

Федеральное агентство связи
Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования

«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

Кафедра радиосвязи, радиовещания и телевидения

Иванова В.Г.

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

к лабораторным занятиям по дисциплине

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Часть 3

для студентов специальности 210700
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
Квалификация выпускника – магистр

Самара
ПГУТИ
2014г.

РАБОТА №9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ И ЦИФРОВОГО ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛА БИНАРНОЙ ФАЗОРАЗНОСТНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение алгоритмов функционирования цифрового формирователя и цифрового демодулятора сигнала бинарной фазоразностной манипуляции DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying). Овладение методикой моделирования цифровых узлов обработки сигналов на ЭВМ.

2. ЛИТЕРАТУРА

1. Приложение к лабораторной работе
2. В.Г.Иванова, А.И.Тяжев. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры, Самара, 2008г.

3. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Изучите указанную в разделе 2 литературу и ответьте на контрольные вопросы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните сущность бинарной фазоразностной манипуляции, используя временные диаграммы модулирующего и модулированного сигнала.

2. Начертите схему нерекурсивного цифрового фильтра. Что такое фильтр «корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом скругления α » (« $\sqrt{\alpha}$ »)?

3. Приведите укрупненный алгоритм функционирования формирователя сигнала DBPSK. Поясните назначение основных узлов формирователя.

4. Приведите укрупненный алгоритм функционирования автокорреляционного демодулятора сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом стробирования. Поясните назначение основных узлов демодулятора.

5. Приведите укрупненный алгоритм функционирования автокорреляционного демодулятора сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования. Поясните назначение основных узлов демодулятора.

6. Каково назначение блока синхронизации в демодуляторе с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом стробирования?

7. Каково назначение блока синхронизации в демодуляторе с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования?

8. Какие функциональные узлы входят в состав блока синхронизации и каков принцип их работы?

9. Начертите схему и поясните принцип работы автокорреляционного детектора сигнала DBPSK.

10. Поясните алгоритм определения количества ошибок при приеме дискретных сигналов.

5. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Рассчитайте ФНЧ с АЧХ типа « $\sqrt{\alpha}$ ». Расчет выполняется по программе «Корень из альфа».

Исходными данными для расчета являются:

- F_d - частота дискретизации в кГц,
- F_g – граничная частота полосы пропускания фильтра в кГц,
- α - коэффициент скругления АЧХ,
- $A_{z_{дв}}$ – ослабление в полосе задерживания в дБ.

Значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номер бригады	Fd кГц	v кбит/с	Fg кГц	α	Az дБ
1	12	1.2	1.2	0,30	30
2	48	4.8	3.6	0,30	38
3	76.8	9.6	9.6	0,20	36
4	38.4	4.8	4.8	0,40	30
5	153.6	19.2	14.4	0,40	34
6	9.6	1.2	1.0	0,25	38

Результатом расчета являются длина линии задержки и коэффициенты системной функции фильтра.

2. Сформируйте испытательный сигнал в виде случайной последовательности элементарных посылок, следующих со скоростью v кбит/с.

3. Выполните моделирование формирователя сигнала DBPSK при условии, что частота несущей равна четверти частоты дискретизации, а в качестве модулирующего сигнала используется выходной сигнал ФНЧ типа « $\sqrt{\alpha}$ » при подаче на вход фильтра испытательного сигнала.

4. Выполните моделирование автокорреляционного демодулятора сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования.

5. Оцените помехоустойчивость демодулятора при действии на его входе наряду с полезным сигналом гауссова шума при отношениях сигнал/шум 3 дБ и 4 дБ. Для этого организуйте два канала: первый содержит демодулятор, на входе которого действует только полезный сигнал, а второй содержит демодулятор, на входе которого наряду с сигналом действует шумовая помеха. Выходные сигналы двух каналов должны сравниваться в середине элементарной посылки счетчиком ошибок. Если знаки элементарных посылок на выходах двух каналов не совпадают, то показание счетчика ошибок должно увеличиваться на единицу. Количество ошибок нужно определить при передаче 10000 элементар-

ных посылок. Пронаблюдайте временную диаграмму работы счетчика ошибок.

6. Выполните моделирование автокорреляционного демодулятора сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом стробирования выходного сигнала детектора в середине элементарной посылки.

7. Повторите эксперимент п.4 для демодулятора п.5.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- укрупненные алгоритмы функционирования формирователя и демодуляторов сигнала DBPSK,
- программу и результаты моделирования формирователя и демодуляторов в виде временных и спектральных диаграмм,
- временную диаграмму работы счетчика ошибок и результаты оценки помехоустойчивости демодуляторов,
- вывод о влиянии ФНЧ формирователя на спектр выходного сигнала,
- вывод о помехоустойчивости демодуляторов сигнала DBPSK при использовании методов стробирования и интегрирования элементарных посылок сигнала на выходе автокорреляционного детектора.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Выполните синтез ФНЧ типа « $\sqrt{\alpha}$ ». Для этого в программной среде Mathcad создайте файл и скопируйте в него программу «Корень из альфа». Введите в программу исходные данные из таблицы 1 и задайте значение половины длины линии задержки K_0 (например, 20).

Если пульсации реальной АЧХ $K_F(N)$ превысят уровень $1/A_z$, то нужно увеличить K_0 . Если пульсации АЧХ окажутся значительно меньше этого уровня, то K_0 можно уменьшить.

2. Сформируйте испытательный сигнал. Для этого введите значение скорости манипуляции v из таблицы 1 и определите количество отсчетов n_v в элементарной посылке

$$n_v := \frac{Fd}{v}$$

Введите максимальный номер отсчета

$$n_{\max} := n_v \cdot 10000 + 4 \cdot K0$$

Выполните моделирование счетчика отсчетов с переменной q_n и сформируйте последовательность единичных отсчетов I_n на границах элементарных посылок

$$q_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$q_n := \text{if}(q_{n-1} + 1 < n_v, q_{n-1} + 1, 0)$$

$$I_n := \text{if}(q_n = 0, 1, 0)$$

Выведите график зависимости I_n от n . Пронаблюдайте 200..400 отсчетов этой последовательности, начиная с $n=4 \cdot K0$.

Сформируйте случайную последовательность элементарных посылок, используя функцию генерирования равномерно распределенного случайного числа между нулем и единицей $\text{rnd}(1)$

$$x_0 := 1$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$x_n := \text{if}(I_n > 0, \text{if}(\text{rnd}(1) \geq 0.5, 1, -1), x_{n-1})$$

Пронаблюдайте временную диаграмму испытательного сигнала – зависимость x_n от n . Временной интервал наблюдаемых отсчетов на этом и последующих графиках должен быть таким же, как на предыдущем графике.

3. Моделирование формирователя сигнала DBPSK

3.1. Выполните моделирование блока перекодирования

$$X_{p0} := 1$$

$$X_{pn} := \text{if}(I_n > 0, \text{if}(x_n \cdot X_{pn-1} < 0, -1, 1), X_{pn-1})$$

Приведите временную диаграмму перекодированного сигнала.

3.2. Выполните фильтрацию перекодированного сигнала в ФНЧ с АЧХ « $\sqrt{\alpha}$ »

$$n := 2K_0 .. n_{\max}$$

$$y_{F_n} := B_0 \cdot X_{p_{n-K_0}} + \sum_{k=1}^{K_0} [B_k \cdot (X_{p_{n-K_0+k}} + X_{p_{n-K_0-k}})]$$

Приведите временную диаграмму сигнала на выходе фильтра.

3.3. Рассчитайте константу, определяющую частоту колебаний несущей. Так как частота несущей равна четверти частоты дискретизации, то количество отсчетов в периоде несущей равно

$$n_0 := 4.$$

При этом константа, определяющая частоту несущей равна

$$A_0 := \frac{2}{n_0}.$$

Выполните моделирование генератора синусоидальной несущей на основе генератора пилы

$$z_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$z_n := \text{if}(z_{n-1} + A_0 < 1, z_{n-1} + A_0, z_{n-1} + A_0 - 2)$$

$$x_{0_n} := \sin(\pi \cdot z_n)$$

3.4. Сформируйте сигнал бинарной фазоразностной манипуляции и приведите его временную диаграмму

$$y_n := x_{0_n} \cdot y_{F_n}$$

Определите среднеквадратический уровень сигнала формирователя

$$\sigma_c := \sqrt{\frac{\sum_{n=4 \cdot K_0}^{n_{\max}} (y_n)^2}{n_{\max} - 4 \cdot K_0}}$$

3.5. Для определения спектра сигнала создайте массив, содержащий 2^{11} отсчетов сигнала y_n

```

Imax := 2047
i := 0 .. Imax
Xmi := ynmax - Imax + i

```

Воспользовавшись функцией прямого быстрого преобразования Фурье, определите массив отсчетов спектра сигнала.

```

Sp := FFT(Xm)
Kmax :=  $\frac{I_{\max} + 1}{2}$ 
k := 0 .. Kmax

```

Выведите график зависимости модуля отсчета спектральной плотности $|S_{p_k}|$ от нормированной частоты $k/(2 \cdot K_{\max})$.

По графику определите максимальное значение модуля отсчета спектральной плотности $S_{p_{\max}}$ и постройте график зависимости $|S_{p_k}|/S_{p_{\max}}$ от нормированной частоты $k/(2 \cdot K_{\max})$.

3.6. Сформируйте сигнал бинарной фазовой манипуляции при отсутствии ФНЧ « $\sqrt{\alpha}$ »

$$y_{0n} := x_{0n} \cdot X_{p_n}$$

3.7. Определите спектр сигнала y_{0n} , воспользовавшись методикой, приведённой в п.3.5. Постройте график зависимости $|S_{p_k}|/S_{p_{\max}}$ от нормированной частоты $k/(2 \cdot K_{\max})$.

Запишите в отчет вывод о влиянии ФНЧ на спектр сигнала BPSK.

4. Моделирование демодулятора сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования

4.1. Моделирование демодулятора начинается с построения автокорреляционного детектора.

Подайте выходной сигнал формирователя y_n на вход детектора

$$x_{d_n} := y_n$$

Определите сигнал на выходе перемножителя входного сигнала детектора и сигнала, задержанного на длительность элементарной посылки.

$$n := 0..n_v - 1$$

$$y_{d_n} := 0$$

$$L := 2 \cdot \frac{n_v}{n_0}$$

$$n := n_v..n_{max}$$

$$y_{d_n} := (-1)^L \cdot (x_{d_n} \cdot x_{d_{n-n_v}})$$

Определите сигнал на выходе ФНЧ типа « $\sqrt{\alpha}$ », устраняющего высокочастотные пульсации на выходе детектора и обеспечивающего помехоустойчивость системы синхронизации

$$n := 2K_0..n_{max}$$

$$v_{F_n} := B_0 \cdot y_{d_{n-K_0}} + \sum_{k=1}^{K_0} [B_k \cdot (y_{d_{n-K_0+k}} + y_{d_{n-K_0-k}})]$$

Приведите временные диаграммы сигналов на выходе перемножителя и на выходе ФНЧ детектора.

4.2. Выполните моделирование блока синхронизации.

Определите сигнал на выходе выделителя фронтов элементарных посылок

$$I_{F_n} := \text{if} \left[\left(v_{F_n} \cdot v_{F_{n-1}} < 0 \right) + \left(v_{F_n} = 0 \right), 1, 0 \right]$$

Введите константу A_{g0} , определяющую начальное значение частоты пилообразного колебания, и константу управления R

$$A_{g0} := \frac{2}{n_v}$$

$$R := 0.1 \cdot A_{g0}$$

Сформируйте пилообразное колебание, фаза которого подстраивается единичными отсчетами с выхода выделителя фронтов

$$z_g := \left| \begin{array}{l} A_g \leftarrow A_{g0} \\ z_{g0} \leftarrow 0 \\ \text{for } n \in 1 .. n_{\max} \\ \left| \begin{array}{l} z_{g_n} \leftarrow \text{if} \left(z_{g_{n-1}} + A_g < 1, z_{g_{n-1}} + A_g, z_{g_{n-1}} + A_g - 2 \right) \\ A_g \leftarrow A_{g0} - R \cdot z_{g_n} \text{ if } I_{F_n} > 0 \end{array} \right. \\ z_g \end{array} \right.$$

Получите последовательность единичных отсчетов на границах элементарных посылок

$$I_{g_n} := \text{if} \left[\left[\left(z_{g_n} \cdot z_{g_{n-1}} < 0 \right) \cdot \left(z_{g_n} > 0 \right) + \left(z_{g_n} = 0 \right) \right], 1, 0 \right]$$

На одном графике покажите последовательности отсчетов I_{g_n} и I_{F_n} .

4.3. Определите сигнал на выходе интегратора

$$\text{Int}_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$\text{Int}_n := \text{if} \left(I_{g_n} > 0, 0, \text{Int}_{n-1} + v_{F_n} \right)$$

Приведите временную диаграмму выходного сигнала интегратора.

4.4. Выполните моделирование формирователя элементарных посылок

$$\begin{aligned} X_0 &:= 0 \\ n &:= 1 .. n_{\max} \\ X_n &:= \text{if}(I_{g_n} > 0, \text{if}(I_{n-1} < 0, -1, 1), X_{n-1}) \end{aligned}$$

Приведите временную диаграмму сигнала на выходе демодулятора X_n . На этом же графике покажите сигнал на входе формирователя.

Поскольку сигнал на выходе демодулятора отстает от переданного сигнала на входе формирователя x_n , то для их одновременного наблюдения нужно задержать сигнал x_n на n_z отсчетов, т.е. наблюдать сигнал x_{n-n_z} , где

$$n_z := 2 \cdot K_0 + n_v$$

Убедитесь в том, что в установившемся режиме принятый сигнал совпадает с переданным.

5. Исследование помехоустойчивости демодулятора сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования

Сформируйте последовательность стробирующих отсчетов в середине элементарных посылок

$$\begin{aligned} m &:= \text{floor}\left(\frac{n_v}{2}\right) \\ n &:= m .. n_{\max} \\ I_{\text{str}_n} &:= I_{g_{n-m}} \end{aligned}$$

Задайте отношение сигнал/шум в децибелах

$$S_N := 3$$

Определите среднеквадратический уровень шума

$$\sigma_{sh} := \sigma_c \cdot 10^{\frac{-S_N}{20}}$$

Сформируйте массив отсчетов гауссова шума

$$Sh := rnorm(n_{max} + 1, 0, \sigma_{sh})$$

Аргументами функции `rnorm` являются количество отсчетов $n_{max} + 1$, среднее значение отсчетов шума (ноль) и среднеквадратический уровень шума σ_{sh} .

Пронаблюдайте временную диаграмму шума – зависимость Sh_n от n .

Сформируйте входной сигнал автокорреляционного детектора с учетом шума

$$x_{d_n} := y_n + Sh_n$$

Скопируйте программу реализации демодулятора, заменив в выражении для сигнала на выходе формирователя X_n на Xsh_n

$$Xsh_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{max}$$

$$Xsh_n := \text{if}(I_{gn} > 0, \text{if}(I_{nt_{n-1}} < 0, -1, 1), Xsh_{n-1})$$

Выведите временную диаграмму сигнала на выходе демодулятора вместе с сигналом на входе формирователя.

Введите программу реализации счетчика ошибок

$$O_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{max}$$

$$O_n := \text{if}(n > 4 \cdot K_0, \text{if}(I_{str_n} > 0, \text{if}(X_n \cdot Xsh_n < 0, O_{n-1} + 1, O_{n-1}), O_{n-1}), O_{n-1})$$

Приведите временную диаграмму работы счетчика.

Занесите полученное количество ошибок в таблицу 2.

При переходе к следующему эксперименту выделите соотношение, задающее отношение сигнал/шум, и нажмите на клавишу «F9». При этом будет сформирована новая последовательность отсчетов шума.

Таблица 2а

Номер эксперимента i	Количество ошибок на 10000 посылок O_i	
	Сигнал/шум - 3 дБ	Сигнал/шум- 5 дБ
1		
...
10		

После выполнения десяти экспериментов при отношении сигнал/шум 3дБ определите среднее арифметическое значение количества ошибок O_{cp} и нижнюю и верхнюю границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0.9. Методика определения доверительного интервала описана в ПРИЛОЖЕНИИ А к лабораторной работе.

Аналогичным образом выполните эксперименты 1-10 при отношении сигнал/шум 5дБ. Найдите среднее значение количества ошибок и границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0.9.

6. Скопируйте первую часть разработанной программы (до демодулятора с шумом) в новый файл и измените демодулятор: удалите интегратор и формирователь. Вместо формирователя, определяющего знак элементарной посылки по выходному сигналу интегратора в конце интервала интегрирования, введите формирователь, который определяет знак в середине элементарной посылки на выходе детектора в момент действия стробирующего отсчета.

Последовательность стробирующих отсчетов получается путем задержки последовательности отсчетов на границах элементарных посылок на m отсчетов, где m – половина количества отсчетов в элементарной посылке

Функция $\text{floor}(x)$ возвращает наибольшее целое число, меньшее или равное x .

Следующие соотношения формируют последовательность стробирующих отсчетов:

$$m := \text{floor}\left(\frac{n_V}{2}\right)$$

$$n := m .. n_{\max}$$

$$\text{Istr}_n := \text{I}g_{n-m}$$

Для реализации формирователя элементарных посылок введите следующие соотношения

$$X_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$X_n := \text{if}\left(\text{Istr}_n > 0, \text{if}\left(v_{F_n} < 0, -1, 1\right), X_{n-1}\right)$$

Для одновременного наблюдения выходного сигнала демодулятора X_n и сигнала на входе формирователя x_n задержите сигнал x_n на nz отсчетов,

где

$$nz := 2 \cdot K_0 + m$$

На одном графике приведите временные диаграммы сигналов X_n и x_{n-nz} .

7. Исследование помехоустойчивости демодулятора сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом стробирования

Сформируйте последовательность стробирующих отсчетов в середине элементарных посылок

$$n := m .. n_{\max}$$

$$\text{Istr}0_n := \text{Istr}_{n-m}$$

Задайте отношение сигнал/шум в децибелах, например,

$$S_N := 3$$

Определите среднеквадратический уровень шума

$$\sigma_{sh} := \sigma_c \cdot 10^{\frac{-S_N}{20}}$$

Сформируйте массив отсчетов гауссова шума.

$$Sh := \text{rnorm}(n_{\max} + 1, 0, \sigma_{sh})$$

Сформируйте входной сигнал автокорреляционного детектора с учетом шума

$$x_{d_n} := y_n + Sh_n$$

Скопируйте программу реализации демодулятора, заменив в выражении для сигнала на выходе формирователя X_n на Xsh_n

$$Xsh_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$Xsh_n := \text{if}(Istr_n > 0, \text{if}(v_{F_n} < 0, -1, 1), Xsh_{n-1})$$

Приведите временные диаграммы сигналов Xsh_n и x_{n-nz} .

Введите счетчик ошибок

$$O_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$O_n := \text{if}(n > 4 \cdot K_0, \text{if}(Istr_n > 0, \text{if}(X_n \cdot Xsh_n < 0, O_{n-1} + 1, O_{n-1}), O_{n-1}), O_{n-1})$$

Приведите временную диаграмму работы счетчика.

Занесите полученное количество ошибок в таблицу 2б, которая по форме совпадает с таблицей 2а.

Найдите среднее значение количества ошибок O_{cp} , нижнюю и верхнюю границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0.9.

Повторите все операции при отношении сигнал/шум 5дБ.

Запишите в отчет вывод о влиянии способа формирования элементарных посылок выходного сигнала демодулятора на его помехоустойчивость.

Исследование цифрового формирователя и цифрового демодулятора сигнала бинарной фазовой манипуляции

1. Принцип бинарной фазоразностной манипуляции

При фазоразностной манипуляции информация заложена в разности фаз между текущей посылкой сигнала и предыдущей.

Существует два способа формирования сигнала фазоразностной манипуляции (ФРМ, DBPSK – Differential Binary Phase Shift Keying):

- имеет место скачок фазы на границе элементарных посылок на 180 градусов, если следующая посылка отрицательна (рисунок П.1а);
- имеет место скачок фазы на границе элементарных посылок на 180 градусов, если следующая посылка положительна (рисунок П.1б).

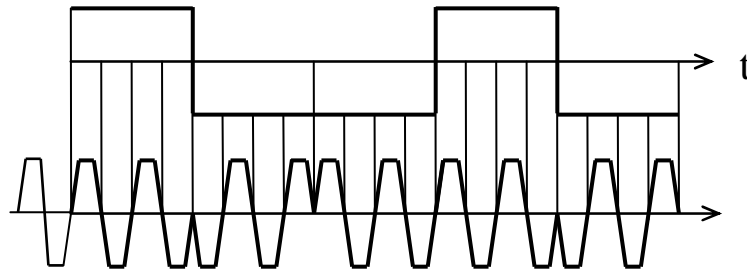


Рисунок П.1а – Формирование сигнала ФРМ (способ 1)

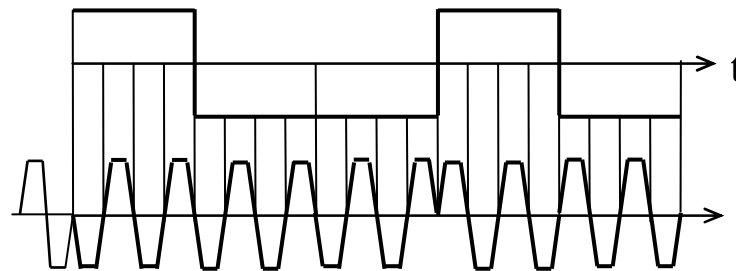


Рисунок П.1б – Формирование сигнала ФРМ (способ 2)

2. Формирование сигнала DBPSK с использованием перекодирования передаваемого сигнала

На рисунке П.2 приведены временные диаграммы формирования сигнала бинарной фазоразностной манипуляции.

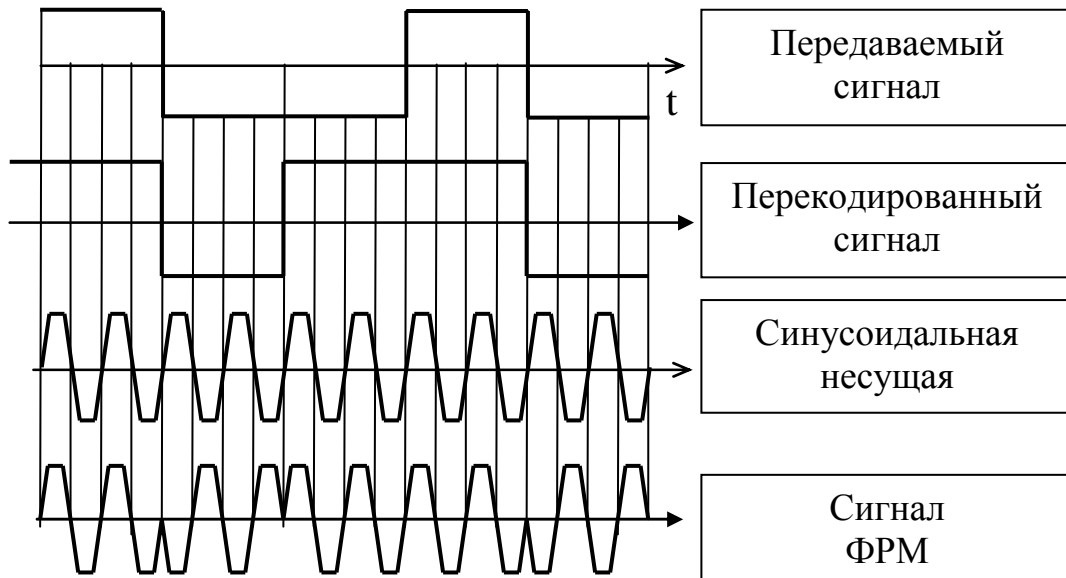


Рисунок П.2 – Формирование сигнала ФРМ с использованием метода перекодирования передаваемого сигнала

Перекодированный сигнал формируется следующим образом: если знак текущей посылки передаваемого сигнала совпадает со знаком предыдущей посылки перекодированного сигнала, то формируется положительная текущая посылка перекодированного сигнала. В противном случае формируется посылка негатива перекодированного сигнала. На рисунке П.2 начальное значение перекодированного сигнала положительно, поэтому первой посылке позитива передаваемого сигнала соответствует посылка позитива перекодированного сигнала. Вторая посылка передаваемого сигнала отрицательна, а предыдущая (первая) посылка перекодированного сигнала положительна, поэтому вторая посылка перекодированного сигнала отрицательна и т.д.

Результатом перемножения функций, описывающих перекодированный сигнал и синусоидальную несущую является сигнал бинарной фазоразностной манипуляции.

Сравнение рисунка П.2 с рисунком П.1а показывает, что одинаковым входным передаваемым сигналам соответствуют одинаковые сигналы ФРМ.

Полученный указанным способом сигнал ФРМ имеет бесконечно широкий спектр из-за неограниченного спектра модулирующей последовательности прямоугольных импульсов. Для ограничения спектра перекодированный сигнал подвергается предварительной фильтрации.

Фильтрация осуществляется ФНЧ типа «приподнятый косинус» или «корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом скругления α ».

Укрупненный алгоритм формирования сигнала ФРМ приведен на рисунке П.3.

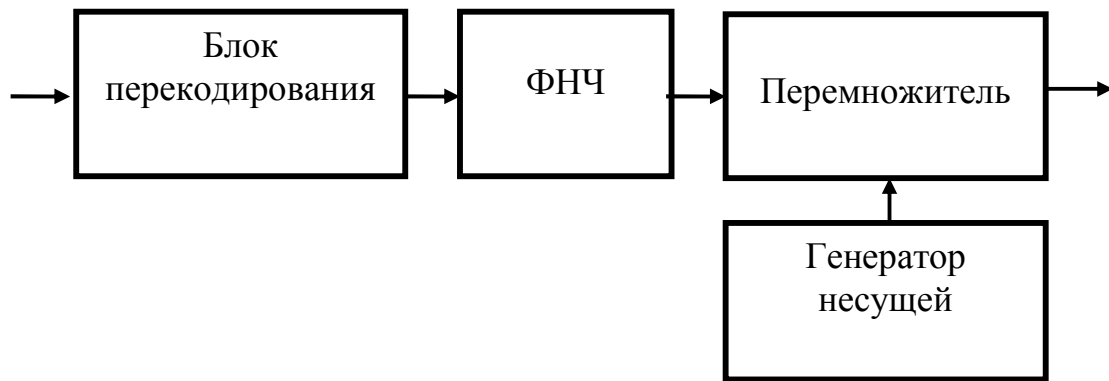


Рисунок П.3 – Укрупненный алгоритм формирования сигнала бинарной ФРМ

3. Фильтры для ограничения спектра

На рисунке П.4 приведена АЧХ типа «приподнятый косинус», где f_N – текущее значение нормированной частоты, α – коэффициент скругления АЧХ, $f_{Ng} = Fg/Fd$ – нормированная граничная частота, Fd – частота дискретизации, Fg – граничная частота на уровне 0.5.

Минимальное значение граничной частоты равно частоте манипуляции F_M

$$Fg = F_M = v/2,$$

где v – частота манипуляции.

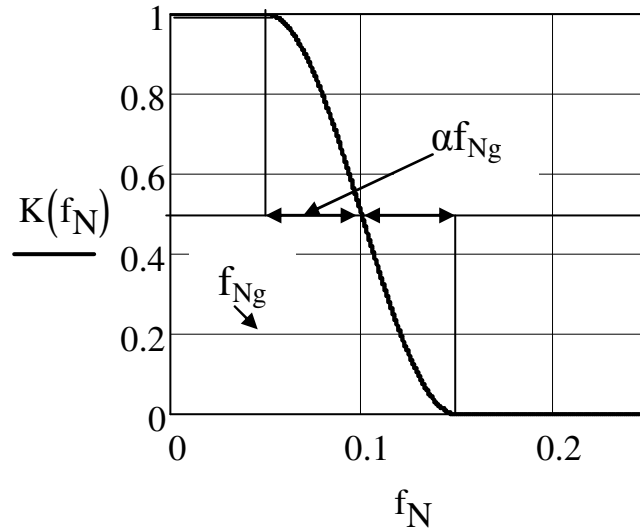


Рисунок П.4 – АЧХ типа «приподнятый косинус»

АЧХ фильтра описывается следующим соотношением

$$K(f_N) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq f_N \leq (1 - \alpha), \\ 0.5 \cdot \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_N - f_{Ng}}{\alpha \cdot f_{Ng}} \right) \right) & \text{при } (1 - \alpha) \cdot f_{Ng} < f_N < (1 + \alpha) \cdot f_{Ng}, \\ 0 & \text{при } (1 + \alpha) \cdot f_{Ng} \leq f_N \leq 0.5 \end{cases}$$

Достоинством фильтра являются малые межсимвольные искажения выходного сигнала фильтра.

Наряду с этим фильтром применяется фильтр с АЧХ типа «корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом скругления α », которую обозначают как « $\sqrt{\alpha}$ ».

АЧХ фильтра « $\sqrt{\alpha}$ » описывается соотношением

$$K(f_N) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq f_N \leq (1 - \alpha), \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_N - f_{Ng}}{\alpha \cdot f_{Ng}} \right) \right)} & \text{при } (1 - \alpha) \cdot f_{Ng} < f_N < (1 + \alpha) \cdot f_{Ng}, \\ 0 & \text{при } (1 + \alpha) \cdot f_{Ng} \leq f_N \leq 0.5 \end{cases}$$

Два таких фильтра (один в формирователе, а второй в демодуляторе) обеспечивают АЧХ типа «приподнятый косинус».

Указанные характеристики может обеспечить нерекурсивный цифровой фильтр с линейной ФЧХ, схема которого приведена на рисунке П.5.

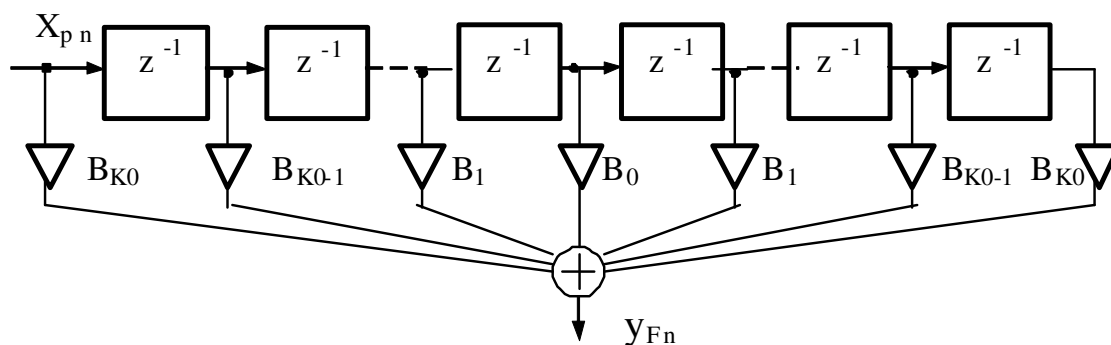


Рисунок П.5– Нерекурсивный цифровой фильтр с линейной ФЧХ

Фильтр выполнен на основе цифровой линии задержки с отводами, содержащей $2K_0$ элементов. Линейность ФЧХ обеспечивается за счет симметрии коэффициентов \mathbf{B} относительно середины линии задержки.

Программа синтеза фильтра приведена в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Эта программа осуществляет синтез фильтра методом ряда Фурье и «окна». В качестве оконной функции используется функция Хемминга.

4. Автокорреляционные демодуляторы

4.1. Демодулятор сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования

На рисунке П.6 приведен укрупненный алгоритм функционирования демодулятора, который состоит из автокорреляционного детектора, интегратора, блока синхронизации и формирователя элементарных посылок, а на рисунке П.7 алгоритм функционирования автокорреляционного фазового детектора.

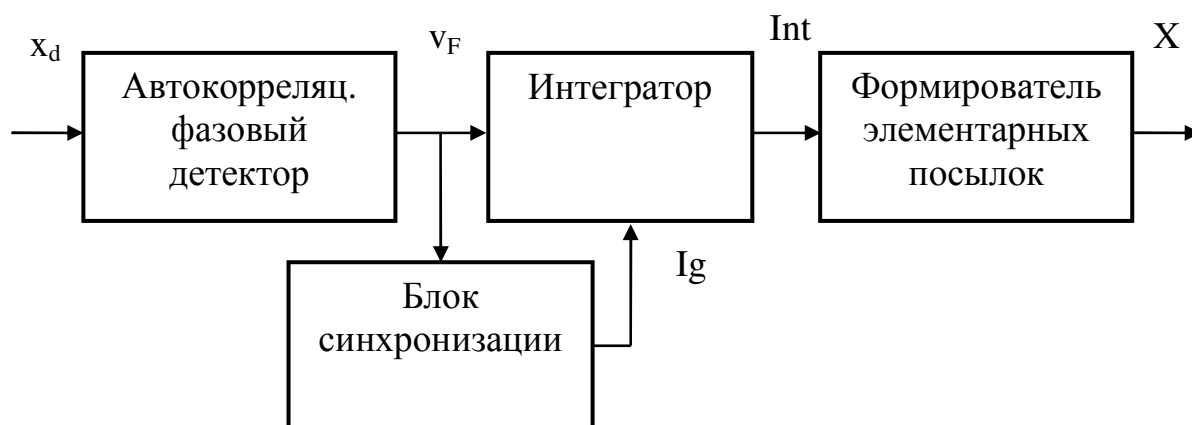


Рисунок П.6 – Укрупненный алгоритм функционирования демодулятора с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования

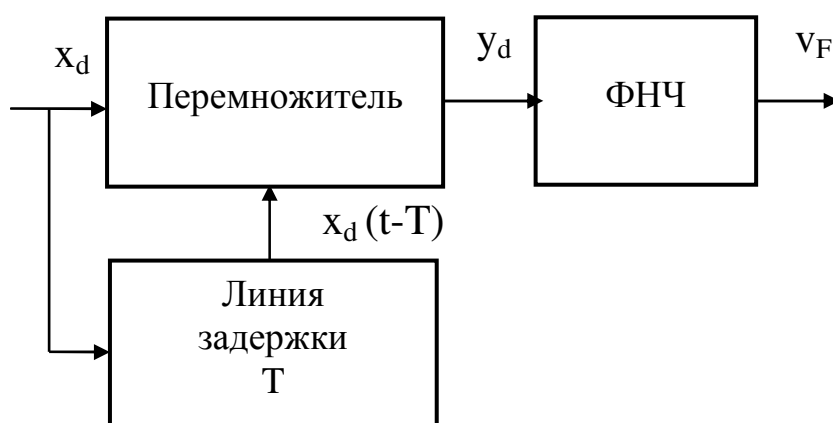


Рисунок П.7 – Автокорреляционный фазовый детектор

Детектор состоит из перемножителя входного сигнала x_d и входного сигнала, задержанного на длительность элементарной посылки T . Выходной сигнал перемножителя поступает на ФНЧ, который устраняет побочный высокочастотный продукт перемножения двух синусоидальных сигналов и ослабляет действие помех.

Временные диаграммы сигналов детектора приведены на рисунке П.8. Из рисунка видно, что выходной сигнал перемножителя в пределах каждой посылки содержит постоянную составляющую (полезный продукт детектирования) и переменную составляющую с удвоенной частотой входного сигнала. В идеальном случае после удаления высокочастотной составляющей

фильтром нижних частот на выходе детектора действует сигнал, повторяющий переданный сигнал (сигнал на входе формирователя), но без первой посылки.

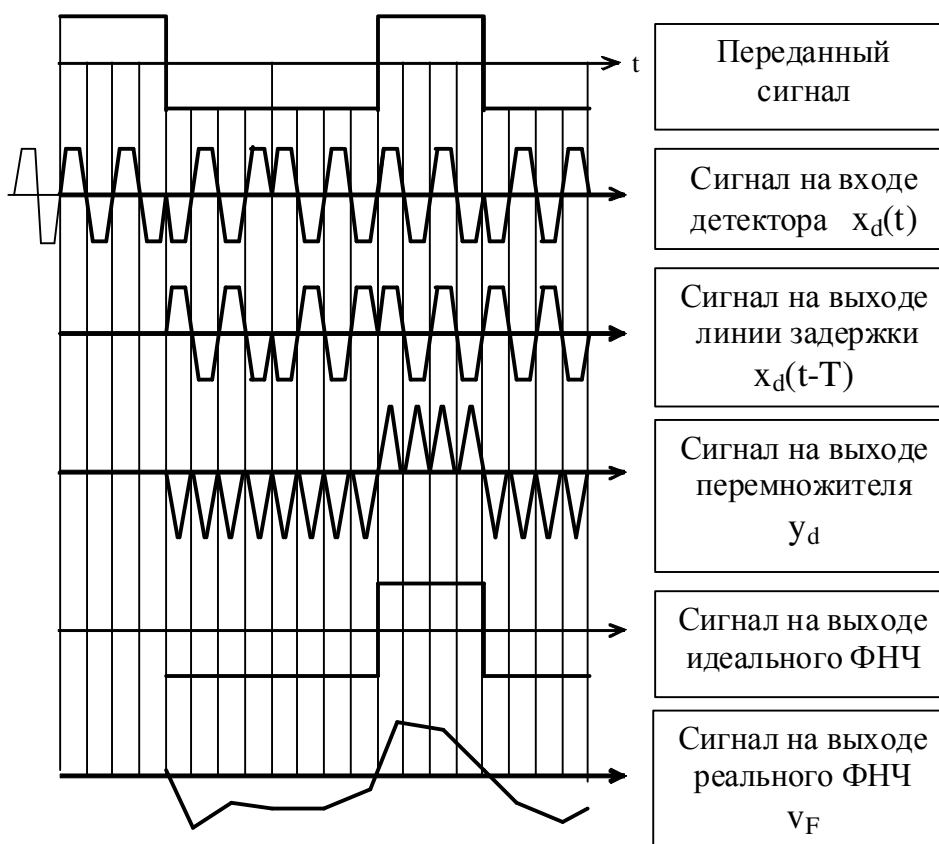


Рисунок П.8 – Временные диаграммы сигналов автокорреляционного фазового детектора

В реальных условиях выходной сигнал фильтра отличается от последовательности прямоугольных импульсов из-за действия помех и переходных процессах в ФНЧ.

При цифровой реализации на входе детектора действует сигнал

$$x_{dn} = X \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot n \cdot T_D + \varphi_n),$$

где X – амплитуда несущей, f_0 – частота несущей, T_D – интервал дискретизации, φ_n – мгновенная фаза сигнала.

Тогда на выходе линии задержки получим

$$x_{d n-n_v} = X \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot (n - n_v) \cdot T_D + \varphi_{n-n_v}),$$

где n_v – количество отсчетов в элементарной посылке.

В результате выходной сигнал перемножителя определится следующим соотношением

$$y_n = x_{dn} \cdot x_{dn-n_v} = \frac{1}{2} X^2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot n_v \cdot T_d + \varphi_n - \varphi_{n-n_v}) + \frac{1}{2} X^2 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot n_v \cdot T_d - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot n_v \cdot T_d + \varphi_n + \varphi_{n-n_v})$$

Первое слагаемое в этом выражении представляет собой полезный продукт детектирования, а второе слагаемое является побочным продуктом, устраняемым ФНЧ.

Тогда на выходе ФНЧ с единичным коэффициентом передачи в пределах полосы пропускания получим

$$v_{F_n} = \frac{1}{2} X^2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot n_v \cdot T_d + \varphi_n - \varphi_{n-n_v})$$

Чтобы выходной сигнал детектора зависел только от разности фаз текущей и предыдущей посылок, необходимо потребовать выполнения следующего условия

$$2 \cdot f_0 \cdot T_d \cdot n_v = \frac{2 \cdot n_v}{n_0} = L,$$

где n_0 – количество отсчетов в периоде несущей, L – целое число.

При выполнении этого условия выходной сигнал детектора будет равен

$$v_{F_n} = \frac{1}{2} X^2 \cdot (-1)^L \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_{n-n_v}).$$

Из последнего соотношения видно, что при четном L нулевой разности фаз будет соответствовать положительный уровень сигнала на выходе детектора, а разности фаз, равной π , – отрицательный, что и требуется для соответствия полярности выходного сигнала демодулятора переданному сигналу.

При нечетном L полярность выходного сигнала демодулятора окажется противоположной полярности передаваемого сигнала. Поэтому выходной сигнал детектора нужно умножить на $(-1)^L$. Тогда указанное несоответствие полярностей будет устранено.

На рисунке П.9 приведены временные диаграммы формирования выходного сигнала демодулятора.

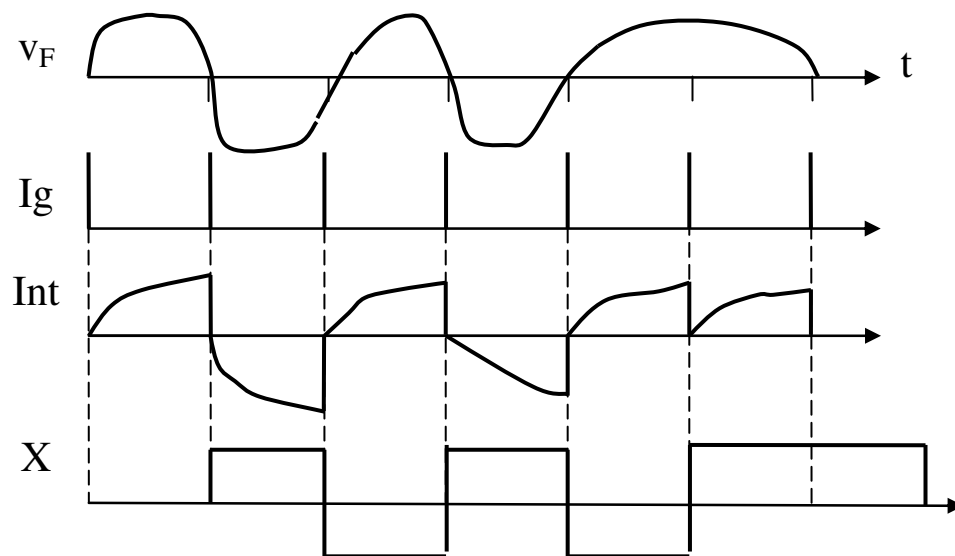


Рисунок П.9 – Формирование элементарных посылок выходного сигнала демодулятора методом интегрирования

В момент появления единичного отсчета I_g интегратор обнуляется и начинается процесс интегрирования выходного сигнала детектора v_F в течении промежутка времени, равного длительности элементарной посылки. В зависимости от знака сигнала на выходе интегратора Int в конце интервала интегрирования формируется или посылка позитива, или посылка негатива выходного сигнала X .

Алгоритм функционирования блока синхронизации приведен на рисунке П.10.

Блок синхронизации состоит из выделителя фронтов выходного сигнала детектора, генератора пилы, охваченного кольцом ФАПЧ, и формирователя единичных отсчетов.

Он предназначен для формирования последовательности единичных отсчетов I_{g_n} , следующих с периодом, равным длительности элементарной посылки сигнала.

По времени единичные отсчеты I_{g_n} должны находиться на границах элементарных посылок.

Рисунок П.11 поясняет формирование последовательности отсчетов I_{g_n} .

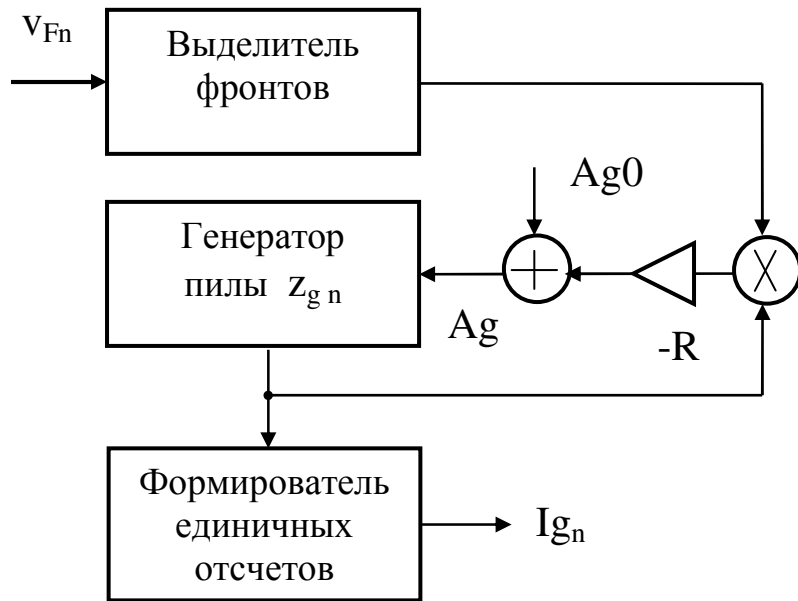


Рисунок П.10 - Укрупненный алгоритм функционирования блока синхронизации

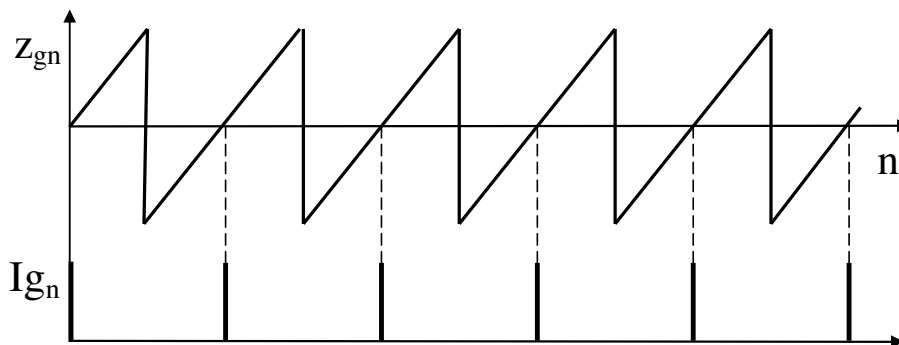


Рисунок П.11- Пилообразное колебание и последовательность единичных отсчетов

Единичные отсчеты формируются или при нулевом значении отсчета пилообразного колебания, или при переходе пилы через нуль с отрицательного на положительное значение. Во всех остальных случаях значение отсчета I_{g_n} равно нулю.

Для того чтобы единичные отсчеты I_{g_n} соответствовали границам элементарных посылок предусматривается подстройка фазы пилообразного колебания по сигналу, поступающему с выделителя фронтов.

Выделитель фронтов вырабатывает единичный отсчет при переходе сигнала на выходе автокорреляционного фазового де-

тектора от посылки негатива к посылке позитива и наоборот согласно следующему соотношению:

$$I_{Fn} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{Fn} = 0 \text{ или при } v_{Fn} \cdot v_{Fn-1} < 0, \\ 0 & \text{при } v_{Fn} \cdot v_{Fn-1} > 0. \end{cases}$$

Принцип подстройки фазы генератора пилообразных колебаний поясняет рисунок П.12.

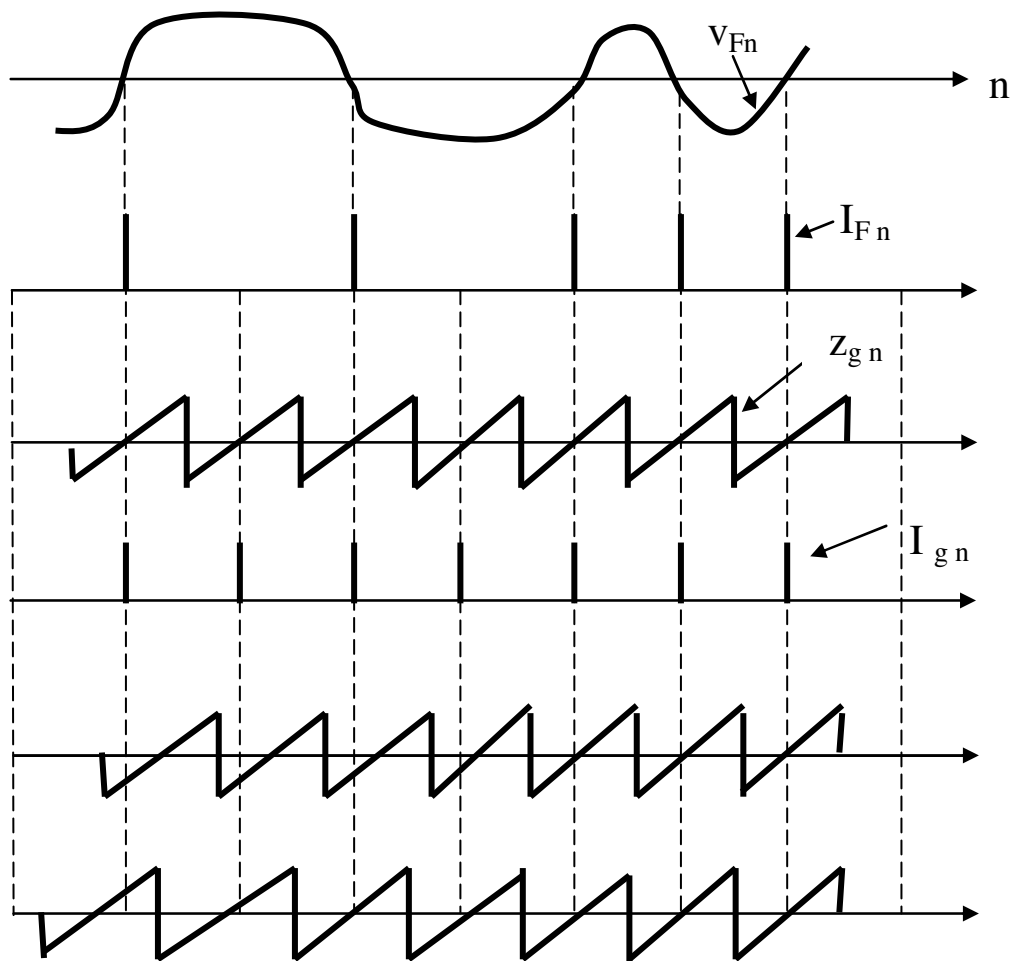


Рисунок П.12 – Временные диаграммы подстройки фазы пилообразного колебания

Если пилообразное колебание сфазировано правильно, то единичному отсчету сигнала выделителя фронтов I_{Fn} соответствует нулевое значение z_{gn} . При неправильном фазировании единичный отсчет I_{Fn} приходится либо на отрицательное, либо на положительное значение z_{gn} .

Это обстоятельство используется для подстройки фазы пилообразного колебания в соответствии со схемой рисунка П.10. На этом рисунке A_{g0} – значение константы пилы при разомкнутом кольце автоподстройки, а R – константа управления. Константы определяются следующим образом:

$$A_{g0} = \frac{2}{n_v}, \quad R = (0.05 \dots 0.15) A_{g0}.$$

Из рисунков П.10 и П.12 видно, что при правильном фазировании пилообразного колебания сигнал управления равен нулю.

Если отсчету выделителя фронтов I_{Fn} соответствует положительное значение отсчета пилы, то сигнал управления положителен, а если отсчету I_{Fn} соответствует отрицательное значение отсчета пилы, то сигнал управления отрицателен. В результате осуществляется сдвиг пилы в нужном направлении.

4.2. Демодулятор сигнала DBPSK с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом стробирования

Укрупненный алгоритм функционирования демодулятора приведен на рисунке П.13, а временные диаграммы, поясняющие формирование выходного сигнала, представлены на рисунке П.14.

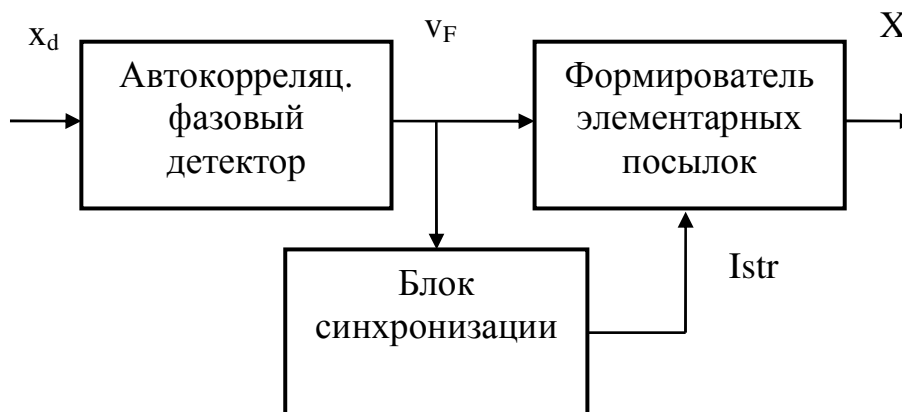


Рисунок П.13 – Укрупненный алгоритм функционирования демодулятора с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом стробирования

Автокорреляционный фазовый детектор рисунка П.13 ничем не отличается от детектора рассмотренного в предыдущем разделе.

Блок синхронизации вырабатывает последовательность стробирующих единичных отсчетов I_{str_n} , которая отличается от последовательности I_{g_n} только задержкой на половину длительности элементарной посылки.

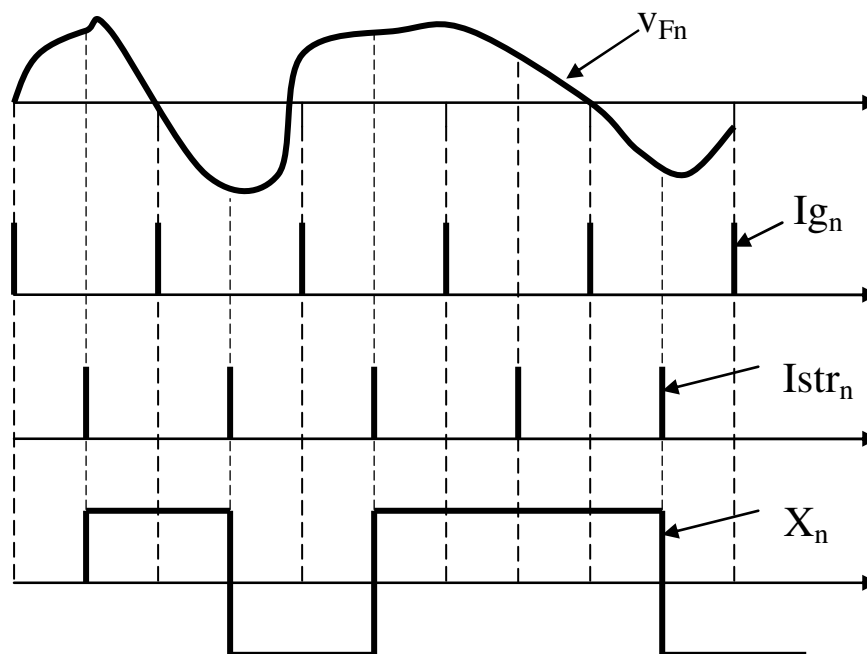


Рисунок П.14 – Временные диаграммы сигналов в демодуляторе с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом стробирования

Формирование выходного сигнала демодулятора осуществляется следующим образом.

В момент появления единичного отсчета стробирующего сигнала определяется знак посылки на выходе детектора v_{Fn} .

Если $v_{Fn} > 0$, то устанавливается положительный уровень выходного сигнала и остается неизменным до прихода следующего стробирующего импульса.

При $v_{Fn} < 0$ устанавливается отрицательный уровень выходного сигнала и остается неизменным до прихода следующего стробирующего импульса.

5. Машинный эксперимент по исследованию помехоустойчивости демодуляторов

На рисунке П.15 приведен алгоритм исследования помехоустойчивости демодуляторов.

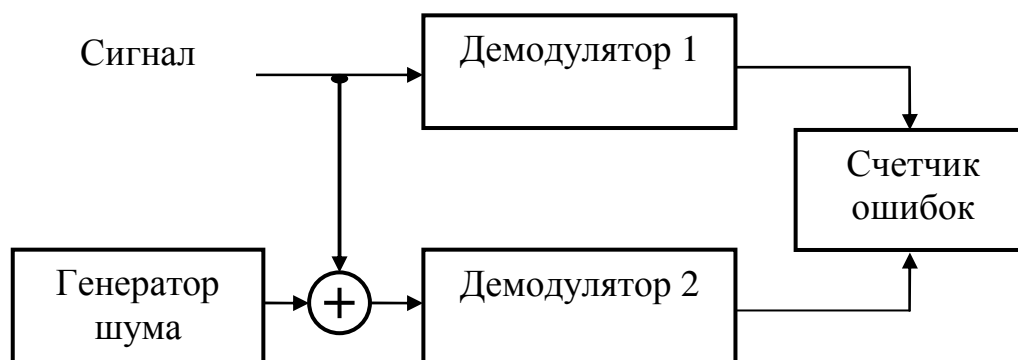


Рисунок П.15 – Алгоритм исследования помехоустойчивости демодуляторов

Демодулятор 2 представляет собой точную копию демодулятора 1. На вход демодулятора 1 поступает модулированный сигнал, а на вход демодулятора 2 – сигнал и шум.

Счетчик ошибок сравнивает знаки элементарных посылок на выходах демодуляторов и при их несовпадении фиксирует и увеличивает количество обнаруженных ошибок на единицу.

Подсчет ошибок осуществляется в установившемся режиме после завершения переходных процессов в демодуляторах.

Генератор шума формирует вектор случайных чисел, имеющих нормальное распределение.

В программной среде Mathcad имеется встроенная функция $\text{rnorm}(m, \mu, \sigma)$, где m – количество случайных чисел, μ – среднее значение, σ – среднеквадратическое отклонение от среднего значения.

В программе моделирования $m=1+n_{\max}$, где n_{\max} – максимальный номер отсчета шума, $\mu=0$, а среднеквадратическое отклонение обозначено как σ_{sh} .

Отношение сигнал/шум S_N в децибелах равно

$$S_N = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{sh}} \right).$$

В последнем соотношении σ_c – среднеквадратический уровень сигнала, который в данном эксперименте определяется при формировании сигнала DBPSK.

При известном значении σ_c и заданном отношении сигнал/шум S_N среднеквадратическое отклонение отсчетов шума определяется из предыдущего выражения.

При каждом значении отношения сигнал/шум выполняется I экспериментов по определению количества ошибок. Если в i – ом эксперименте зафиксировано O_i ошибок, то среднее значение количества ошибок равно

$$O_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^{I-1} O_i}{i}.$$

Точность и надежность полученного результата определяются величиной доверительного интервала значений O_{cp} и доверительной вероятностью.

Доверительный интервал – интервал значений O_{cp} , в пределах которого находится среднее значение количества ошибок с заданной доверительной вероятностью.

Нижняя и верхняя границы доверительного интервала определяются следующими соотношениями:

$$O_n = O_{cp} - \varepsilon,$$

$$O_v = O_{cp} + \varepsilon.$$

В последних соотношениях

$$\varepsilon = S^* \cdot t_\alpha,$$

где

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{I-1} (O_i - O_{cp})^2}{I \cdot (I-1)}}$$

t_α – табличное значение.

Ниже приведен фрагмент таблицы 4 из учебника Е.С. Вентцель «Теория вероятностей».

Таблица П.1

Значения параметра t_α в зависимости от количества опытов I и доверительной вероятности

Количество опытов I	Доверительная вероятность		
	0.80	0.90	0.95
10	1.383	1.833	2.260
15	1.345	1.761	2.140
20	1.328	1.729	2.090

Из таблицы видно, что при увеличении количества опытов доверительный интервал сужается, а при приближении доверительной вероятности к единице наоборот расширяется.

В данной лабораторной работе рекомендуется определить доверительный интервал при $I = 10$ и доверительной вероятности 0.9.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
к лабораторной работе №9
Исследование цифрового формирователя и цифрового
демодулятора сигнала бинарной фазовой манипуляции

Программа синтеза ФНЧ с АЧХ вида «корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом скругления α »

Имя программы: «Корень из альфа».

Исходные данные:

$F_d := 12$ Частота дискретизации

$f_{Ng} := \frac{F_g}{F_d}$ Нормированная граничная частота

$\alpha := 0.5$ Коэффициент скругления АЧХ

$A_{z_{dB}} := 26$ Ослабление в полосе задерживания

$$A_z := 10^{\frac{A_{z_{dB}}}{20}}$$

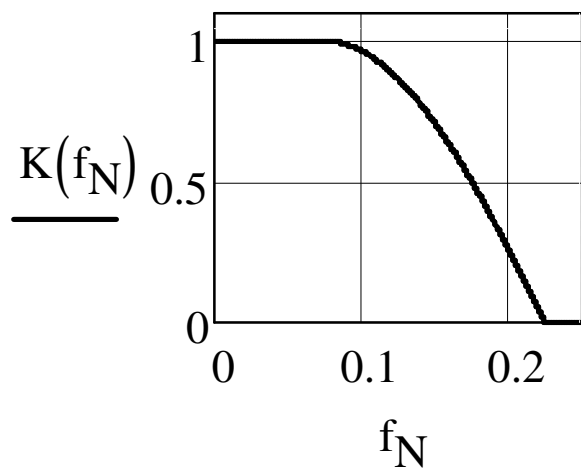
Формирование требуемой АЧХ

$$\rho(f_N) := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\left(1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_N - f_{Ng}}{\alpha \cdot f_{Ng}}\right)\right)}$$

$$K(f_N) := \text{if}\left[f_N \leq f_{Ng} \cdot (1 - \alpha), 1, \text{if}\left(f_N < f_{Ng} \cdot (1 + \alpha), \rho(f_N), 0\right)\right]$$

Построение графика требуемой АЧХ

$$f_N := 0, 0.0001 .. 0.5$$



Задаем значение половины длины линии задержки

$$K_0 := 34$$

Расчет коэффициентов системной функции

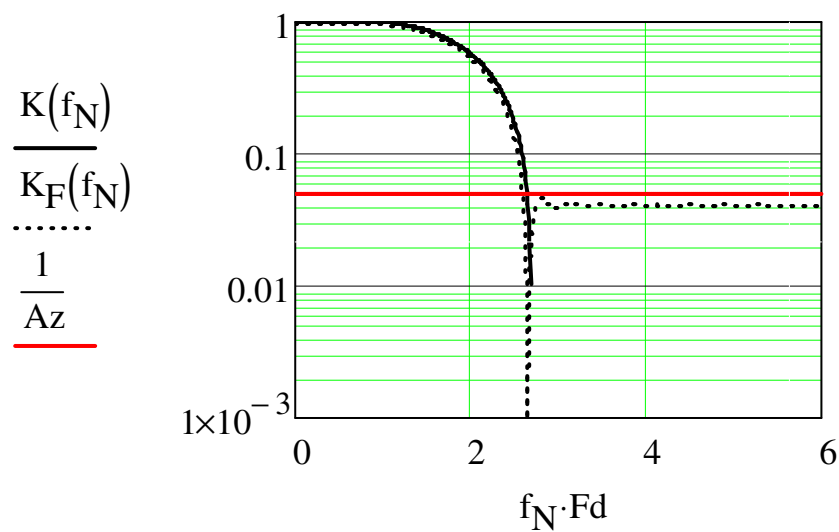
$$k := 1 .. K_0$$

$$B_0 := 2 \cdot f_{Ng}$$

$$B_k := 2 \cdot \int_0^{0.5} K(f_N) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_N) df_N$$

Расчет реальной АЧХ

$$K_F(f_N) := \left| B_0 + 2 \left[\sum_{k=1}^{K_0} (B_k \cdot \cos(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N)) \right] \right|$$



Примечание: если при выбранном значении КО ослабление в полосе задерживания окажется меньше требуемого значения, длину линии задержки нужно увеличить, а если окажется больше, то можно уменьшить.

РАБОТА №10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ И ЦИФРОВОГО ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛОВ МИНИМАЛЬНОЙ И ГАУССОВСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение алгоритмов функционирования цифрового формирователя и цифрового демодулятора сигналов минимальной MSK (Minimum Shift Keying) и гауссовской минимальной частотной манипуляции GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying).

Овладение методикой моделирования цифровых узлов обработки сигналов на ЭВМ.

2. ЛИТЕРАТУРА

1. Приложение к лабораторной работе
2. В.Г.Иванова, А.И.Тяжев. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры, Самара, 2008г.
3. К.Феер. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.: ил., стр.178-182.

3. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Изучите указанную в разделе 2 литературу и ответьте на контрольные вопросы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните сущность частотной манипуляции, используя временные диаграммы модулирующего и модулированного сигнала. Что такое сдвиг частот при частотной манипуляции?

2. Что представляют собой сигналы MSK и GMSK? Что у них общего и чем отличаются они друг от друга? Почему эти сигналы нашли в настоящее время широкое применение?

3. Начертите схему (графическое представление алгоритма функционирования) цифрового квадратурного формирователя сигналов MSK и GMSK с использованием операции интегрирования и поясните принцип работы формирователя с использованием временных диаграмм.

4. Приведите укрупненный алгоритм функционирования автокорреляционного демодулятора сигналов MSK и GMSK. Поясните назначение основных узлов демодулятора.

5. Поясните принцип работы автокорреляционного детектора сигнала MSK .

6. Каково назначение блока синхронизации в демодуляторе с формированием элементарных посылок выходного сигнала методом интегрирования?

7. Какие функциональные узлы входят в состав блока синхронизации и каков принцип их работы?

8. Поясните алгоритм определения количества ошибок при приеме дискретных сигналов.

5. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Выполните расчет гауссовского ФНЧ с неравномерностью АЧХ в полосе пропускания $\sigma_{дБ} = 3$ дБ при заданных значениях скорости манипуляции ν , частоты дискретизации F_d , ослабления в полосе задерживания $A_{здБ}$ и параметра ВТ, равного произведению граничной частоты на длительность элементарной посылки. Значения указанных параметров приведено в таблице 1. Расчет выполняется по программе «Gauss».

2. Выполните расчет ФНЧ с АЧХ типа «приподнятый косинус» с граничной частотой 1.5ν при заданных значениях скорости манипуляции ν , частоты дискретизации F_d , ослабления в полосе задерживания $A_{здБ}$, коэффициента скругления $\alpha = 0.3$. Расчет выполняется по программе «Приподнятый косинус».

3. Рассчитайте нерекурсивный 90-градусный фазорасщепитель с нормированной полосой пропускания $P_N = 0.4$ и отклонением АЧХ по выходу синусной компоненты от единицы не более

1%.. Расчет выполняется по программе синтеза нерекурсивного 90 – градусного фазорасщепителя «Fr1_1».

Таблица 1

Номер бригады	Fd кГц	v кбит/с	BT	Az _{дБ} , дБ	X
1	19.2	2.4	0.3	60	1
2	19.2	2.4	0.5	50	2
3	43.2	3.6	0.5	40	3
4	14.4	1.2	0.3	60	1
5	9.6	1.2	0.7	50	2
6	48.0	4.8	0.3	40	3

4. Сформируйте испытательный сигнал в виде случайной последовательности элементарных посылок с максимальным уровнем X, минимальным уровнем –X при скорости манипуляции v и частоте дискретизации Fd. Значения параметров сигнала приведены в таблице 1.

5. Выполните моделирование гауссовского фильтра при действии на его входе испытательного сигнала. Сравните временные диаграммы сигналов на входе и выходе фильтра.

6. Выполните моделирование квадратурного формирователя сигнала GMSK с использованием операции интегрирования при частоте несущей, равной четверти частоты дискретизации, и определите спектр сигнала на выходе формирователя.

7. Выполните моделирование автокорреляционного демодулятора сигнала GMSK, состоящего из квадратурного автокорреляционного детектора с ФНЧ, блока синхронизации и формирователя выходного сигнала. Пронаблюдайте временные диаграммы на выходах указанных блоков.

8. Оцените помехоустойчивость демодулятора сигнала GMSK при действии на его входе наряду с полезным сигналом гауссова шума при отношениях сигнал/шум 5дБ и 10дБ.

Для этого организуйте два канала: первый содержит демодулятор, на входе которого действует только полезный сигнал, а

второй содержит демодулятор, на входе которого наряду с сигналом действует шумовая помеха. Выходные сигналы двух каналов должны сравниваться в середине элементарной посылки. Если знаки элементарных посылок на выходах двух каналов не совпадают, то показание счетчика ошибок увеличивается на единицу. Количество ошибок нужно определить при передаче 1000 элементарных посылок. Пронаблюдайте временную диаграмму работы счетчика ошибок при демодуляции сигналов MSK.

9. Повторите предыдущие разделы задания для сигнала MSK.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- укрупненный алгоритм функционирования квадратурного формирователя сигнала GMSK с использованием операции интегрирования,
- программу и результаты моделирования квадратурного формирователя с использованием операции интегрирования в виде временных и спектральных диаграмм,
- программу и результаты моделирования демодулятора в виде временных диаграмм.
- временные диаграммы работы счетчика ошибок при демодуляции сигналов MSK и GMSK,
- выводы о спектральной эффективности и помехоустойчивости сигналов MSK и GMSK.

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Выполните синтез гауссовского ФНЧ. Для этого в программной среде Mathcad создайте файл и скопируйте в него программу «Gauss». Введите в программу исходные данные из таблицы 1.

Синтез фильтра осуществляется следующим образом. Сначала рассчитывается функция $D(f_N)$, аппроксимирующая АЧХ с заданными требованиями, где f_N – нормированное значение текущей частоты, т.е. отношение абсолютного значения частоты к ча-

стоте дискретизации. Затем вводится целое число K_0 , равное половине длины линии задержки фильтра. Длина линии задержки измеряется количеством входящих в нее элементов задержки. Целесообразно первоначально задать $K_0 = 10$. После этого рассчитываются коэффициенты системной функции V_G и АЧХ фильтра $K_F(f_N)$, которая сравнивается с аппроксимирующей функцией $D(f_N)$.

Если $K_F(f_N)$ совпадает с $D(f_N)$ при $K_F(f_N) \geq \frac{1}{A_Z}$, то расчет можно считать завершенным. Если пульсации реальной АЧХ окажутся выше указанного уровня, то нужно увеличить K_0 , а если ниже, то уменьшить.

2. Выполните расчет ФНЧ с АЧХ типа «приподнятый косинус» с граничной частотой $F_g = v/2$ при заданных значениях скорости манипуляции v , частоты дискретизации F_d , ослабления в полосе задерживания $A_{z_{дв}}$, коэффициента скругления АЧХ $\alpha = 0.3$.

Для этого откройте программу «Приподнятый косинус» и скопируйте её в свой файл. Введите первоначальное значение половины длины линии задержки фильтра K_0 , которое можно принять равным 10. Рассчитайте фактический коэффициент передачи фильтра $K_F(f_N)$.

Если $K_F(f_N)$ совпадает с $D(f_N)$ при $K_F(f_N) \geq \frac{1}{A_Z}$, то расчет можно считать завершенным. Если пульсации реальной АЧХ окажутся выше указанного уровня, то нужно увеличить K_0 , а если ниже, то уменьшить.

3. Рассчитайте нерекурсивный 90-градусный фазорасщепитель с нормированной полосой пропускания $\Pi_N = 0.4$ и отклонением АЧХ по выходу синусной компоненты от единицы не более 1%. Расчет выполняется по программе синтеза нерекурсивного 90 – градусного фазорасщепителя «Fr1_1».

Откройте программу «Fr1_1» и скопируйте её в свой файл. Введите нечетное целое число N , равное половине длины линии задержки, (например, $N=5$). Если фактическое значение отклонения реальной АЧХ от идеальной окажется больше допустимого

значения, равного 0.01, то N нужно увеличить, а если меньше, то уменьшить.

4. Сформируйте испытательный сигнал в виде случайной последовательности элементарных посылок.

Введите максимальный номер отсчета

$$n_{\max} := n_v \cdot 1000 + 2 \cdot (K_0 + K_0 + N)$$

Выполните моделирование счетчика отсчетов с переменной q_n и сформируйте последовательность единичных отсчетов I_n на границах элементарных посылок

$$q_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$q_n := \text{if}(q_{n-1} + 1 < n_v, q_{n-1} + 1, 0)$$

$$I_n := \text{if}(q_n = 0, 1, 0)$$

Выведите график зависимости I_n от n . Пронаблюдайте 200..400 отсчетов этой последовательности, начиная с $n = 2 \cdot (K_0 + K_0 + N)$.

Введите значение максимального уровня испытательного сигнала X.

Воспользовавшись случайной функцией $\text{rnd}(1)$, получите испытательный сигнал

$$x_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$x_n := \text{if}(i_n > 0, \text{if}(\text{rnd}(1) \geq 0.5, X, -X), x_{n-1})$$

Задайте диапазон изменения порядкового номера отсчета

$$n := 0 .. n_{\max}$$

Пронаблюдайте временную диаграмму испытательного сигнала.

5. Сформируйте выходной сигнал гауссовского фильтра. Для этого введите следующие соотношения

$$n := 2 \cdot K_0 .. n_{\max}$$

$$x_{G_n} := B_{G_0} \cdot x_{n-K_0} + \sum_{k=1}^{K_0} \left[B_{G_k} \cdot (x_{n-K_0+k} + x_{n-K_0-k}) \right]$$

Пронаблюдайте временную диаграмму сигнала на выходе фильтра и сравните ее с временной диаграммой входного сигнала.

6. Моделирование интегратора осуществляется следующим образом. Сначала определяется переменная Δ_n , пропорциональная нормированному модулирующему сигналу. Эта переменная представляет собой приращение сигнала на выходе интегратора за один интервал дискретизации

$$n := 0 .. n_{\max}$$

$$\Delta_n := \frac{1}{2 \cdot n_v} \cdot \frac{x_{G_n}}{X}$$

Затем выполняется накапливающее суммирование со сбросом: если сигнал на выходе сумматора превысит единицу, то из значения выходного сигнала интегратора вычитается 2; если сигнал на выходе интегратора меньше -1 , то к значению выходного сигнала интегратора прибавляется 2.

$$z_0 := 0 \quad n := 1 .. n_{\max}$$

$$z_n := \text{if}(z_{n-1} + \Delta_n > 1, z_n + \Delta_n - 2, \text{if}(z_{n-1} + \Delta_n < -1, z_{n-1} + \Delta_n + 2, z_{n-1} + \Delta_n))$$

Запишите выражение для мгновенной фазы сигнала

$$n := 0 .. n_{\max}$$

$$\varphi_n := \pi \cdot z_n$$

Из последнего соотношения видно, что вычитание из z_n числа 2 и прибавление к z_n числа 2 соответствует изменению мгновенной фазы на 2π , что не изменяет значения косинуса и синуса φ_n .

Постройте временную диаграмму z_n и на этом же графике покажите нормированный сигнал x_n/X . Убедитесь в том, что имеет место интегрирование входного сигнала формирователя.

Сформируйте низкочастотные квадратурные компоненты сигнала

$$\begin{aligned} C_n &:= \cos(\varphi_n) \\ S_n &:= \sin(\varphi_n) \end{aligned}$$

Приведите их временные диаграммы.

Выполните моделирование повышающего преобразователя частоты

Получите две квадратурные компоненты несущей. Для этого введите частоту несущей

$$F0 := \frac{Fd}{4}$$

Рассчитайте константу генератора пилы, определяющую частоту несущей

$$A0 := 2 \cdot \frac{F0}{Fd}$$

Сформируйте пилообразное колебание и две квадратурные компоненты несущей

$$z0_0 := 0$$

$$n := 1..n_{\max}$$

$$z0_n := \text{if}(z0_{n-1} + A0 \geq 1, z0_{n-1} + A0 - 2, z0_{n-1} + A0)$$

$$C0_n := \cos(\pi \cdot z0_n)$$

$$S0_n := \sin(\pi \cdot z0_n)$$

На выходе повышающего преобразователя частоты получите выходной сигнал формирователя

$$y_n := C_n \cdot C0_n - S_n \cdot S0_n$$

Приведите временную диаграмму этого сигнала. На этой же временной диаграмме покажите сигнал $x_n / (2X)$ и убедитесь в

том, что изменение частоты сигнала MSK соответствует передаваемому сигналу.

Определите среднеквадратический уровень сигнала формирователя

$$\sigma_c := \sqrt{\frac{\sum_{n=2 \cdot K_0}^{n_{\max}} (y_n)^2}{n_{\max} - 2 \cdot K_0}}$$

Для определения спектра выходного сигнала формирователя сформируйте массив, содержащий 2048 отсчетов выходного сигнала в установившемся режиме

$$I_{\max} := 2047 \quad i := 0 .. I_{\max} \quad X_{m_i} := y_{n_{\max} - I_{\max} + i}$$

$$S_p := \text{FFT}(X_m)$$

Введите диапазон изменения порядкового номера отсчета спектра

$$K_{\max} := \frac{n_{\max} + 1}{2}$$

$$k := 0 .. K_{\max}$$

Постройте график зависимости $|S_{p_k}|$ от нормированной частоты $\frac{k}{2K_{\max}}$.

Определите максимальное значение спектральной плотности $S_{p_{\max}}$ и постройте спектральную диаграмму в относительном масштабе – зависимость относительной спектральной плотности

$$\frac{|S_{p_k}|}{S_{p_{\max}}} \text{ от нормированной частоты } \frac{k}{2K_{\max}}.$$

7. Моделирование автокорреляционного демодулятора начинается с построения нерекурсивного 90-градусного фазорасщепителя.

Подайте на вход фазорасщепителя выходной сигнал формирователя

$$X_{fr_n} := y_n$$

Для получения выходных сигналов фазорасщепителя X_{c_n} и X_{s_n} запишите следующие соотношения

$$n := 0 .. 2 \cdot N - 1$$

$$X_{c_n} := 0$$

$$X_{s_n} := 0$$

$$n := 2 \cdot N .. n_{max}$$

$$X_{c_n} := X_{fr_{n-N}}$$

$$X_{s_n} := \sum_{m=0}^{\frac{N-1}{2}} \left[B_{fr_{2 \cdot m+1}} \cdot (X_{fr_{n-N-2 \cdot m-1}} - X_{fr_{n-N+2 \cdot m+1}}) \right]$$

Для определения выходного сигнала автокорреляционного детектора введите количество отсчетов в периоде несущей n_0 и параметр L , определяющий полярность выходного сигнала детектора:

$$n_0 := 4$$

$$L := \frac{2 \cdot n_v}{n_0}$$

Выходной сигнал детектора определяется следующими соотношениями:

$$n := n_v .. n_{max}$$

$$w_n := (-1)^L (X_{s_n} \cdot X_{c_{n-n_v}} - X_{c_n} \cdot X_{s_{n-n_v}})$$

Пронаблюдайте временную диаграмму этого сигнала при

$$n := 0 .. n_{max}$$

Определите сигнал w_{Fn} на выходе ФНЧ с АЧХ типа «приподнятый косинус»

$$n := 2K0 .. n_{max}$$

$$w_{F_n} := B_0 \cdot w_{n-K_0} + \sum_{k=1}^{K_0} [B_k \cdot (w_{n-K_0+k} + w_{n-K_0-k})]$$

Постройте временную диаграмму этого сигнала.

Сформируйте выходной сигнал выделителя фронтов

$$n := 1..n_{\max}$$

$$I_{F_n} := \text{if} \left[\left(w_{F_n} \cdot w_{F_{n-1}} < 0 \right) + \left(w_{F_n} = 0 \right), 1, 0 \right]$$

Постройте временную диаграмму сигнала на выходе выделителя фронтов.

Сформируйте пилообразное колебание Z_g с периодом, равным длительности элементарной посылки сигнала, синхронизируемое выходным сигналом выделителя фронтов. Сначала задайте значение константы Ag_0 , определяющей частоту пила, и константу управления R

$$Ag_0 := \frac{2}{n_v}$$

$$R := 0.1 \cdot Ag_0$$

Затем введите следующий фрагмент программы

$$z_g := \left| \begin{array}{l} Ag \leftarrow Ag_0 \\ z_{g_0} \leftarrow 0 \\ \text{for } n \in 1..n_{\max} \\ \quad \left| \begin{array}{l} z_{g_n} \leftarrow \text{if} \left(z_{g_{n-1}} + Ag < 1, z_{g_{n-1}} + Ag, z_{g_{n-1}} + Ag - 2 \right) \\ Ag \leftarrow Ag_0 - R \cdot z_{g_n} \text{ if } I_{F_n} > 0 \end{array} \right. \\ z_g \end{array} \right.$$

Введите

$$\underline{n} := 1..n_{\max}$$

Постройте временную диаграмму пилообразного колебания z_{g_n} .

Сформируйте последовательность единичных отсчетов на границах элементарных посылок. Эти отсчеты соответствуют нулевому значению пилообразного колебания или его переходу через нуль с отрицательного на положительное значение

$$I_{g_n} := \text{if} \left[\left(z_{g_n} \cdot z_{g_{n-1}} < 0 \right) \cdot \left(z_{g_n} > 0 \right) + \left(z_{g_n} = 0 \right), 1, 0 \right]$$

Выведите временную диаграмму полученной последовательности.

Определите количество отсчетов, содержащихся в половине длительности элементарной посылки

$$m := \text{floor} \left(\frac{n_v}{2} \right)$$

Сформируйте последовательность стробирующих единичных отсчетов, которые по времени соответствуют середине элементарной посылки

$$n := m .. n_{\max}$$

$$I_{\text{str}_n} := I_{g_{n-m}}$$

Сигнал на выходе формирователя определяется знаком сигнала w_{F_n} на выходе ФНЧ в середине элементарной посылки и описывается следующими соотношениями

$$X_0 := 0$$

$$n := 1 .. n_{\max}$$

$$X_n := \text{if} \left(I_{\text{str}_n} > 0, \text{if} \left(w_{F_n} < 0, -1, 1 \right), X_{n-1} \right)$$

Этот сигнал является выходным сигналом демодулятора.

Для сравнения выходного сигнала демодулятора X_n с переданным сигналом x_n сначала определите временную задержку выходного сигнала детектора относительно переданного сигнала

$$L_0 := N + K_0 + K_0 + \frac{n_v}{2}$$

Покажите на одном графике временные диаграммы сигнала X_n и сигнала $0.5 \cdot x_{n-L0}$. Убедитесь в совпадении этих сигналов.

В дальнейшем при исследовании помехоустойчивости демодулятора понадобятся стробирующие единичные отсчеты, которые по времени соответствуют середине элементарной посылки выходного сигнала формирователя. Они получаются путем задержки на m отсчетов последовательности $Istr_n$

$$n := m .. n_{\max}$$

$$Istr_n := Ig_{n-m}$$

8. Для исследования помехоустойчивости демодулятора при действии гауссова шума сначала введите отношение сигнал/шум S_N и определите среднеквадратическое значение шума σ_{sh} , а затем сформируйте массив отсчетов шума

$$S_N := 5$$

$$\sigma_{sh} := \sigma_c \cdot 10^{\frac{-S_N}{20}}$$

$$Sh := rnorm(n_{\max} + 1, 0, \sigma_{sh})$$

К испытательному сигналу добавьте шум

$$y_n := y_n + Sh_n$$

Скопируйте программу моделирования демодулятора, разработанную ранее, а затем замените обозначение выходного сигнала демодулятора X_n на Xsh_n .

Выведите график для Xsh_n вместе с $0.5 \cdot x_{n-L0}$.

Выполните моделирование счетчика ошибок. Введите

$$O_0 := 0 \quad n := 1 .. n_{\max}$$

$$L1 := 2 \cdot (K_0 + K0 + N)$$

$$J_n := X_n \cdot Xsh_n$$

$$O_n := \text{if}(n > L1, \text{if}(IstrO_n > 0, \text{if}(J_n < 0, O_{n-1} + 1, O_{n-1}), O_{n-1}), O_{n-1})$$

Согласно приведенному соотношению подсчет ошибок начинается после завершения переходных процессов за дискретное время, равное $L1$.

Приведите временную диаграмму работы счетчика.
Занесите полученное количество ошибок в таблицу 2а.

Таблица 2а

Экспериментальное определение количества ошибок
при приеме сигнала GMSK

Номер эксперимента i	Количество ошибок O_i на 1000 посылок	
	Сигнал/шум - 5 дБ	Сигнал/шум - 10 дБ
1		
...
10		

При переходе к следующему эксперименту выделите соотношение, задающее отношение сигнал/шум, и нажмите на клавишу «F9». При этом будет сформирована новая последовательность отсчетов шума.

После выполнения десяти экспериментов при отношении сигнал/шум 5дБ определите среднее арифметическое значение количества ошибок O_{cp} и нижнюю и верхнюю границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0.9. Методика определения доверительного интервала описана в ПРИЛОЖЕНИИ к лабораторной работе.

Аналогичным образом выполните эксперименты 1-10 при отношении сигнал/шум 10 дБ. Найдите среднее значение количества ошибок и границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0.9.

Для исследования формирователя и демодулятора сигнала MSK создайте новый файл и скопируйте в него программу исследования формирователя и демодулятора сигнала GMSK.

Формирователь сигнала MSK отличается от формирователя сигнала GMSK только отсутствием гауссовского фильтра.

Поэтому соотношение $\Delta_n := \frac{1}{2 \cdot n_v} \cdot \frac{x_{Gn}}{X}$ нужно заменить на

$$\Delta_n := \frac{1}{2 \cdot n_v} \cdot \frac{x_n}{X}.$$

Демодулятор не изменяется.

Выполните эксперимент по определению количества ошибок.

Приведите временную диаграмму работы счетчика.

Занесите полученное количество ошибок в таблицу 2б.

Таблица 2б

Экспериментальное определение количества ошибок при приеме сигнала MSK

Номер эксперимента i	Количество ошибок O_i на 1000 посылок	
	Сигнал/шум - 5 дБ	Сигнал/шум - 10 дБ
1		
...
10		

При переходе к следующему эксперименту выделите соотношение, задающее отношение сигнал/шум, и нажмите на клавишу «F9». При этом будет сформирована новая последовательность отсчетов шума.

После выполнения десяти экспериментов при отношении сигнал/шум 5дБ определите среднее арифметическое значение количества ошибок O_{cp} и нижнюю и верхнюю границы \square овериительного интервала при доверительной вероятности 0.9. Методика определения доверительного интервала описана в ПРИЛОЖЕНИИ к лабораторной работе.

Аналогичным образом выполните эксперименты 1-10 при отношении сигнал/шум 10 дБ. Найдите среднее значение количества ошибок и границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0.9.

Запишите в отчет выводы о влиянии вида модуляции и отношения сигнал/шум на помехоустойчивость демодулятора.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
к лабораторной работе №10

Исследование цифрового формирователя и цифрового демодулятора сигналов минимальной и гауссовской минимальной частотной манипуляции

1. Общие сведения о сигналах частотной манипуляции

Сущность частотной манипуляции состоит в формировании синусоидального колебания частоты позитива $f_{\text{поз}}$ при передаче посылки позитива и синусоидального колебания частоты негатива $f_{\text{нег}}$ при передаче посылки негатива. Сдвигом частот называется разность частот позитива и негатива

$$F_{\text{сдв}} = f_{\text{поз}} - f_{\text{нег}} .$$

На рисунке П.1 приведены временные диаграммы передаваемого первичного сигнала (а), сигнала частотной манипуляции ((ЧМн, FSK- Frequency Shift Keying) (б) на выходе формирователя, сигнала частотной манипуляции на входе демодулятора при наличии помех и искажений в канале передачи (в), сигнала на выходе частотного детектора (г) и сигнала на выходе формирователя элементарных посылок (д).

На рисунке показан сигнал формирователя элементарных посылок в случае, когда формирование осуществляется по знаку входного сигнала: положительному входному сигналу соответствует постоянный положительный уровень выходного сигнала, а отрицательному уровню входного сигнала – постоянный отрицательный уровень выходного сигнала.

Скоростью манипуляции называется количество элементарных посылок в секунду. При длительности посылки T скорость манипуляции равна

$$v = \frac{1}{T} .$$

Период манипуляции равен $T_{\text{м}} = 2 T$. Поэтому частота манипуляции равна

$$F_{\text{м}} = 1/(2T_{\text{м}}) = v/2 .$$

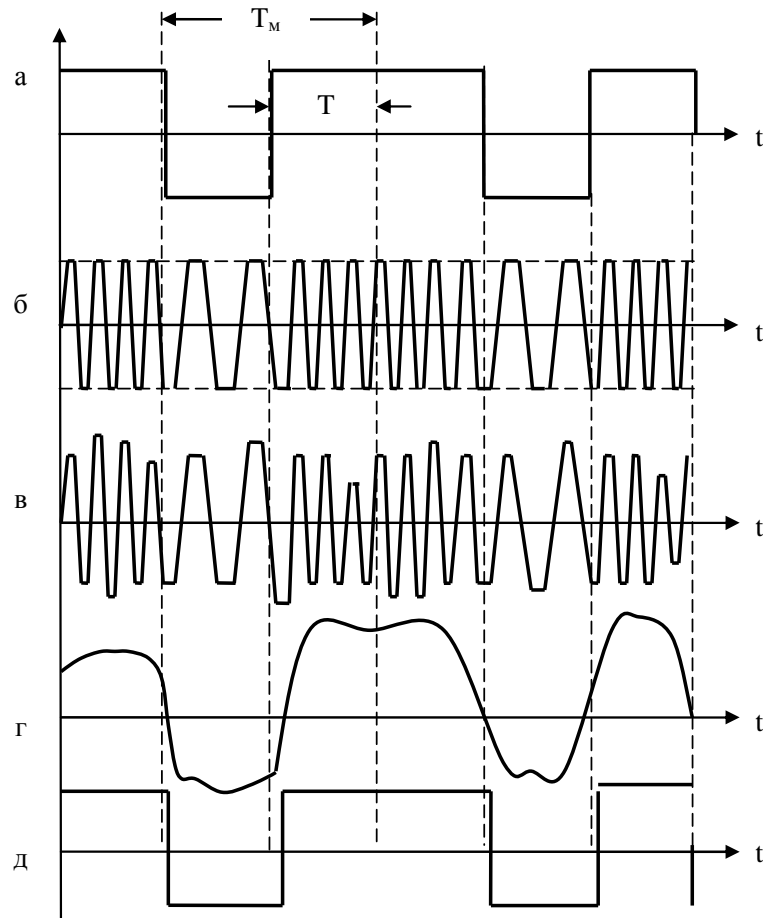


Рисунок П.1 – Временные диаграммы формирования и демодуляции сигнала частотной манипуляции

На рисунке П.2 показан спектр сигнала частотной манипуляции.

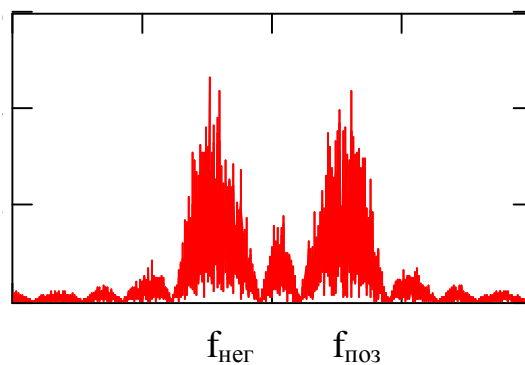


Рисунок П.2 – Спектр сигнала частотной манипуляции

На рисунке наблюдаются два характерных максимума на частоте позитива и на частоте негатива. Из рисунка видно, что чем больше сдвиг частот, тем шире спектр сигнала ЧМН.

2. Общие сведения о сигналах минимальной и гауссовской минимальной частотной манипуляции

Частотная манипуляция называется минимальной, если сдвиг частот $F_{\text{сдв}}$ равен частоте манипуляции F_M

$$F_{\text{сдв}} = F_M.$$

Достоинством сигнала минимальной частотной манипуляции (МЧМ, MSK – Minimum Shift Keying) является относительно узкий спектр, позволяющий разместить в ограниченном частотном диапазоне большее количество каналов с частотным разделением.

Для увеличения спектральной эффективности путем уменьшения ширины главного лепестка спектра и уровня боковых лепестков в модулятор сигнала МЧМ включают предмодуляционный гауссовский ФНЧ, т.е. ФНЧ, АЧХ которого описывается функцией Гаусса

$$K(f) = \exp\left(-\ln(\sigma) \cdot \left(\frac{f}{f_{\text{гр}}}\right)^2\right),$$

где $f_{\text{гр}}$ – граничная частота ФНЧ при неравномерности в полосе пропускания σ .

Сигнал МЧМ, формируемый с использованием такого фильтра называют сигналом гауссовской МЧМ или GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Модуляция GMSK применяется в стандартах GSM и DECT.

В англоязычной литературе полосу пропускания гауссовского ФНЧ при неравномерности 3 дБ, равную его граничной частоте $f_{\text{гр}}$, обозначают символом **B** (Band – полоса) и используют параметр **BT**, равный произведению полосы пропускания ФНЧ на длительность элементарной посылки сигнала T . Величина этого параметра определяет ширину спектра сигнала GMSK.

На рисунках П.3- П.5 приведены спектры сигналов GMSK при разных значениях параметра BT

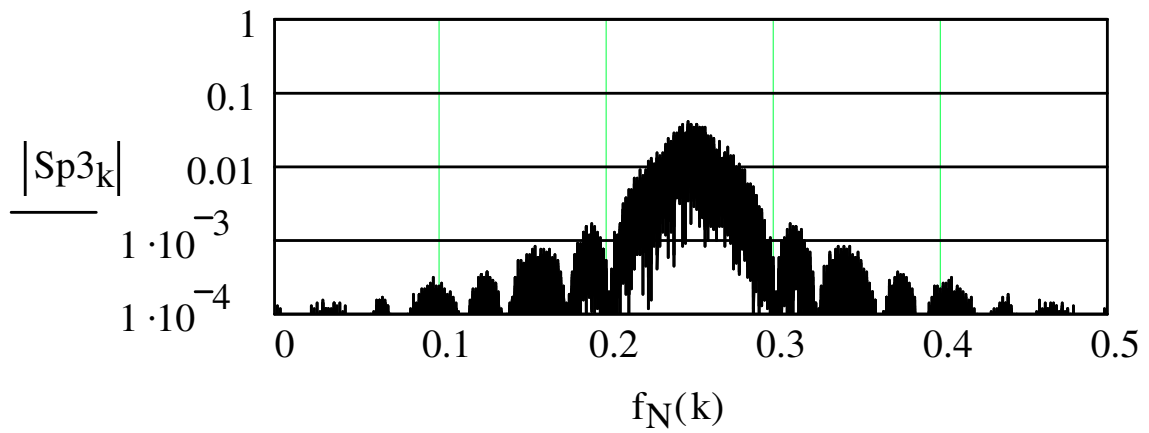


Рисунок П.3 - Спектр сигнала GMSK при BT = 3

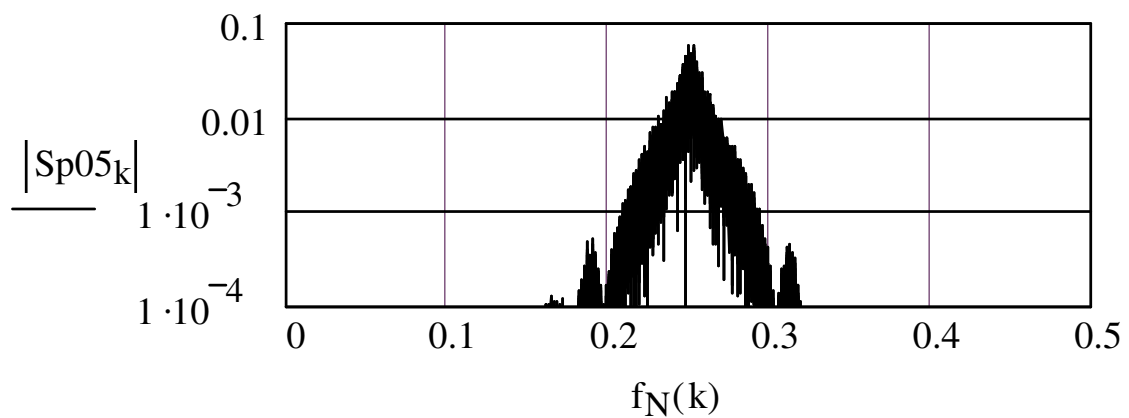


Рисунок П.4 - Спектр сигнала GMSK при BT =0,5

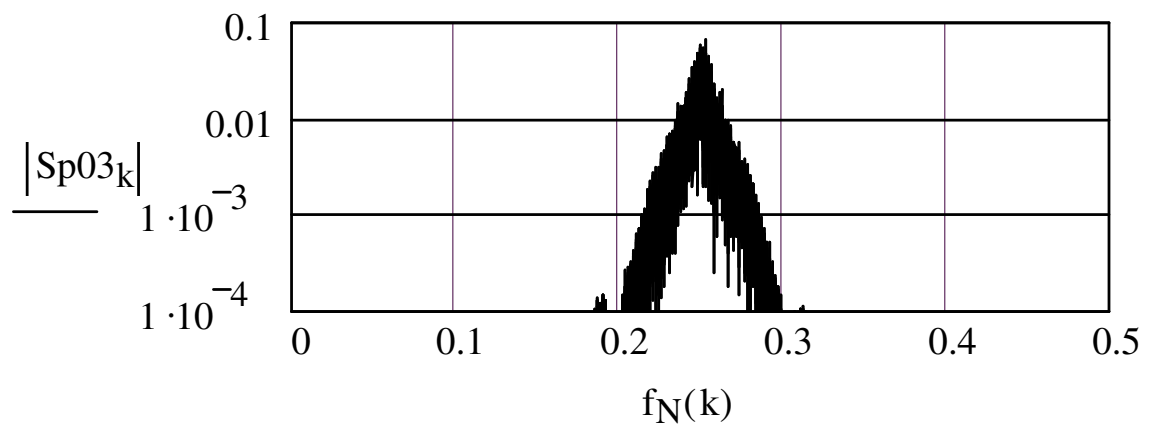


Рисунок П.5 - Спектр сигнала GMSK при BT = 0,3

Из рисунков видно, что при уменьшении параметра BT ширина спектра сигнала уменьшается.

Параметр $BT=0.3$ применяется в стандарте GSM, а параметр $BT=0.5$ – в стандарте DECT.

При сдвиге частот, равном частоте манипуляции F_M , девиация частоты равна

$$\Delta f_m = \frac{F_M}{2} = \frac{v}{4} = \frac{1}{4T},$$

Индекс частотной манипуляции этих сигналов равен

$$\psi = \frac{\Delta f_m}{F_M} = 0.5.$$

3. Квадратурный способ формирования сигналов MSK и GMSK с использованием операции интегрирования

Известно, что аналоговый ЧМ сигнал описывается соотношением

$$y(t) = \cos\left(\int \omega(t) dt\right),$$

где $\omega(t) = \omega_0 + \Delta \omega_m x_N(t)$ - мгновенная частота,

$$\omega_0 = 2\pi f_0, \quad \Delta \omega_m = 2\pi \Delta f_m = \frac{\pi}{2T}, \quad f_0 - \text{частота несущей,}$$

$-1 \leq x_N(t) \leq 1$ - нормированный модулирующий сигнал.

В приведенном выражении амплитуда ЧМ сигнала принята равной единице, что не влияет на общность последующих выводов.

После подстановки выражения для мгновенной частоты под знак интеграла и последующего интегрирования получим

$$y(t) = \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \frac{1}{T} \int x_N(t) dt\right) = C_0(t)C(t) - S_0(t)S(t),$$

где

$$C_0(t) = \cos(\omega_0 t), \quad S_0(t) = \sin(\omega_0 t),$$

$$C(t) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{T} \int x_N(t) dt\right), \quad S(t) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{T} \int x_N(t) dt\right).$$

Обозначим

$$\varphi'(t) = \frac{\pi}{2} \frac{1}{T} \int x_N(t) dt$$

Учитывая периодичность функций косинуса и синуса, достаточно определить значение мгновенной фазы сигнала в интервале от $-\pi$ до π . Поэтому определим аргумент косинуса и синуса следующим образом:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi'(t) & \text{при } -\pi \leq \varphi'(t) \leq \pi, \\ \varphi'(t) - 2\pi & \text{при } \varphi'(t) > \pi, \\ \varphi'(t) + 2\pi & \text{при } \varphi'(t) < -\pi. \end{cases}$$

Тогда

$$C(t) = \cos(\varphi(t)), \quad S(t) = \sin(\varphi(t)).$$

Из приведенных соотношений следует, что для формирования сигнала MSK квадратурным методом необходимо иметь интегратор нормированного модулирующего сигнала, умноженного на $0.5\pi/T$, два функциональных преобразователя $\cos(\varphi(t))$ и $\sin(\varphi(t))$, косинусно-синусный генератор несущей, вырабатывающий квадратурные компоненты $\cos(\omega_0 t)$ и $\sin(\omega_0 t)$, и повышающий преобразователь частоты (рисунок П.6).

Формирователь сигнала GMSK отличается от формирователя сигнала MSK только наличием гауссовского ФНЧ, который на рисунке показан пунктиром.

На рисунке П.7 приведены временные диаграммы формирования низкочастотных квадратурных компонент сигнала MSK.

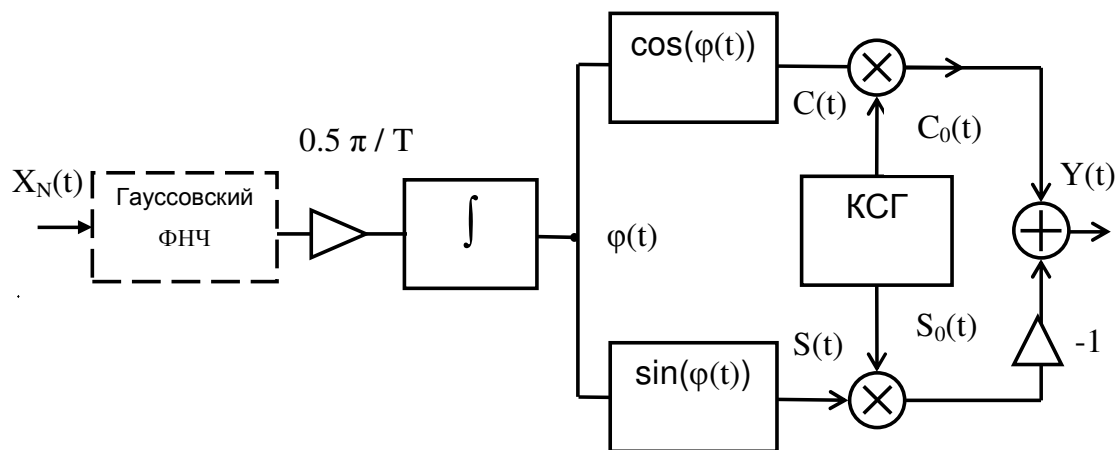


Рисунок П.6 – Формирователь сигналов MSK и GMSK

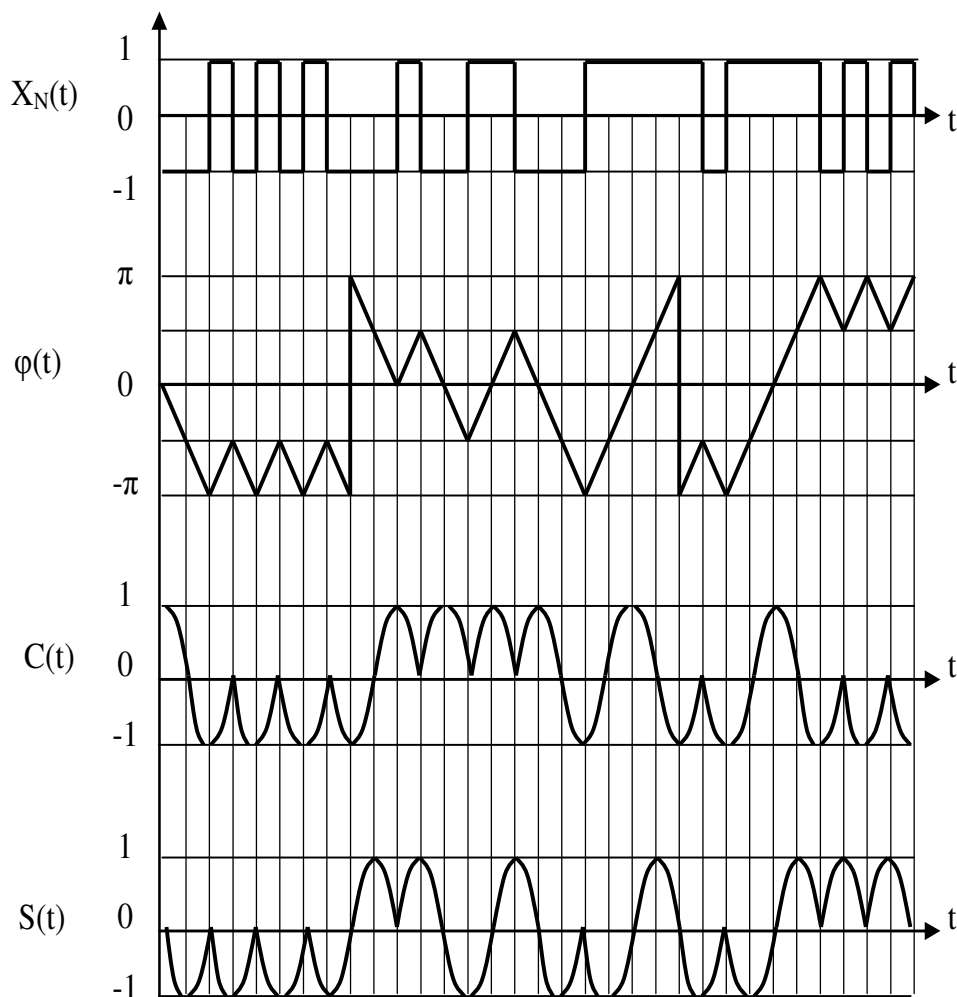


Рисунок П.7 – Временные диаграммы формирования низкочастотных квадратурных компонент сигнала MSK

После повышающего преобразователя частоты получается сигнал MSK, временная диаграмма которого приведена на рисунке П.8. На этом же рисунке показана последовательность элементарных посылок на входе формирователя, задержанная на временной интервал t_0 .

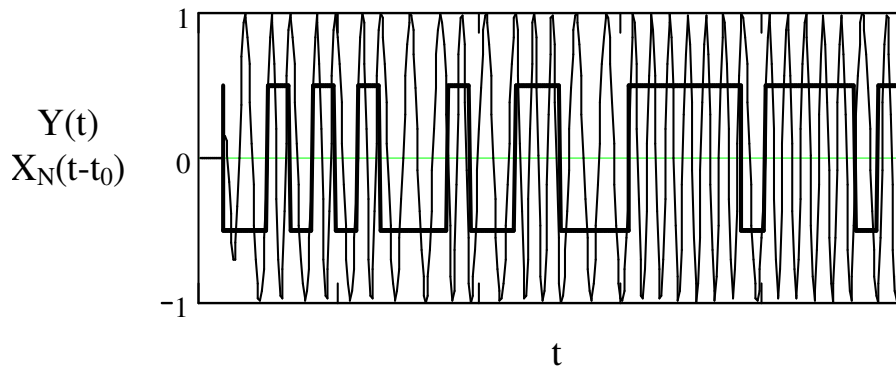


Рисунок П.8 – Временные диаграммы высокочастотных квадратурных компонент сигнала и выходной сигнал формирователя

4. Автокорреляционный демодулятор сигналов MSK и GMSK

На рисунке П.9 приведена структурная схема автокорреляционного демодулятора сигналов MSK и GMSK.

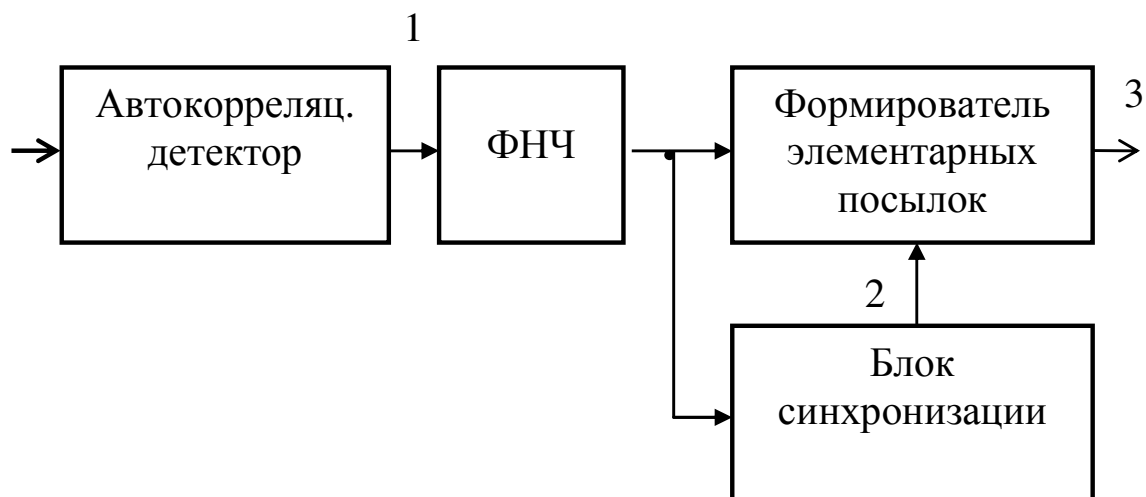


Рисунок П.9 – Функциональная схема автокорреляционного демодулятора сигналов MSK и GMSK

Функциональная схема автокорреляционного детектора представлена на рисунке П.10.

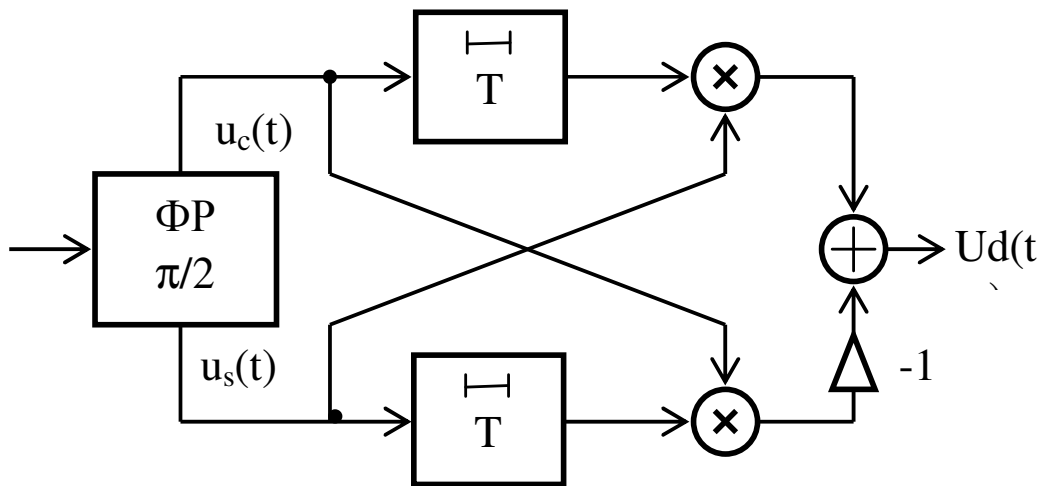


Рисунок П.10 – Автокорреляционный детектор

Детектор состоит из 90-градусного фазорасщепителя (ФР), двух линий задержки, каждая из которых задерживает сигнал на длительность элементарной посылки T , двух перемножителей и вычитателя.

Пусть на выходах ФР действуют сигналы

$$u_c(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_0(t)),$$

$$u_s(t) = \sin(\omega_0 t + \varphi_0(t)),$$

где

$$\varphi_0(t) = \frac{\pi}{2} \frac{1}{T} \int x_N(t) dt.$$

Тогда на выходе детектора получим

$$\begin{aligned} u_d(t) &= u_s(t) u_c(t - T) - u_c(t) u_s(t - T) = \\ &= \sin(\omega_0 T + \varphi_0(t) - \varphi_0(t - T)). \end{aligned}$$

Для нормальной работы детектора необходимо, чтобы в длительности элементарной посылки укладывалось целое число полупериодов несущей, т.е. выполнялось условие $2\pi f_0 T = \pi L$, где L – целое число.

В этом случае сигнал на выходе детектора равен

$$u_d(t) = (-1)^L \sin(\varphi_0(t) - \varphi_0(t - T)).$$

На рисунке П.11 показаны временная диаграмма передаваемого нормированного сигнала $x_N(t)$, действующего на входе формирователя, фаза сигнала на входе демодулятора $\varphi_0(t)$, изменяющаяся в соответствии с законом модуляции, фаза сигнала, задержанного на длительность элементарной посылки $\varphi_0(t-T)$, разность фаз $\varphi_0(t) - \varphi_0(t-T)$ и синус этой разности, определяющий выходной сигнал автокорреляционного детектора.

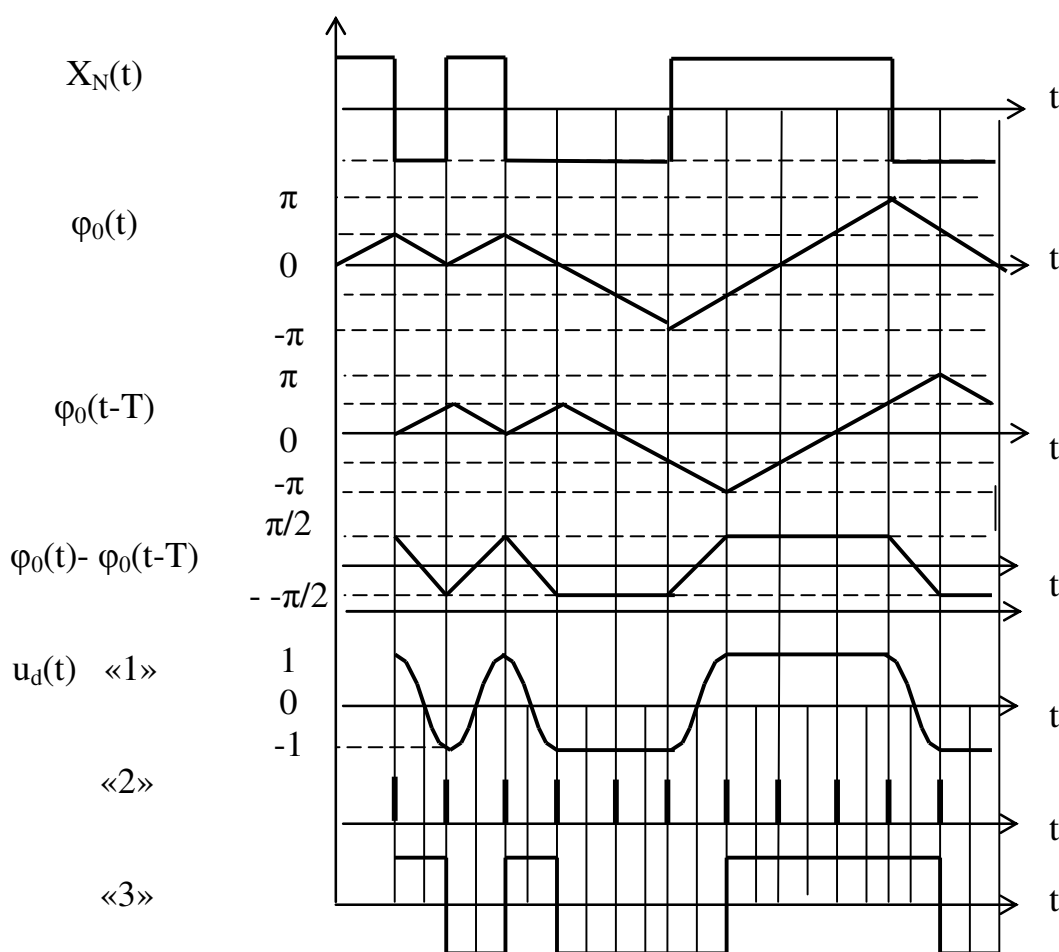


Рисунок П.11 – Временные диаграммы сигналов в автокорреляционном демодуляторе

Выходной сигнал детектора через ФНЧ, обеспечивающего помехоустойчивость демодулятора, поступает на формирователь элементарных посылок. На второй вход формирователя подаются

короткие стробирующие импульсы в аналоговом варианте или единичные отсчеты в цифровом, следующие с периодом, равным длительности элементарных посылок, и действующие в середине элементарной посылки.

В момент действия единичного отсчета определяется знак сигнала на выходе детектора (или ФНЧ при его наличии). При положительном знаке устанавливается положительный уровень сигнала на выходе формирователя и остаётся неизменным до прихода следующего единичного отсчета, при отрицательном знаке – отрицательный уровень сигнала на выходе формирователя.

При наличии фильтра выходной сигнал формирователя задерживается на время задержки сигнала в фильтре.

Из временной диаграммы рисунка П.11 видно, что выходной сигнал детектора со сдвигом во времени повторяет переданный сигнал.

Блок синхронизации состоит из выделителя фронтов выходного сигнала детектора, генератора пилы, охваченного кольцом ФАПЧ, и формирователя единичных отсчетов (рисунок П.12).

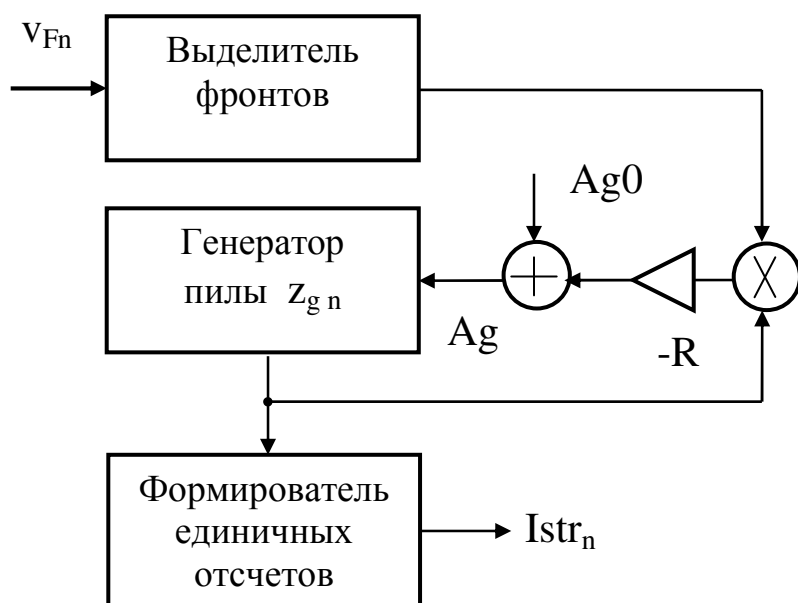


Рисунок П.12 - Укрупненный алгоритм функционирования блока синхронизации

Он предназначен для формирования последовательности единичных стробирующих отсчетов I_{str_n} , следующих с периодом, равным длительности элементарной посылки сигнала.

По времени единичные отсчеты I_{str_n} должны соответствовать серединам элементарных посылок.

На рисунке П.13 приведены временные диаграммы пилообразного колебания, последовательности отсчетов I_{g_n} , и последовательности стробирующих отсчетов I_{str_n} .

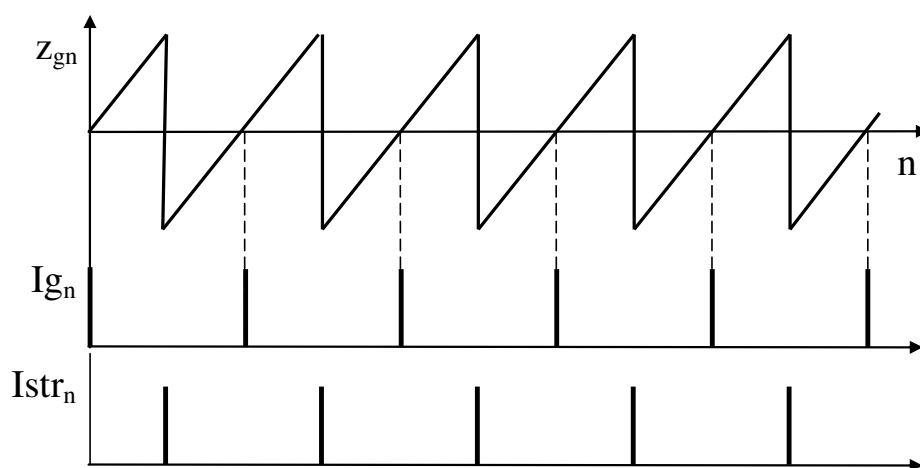


Рисунок П.13- Пилообразное колебание и последовательность единичных отсчетов

Стробирующие отсчеты I_{str_n} формируются путем сдвига во времени на половину длительности элементарной посылки отсчетов I_{g_n} или непосредственно из пилообразного колебания при его переходе от положительного к отрицательному значению.

Единичные отсчеты I_{g_n} формируются или при нулевом значении отсчета пилообразного колебания, или при переходе пилы через нуль с отрицательного на положительное значение.

Последовательность I_{g_n} используется для подстройки фазы пилообразного колебания по выходному сигналу выделителя фронтов.

Выделитель фронтов вырабатывает единичный отсчет при переходе сигнала на выходе ФНЧ от посылки негатива к посылке позитива и наоборот согласно следующему соотношению:

$$I_{Fn} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{Fn} = 0 \text{ или при } v_{Fn} \cdot v_{Fn-1} < 0, \\ 0 & \text{при } v_{Fn} \cdot v_{Fn-1} > 0. \end{cases}$$

Принцип подстройки фазы генератора пилообразных колебаний поясняет рисунок П.14.

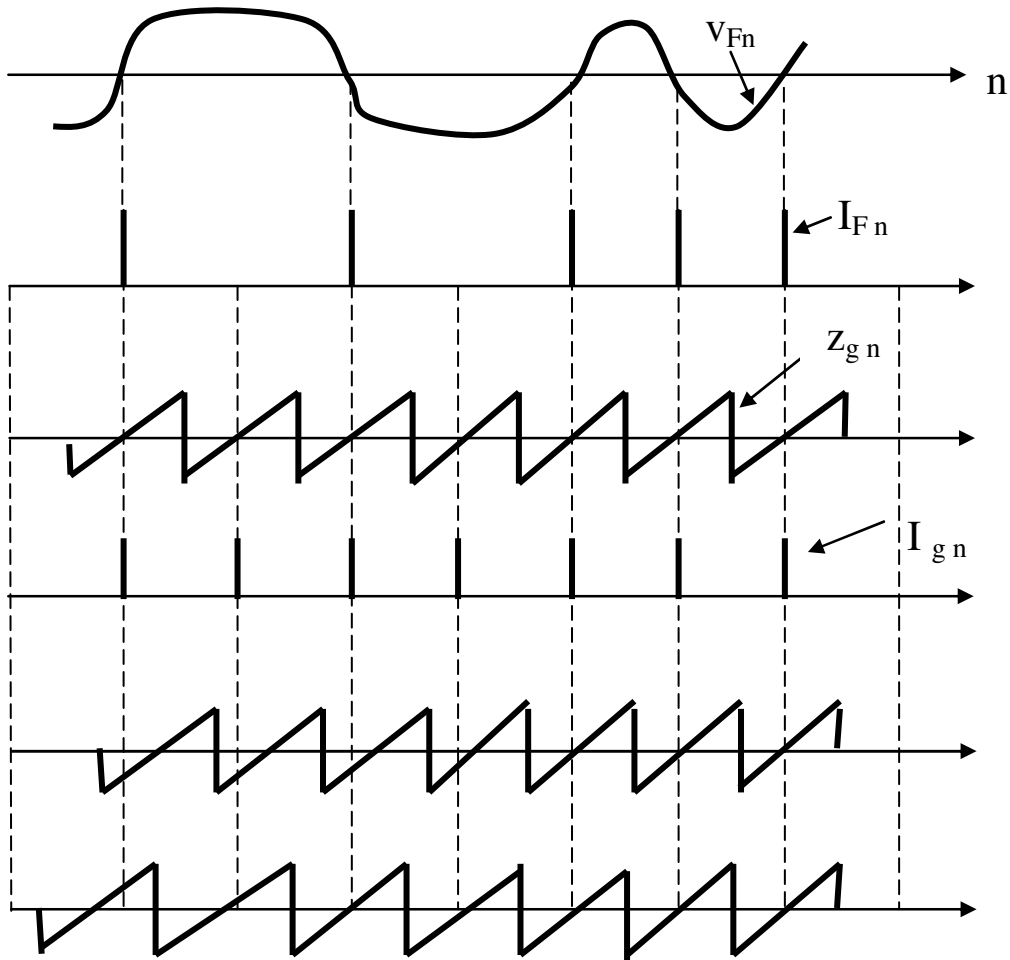


Рисунок П.14 – Временные диаграммы подстройки фазы пилообразного колебания

Если пилообразное колебание сфазировано правильно, то единичному отсчету сигнала выделителя фронтов I_{Fn} соответствует нулевое значение z_{gn} . При неправильном фазировании единичный отсчет I_{Fn} приходится либо на отрицательное, либо на положительное значение z_{gn} .

Это обстоятельство используется для подстройки фазы пилообразного колебания в соответствии со схемой рисунка П.12. На

этом рисунке A_{g0} – значение константы пилы при разомкнутом кольце автоподстройки, а R – константа управления. Константы определяются следующим образом:

$$A_{g0} = \frac{2}{n_v}, \quad R = (0.05 \dots 0.15) A_{g0}.$$

Из рисунков П.12 и П.14 видно, что при правильном фазировании пилообразного колебания сигнал управления равен нулю.

Если отсчету выделителя фронтов I_{Fn} соответствует положительное значение отсчета пилы, то сигнал управления положителен, а если отсчету I_{Fn} соответствует отрицательное значение отсчета пилы, то сигнал управления отрицателен. В результате осуществляется сдвиг пилы в нужном направлении.

Перед выполнением эксперимента по исследованию помехоустойчивости демодуляторов сигналов MSK и GMSK ознакомьтесь с разделом 5 ПРИЛОЖЕНИЯ А к лабораторной работе №9.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
к лабораторной работе №10

Исследование цифрового формирователя и цифрового демодулятора сигналов минимальной и гауссовской минимальной частотной манипуляции

Программа синтеза гауссовского фильтра.

Имя программы: «Gauss»

Ввод исходных данных

$v := 2.4$ Скорость манипуляции в килободах

$F_d := 19.2$ Частота дискретизации в кГц

$n_v := \frac{F_d}{v}$ Количество отсчетов в элементарной посылке

$\sigma := \sqrt{2}$ Неравномерность АЧХ в полосе пропускания

$BT := 0.5$ Параметр сигнала GMSK – произведение полосы пропускания ФНЧ на длительность элементарной посылки

$Az_{dB} := 40$ Ослабление в полосе задерживания в децибелах

$Az := 10^{\frac{Az_{dB}}{20}}$

Определение граничной частоты полосы пропускания

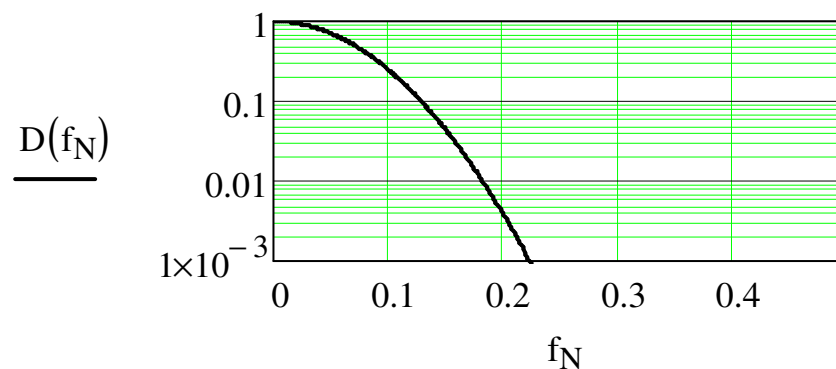
$f_{Ng} := \frac{BT}{n_v}$

Требуемая АЧХ фильтра

$$D(f_N) := \exp\left(\frac{-\ln(\sigma)}{f_{Ng}^2} \cdot f_N^2\right)$$

Диапазон изменения нормированной частоты

$$f_N := 0, 0.001 \dots 0.5$$



Расчет коэффициентов системной функции фильтра

$$B_{G_0} := 2 \cdot \int_0^\pi D(f_N) df_N$$

$K_0 := 7$ Половина длины линии задержки

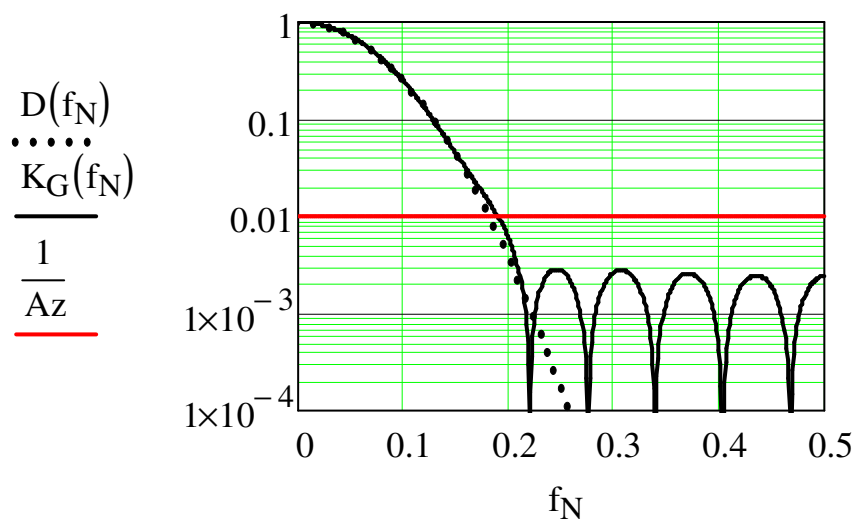
$$k := 1 \dots K_0$$

$$B_{G_k} := 2 \cdot \int_0^{0.5} D(f_N) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_N) df_N$$

Расчет реальной АЧХ

$$K_G(f_N) := \left| B_{G_0} + 2 \left[\sum_{k=1}^{K_0} (B_{G_k} \cdot \cos(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N)) \right] \right|$$

Построение графиков реальной и идеальной АЧХ



Реальная АЧХ – сплошная линия

Идеальная АЧХ – пунктирная линия

Реальная АЧХ должна совпадать с идеальной при значениях коэффициента передачи, больших и равных $1/Az$.

Если несовпадение характеристик наблюдается при значениях коэффициента передачи, больших Az , то нужно увеличить K_0 .

В противном случае длина линии задержки может быть уменьшена.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
к лабораторной работе №10

Исследование цифрового формирователя и цифрового демодулятора сигналов минимальной и гауссовской минимальной частотной манипуляции

Синтез ФНЧ с АЧХ типа «приподнятый косинус»
Имя программы: Приподнятый косинус

Ввод исходных данных

$v := 4.8$ Скорость манипуляции в килободах

$Fd := 48$ Частота дискретизации в килогерцах

$f_{Ng} := \frac{v}{2 \cdot Fd}$ Нормированная граничная частота
при граничной частоте $Fg = v/2$

$\alpha := 0.5$ Коэффициент скругления АЧХ

$Az_{dB} := 40$ Ослабление в полосе задерживания
в децибелах

$Az := 10^{\frac{Az_{dB}}{20}}$

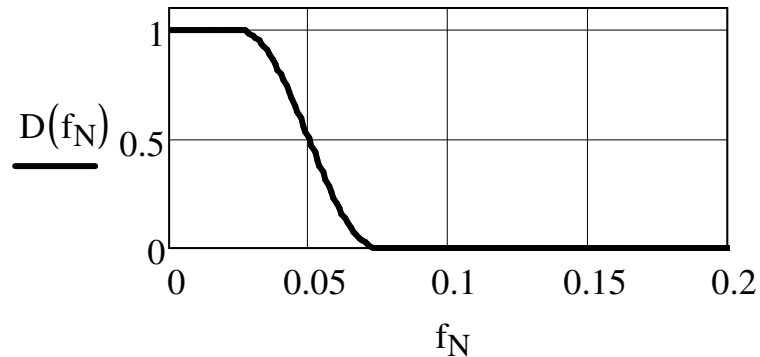
Функция, описывающая требуемую АЧХ

$$\rho(f_N) := 0.5 \cdot \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_N - f_{Ng}}{\alpha \cdot f_{Ng}} \right) \right)$$

$$K(f_N) := \text{if} [f_N \leq f_{Ng} \cdot (1 - \alpha), 1, \text{if} (f_N < f_{Ng} \cdot (1 + \alpha), \rho(f_N), 0)]$$

Диапазон изменения нормированной частоты

$$f_N := 0, 0.001 \dots 0.5$$



Расчет коэффициентов системной функции

$$B_0 := 2 \cdot f_{Ng}$$

$K_0 := 25$ Половина длины линии задержки

$$k := 1 \dots K_0$$

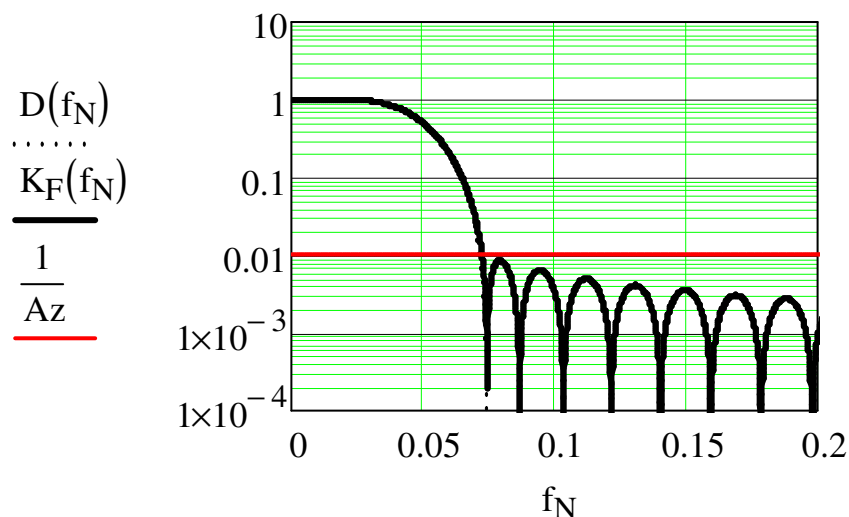
$$B_k := 2 \cdot \int_0^{0.5} D(f_N) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_N) df_N$$

Расчет реальной АЧХ

$$K_F(f_N) := \left| B_0 + \sum_{k=1}^{K_0} (2 B_k \cdot \cos(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N)) \right|$$

$$f_N := 0, 0.0001 \dots 0.5$$

Построение графиков реальной и идеальной АЧХ



Реальная АЧХ – сплошная линия
 Идеальная АЧХ – пунктирная линия

Реальная АЧХ должна совпадать с идеальной при значениях коэффициента передачи, больших и равных $1/Az$.

Если несовпадение характеристик наблюдается при значениях коэффициента передачи, больших Az , то нужно увеличить K_0 .

В противном случае длина линии задержки может быть уменьшена.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
к лабораторной работе №10

Исследование цифрового формирователя и цифрового
демодулятора сигналов минимальной и гауссовской
минимальной частотной манипуляции

Синтез нерекурсивного 90 – градусного фазорасщепителя
Имя программы: FR1_1

Ввод исходных данных

$v := 2.4$ Скорость манипуляции в килободах

$F_d := 19.2$ Частота дискретизации в кГц

$\Pi_N := 3 \cdot \frac{v}{F_d}$ Нормированная полоса пропускания

$N := 13$ Нечетное целое число, равное половине длины
линии задержки

Определение коэффициентов системной функции
фазорасщепителя

$$M := \frac{N - 1}{2}$$

$$\Delta\theta := \pi \cdot \Pi_N$$

$$\varphi_1(m, k, \Delta\theta) := (-1)^{m+k+1} \cdot \frac{\sin(2 \cdot (m+k+1) \cdot \Delta\theta)}{2 \cdot (m+k+1)}$$

$$\varphi_2(m, k, \Delta\theta) := \text{if} \left[m = k, \Delta\theta, (-1)^{m-k} \cdot \frac{\sin(2 \cdot (m-k) \cdot \Delta\theta)}{2 \cdot (m-k)} \right]$$

```

φ := | for k ∈ 0..M
      |   for m ∈ 0..M
      |     φm,k ← φ1(m,k,Δθ) - φ2(m,k,Δθ)
      | φ

```

```

k := 0..M

```

$$\psi_k := (-1)^{k+1} \cdot \frac{2 \cdot \sin[(2 \cdot k + 1) \cdot \Delta\theta]}{2 \cdot k + 1}$$

```

Bfr := | for k ∈ 0..M
        |   for m ∈ 0..M
        |     am,k ← φm,k
        |   D ← |a|
        |   for i ∈ 0..M
        |     | for k ∈ 0..M
        |     |   ai,k ← ψk
        |     |   D1i ← |a|
        |     |   Bfr2·i+1 ←  $\frac{1}{2} \cdot \frac{D1_i}{D}$ 
        |     |   for k ∈ 0..M
        |     |     ai,k ← φi,k
        |   Bfr

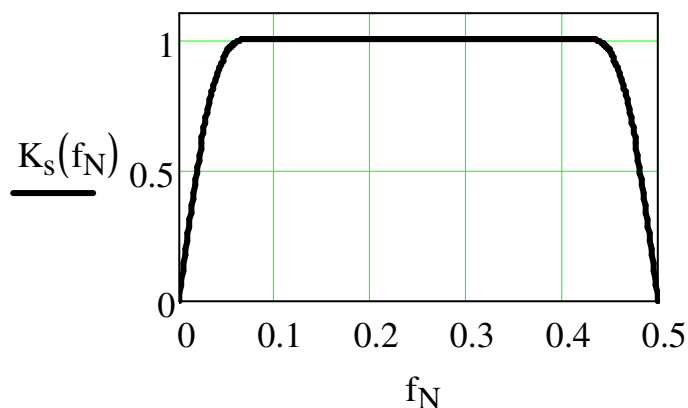
```

Программа выдаёт только половину значений коэффициентов. Вторая половина имеет противоположный знак. Нумерация коэффициентов ведётся от середины линии задержки.

Расчет АЧХ фазорасщепителя по выходу синусной
КОМПОНЕНТЫ

$$K_s(f_N) := 2 \left| \sum_{m=0}^M \left[Bfr_{2 \cdot m + 1} \cdot \sin \left[(2 \cdot m + 1) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N \right] \right] \right|$$

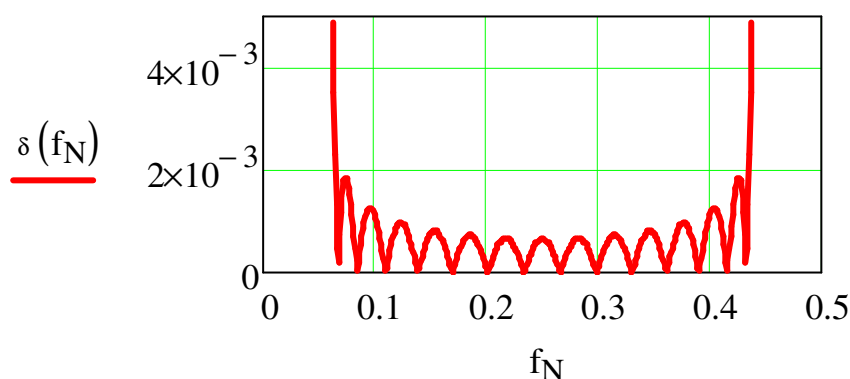
$$f_N := 0, 0.001 .. 0.5$$



Расчет отклонения реальной АЧХ по выходу синусной компоненты от идеальной в пределах полосы пропускания фазорасщепителя

$$f_N := 0.25 - \frac{\pi N}{2}, 0.25 - \frac{\pi N}{2} + 0.001 .. 0.25 + \frac{\pi N}{2}$$

$$\delta(f_N) := |K_s(f_N) - 1|$$



Если приведенном значении N максимальное отклонение в пределах полосы пропускания окажется больше допустимого, то длину линии задержки нужно увеличить, а если меньше допустимого, то уменьшить.

Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования
“Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики”
443010, г. Самара, ул. Льва Толстого 23

Подписано в печать 24.06.14 г. Формат 60 x 84/16
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс.
Заказ 1001068. Печать оперативная. Усл. печ. л. 4,21. Тираж 100 экз.

Отпечатано в издательстве учебной и научной литературы
Поволжского государственного университета
телекоммуникаций и информатики
443090, г. Самара, Московское шоссе 77, т. (846) 228-00-44