

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное бюджетное государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

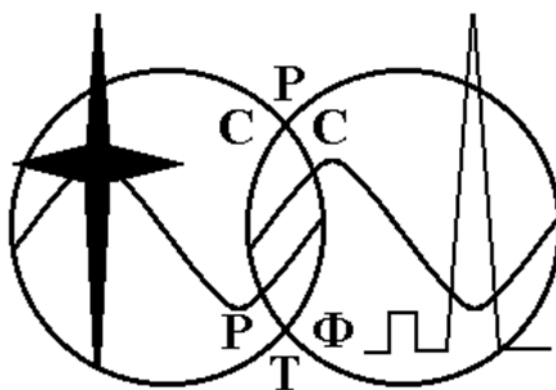
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра средств радиосвязи

МЕЛИХОВ С.В., ВЕРБИЛО И.М.

**ТРЕХКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ**

Учебно-методическое пособие по лабораторной работе в пакете
SIMULINK компьютерной среды MATLAB по дисциплинам «Ра-
диосвязь и радиовещание», «Системы радиовещания» для студен-
тов радиотехнических специальностей



Томск – 2012

Мелихов С.В., Вербило И.М. Трехканальная система связи на основе шумоподобных сигналов. Учебно-методическое пособие по лабораторной работе в пакете SIMULINK компьютерной среды MATLAB по дисциплинам «Радиосвязь и радиовещание», «Системы радиовещания» для студентов радиотехнических специальностей. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2012. – 17 с.

Приводятся краткие теоретические сведения и аналитические выражения, необходимые для исследования трехканальной системы связи на основе шумоподобных сигналов. Представлена методика проведения экспериментального исследования на основе использования компьютерной среды Design Center (PSpice).

© Мелихов С.В., Вербило И.М. 2012

© Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники, 2012

Цель работы:

изучение принципа формирования шумоподобных сигналов (ШП-сигналов) и особенностей работы системы связи на их основе;

приобретение навыков работы с инструментом визуального моделирования SIMULINK пакета MATLAB.

1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Понятие "шумоподобные сигналы". ШП-сигналы или сигналы с расширенным (распределенным) спектром относятся к технологии CDMA {Code Division Multiple Access - множественный (многостанционный) доступ с кодовым разделением каналов}.

Важным параметром ШП-сигналов является база сигнала.

Базой импульсного сигнала называют произведение ширины его спектра Δf на длительность единичного элемента T_b :

$$B = \Delta f \cdot T_b. \quad (1)$$

Для информационного сигнала с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) без возвращения к нулю (БВН) $\Delta f_{ИКМ} = 1 / T_b$, следовательно $B = 1$.

Признаком импульсного ШП-сигнала является большая величина базы ($B \gg 1$). Для получения $B \gg 1$ спектр передаваемого информационного сигнала искусственно расширяется. Широкое применение на практике нашли два метода расширения спектра: метод *прямой последовательности* (DS - Direct Sequence) и метод *скачков по частоте* (FH - Frequency Hopping). Здесь рассмотрен принцип формирования, передачи и приема ШП-радиосигнала на основе метода прямой последовательности.

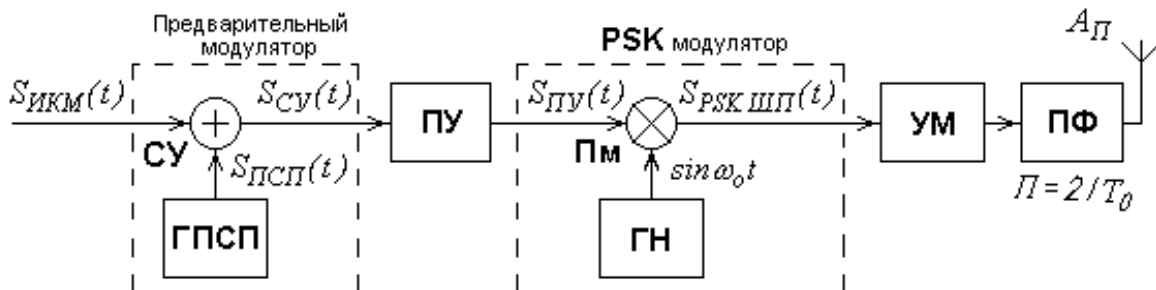


Рисунок 1 - Структурная схема передатчика ШП-радиосигнала с двухпозиционной фазовой манипуляцией.
Включение блока ПУ между ГПСЧ и СУ не изменит свойств схемы

1.2 Формирование ШП-радиосигнала по методу прямой последовательности. Структурная схема передатчика ШП-радиосигнала, формируемого по методу прямой последовательности, изображена на рисунке 1. В суммирующем устройстве (СУ) происходит сложение по *mod 2* битов *информационной последовательности* $S_{ИКМ}(t)$ и символов *псевдослучайной последовательности* (ПСП) $S_{ПСП}(t)$ от генератора *псевдослучайной последовательности* (ГПСЧ). Блок *преобразования уровней* (ПУ) производит преобразование уровней сигнала $S_{СУ}(t)$ и образует сигнал $S_{ПУ}(t)$. В PSK-модуляторе осуществляется *двухпозиционная фазовая манипуляция* (Phase Shift Keying - PSK) *несущей частоты* $\omega_0 = 2\pi f_0$ для получения *фазоманипулированного шумоподобного радиосигнала* $S_{PSK ШП}$. Случай двухпозиционной

PSK (BPSK – Binary Phase Shift Keying) здесь выбран для простоты рассмотрения; в принципе, возможно использование многопозиционной *PSK*, а также других видов модуляции.

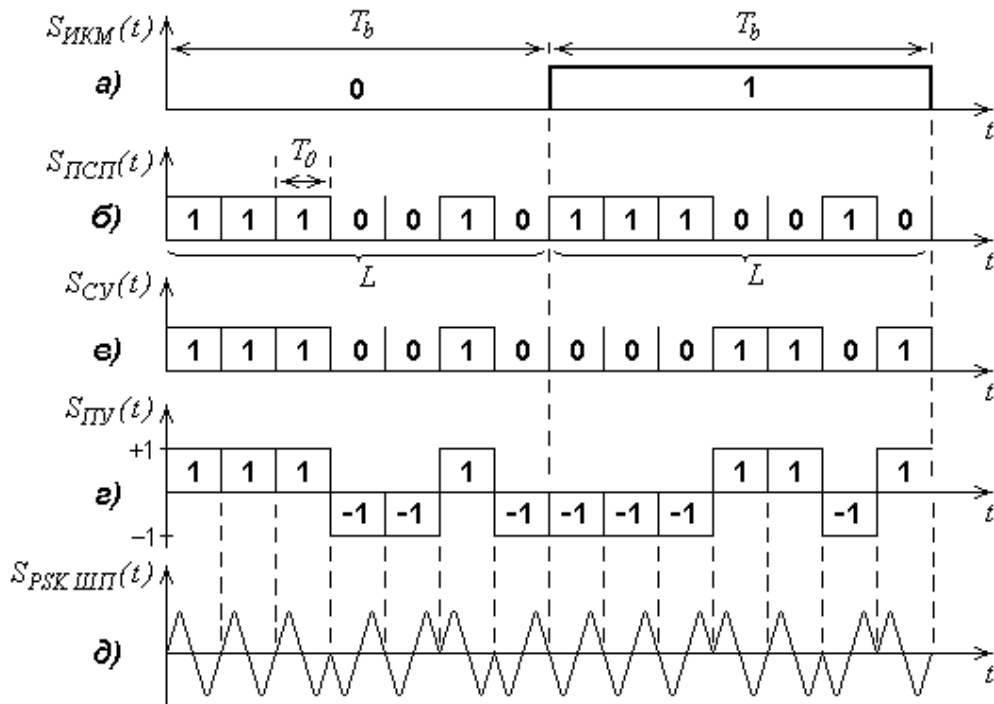


Рисунок 2 - К принципу формирования шумоподобного радиосигнала по методу прямой последовательности

При использовании метода *прямой последовательности* используется *предварительная модуляция*: каждый бит информационного сигнала $S_{ИКМ}(t)$ (рисунок 2,а) накладывается путем сложения по *mod 2* на поток из L "расширяющих" символов *периодической псевдослучайной последовательности* $S_{ПСП}(t)$ (рисунок 2,б). При этом длительность единичного элемента импульсного сигнала уменьшается в L раз ($T_0 = T_b / L$), что приводит к расширению спектра импульсного сигнала также в L раз: $\Delta f_{СУ} = \Delta f_{ИКМ} \cdot L$. Очевидно, что после предварительной модуляции база информационного импульсного сигнала $S_{СУ}(t)$ (рисунок 2,в)

$$B = L = \Delta f_{СУ} \cdot T_b = \Delta f_{СУ} / \Delta f_{ИКМ} = T_b / T_0. \quad (2)$$

Двухполярный сигнал $S_{ПУ}(t)$ (рисунок 2,г) управляет начальной фазой напряжения несущей частоты $U \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$: $\varphi_0 = 0^\circ$, если $S_{ПУ} = 1$; $\varphi_0 = 180^\circ$, если $S_{ПУ} = -1$. Вид ШП-радиосигнала с фазовой манипуляцией на выходе *PSK*-модулятора $\{S_{PSK_ШП}(t)\}$ изображен на рисунке 2,д. Для упрощения каждый единичный элемент длительностью T_0 представлен одним периодом несущей частоты (на практике количество периодов в элементе гораздо больше).

Ширина спектра шумоподобного радиосигнала

$$\Delta f_{PSK_ШП} = 2 / T_0. \quad (3)$$

При приеме ШП-радиосигнала необходимы *две ступени демодуляции*: сначала нужно провести *демодуляцию расширяющего кода (демодуляцию ПСП)*, а затем - *демодуляцию информационного сигнала*.

Демодуляция ПСП проводится в приемнике при помощи *коррелятора*, выделяющего выброс автокорреляционной функции *периодической ПСП*.

1.3 Автокорреляционная функция знакопеременных периодических

M – **последовательностей**. Рассмотрим понятие *автокорреляционной функции* (АКФ) сигнала.

Под АКФ сигнала $S(t)$ понимают величину

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)S(t-\tau) dt, \quad (4)$$

где τ – некоторый временной сдвиг функции $S(t)$.

Автокорреляционная функция $R(\tau)$ характеризует степень связи (корреляции) сигнала $S(t)$ со своей копией, сдвинутой по оси времени на величину τ .

На рисунке 3 показано построение АКФ для одиночного импульсного сигнала с амплитудой S . Сдвинутый на величину τ сигнал $S(t-\tau)$ показан на рисунке 3,б, произведение $S(t)S(t-\tau)$ - на рисунке 3,в, зависимость $R(\tau)$ - на рисунке 3,г.

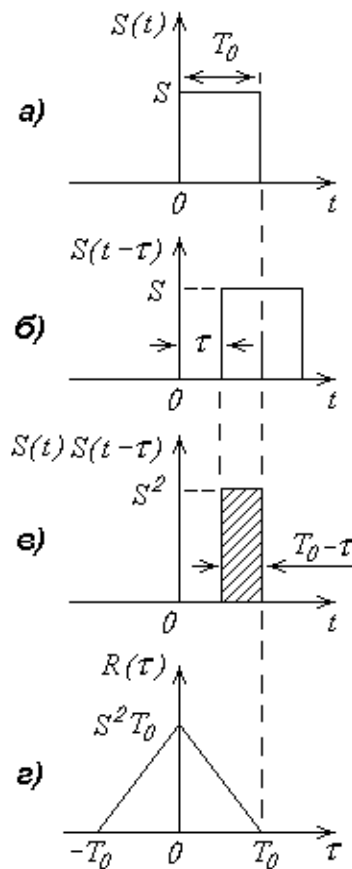


Рисунок 3 - К понятию автокорреляционной функции

АКФ имеет **максимум (выброс)** при $\tau = 0$, т.к. при отсутствии временного сдвига сигнал коррелирован сам с собой. Максимальное значение АКФ равно энергии сигнала E :

$$R(0) = \int_0^{T_0} S^2(t) dt = S^2 T_0 = E. \quad (5)$$

С увеличением τ АКФ $R(\tau)$ убывает и при сдвиге сигнала $S(t-\tau)$ на величину, превышающую длительность импульса T_0 , обращается в ноль. АКФ является **четной функцией**.

Вид (или порядок следования символов) *периодической ПСП* формируется в ГПСР таким образом, чтобы ее АКФ имела **максимальные и периодические выбросы при временных сдвигах**

$$\tau = 0 \pm k L T_0, \quad (5)$$

где L – длина ПСП; $k = 0, 1, 2, \dots$

АКФ ПСП имеет *максимальные выбросы* в том случае, если последовательность является *знакопеременной*, т.е. состоит из символов "–1" и "1". Для получения знакопеременной последовательности необходимо заменить символы "0" бинарной последовательности на символы "–1" (см. рисунок 2,а). Эту операцию в схеме, изображенной на рисунке 1, прделывает блок ПУ (заметим, что включение блока ПУ между ГПСП и СУ не изменит свойств схемы).

Условию (11.63) удовлетворяют *периодические ПСП максимальной длины* (M – последовательности или последовательности Хаффмена), *последовательности Голда* (Gold-коды), *Касами* и *Уолша* и др. Рассмотрим принцип формирования периодических M – последовательностей.

1.4 Формирование M -последовательностей и их свойства. В качестве генераторов периодических бинарных (имеющих уровни "0" и "1") M – последовательностей используют *цифровые автоматы*, содержащие в своем составе n – разрядный регистр сдвига на D – триггерах и цепь обратной связи с генератором бита четности (ГБЧ, рисунок 4,а). Регистром сдвига управляют тактовые импульсы с частотой следования $1/T_0$. ГБЧ представляет из себя набор сумматоров по $mod 2$ выходных сигналов *только от определенных триггеров регистра сдвига* (поэтому соединения выходов триггеров с соответствующими сумматорами показаны пунктирными линиями).

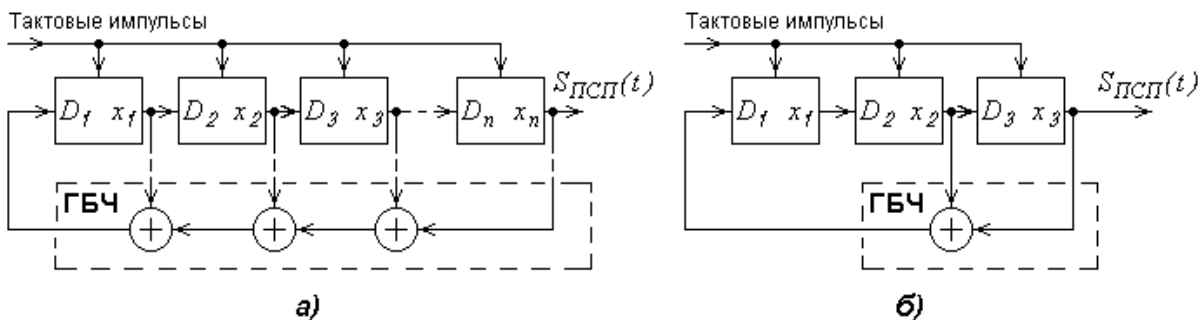


Рисунок 4 - а - обобщенная структурная схема ГПСП - цифрового автомата формирования периодических бинарных M – последовательностей; б - генератор псевдослучайной 7 – символьной последовательности, изображенной на рис.11.51,б

На рисунке 4,б приведена структурная схема ГПСП, генерирующего семисимвольную M – последовательность (вид этой последовательности показан на рисунке 2,б). Рассмотрим принцип работы такого ГПСП.

Пусть в исходный момент времени в регистр сдвига было введено число 110 (число может быть любым, но только не 000). С поступлением первого тактового импульса (ТИ) в первую ячейку запишется цифра "1", т.к. сумма по $mod 2$ второго и третьего разрядов равна единице. Во вторую ячейку перейдет цифра "1", ранее записанная в первой ячейке; в третью ячейку перейдет цифра "1", ранее записанная во второй ячейке. Эти состояния ячеек приведены в первой строке таблицы 1. С поступлением последующих ТИ процесс смены состояний ячеек отражен в последующих строках таблицы. С поступлением восьмого ТИ (пятнадцатого, двадцать второго и т.д.) цикл повторяется. В результате на выходе генератора образуется периодическая ПСП вида 1110010, с длиной $L = 7$ и периодом $T_b = 7 T_0$.

Таблица 1 - Состояние ячеек регистра сдвига ГПСП (рисунок 4,б)

Номер ТИ	Первая ячейка	Вторая ячейка	Третья ячейка
1	1	1	1
2	0	1	1
3	0	0	1
4	1	0	0
5	0	1	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1
...

В общем случае длина M –последовательностей

$$L = 2^n - 1, \quad (6)$$

а их количество

$$N = \varphi(L) / n, \quad (7)$$

где $\varphi(L)$ – функция Эйлера.

Для бинарных ПСП (состоящих из символов "0" и "1")

$$\varphi(L) = (L-1), \quad (8)$$

если L – простое число, т.е. число, которое нельзя представить в виде произведения других целых чисел (например, $7 = 2^3 - 1$, $31 = 2^5 - 1$, $127 = 2^7 - 1$, $8191 = 2^{13} - 1$ и т.д.), и

$$\varphi(L) = P < (L-1), \quad (9)$$

где P – число чисел в ряду $(1, 2, \dots, L-1)$, взаимно простых с числом L (т.е. не имеющих общих делителей, кроме единицы). Например, при $n=4$ $L = 2^4 - 1 = 15$ и взаимно простыми числами с L являются числа: $1, 2, 4, 7, 8, 11, 13, 14$ ($P=8$). Остальные числа в ряду $(1, 2, \dots, L-1)$ имеют общие делители с числом $L=15$ (эти числа: $3, 5, 6, 9, 10, 12$). Следовательно, при $n=4$ $N = P / 4 = 8 / 4 = 2$.

В таблице 2 приведены характеристики M –последовательностей в зависимости от числа разрядов регистра сдвига цифрового автомата (число n может быть и больше 15). Заметим, что с ростом длины число последовательностей резко возрастает.

M –последовательности обладают следующими свойствами.

Балансное свойство. В одном периоде M –последовательности содержится $2^{(n-1)} - 1$ нулей и $2^{(n-1)}$ единиц.

Свойство сдвига при сложении по mod 2. Сумма по mod 2 M –последовательности и ее произвольного циклического сдвига представляет собой другой циклический сдвиг исходной M –последовательности.

Свойства периодической АКФ M –последовательностей. Если в бинарной M –последовательности, состоящей из символов $(0, 1)$, заменить символы "0" на символы "-1" и получить последовательность $(-1, 1)$, то ее периодическая АКФ удовлетворяет условию (11.63) и определяется выражением:

$$R_{II}(\tau) = \begin{cases} 2^n - 1 = L, & \tau = 0 \pm k L T_0, & k = 0, 1, 2, \dots; \\ -1, & \tau = \pm k L T_0 \pm l T_0, & l = 1, 2, \dots, L-1. \end{cases} \quad (10)$$

Из (10) следует, что автокорреляционная функция периодических знакопеременных M –последовательностей является четной функцией и имеет максимальный выброс с периодом $L T_0$. Величина выброса пропорциональна длине последовательности L .

Таблица 2 - Длина и число M – последовательностей, а также один из возможных вариантов алгоритма формирования бита четности D_1 в ГБЧ

Число разрядов регистра сдвига (n)	Длина последовательности (L)	Число последовательностей (N)	D_1 в схеме рис.11.53,а
3	7	2	$x_2 \oplus x_3$
4	15	2	$x_3 \oplus x_4$
5	31	6	$x_4 \oplus x_5$
6	63	6	$x_5 \oplus x_6$
...
11	2047	176	$x_9 \oplus x_{10}$
12	4095	144	$x_2 \oplus x_{10} \oplus$ $\oplus x_{11} \oplus x_{12}$
...
15	32767	1800	$x_{14} \oplus x_{15}$

В качестве примера определим вид АКФ для 7 – символьной ПСП, изображенной на рисунке 2,б. Будем считать что в этой последовательности символы "0" заменены на символы "-1" и знакопеременная ПСП имеет вид: $S(t)=1\ 1\ 1\ -1\ -1\ 1\ -1$. Расчет значений АКФ такой последовательности при различных временных сдвигах ее копии $S(t-\tau)$ (при $\tau=lT_0$) иллюстрируется данными

таблицы 3. Величины периодической АКФ $R_{II}(\tau) = \int_0^{7T_0} S(t)S(t-\tau)dt$ приведены в последнем столбце таблицы, а вид нормированной АКФ $\{R_{II}(\tau) = R_{II}(\tau)/L = R_{II}(\tau)/7\}$ - на рисунке 5.

Максимальный выброс АКФ периодических ПСП имеет важное значение при их использовании в цифровых системах связи технологии CDMA: два или более сигналов могут переданы одновременно в одной и той же полосе частот, а затем успешно выделены, если их кодовые последовательности представляют собой циклические сдвиги одной M – последовательности на один и более символ.

Заметим, что ШП-радиосигналы могут использоваться и в системах измерения дальности. Точность измерения может быть обеспечена в пределах длительности одного символа ПСП, если в качестве маркера использовать максимальный выброс АКФ.

Таблица 3 - Расчет АКФ 7 – символьной знакопеременной периодической M – последовательности вида $S(t)=1\ 1\ 1\ -1\ -1\ 1\ -1$

Величина сдвига ($\tau = lT_0$)	Последовательность $S(t-\tau)$	$S(t)S(t-\tau)$ (посимвольное умножение)	$R_{II}(\tau)$ {сумма символов $S(t)S(t-\tau)$ }
0	1 1 1 -1 -1 1 -1	1 1 1 1 1 1 1	7
T_0	-1 1 1 1 -1 -1 1	-1 1 1 -1 1 -1 -1	-1
$2T_0$	1 -1 1 1 1 -1 -1	1 -1 1 -1 -1 -1 1	-1
$3T_0$	-1 1 -1 1 1 1 -1	-1 1 -1 -1 -1 1 1	-1
$4T_0$	-1 -1 1 -1 1 1 1	-1 -1 1 1 -1 1 -1	-1

$5T_0$	1 -1 -1 1 -1 1 1	1 -1 -1 -1 1 1 -1	-1
$6T_0$	1 1 -1 -1 1 -1 1	1 1 -1 1 -1 -1 -1	-1
$7T_0$	1 1 1 -1 -1 1 -1	1 1 1 1 1 1 1	7
$8T_0$	-1 1 1 1 -1 -1 1	-1 1 1 -1 1 -1 -1	-1
...

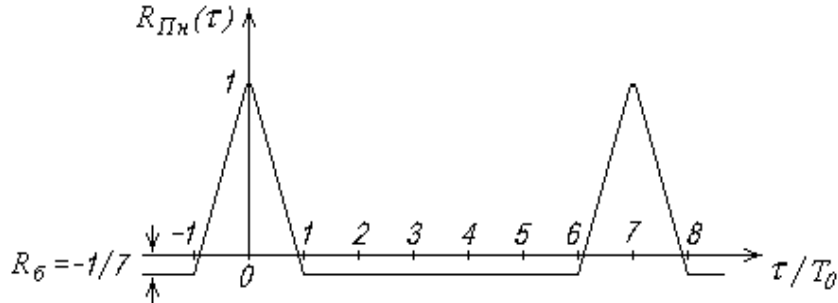


Рисунок 5 - Нормированная АКФ знакопеременной периодической 7 – символьной M – последовательности

На практике используются Gold-коды, число которых при заданной длине L значительно больше, чем число M – последовательностей. Gold-коды получают сложением по $\text{mod } 2$ двух M – последовательностей ($m=2$), одна из которых сдвигается по времени относительно другой на $1, 2, \dots, L$ символов. Число Gold-кодов оказывается равным

$$N_{Gold} = C_N^m = \frac{N!}{(N-m)!m!}. \quad (11)$$

1.5 Корреляционный приемник ШП-радиосигнала. Структурная схема приемника ШП-радиосигнала, сформированного с использованием метода прямой последовательности, приведена на рисунке 6. С выхода *радиотракта приемника* (РТПР), имеющего полосу пропускания $\Pi_{ПР} = \Delta f_{PSK_{ПП}} = 2 / T_0$, ШП-радиосигнал поступает на *коррелятор*. В состав коррелятора входят: перемножитель (Пм); генератор псевдослучайной последовательности (ГПСП); преобразователь уровней (ПУ); узкополосный полосовой фильтр (УПФ) с полосой пропускания $\Pi_{УПФ} = 2 / T_b$. ГПСП приемника генерирует точно такую же ПСП, что и ГПСП передатчика. Работой ГПСП и *PSK*-демодулятора управляет *система синхронизации* (ССНХР). Главное условие нормальной работы коррелятора - строгое согласование временных параметров принимаемого и опорного сигнала. ССНХР, как правило, содержит несколько следящих систем фазовой и частотной автоподстройки и систему слежения за задержкой сигнала.

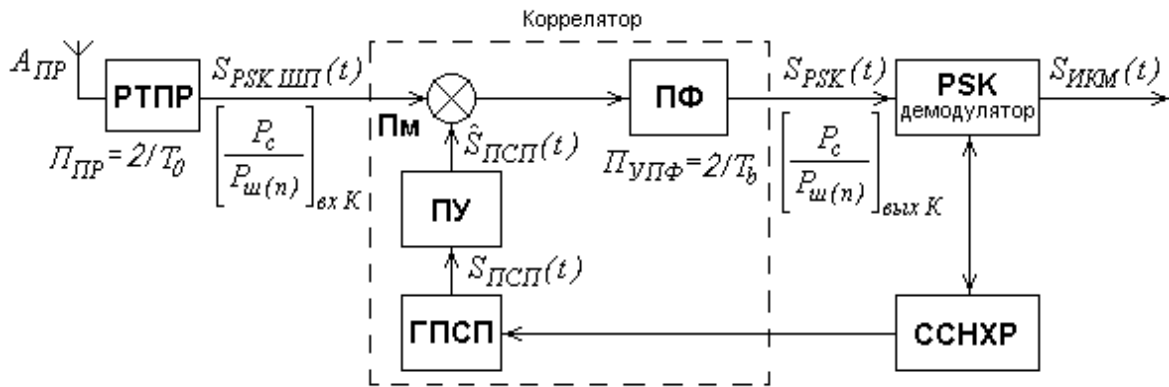


Рисунок 6 - Структурная схема приемника ШП-радиосигнала

Первая ступень демодуляции широкополосного шумоподобного PSK-радиосигнала, имеющего длительность единичного символа T_0 и ширину спектра $\Delta f_{PSK ШП} = 2 / T_0$, происходит в корреляторе. Если порядок следования нулей и единиц ШП-радиосигнала и генерируемой в приемнике ПСП совпадают (ШП-радиосигнал является согласованным), то на выходе ПМ образуется узкополосный информационный PSK-радиосигнал с длительностью единичного символа T_b и шириной спектра $\Delta f_{PSK} = 2 / T_b$. Этот процесс "демодуляции расширяющего кода" изображен на рисунке 7, а, б, в.

Ширина спектра узкополосного PSK-радиосигнала на выходе Пм в L раз меньше, чем ширина спектра широкополосного ШП-радиосигнала на входе Пм:

$$\Delta f_{PSK ШП} / \Delta f_{PSK} = T_b / T_0 = L. \quad (12)$$

Узкополосный PSK-радиосигнал проходит через УПФ (полоса пропускания которого $\Pi_{УПФ} = \Delta f_{PSK} = 2 / T_b$) и попадает на PSK-демодулятор, где осуществляется вторая ступень демодуляции - выделение информационного сигнала (рисунк 7, г).

Если на Пм коррелятора попадают еще какие-либо несогласованные широкополосные ШП-радиосигналы (широкополосные помехи), модулированные другими кодами (например, такими же M -последовательностями, но сдвинутыми во времени на один и более символов), то на выходе Пм они превращаются в хаотическую последовательность коротких импульсов с широким спектром. В результате через УПФ проходит лишь часть энергии несогласованных сигналов, причем эта часть тем меньше, чем больше длина L кодирующей (декодирующей) ПСП. Заметим, что чем большее число несогласованных ШП-радиосигналов имеется на входе приемника, тем хуже качество приема полезного сигнала.

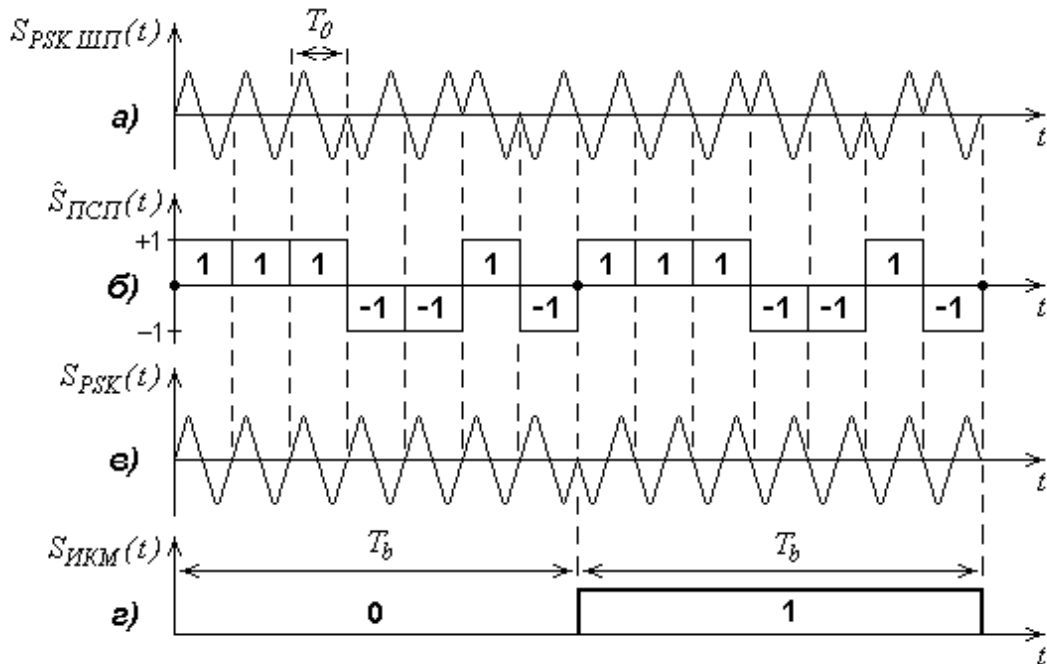


Рисунок 7 - К принципу демодуляции шумоподобного радиосигнала

Если на входе Пм имеется *узкополосная помеха* (например, гармоническая помеха, характеризуемая одной спектральной линией), то после ее перемножения с ПСП на выходе Пм образуется широкополосный сигнал с практически равномерным спектром. Лишь малая часть энергии этого широкополосного сигнала пройдет через УПФ коррелятора. Следовательно, узкополосная помеха ослабляется коррелятором тем больше, чем больше длина L кодирующей (декодирующей) ПСП.

Если на входе Пм имеется помеха в виде *широкополосного теплового шума*, то после ее перемножения с ПСП на выходе Пм образуется шумовая помеха с изменяющейся полярностью. Изменение полярности шумовой помехи не оказывает влияния на ее спектральную плотность. Следовательно, шумовая широкополосная помеха ослабляется коррелятором тем больше, чем больше длина L кодирующей (декодирующей) ПСП.

Таким образом, в корреляторе приемника обеспечивается как кодовое выделение полезного информационного сигнала, так и запас помехоустойчивости к помехам различного типа.

Улучшение отношения сигнал/шум (сигнал/помеха) коррелятором зависит от отношения полосы пропускания радиотракта приемника и полосы пропускания фильтра коррелятора и, следовательно, определяется длиной кодирующей (декодирующей) ПСП:

$$G_{u(n)}[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{[P_c / P_{u(n)}]_{\text{вых К}}}{[P_c / P_{u(n)}]_{\text{вх К}}} \approx 10 \lg (\Pi_{\text{ПР}} / \Pi_{\text{УПФ}}) = 10 \lg L. \quad (13)$$

Если, например, используется ПСП с длиной $L = 32767$, то $G_{u(n)} \approx 45 \text{ дБ}$. Это означает, что при $[P_c / P_{u(n)}]_{\text{вх К}} = 12 \text{ дБ}$ величина $[P_c / P_{u(n)}]_{\text{вх К}} = -33 \text{ дБ}$, т.е. прием полезного ШП-радиосигнала возможен при его уровне на входе приемника много меньшем, чем уровень шумов и помех (отношение $C/\text{Ш}$ на входе приемника связано с отношением $C/\text{Ш}$ на выходе радиотракта приемника формулой

$$[P_c / P_{u(n)}]_{\text{вх ПР}} = [P_c / P_{u(n)}]_{\text{вх К}} - N_{\text{ПР}}, \quad (14)$$

где $N_{\text{ПР}} \approx (0, 2 \dots 6) \text{ дБ}$ – коэффициент шума радиотракта современных приемников).

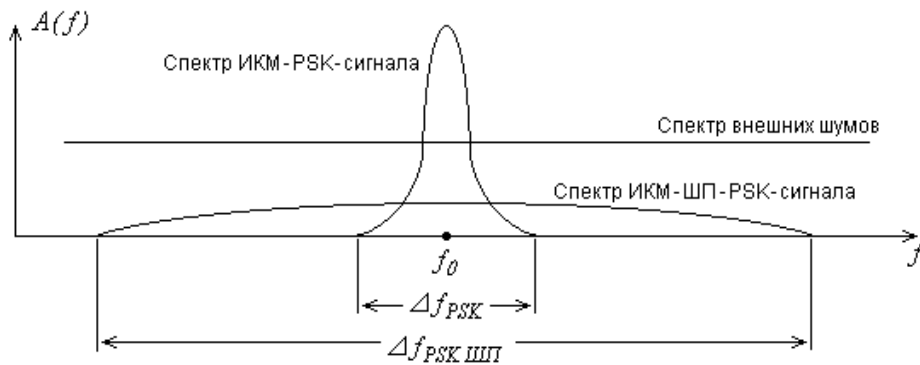


Рисунок 8 - Огибающие спектров узкополосного *PSK*-сигнала, шумоподобного *PSK*-сигнала, внешних шумов

Заметим, однако, что использование ШП-радиосигналов (технологии *CDMA*) не дает никаких преимуществ с точки зрения повышения реальной чувствительности приемника по сравнению с технологиями *FDMA* и *TDMA*. В самом деле, расширение спектра (увеличение базы) сигнала при его постоянной энергии приводит к уменьшению интенсивности спектральных компонентов, распределяющихся в полосе $\Delta f_{PSK_ШП}$ (рисунок 8). Интенсивность спектральных компонентов ШП-радиосигнала может быть существенно меньше, чем уровень природных и промышленных шумов (передаваемый ШП-радиосигнал становится энергетически "скрытым"). При его приеме коррелятор сужает расширенный спектр сигнала, интенсивность спектральных компонентов сигнала при этом возрастает до прежнего уровня. К внешним принятым шумам добавляются собственные шумы радиотракта приемника (так же, как и при приеме сигналов *FDMA* или *TDMA*). Следовательно, при прочих равных условиях отношение *C/Ш* на входе демодулятора приемника широкополосного ШП-сигнала будет такое же, как и на входе демодулятора приемника, например, узкополосного *PSK*-сигнала.

На основе изложенного сформулируем преимущества и особенности *CDMA*-радиосвязи на основе шумоподобных сигналов.

- 1). Энергетическая скрытность из-за низкого уровня спектральной плотности ШП-радиосигналов.
- 2). Защищенность связи от несанкционированного доступа за счет кодирования информационных сигналов псевдослучайными последовательностями.
- 3). Повышенная помехоустойчивость приемных систем к различному виду помех, в том числе к воздействию преднамеренных помех.
- 4). Постепенное уменьшение отношения *сигнал/помеха* при увеличении числа пользователей, одновременно занимающих один и тот же *радиоканал* (ограниченную полосу частот). Это приводит к постепенному ухудшению качества связи, проявляющемуся в возрастании среднего количества цифровых ошибок (щелчков при приеме звуковых сигналов) за определенный промежуток времени.
- 5). Отсутствие жесткого ограничения количества одновременно работающих в радиоканале пользователей в отличие от технологий *FDMA* и *TDMA*. Однако, платой за это является ухудшение качества связи при одновременной работе многих пользователей в одном радиоканале.

2 ОПИСАНИЕ ИНСТРУМЕНТА ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMULINK СРЕДЫ MATLAB

2.1 Общая характеристика пакета SIMULINK. Пакет SIMULINK позволяет осуществлять исследование (моделирование) поведения динамических нелинейных

систем. Ввод характеристик исследуемых систем производится в диалоговом режиме путем графической сборки схемы соединений элементарных стандартных звеньев. В результате такой сборки образуется модель исследуемой системы, которую называют S-моделью. Модель хранится в файле с расширением *.mdl.

Создание моделей в пакете SIMULINK основано на использовании технологии Drag-and-Drop ("перетаски и оставь"). В качестве "кирпичиков" для построения S-модели применяются блоки, хранящиеся в библиотеке SIMULINK. Любая S-модель может иметь иерархическую структуру, т.е. состоять из моделей более низкого уровня, причем число уровней иерархии практически не ограничено. В ходе моделирования имеется возможность наблюдать за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные смотровые окна, входящие в библиотеку SIMULINK.

2.2 Запуск пакета SIMULINK. После вызова MATLAB из среды WINDOWS на экране появляется командное окно среды MATLAB.

Запуск пакета SIMULINK можно произвести из командного окна MATLAB, выбрав команду **New Model** (новая модель) из меню **File** (файл) или нажав соответствующую пиктограмму в панели инструментов.

При запуске SIMULINK открываются два окна:

- пустое окно **untitled** (заготовка для создания новой S-модели, MDL-файла или схемного изображения моделируемой системы);
- окно **Library: simulink** с перечнем основных разделов библиотеки SIMULINK.

Оба окна имеют сходную структуру и содержат строку меню, панель инструментов и рабочее поле.

Меню **File** включает команды работы с MDL-файлами, меню **Edit** (правка) - команды редактирования блок-схемы и работы библиотекой, а меню **View** (вид) - команды изменения внешнего вида окна. В меню **Simulation** (моделирование) находятся команды управления моделированием, а в меню **Format** (формат) - команды редактирования формата (внешнего вида) блока схемы и блок-схемы в целом.

2.3 Библиотека блоков. Библиотека блоков SIMULINK представляет собой набор визуальных объектов, при помощи которых можно, соединяя модули линиями функциональной связи, составлять блок-схему любого устройства.

Библиотека блоков разбита на семь разделов. Шесть из них являются основными и не могут изменяться пользователем:

- **Sources** (источники);
- **Sinks** (приемники);
- **Discrete** (дискретные элементы);
- **Linear** (линейные элементы);
- **Nonlinear** (нелинейные элементы);
- **Connections** (связи или соединения).

Блоки, входящие в раздел **Sources**, предназначены для формирования сигналов, обеспечивающих управление работой S-модели в целом или отдельных ее частей.

Блоки, собранные в разделе **Sinks**, имеют только входы и не имеют выходов. Они используются как смотровые окна при моделировании. В данной работе используется блок (осциллограф) с одним входом. Блок **Scope** выводит на монитор график зависимости исследуемого сигнала от модельного времени. Для настройки параметров блока **Scope** (после установки его в поле сборки схемы) следует дважды щелкнуть левой кнопкой мыши (ЛКМ) на его изображении. В результате откроется окно **Scope**. Размер и пропорции этого окна можно изменять произвольно, используя мышь.

Для управления параметрами графиков и выполнения над ними различных действий в окне имеется панель инструментов, содержащая 7 пиктограмм. Их на-

значение:

- изменение масштаба осей графика;
- изменение масштаба по горизонтальной оси графика;
- изменение масштаба по вертикальной оси графика;
- автошкалирование;
- сохранение установленного масштаба осей;
- вызов окна настройки параметров блока **Scope**;
- печать содержимого окна **Scope**.

Первые три пиктограммы являются альтернативными, т. е. в каждый момент времени может быть активна лишь одна из них. Первые пять пиктограмм не активны до тех пор, пока в окне **Scope** нет графика. Активными с самого начала являются лишь последние две пиктограммы.

Нажатие шестой пиктограммы приводит к появлению окна настройки параметров **Properties: Scope**. Это окно имеет две вкладки:

- вкладка **Axes** (оси), которая позволяет установить параметры осей;
- вкладка **Settings** (установки), которая предназначена для ввода значений дополнительных параметров блока **Scope**.

Раздел **Linear** содержит блоки, которые можно условно разделить на две группы:

- блоки общего назначения (сумматоры, интеграторы и т. п.);
- блоки описания линейных стационарных звеньев.

Раздел **Nonlinear** самый большой по составу. Он включает 30 блоков, которые условно можно разбить на следующие группы:

- блоки, реализующие элементарные математические функции;
- блоки, обеспечивающие логическую обработку входного сигнала;
- блоки, аппроксимирующие входной дискретный сигнал тем или иным способом;
- блоки, реализующие функцию задержки входного сигнала;
- блоки-переключатели;
- блоки, используемые при моделировании систем автоматического регулирования и управления.

Чтобы перейти в окно соответствующего раздела библиотеки, которое содержит графические изображения блоков, следует выполнить двойной щелчок ЛКМ на пиктограмме раздела.

Работа по сборке S-модели заключается в том, что изображения выбранных блоков перетаскиваются мышью из окна раздела библиотеки в окно сборки модели, а затем выходы одних блоков соединяются со входами других блоков.

Технология перетаскивания блока такова: установить курсор на изображении блока в окне раздела библиотеки; нажать ЛКМ и, не отпуская кнопку, переместить курсор в поле сборки схемы. Аналогично производятся соединения линиями (проводниками) выходов одних блоков со входами других: необходимо подвести курсор к нужному выходу некоторого блока; нажать ЛКМ и, не отпуская кнопку, переместить курсор ко входу другого блока.

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

3.1 Передающий тракт. Ниже приведено описание одного канала передающего тракта, другие два канала аналогичны первому.

Блок **Meander** предназначен для формирования импульсов прямоугольной формы. Далее следует **Generator 6x Gold PN 1** (генератор Gold-кода), в котором происходит формирование псевдослучайных шумоподобных последовательностей **PN A**, **PN B** и формируемого с помощью этих последовательностей Gold-кода. Он образуется сложением по *mod 2* последовательности **PN A** и сдвинутой последова-

тельности **PN B**. Разные сдвиги последовательности **PN B** будут давать разные Gold-коды. В исследуемую модель системы связи заложено три канала, но их может быть гораздо больше. Сдвиг последовательности задается двоичным числом в поле **Offset**. Так сдвиг на три символа задается двоичным числом [000011]. В блоке **Generator 6x Gold PN 1** формируются также **Data Epoch** (период следования битов данных). Период **Data Epoch** определяет двоичное число **Divider**. Если двоичное число **Divider** равно длине последовательности, то период **Data Epoch** совпадает с периодом Gold-кода.

Блок **Band Limited White Noise 1** (генератор белого шума с ограниченной полосой) является по сути генератором случайных чисел. Последовательность случайных чисел используется для образования информационных данных, подлежащих дальнейшей передаче. Образование этих данных происходит в блоке **Data** (данные) с приходом на его триггерный вход импульсов **Data Epoch**. Эти импульсы задают частоту следования битов данных.

Образованные данные в блоке **Data** складываются по *mod 2* с Gold-кодом и образуют цифровой поток **Data Code** (кодированные данные).

Цифровой поток **Data Code** управляет блоком **BPSK Modulator 1** (фазовый манипулятор) на выходе которого образуются **RF Data** (радиочастотные данные).

Радиочастотные данные **RF Data**, после выхода из блока **Transmitter**, суммируются в блоке **Sum** с шумовой помехой. Блок **Sum** имитирует линию передачи. С выхода сумматора **Sum** сумма трех ШП-радиосигналов и шума поступает в блок **Receiver** (приемник).

3.2 Приемный тракт. На вход блока **Receiver** поступают три ШП-радиосигнала и шум. Первая ступень демодуляции осуществляется блоками **Product 1.1** (перемножитель) и **Filter 1.1** (ФНЧ). В блоке **Product 1.1** происходит перемножение ШП-радиосигналов и шума с колебанием несущей частоты **Sin**, в блоке **Filter 1.1** - предварительная фильтрация полученного сигнала. Вторая ступень демодуляции происходит в корреляторе, состоящем из двух блоков: **Product 1.2** (перемножитель) и **Filter 1.2** (ФНЧ). В блоке **Product 1.2** происходит перемножение суммы сигналов с соответствующим Gold-кодом, в блоке **Filter 1.2** - окончательная фильтрация полезного сигнала. Далее в блоке **Dump Integrator 1** происходит интегрирование сигнала за время между двумя тактовыми импульсами информационной цифровой последовательности. Единичный символ информационной цифровой последовательности запускает блок **Level 1.1** (пороговое устройство).

Необходимо заметить, что сигнал на выходе коррелятора появляется с некоторой временной задержкой, равной длине Gold-кода.

4 РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1 Рассчитать число бинарных M-последовательностей при $n = 6$.

4.2 Рассчитать возможное количество последовательностей (каналов), которые можно сформировать с использованием Gold-кода при $n = 6$.

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Ознакомиться с описанием лабораторной работы. Выполнить расчетное задание.

5.2 Продумать ответы на контрольные вопросы.

5.3 Запустить пакет SIMULINK, открыть файл с лабораторным макетом Laba.mdl в рабочем каталоге пакета.

5.4 Изучить состав пакета SIMULINK среды MATLAB, уяснить функциональное

назначение и принцип работы блоков трехканальной системы связи.

5.5 Произвести запуск макета. Получить, зарисовать и объяснить осциллограммы сигналов во всех контрольных точках передатчика и приёмника (для трех каналов системы).

5.6 Сделать выводы по проделанной работе.

6 ПОЯСНЕНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

6.1 Произвести запуск пакета (см. подраздел 2.2).

6.2 Открыть файл **Laba.mdl**. При его открытии в рабочем поле макета располагаются три блока: трехканальный передатчик (**Transmitter**); трехканальный приемник (**Receiver**) и блок формирования белого шума (**White Noise**). В приемнике имеются три осциллографа (**Scope 1 – Scope 3**). С их помощью можно наблюдать осциллограммы напряжений в характерных точках схемы.

После двойного щелчка ЛКМ по иконке **Transmitter** появится меню, состоящее из следующих компонентов:

- несущая частота (Гц) - **25**;
- частота следования символов ППС (Гц) – **25**;
- М-последовательность **A** - **[110011]**;
- М-последовательность **B** - **[110010]**;
- задержка М-последовательности **B** - **[111110]** (для 1-го канала);
- задержка М-последовательности **B** - **[101010]** (для 2-го канала);
- задержка М-последовательности **B** - **[001000]** (для 3-го канала);
- период следования битов данных (с) - **2,52** (при этом двоичное число **Divider** - **[111111]**).

Работа макета начинается с момента нажатия мышью на иконку **Start** панели инструментов.

Для наблюдения сигналов на экране какого-либо осциллографа необходим двойной щелчок ЛКМ по иконке осциллографа.

Для просмотра содержимого блоков **Transmitter** или **Receiver** необходимо кратковременное нажатие правой кнопки мыши на их иконках. При появлении меню нужно выбрать опцию **Look under mask**, открывающую содержимое выбранного блока.

Для просмотра осциллограмм в контрольных точках макета используется блок(и) **Scope**. Контрольные точки **Point 1 – Point N** обозначены на линиях связи.

Производится это следующим образом. В открытой **Library: simulink** двойным щелчком ЛКМ открыть **Sinks**, в котором имеется блок **Scope**. **Scope** перетащить ЛКМ в то окно макета, где необходимо просмотреть осциллограммы. Мышью вход блока **Scope** соединить с необходимой точкой схемы (в месте соединения должна быть видна точка). Запустить модель, дождаться окончания вычислений, и, щелкнув два раза ЛКМ на **Scope**, провести наблюдение результата.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется базой импульсного сигнала?
2. Что является признаком шумоподобного импульсного сигнала ?
3. Как выражается отношение ширины спектра цифрового ШП-радиосигнала ($\Delta f_{BPSK_{ШП}}$) к ширине спектра цифрового ИКМ - радиосигнала ($\Delta f_{BPSK_{ИКМ}}$) при двухпозиционной фазовой манипуляции ?
4. Что характеризует автокорреляционная функция $R(\tau)$ импульсного сигнала ?
5. Почему в системах связи для получения ШП-радиосигналов используют периодические знакопеременные псевдослучайные последовательности ?

6. Какой формулой определяется длина псевдослучайных последовательностей Хаффмена (M - последовательностей), если они формируются цифровым автоматом с n – разрядным регистром сдвига ?
7. Какое число единиц (+1) имеет один период M - последовательностей ? Какое число нулей (или -1) имеет один период M - последовательностей ?
8. Как формируются Gold-коды ?
9. В каком случае выходное напряжение коррелятора приемника ШП-радиосигналов максимально и соответствует переданному информационному сигналу ?
10. Какой ШП-радиосигнал называют согласованным для приемника пользователя данного радиоканала ?
11. Чему должно быть равно отношение ширины спектра ШП-радиосигнала ($\Delta f_{BPSK_{III}}$) на входе коррелятора приемника к ширине спектра узкополосного PSK - радиосигнала (Δf_{BPSK}) на его выходе ?
12. Чему должно быть равно отношение полосы пропускания радиотракта корреляционного приемника ШП-радиосигнала (P_{IIIP}) к полосе пропускания полосового фильтра коррелятора приемника ($P_{УПФ}$) ?
13. Почему с увеличением количества ШП-радиосигналов в одном радиоканале качество приема полезного сигнала ухудшается постепенно ?
14. От чего зависит количество пользователей, которые могут работать в одном радиоканале (с полосой частот Δf_{III}) при использовании ШП-радиосигналов, кодированных M - последовательностями с длиной L ?
15. Каковы значения несущих частот N разных передатчиков ШП-радиосигналов, работающих в одном радиоканале с полосой частот Δf_{III} и использующих ПСП длиной L ?
16. Каковы преимущества CDMA-радиосвязи {Code Division Multiple Access - множественный (многостанционный) доступ с кодовым разделением каналов} по сравнению с FDMA-радиосвязью {Frequency Division Multiple Access - множественный (многостанционный) доступ с частотным разделением каналов} и TDMA-радиосвязью {Time Division Multiple Access - множественный (многостанционный) доступ с временным разделением каналов}.
17. Почему в данной лабораторной работе использован пакет SIMULINK ?
18. Каково назначение блоков стандартной библиотеки пакета SIMULINK ?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами.– М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.
2. Ключев Л. Л. Теория электрической связи.– Минск: Дизайн ПРО, 1998.– 336с.
3. Гульятев А. К. MATLAB 5.2 Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие.– СПб.: КОРОНА принт, 1999.–288с.
4. Мелихов С.В. Радиосвязь и радиовещание: Учебное пособие. - Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2002. - 266 с.