПОС, предварительно подключив адаптер к сети 220В.

1.4. Включить персональный компьютер с установленным программным модулем.

### 2. Запустить программу «YPOS» (рис.2.5)

2.1. Активировать кнопку остановки программы «STOP» (рис. 2.5)

2.2. С помощью интерфейса “Начальные установки” активизировать настройки:

- В поле «Visa session general» установить № COM - порта «16»;

- В поле «Visa session oscilloscope» установить № COM - порта «15»;

- В поле «Visa session YPOS» установить № COM - порта «13»;

2.3. Активировать кнопку начало испытаний «Running» и в поле «Инициализация» получить ответ «UPOS». (Этот элемент индикации необходим для подтверждения взаимодействия программного и аппаратного обеспечения.)

### 3. Включить тумблер «Генератор шума».

3.1. Переключатель выбора «шум или помеха» установить в положение «шум»;

3.2. Проверить наличие шума на КТ 1 щупом осциллографа. Сделать необходимые скриншоты с осциллографа для отчета.

3.3. Щуп канала осциллографа подключить к КТ 5. Установить значение «Амплитуда шума и помехи» равное «35».

3.4. Щуп канала осциллографа подключить к КТ 4-1.

3.4. Выбрать вкладку «Спектральный анализ» (рис. 1.9);

4.5. Выбрать соответствующий канал осциллографа (Канал 1 или Канал 2), который отображает исследуемый сигнал (вкладка «Выбор канала с осциллографа»);

4.6. Установить значение «Развертка осциллографа» в наносекундах.

4.7. Установить значение «Размер БПФ» равное «4096».

4.8. Активировать на кнопку начала измерений «Start». Сделать необходимые скриншоты с вкладки «Спектральный анализ» для отчета.

4.9. Вернуться к вкладке «Начальные установки»

4.10. Включить тумблер «Шунтирование» и снять спектр.

4.11. Последовательно устанавливая значения «Уровень УРЧ» на «10», «20», «30», снять спектр сигнала с шумом в КТ 4-1. Сделать необходимые скриншоты с вкладки «Спектральный анализ» для отчета.

4.12. Установить значение «УРЧ» из вкладки «Усилители» равное «35»

4.13. Установить частоту гетеродина (вкладка «Частота гетеродина») так, чтобы разностный сигнал гетеродина и несущей был 455 кГц. Частота гетеродина для приемника супергетеродинного типа выбирается из следующего выражения:

$$f_{нч} = f_{рч} - f_z,$$

где  $f_{пч}=455$  кГц,  $f_{рч}$ - см. пп.4.7 (спектр сигнала снятый в КТ 4-1 без изменения «Уровень УРЧ»);

4.14. Исследуемый сигнал снимается в контрольной точке №10;

4.15. Перейти к вкладке «Спектральный анализ» и установить развертку осциллографа «Развертка осциллографа» в микросекундах.

4.16. Активировать на кнопку начала измерений «Start»;

4.17. Установить значение «УПЧ» из вкладки «Усилители» равное «35»

4.18. Выбрать Полосовой фильтр 1;

4.19. Перейти к вкладке «Спектральный анализ» и установить предел развертки осциллографа «Развертка осциллографа» на «микросекунды».

4.20. Активировать на кнопку начала измерений «Start»;

4.21. Исследуемый сигнал снимается в контрольной точке №11.

5. Сделать необходимые скриншоты, составить отчет по лабораторной работе.

**\*Примечание:** Если по каким-либо причинам не удастся установка COM-портов, проделать следующие действия:

- Активировать кнопку останова программы «STOP»;

- Во вкладке «Базовые настройки» в поле «Visa session YPOS» установить номер (один из трех) порта и Активировать кнопку начала испытаний «Running»;

- В поле «Инициализация» появится одно из следующих обозначений («YPOS» - соответствует вводу данных в поле «Visa session YPOS»; «GD/GS» соответствует вводу данных в поле «Visa session oscilloscope»; если ничего не появилось, то указанный номер порта соответствует вводу данных в поле «Visa session general»), которое будет соответствовать введенному номеру COM-порта.

- Прodelать выше описанные действия с оставшимися номерами портов.
- Установить полученные значения в соответствующие поля;

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое шумовой процесс, и какие его виды можно наблюдать в РПрУ?
2. Какими уровнями чувствительности характеризуются РПрУ?
3. Как выбирается значение ПЧ инфраничного РПрУ?
4. Поясните метод построения генератора шума на основе псевдослучайной последовательности.

### **Рекомендуемая литература**

1. .Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с
2. . Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
3. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
4. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
5. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

## 8. Лабораторная работа.

### Исследование избирательности РПрУ по соседнему каналу

#### Цель работы

1. Экспериментальное исследование подавления монохроматической помехи соседнего канала частотно-избирательной системой тракта аналогового РПрУ.
2. Моделирование частотной избирательности тракта аналогового РПрУ в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS).

#### Домашнее задание к работе

1. Ознакомиться с методами подавления помех от соседнего канала в аналоговых РПрУ.
2. Освоить технику моделирования системных характеристик тракта промежуточной частоты РПрУ в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS). [3,4].

#### Лабораторное задание

В состав платы исследуемого модуля УПОС лабораторной установки ЛУ-ИИС (рис.2.1-3) включен узел генератора монохроматической помехи, имитирующий работу соседнего канала. В данном качестве используется, построенный на методе прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis, DDS) и реализованный на микросхеме *AD9834*. В качестве источника тактового сигнала в данном узле используется рекомендованный производителем опорный генератор *GXO-7531* 50МГц. В качестве источника питания используется отдельный линейный стабилизатор напряжения *ADP3301*. Выбор метода DDS для построения синтезатора частоты помехи обусловлен следующими причинами:

- возможность цифрового управления устройством;
- высокое разрешение по частоте и фазе;
- высокая скорость переключения на другую частоту (или фазу), перестройка по частоте без разрыва фазы и выбросов;
- возможность параметрической температурной компенсации синтезатора;

Таким образом, лабораторное задание данной работы состоит в следующем:

1. Моделирование частотной избирательности тракта промежуточной частоты исследуемого модуля УПОС по соседнему каналу в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS)..
2. На лабораторной установке рис.2.2,3 исследовать подавление помехи от соседних каналов трактами приемников прямого усиления, прямого преобразования и супергетеродинного приемника.

### Порядок выполнения работы

Для выполнения расчетной части работы и выполнения п.1 задания на ЛР следует запустить на выполнение файл программы «Ехемр3 Rs.emp.». При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [5];

Выполнение п.2 задания на ЛР следует провести в следующей последовательности;

1. Подготовить к работе ИИС:

1.1. Подключить выход генератор «вывод» к разъему «эквивалент антенны» модуля УПОС. Включить генератор. Установить частоту и модуляцию сигнала по указанию преподавателя;

1.2. Включить осциллограф. Сигнальный зажим щупа одного из каналов осциллографа подключить: к контрольной точке, соответствующей исследованию; второй зажим подключить к заземлению;

1.3. Подключить разъем последовательного интерфейса RS-232 к модулю УПОС;

1.4. Подключить разъем адаптера питания к модулю УПОС, предварительно подключив адаптер к сети 220В;

1.5. Включить персональный компьютер с установленным программным модулем.

2. Запустить программу «УПОС» (рис.2.5,6)

2.1. Активировать кнопку остановки программы «STOP» (рис.2.5,6)

2.2. На интерфейсе пользователя “Начальные установки” задать следующие настройки:

- В поле «Visasessiongeneral» установить № COM - порта «16»;

- В поле «Visasessionoscilloscope» установить № COM - порта «15»;

- В поле «Visasession YPOS» установить № COM - порта «13»;

2.3. Активировать кнопку начало испытаний «Running» и в поле «Инициализация» получить ответ «UPOS». Этот элемент индикации подтверждает установку взаимодействия программного и аппаратного обеспечений макета;

3. Включить тумблер «Входная цепь 2»;

3.1. Включить тумблер «Генератор шума»;

3.2. Переключатель выбора «шум или помеха» установить в положение «помеха»;

3.3. Установить значение «Частота монохроматической помехи» по указанию преподавателя (не более 100 кГц)

3.4. Установить значение «Амплитуда шума и помехи» равное «35»;

3.5. Щуп канала осциллографа подключить к КТ 4;

3.6. Установить значение «Уровень сигнала на ВЦ» равное «35»;

3.7. Выбрать вкладку «Спектральный анализ» (рис. 2.6б);

4. На вкладке «Выбор канала осциллографа» установить канал осциллографа для отображения исследуемого сигнала;
  - 4.1. Установить значение «Развертка осциллографа» в наносекундах;
  - 4.2. Выбрать значение «Размер БПФ» (не менее 2048);
  - 4.3. Активировать на кнопку начала измерений «Start». На вкладке «Спектральный анализ» сделать необходимые фото спектрограмм для отчета по ЛР;
  - 4.4. Вернуться к вкладке «Начальные установки»;
  - 4.5. Установить значение «Уровень сигнала на УРЧ» равное «35»;
  - 4.6. Щуп канала осциллографа подключить к КТ 4-1. Повторить спектральные измерения по пп.4 - 4.3;
  - 4.7. Установить значение «УРЧ» из вкладки «Усилители» равное «35»;
  - 4.8. На вкладке «Частота гетеродина» установить частоту гетеродина соответствующей промежуточной частоте 455 кГц ( $f_{гч} = f_{пч} - f_{г}$ ).
- 4.10. Исследуемый сигнал снимается на контрольной точке №10;
  - 4.11. Повторить измерения по пп.4 - 4.3;
  - 4.12. На вкладке «Усилители» установить значение «УПЧ» из равное «35»;
  - 4.13. Выбрать полосовой фильтр типа 1;
5. Сигнальный щуп осциллографа подключить к КТ 11.
  - 5.1. Повторить измерения по пп.4.5-4.7;
  - 5.2. Повторить измерения по пп.4.5-4.7 для ППФ 2-го 3-го типов;
6. Задokumentировать полученные результаты, составить отчет по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Что такое помеха соседнего канала в РПрУ?
2. Какое влияние оказывает на полезный сигнал в РПрУ?
3. Каким структурным узлом РПрУ обеспечивается подавление помехи соседнего канала?

### Рекомендуемая литература

1. Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов /- М.: Горячая линия, 2007. - 520 с.
2. Томаси. Электронные системы связи /- М.: Техносфера, 2007. - 1360 с.
3. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
4. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.

5. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

### Тема 3. Прототипирование цифровых и аналоговых РПрУ по технологии программно определяемой радиосистемы

Важной задачей настоящего курса УПО-ДАС является практикум по прототипированию программно-определяемых блоков радиоприемников (**прототипирование** - [англ. prototyping](#) от др.-греч. πρῶτος — первый и τύπος — отпечаток, оттиск; первообраз) т.е. быстрая «черновая» реализация базовой функциональности для анализа работы системы в целом), охватывающей область радиоинженерии, к которой относится идеология SDR (Software-Defined Radio – радиосредства, алгоритмы работы которых определяются программным обеспечением) позволяющая наращивать функциональность радиосредств без изменения аппаратной части.

В данном лабораторном практикуме данная операция реализована на основе программно определяемой радиосистемы (SDR) представляющей собой радиосистему NI USRP-2920, в которой функции физического уровня частично или полностью задаются программно. На этапе прототипирования малыми усилиями создается работающая система (возможно неэффективно, с ошибками, и не в полной мере), позволяющая более детально изучить работу устройства системы. В рамках решения данной задачи обсуждаются SDR-проекты по сборке и настройке NI USRP алгоритма фильтрации, демодуляции аналоговых AM и FM-сигналов, цифровых каналов передачи и др.

Комбинация оборудования NI USRP и LabVIEW для достижения высокой функциональности и гибкости, дает платформу для быстрого прототипирования, включая разработку физического уровня, записи и воспроизведения радиосигнала, радиомониторинга, валидации алгоритмов и многое другое. Актуальность данного направления, с точки зрения разработки радиоприемных устройств, определяется возможностью реализовать и анализировать прототипы блоков радиоприемников с использованием потенциала универсального периферийного устройства программного радио (USRP – Universal Software Radio Peripheral)

Ниже дано описание **двух** лабораторных работ по исследованию узлов блока USRP-2920 для прототипирования цифровых и аналоговых РПрУ по технологии программно определяемого радио (Software-defined radio, SDR) [1-4].

#### Общие сведения об универсальном устройстве USRP

Общий вид блока USRP-2920, используемого в ЛР для прототипирования РПрУ показан на рис.1.

NI USRP-2920 представляет собой платформу программно- управляемого радио (SDR), которая может формировать, передавать, принимать и обрабатывать сигналы для

решения задач в области радиосвязи. Данное устройство поставляется с приборным драйвером NI-USRP, который можно использовать для его программирования в LabVIEW. Для создания коммуникационных приложений для NI USRP- 2920 используется приборный драйвер NI-USRP.

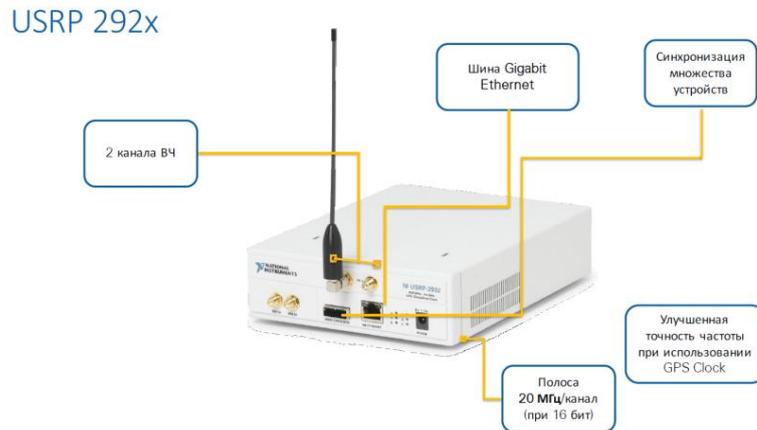


Рис.1. Общий вид блока USRP-2920, используемого в ЛР для прототипирования РПрУ

Приборный драйвер NI-USRP имеет набор виртуальных приборов (ВП) и свойств, которые поддерживают функциональность универсального периферийного устройства программного радио, включая конфигурирование, управление и другие специальные функции.

Платформа NI USRP позволяет пользователю проводить эксперименты и создавать на компьютере алгоритмы физического уровня разнообразных протоколов связи. Представленные функциональные возможности NI USRP позволяют повысить усвояемость обучающимся материала, вместе с тем в кратчайшие сроки создавать прототипы и сравнивать экспериментальные результаты с теоретическими данными.

Основные возможности платформы NI USRP:

- гибкая программно конфигурируемая платформа с интуитивно понятным инструментом для графического и текстового программирования в LabVIEW;
- предлагает разработчикам систем радиосвязи доступную программно определяемую радиосистему с многообразной функциональностью, позволяющей разрабатывать системы пятого поколения;
- имеет на борту 2x2 многоканальных входа, многоканальных выхода, радио трансивер, АЦП, ЦАП, ПЛИС Kintex7, управляемые через LabVIEW;
- ориентирован на цифровую обработку сигналов, в форм факторе 1U половинной ширины;

- совмещает два дуплексных радиоканала с мгновенной полосой до 40 МГц, каждый из которых оборудован переключателем, позволяющим переключаться с дуплексной работы с разделением по времени на дуплексную работу с разделением по частоте;
- доступное решение для преподавания основных направлений в радиосвязи с готовыми к использованию учебными курсами;
- настраиваемый рабочий диапазон частот от 50 МГц до 6 ГГц
- мгновенная полоса I/Q до 40 МГц потоковая передача данных до 40 МГц для удаленной обработки данных в среде LabVIEW;
- дает платформу для быстрого прототипирования, включая разработку физического уровня, записи и воспроизведения радиосигнала, радиоэлектронной разведки,
- валидации алгоритмов и многое другое; - NI USRP совместим с ОС Windows 7/ 10.

Структурная схема блока USRP-2920 дана на рис.2. На этой схеме отсчеты I/Q сигналов синтезируются компьютером и передаются в USRP с заданной частотой дискретизации через Ethernet. USRP аппаратно интерполирует входные сигналы для более высокой частоты дискретизации, используя цифровое преобразование с повышением частоты (DUC), после чего преобразует сигнал в аналоговый при помощи цифро-аналогового преобразователя (DAC). Далее результирующий аналоговый сигнал микшируется с заданной несущей частотой и поступает на SMA разъем TX1. Дополнительную информацию об оборудовании NI SDR можно найти в описании к устройству NI USRP 2920.

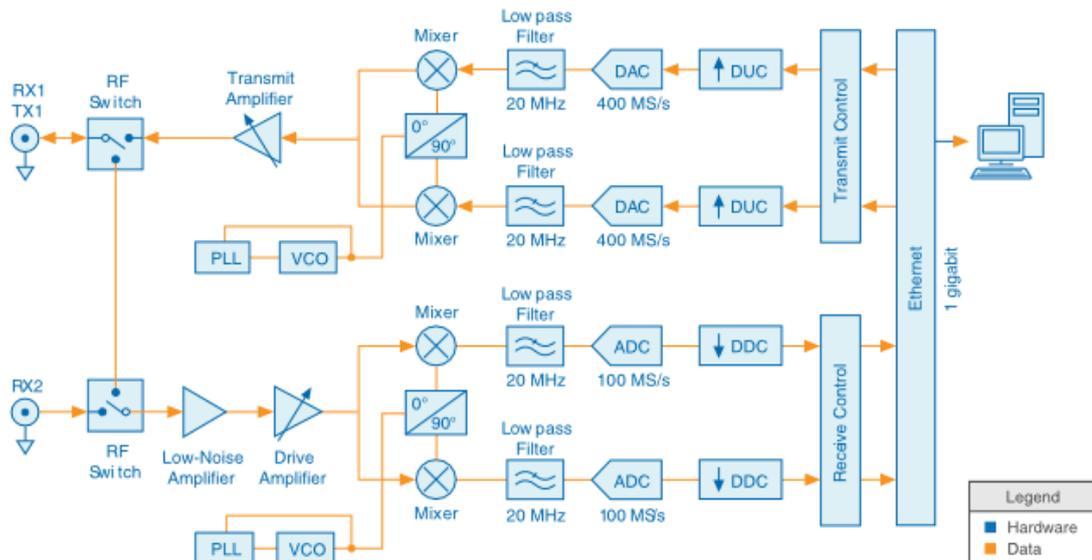


Рис.2. Структурная схема USRP-2920

Технические характеристики блока USRP-2920 приведены в таблице 1.

Внешний вид передней панели NI USRP-2920 представлен на рис. 3. В таблицах 3 и 4 приведено описание разъемов устройства.

Таблица 1. Технические характеристики USRP-2920

Transmitter		Receiver	
Frequency range	50 MHz to 2.2 GHz	Frequency range	50 MHz to 2.2 GHz
Frequency step	<1 kHz	Frequency step	<1 kHz
<b>Maximum output power (<math>P_{out}</math>)</b>		Gain range <sup>[5]</sup>	0 dB to 31.5 dB
50 MHz to 1.2 GHz	50 mW to 100 mW (17 dBm to 20 dBm)	Gain step	0.5 dB
1.2 GHz to 2.2 GHz	30 mW to 70 mW (15 dBm to 18 dBm)	Maximum input power ( $P_{in}$ )	0 dBm
Gain range <sup>[1]</sup>	0 dB to 31 dB	Noise figure	5 dB to 7 dB
Gain step	1.0 dB	Frequency accuracy <sup>[6]</sup>	2.5 ppm
Frequency accuracy <sup>[2]</sup>	2.5 ppm	<b>Maximum instantaneous real-time bandwidth[7]</b>	
<b>Maximum instantaneous real-time bandwidth[3]</b>		16-bit sample width	20 MHz
16-bit sample width	25 MS/s	8-bit sample width	40 MHz
8-bit sample width	50 MS/s	Maximum I/Q sample rate <sup>[8]</sup>	
Digital-to-analog converter (DAC)	2 channels, 400 MS/s, 16 bit	16-bit sample width	25 MS/s
DAC spurious-free dynamic range (sFDR)	80 dB	8-bit sample width	50 MS/s
		Analog-to-digital converter (ADC)	2 channels, 100 MS/s, 14 bit
		ADC sFDR	88 dB

1. The output power resulting from the gain setting varies over the frequency band and among devices.
2. *Frequency accuracy* is based on temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) vendor specifications and is not measured. Alternatively, you can incorporate an external reference source to provide a more precise frequency Reference Clock and to achieve better frequency accuracy.
3. Instantaneous bandwidth depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.
4. I/Q sample rate depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.
5. The received signal amplitude resulting from the gain setting varies over the frequency band and among devices.
6. *Frequency accuracy* is based on temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) vendor specifications and is not measured. Alternatively, you can incorporate an external reference source to provide a more precise frequency Reference Clock and to achieve better frequency accuracy.
7. Instantaneous bandwidth depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.
8. I/Q sample rate depends on many factors including, but not limited to, network configuration and host computer performance. Actual data throughput may be chipset dependent.

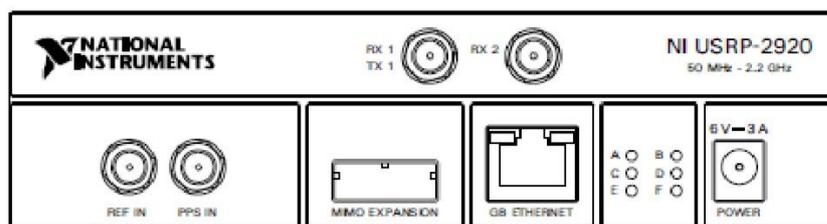


Рис. 3. Передняя панель NI USRP-2920

Таблица 2. Разъемы передней панели модуля NI USRP-2920

Разъем	Использование
RX1 TX1	Входной и выходной разъем ВЧ-сигнала. RX1 TX1 является штыревым SMA разъемом с импедансом 50 Ом и представляет собой канал ввода или вывода, привязанный к общему проводу (single-ended).
RX2	Входной разъем ВЧ-сигнала. RX2 является штыревым SMA разъемом с импедансом 50 Ом и представляет собой канал ввода, привязанный к

	общему проводу.
REF IN	Входной сигнал для внешнего опорного сигнала для местного гетеродина (LO). REF IN является штыревым SMA разъемом с импедансом 50 Ом и представляет собой канал ввода, привязанный к общему проводу. REF IN рассчитан на прием сигнала 10 МГц с минимальной входной мощностью 0 дБм (0,632 В) и максимальной входной мощностью 15дБм (3,56 В) для прямоугольного или синусоидального сигнала.
PSS IN	Входной разъем для опорного сигнала синхронизации PPS (имп./с). PSS IN является штыревым SMA разъемом с импедансом 50 Ом и представляет собой канал ввода, привязанный к общему проводу. PSS рассчитан на прием сигналов ТТЛ от 0 В до 3,3 В и от 0 В до 5 В.
MIMOEXPANSION	Интерфейсный порт РАСШИРЕНИЯ (EXPANSION) для несколько входов, несколько выходов (MIMO) соединяет два устройства USRP с помощью совместимого MIMO-кабеля.
GB ETHERNET	Порт гигабитного Ethernet предназначен для подключения разъема RJ-45 (Category 5, Category 5e, Category 6).
POWER	Разъем предназначен для подключения внешнего источника постоянного тока 3 А, 6В.

**Таблица 3. Светодиодные индикаторы модуля USRP-2920**

Светодиод	Индикация
A	Показывает состояние передачи модуля NIUSRP-2920: ВЫКЛ – модель не передает данные ЗЕЛЕНЫЙ – модуль передает данные
B	Показывает состояние физического соединения MIMO-кабеля: ВЫКЛ – модули не подключены с помощью MIMO-кабеля ЗЕЛЕНЫЙ – модули подключены с помощью MIMO-кабеля
C	Показывает состояние приема модуля NIUSRP-2920: ВЫКЛ – модуль не принимает данные ЗЕЛЕНЫЙ – модуль принимает данные
D	Показывает состояние встроенного программного обеспечения модуля NIUSRP: ВЫКЛ – программное обеспечение не загружено ЗЕЛЕНЫЙ – программного обеспечение загружено
E	Показывает состояние привязки к опорному синхросигналу гетеродина (LO) в модуле NIUSRP-2920: ВЫКЛ – опорный синхросигнал не подан или гетеродин не привязан к синхросигналу МИГАНИЕ – гетеродин не привязан к опорному синхросигналу
F	Показывает состояние питания модуля NIUSRP-2920: ВЫКЛ – питание модуля выключено ЗЕЛЕНЫЙ – питание модуля включено

Подключение USRP-2920 к компьютеру позволяет создать двухканальную приемопередающую SDR – систему, работающую в частотном диапазоне 50 МГц – 2,2 ГГц с полосой обработки сигнала до 20 МГц. Для управления работой USRP использована среда

программирования LabVIEW, которая предоставляет удобный интерфейс конфигурирования SDR – устройства и работы с другими внешними устройствами [4].

Поступающие на вход USRP-2920 сигналы смешиваются в преобразователе частоты с сигналом гетеродина (VCO) для получения ортогональных I/Q компонент, которые после прохождения через ФНЧ с частотой среза 20 МГц дискретизируются 2-канальным 14-битным аналого-цифровым преобразователем (ADS) со скоростью 100 MS/s. Оцифрованные I/Q данные следуют параллельными путями в тракт цифрового преобразования с понижением частоты, при этом осуществляется смешивание, фильтрация и децимация в цифровом понижающем преобразователе (DDC). Прореженные отсчеты передаются на компьютер.

При передаче отсчеты I/Q сигналов синтезируются компьютером и передаются в USRP с заданной частотой дискретизации через интерфейс Ethernet, USB или PCI Express. USRP аппаратно интерполирует входные сигналы для более высокой частоты дискретизации, используя цифровой повышающий преобразователь (DUC), и далее при помощи 2-канального 16-разрядного цифро-аналогового преобразователя (DAC) и ФНЧ преобразует информацию в один аналоговый сигнал, который с помощью VCO повышается до рабочей частоты.

Устройство USRP-2920 предназначено для создания прототипов телекоммуникационных устройств [1-4]. В настоящем лабораторном практикуме оно используется для прототипирования приемников цифровых и аналоговых сигналов. Подробное техническое описание, а также инструкцию по применению USRP-2920 можно взять в [2,3].

### Рекомендуемая литература

1. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. - М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 372 с.
2. Прототипирование программно-определяемых радиосистем с помощью NI LabVIEW// URL: (<http://www.ni.com/pdf/manuals/376358a.pdf>)
3. Руководство NI USRP-2930/2932 Universal Software Radio Peripheral// URL: <http://russia.ni.com/sites/default/files/USRP%20293x%20%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8F.pdf>.
4. Блэк Б.А. Введение в системы радиосвязи. Лабораторные работы с NI USRP и LabVIEW Communications. NI 326348A-01, 2014. С. 10-12.

5. Федосов, В. П., Нестеренко, А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

## 9. Лабораторная работа.

### Прототипирование системы передачи аудиосигнала по каналу с АМ модуляцией в УКВ диапазоне

#### Цель работы

1. Ознакомление с принципами работы SDR (software defined radio) и приемами программирования модуля NI USRP 2920 в среде LabView;
2. Освоение техники настройки модуля USRP 2920 для приема АМ сигналов;
3. Прототипирование системы связи с АМ модуляцией в УКВ диапазоне.

#### Домашнее задание к работе

1. Ознакомится с принципами работы SDR (software defined radio) и приемами программирования модуля NI USRP 2920 в среде LabView;
2. Освоить технику моделирования системы связи с АМ модуляцией в УКВ диапазоне в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS). [3,4].

#### Лабораторное задание



Рис. 1. Прототип системы связи с АМ модуляцией на основе NI USRP-2920

1. Изучить принципы и конструктивное выполнение приемно-передающей аппаратуры SDR модуля на базе NI USRP 2920 (рис.1-3), а также приемы его программирования в среде LabView .
2. Провести моделирование системы связи с АМ модуляцией в УКВ диапазоне в среде AWR Visual System Simulator (AWR VSS);
3. Создать прототип системы связи с АМ модуляцией, работающей в УКВ диапазоне;
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

### Порядок выполнения работы

Для выполнения расчетной части работы по п. 2 настоящего описания следует запустить на выполнение файл программы Exemp\_3 TK\_System.emp. При работе с программой следовать подсказкам на экране и методическим указаниям [4]. Выполнение п.1 задания на ЛР следует провести в следующей последовательности.

#### Установка и настройка оборудования USRP-2920

Процесс запуска NI USRP-2920 состоит из шагов, перечисленных ниже.

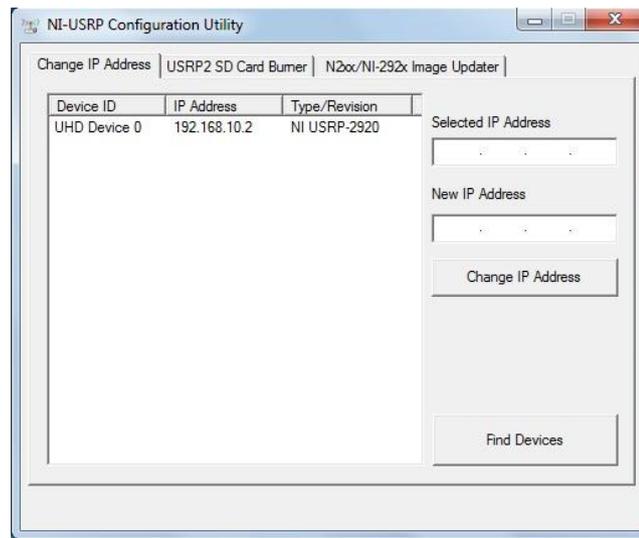


Рис. 2. Интерфейс конфигурирования сетевого соединения

1. Подключите антенну или коаксиальный кабель к передней панели устройства NI USRP-2920.
2. Подключите устройство напрямую к компьютеру с помощью Ethernet кабеля.
3. Подключите к устройству сетевой блок питания.
4. Вставьте источник питания в сетевую розетку.
5. Замените IP-адрес вашего гигабитного Ethernet-порта на статический IP-адрес. National Instruments рекомендует статический IP-адрес 192.168.10.1, т.к. устройство NI USRP-2920 по умолчанию имеет адрес 192.168.10.2.
6. Для того, чтобы открыть утилиту конфигурирования NI-USRP выберите Start » All Programs » National Instruments » NI-USRP » NIUSRP Configuration Utility. В окне утилиты выберите вкладку Change IP Address (Изменить IP-адрес). Ваше устройство должно появиться в списке с левой стороны вкладки, как показано на рис. 2.

#### Конфигурирование передатчика АМ сигнала

Платформа LabVIEW взаимодействует с передатчиком USRP при помощи четырех функций, находящихся в палитре блок-диаграммы в разделе Instruments IO ⇒ Instr Drivers

⇒ NI USRP ⇒ Tx. На рис. 3 показана базовая структура передатчика. Эта структура является исходной для всех лабораторных работ.

Функция **Open Tx Session** инициализирует сессию передатчика и генерирует идентификатор сессии и кластер ошибок, которые передаются через все четыре функции. При использовании этой функции вы должны добавить элемент управления “device names” (имена устройств), посредством которого вы сообщите LabVIEW IP-адрес или имя ресурса USRP.

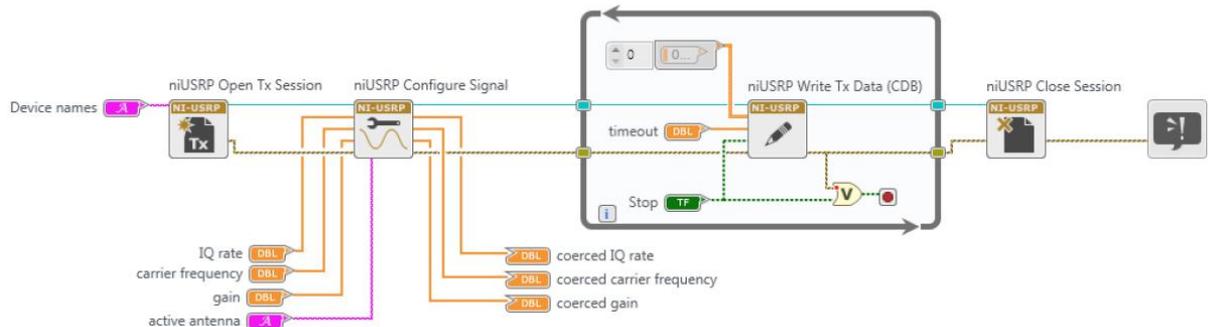


Рис. 3. Шаблон блок-диаграммы передатчика системы связи

Функция **Configure Signal** используется для задания значений параметров USRP. Подключите четыре элемента управления и три индикатора к этой функции, как показано на рисунке. Для начала установите частоту IQ равной 200 кОтсчетов/с (наименьшее возможное значение), несущую частоту равной 1 ГГц, коэффициент усиления равным 0 дБ и выберите в качестве активной антенны TX1. Когда функция выполняется, USRP вернет реальные значения этих параметров. Эти значения отобразятся на подключенных вами индикаторах. Как правило, реальные значения параметров будут совпадать с заданными, однако если значения одного или нескольких заданных параметров лежат за пределами возможностей USRP, вместо сообщения об ошибке будет выбрано ближайшее допустимое значение параметра.

Функция **Write Tx Data** записывает модулирующий сигнал в USRP для передачи. Помещение этой функции в цикл while позволяет циклически посылать блок отсчетов модулирующего сигнала, пока не будет нажата кнопка "stop". Обратите внимание, что цикл while запрограммирован на останов при обнаружении ошибки. Отсчеты модулирующего сигнала могут передаваться в Write Tx Data как массив комплексных чисел или как комплексный сигнал типа waveform.

Функция **Close Session** завершает работу передатчика, как только завершается выполнение цикла while. Обратите внимание, что выполнение функции должно быть остановлено кнопкой STOP, а не кнопкой “Abort Execution” на панели инструментов. Это

необходимо для того, чтобы функция `Close Session` гарантировано выполнялась и корректно закрыла все используемые структуры данных.

В качестве информационного сигнала (сообщения) для передачи по радиоканалу используется музыкальная мелодия, сохраненная в файле `music.wav`, этот файл расположен в папке `Labs`, которая находится на рабочем столе.

Лабораторная работа выполняется двумя подгруппами студентов. Первая из них на своем рабочем месте конфигурирует передатчик АМ сигнала, используя NI USRP 2920. Для конфигурирования передатчика запустите LabView, на рабочем столе в папке `Labs` найдите файл `AM_TX.vi`, откройте его в LabView. На рис. 4 представлена блок-диаграмма АМ передатчика, реализованного в `AM_TX.vi`. Если сравнить шаблон передатчика, описанный выше рис. 3, с АМ передатчиком, реализованным в файле `AM_TX.vi`, то можно видеть, что они отличаются только тем, что в последний добавлен функционал, позволяющий читать `wav` файлы.

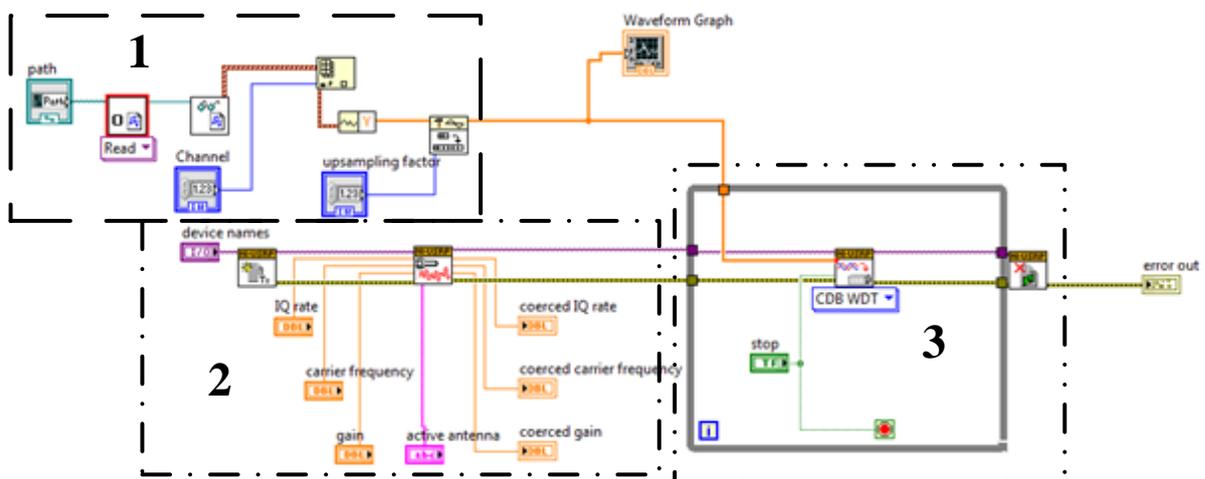


Рис. 4. Блок-диаграмма передатчика системы связи

### Конфигурирование приемника АМ сигнала

Пакет LabVIEW взаимодействует с приемником USRP при помощи шести функций, находящихся в палитре блок-диаграммы в разделе `Instruments IO ⇒ Instr Drivers ⇒ NI USRP ⇒ Rx`. На рис. 5 представлен шаблон SDR приемника NI USRP 2920.

Функция ***Open Rx Session*** инициализирует сессию приемника и генерирует идентификатор сессии и кластер ошибок, которые передаются через все шесть функций. Вы должны добавить элемент управления “`device names`”, посредством которого вы сообщите LabVIEW IP-адрес или имя ресурса USRP.

Функция ***Configure Signal*** выполняет ту же функцию, что соответствующий блок в передатчике. Подключите четыре элемента управления и три индикатора к этой функции,

как показано на рисунке. Установите частоту IQ равной 200 кОтсчетов/с, несущую частоту равной 1ГГц, коэффициент усиления равным 0 дБ и выберите в качестве активной антенны RX2. Когда функция запустится, USRP вернет реальные значения этих параметров.

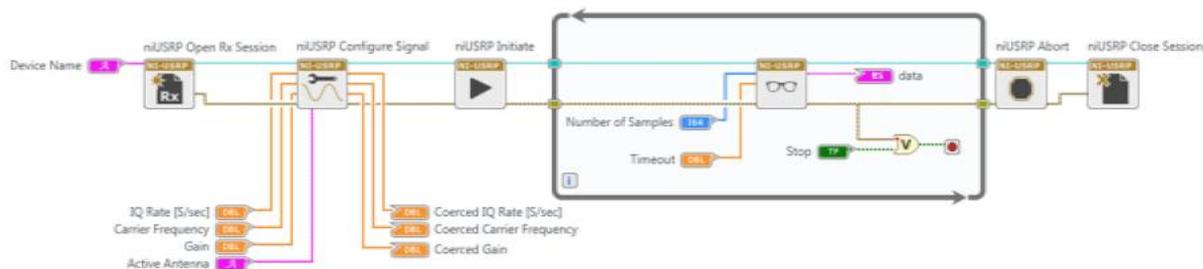


Рис. 5. Блок-диаграмма шаблона приемника системы связи

Функция **Initiate** посылает выбранные вами значения параметров в приемник и запускает его.

Функция **Fetch Rx Data** извлекает отсчеты сообщения, полученные USRP. Помещение этой функции в цикл while позволяет извлекать отсчеты сигнала блоком за блоком, пока не будет нажата кнопка "stop". Обратите внимание, что цикл while запрограммирован на останов при обнаружении ошибки. "number of samples" (Количество отсчетов) позволяет задать количество отсчетов, извлекаемых в каждой итерации цикла while. Функция **Fetch Rx Data** может выдавать отсчеты сообщения пользователю массивом комплексных чисел или комплексным сигналом типа waveform. Вы можете выбрать тип данных отсчетов сообщений из выпадающего меню.

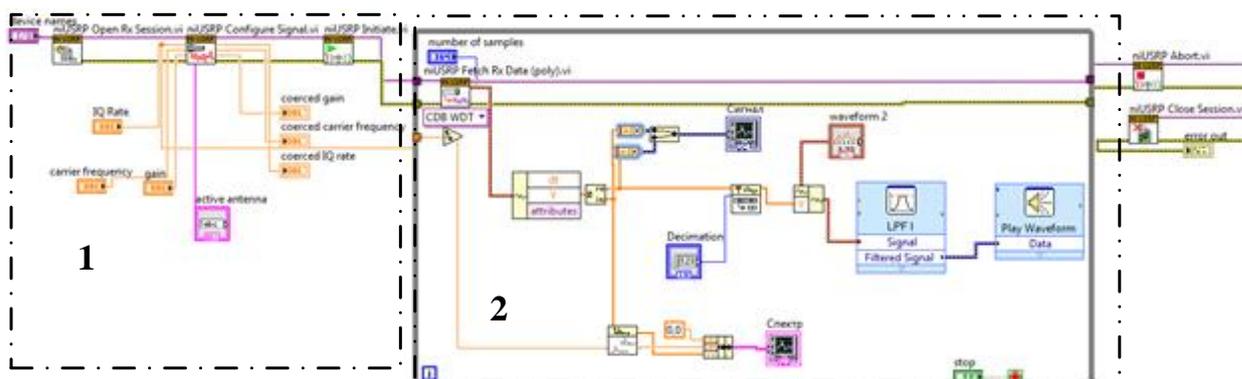


Рис. 6. Блок-диаграмма приемника системы связи

Функция **Abort** останавливает сбор данных по завершении цикла While.

Функция **Close Session** завершает работу приемника. Как отмечено выше, используйте для останова программы кнопку STOP, чтобы функция Close Session гарантированно исполнилась.

Задачей второй подгруппы является прототипирование приемника АМ сигнала. С этой целью следует запустить LabView и открыть файл AM\_RX.vi, расположенный на рабочем столе в папке Labs. На рис. 6 изображена соответствующая блок-диаграмма приемника.

Приемник состоит из двух основных частей. В первой части, как и в передатчике, производится настройка приемника, во второй части организовано циклическое чтение данных из NI USRP 2920. Помимо сигнальных отсчетов из устройства USRP в пользовательский интерфейс LabView циклически поступают также частота ЦАП, а также время формирования пакета с отсчетами. Для извлечения самих данных используется блок, представленный на рисунке 7а, расположенный в Programming ⇒ Waveform.

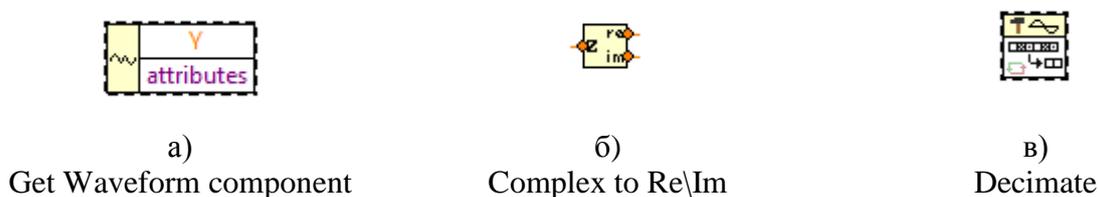


Рис.7. Элементы блок-диаграммы передатчика

Следует подчеркнуть, что каждый сигнальный отсчет в формате «Waveform» представляет собой комплексное число:

$$Z = I + iQ, \quad (1)$$

где  $I$  – синфазная,  $Q$  – квадратурная составляющие сигнала. Для разделения комплексного входного потока отсчетов на синфазную и квадратурную составляющие применяется блок, изображенный на рисунке 7б, расположенный в разделах: Programming ⇒ Numeric ⇒ Complex.

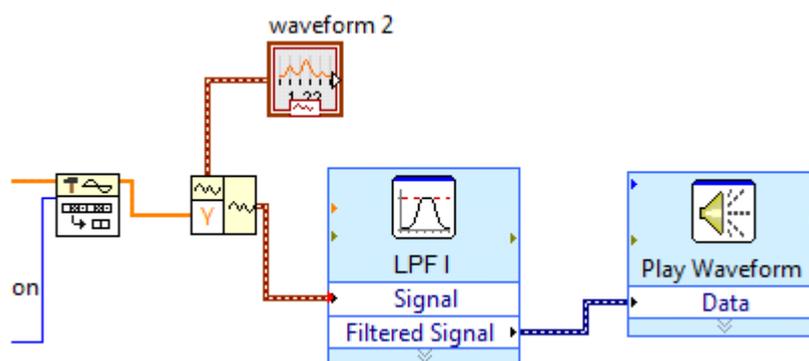


Рис. 8. Блок-диаграммы ФНЧ и вывода аудио сообщения на колонки

При прототипировании системы следует иметь в виду, что минимальная частота дискретизации АЦП USRP лежит в пределах  $2920 - 200 \times 10^3$  отсчетов в секунду, т.е. существенно отличается от максимальной частоты ЦАП звуковой карты  $44,10 \times 10^3$

отсчетов в секунду. Поэтому для воспроизведения принятого сигнала необходима процедура выравнивания скоростей работы АЦП NI USRP и ЦАП звуковой карты. Эту задачу решает блок «Decimate», изображенный на рисунке 7в, производящий прореживание (децимацию) входного потока данных. Блок расположен в разделах: Signal Processing ⇒ Sig Operation.

Перед воспроизведением сформированный таким образом сигнал необходимо очистить от субгармоник с помощью ФНЧ с частотой среза не менее 4 кГц. Для этих целей программа LabView предоставляет широкий выбор цифровых фильтров. Тип фильтра, полоса пропускания и другие параметры задаются в специальной вкладке, появляющейся при двойном клике мышью по пиктограмме фильтра. На рисунке 8 изображен такой фильтр, а также блок, с помощью которого сформированный аудиосигнал выводится на колонки компьютера. Блок располагается по пути: Programming ⇒ Graphic & Sound ⇒ Sound ⇒ Output.

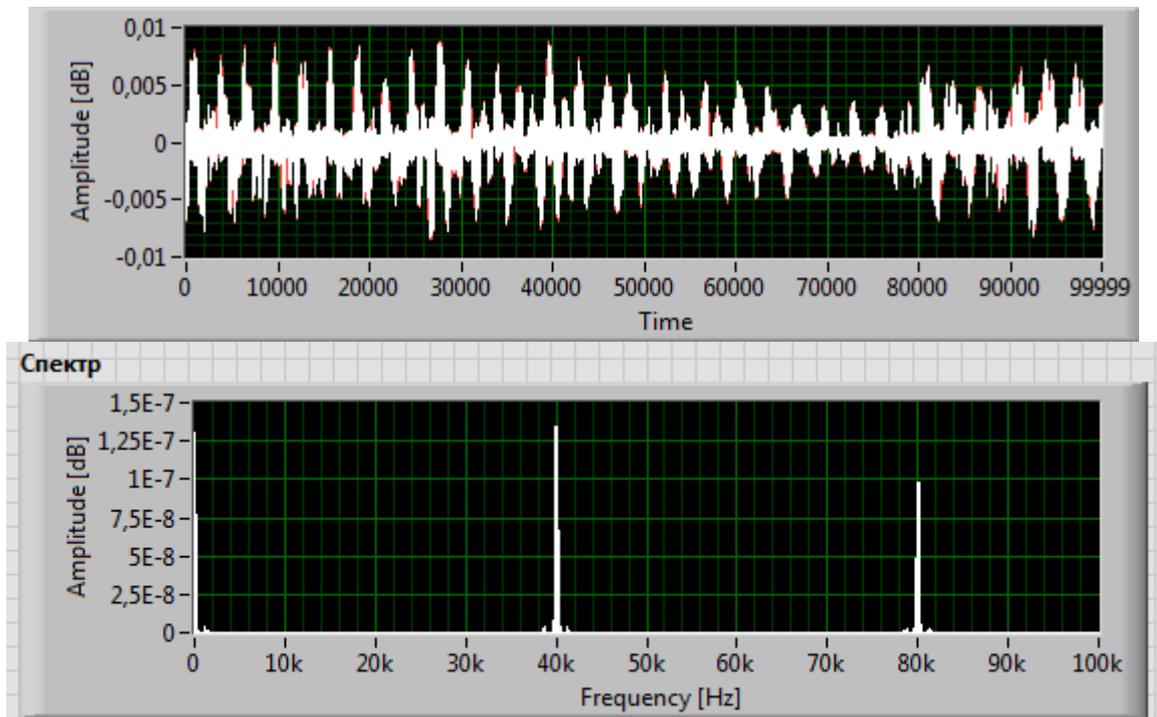


Рис.9. Осциллограммы спектрограммы компонент  $I(t)$ ,  $Q(t)$  принятого АМ-сигнала

Осциллограммы спектрограммы квадратурных компонент  $I(t)$ ,  $Q(t)$  принятого АМ-сигнала показаны на рис.9.

### Последовательность выполнения лабораторного задания

- Подгруппа, прототипирующая системный передатчик, подключает антенну к sma-разъему TX 1, вторая подгруппа, конфигурирующая приемник, подключает антенну к sma-разъему RX 2.
  - ✓ Подключить блок USRP к компьютеру и включить питание;

- ✓ Запустить LabVIEW- интерфейс системы, с помощью которого активировать программы приемника и передатчика.
- Убедится, что настройки передатчика соответствуют следующим установкам:
  - ✓ Несущая частота (Carrier Frequency): 1 ГГц;
  - ✓ Частота IQ (IQ Rate): 200 кГц;
  - ✓ Коэффициент усиления (Gain): 0 дБ;
  - ✓ Активная антенна (Active Antenna): TX1;
  - ✓ Укажите расположение файла music.wav;
- Убедится, что настройки приемника соответствуют следующим установкам:
  - ✓ Несущая частота (Carrier Frequency): 1 ГГц
  - ✓ Частота IQ (IQ Rate): 200 кГц
  - ✓ Коэффициент усиления (Gain): 0 дБ
  - ✓ Активная антенна (Active Antenna): RX2
  - ✓ Количество отсчетов: 1000000 отсчетов - хороший блок данных для работы
  - ✓ Коэффициент децимации - 5
- Запустить сначала передатчик, затем приемник, проконтролировать качественной трансляции системой выбранного аудиофайла «music.wav».
- Составить отчет по лабораторной работе

### **Контрольные вопросы**

1. Программно-определяемые радиосистемы (SDR - software defined radio). Концепция SDR-радиосистем (обработка процессором общего назначения) и ее аппаратная реализация.
2. Структурные схемы SDR приемников и передатчиков.
3. Производительность процессоров общего назначения для SDR задач.

### **Рекомендуемая литература**

1. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. - М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 372 с.
2. Прототипирование программно-определяемых радиосистем с помощью NI LabVIEW// URL: (<http://www.ni.com/pdf/manuals/376358a.pdf>)
3. Руководство NI USRP-2930/2932 Universal Software Radio Peripheral// URL: <http://russia.ni.com/sites/default/files/USRP%20293x%20%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%>

[BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8F.pdf](#).

4. Блэк Б.А. Введение в системы радиосвязи. Лабораторные работы с NI USRP и LabVIEW Communications. NI 326348A-01, 2014. С. 10-12.
5. Федосов, В. П., Нестеренко, А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 456 с.
6. Руководство по Visual System Simulator NI AWR Design Environment v14 Edition ([https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS\\_Getting\\_Started\\_ru.pdf](https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/VSS_Getting_Started_ru.pdf))
7. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
8. Задорин А. С., Кузьменко И.Ю. Устройства приема и обработки дискретных и аналоговых сигналов. Методические указания по выполнению практических работ: учебно-методическое пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 112 с.

### Приложение 1. Аппаратный состав лабораторного макета

Основу лабораторного макета рис.11,12 составляет аппаратура цифровой радиорелейной системы (ЦРРС) «МИК-РЛ Р+» фирмы «Микран», предназначенная для организации радиорелейных линий связи асинхронной и синхронной цифровых иерархий. Ее структурная схема приведена на рис.П1. Аппаратура ЦРРС делится на верхнее - приемопередающие устройства (ППУ) расположенные непосредственно возле антенн (рис.П.1, П2), и нижнее оборудование - модуль доступа (МД), расположенный возле источников питания. Измеритель коэффициента ошибок (ИКО) используется в целях наладки системы, подключается к модулю доступа.

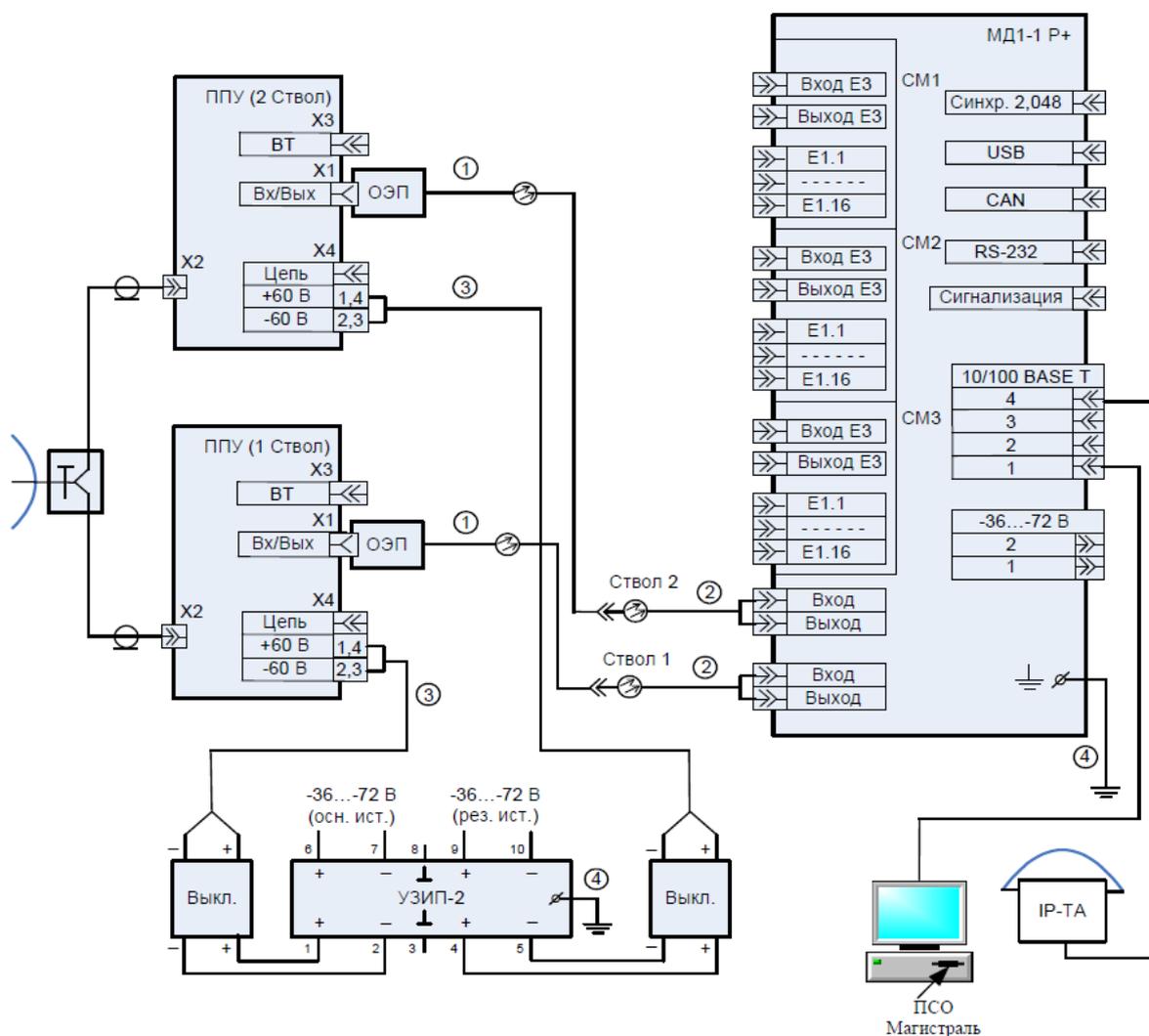


Рис.П1. Схема соединения устройств оконечной РРС

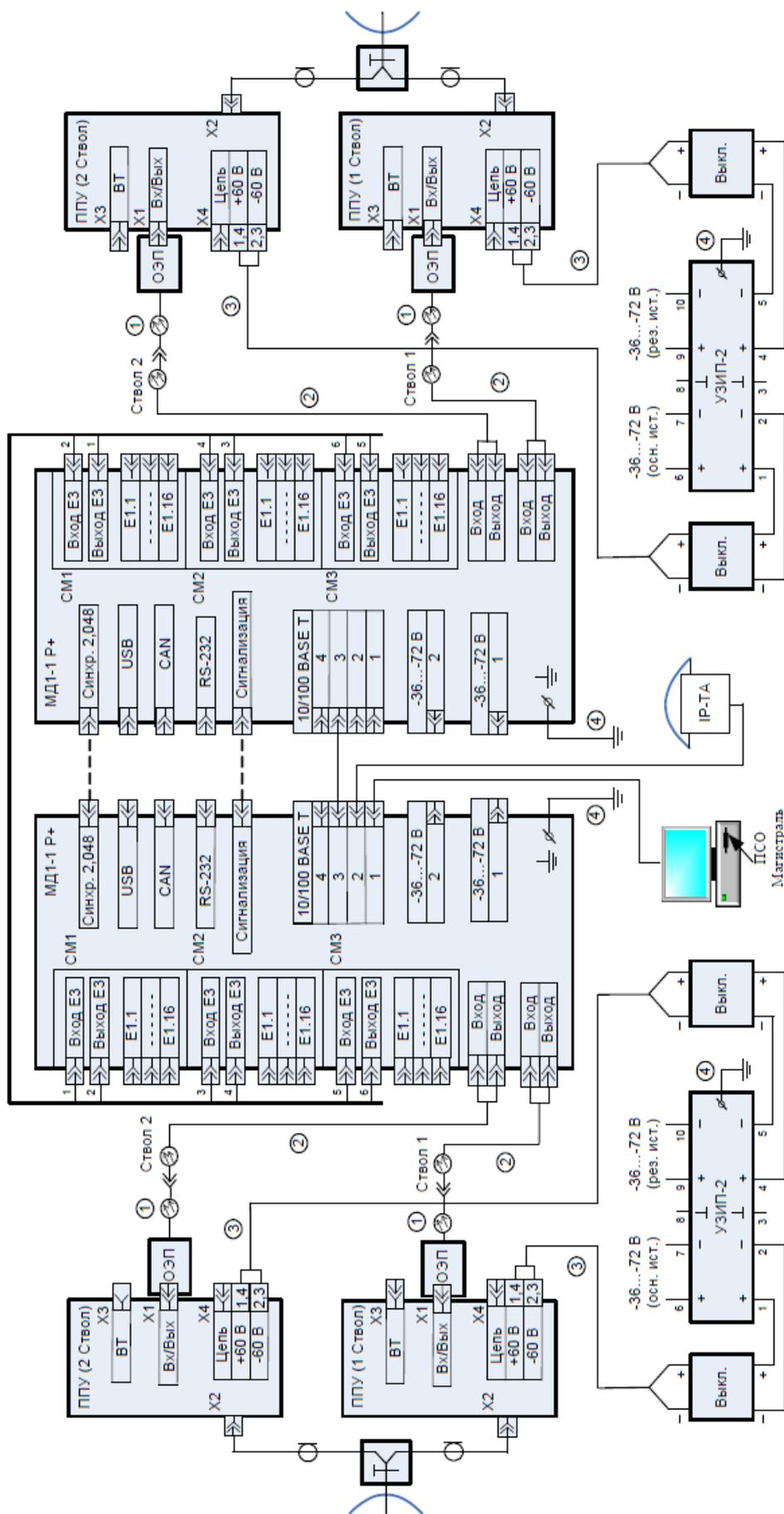


Рис.П2. Схема соединения устройств промежуточной РРС

- Модуль доступа МД1-1 Р+ предназначен для осуществления связи между оборудованием потребителя и ППУ с одновременным мультиплексированием/демультиплексированием трафика, представленного на входных интерфейсах (Е1, Е3, Ethernet) в последовательность, удобную для дальнейшего кодирования в ППУ. Модуль доступа также осуществляет контроль основных параметров и управление всеми функциями как местной, так и удаленных станций, путем замешивания управляющих бит информации в основной поток.

- Модуль ИКО-155Е предназначен для измерения параметров первичного, вторичного, третичного сетевых стыков радиорелейной аппаратуры семейства МИК РЛ, а также канала Ethernet.

- Модуль ППУ предназначено для преобразования цифрового потока от модуля доступа в радиосигнал в определенном диапазоне частот. В состав ППУ входит модем. Модем позволяет программными методами менять вид модуляции, ширину занимаемого спектра из набора 1,75; 3,5; 7; 14; 28 МГц и, соответственно, скорость передачи информации - от Е1 до Е3. Выбор требуемой комбинации осуществляется с помощью программы управления «Мастер 3.0».

- Для осуществления мониторинга и управления радиорелейными станциями МИК-РЛ Р+ используется система технической эксплуатации (СТЭ) «Мастер 3.0».

Программа снабжена графическим интерфейсом, разработанный для платформы MS Windows.

Поддержка протокола управления осуществляется за счёт организации управляющего канала, работающего независимо от основного потока передачи данных.

Адресация и работа в соответствии с требованиями, предъявляемыми к протоколу TCP/IP, позволяет интегрировать оборудование МИК-РЛ Р+ в существующие системы мониторинга и управления. Подключение СТЭ и вход в сеть управления возможен с любой входящей в эту сеть станции.

### **Рекомендуемая литература**

1. Аппаратура цифровых радиорелейных станций «МИК-РЛ Р+». Руководство по эксплуатации. ЖНКЮ.464429.028 РЭ// ООО НПФ «Микран». Томск 2007г. -50с.