

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Московский технический университет связи и информатики

Кафедра систем радиосвязи

Лабораторная работа № 5

Изучение принципов передачи цифровых сигналов по РРЛ

Составили в 1993г. М.М.Маковеева, канд. техн. наук, доцент
С.С.Тарасов, старший преподаватель

Новая редакция в 2008г. Сухорукова И.Ю., доцент

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить принципы передачи многоканальных телефонных сигналов (МТС) по цифровым радиорелейным линиям (ЦРРЛ).
2. Ознакомиться с назначением и принципами работы основных узлов аппаратуры, а также методами организации цифровых стволов.
3. Ознакомиться с методами контроля достоверности передачи сигналов в ЦРРЛ.
4. Исследовать зависимость вероятности ошибок в каналах ЦРРЛ от соотношения сигнал-шум на входе приемника.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить назначение основных элементов структурной схемы цифровой радиорелейной системы (ЦРРС) и основные характеристики линейного цифрового сигнала (ЛЦС) по [1] и приложению 3.
2. Изучить структурную схему лабораторного стенда и назначение основных элементов по приложению 1.
3. Изучить по приложению 2 принцип регенерации ЛЦС и метод оценки воздействия помех на процесс принятия решения в регенераторе по глаз-диаграмме.
4. Зарисовать структурные схемы ЦРРС и лабораторного стенда.
5. Изучить основные технические данные ЦРРС «Пихта-2», «Радан-МС», «Радан-МГ», «Ракита-8».
6. Подготовить таблицы для записи результатов измерений.
7. (выполняется студентами **4-го курса** для получения допуска к выполнению лабораторной работы)

Рассчитать для соответствующих исходных данных:

- а) ослабление сигнала при распространении в свободном пространстве в дБ

$$a_{св}=20\lg(4\pi R_0/\lambda), \text{ дБ} \quad (5.1)$$

Длину волны в длину пролета подставлять в одинаковых единицах измерения.

- б) суммарное ослабление сигнала на пролете в дБ

$$a_{сум}=a_{св}-g_{пер}-g_{пр}+a_{ф.пер}+a_{ф.пр}, \text{ дБ} \quad (5.2)$$

- в) уровень мощности сигнала на входе приемника при отсутствии замираний на пролете в дБВт

$$p_{с.вх.0}=10\lg P_{п}-a_{сум}, \text{ дБВт} \quad (5.3)$$

- г) минимально допустимое значение множителя ослабления на пролете в дБ

$$V_{min}=p_{пор} - p_{с.вх.0}, \text{ дБ} \quad (5.4)$$

- д) полосу частот соответствующую скорости передачи на входе модулятора в Гц

$$\Pi_{ш} = C/\log_2 M, \text{ Гц}, \quad (5.5)$$

где М- число уровней манипуляции

- е) уровень мощности шума на входе приемника в дБВт

$$p_{ш.вх}=10\lg(kT_0\Pi_{ш})+n_{ш}, \text{ дБВт}, \quad (5.6)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К Гц – постоянная Больцмана,

$T_0 = 290 \dots 300$ К – температура окружающей среды по шкале Кельвина;

- ж) отношение сигнал- шум для реального приемника в дБ

$$q_{вх.р} = P_{пор} - P_{ш.вх}, \text{ дБ} \quad (5.7)$$

з) величину энергетического запаса аппаратуры из-за её не идеальности в дБ

$$\Delta h = q_{\text{вх.р}} - h_{\text{ид}}, \text{ дБ}, \quad (5.8)$$

где $h_{\text{ид}}$ определяется по графикам зависимости вероятности ошибки $p_{\text{ош}}$ от отношения сигнал-шум $h(t)$ (см. рис.5.1) для заданного вида манипуляции и вероятности ошибки $p_{\text{ош}}=10^{-3}$.

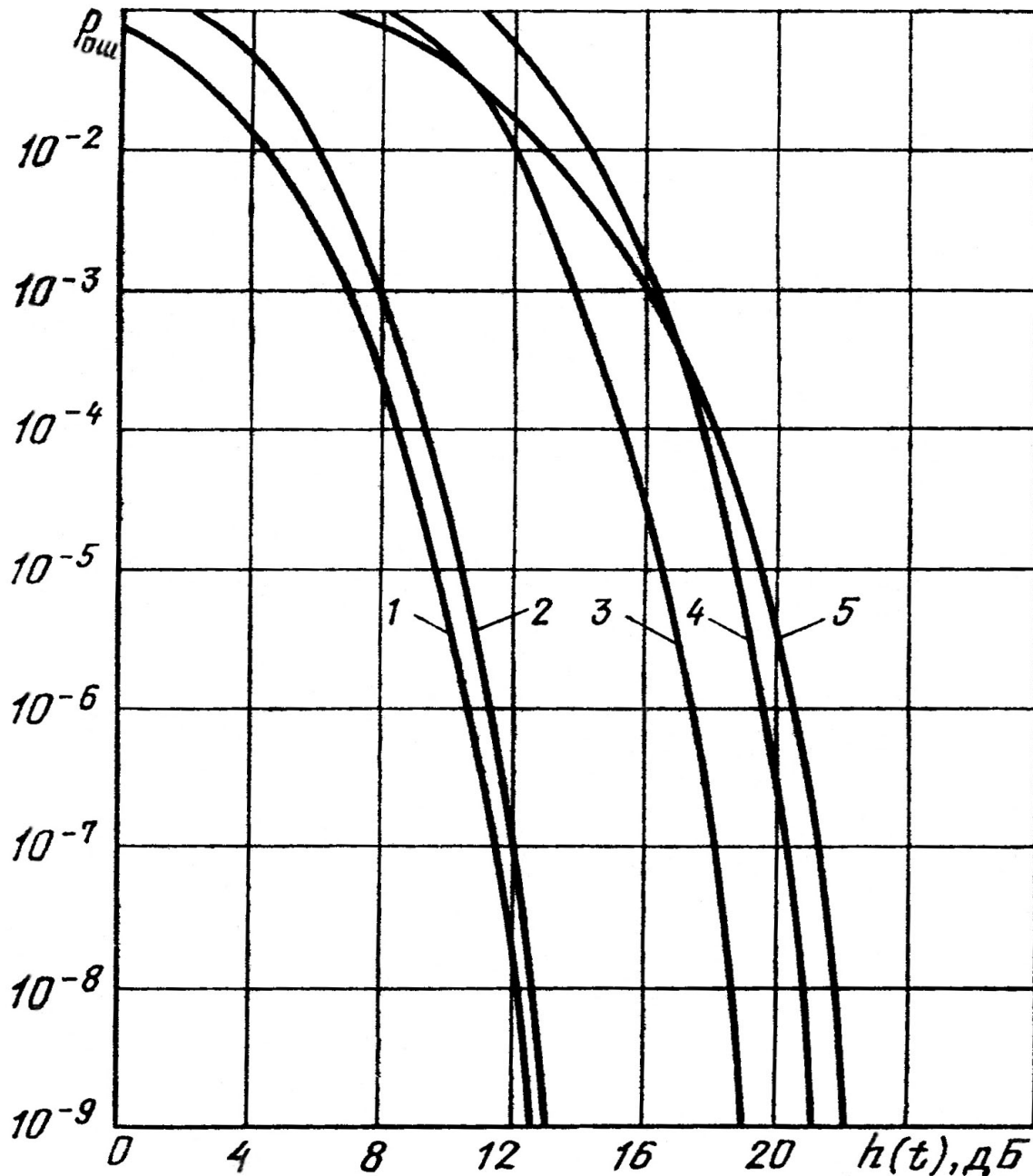


Рис.5.1. Зависимость вероятности ошибок $P_{\text{ош}}$ от отношения сигнал-шум $h(t)$
для способов манипуляции:

- 1 – ОФМ-4 при когерентном приеме;
- 2 – ОФМ при некогерентном приеме;
- 3 – АМ при детектировании по огибающей;
- 4 – ОФМ-8 при когерентном приеме;
- 5 – АФМ-16 при когерентном приеме.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Включить макет и по осциллограммам в контрольных точках исследовать работу датчика испытательного ЛЦС.
2. По осциллограммам в контрольных точках исследовать работу регенератора ЛЦС.
3. Экспериментально определить зону значений порога решающего устройства (РУ) и фазы стробирующих импульсов (СИ), в которой обеспечивается правильная регенерация ЛЦС. Полученные результаты изобразить в виде графика. Из графика определить и установить на макете оптимальные значения фазы СИ и порога РУ.
4. Зарисовать и объяснить осциллограммы сигналов во всех контрольных точках.
5. Наблюдать и объяснить глаз-диаграмму ЛЦС при различных значениях полосы пропускания тракта и при увеличении замираний на пролете ЦРРЛ.
6. Измерить зависимость частоты ошибок в ЦРРС от величины множителя ослабления. Определить $V_{\text{доп}}$ и сравнить его с расчетным значением.
7. Сделать выводы из полученных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

Он должен содержать:

1. Структурную схему лабораторного стенда.
2. Структурную схему цифрового ствола РРЛ.
3. Результаты домашнего расчета (для студентов 4-го курса).
4. Осциллограммы сигналов в контрольных точках 1 ... 8 с поясняющими подписями.
5. Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
6. Зарисованные глаз-диаграммы с поясняющими подписями.
7. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните назначение основных элементов структурной схемы ЦРРС.
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. С какой целью осуществляется преобразование двоичного ЛЦС в квазитроичный?
5. Какая скорость передачи соответствует одному каналу ТЧ? Пояснить почему.
6. Поясните, как определяется номинальная скорость передачи для аппаратуры ИКМ-30 и

ИКМ-120.

7. В чем заключаются преимущества и недостатки цифровых систем передачи по сравнению с аналоговыми?
8. Нарисуйте вид радиосигнала на выходе передатчика ЦРРС при различных видах модуляции.
9. Какие методы организации цифровых стволов вы знаете?
10. Какие ЦРРС работают в диапазонах 2 ГГц, 8 ГГц, 11 ГГц?
11. Как может быть организована передача цифровых сигналов по стволам аналоговых РРЛ?
12. Что такое ПСП? Назовите примеры применения ПСП, основные свойства ПСП. Поясните принцип работы генератора ПСП по рис. 5.11.
13. Поясните принцип работы регенератора по рис. 5.4 и 5.5.
14. Каково назначение ФНЧ на рис. 5.4? Как следует выбирать его полосу пропускания?
15. Из каких соображений выбирается порог РУ и фаза СИ в регенераторе?
16. Что такое глаз-диаграмма? Как оценить искажения ЛЦС по глаз-диаграмме? Как правильно выбрать порог РУ?
17. Поясните методику экспериментального определения порога РУ и фазы СИ.
18. Что такое энергетический запас из-за не идеальности аппаратуры? От чего он зависит?
19. Как определить энергетический запас на основании технических данных аппаратуры?
20. Сопоставьте виды модуляции радиосигнала по помехоустойчивости и занимаемой полосе частот.
21. Поясните, почему существует оптимальное значение порога РУ регенератора, оптимальное значение фазы СИ, полосы пропускания приемника?
22. Как следует выбирать время для измерения частоты ошибок?
23. Как определить минимально допустимое значение множителя ослабления для ЦРРЛ?
24. В чем отличие видов модуляции ИКМ-ФМ и ИКМ-ОФМ?
25. Как влияют ошибки при приеме цифрового сигнала на качество канала ТЧ?
26. Поясните, как получить сигнал ИКМ-4ФМ.
27. С какой целью на ЦРРЛ применяют многоуровневые методы манипуляции?
28. Как определяют эффективность использования полосы частот при различных методах манипуляции?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиорелейные и спутниковые системы передачи: Учебник для вузов / А.С. Немировский, О.С. Данилович, Ю.И. Маримонт и др. Под ред. А.С. Немировского. – М.: Радио и связь, 1986. – стр. 27-38, 122-134, 191-198.
2. Системы радиосвязи: Учебник для вузов / Н.И. Калашников, Э.И. Крупицкий, И.Л. Дороднов, В.И. Носов. Под ред. Н.И. Калашникова. М.: Радио и связь, 1988. – стр. 43-58,

162-165, 314-317.

3. Изучение принципов построения однопролетных ЦРРЛ и основных эксплуатационных измерений в них: Описание лабораторной работы № 11 / М.М. Маковеева, С.С. Тарасов / МИС. – М.: 1989. – стр. 11 – 21.

4. Банкет В.Л., Дорофеев В.М. Цифровые методы в спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. ВКЛЮЧЕНИЕ СТЕНДА

1. Убедиться, что макет соединен с измерительными приборами в соответствии со схемой рис.5.3 и рис.5.2.
2. Получив разрешение преподавателя, включить макет оконечного устройства тумблером «Сеть» на передней панели.
3. Включить имитатор пролета ЦРРЛ.
4. Установить на имитаторе пролета значение множителя ослабления – 6 дБ, протяженность пролета – *по указанию преподавателя*.
5. Включить осциллограф и подготовить его к работе.



Рис.5.2. Внешний вид лабораторного стенда

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДАТЧИКА ЛЦС

1. Установить на макете тумблер П1 (синхронизация) в положение 1.
2. Установить переключатель П4 в положение 5 и по осциллограмме импульсов тактовой частоты установить скорость развертки луча так, чтобы один период сигнала занимал на экране одну клетку. Определить и записать в отчет масштаб развертки.
3. Установить переключатель П4 в положение 1. Записать и зарисовать наблюдаемую ПСП в виде символов 0 и 1. За начало последовательности принять символ 1, идущий после сочетания 000.
4. Установить переключатель П4 в положение 2. Зарисовать осциллограмму сигнала. За начало последовательности принять символ 1, идущий после сочетания 000. Подписать осциллограмму в соответствии с рис.5.3 и приложением 1.
5. Установить переключатель П4 в положение 3. Зарисовать осциллограмму сигнала. За начало последовательности принять символ 1, идущий после сочетания 000. Подписать осциллограмму в соответствии с рис.5.3 и приложением 1.

Примечание: все осциллограммы зарисовываются на одном листе миллиметровой бумаги друг под другом в масштабе, определенном выше. Так как при прохождении по тракту сигнал заметно запаздывает, на каждой осциллограмме ручкой «Смещение X» совмещать начало периода ПСП с началом развертки.

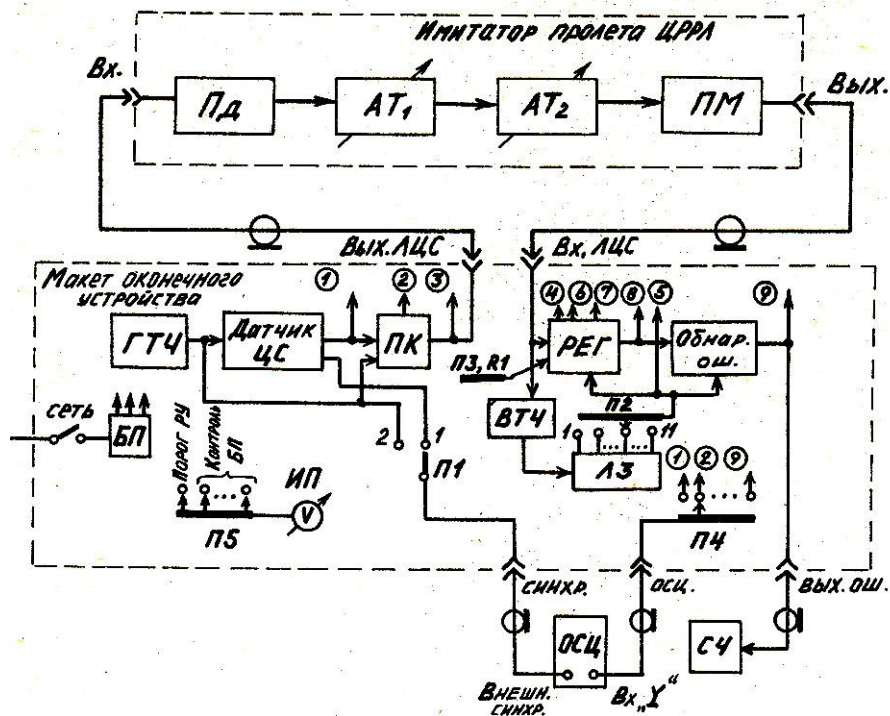


Рис.5.3. Структурная схема лабораторного стенда

3. ВЫБОР ПОРОГА РУ И ФАЗЫ СИ В РЕГЕНЕРАТОРЕ

Свидетельством правильной регенерации сигнала служит отсутствие импульсов ошибок на выходе обнаружителя ошибок (точка 9 на рис. 5.3). Наличие или отсутствие

этих импульсов можно определить визуально, наблюдая осциллограмму сигнала в точке 9. Отсчет значений порога РУ U_n проводится по шкале измерительного прибора (ИП). Время задержки (фаза) СИ регулируется переключателем П2 и определяется следующим образом:

$$T_{\text{си}} = 10 (K - 1), \text{ нс}, \quad (5.9)$$

где К – номер положения, в котором находится П2.

1. Переключатель П4 установить в положение 9.
2. Переключатель П5 установить в положение 1.
3. Установить переключатель П3 в положение 2. В этом положении П3 полоса ФНЧ перед регенератором $\Delta F = 4,25 \text{ МГц}$.
4. Установить переключатель П2 в положение 1.
5. Порог РУ потенциометром R1 по показанию ИП установить равным нулю.

При этом на экране осциллографа должны наблюдаться импульсы ошибок.

6. Постепенно увеличивая порог потенциометром R1, добиться пропадания импульсов ошибок. Значение $U_{\text{п. мин}}$, при котором это произошло, занести в табл. 5.1.
7. Продолжая увеличивать порог РУ, определить $U_{\text{п. макс}}$, при котором импульсы ошибок появляются вновь, и занести это значение в табл.5.1.

Если импульсы ошибок не пропадают при изменении U_n от 0 до 2 В, то в соответствующих графах табл. 5.1 следует поставить прочерки.

Таблица 5.1

$t_{\text{си}}, \text{ нс}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	П3 = 2 $\Delta F = 4,25 \text{ МГц}$
$U_{\text{п}}, \text{ мВ}$												
$U_{\text{п. мин}}$												$t_{\text{си } 0} =$
$U_{\text{п. макс}}$												$U_{\text{п } 0} =$

8. Повторить действия по п.5... 7 для всех остальных положений переключателя П2.
9. Построить в одних осях графики зависимости $U_{\text{п. мин}}$ и $U_{\text{п. макс}}$ от $t_{\text{си}}$.
10. Определить оптимальное значение $t_{\text{си } 0}$, при котором раскрыт глаза максимален:
 $\Delta U = U_{\text{п. макс}} - U_{\text{п. мин}}$, и оптимальное положение порога РУ, как $U_{\text{п } 0} = (U_{\text{п. макс}} + U_{\text{п. мин}})/2$ при $t_{\text{си}} = t_{\text{си } 0}$.
11. По указанию преподавателя повторить пп. 3...10 для другого положения П3.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТОРА

1. Установить переключатель П3 в положение 2.
2. Выставить согласно табл. 5.1 найденные ранее значения $t_{\text{си } 0}$ и $U_{\text{п } 0}$ при

соответствующем положении переключателя ПЗ.

3. Наблюдать и объяснить осциллограммы сигналов в положениях 4...8 переключателя П4.

4. Зарисовать одну под другой и подписать в соответствии с рис.5.4, 5.5 и приложением 2 полученные осциллограммы.

5. НАБЛЮДЕНИЕ ГЛАЗ-ДИАГРАММЫ

1. **По указанию преподавателя** установить новый масштаб развертки осциллографа, равный 20 нс/см.

2. Тумблер П1 установить в положение 2.

3. Переключатель П4 поставить в положение 4.

На экране осциллографа должна наблюдаться глаз-диаграмма, подобная рис. 5.6.

Если этого не происходит, обратиться к преподавателю.

4. Наблюдать и зарисовать глаз-диаграммы при изменении полосы пропускания ФНЧ регенератора (переводя переключатель ПЗ в положения 1, 2, 3). Сопоставить наблюдаемые глаз-диаграммы с графиками п. 3.9.

5. Переключатель ПЗ поставить в положение 2.

6. Наблюдать появление шумов на глаз-диаграмме при увеличении глубины замираний и зарисовать эти глаз-диаграммы для трех значений аттенюатора АТ₂: 1 – появились шумы, $V = \dots$ дБ; 2 – увеличились шумы, $V = \dots$ дБ; 3 – «глаз» глаз-диаграммы закрылся. $V = \dots$ дБ.

7. Переключатель П4 поставить в положение 9.

8. Выставить найденные ранее значения $t_{\text{си } 0}$ и $U_{\text{п } 0}$ согласно табл. 5.1 для значения переключателя ПЗ в положении 2 (п.3.10).

9. Наблюдать появление импульсов ошибок на выходе обнаружителя ошибок при увеличении глубины замираний. Записать показание аттенюатора АТ₂, при котором наблюдается полное закрытие «глаза» глаз-диаграммы $V = \dots$ дБ.

10. Восстановить прежнее значение множителя ослабления, равное – 6 дБ.

11. Выключить осциллограф.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ ОШИБОК ОТ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ

Отметим, что понятие частоты ошибок применимо к результатам эксперимента, а понятие вероятности ошибок принято по отношению к расчетным величинам. В пределе, когда время измерений стремится к бесконечности, эти понятия совпадают.

1. Включить частотомер и подготовить его к работе в режиме непрерывного счета числа импульсов. Для этого переключатель РОД РАБОТЫ установить в положение НЕПРЕР.СЧЕТ

2. Установить переключатель ПЗ в положение 2 и соответствующие оптимальные значения $t_{\text{си } 0}$ и $U_{\text{п } 0}$, найденные в результате выполнения п. 3.10.

3. Сбросить показания частотомера.

Если значения $t_{\text{си } 0}$ и $U_{\text{п } 0}$ установлены правильно, частотомер не должен регистрировать ошибок, так как при $V = -6$ дБ вероятность их появления ничтожно мала.

4. Плавно увеличивать глубину замираний аттенюатором АТ2 до тех пор, пока частотомер не начнет регистрацию ошибок.

5. Переключить частотомер в режим счета числа импульсов за 1 с. Для этого переключатель РОД РАБОТЫ переключить в положение F_A , а ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ в положение 1s.

6. Подобрать такое значение множителя ослабления, при котором в 1 с возникает в среднем 850 ошибок (что соответствует частоте ошибок $K_{\text{ош}} = 10^{-4}$).

Примечание: т.к. в качестве счетчика ошибок используется частотомер, то определять по нему количество ошибок надо, не обращая внимания на точку на шкале частот.

7. Подстройкой порога РУ потенциометром R1 добиться минимума частоты ошибок.

8. Увеличением глубины замираний аттенюатором АТ2 опять довести среднее число ошибок в 1 с до 850.

9. Записать уточненное показание $U_{\text{п } 0}$.

10. Снять зависимость частоты ошибок $K_{\text{ош}}$ от множителя ослабления V . Результаты записать в табл. 5.2. Снятие зависимости проводить согласно пп. 6.11 и 6.12.

Учесть, что частота ошибок определяется как

$$K_{\text{ош}} = n_{\text{ош}} / N = n_{\text{ош}} / B \Delta t, \quad (5.10)$$

где $n_{\text{ош}}$ - число ошибок за сеанс измерения,

N – общее число символов, переданное за сеанс измерения, $N = B \Delta t$;

$B = 8,448 \cdot 10^6$ бит/с,

Δt – длительность сеанса, которую следует выбирать так, чтобы число зафиксированных ошибок было не менее 10.

Примечание: при измерении малых значений $K_{\text{ош}}$ потребуется увеличение Δt . Значения $\Delta t = 10$ с можно задавать, переведя переключатель ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ в положение 10s или с помощью часов с секундной стрелкой.

Таблица 5.2

V , дБ						
$K_{\text{ош}}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
Δt , с						
N						
$n_{\text{ош}}$						

6.11. Увеличивая глубину замираний, довести среднее число ошибок в 1 с до 85000, что соответствует $K_{\text{ош}} = 10^{-2}$. Заполнить первый столбец табл. 5.2.

6.12. Плавное уменьшая глубину замираний, добиться уменьшения $K_{\text{ош}}$ в десять раз. Заполнить второй столбец табл. 5.2.

Подобным образом заполнить остальные столбцы.

6.13. Построить график зависимости $K_{\text{ош}}$ от V . Значения $K_{\text{ош}}$ откладывать в логарифмическом масштабе:

$$k_{\text{ош}} = 10 \log(K_{\text{ош}}), \text{ дБ} \quad (5.11)$$

6.14. Определить по графику $V_{\text{доп}}$ и сравнить его с расчетным значением.

6.15. Предъявить полученные результаты преподавателю.

6.16. Выключить макет и все приборы лабораторного стенда.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Краткое описание лабораторного стенда

Структурная схема лабораторного стенда приведена на рис. 5.3. Стенд состоит из двух частей: имитатора пролета ЦРРЛ и макета оконечного устройства.

Имитатор пролета содержит в себе передатчик (ПД) и приемник (ПМ), соединенные между собой через регулируемые аттенюаторы AT_1 и AT_2 .

С помощью аттенюатора AT_1 устанавливается затухание, эквивалентное ослаблению сигнала на пролете при распространении в свободном пространстве с учетом КПД АФТ и направленных свойств антенн. Для удобства выполнения работы шкала этого аттенюатора проградуирована в километрах. Аттенюатором AT_2 устанавливается величина множителя ослабления на пролете. Шкала аттенюатора проградуирована в децибелах.

В состав **макета оконечного устройства** входят: генератор импульсов тактовой частоты (ГТЧ); датчик цифрового сигнала (Датчик ЦС); преобразователь кода (ПК); регенератор (РЕГ) со схемой выделения сигнала тактовой частоты (ВТЧ); линия задержки (ЛЗ) с отводами; обнаружитель ошибок (Обнар.Ош.), блок питания (БП) и стрелочный измерительный прибор (ИП). К макету подключены осциллограф (ОСЦ), с помощью которого можно наблюдать осциллограммы в точках 1...9 схемы и частотомер (СЧ), используемый для подсчета числа ошибок.

В качестве цифрового сообщения, имитирующего ИКМ-сигнал, выбрана псевдослучайная последовательность (ПСП) импульсов, которая генерируется датчиком. Однополярные импульсы ПСП преобразовываются в ПК в квазитроичный линейный цифровой сигнал (ЛЦС) и поступают по кабелю на вход передатчика.

Через аттенюаторы AT_1 и AT_2 сигнал передатчика попадает на вход приемника. В приемнике имеется система автоматической регулировки усиления. Поэтому при уменьшении уровня сигнала на входе приемника напряжение ЦС на его выходе автоматически поддерживается постоянным, но уровень вносимых приемником тепловых

шумов увеличивается.

С выхода приемника квазитроичный цифровой сигнал по соединительному кабелю поступает в регенератор. В регенераторе осуществляется фильтрация сигнала, восстановление его формы (как амплитудных, так и временных соотношений) и преобразование к исходному виду, т.е. в форму однополярных импульсов, так как далее эти импульсы подаются в устройство обнаружения ошибок, выполненное на логических интегральных микросхемах.

Импульсы тактовой частоты, необходимые для работы приемной части схемы, выделяются из принимаемого сигнала с помощью ВТЧ.

Устройство обнаружения ошибок осуществляет проверку соответствия закона чередования символов (т.е. единиц и нулей) входной последовательности определенному, заранее заданному закону формирования последовательности в датчике ЦС. В каждом случае ложного приема символа (единицы вместо нуля или наоборот) на выходе обнаружителя ошибок появляется импульс ошибки.

При помощи счетчика, функцию которого выполняет частотомер, можно подсчитать число ошибок за определенный промежуток времени Δt , называемый сеансом измерения. Так как ошибки возникают случайно, то их число в различных сеансах одинаковой продолжительности будет различным, т.е. случаен сам результат измерения. Разброс значений $K_{\text{ош}}$, получаемых в различных сеансах одинаковой продолжительности будет тем меньше, чем больше Δt . В пределе, когда $\Delta t \rightarrow \infty$, можно говорить о том, что измеряется вероятность ошибки.

Назначение органов управления

Через **переключатель П1** и гнездо «Синхр.» подаются импульсы синхронизации для осциллографа. В положении 1 переключателя П1 синхронизация осуществляется с периодом повторения ПСП, что позволяет наблюдать за прохождением ЦС по всему тракту. В положении 2 П1 выдаются синхроимпульсы для наблюдения глаз-диаграммы.

С помощью **переключателя П2** проводится регулировка фазы тактовых импульсов в регенераторе (момента стробирования сигнала). Задержка момента прихода тактового импульса регулируется в пределах от 0 до 100 нс ступенями по 10 нс.

Переключателем П3 выбирается полоса пропускания ФНЧ на входе регенератора. В положении 1 она равна 10 МГц, в положении 2 – 4,25 МГц, в положении 3 – 3 МГц.

Переключатель П4 позволяет подключить вход осциллографа к точкам 1...9 схемы рис. 5.1 для снятия осциллограмм.

Переключатель П5 совместно с ИП предназначен для контроля питающих напряжений (стрелка ИП должна находиться в пределах зеленого сектора). Когда П5 находится в положении 1, ИП указывает уровень (порог) срабатывания решающего устройства. Этот уровень регулируется потенциометром R1.

Регенерация линейного цифрового сигнала и оценка его искажений по глаз-диаграмме

Регенератор является одним из наиболее важных элементов цифрового тракта. Он предназначен для восстановления формы импульсов линейного цифрового сигнала (ЛЦС), их длительности и амплитуды. Благодаря регенерации полностью устраняются все шумы и искажения, вносимые каналом связи, если только их уровень не достигает некоторой пороговой величины, приводящей к возникновению ошибок. Поэтому регенераторы устанавливаются в цифровом тракте так, чтобы искажения и шумы, накапливающиеся на участке между регенераторами не достигали этой пороговой величины.

Основными элементами регенератора являются:

- согласованный фильтр, максимизирующий отношение сигнал-шум на входе решающего устройства (РУ);
- усилитель для поддержания определенного уровня ЛЦС на входе РУ;
- решающие устройства, сравнивающие напряжение ЛЦС с порогами, разделяющими соседние разрешенные уровни ЛЦС (обычно число РУ в регенераторе на единицу меньше числа уровней регенерируемого ЛЦС);
- триггеры, синхронизируемые импульсами тактовой частоты для восстановления длительности символов ЛЦС и границ между ними;
- логические схемы для формирования выходного сигнала;
- устройство выделения сигнала тактовой частоты (ВТЧ), из принимаемого ЛЦС;
- устройство формирования пороговых напряжений (их «привязки» к амплитуде ЛЦС).

Структурная схема регенератора квазитроичного ЛЦС, смонтированного в лабораторном макете (без ВТЧ) показана на рис. 5.4, а соответствующие временные диаграммы напряжений на рис.5.5.

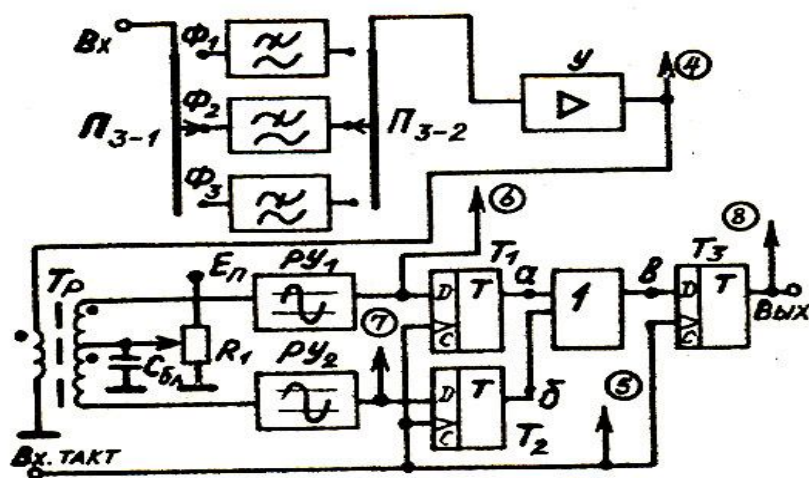


Рис.5.4. Структурная схема регенератора

Выбор ФНЧ осуществляется переключателем ПЗ. Далее сигнал проходит через усилитель (У) с трансформаторным выходом. Трансформатор позволяет построить

На вход регенератора по соединительному кабелю с выхода приемника поступает квазитроичный ЛЦС. Форма этого сигнала искажена приемником и линией, кроме того, на него могут накладываться шумы.

Высокочастотные составляющие этих шумов отфильтровываются с помощью одного из трех ФНЧ (Φ_1 , Φ_2 , Φ_3).

каналы регенерации положительных и отрицательных импульсов по одинаковой схеме. Каждый канал регенерации содержит решающее устройство (двухсторонний ограничитель сигнала), восстанавливающее амплитудные соотношения и D – триггер для восстановления временных соотношений. Потенциометр R1 позволяет регулировать уровень срабатывания решающих устройств РУ₁ и РУ₂. Триггеры Т₁ и Т₂ срабатывают по переднему фронту импульсов тактовой частоты, подводимой ко входам С. Состояние триггера определяется потенциалом на входе D в момент действия переднего фронта тактового импульса и сохраняется неизменным до прихода переднего фронта следующего импульса независимо от изменения потенциала в промежутке времени между передними фронтами соседних тактовых импульсов. Так как фронт тактового импульса имеет очень малую длительность (примерно 10 нс) по сравнению с длительностью одного символа (примерно 120 нс), то «спрос» состояния РУ (ноль или единица?) осуществляется практически мгновенно. Такой способ регенерации ЦС получил название МЕТОД СТРОБИРОВАНИЯ.

Регенерированные таким образом положительные и отрицательные импульсы объединяются в одну однополярную цифровую последовательность схемой ИЛИ (1). Возникающие при этом переходные процессы устраняются с помощью триггера Т₃.

Для правильной и помехоустойчивой регенерации ЛЦС фаза напряжения тактовой частоты должна быть подобрана таким образом, чтобы «опрос» состояния РУ происходил в те моменты времени, когда напряжение ЛЦС на его входе ближе всего к установившемуся значению (достигает максимума при передаче единицы и близко к нулю при передаче нуля). Порог срабатывания РУ обычно устанавливают равным половине амплитуды импульсов ЛЦС. Выбор порога РУ, момента стробирования и оценку помехоустойчивости регенерации удобно проводить по глаз-диаграмме.

Глаз-диаграмма представляет собой результат наложения друг на друга временных диаграмм (осциллограмм) ЛЦС при всех возможных сочетаниях соседних символов. Глаз-диаграмму можно наблюдать на осциллографе, если на его вход подать случайный или псевдослучайный ЛЦС, а синхронизацию развертки осуществлять импульсами тактовой частоты. Линии глаз-диаграммы показывают, каким образом изменяются напряжение ЛЦС при переходе от одного символа к другому. На рис. 5.6 показан примерный вид глаз-диаграммы квазитроичного ЛЦС для случая отсутствия межсимвольных искажений (МСИ). Из рисунка видно, что в этом случае напряжение ЛЦС от символа к символу может изменяться по одной из семи траекторий, в зависимости от того, от какого и к какому символу совершается переход, в момент времени t_0 принимает одно из трех значений: 0, $+U_m$, $-U_m$, где U_m – амплитуда ЛЦС. Запись $+1 \rightarrow -1$ поясняет траекторию изменения напряжения ЛЦС при переходе от символа 1, представленного положительным импульсом на рассматриваемом тактовом интервале к

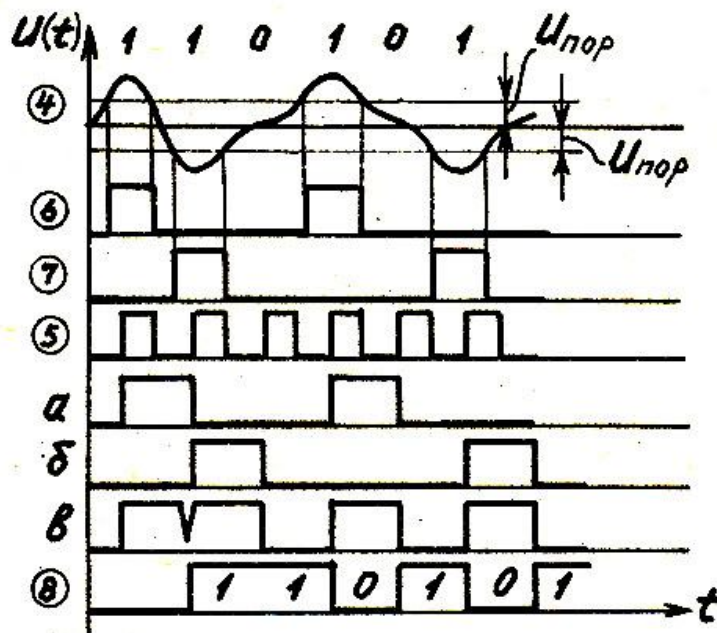


Рис.5.5. Временные диаграммы напряжений в различных точках схемы регенератора

символу 1, который на следующем тактовом интервале представлен отрицательным импульсом. Аналогично помечены другие траектории на рис. 5.6.

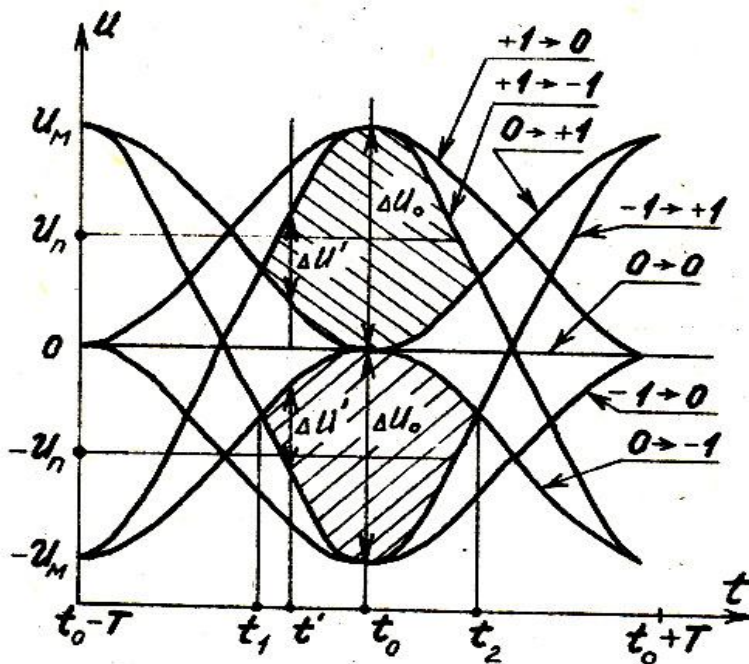


Рис.5.6. Глаз-диаграмма квазитроичного ЛЦС в случае отсутствия МСИ

На глаз-диаграмме проведены прямые линии $t = t_0$, $u = U_n$ и $u = -U_n$, где U_n — порог РУ. Очевидно, что если точки пересечения этих линий будут находиться внутри заштрихованных областей глаз-диаграммы (каждая такая область называется глазом), то в отсутствие шума и других помех регенератором всегда будут приниматься правильные решения. В присутствии теплового шума отдельные его выбросы могут приводить к ошибкам в регенерации ЛЦС. Число этих ошибок будет тем меньше, чем ближе точки пересечения линий порога и момента стробирования к центру глаза.

Важным параметром глаз-диаграммы является раскрыт глаза ΔU , который показывает, насколько могут различаться в наихудшем случае уровни ЛЦС, соответствующие 0 и 1. Так, из рис. 5.6 видно, что в отсутствие МСИ в середине символа ($t = t_0$) раскрыт глаза $\Delta U = \Delta U_0$ максимален и равен амплитуде ЛЦС. Ближе к краям символа вследствие переходных процессов раскрыт глаза уменьшается. При $t = t^1$ раскрыт $\Delta U = \Delta U^1 < \Delta U_0$.

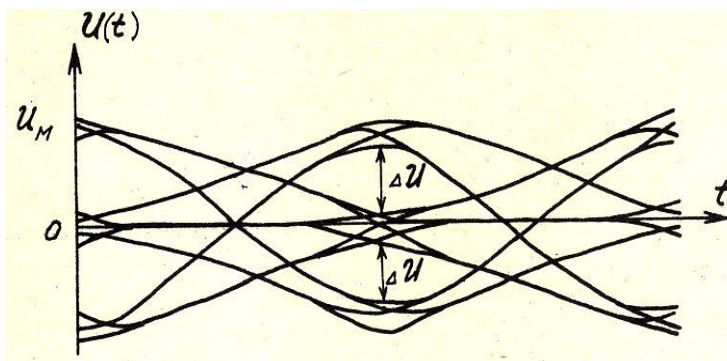


Рис.5.7. Глаз-диаграмма квазитроичного ЛЦС с МСИ

Межсимвольные искажения ЛЦС приводят к уменьшению раскрыта глаза на протяжении всего тактового интервала. Это видно из рис. 5.7, на котором изображена глаз-диаграмма квазитроичного ЛЦС с МСИ.

Уменьшение раскрыта глаза эквивалентно уменьшению амплитуды ЛЦС на входе регенератора.

В первом приближении можно считать, что если в результате МСИ и погрешности в установке момента стробирования раскрыт глаза уменьшился с величины U_M до величины ΔU , то потребуется увеличить отношение сигнал-шум на входе регенератора в $U_M/\Delta U$ раз для того, чтобы сохранить прежнее значение вероятности ошибок (при отсутствии МСИ и погрешности).

Организация цифровых стволов в радиорелейных системах

Структурная схема цифрового ствола

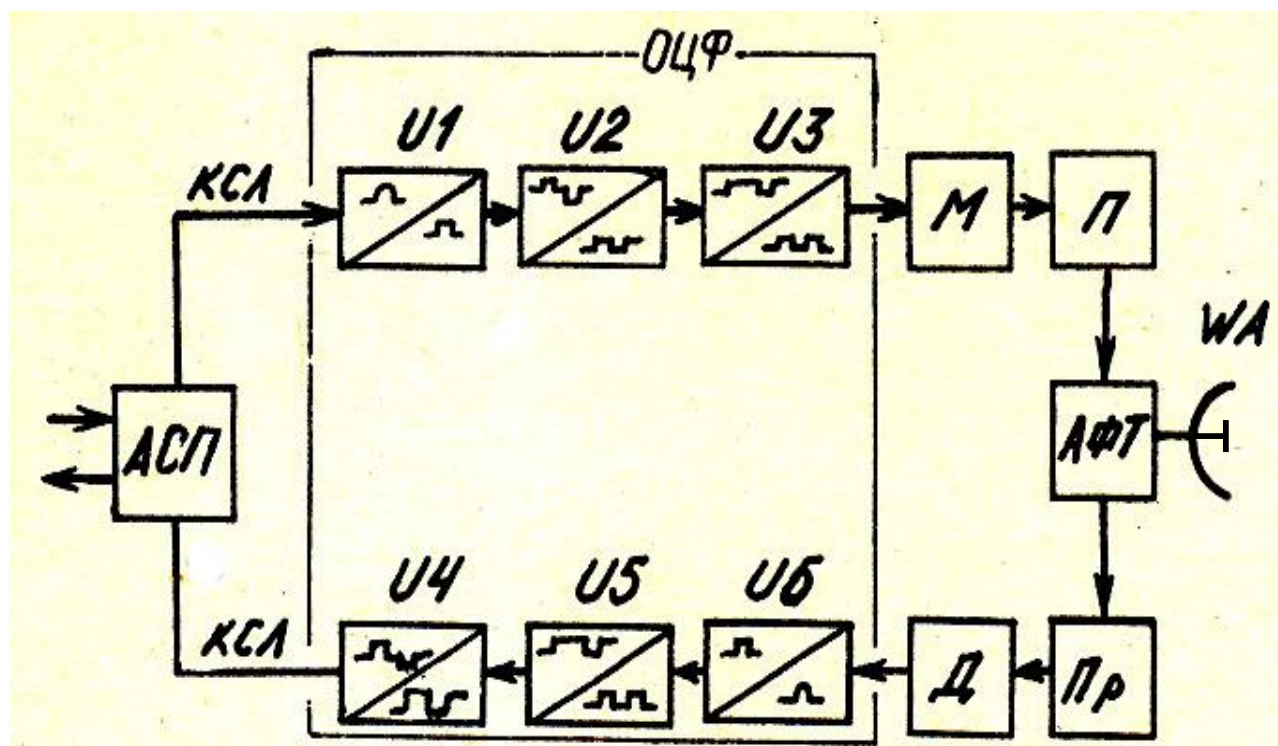


Рис.5.8. Структурная схема цифрового ствола

Широкополосный ствол РРЛ, предназначенный для передачи цифровых сигналов, называют цифровым (ЦФ) стволом. Для его организации к высокочастотному (ВЧ) стволу РРЛ подключают оконечное устройство ЦФ ствола (ОЦФ), которое также часто называют устройством сопряжения. Назначение ОЦФ – преобразовать ЛЦС к виду, удобному для передачи по РРЛ, с целью обеспечения наименьших искажений.

На вход ОЦФ (рис. 5.8) по кабельной соединительной линии (КСЛ) поступает линейный цифровой сигнал (ЛЦС) от типовой аппаратуры системы передачи (АСП), например ИКМ-30. На выходе ОЦФ получают двоичный цифровой сигнал (ЦС). Для ЛЦС $\tau \leq \Delta T$, где τ – длительность импульса; T – время, отводимое для передачи одного символа в кодовой группе, или тактовый интервал. В двоичном ЦС обычно $\tau = T$, так как в этом случае необходимая полоса пропускания высокочастотного тракта цифрового ствола оказывается наименьшей.

В составе ОЦФ: регенераторы импульсов U_1, U_6 ; преобразователи кодов U_2, U_4 ; скремблер U_3 и дескремблер U_5 . Регенераторы нужны для восстановления формы,

длительности, амплитуды и временного положения каждого из символов цифрового сигнала. Применение регенераторов позволяет снизить эффект накопления шумов в РРЛ, за счет чего обеспечивается высокая помехозащищенность в ЦФ каналах. Преобразователи кодов служат для согласования кодов в разных точках схемы. Например, часто ЛЦС поступает в квазитроичном коде, а на выходе ОЦФ нужен двоичный цифровой сигнал в относительном бинарном коде. Такое преобразование на передаче выполняет U2, обратное преобразование на приеме – U4. Скремблер выполняет определенные логические преобразования двоичного ЦС, в результате которых в выходном сигнале исключается возможность появления длинных серий одинаковых символов. Например, при передаче измерительных сигналов по линии на выходе U2 может наблюдаться символ 0 подряд на K тактовых интервалах. Такой двоичный ЦС практически на интервале КТ не содержит информации о тактовой частоте. Эту частоту трудно выделить на приеме. В результате нарушается работа системы тактовой синхронизации по всей РРЛ. Применение скремблера исключает такие нарушения. Кроме того, скремблирование улучшает условия ЭМС РРЛ, работающих в общих полосах частот, так как предотвращает излучение импульсов длительностью КТ, энергия которых сосредоточена в узкой полосе $\Pi_1 = 1/КТ$, где они могут создавать мощную помеху. Дескремблер выполняет логические операции, обратные скремблированию.

На рис. 5.8 показаны модулятор (М) и демодулятор (Д) ЦФ ствола, а также СВЧ передатчик (П) и СВЧ приемник (Пр), антенно-фидерный тракт (АФТ) и антенна WA. Если модуляция выполняется непосредственно в СВЧ диапазоне, то модулятор и СВЧ передатчик конструктивно представляют один блок.

Методы манипуляции

Модуляция цифровым сигналом называется манипуляцией. В ЦФ стволах применяют различные методы манипуляции: как двухуровневые, например ИКМ-ЧМ, ИКМ-ФМ, ИКМ-ОФМ, так и многоуровневые, например ИКМ-4ФМ, ИКМ16 КАМ. При

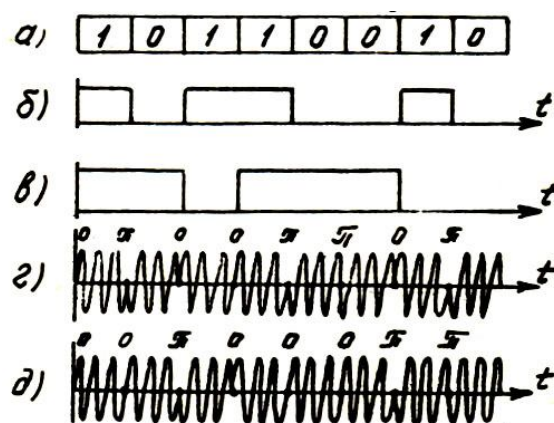


Рис.5.9. Отличие ФМ от ОФМ

двухуровневых методах манипуляции модулируемый параметр сигнала принимает два значения, например при ИКМ-ФМ меняется фаза выходного сигнала: 0, π .

Отличие ФМ и ОФМ состоит в том, что в первом случае на модулятор поступает двоичный ЦС в бинарном коде, а при ОФМ – в относительном бинарном коде (рис. 5.9). На рис. 5.9 показана кодовая группа (а), соответствующие ей модулирующие сигналы в бинарном коде (б) и относительном бинарном коде (в), а также сигналы на выходе передатчика ИКМ-ФМ и ИКМ-ОФМ (г, д). На рис. 5.9 г, д сверху указана начальная фаза СВЧ сигнала.

Модулятор ИКМ-4ФМ (рис. 5.10а) содержит два фазовых модулятора UB1 и UB2, в каждом из которых выполняется манипуляция несущей своим двоичным ЦС, причем эти несущие ортогональны. На UB1 несущая поступает от генератора G непосредственно, а на UB2 - через фазосдвигающую цепь $\pi/2$.

На выходе UB1 получаю квадратурный сигнал, его начальная фаза может

принимать значения $\pi/2$, $3\pi/2$; на рис. 5.10б вектор этого сигнала обозначен 2ЦС. Выходные сигналы модуляторов складываются в А1. Таким образом, всем возможным комбинациям символов двух модулирующих ЦС соответствуют четыре вектора 00, 01, 11, 10. В обозначениях векторов первая цифра соответствует символу, передаваемому на квадратурной несущей, вторая – на синфазной.

Модулирующие ЦС должны быть синхронны. Их можно получить из входного ЦС с помощью устройства синхронного деления DD1. При таком делении длительность элемента ЦС на выходе DD1 в два раза больше, чем на входе. Если длительность элемента ЦС на входе модулятора T , то скорость передачи двоичных символов на одной несущей $B = 1/T$. Поскольку модуляция происходит синхронно и изменение начальной

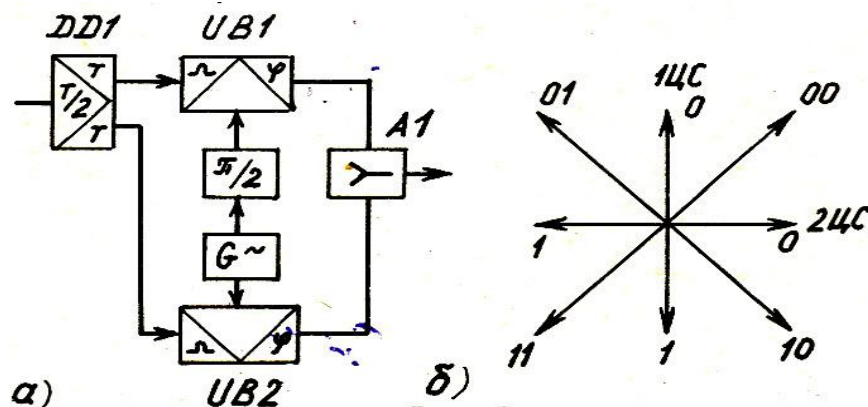


Рис.5.10. Структурная схема модулятора ИКМ-4ФМ и векторная диаграмма

фазы сигнала на выходе передатчика происходит в начале каждого тактового интервала T , то радиоимпульсы на выходе модулятора будут иметь длительность T и необходимая полоса пропускания для цифрового ствола

$$П_{ц} \approx 1/T = B, \text{ Гц.} \quad (5.12)$$

Только теперь за время T передаются

одновременно символы двух цифровых сигналов. Следовательно, скорость передачи четырехуровневого сигнала:

$$C_4 = 2B, \text{ бит/с} \quad (5.13)$$

где B – скорость манипуляции.

В общем случае при M уровнях манипуляции скорость передачи:

$$C_m = B \log_2 M, \text{ бит/с.} \quad (5.14)$$

Применение многоуровневой манипуляции позволяет более эффективно использовать полосу частот ствола. Эффективность использования полосы:

$$\gamma = C_m / B = \log_2 M, \text{ (бит/с)/Гц.} \quad (5.15)$$

Дальнейшее повышение эффективности достигается путем ограничения спектра модулирующего импульса.

Поскольку полоса частот цифрового ствола РРЛ ограничена согласно плану частот, то передача по ним широкополосных цифровых сигналов, например, сигналов третичного цифрового потока, возможна только благодаря применению многоуровневых методов

манипуляции. Следует, однако, помнить, что с ростом M возрастает сложность аппаратуры, а также падает помехозащищенность, поскольку мощность передатчика распределяется теперь между несколькими несущими.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Основные свойства псевдослучайных последовательностей.

Применение ПСП в цифровых системах связи

При испытаниях цифровых линейных трактов и измерении в них коэффициентов ошибок в качестве испытательных цифровых сигналов по ним передаются псевдослучайные последовательности (ПСП). Они являются псевдослучайными в том смысле, что удовлетворяют следующим трем критериям случайности:

- в каждом периоде последовательности число единиц отличается от числа нулей не более чем на единицу (свойство уравнищенности);
- в течение периода последовательности половина серий (т.е. последовательности одинаковых символов) единиц и нулей имеет длину 1, одна четверть – 2, одна восьмая – 3 и т.д., до тех пор, пока это продолжение имеет смысл (свойство серий);
- если последовательность посимвольно сравнивать с любым ее циклическим сдвигом в течение периода этой последовательности, то число совпадений отличается от числа несовпадений не больше, чем на единицу (свойство корреляции).

Широкое применение ПСП обусловлено также и простотой их генерации. Генератор ПСП представляет собой последовательный регистр (регистр сдвига), охваченный логической обратной связью. Хотя ПСП по своим свойствам максимально приближается к случайному цифровому сигналу, тем не менее является детерминированной, периодической последовательностью. Период повторения и структура ПСП определяются длиной регистра генератора и видом функции обратной связи. Наибольший период последовательности, генерируемой n -разрядным регистром сдвига $M = 2^n - 1$, символов. В такой последовательности встречаются все возможные сочетания из n символов (включая серию из n единиц подряд), кроме серии из n нулей.

Рекомендациями МККТТ определено применение в качестве испытательного сигнала для первичных и вторичных цифровых трактов ПСП с периодом повторения $2^{15} - 1$, а для третичных и четверичных – с периодом $2^{23} - 1$.

ПСП в цифровых системах передачи используются также в качестве сигналов дисперсии для рандомизации (придания случайного характера) передаваемого цифрового сигнала, исключения дискретных компонентов в спектре и облегчения условий выделения тактовой частоты.

ПСП используются для шифровки сообщений, могут применяться в качестве адресных и синхронизирующих сигналов, применяются также в качестве шумоподобных сигналов в системе скрытой связи и в системах с многостанционным доступом и разделением сигналов по форме, в радиолокационных дальномерах и т.д.

Генератор ПСП

В макете настоящей лабораторной работы в качестве датчика испытательного цифрового сигнала используется генератор ПСП на четырехразрядном регистре сдвига (рис.5.11).

Регистр сдвига образован ячейками памяти (триггерами) $T_1...T_4$, цепь логической обратной связи – сумматором по модулю два (СМ), входы которого подключены к выходам третьей и четвертой ячеек регистра, а выход – ко входу первой ячейки. Выход сумматора является также и выходом датчика (точка 1). Каждый тактовый импульс вызывает сдвиг хранящейся в регистре информации на одну ячейку вправо (т.е. состояние ячейки T_1 передается в T_2 ; T_2 – в T_3 , а T_3 – в T_4) и запись в первую ячейку информации с сумматора.

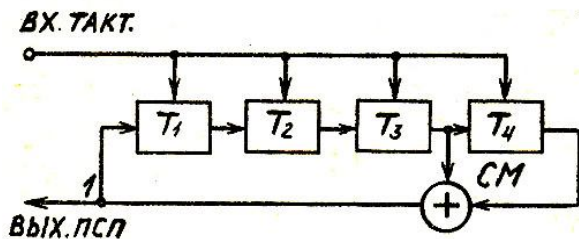


Рис.5.11. Генератор ПСП

Обозначим символ, сформированный сумматором после прихода очередного тактового импульса через S_n (S_n может быть нулем, либо единицей). Тогда, согласно схеме на рис. 5.11, в первой ячейке регистра будет храниться предыдущий символ, т.е. S_{n-1} , во второй S_{n-2} и т.д., а закон формирования последовательности символов датчиком можно записать в виде:

$$S_n = S_{n-3} \oplus S_{n-4} \quad (5.16)$$

Произвольно задавая первоначальным состоянием ячеек регистра, по этой формуле можно рассчитать все последующие их состояния, вид генерируемой последовательности и ее период повторения.

В процессе генерации ПСП регистр «перебирает» в определенном порядке все возможные сочетания символов, кроме сочетания 0000, которое является запрещенным. Если регистр окажется в этом состоянии (что может случиться в первоначальный момент времени после включения питания либо в результате случайного сбоя в его работе), то генерация ПСП прекратится. Возобновить генерацию можно, записав единицу в любую из ячеек регистра. Для этого в датчике предусмотрено специальное устройство (на схеме не показано), автоматически устанавливающее триггер T_1 в единицу при срыве генерации ПСП.

Обнаружитель ошибок

Принцип работы обнаружителя ошибок (рис. 5.12) во многом совпадает с принципом работы датчика ПСП. Как и датчик, обнаружитель содержит четырехразрядный регистр сдвига на триггерах $T_1...T_4$, сумматор по модулю два ($СМ_2$), подключенный к выходам T_3 и T_4 и, кроме того, еще один сумматор ($СМ_1$) по модулю два, один вход которого подключен ко входу регистра, а другой – к выходу $СМ_1$.

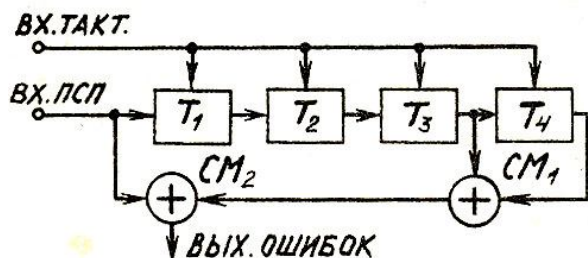


Рис.5.12. Обнаружитель ошибок

На вход регистра поступает ПСП, прошедшая через тракт ЦРРС. Эта последовательность, в отличие от ПСП, сформированной датчиком, может содержать ошибочные символы в отдельных тактовых позициях. Запуск регистров обнаружителя ошибок и датчика ПСП осуществляется с одной и той же тактовой частотой.

Пусть после прихода очередного тактового импульса на входе обнаружителя присутствует символа S_n . Тогда в ячейках T_3 и T_4 хранятся значения предшествующих символов, т.е. S_{n-3} и S_{n-4} . Сумматоры $СМ_1$ и $СМ_2$ формируют сигнал ошибки:

$$S_{\text{ош}} = S_n \oplus S_{n-3} \oplus S_{n-4} \quad (5.17)$$

Если все символы, входящие в правую часть (5.17), приняты безошибочно, т.е. $S_i = S_i$, то согласно (5.16) и (5.17):

$$S_{\text{ош}} = S_n \oplus (S_{n-3} \oplus S_{n-4}) = S_n \oplus S_n = 0 \quad (5.18)$$

Если очередной символ принят неверно, т.е. $S_n = \bar{S}_n$, а предыдущие - правильно, то согласно (5.16) и (5.17) получим:

$$S_{\text{ош}} = \bar{S}_n \oplus (S_{n-3} \oplus S_{n-4}) = \bar{S}_n \oplus S_n = 1 \quad (5.19)$$

Таким образом, принцип обнаружения ошибок в ПСП заключается в следующем: на основании значений предшествующих символов, хранящихся в регистре, в соответствии с правилом формирования ПСП (5.16) сумматором $СМ_1$ предсказывается значение очередного символа. Предсказанное и действительное значения сравниваются в сумматоре $СМ_2$, в результате чего и обнаруживаются ошибки.

Такая схема обнаружения ошибок имеет тот недостаток, что одиночный ошибочный символ регистрируется обнаружителем как три ошибки: первая, когда этот символ сравнивается с правильно предсказанным значением, вторая и третья, когда значение этого символа используется для предсказания значений последующих символов. Однако этот недостаток окупается простотой схемы. Чтобы длительное полное пропадание сигнала на входе обнаружителя фиксировалось как ошибка, в схему обнаружителя введено устройство (на рис. 5.12 не показано), устанавливающее в этом случае триггер T_4 в единицу. При этом ошибка будет фиксироваться в каждой тактовой позиции до тех пор, пока сигнал на входе обнаружителя не появится вновь.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Параметры линейного цифрового сигнала

Одним из основных параметров ЛЦС является скорость передачи, которая определяется числом двоичных единиц (бит), передаваемых за единицу времени.

В соответствии с рекомендацией МККТТ для канала тональной частоты (ТЧ) дискретизация по времени осуществляется через период $T_d = 125$ мкс и каждый временной отсчет передается восьмиразрядным бинарным кодом ($n = 8$). При этом получается, что каждому каналу ТЧ соответствует цифровой канал со скоростью передачи

$$B_k = n/T_d = 64 \cdot 10^3, \text{ бит/с.} \quad (5.20)$$

Для передачи многоканальных сигналов в первичной сети ЕАСС предусмотрен иерархический ряд типовых трактов, характеристика которого приведена в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Типовой цифровой тракт	Аббревиатура	Номинальная скорость передачи, кбит/с	Число каналов ТЧ/канальных интервалов
Первичный	ПЦТ	2048	30/32
Вторичный	ВЦТ	8448	120/132
Третичный	ТЦТ	34368	480/536
Четверичный	ЧТЦ	139264	1920/2176

Иерархией систем цифровой передачи обычно называют семейство систем, цифровой сигнал каждой из которых образуется путем объединения сигналов систем более низкого порядка. Число объединяемых систем называется коэффициентом объединения. Малоканальные цифровые системы передачи, положенные в основу построения систем иерархического ряда, называются первичными. В соответствии с рекомендациями МККТТ, в качестве первичных могут использоваться системы с числом каналов ТЧ $N = 24$ или $N = 30$.

В ЕАСС в качестве первичной выбрана система с $N = 30$ и соответствующая аппаратура ИКМ-30, а коэффициент объединения выбран равным 4.

В системе ИКМ-30 период дискретизации разбивается на 32 канальных интервала, из которых 30 используются для передачи ИКМ сигналов абонентов и два – для передачи сигналов синхронизации и вспомогательных сигналов. При этом скорость передачи сигналов первичной группы оказывается равной:

$$B_1 = 32 B_k = 2048 \text{ кбит/с.} \quad (5.21)$$

Аналогично определены номинальные скорости передачи и число каналов ТЧ для ТЦТ и ЧТЦ в табл. 5.3.

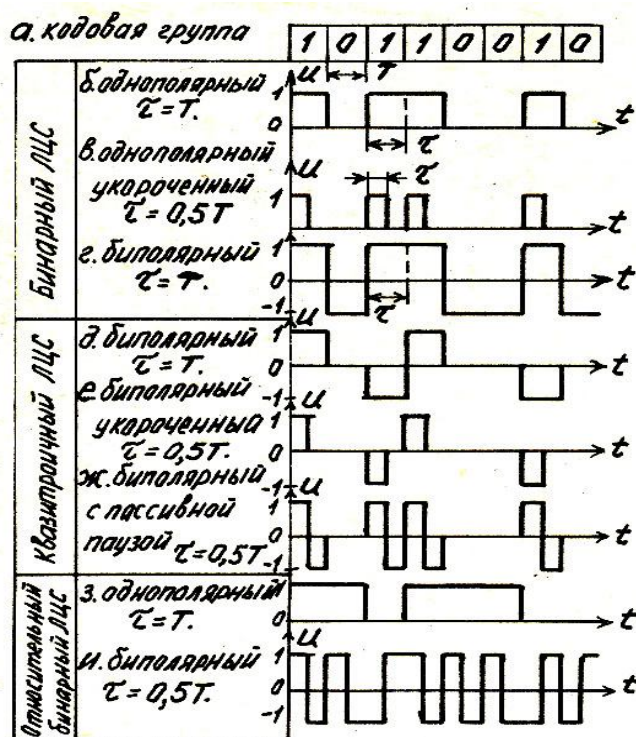


Рис.5.13.ЛЦС в различных кодах

Вторым важным параметром ЛЦС является его спектр. Так как ЛЦС представляет собой случайную последовательность импульсов, то обычно для него рассчитывается энергетический спектр. Энергетический спектр ЛЦС определяется принятым кодом. При формировании ЛЦС применяются бинарные и квазитроичные коды. Модификация ЛЦС в различных кодах показана на рис. 5.13. На рис. 5.13а показана восьмиразрядная кодовая группа, а на рис. 5.13б... и – электрические сигналы, с помощью которых она может передаваться при использовании различных кодов. На рис. 5.13 обозначено τ – длительность импульса сигнала; T – длительность символа в кодовой группе (тактовый интервал); U – относительная амплитуда импульса.

На рис. 5.13 б показан бинарный ЛЦС при использовании однополярных импульсов, а на рис. 5.13 г – при импульсах разной полярности. На каждом тактовом интервале бинарный ЛЦС может принимать одно из двух возможных значений: (+1, 0) для вариантов рис. 5.13б,в и (+1, -1) при двухполярном ЛЦС. Примеры квазитроичных ЛЦС приведены на рис. 5.13 д...ж. На рис. 5.13 д...е показаны сигналы квазитроичного кода с чередующейся полярностью. В этом случае символы 0 кодируются отсутствием импульсов, и символы 1 поочередно импульсами положительной и отрицательной полярности. Полярность первого импульса устанавливается произвольно. На рис. 5.13 ж показан ЛЦС при другом варианте кодирования, при котором каждая 1 передается в виде бимпульса. Заметим, что при любом варианте квазитроичного кода ЛЦС представляет собой трехсимвольную импульсную последовательность (-1, 0, +1). В то же время кодирование в аппаратуре ИКМ остается двоичным (передается двоичная кодовая группа).

Помимо рассмотренных методов кодирования ЛЦС, интерес представляет относительный бинарный код. Относительное бинарное кодирование возможно как при однополярном, так и при биполярном сигнале. В процессе кодирования однополярных импульсов происходит изменение их относительной амплитуды (возможные значения 1 или 0), биполярные импульсы кодируются изменением их полярности. Алгоритм кодирования сводится к следующему. Изменяемый параметр импульсов (амплитуда или полярность) при передаче первого символа ЛЦС устанавливается произвольно. Затем при передаче символа 0 кодовой группе он сохраняется таким же, как и для предшествующего символа, а при передаче 1 изменяется на противоположный. Относительный бинарный ЛЦС показан на рис. 5.13з с использованием однополярных импульсов и на рис. 5.13и с использованием биполярных импульсов.

Энергетический спектр однополярного сигнала в общем случае состоит из постоянной составляющей, непрерывной части и дискретный компонент на частотах $F_d = m F_T$, где F_T – тактовая частота, $F_T = 1/T$; $m = 1, 2, 3$ и т.д. Огибающая непрерывной составляющей имеет вид функции $[\sin(\pi F_T \tau) / (\pi F_T \tau)]^2$ и, следовательно, обращается в ноль на частотах $F_H \tau = 2m$.

Однако спектр однополярного сигнала, показанный на рис.5.13б при $\tau = T$, дискретных компонент не содержит, поскольку для него совпадают частоты $F_H = F_d$

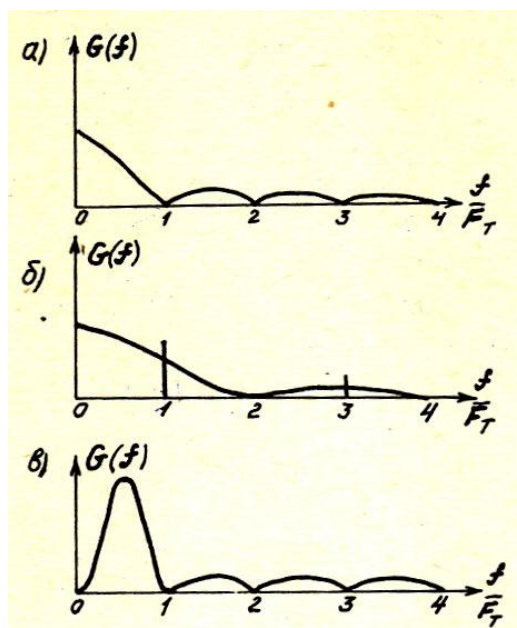


Рис.5.14.Энергетические спектры ЛЦС

Энергетический спектр такого сигнала имеет вид, показанный на рис. 5.14 а. В спектре укороченного однополярного сигнала $\tau = 0,5 T$ появляются дискретные компоненты на тактовой частоте и ее нечетных гармониках. Энергетический спектр такого сигнала имеет вид, показанный на рис. 5.14 б. Энергетический спектр квазитроичного сигнала не содержит дискретных компонент и постоянной составляющей, а энергия его непрерывной части сконцентрирована в области частот, близких к $0,5 F_T$, как показано на рис. 5.14 в. Выбор кода ЛЦС определяется особенностями передачи его по соединительным линиям, в качестве которых используются симметричные или коаксиальные кабели.

При передаче по кабельным линиям ЛЦС искажается. Искажения возникают из-за ограничения полосы в линейном тракте как со стороны нижних частот (из-за наличия переходных конденсаторов и согласующих трансформаторов), так и со стороны верхних частот (как известно с ростом частоты увеличивается затухание кабеля). Поэтому целесообразно выбрать такой ЛЦС, который имеет наиболее узкий спектр и не содержит постоянной составляющей. Кроме того, для работы цепей синхронизации, необходимо предусмотреть возможность выделения из ЛЦС колебаний тактовой частоты. Поэтому выбор метода кодирования ЛЦС в первую очередь определяется его спектром.

Можно отметить как недостаток бинарных ЛЦС и относительных бинарных, использующих однополярные импульсы, наличие в их спектре постоянной составляющей и значительную мощность низкочастотных составляющих спектра. Присутствие в спектре бинарного ЛЦС с укороченными импульсами дискретной составляющей с тактовой частотой позволяет достаточно просто с помощью полосового фильтра выделить ее для целей синхронизации. Для выделения сигнала синхронизации из квазитроичного ЛЦС последний выпрямляется. В результате получается однополярная последовательность со спектром, показанным на рисунке 5.14 б, из которой колебания тактовой частоты выделяются с помощью фильтра.

В качестве ЛЦС в ПЦТ и ВЦТ используется квазитроичная последовательность импульсов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Цифровые радиорелейные системы «Радан-МС», «Радан-МГ», «Пихта-2», «Ракита-8»

Основные технические характеристики серийно выпускаемых в России ЦРРС приведены в табл 5.4. ЦРРС «Радан-МС» и «Радан-МГ» являются дальнейшим развитием аппаратуры «Радан-2». Системы предназначены для организации пучков соединительных линий между сельскими («Радан-МС») и городскими («Радан-МГ») АТС. Система «Радан-МС» может также использоваться для непосредственного подключения к АТС удаленной группы абонентов.

Существенным отличием ЦРРС «Радан-МС» от предшествующей «Радан-2» [3] является применение нового поколения аппаратуры системы передачи типа ИКМ-15/30 «Кедр», что позволяет организовать в стволе 15 или 30 каналов тональной частоты (ТЧ) или основных цифровых каналов (ОЦК). ЦРРС «Радан-МГ» имеет еще более существенные отличия. В ее состав входят радиооборудование (РО) и устройство сопряжения (УС), которые в зависимости от модификации позволяют передавать между АТС от двух до четырех синхронно объединяемых первичных цифровых потоков (УС-120П) или от двух до 16 таких же потоков (УС-480П) в каждом радиостволе. В состав УС входят также модуляторы и демодуляторы, что позволяет упростить РО и повысить его надежность. Связь между РО и УС осуществляется сигналом промежуточной частоты 70 МГц по коаксиальным кабелям с затуханием до 38 дБ.

Для уменьшения необходимой полосы частот и снижения внеполосных излучений на передаче используется четырехуровневая частотная модуляция (частота выбирается так, чтобы набег фазы сигнала за длительность сигнала был кратен 90 градусам). Это позволяет применять на приеме автокорреляционный фазовый детектор для получения хорошей помехозащищенности. Такой метод модуляции-демодуляции получил наименование 4-ЧФМ.

Таблица 5.4

Технические характеристики	Аппаратура			
	«Пихта-2»	«Ракита-8»	«Радан-МС»	«Радан-МГ»
Диапазон рабочих частот, ГГц	1,7...2,1	7,9...8,4	10,7...11,7	10,7...11,7
Скорость передачи цифрового сигнала в стволе, Мбит/с	2,048	34,368	1,024 / 2,048	8,192 / 32,768
Количество стволов	1 или 2	1 или 2	2	2
Вид модуляции	2-ОФМ	4-ОФМ-0	2-ЧМ	4-ЧФМ
Метод демодуляции	когерентный	когерентный	некогерентный, ЛЧД	автокорреляционный
Мощность передатчика, Вт, не менее	0,5	0,75/0,37/0,125	0,075	0,05
Коэффициент шума приемника, дБ, не более	3,5	7,5	8,5	8,5
Потери в системе разделения стволов, дБ	1	2	1	1
Коэффициент усиления антенны, дБ	25	41 / 44 / 45	39	40 / 43,5
Пороговый уровень сигнала на входе приемника при $K_{\text{ош}} = 10^{-3}$, дБВт	-124	- 109	- 120	-112 / -106

ЦРРС «Пихта-2» предназначена для построения цифровых РРЛ для сельской сети межстанционной телефонной связи, а также для сетей внутризоновой и технологической связи на транспорте, в энергосистемах и других отраслях промышленности. В состав основного оборудования «Пихта-2» входят: антенно-фидерное мачтовое устройство (АФМУ) «Шпора-2»; универсальный приемопередатчик ПмПд-2П; устройство окончания линейного тракта оконечной станции ОЛТ-0; устройство окончания линейного тракта промежуточной станции с выделением каналов ОЛТ-П; прямо-передатчик ПмПд-2П-С (для ПРС без выделения каналов); переносное устройство служебной связи и контроля ССК. Важная особенность оборудования «Пихта-2» - использование кабеля КСППБ для передачи цифрового сигнала в квазитрочном коде от ОЛТ к передатчику вместе с передачей ФМ сигнала второй промежуточной частоты 10,7 МГц в обратном направлении от приемника к ОЛТ. Благодаря этому удалось перенести наиболее чувствительный к изменению температуры когерентный демодулятор ОФМ сигнала в устройство ОЛТ,

размещаемое в отапливаемых помещениях, и тем самым повысить устойчивость работы линии связи. Приемопередатчики «Пихта-2» рассчитаны на работу в диапазоне температур от -50 до + 50° С и подвешиваются на высоте около 3 м на опорной ферме АФМУ. Длина кабеля КСППБ между ОЛТ и ПмПд может достигать 2 км.

РРС «Ракита-8» представляет собой модернизированный вариант аппаратуры «КУРС-8-ОУ». Приемопередающее оборудование «Ракита-8» выпускается в нескольких модификациях, одна из которых совместно со специальной оконечной аппаратурой ОЦФ-34 позволяет создавать внутризональные цифровые РРЛ. Статив ОЦФ-34 осуществляет регенерацию цифрового сигнала, дискретную фазовую модуляцию и демодуляцию сигнала ПЧ 70 МГц, резервирование по схеме 1+1 в ручном или автоматическом режимах, контроль коэффициента ошибок без перерыва связи. Статив содержит два комплекта цифрового оборудования, а также устройства резервирования и контроля. Особенностью модификации приемо-передающего оборудования является наличие специального демодулятора сигналов служебной связи. Типовые проектные решения, разработанные для строительства РРЛ «КУРС-8-ОУ» пригодны и для РРЛ «Ракита-8» (при соответствующей замене приемо-передающей аппаратуры).

Расчет минимально допустимого множителя ослабления

Минимально допустимый множитель ослабления находится по соотношению

$$V_{\text{доп}} = P_{\text{с. вх. доп.}} - P_{\text{с. вх. 0}}, \text{ дБ}, \quad (5.22)$$

где $P_{\text{с. вх. доп}}$ – минимально допустимый (пороговый) уровень мощности сигнала на входе приемника, при котором коэффициент ошибок не превышает заданного допустимого значения (обычно 10^{-3}), $P_{\text{с.вх.0}}$ – медианный уровень мощности сигнала на входе приемника.

В таком соотношении $P_{\text{с. вх. доп}}$ берется их технических характеристик аппаратуры, $P_{\text{с. вх. 0}}$ – рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{с. вх. 0}} = P_{\text{п}} + g_{\text{п}} + g_{\text{пр}} - 20 \lg (4\pi R/\lambda) - a_{\text{ф.сум}} + V(50\%), \text{ дБВт}, \quad (5.23)$$

где $P_{\text{п}}$ – уровень мощности сигнала на выходе передатчика, дБВт;

$g_{\text{п}}$, $g_{\text{пр}}$ – коэффициенты усиления антенн передающей и приемной станции, дБ;

R – длина пролета РРЛ, м; $a_{\text{ф.сум}}$ – потери в антенно-фидерном тракте на пролете РРЛ, дБ;

λ – длина волны, соответствующая середине диапазона рабочих частот РРЛ, м;

$V(50\%)$ – медианное значение множителя ослабления.

Для открытых трасс можно считать, что $V(50\%) = 0$ дБ.

Энергетический запас на неидеальности аппаратуры

Вероятность ошибочного приема символа в ЦРРС зависит от соотношения сигнал-шум на входе приемника, метода модуляции и способа обработки сигнала в приемнике, а также степени приближения реальных характеристик аппаратуры к идеальным. Причинами снижения помехозащищенности реальной ЦРРС по сравнению с идеальной обычно являются неточность работы модулятора, неточность восстановления фазы несущей в демодуляторе, фазы сигнала тактовой частоты в регенераторе, неточность поддержания оптимального порога срабатывания решающего устройства, неоптимальность фильтрации сигнала, приводящая к межсимвольным искажениям или

расширению шумовой полосы пропускания приемника. Влияние этих погрешностей усугубляется наличием нестабильности несущей и тактовой частот цифрового радиосигнала. Заметное влияние на режимы работы модулятора, демодулятора и регенератора оказывает изменение температуры окружающей среды.

Качество аппаратуры, т.е. степень ее приближения к идеальной, принято характеризовать величиной энергетических потерь (энергетического запаса на неидеальности):

$$\Delta h = q_{т.вх} - h_{ид}, \text{ дБ}, \quad (5.24)$$

где $q_{т.вх}$ – величина отношения сигнал-шум на входе реального приемника, необходимая для достижения заданной величины коэффициента ошибок (обычно 10^{-3});

$h_{ид}$ – расчетное соотношение сигнал-шум, необходимое для достижения заданной величины коэффициента ошибок при идеальной реализации алгоритмов обработки сигнала (модуляции, демодуляции, фильтрации и регенерации).

Обычно соотношение сигнал-шум определяется в полосе частот, численно равной скорости модуляции

$$П_{ш} = C / \log_2 M, \text{ Гц}, \quad (5.25)$$

где C – скорость передачи ЦС, бит/с;

M – число уровней модуляции.

Отношение сигнал-шум для реального приемника можно рассчитать, зная его технические характеристики:

$$q_{т.вх} = P_{с.вх.доп.} - P_{ш.вх}, \text{ дБ}, \quad (5.26)$$

где $P_{ш.вх}$ – уровень мощности шумов, приведенных ко входу приемника в полосе $П_{ш}$:

$$P_{ш.вх} = 10 \lg (kT_0 П_{ш}) + n_{ш}, \text{ дБВт}, \quad (5.27)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц К;

$T_0 = 290\text{К}$;

$n_{ш}$ – коэффициент шума приемника, дБ.

Отношение сигнал-шум для идеального приемника определяется из учебника или справочника по кривым зависимости вероятности ошибок от отношения сигнал-шум.

Можно считать, что для системы «Радан - МГ» $h_{ид} = 13$ дБ.