

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский технический университет связи и информатики»

---

Кафедра радиооборудования и схемотехники

Практикум

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ СВЯЗИ С КВАДРАТУРНОЙ МОДУЛЯ-  
ЦИЕЙ

МОСКВА 2016

## **ПРАКТИКУМ**

Исследование систем связи с квадратурной модуляцией

Составители: Т.П. Косичкина к.т.н., доц., С.Ф.Горгадзе, д.т.н., проф.

Издание утверждено советом факультета РиТ протокол №7 от 15.03.2016г.

Рецензент: Р.Ю.Иванюшкин, к.т.н., доц. каф. РОС

<b>ВНИМАНИЕ!!!</b>	<b>СОБЛЮДЕНИЕ</b>	<b>ДЕЙСТВУЮЩИХ</b>	<b>В</b>
<b>ЛАБОРАТОРИЯХ</b>	<b>РПДУ</b>	<b>МТУСИ</b>	<b>ПРАВИЛ</b>
<b>ОБЯЗАТЕЛЬНО!!!</b>			<b>БЕЗОПАСНОСТИ</b>

## I. ВВЕДЕНИЕ

Действующие в учебных лабораториях РПДУ МТУСИ Правила безопасности студенты изучают на первом занятии в лаборатории при вводном инструктаже. Работать в лаборатории без изучения этих правил и соответствующего оформления *запрещается!!!* Требуется строжайшая *сознательная* дисциплина, как общая, так и в части соблюдения правил безопасности.

В состав практикума входит лабораторная работа №59 (части 1 и 2), которая относится к общему циклу лабораторных работ, выполняемых при изучении дисциплин: «Радиопередающие устройства», «Основы генерирования и формирования радиосигналов», «Устройства генерирования и формирования радиосигналов», «Радиоприемные устройства», «Основы построения оборудования для телерадиовещания» и т.п. Они входят в перечень дисциплин направлений «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профили подготовки «Системы мобильной связи», «Цифровое телерадиовещание», «Системы радиосвязи и радиодоступа»), «Радиотехника» (профиль подготовки «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов»), а также специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Количество лабораторных работ и порядок их выполнения определяется графиком лабораторных занятий, который составляется в соответствии с действующей учебной программой и вывешивается не позднее, чем на неделю, предшествующей началу занятий в лаборатории.

К очередной лабораторной работе допускаются студенты, продемонстрировавшие должную степень подготовки и успешно защитившие предшествующие лабораторные работы.

## II. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Учебный лабораторный стенд «Устройства генерирования и формирования сигналов» разработан Центром «Учебная техника в телекоммуникациях» при Санкт-Петербургском Государственном Университете Телекоммуникаций им проф. М.А. Бонч-Бруевича при участии кафедры Радиопередающих устройств МТУСИ. Лабораторный стенд содержит комплекс измерительной аппаратуры и сменные блоки - макеты, позволяющие выполнять несколько лабораторных работ.

Лицевая сторона установки имеет три панели, две из которых (левая и правая) являются стационарными и содержат набор измерительных приборов. Средняя панель вместе с установленными на ней элементами и платами (именуемая сменным блоком) является съемной и представляет собой лабораторный макет, соответствующий определенной лабораторной работе. Содер-

жание выполняемой лабораторной работы определяется видом установленного сменного блока.

Описание левой и правой панелей лабораторного стенда, а также измерительных приборов, встроенных в стенд, приводятся в основных методических указаниях (Часть 3-я лабораторного практикума [6]).

Для проведения лабораторных работ необходимы внешние измерительные приборы: осциллограф ОСУ-2 или аналогичный; радиочастотный вольтметр ВЗ-39 или аналогичный.

**ВНИМАНИЕ:** для выполнения лабораторной работы № 59 в лабораторный стенд должен быть установлен сменный блок **«Исследование систем связи с квадратурной модуляцией»!**

### III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА (СМЕННОГО БЛОКА)

Сменный блок «Исследование системы связи с квадратурной модуляцией» состоит из двух частей – квадратурного модулятора и квадратурного демодулятора. Внешний вид макета с изображенной на нем структурной схемой приемного и передающего тракта изображен на рис. 1.

На передней панели макета расположены разъемы для подключения контрольно-измерительной аппаратуры, органы управления:

«Источник кодовой последовательности»,

ручка регулировки «Уровень шума»,

«Блок контроля ошибок».

Общая часть для обеих лабораторных работ «Источник кодовой последовательности» содержит три панели: «Постоянная», «Случайная» и «Периодическая». При работе панели «Постоянная» формируется определенная последовательность из 4 информационных бит. Нажатием кнопок на этой панели можно менять эту последовательность, перебирая все возможные сочетания из 4 бинарных информационных символов.

При включении панели «Случайная» случайным образом формируются блоки по 4 информационных бита, что имитирует передачу потока информационных бит на вход модуляционного устройства.

Панель «Периодическая» обеспечивает формирование 4 блоков по 4 бинарных информационных бита. Эти 4 блока затем периодически повторяются. Повторным нажатием управляющей кнопки можно изменить последовательности информационных бит в блоках.

**В первой части** лабораторной работы «Изучение квадратурного модулятора цифровых радиоканалов» используются следующие части сменного блока «Исследование систем связи с квадратурной модуляцией»: «Источник кодовой последовательности», «Формирователь квадратурных компонентов», «Модулятор», «Контроль выхода», «Генератор шума».

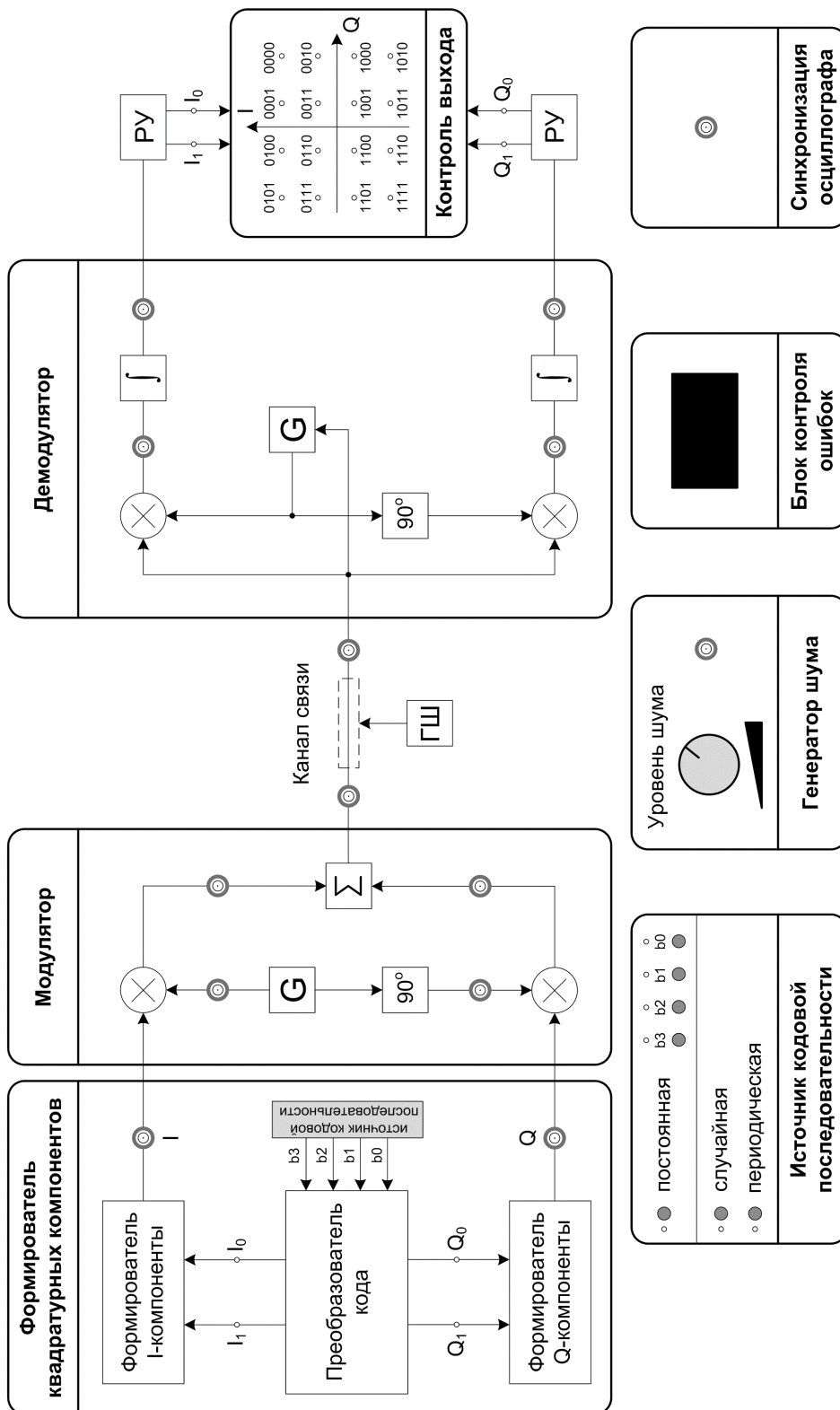


Рис. 1. Внешний вид макета приемопередающего тракта системы связи с квадратурной модуляцией

Часть «Формирователь квадратурных компонентов» представляет собой сигнальный кодер, включающий обычно расширители импульсов, транскодер, цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). На соответствующей панели они названы как «Преобразователь кода», «Формирователь I-компоненты» и «Формирователь Q-компоненты». С выходов I и Q этой части сменного блока следуют модулирующие сигналы квадратурных каналов, предназначенные для формирования канальных сигналов.

Часть «Модулятор» включает источник модулируемого гармонического сигнала  $G$ , подаваемого на вход перемножителя I-канала непосредственно, а на перемножитель Q-канала – через фазовращатель на  $90^\circ$ . Канальные символы (сигналы) формируются с использованием высокочастотного сумматора  $\Sigma$ .

Часть «Контроль выхода» позволяет контролировать переданные последовательности информационных бит при отсутствии шума в канале связи, что обеспечивается установкой ручки «Уровень шума» на панели «Генератор шума» в крайнее левое положение. Эта часть сменного блока («Контроль выхода») фактически отражает сигнальное созвездие задействованных канальных сигналов, пронумерованных с помощью бинарного 4-разрядного кода, повторяющего последовательности бинарных информационных бит, использованных при формировании каждого канального сигнала.

**Вторая часть** работы посвящена исследованию принципов работы демодулятора, который состоит из следующих основных блоков: «Смеситель», «Интегратор», «Решающее устройство». Входным сигналом для демодулятора является сигнал, формируемый первой частью лабораторного макета (модулятора).

Макет позволяет подавать на вход модулятора различные типы входных последовательностей, состоящих из нулей и единиц. Выбор последовательности осуществляется с помощью кнопок блока «Источник кодовой последовательности». При нажатии кнопки «Случайная» на вход модулятора подается последовательность нулей и единиц, сформированная генератором случайных чисел. Постоянная последовательность, состоящая из четырех периодически повторяющихся бит, устанавливается с помощью кнопки «Постоянная» и четырех кнопок (b0 b1 b2 b3). Значения кода, подаваемого на вход модулятора, контролируются с помощью четырех светодиодов, расположенных над указанными кнопками. При этом b0 соответствует младшему разряду кода, b3 - старшему. При нажатии кнопки «Периодическая» на вход модулятора поступает последовательность из 16 бит (4 символа по 4 бита). С помощью последовательного нажатия кнопки «Периодическая» можно получить 12 различных комбинаций из 4 символов. Последующие два нажатия на эту кнопку приводят к появлению 12-символьной и 16-символьной комбинации соответственно.

Преобразователь кода разделяет заданную последовательность на два потока, один из которых поступает в синфазный (I), а другой - в квадратурный (Q) каналы модулятора. В модуляторе цифровые коды входного сигнала и

опорного колебания перемножаются, и суммируются, сумма подается в канал связи.

На вход демодулятора может подаваться как неискаженный сигнал, так и сигнал, прошедший через канал связи. В данном случае используется простейшая модель канала: с аддитивным белым гауссовским шумом. Шум формируется с помощью генератора, ручка регулятора позволяет изменять уровень шума.

С выхода канала связи сигнал поступает на смесители, в качестве которых используются два синхронных детектора. На другой вход смесителей подается сигнал от гетеродина (встроенного автогенератора). Причем на смеситель нижнего (квадратурного) канала сигнал гетеродина подается сдвинутым на  $90^\circ$  относительно верхнего (синфазного) канала. После смесителей сигнал каждого из каналов подается на интегратор, в качестве интеграторов используются фильтры нижних частот (ФНЧ).

Для контроля соответствия выходного кода входному, заданному с помощью соответствующих кнопок, справа на макете расположен блок индикации «Контроль выхода», на котором с помощью светодиодов имитируется сигнальное созвездие. Каждый светодиод соответствует одному символу, состоящему из четырех бит. Также с помощью светодиодов контролируются биты в синфазном и квадратурном каналах модулятора и демодулятора (I0, I1, Q0, Q1). При установке последовательности контроль выхода целесообразно проводить в отсутствии шума (ручка «уровень шума» повернута против часовой стрелки до упора).

Блок «Контроль ошибок» служит для определения относительного числа появления ошибочных символов в демодулируемом сообщении.

К исследуемому макету коаксиальными кабелями подключают контрольно-измерительную аппаратуру. Контроль частоты гетеродина осуществляют частотомером, размещенным на правой панели лабораторной установки. Напряжение сигнала и шума измеряют милливольтметром типа ВЗ-38 или подобным.

# ЧАСТЬ 1. «ИЗУЧЕНИЕ КВАДРАТУРНОГО МОДУЛЯТОРА ЦИФРОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ»

## 1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить методы формирования сигналов цифровых радиоканалов, основанные на использовании прямой модуляции несущей частоты в квадратурном модуляторе и экспериментально исследовать параметры модулированных сигналов в каналах и на выходе устройства модуляции.

## 1.2. ВОПРОСЫ ДИСЦИПЛИНЫ ИЗУЧАЕМЫЕ ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ РАБОТЫ

1. Способы представления гармонических сигналов как действительных функций и в комплексном виде. Изображение сигналов на плоскости в декартовых координатах. Геометрическая трактовка сигналов и их представление в полярных координатах.
2. Аналитическое описание радиосигнала, понятие его действительной и комплексной огибающей. Представление в полярных координатах.
3. Евклидово расстояние между сигналами, заданными в непрерывной и дискретной форме. Скалярное произведение сигналов.
4. Критерии выбора сигналов для их использования при передаче информации. Построение ансамблей сигналов. Сигнальное созвездие. Фазовые переходы.
5. Понятие цифровой модуляции (манипуляции). Аналитическое описание сигнала при фазовой модуляции и его разложение на синусную и косинусную составляющие. Понятие комплексного бита. I- Q- компоненты.
6. Аналитическое описание и разложение на синфазную и квадратурную составляющие сигналов при квадратурной фазовой модуляции (ФМ-2, ФМ-4, относительная ФМ-4, ФМ-8 с упаковкой сигнального созвездия по кругу, MSK, GMSK). Структурные схемы квадратурных модуляторов.
7. Комбинированная квадратурная амплитудная модуляция (КАМ). Способы нумерации точек сигнального созвездия. Ансамбли с косыми сигнальными созвездиями.

Ссылки на рекомендуемую литературу для самоподготовки приведены ниже в методических указаниях.

## 1.3. ЗАДАНИЕ

### 1.3.1. ПРИ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКЕ:

1. Изучить способы цифровой модуляции (манипуляции) несущей частоты в цифровых радиоканалах; рассмотреть аналитическое описание и разложение на синфазную и квадратурную составляющие следующих типов сигналов: ФМ-2, ФМ-4,



относительной ФМ-4, ФМ-8, МСК, гауссовской МСК, КАМ-8, КАМ-16, КАМ-64.

2. Изучить способ описания этих сигналов в виде сигнальных созвездий. Рассмотреть варианты с различными способами упаковки и нумерации элементов созвездий для вышеперечисленных типов сигналов (в виде квадрата, по кругу, косые варианты).
3. Изучить принципы построения квадратурного модулятора цифровых радиоканалов, а также назначение элементов его функциональной схемы.

#### 1.3.2. ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ:

1. Экспериментально исследовать уровни модулирующих сигналов в квадратурных каналах (I- Q-каналах) модулятора и их взаимосвязь с последовательностями информационных бит.
2. Изучить модулируемые сигналы квадратурных каналов модулятора и убедиться, что сдвиг фаз сигналов составляет  $90^\circ$ .
3. Измерить фазовые сдвиги сигналов I-канала (или Q-канала) и сигнала на выходе модулятора при всех возможных сочетаниях последовательностей информационных бит каждый раз для одного канального сигнала.
4. Пронаблюдать и зарисовать эпюры составляющих квадратурных каналов и сформированного сигнала для ряда (не менее 8) сочетаний информационных бит.
5. Пронаблюдать и зарисовать эпюры сигналов на выходе модулятора при последовательной передаче ряда канальных сигналов. Пронаблюдать и зарисовать соответствующие сигнальные созвездия.

### 1.4. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### **Подготовка установки к работе**

1. Включить установку, осциллограф и вольтметр.
2. Установить ручку «Уровень шума» на панели «Генератор шума» в крайнее левое положение.

#### **1.4.1. Измерение уровней модулирующих сигналов в квадратурных каналах**

1. Измерение уровней напряжений модулирующих сигналов провести с использованием осциллографа. Прежде всего, необходимо зафиксировать нулевые уровни отсчета напряжений каналов. С этой целью следует заземлить входы «X1» и «X2» двухлучевого осциллографа переводом переключателей, расположенных над ними, в положение GND. Затем с использованием регуляторов « $\updownarrow$ » добиться положений лучей «X1» и «X2» на экране ос-

циллографа, удобных для проведения измерений. Зарисовать в тетради координатную сетку на экране осциллографа, отметив на ней положения лучей. Перевести переключатели над входами «X1» и «X2» в положение DC.

2. Соединить выходы «Формирователь I-компоненты» и «Формирователь Q-компоненты» части «Формирователь квадратурных компонентов» сменного блока с входами «X1» и «X2» осциллографа соответственно. На съемном блоке включить панель «Постоянная». Последовательно выставляя на этой панели все возможные сочетания информационных бит 0001, 0010, 0011 и т. д., для каждой из них измерить уровни напряжений I-и Q-компонент при помощи осциллографа, одновременно анализируя структуру сигнального созвездия на панели «Контроль выхода» съемного блока. Результаты измерений занести в Таблицу 1.1, образец которой приводится ниже. Результаты представить в виде  $A \pm B$ , где  $A$  – результат измерения,  $B$  – погрешность измерения напряжения при помощи осциллографа, которая согласно [9] составляет приблизительно 6%. Для каждого сочетания информационных бит зарисовать положение светящейся позиции на панели «Контроль выхода».

Таблица 1.1. Уровни модулирующих сигналов в квадратурных каналах

Последовательность информационных бит	0001	0010	0011	...
Уровень модулирующего сигнала I-канала (В)				
Уровень модулирующего сигнала Q-канала (В)				
Положение сигнальной точки				

#### **1.4.2. Исследование модулируемых сигналов квадратурных составляющих**

1. Измерить сдвиг фаз модулируемых сигналов каналов с использованием пилообразной (непрерывной) развертки осциллографа. С этой целью на вход «X1» подать сигнал с выхода генератора **G** панели «Модулятор», а на вход «X2» - с выхода фазовращателя этой панели. С помощью регуляторов « $\updownarrow$ » осциллографа совместить сигналы лучей на экране. Измерить сдвиг фаз этих сигналов с использованием методики, проиллюстрированной ниже. Учитывая, что погрешность такого измерения составляет  $\pm$

10%, записать результат в виде:  $\varphi = \varphi_0 \pm \Delta\varphi$ . Перерисовать эюры напряжений модулируемых сигналов с экрана осциллографа в тетрадь.

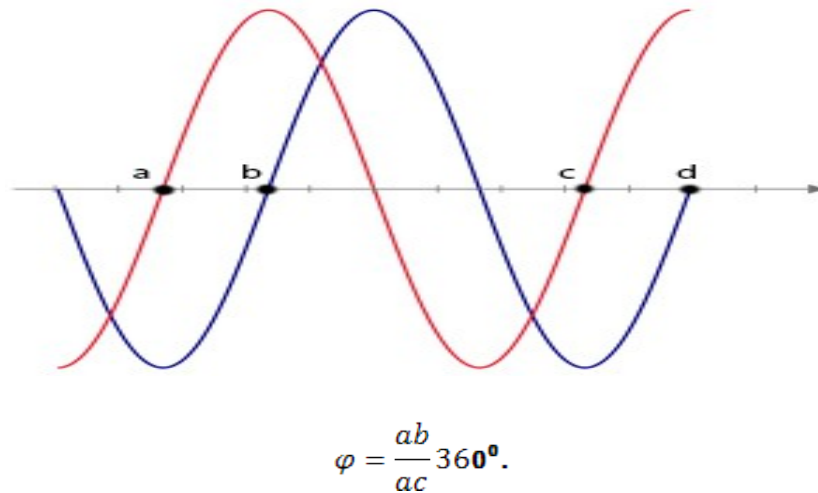


Рис. 2. Методика измерения сдвига фаз между модулируемыми сигналами квадратурных каналов.

2. Измерить сдвиг фаз модулируемых сигналов квадратурных каналов с использованием эллиптической развертки осциллографа. Она включается регулятором частоты сигнала развертки при его переводе в крайнее правое положение. При этом входы «X1» и «X2» осциллографа становятся входами «X» и «Y». Регулировкой усиления каналов «X» и «Y» осциллографа добиться изображения идеальной окружности на экране. Сделать вывод о сдвиге фаз сигналов, поданных на входы «X» и «Y» осциллографа.
3. Измерить напряжения модулируемых сигналов квадратурных каналов модулятора с помощью вольтметра. Результат измерений отметить на зарисованных эюрах.

#### **1.4.3. Измерение уровней модулированных сигналов квадратурных составляющих и уровня канального сигнала**

1. На съемном блоке включить панель «Постоянная». Последовательно выставляя на этой панели все возможные сочетания информационных бит 0001, 0010, 0011 и т. д., для каждой из них измерить уровни напряжений модулированных сигналов I-и Q-каналов на входах сумматора  $\Sigma$  части «Модулятор» сменного блока с помощью вольтметра. Аналогичные измерения провести для канальных сигналов на выходе этого сумматора. Результаты измерений занести в Таблицу 1.2.

Таблица 1.2. Уровни модулированных сигналов квадратурных составляющих и уровень канального сигнала

Последовательность информационных бит	0001	0010	0011	...
Уровень модулированного сигнала I-канала (В)				
Уровень модулированного сигнала Q-канала (В)				
Уровень канального сигнала (В)				

#### 1.4.4. Исследование фазовых структур канальных сигналов

Фазовые структуры канальных сигналов исследовать, измеряя сдвиги фаз  $\varphi$  между сигналом генератора **G** панели «Модулятор» и канальным сигналом с использованием эллиптической развертки осциллографа. С этой целью на вход «X» осциллографа подать сигнал с выхода генератора **G**, а на вход «Y» - с выхода сумматора  $\Sigma$  части «Модулятор» сменного блока. На съемном блоке включить панель «Постоянная». Последовательно выставляя на этой панели все возможные сочетания информационных бит 0001, 0010, 0011 и т. д., провести измерения по методике, проиллюстрированной ниже. Результаты измерений занести в Таблицу 1.3.

Таблица 1.3. Сдвиг фаз для различных сочетаний информационных бит

Последовательность информационных бит	0001	0010	0011	...
$\varphi$				

#### Измерение сдвига фаз с помощью эллиптической развертки осциллографа

Регулируя усиления в каналах «X» и «Y» осциллографа, обеспечить выполнение равенства:  $X=Y$  (см. обозначения на рисунке). Значение  $\varphi$  рассчитать по формуле:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{A}{B}; \quad \varphi = 2\operatorname{arctg}\left(\frac{A}{B}\right).$$

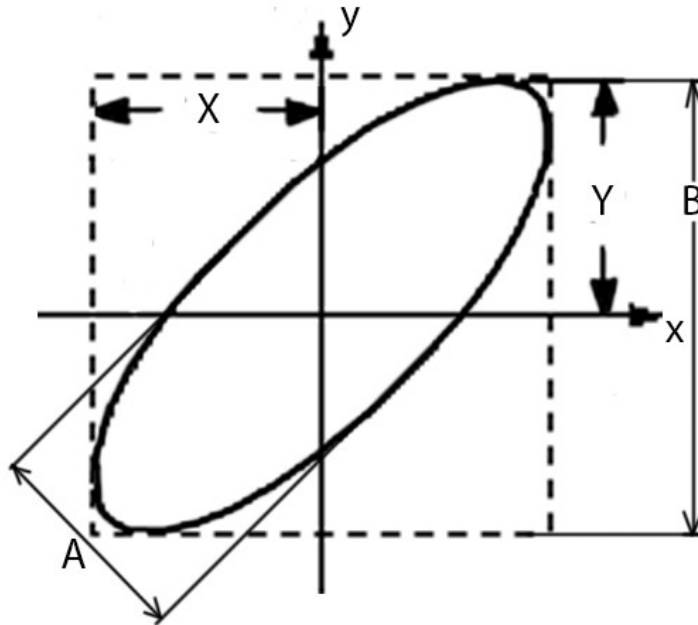


Рис.3. Методика измерения сдвига фаз с помощью эллиптической развертки осциллографа

Ошибки измерений могут возникать из-за неодинаковости фазовых характеристик усилителей каналов «X» и «Y» осциллографа. С целью регулировки измерительной схемы одно из исследуемых напряжений подают на вход «Y», а на вход «X» подают его же, но через фазовращатель. Затем с помощью фазовращателя компенсируют фазовый сдвиг каналов осциллографа, добиваясь на его экране появления наклонной прямой линии. В дальнейшем другое исследуемое напряжение подают на вход «X» через фазовращатель, сдвиг фазы которого не меняют.

Способ эллиптической развертки не позволяет однозначно измерить фазовый сдвиг. Когда оси эллипса совпадают с осями координат, фазовый сдвиг  $\varphi$  равен  $90^\circ$  или  $270^\circ$ . Если большая ось находится в 1-ом и третьем квадрантах, то  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  или  $270^\circ < \varphi < 360^\circ$ ; если во втором и четвертом, то  $90^\circ < \varphi < 180^\circ$  или  $180^\circ < \varphi < 270^\circ$ . Для устранения неоднозначности следует ввести дополнительный сдвиг фаз на  $90^\circ$ , для чего вместо сигнала с выхода генератора G панели «Модулятор» подать на вход «X» осциллографа сигнал с выхода фазовращателя на  $90^\circ$  этой панели. Например, допустим, что при измерении  $\varphi$  выяснилось, что его значение составляет  $30^\circ$  или  $330^\circ$ . Для устранения неоднозначности измерения на вход «X» осциллографа подать сигнал с выхода фазовращателя панели «Модулятор». Если осциллограмма осталась в прежних квадрантах, то

$\varphi = 330^\circ$ . Если осциллограмма переместилась во второй и четвертый квадранты, то  $\varphi = 30^\circ$ .

#### **1.4.5. Наблюдение канальных сигналов и сигнальных созвездий**

1. На сменном блоке включить панель «Периодическая». С помощью пилообразной развертки осциллографа наблюдать его экране канальный сигнал на выходе осциллографа, для чего к его входу «X1» подключить сигнал с выхода сумматора  $\Sigma$  части «Модулятор» сменного блока. Зарисовать соответствующую эппюру с экрана осциллографа в тетрадь. Зарисовать соответствующее сигнальное созвездие с панели «Контроль выхода» сменного блока.
2. Включить эллиптическую развертку осциллографа. На вход «X» подать сигнал с выхода сумматора  $\Sigma$  панели «Модулятор», а на вход «Y» подать сигнал с выхода  $G$  этой панели. Наблюдать и зарисовать в тетради результирующую интерференционную фигуру на экране осциллографа.
3. Повторным включением панели «Периодическая» перебрать последовательно все возможные сочетания периодических блоков бинарных информационных символов. Для каждой периодической последовательности блоков провести исследования, описанные в п.п. 1 и 2 настоящего раздела лабораторной работы.
4. Включить панель «Случайная» сменного блока. Наблюдать сигнальное созвездие на панели «Контроль выхода» сменного блока.

### **1.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) Цель работы;
- 2) Схему лабораторной установки (сменного блока);
- 3) Структурные схемы экспериментов (с указанием подключения измерительной аппаратуры), соответствующие разделам 1.4.1... 1.4.5. описания лабораторной работы;
- 4) По каждому разделу описания необходимо привести заполненные таблицы и (или) рисунки, соответствующие данному разделу;
- 5) Обобщающий вывод о результатах проведенных исследований.

### **1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Приведите аналитическое выражение, описывающее узкополосный детерминированный сигнал. Что называют действительной огибающей, комплексной огибающей и фазой высокочастотного сигнала? Как такой сигнал представляют в декартовых и полярных

- координатах.
2. Что называют евклидовым расстоянием между сигналами? А скалярным произведением сигналов?
  3. В соответствии с какими критериями выбирают ансамбли сигналов для передачи цифровой информации в радиоканалах? Что называют ансамблем сигналов?
  4. Что называют сигнальным созвездием? А фазовыми переходами внутри созвездия? Какие требования предъявляют к динамике фазовых переходов в радиоканалах современных систем цифровой связи и почему?
  5. Дайте определение модуляции применительно к цифровому радиоканалу. Что называют информационным битом, а что комплексным битом? Что собой представляет каналный сигнал?
  6. Что называют сигнальным кодером. Из каких составных частей он состоит?
  7. Дайте определение двоичной, квадратурной и смещенной квадратурной модуляции. Зарисуйте соответствующие сигнальные созвездия с обозначением фазовых переходов. Представьте разложение сигналов на квадратурные составляющие. Зарисуйте структурные схемы устройств формирования сигналов.
  8. Что представляет собой ММС (в англоязычной литературе MSK)-сигнал, а ГММС (GMSK)-сигнал? Проведите сравнение этих сигналов, а также сигналов с двоичной, квадратурной и смещенной квадратурной модуляцией по совокупности критериев, представляющихся вам значимыми для современных цифровых систем связи.
  9. Представьте ГММС (GMSK)-сигнал в виде суммы квадратурных составляющих. Зарисуйте структурную схему устройства формирования таких сигналов.
  10. Что представляет собой квадратурная амплитудная модуляция (КАМ)? В чем ее преимущества и недостатки, по сравнению с видами модуляции, перечисленными (упомянутыми) в вопросе 8.
  11. Нарисуйте типичные сигнальные созвездия для КАМ-8 и КАМ-16. Как совокупность точек сигнальных созвездий в этих случаях может быть описана с использованием матрицы.
  12. Зарисуйте структурную схему устройства формирования КАМ-сигналов.

## ЧАСТЬ 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ КВАДРАТУРНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА.

### 2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной лабораторной работы является изучение принципа работы и структурной схемы квадратурного демодулятора, а также эксперименталь-

ное исследование зависимости коэффициента ошибок демодуляции от отношения сигнал-шум в канале.

## 2.2. ВОПРОСЫ ДИСЦИПЛИНЫ ИЗУЧАЕМЫЕ ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ РАБОТЫ

1. Структуры радиоприемных устройств приемников сигналов цифрового телерадиовещания.

2. Способы представления квадратурных составляющих сигнала при цифровой обработке. Метод комплексных огибающих.

3. Методы демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ).

3. Структуры демодуляторов, реализующих оптимальный в смысле минимальной средней вероятности ошибки прием сигналов с КАМ при воздействии аддитивного белого гауссовского шума. Корреляционный демодулятор.

4. Помехоустойчивость систем связи с различными видами модуляции. Помехоустойчивость сигналов с КАМ с различной кратностью модуляции

## 2.3. ЗАДАНИЕ

### 2.3.1. ПРИ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКЕ

1. С помощью указанной литературы изучить принцип работы квадратурных приемников (демодуляторов). Зарисовать структурную схему когерентного квадратурного демодулятора.

2. Изучить характеристики корреляционного демодулятора, зарисовать теоретическую зависимость вероятности ошибки на символ от отношения сигнал-шум для способа модуляции 16-КАМ.

3. Ознакомиться с устройством лабораторного макета.

4. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

### 2.3.2. ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ

1. Наблюдать и зарисовать осциллограммы сигнала на выходе канала связи при отсутствии шума для трех вариантов последовательностей (в соответствии с вариантом задания), подаваемых на вход модулятора.

2. Наблюдать и зарисовать осциллограммы сигнала в различных точках исследуемого радиоприемного тракта для заданных вариантов последовательностей (в соответствии с вариантом задания), подаваемых на вход модулятора.

3. Провести экспериментальные измерения коэффициента ошибок при различных отношениях мощностей сигнала и шума для заданных вариантов последовательностей (в соответствии с вариантом задания), подаваемых на вход модулятора.



## 2.4. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Подготовка лабораторной установки к работе

**ВНИМАНИЕ:** Включать аппаратуру и приступать к экспериментальной работе можно только после получения разрешения преподавателя, ведущего занятия!

#### 2.4.1. Скоммутировать всю необходимую измерительную аппаратуру

Перед началом выполнения экспериментальной части лабораторной работы требуется обеспечить коммутацию лабораторного стенда и другой необходимой измерительной аппаратуры. Выход «синхронизация» осциллографа подключается к гнезду макета «синхронизация осциллографа» на весь период проведения измерений.

Кабель, подключаемый на вход осциллографа последовательно подсоединяется ко всем контрольным точкам макета для наблюдения осциллограмм в указанных местах структурной схемы.

#### 2.4.2. Включить и подготовить к работе всю необходимую аппаратуру

- Включить лабораторный стенд (тумблер расположен в правом нижнем углу макета).

- Включить осциллограф (расположен на полке сверху лабораторного стенда).

#### 2.4.3. Выполнение экспериментальных пунктов задания

1) Наблюдать и зарисовать осциллограммы сигнала на выходе канала связи при отсутствии шума для трех вариантов последовательностей, подаваемых на вход модулятора.

- Подключить вход  $Y$  осциллографа к контрольной точке на выходе канала связи.

- Ручку регулировки уровня шума повернуть до упора против часовой стрелки.

- Последовательным нажатием кнопки «Периодическая» на передней панели съемного блока макета установить последовательность из 16 бит в соответствии с заданным вариантом (Таблица 2.2). Номер варианта определяется как  $n_1 = N \bmod 12$ , где  $N$  – номер студента по журналу. Контроль за правильностью установки последовательности осуществлять с помощью блока «Контроль выхода».

- Настроить изображение на экране осциллографа так, чтобы на экране укладывались 8-10 периодов последовательности (1-0.5 мс на одно деление). Наблюдать и зарисовать полученные осциллограммы.

- С помощью кнопки «Постоянная» и кнопок  $b_0 \dots b_3$  на передней панели съемного блока макета установить последовательность в соответствии с заданным вариантом (двоичная запись номера варианта). Номер варианта определяется как  $n_2 = N \bmod 16$ , где  $N$  – номер студента по журналу. Контроль за установкой последовательности осуществлять с помощью расположенных ря-

дом светодиодов. Например, для студента, чей номер в журнале 17  $n_2=1$ , двоичная комбинация 0001, светодиод b0 горит, остальные погашены.

Наблюдать и зарисовать полученные осциллограммы.

- С помощью кнопки «Случайная» блока источника сигналов установить на входе модулятора псевдослучайную последовательность. Наблюдать осциллограмму установленного сигнала и сигнальное созвездие с помощью блока «Контроль выхода».

- На основании полученных наблюдений сделать выводы по данному разделу.

2) Наблюдать и зарисовать осциллограммы сигнала в различных точках исследуемого радиоприемного тракта для заданных вариантов последовательностей (в соответствии с вариантом задания), подаваемых на вход модулятора.

- Последовательным нажатием кнопки «Периодическая» на передней панели съемного блока макета установить последовательность из 16 бит в соответствии с заданным вариантом (Таблица 2.2). Номер варианта определяется как  $n_1=N \bmod 12$ , где  $N$  – номер студента по журналу. Контроль за правильностью установки последовательности осуществлять с помощью блока «Контроль выхода». Наблюдать и зарисовать осциллограммы в различных точках демодулятора.

- С помощью кнопки «Постоянная» и кнопок b0...b3 на передней панели съемного блока макета установить последовательность в соответствии с заданным вариантом (двоичная запись номера варианта). Номер варианта определяется как  $n_2=N \bmod 16$ , где  $N$  – номер студента по журналу. Контроль за установкой последовательности осуществлять с помощью расположенных рядом светодиодов. Наблюдать и зарисовать осциллограммы в различных точках демодулятора.

- На основании полученных наблюдений сделать выводы по данному разделу.

3) Провести экспериментальные измерения коэффициента ошибок при различных отношениях мощностей сигнала и шума для заданных вариантов последовательностей (в соответствии с вариантом задания), подаваемых на вход модулятора.

- С помощью описанной выше методики подать на вход модулятора периодическую последовательность (вариант №9 из Таблицы 2.2).

- Ручку регулировки уровня шума повернуть до упора против часовой стрелки.

- Подключить вход вольтметра к гнезду выхода канала связи. Переключатель шкалы вольтметра установить на максимальное значение. Включить вольтметр.

- Измерить напряжение сигнала на выходе канала.

- Подключить вольтметр к гнезду генератора шума.

- Изменять напряжение шума в канале ручкой регулировки уровня шума.

Наблюдать при этом изменение коэффициента ошибок. Снять 6-8 значений

коэффициента ошибок при разном уровне шума. Полученный результат ввести в таблицу вида:

Таблица 2.1. Зависимость коэффициента ошибок от напряжения шума

$U_{ш}, В$					
$U_c^2/U_{ш}^2$					
$K_{ош}$					

- Повторить измерения для варианта №10, а также №13 и №14.

- На основании полученных результатов построить на одном графике зависимости коэффициента ошибок от отношения квадратов напряжений ( $U_c^2/U_{ш}^2$ ). Сравнить полученные зависимости с теоретической зависимостью, зарисованной в ходе подготовки к работе. Сделать выводы.

Таблица 2.2. Варианты периодической последовательности

№ вар				
1.	0101	0100	0001	0000
2.	0111	0110	0011	0010
3.	1101	1100	1001	1000
4.	1111	1110	1011	1010
5.	0000	0010	1000	1010
6.	0001	0011	1001	1011
7.	0100	0110	1100	1110
8.	0101	0111	1101	1111
9.	0101	0000	1111	1010
10.	0110	0011	1100	1001
11.	0000	0011	1100	0000
12.	0101	0110	1001	1010
13.	12-битная последовательность			
14.	16-битная последовательность			

## 2.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Структурную схему лабораторной установки (сменного блока).
3. Результаты измерений в виде таблиц, графиков и осциллограмм.
4. Краткие выводы по разделам с объяснением результатов, полученные в ходе выполнения работы.
5. Общий вывод по проделанной работе.

## 2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Привести примеры использования квадратурной амплитудной модуляции в современных системах радиосвязи и телерадиовещания. В чем преимущества и недостатки данного способа модуляции?
2. Привести примеры структурных схем радиоприемных устройств для систем, использующих квадратурную амплитудную модуляцию.
3. Привести выражение для квадратурного представления высокочастотных полосовых сигналов.
4. Описать алгоритм формирования квадратурных составляющих радиосигнала в цифровом радиоприемном устройстве.
5. Каковы причины возникновения нелинейных искажений квадратур в цифровых радиоприемных устройствах?
6. Приведите способы уменьшения интермодуляционных искажений квадратур.
7. В чем причины скачков фазы квадратурного радиосигнала?
8. Назначение фильтрации квадратурных составляющих после гетеродинирования; выбор параметров фильтра.
9. Объяснить причины искажений дискретного сообщения при демодуляции радиосигнала.
10. В чем состоит отличие демодуляции непрерывного и дискретного сообщений?
11. Вероятность ошибки на бит и вероятность ошибки на символ для сигналов с дискретными методами модуляции.
12. Вероятность ошибки для сигналов с КАМ. Экспериментальное определение значения вероятности ошибки.

## IV. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Маковеева М.М, Шинаков Ю.С Системы связи с подвижными объектами. - М.: Радио и связь, 2002.
2. Рабинер Л., Голд Б. Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1978.
3. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. – 2004.
4. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. – М.: Техносфера, 2007.
5. Дингес С.И. Мобильная связь: технология DECT. – М.: Солон-Пресс, 2008.
6. Сборник описаний лабораторных работ «Радиопередатчики часть 3: Основы устройств генерирования и формирования радиосигналов». М.:Информсвязьиздат, 2007.
7. Головин О.В. Устройства генерирования, формирования приема и обработки сигналов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2012.
8. Журавлев В.И., Трусевич Н.П. Методы модуляции-демодуляции радиосигналов в системах передачи цифровых сообщений. – М.: Ин-

связьиздат, 2009.

9. Прокис Дж. Цифровая связь. - М: Радио и связь, 2000.

10. Побережский Е.С. Цифровые радиоприемные устройства. – М.: Радио и связь, 1987.