

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для выполнения
лабораторно-практических работ
по I части
дисциплины «Радиоэлектронные системы»
"ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ"
"РАЗРЕШЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ"
"ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ"
для студентов дневной и заочной форм обучения
направления и специальности "Радиотехника"

СЕВАСТОПОЛЬ
2009

УДК 629.056.8: 656.22

Обнаружение радиосигналов на фоне помех. Разрешение радиосигналов. Измерение параметров радиосигналов. Методические указания для выполнения лабораторно-практических работ по I части дисциплины «Радиоэлектронные системы» для студентов дневной и заочной формы обучения / Сост. А.Г. Лукьянчук, В.С. Капелюшок. — Севастополь: Изд. СевНТУ, 2009. — 35 с.

Цель указаний: Помочь студентам в изучении принципов построения и расчета характеристик радиосистем передачи и извлечения информации. Представлена методика расчета энергетических и статистических характеристик радиосистем и их экспериментального модельного исследования на персональных компьютерах.

Методические указания рассмотрены и утверждены на методическом семинаре и заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций

Рецензент: Ю.П. Михайлюк, канд. техн. наук, доцент

Цель работы: Изучение принципов построения оптимальных радиосистем, расчет, теоретические и модельные исследования статистических характеристик радиосистем обнаружения, разрешения, измерения параметров радиосигналов на фоне помех.

ВВЕДЕНИЕ

Учебной программой дисциплины "Радиоэлектронные системы" (РЭС) предусмотрено выполнение семи расчетно-лабораторных работ по индивидуальным заданиям. Исходные данные для выполнения последующих заданий базируются на результатах расчета предыдущих с необходимыми уточнениями. Задания охватывают все разделы первой части РЭС и предусматривают на основе системного подхода исследование параметров отдельных радиоустройств (передатчика, приемника, антенн и др.) на энергетические и статистические характеристики системы в целом.

По каждому из семи заданий предусмотрено выполнение, как теоретического расчета характеристик РЭС, так и проведение лабораторных исследований в виде модельного эксперимента на персональном компьютере. На заключительном этапе работы студенты должны проанализировать и сопоставить результаты расчетов с соответствующими характеристиками, полученными в ходе модельного эксперимента и сделать подробные выводы.

Последовательное выполнение семи расчетно-лабораторных работ позволит студентам глубже усвоить содержание соответствующих разделов теоретического курса и овладеть обобщенной методикой расчета статистических характеристик РЭС различного назначения.

Отчет о выполнении каждой расчетно-лабораторной работы должен содержать формулировку задания, исходные данные по расчету, формулы, таблицы, графики, распечатки полученных результатов. В конце отчета должны быть сделаны выводы и рекомендации по практическому применению результатов. Все расчетно-лабораторные работы целесообразно выполнять в одной тетради.

Выбор варианта задания производится студентом по последней и предпоследней цифре зачетной книжки.

1 РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Исследование энергетических характеристик радиосистем

1.1 Задание для выполнения работы

Система цифровой радиосвязи включает следующие радиоустройства:

- радиопередатчик, формирующий радиоимпульсы мощностью P_{PC} и длительностью τ_{PC} на частоте f_{PC} , нагружен на передающую антенну с коэффициентом усиления $G_{РПД}$;
- радиоприемник с коэффициентом шума $k_{ш}$ и рабочей температурой 300 К подключен к приемной антенне с коэффициентом усиления $G_{РП}$.

Система радиолокации включает следующие радиоустройства:

- радиопередатчик, формирующий зондирующих импульсов мощностью $P_{рл}$, длительностью $\tau_{рл}$ на частоте $f_{рл}$;
- узконаправленную приемопередающую антенну с коэффициентом усиления $G_{рл}$;
- радиоприемник с коэффициентом шума $k_{ш}$ и рабочей температурой 300 К, выделяющий на фоне шума радиоимпульсы, отраженные сосредоточенным объектом с эффективной площадью рассеяния $\sigma_{эфф}$;

Требуется:

1. Рассчитать мощность сигнала на входе приемника в системе связи и в системе локации (исходные данные приведены в таблице 1) при изменении дальности действия системы от D_{MAX} до D_{MIN} при флуктуациях энергетических параметров;
2. Рассчитать мощность шума и отношение сигнал/шум на входе приемника РЭС связи и локации в указанном диапазоне дальностей с учетом флуктуации энергетических параметров. Построить графические зависимости;
3. Рассчитать максимальную дальность действия систем радиосвязи и радиолокации, при которой отношение сигнал/шум по мощности в приемнике будет не менее заданного значения $(с/ш)_{мин}$, обеспечивающего нормальную работоспособность радиосистемы.
4. Проанализировать полученные результаты и сопоставить их с характеристиками, рассчитанными на персональном компьютере. Определить диапазоны дальности действия, в которых система работоспособна, работает со «сбоями» и неработоспособна. Сделать подробные выводы.

1.2 Методические рекомендации по теоретическим расчетам

Радиопередатчик с всенаправленной антенной, изотропно излучающей радиосигнал мощностью $P_{и}$, создает на дальности D плотность потока мощности $\Pi = P_{и} / 4\pi D^2$. При направленной антенне с коэффициентом усиления $G_{прд}$ плотность потока мощности на дальности D

$$\Pi = \frac{P G_{прд}}{4\pi D^2} . \quad (1.1)$$

Для системы радиосвязи в свободном пространстве при приеме сигналов на антенну с эффективной площадью S_A , мощность сигнала на входе приемника описывается уравнением:

$$P_{вх.пр} = \Pi S_A = \frac{P G_{прд} S_A}{4\pi D^2} . \quad (1.2)$$

В системе радиолокации с пассивным ответом при использовании для излучения и приема радиоволн одной узконаправленной антенны мощность сигнала на входе приемника для свободного пространства

$$P_{\text{ВХ.ПР}} = \frac{\Pi \sigma_{\text{эфф}}}{4\pi D^2} S_A = \frac{P G S_A \sigma_{\text{эфф}}}{(4\pi D^2)^2}, \quad (1.3)$$

где: P - мощность радиопередатчика;

$\sigma_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь рассеяния объекта;

G - коэффициент усиления передающей антенны;

S_A - эффективная площадь приемной антенны;

D - длина трассы.

Эффективная площадь антенны и коэффициент её усиления связаны между собой приближенным соотношением:

$$S_A \approx \frac{G \lambda^2}{4\pi}. \quad (1.4)$$

Таблица 1 - Исходные данные для выполнения индивидуальных заданий

Последняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{\text{РС}}, \text{Вт}$	2	3.6	3.5	3	3.9	4.2	2.1	2.9	0.6	0.41
$P_{\text{РЛ}}, \text{кВт}$	63	34	20	69	46	36	28	22	60	100
$\tau_{\text{РС}}, \text{мкс}$	0.12	0.08	0.10	0.11	0.07	0.12	0.09	0.15	0.17	0.08
$\tau_{\text{РЛ}}, \text{мкс}$	0.6	0.5	0.8	0.1	0.3	0.5	0.9	1	0.4	0.1
$k_{\text{ш}}$	5.8	5	5.4	5.6	6.5	6.6	6.9	7	6.3	5.4
$\sigma_{\text{эфф}}, \text{м}^2$	25	87	54	78	96	73	48	37	69	42
$(\text{с/ш})_{\text{мин РЛ}}$	8.5	6.8	7	5.2	10	4.5	7.3	9.5	7.6	6
$(\text{с/ш})_{\text{мин РС}}$	15.6	9.5	19.4	9.7	7.6	8.1	14.3	5.3	18.3	10.4
Предпоследняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D_{\text{МАХ}}, \text{км}$	95	55	97	71	54	84	89	44	61	100
$D_{\text{МИН}}, \text{км}$	18	8	19	13	5	16	10	6	11	7
$f_{\text{РС}}, \text{ГГц}$	5	3	1.7	5.2	1	2	4.2	2.5	6	3.7
$f_{\text{РЛ}}, \text{ГГц}$	9.6	9.2	6.4	7.9	11.7	8.6	8.2	11.3	7.2	10.4
$G_{\text{ПР РС}}, \text{дБ}$	9.1	8.8	10.9	9.6	8.7	7.8	11.4	6.5	10	6.8
$G_{\text{РПД РС}}, \text{дБ}$	8	6	5.2	11.6	5.9	11.1	7.6	8.5	6.6	11.3
$G_{\text{РЛ}}, \text{дБ}$	26.8	29.6	28.6	27.2	25.8	25	28.2	29.3	30	27

При расчетах следует учитывать, что амплитуда радиосигнала на входе приемника непостоянна из-за нестабильности мощности передатчика - 0,3 дБ, изменения коэффициента усиления антенн - 0,2 дБ, флуктуаций эффективной площади рассеяния радиолокационных объектов - 7 дБ, замираний сигнала в реальной атмосфере - 3 дБ.

Оценка мощности теплового шума на входе приемника производится по формуле:

$$P_{\text{ш.пр}} = k k_{\text{ш}} T \Delta F, \quad (1.3)$$

где k - постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T - абсолютная температура приемника (К); ΔF - ширина полосы пропускания приемника (Гц), согласованная с эффективной шириной спектра радиосигнала, $\Delta F \approx 1/\tau_{\text{н}}$.

При построении графических зависимостей мощности сигнала на входе приемника и отношения сигнал/шум от дальности действия РЭС целесообразно применять логарифмический масштаб.

1.3 Методические рекомендации по выполнению работы на персональном компьютере (ПК)

Для выполнения лабораторной работы на ПК необходимо войти в директорию «RTS-LAB», которая включает программы комплекса лабораторных работ по первой части дисциплины «Радиоэлектронные системы». Запуск программ осуществляется посредством ввода файла «RTS. exe», после чего на экран монитора выводится главное меню комплекса со списком семи лабораторных работ. Выбор работы №1 «Исследование энергетических характеристик РЭС» производится клавишами управления курсором и «Enter».

После выбора функции «Выполнение работы» и ввода исходных данных для расчетов на экране ПК производится построение зависимостей отношения сигнал/шум от дальности для различных видов радиосистем.

2. РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

Исследование рабочих характеристик оптимальных обнаружителей радиосигналов на фоне помех

2.1 Задание для выполнения работы

На вход оптимального приемника радиосистемы поступают сигнальные радиоимпульсы на фоне нормального белого шума. Энергетические параметры сигнала и шума должны быть определены в результате выполнения задания 1 для системы радиолокации.

Требуется:

1. Рассчитать параметр обнаружения q , обеспечивающий заданное отношение сигнал/шум по мощности $(с/ш)_{\text{мин РЛ}}$, спектральную плотность шума N_0 и энергию сигнала E_c на входе приемника.

2. Рассчитать математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение отклика оптимального приемника на шум и смесь сигнала с шумом для полученного параметра q . Рассчитать и построить графики плотностей вероятности $W_{ш}(z)$ и $W_{сш}(z)$ (дифференциальные законы распределения) отклика оптимального приемника для трех моделей сигналов:
 - с полностью известными параметрами (СИП);
 - с неизвестной начальной фазой (СНФ);
 - с неизвестной фазой и флуктуирующей амплитудой (СНФА).
3. Рассчитать и построить соответствующие рабочие характеристики оптимальных обнаружителей указанных трех видов сигналов.
4. В модельном эксперименте на персональном компьютере исследовать гistogramмы отклика и рабочие характеристики оптимальных обнаружителей для заданного отношения сигнал/шум $(с/ш)_{мин}$. Провести сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов. Сделать подробные выводы.

2.2 Методические рекомендации по теоретическим расчетам.

Задача обнаружения радиосигнала на фоне помех сводится к принятию решения о наличии (или отсутствии) сигнала в электромагнитных колебаниях поступивших на вход приемной части системы.

Наиболее распространенным видом помех в радиоканалах в общем случае является нормальный (гауссовский) белый шум с нулевым средним значением. Вследствие влияния этого шума отклик на выходе приемника имеет случайный (флуктуирующий) характер и решение о наличии или отсутствии сигнала в системе может быть принято неправильно.

В частности, *при наличии сигнала в системе* возможно правильное решение, которое характеризуется вероятностью правильного обнаружения $P_{по}$, и ошибочное решение, вероятность которого называют вероятностью пропуска сигнала $P_{пс}$.

Сумма этих вероятностей представляет собой полную группу событий и равна единице:

$$P_{по} + P_{пс} = 1 \quad (2.1)$$

При отсутствии сигнала в системе правильное решение характеризуется вероятностью правильного необнаружения $P_{пн}$, ошибочное - вероятностью ложной тревоги $P_{лт}$, которые, очевидно, так же представляют собой полную группу событий.

$$P_{пн} + P_{лт} = 1 \quad (2.2)$$

Для оценки этих вероятностей необходимо исследовать дифференциальные законы распределения отклика приемника, которые представляют собой зависимости плотности вероятности отклика приемника на шум $W_{ш}(z)$ и на смесь сигнала с шумом $W_{сш}(z)$. Пример законов распределения приведен на рис. 2.1

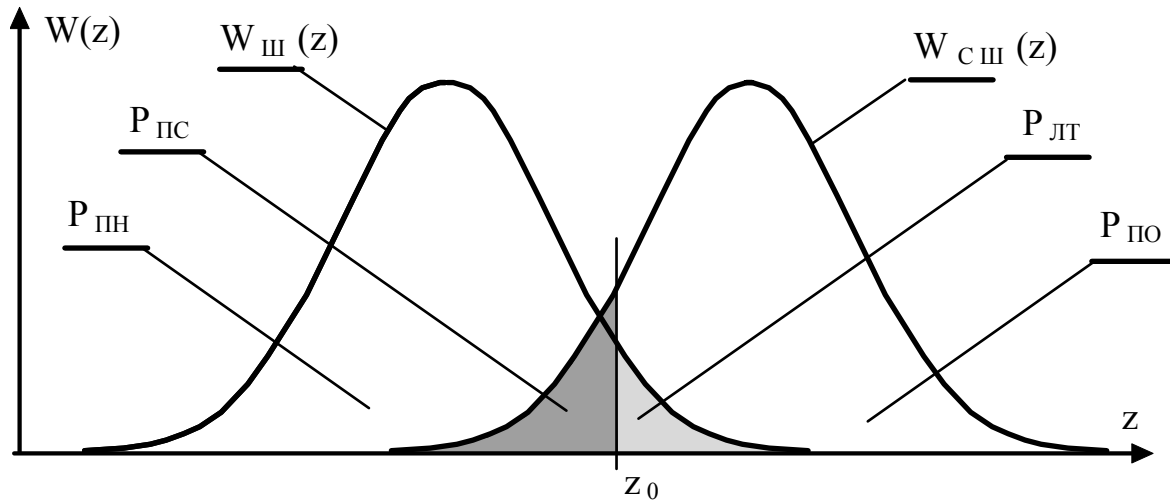


Рисунок 2.1 - Пример законов распределения плотности вероятности отклика на шум и смесь сигнала и шума на выходе приемника РЭС.

Если отклик на выходе приемника меньше порога обнаружения z_0 , то принимается решение об отсутствии сигнала в системе. При превышении порога обнаружения z_0 принимается решение о наличии сигнала в принятой реализации.

Законы распределения $W_{сш}(z)$ и $W_{ш}(z)$ имеют единичные площади в соответствии с (2.1) и (2.2). Порог обнаружения z_0 разделяет приведенные законы (Рис.2.1) на четыре области, площади которых характеризуют $P_{по}$, $P_{пн}$, $P_{лт}$, $P_{пс}$.

Вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ и правильного обнаружения $P_{по}$ определяются площадями, лежащими под кривыми $W_{ш}(z)$ и $W_{сш}(z)$ выше порога обнаружения z_0 .

$$P_{лт} = \int_{z_0}^{\infty} W_{ш}(z) dz, \quad P_{по} = \int_{z_0}^{\infty} W_{сш}(z) dz. \quad (2.3)$$

Вероятности ошибок $P_{пс}$ и $P_{лт}$ могут быть уменьшены за счет:

- снижения уровня шума, что вызывает уменьшение дисперсии законов распределения ("сужение" их) и уменьшения площади их взаимного перекрытия;
- увеличения энергии сигнала, что вызывает смещение $W_{сш}(z)$ в область больших значений z ;
- правильного выбора порога z_0 , при котором минимизируются $P_{пс}$ и $P_{лт}$ (заштрихованные площади ошибок);
- оптимизации процедуры обработки сигналов в РЭС, которая позволяет максимально разнести законы распределения по оси z и уменьшить их взаимное перекрытие.

Теория обнаружения рекомендует оптимальные алгоритмы обработки различных видов сигналов (СИП, СНФ, СНФА), позволяющие максимизировать от-

ношение сигнал/шум и снизить вероятность ошибочных решений. Для оптимального приема сигнала на фоне белого гауссова шума применяются согласованные фильтры и корреляционные приемники.

При оптимальном приеме *сигналов с полностью известными параметрами (СИП)* плотность вероятности отклика z на шум подчиняется нормальному закону распределения с нулевым средним:

$$W_{\text{ш}}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right], \quad (2.4)$$

а плотность вероятности отклика на смесь сигнала с шумом - нормальному закону распределения со смещенным средним значением E :

$$W_{\text{сш}}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z-E)^2}{2\sigma_z^2}\right]. \quad (2.5)$$

В оптимальном приемнике *сигналов с неизвестной начальной фазой (СНФ)* плотность вероятности отклика на шум описывается законом Рэлея:

$$W_{\text{ш}}(z) = \frac{z}{\sigma_z^2} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right], \quad (2.6)$$

а плотность вероятности отклика на смесь сигнала с шумом - обобщенным законом Рэлея (законом Рэлея - Райса):

$$W_{\text{сш}}(z) = \frac{z}{\sigma_z^2} \exp\left[-\frac{z^2 + E^2}{2\sigma_z^2}\right] I_0\left(\frac{zE}{\sigma_z^2}\right), \quad (2.7)$$

где $I_0(zE/\sigma^2)$ - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

При оптимальном обнаружении *сигналов с неизвестной начальной фазой и флуктуирующей амплитудой (СНФА)* плотность вероятности отклика на шум описывается законом Рэлея (2.4), а на смесь сигнала и шума:

$$W_{\text{сш}}(Z) = \frac{2z}{2\sigma_z^2 + E_{\text{ср}}} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2 + E_{\text{ср}}^2}\right]. \quad (2.8)$$

В рассмотренных законах (2.4...2.7) дисперсия отклика приемника определяется дисперсией отклика на шум:

$$\sigma_z^2 = \frac{N_0 E}{2}, \quad (2.9)$$

где: N_0 - спектральная плотность шума; E - энергия сигнала.

При обнаружении СНФА (2.8) за счет флуктуаций амплитуды сигнала, которые имеют рэлеевский закон распределения, дисперсия отклика на смесь сигнала с шумом возрастает:

$$\sigma^2_{z_{\text{СШ}}} = \sigma_z^2 + \frac{E_{\text{СР}}^2}{2}, \quad (2.10)$$

где $E_{\text{СР}}$ - средняя энергия флуктуирующего сигнала.

При выполнении задания в начале следует рассчитать среднее значение и дисперсию отклика оптимальных приемников для всех трех видов сигналов (2.9, 2.10). Затем рассчитать и построить зависимости плотности вероятности отклика оптимального приемника для шума и смеси сигнала с шумом (дифференциальные законы распределения) по формулам (2.4...2.8).

Построение зависимости $W_{\text{СШ}}(z)$ для СНФ (2.7) представляет трудности из-за необходимости вычисления функции Бесселя $I_0(zE/2\sigma_z)$. Однако при достаточно больших отношениях сигнал/шум (более 3), которые используются в данной работе, распределение (2.7) приближается к нормальному закону и может быть построено с достаточной точностью по формуле (2.5).

На следующем этапе работы необходимо рассчитать рабочие характеристики оптимальных приемников для трех видов сигналов, т.е. зависимости $P_{\text{ПО}}$ от $P_{\text{ЛТ}}$ при изменении порога z_0 для заданного отношения сигнал/шум. Строгое решение этой задачи предусматривает вычисление интегралов (2.3), но можно применить упрощенные формулы, использующие табулированный интеграл вероятности $\Phi(x)$ (Приложение А).

Для оптимального приемника СИП вероятность правильного обнаружения описывается выражением:

$$P_{\text{ПО}} = 1 - \Phi(h_0 - q), \quad (2.11)$$

где $h_0 = z_0 / \sigma_z$ - относительный пороговый уровень;

$q = \sqrt{2E/N_0}$ - параметр обнаружения.

Вероятность ложной тревоги для приемника СИП:

$$P_{\text{ЛТ}} = 1 - \Phi(h_0). \quad (2.12)$$

Для оптимального приемника СНФ вероятность ложной тревоги выражается соотношением:

$$P_{\text{ЛТ}} = \exp(-h_0^2 / 2), \quad (2.13)$$

а вероятность правильного обнаружения при отношениях сигнал/шум более 3 может быть вычислена по формуле (2.11).

Анализ вероятностных характеристик оптимального обнаружителя СНФА (2.6,2.8) позволяет установить функциональную связь между $P_{\text{ПО}}$ от $P_{\text{ЛТ}}$ для этого вида сигнала:

$$P_{\text{ПО}} = P_{\text{ЛТ}}^{\frac{1}{1+q^2/2}}. \quad (2.14)$$

Более подробные сведения и примеры расчетов по данной теме можно найти в учебной и справочной литературе /1,2,3,4/.

2.3 Методические рекомендации по выполнению работы на ПК

Для выполнения лабораторной работы на ПК необходимо войти в директорию «RTS-LAB», запустить программу лабораторного практикума через файл «RTS.exe» и после вывода на экран главного меню выбрать лабораторную работу №2 «Исследование рабочих характеристик обнаружителей сигналов».

Лабораторная работа содержит справочный раздел, при входе в который на экран выводятся структурные схемы и строятся временные диаграммы работы обнаружителей различных видов сигналов (рис. 2.3).

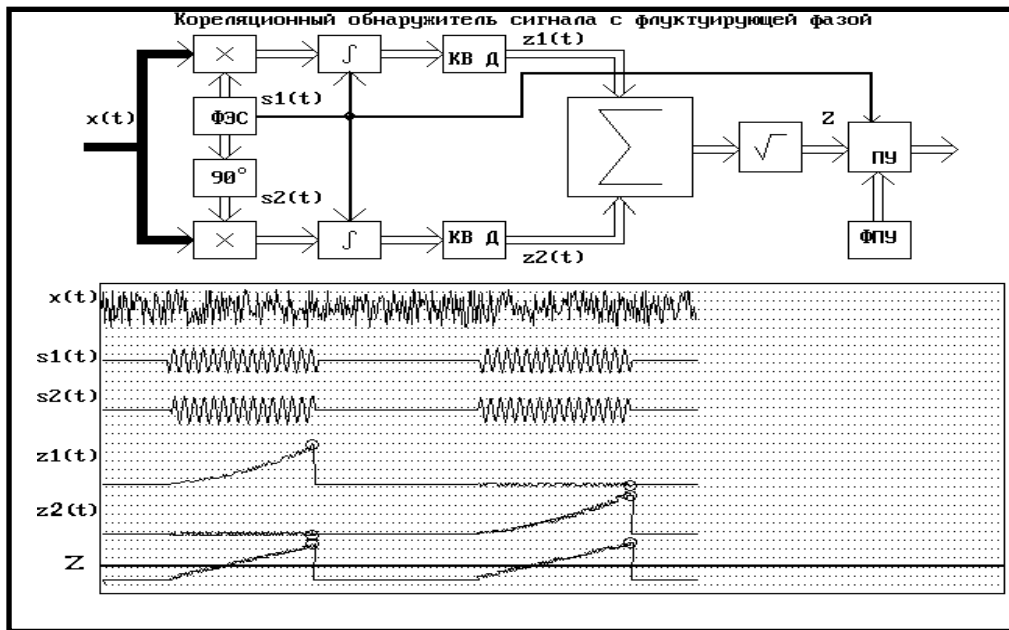


Рисунок 2.2 - Схема и временные диаграммы работы обнаружителя импульсных сигналов.

При переходе в режим выполнения работы необходимо задать нормированную дисперсию шума и объем выборки. Нормировка дисперсии производится относительно масштаба экрана. Для рационального использования экрана монитора при построения гистограмм отклика рекомендуется задавать нормированную дисперсию шума 2...6, а объем выборки - 600...10000.

При слишком малых или больших значениях дисперсии и объема выборки график гистограммы может превысить размеры экрана или не будет обеспечена достаточная точность построения рабочих характеристик обнаружителя.

При запуске программы начинается генерация значений случайной величины с законом распределения, соответствующим отклику на выходе оптимального приемника для выбранного вида сигнала. Временные диаграммы этих значений строятся в нижней части экрана. В верхней части экрана (рис.2.3) синхронно идет построение гистограмма отклика приемника на шум или после задания расчетного параметра обнаружения q (2.11...2.14) на смесь сигнала и шума.

После накопления заданного полного объема выборки нижняя часть экрана очищается и в ней строится рабочая характеристика оптимального приемника для заданного вида сигнала (рис.2.3).

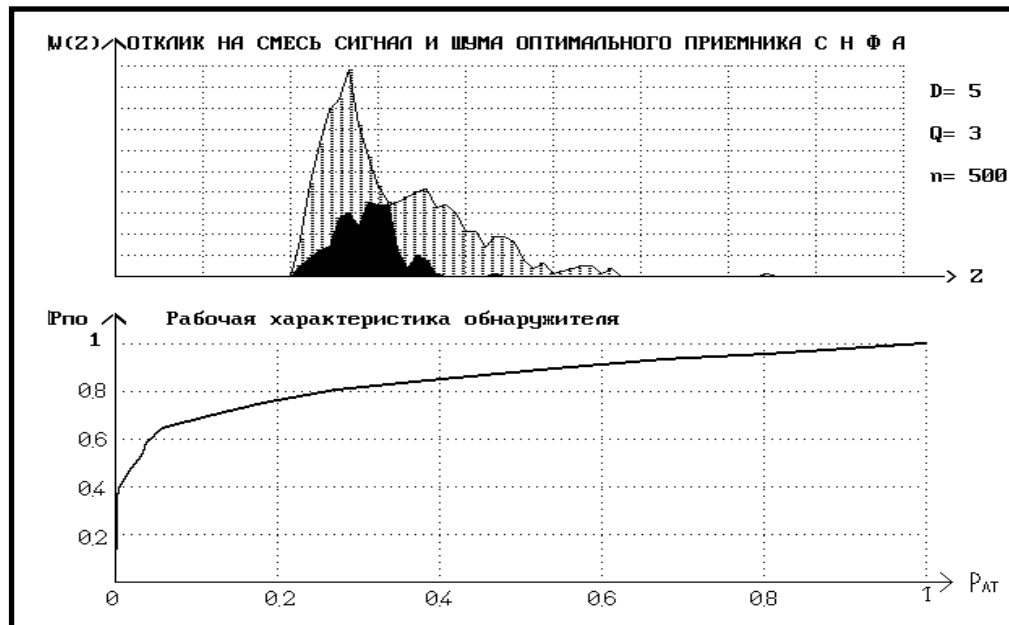


Рисунок 2.3 - Гистограмма отклика на выходе обнаружителя и его рабочая характеристика.

На завершающем этапе ПК производит построение совместных рабочих характеристик приемников СИП, СНФ и СНФА. Студент должен зафиксировать гистограммы и рабочие характеристики, полученные в результате модельного статистического эксперимента, и сравнить их с результатами теоретического расчета, проанализировать отличия и сделать подробные выводы

3 РАСЧЕТНО- ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Исследование характеристик обнаружения оптимальных приемников радиосигналов на фоне помех.

3.1 Задание для выполнения работы

На вход оптимального обнаружителя радиолокационного сигнала, основные характеристики которого рассчитаны в заданиях 1 и 2, поступает сигнальный радиоимпульс на фоне нормального белого шума.

Требуется:

1. Рассчитать пороговый уровень z_0 , при котором вероятность ложной тревоги не будет превышать заданной $P_{лт}$ (табл.1.1) для трех моделей радиосигнала (СИП, СНФ, СНФА).
2. Рассчитать и построить характеристики обнаружения для заданного значения $P_{лт}$ при изменении отношения сигнал/шум, обусловленных флуктуациями энергетических характеристик сигнала (задание 1).
3. Исследовать характеристики обнаружения оптимальных приемников в модельном эксперименте на ПК и провести сравнительный анализ для трех моделей сигнала. Сделать подробные выводы.

Таблица 3.1 - Исходные данные для выполнения задания № 3

Последняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вероятность ложной тревоги, $P_{ЛТ}, 10^{-3}$	0,1	3,1	10	1,2	16	0,6	8,2	38	6,5	1,8

3.2 Методические рекомендации для теоретических расчетов

Характеристика обнаружения представляет собой зависимость вероятности правильного обнаружения $P_{ПО}$ от изменения энергетического параметра q при фиксированной вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}$.

Увеличение параметра обнаружения q (отношения сигнал/шум) приводит к смещению закона распределения для смеси сигнала с шумом $W_{СШ}(z)$ в область больших значений отклика z на выходе приемника (рис.2.1). При фиксированной вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}$, а следовательно, и порога z_0 это смещение приводит к возрастанию вероятности правильного обнаружения и повышению качества системы.

На первом этапе выполнения работы следует по заданному значению вероятности ложной тревоги рассчитать соответствующие относительный h_0 и абсолютный уровни z_0 порога для СИП (2.12), а так же СНФ и СНФА (2.13). Расчет характеристик обнаружения оптимального приемника выполняется по формулам (2.11) — для СИП и СНФ, и (2.14) — для СНФА с использованием таблиц интеграла вероятности $\Phi(x)$ (Приложение А).

Построение графических зависимостей $P_{ПО}(q)$ целесообразно производить в линейном масштабе.

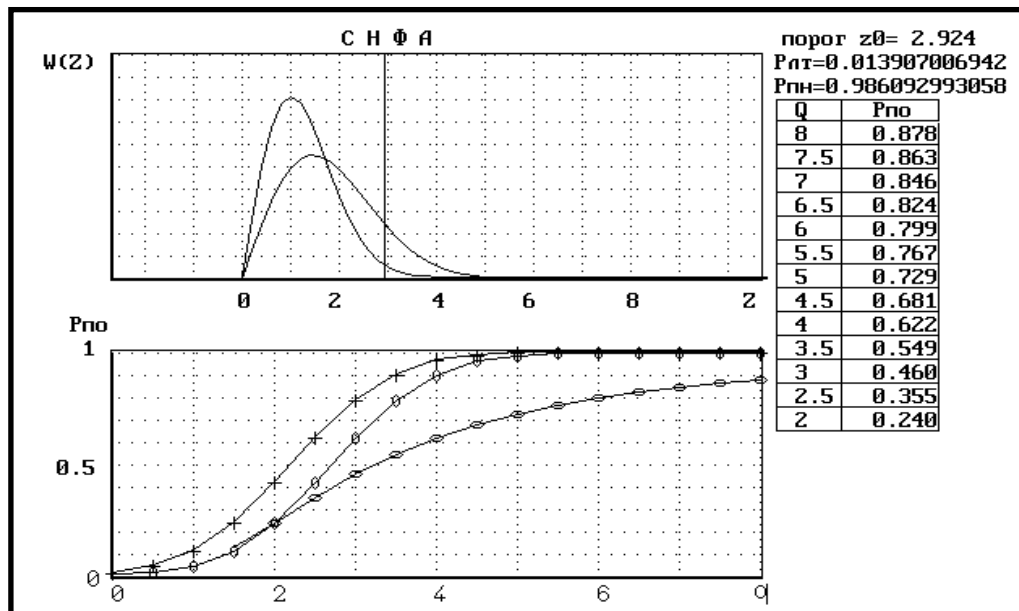


Рисунок 3.1 - Законы распределения отклика и характеристики обнаружения оптимального приемника на экране ПК

3.3 Методические рекомендации по выполнению работы на ПК

Для выполнения лабораторной работы на ПК необходимо войти в директорию «RTS-LAB», запустить программу лабораторного практикума через файл «RTS.exe» и после вывода на экран главного меню выбрать лабораторную работу №3 «Исследование характеристик обнаружения сигналов на фоне помех сигналов».

После ввода относительного порога $h_0 = z_0 / \sigma_z$, который был вычислен при выполнении теоретических расчетов, ПК производит оценку вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ и построение законов распределения $W_{ш}(z)$ и семейства зависимостей $W_{сш}(z)$ при изменяющемся отношении сигнал/шум (параметре обнаружения q) от 0 до 8 (Рис. 3.1). В нижней части экрана при этом идет синхронное построение по рассчитанным точкам характеристик обнаружения для соответствующего вида сигнала.

В правой части экрана выводятся числовые значения вероятностей ложной тревоги и правильного необнаружения, значение порогового уровня z_0 и таблица текущих значений параметра q и вероятности правильного обнаружения $P_{по}$.

4 РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

Исследование частотных и импульсной характеристик согласованного фильтра.

4.1 Задание для выполнения работы

На вход оптимального приемника обнаружения радиосигналов, построенного на базе согласованного фильтра, поступают сигнальные радиоимпульсы на фоне нормального белого шума.

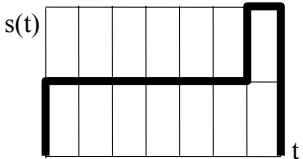
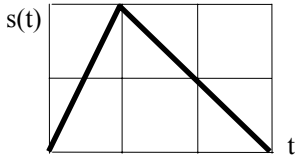
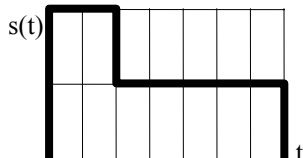
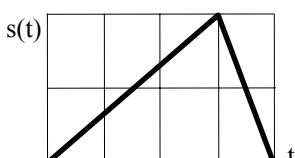
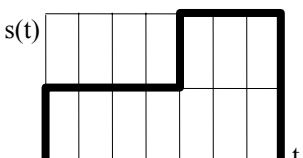
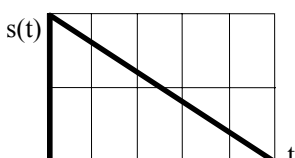
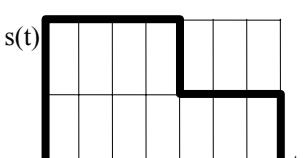
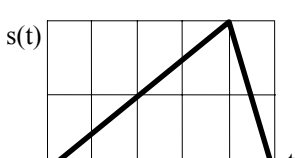
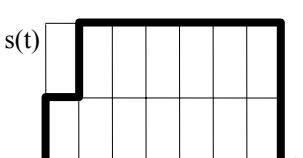
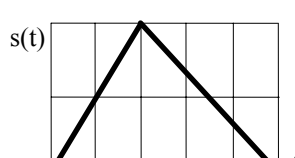
Требуется:

1. Рассчитать и построить частотные и импульсные характеристики фильтров, согласованных с сигналами, в соответствии с таблицами 4.1; 4.2.
2. Рассчитать и построить форму отклика на выходе этих фильтров при воздействии на их входы заданных сигналов, а так же прямоугольного и симметричного треугольного импульсов такой же длительности. Сравнить форму и амплитуду откликов при указанных импульсных воздействиях.
3. Исследовать параметры откликов фильтров на импульсные сигналы заданной формы с помощью модельного синтеза на ПК их импульсных характеристик и провести сравнительный анализ эффективности фильтрации. Сделать подробные выводы.

Таблица 4.1 - Варианты для выполнения расчетно-лабораторных заданий

Последняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номера сигналов	0; 5	1; 6	2; 7	3; 8	4; 9	0; 7	1; 8	2; 9	3; 5	4; 6

Таблица 4.2 - Параметры исследуемых сигналов

№	Форма сигнала	Параметры сигнала	№	Форма сигнала	Параметры сигнала
0		Длительность сигнала 14 мкс	5		Длительность сигнала 12 мс
1		Длительность сигнала 56 мкс	6		Длительность сигнала 20 мс
2		Длительность сигнала 3,5 мкс	7		Длительность сигнала 0,1 мс
3		Длительность сигнала 7,0 мкс	8		Длительность сигнала 35 мс
4		Длительность сигнала 1,4 мкс	9		Длительность сигнала 0,5 мс

4.2 Методические рекомендации по теоретическим расчетам

Основной операцией при оптимальном обнаружении сигналов на фоне белого гауссова шума является вычисление корреляционного интеграла z между принимаемой реализацией $x(t)$ и опорным сигналом $s(t)$.

$$z = \int_0^T x(t) s(t) dt \quad (4.1)$$

Эта операция может быть выполнена корреляционным приемником (КП), включающим перемножитель и интегратор (Рис.2.2). Структурная схема и принципы работы КП представлены в справочном разделе расчетно-лабораторных работ 2 и 3. Однако корреляционный приемник может быть использован для обнаружения только сигналов с известным временным положением. При неизвестном времени прихода сигнала КП должен быть многоканальным, что существенно усложняет его схемотехническую реализацию.

Другой возможный способ получения в результате оптимальной обработки корреляционного интеграла z основан на использовании линейного фильтра, напряжение на выходе которого описывается интегралом свертки:

$$u_{\Phi}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (4.2)$$

где $h(t)$ - импульсная характеристика фильтра.

Для того, что бы линейный фильтр вычислял функцию взаимной корреляции и обеспечивал оптимальное обнаружение сигнала на фоне белого гауссова шума его импульсная характеристика должна отличаться от функции, описывающей этот сигнал, только постоянным множителем C , смещением во времени на величину t_0 и знаком аргумента времени t :

$$h(t) = C s(t_0 - t), \quad (4.3)$$

то есть с точностью до постоянного множителя быть зеркальным отображением сигнала, задержанного на t_0 . Следует учитывать, что t_0 должно быть больше или равно длительности T сигнала. Такой фильтр называется согласованным фильтром и является оптимальным для решения задачи обнаружения сигнала на фоне белого гауссова шума.

Частотная характеристика $K(j\omega)$ такого согласованного фильтра является преобразованием Фурье от импульсной характеристики $h(t)$ и комплексно-сопряженной функцией спектральной плотности сигнала:

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt = C S^*(j\omega) e^{-j\omega t_0} \quad (4.4)$$

Это комплексное равенство соответствует двум действительным равенствам:

$$K(\omega) = C S(\omega), \quad (4.5)$$

$$\psi(\omega) = -[\varphi(\omega) + \omega t_0]. \quad (4.6)$$

Из выражения (4.5) следует, что амплитудно-частотная характеристика фильтра $K(\omega)$ отличается только множителем C от амплитудного спектра сигнала, с которым согласован этот фильтр, то есть АЧХ должна по форме повторять амплитудный спектр сигнала.

Выражение (4.6) означает, что фазо-частотная характеристика $\psi(\omega)$ согласованного фильтра отличается только знаком суммы фазового спектра $\varphi(\omega)$ сигнала и линейной функции частоты ωt_0 , которая учитывает смещение $h(t)$ на временной интервал t_0 (4.3), то есть ФЧХ фильтра должна быть обратной фазовому спектру сигнала.

Из (4.3; 4.5) следует, что согласованный фильтр оптимален для всех сигналов, которые имеют заданную форму и длительность, но отличаются другими

амплитудой и временным положением. Таким образом согласованный фильтр обладает свойством инвариантности относительно амплитуды и временного положения сигнала.

Как правило, при реализации согласованных фильтров для импульсных сигналов весьма затруднительно синтезировать ФЧХ (4.6), поэтому на практике часто используются так называемые квазиоптимальные фильтры, реализуемые с помощью обычных усилителей, имеющих оптимальную полосу пропускания (4.5).

Для выполнения теоретической части задания вначале необходимо рассчитать и построить импульсную и амплитудно-частотную характеристики фильтра, согласованного с импульсным сигналом заданной формы. Затем, используя выражение (4.2), следует построить форму отклика на выходе фильтра, обладающего рассчитанными характеристиками, при воздействии на его вход заданного импульсного сигнала, прямоугольного импульса и треугольного симметричного импульса. Результаты расчета формы откликов следует свести на общий график и провести сравнительный анализ полученных результатов.

4.3 Методические рекомендации по выполнению работы на ПК

Для выполнения лабораторной работы на ПК необходимо войти в директорию «RTS-LAB», запустить программу лабораторного практикума через файл «RTS.exe» и после вывода на экран главного меню выбрать лабораторную работу № 4 «Исследование характеристик согласованных фильтров».

Программа лабораторной работы содержит краткий справочный раздел, поясняющий принцип построения согласованных фильтров импульсных сигналов на многоотводной линии задержки (рис.4.1)

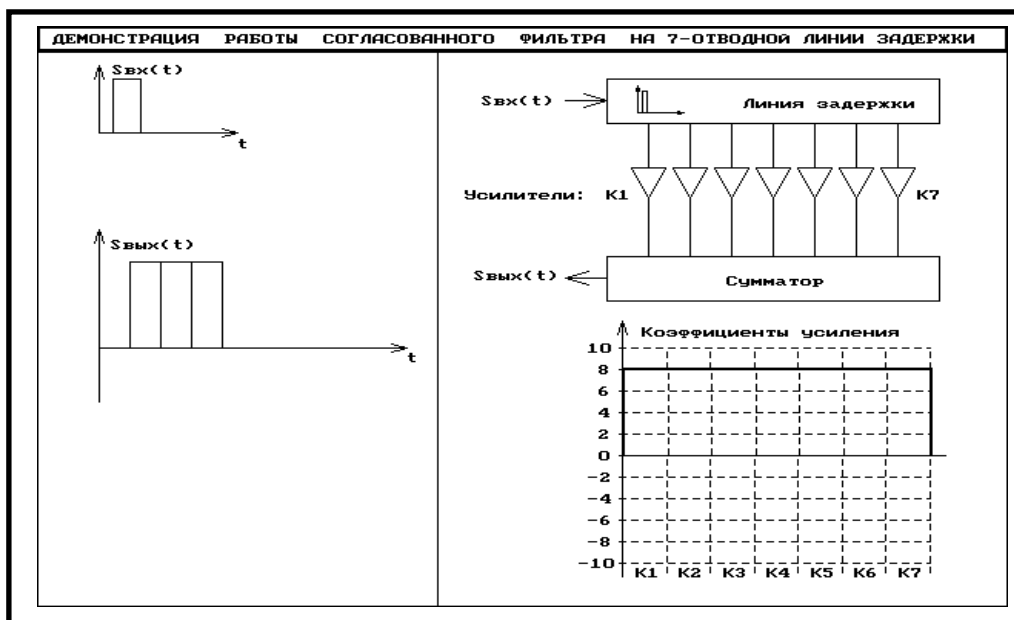


Рисунок 4.1 - Временные диаграммы, поясняющие работу согласованного фильтра на многоотводной линии задержки

Импульсной характеристикой фильтра является его реакция на дельта-функцию, поэтому при подаче на вход фильтра дельтаобразного импульсного воздействия на временных диаграммах (Рис.4.1) последовательно отображаются огибающие откликов на отводах линии задержки с учетом коэффициентов передачи канальных усилителей, а так же результирующий отклик на выходе сумматора фильтра.

Для выполнения лабораторной работы сначала требуется задать импульсную характеристику фильтра, которая должна быть зеркальна заданным для исследования сигналам (в соответствии с таблицами 4,1; 4.2). Импульсная характеристика в модельном эксперименте задается семиэлементной ступенчатой функцией.

Форма сигналов, поступающих на вход исследуемого фильтра, задается аналогичным образом. Программа позволяет задать в одном эксперименте до четырех различных видов входного воздействия. В результате ПК производит расчет и построение формы откликов (Рис. 4.2) на выходе фильтра, по которым может быть оценена степень согласованности фильтра с заданным видом сигнала.

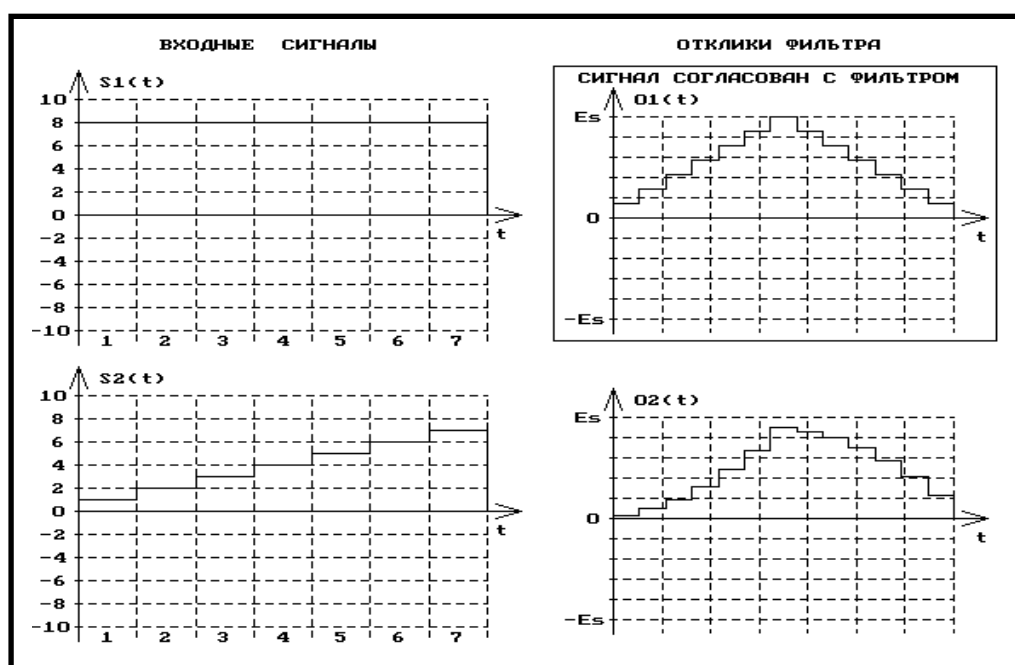


Рисунок 4.2 - Временные диаграммы откликов на выходе фильтра.

Для сравнения можно выбирать сигналы с различной формой огибающей. Рекомендуется наряду с согласованным сигналом задать прямоугольный, симметричный и "зеркальный" сигнал. Представляет интерес промоделировать процедуру согласованной фильтрации широкополосного импульсного сигнала, например амплитудно-манипулированного семиэлементным кодом Баркера (1110010).

В результате модельного эксперимента необходимо зафиксировать амплитуду и форму откликов, сравнить их с результатами расчетов и сделать подробные выводы.

5. РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

Исследование разрешающей способности импульсных сигналов во временной области.

5.1 Задание для выполнения работы

На входы оптимальных приемников на базе согласованных фильтров, основные характеристики которых рассчитаны в предыдущих заданиях, поступают сигнальные радиоимпульсы, заданные таблицами 4.1; 4.2.

Требуется:

1. Рассчитать для заданных видов сигналов (в соответствии с таблицами 4.1; 4.2) нормированные автокорреляционные функции и построить их графики.
2. Рассчитать и построить графики автокорреляционных функций для сигналов в виде пачки прямоугольных радиоимпульсов в соответствии с таблицей 5.1 и сигнала с внутриимпульсной модуляцией семиэлементным кодом Баркера (1110010)
3. Оценить потенциальную разрешающую способность во времени для заданных сигналов и сравнить её с разрешающей способностью для прямоугольного и треугольного (симметричного) импульсов.
4. Исследовать в модельном эксперименте на ПК корреляционные функции и разрешающую способность различных импульсных сигналов. Провести сравнительный анализ полученных результатов с результатами теоретических расчетов. Сделать подробные выводы.

5.2 Методические рекомендации по теоретическим расчетам

Под разрешающей способностью РЭС понимают то минимальное различие в параметрах двух сигналов, при котором они могут быть выделены радиосистемой отдельно.

Наиболее наглядно понятие разрешающей способности объясняется для систем извлечения информации (радиолокации), где разрешающая способность по дальности - это способность системы выделить отдельно сигналы от двух целей при минимальном расстоянии между ними (Рис.5.1).

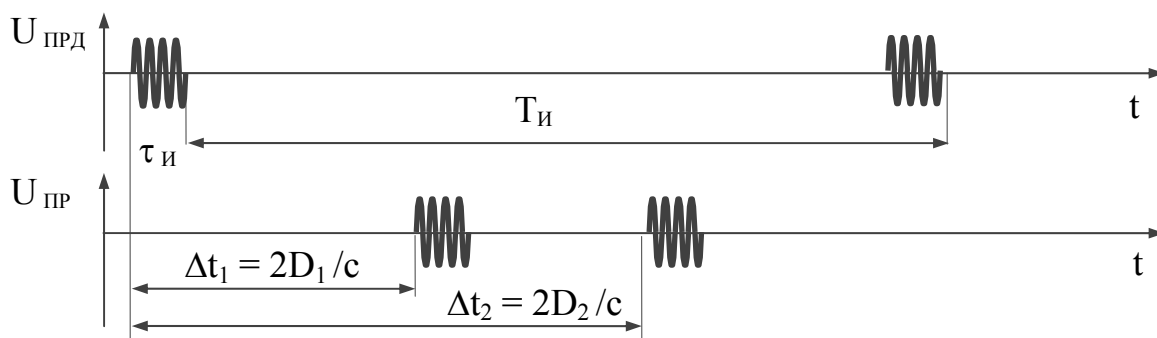


Рисунок 5.1 - Временные диаграммы, поясняющие принцип измерения дальности импульсным радиолокационным дальномером.

При радиолокационном измерении дальности в пространство посылаются зондирующие импульсы $U_{\text{прд}}$ длительностью $\tau_{\text{и}}$ с периодом $T_{\text{и}}$. Отраженные от целей сигналы $U_{\text{пр}}$ представляют собой отклики, запаздывающие относительно зондирующего импульса на временные интервалы Δt , пропорциональные дальности до целей D .

Если цели находятся на разных дальностях, то отклики занимают различное временное положение и разрешаются нормально (Рис.5.1). Если расстояние между объектами $D_{1-2} = D_1 - D_2$ уменьшается и временная задержка $\Delta t_1 - \Delta t_2$ меньше, чем длительность импульса $\tau_{\text{и}}$, то отклики от различных целей сливаются и не могут быть разрешимы. Минимальное расстояние δ_D или временное смещение δ_t , при котором цели могут быть выделены раздельно, называется разрешающей способностью системы по дальности или по времени.

Таким образом, разрешающая способность РЭС тем лучше, чем короче отклики на выходе радиоприемника системы. Как отмечалось в предыдущем разделе 4, отклик на выходе согласованного фильтра при отсутствии шума описывается автокорреляционной функцией (АКФ) сигнала. То есть, если на вход согласованного фильтра поступает видеосигнал без шума $s(t)$, а импульсная характеристика фильтра зеркальна по отношению к этому сигналу (4.3), то нормированный отклик на выходе СФ:

$$R(\tau) = \frac{1}{E_c} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s(t - \tau) dt \quad (5.1)$$

есть автокорреляционная функция, нормированная к энергии сигнала E_c . Функция $R(\tau)$ характеризует "степень похожести" между сигналом $s(t)$ и его сдвинутой во времени копией $s(t-\tau)$ и для радиосигналов может быть представлена в виде:

$$R(\tau) = \frac{1}{2E_c} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{s}(t) \dot{s}^*(t - \tau) dt, \quad (5.2)$$

где $\dot{s}(t)$ и $\dot{s}^*(t - \tau)$ - комплексная огибающая сигнала и комплексно-сопряженная огибающая. Из (5.2) следует, что корреляционная функция двух высокочастотных сигналов есть КФ их комплексных амплитуд, т.е. огибающих сигналов. Следовательно, она зависит от параметров модуляции высокочастотного сигнала.

Для обеспечения наилучшего разрешения во времени необходимо выбирать такие сигналы, у которых АКФ приближается к нулю всюду кроме окрестности $\tau = 0$. Максимум АКФ при $\tau = 0$ равен 1. Из выражений (5.1,5.2) очевидно, что АКФ обладает симметрией относительно значения $\tau = 0$. Интервал задержки одного сигнала по отношению к другому, в пределах которого сигналы считаются неразрешимыми, называется разрешающей способностью системы по времени δ_t или интервалом неопределенности по временной задержке:

$$\delta_t = \int_{-\infty}^{\infty} |R(\tau)|^2 dt . \quad (5.3)$$

В соответствии с выражением (5.1...5.3) наилучшей разрешающей способностью по времени, а, следовательно, и по дальности обладают радиосистемы, использующие широкополосные радиосигналы, имеющие узкую АКФ с малым интервалом неопределенности δ_t по временной задержке.

Для выполнения теоретической части необходимо рассчитать АКФ заданных сигналов (5.1, 5.2) и их разрешающую способность (5.3) во времени. Расчет и построение графиков следует произвести:

- * для двух сигналов (ступенчатого и гладкого), заданных таблицей 4.1;
- * для прямоугольного и треугольного (симметричного) импульсов с соответствующими длительностями;
- * для сигналов в виде пачек прямоугольных импульсов в соответствии с таблицей 5.1;
- * для прямоугольного широкополосного сигнала с внутриимпульсной ступенчатой модуляцией семиэлементным кодом Баркера (1110010). В качестве внутриимпульсной модуляции можно выбрать, как амплитудную (0,1), так и фазовую (0°, 180°). Длительностью широкополосного сигнала следует задаться из таблицы 4.1.

Таблица 5.1 - Исходные данные для расчета АКФ пачек импульсов

Последняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длительность пачки $T_{\text{пачки}}$, мкс	80	120	49	100	120	90	80	150	105	140
Период следования импульсов $T_{\text{и}}$, мкс	10	15	7	20	11	8	13	16	9	19
Предпоследняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длительность импульсов $\tau_{\text{и}}$, мкс	1,0	0,2	1,5	0,3	2,1	0,7	1,3	0,5	1,7	0,9

При расчете АКФ следует подставлять в формулы (5.1...5.3) реальные пределы интегрирования, так как АКФ обладает симметрией и при $\tau > \tau_{\text{и}}$ подынтегральное выражение обращается в 0.

При упрощенном анализе разрешающей способности интервал неопределенности можно оценивать сечением АКФ на уровне 0,5 (Рис. 5.1).

5.3 Методические рекомендации по выполнению работы на ПК

Для выполнения лабораторной работы на ПК необходимо войти в директорию «RTS-LAB», запустить программу лабораторного практикума через файл «RTS. exe» и после вывода на экран главного меню выбрать расчетно-

лабораторную работу № 5 «Исследование разрешающей способности импульсных сигналов во времени».

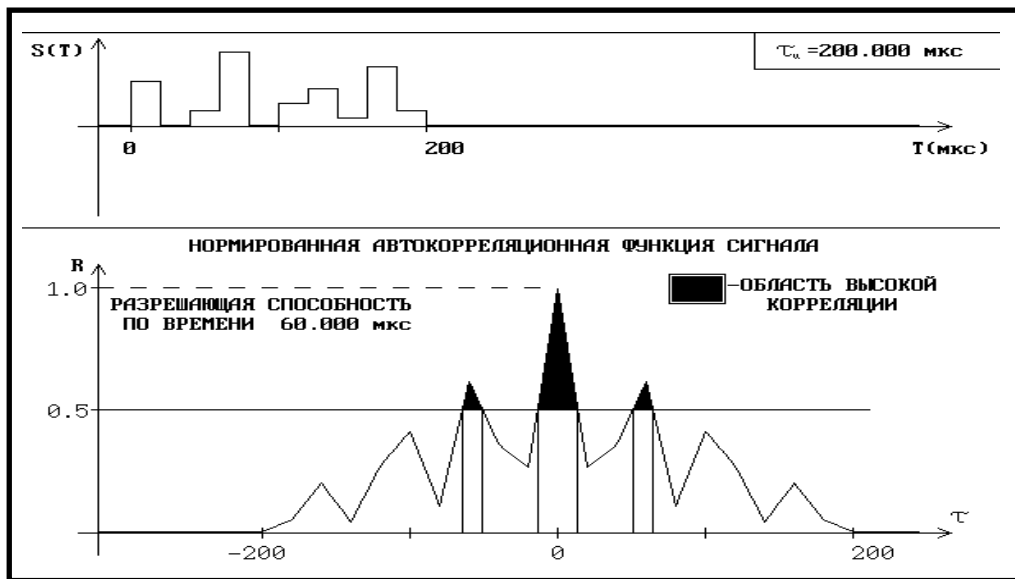


Рисунок 5.1 - Огибающая и АКФ ступенчатого импульсного сигнала

Программа лабораторной работы содержит краткий справочный раздел, поясняющий связь между понятиями "разрешающая способность по дальности" и "по временному запаздыванию" для простых сигналов.

Для выполнения модельных расчетов необходимо сначала выбрать вид аппроксимации сигнала (ступенчатая или гладкая), а затем задать длительность и форму огибающей по 1...100 отсчетам. Для повышения точности расчета АКФ для сигналов сложной формы целесообразно увеличивать количество отсчетов. Задание амплитудно-модулированного сигнала производится значениями в диапазоне от 0 до 10, а задание фазоманипулированного сигнала (0° , 180°) - значениями +5, -5. После задания формы сигнала ПК производит построение АКФ, которая повторяет форму отклика согласованного фильтра (Рис.5.1). Оценка разрешающей способности в процессе модельного исследования производится по сечению нормированного отклика на половинном уровне.

В результате выполнения модельного эксперимента необходимо зафиксировать форму АКФ для всех видов сигналов и значения разрешающей способности по времени для сигналов различной формы, сравнить их с результатами выполненных расчетов и сделать подробные выводы.

6. РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

Исследование совместной разрешающей способности импульсных сигналов в частотно-временной области.

6.1 Задание для выполнения работы

На входы оптимальных приемников на базе согласованных фильтров, основные характеристики которых рассчитаны в предыдущих заданиях, поступают сигнальные радиоимпульсы.

Требуется:

1. Рассчитать и построить для заданных видов сигналов (в соответствии с таблицами 4.1; 4.2, 5.1) нормированные автокорреляционные функции в частотной и временной областях и построить их графики.
2. Рассчитать и построить диаграммы неопределенности и оценить по ним разрешающую способность системы для:
 - прямоугольного импульса;
 - треугольного симметричного импульса;
 - ступенчатого импульса (Таблица 4.1);
 - импульса с треугольной огибающей (Таблица 4.1);
 - пачки прямоугольных импульсов (Таблица 5.1);
 - линейно-частотно-модулированного радиоимпульса (Таблица 6.1);
 - фазоманипулированного радиоимпульса.
3. Исследовать в модельном эксперименте на ПК двумерные нормированные корреляционные функции, диаграммы неопределенности и разрешающую способность различных импульсных сигналов. Провести сравнительный анализ полученных результатов с результатами теоретических расчетов. Сделать подробные выводы.

6.2 Методические рекомендации по теоретическим расчетам

В радиосистемах сигналы на входе приемника отличаются не только временным положением (занятие 5), но и имеют различные смещения по частоте F , обусловленные доплеровским эффектом. Частота радиолокационного сигнала, отраженного целью, движущейся с радиальной скоростью $V_{\text{рад}}$, смещается на величину:

$$F = \frac{2 V_{\text{рад}}}{\lambda}, \quad (6.1)$$

где λ - длина волны зондирующего радиосигнала системы.

Для оценки совместной разрешающей способности радиолокационных сигналов во временной и частотной областях требуется исследовать двумерную функцию корреляции двух переменных τ и F во временной и частотной областях. Действительно, если принимаемый сигнал смещен по частоте то фильтр, выделяющий этот сигнал на фоне шума, перестает быть согласованным с сигналом вследствие расстройки по частоте на величину F . Это рассогласование приводит к уменьшению амплитуды и искажению формы отклика фильтра.

Двумерная нормированная АКФ имеет вид:

$$R(\tau, F) = \left| \frac{1}{2E_c} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(t) \dot{S}^*(t - \tau) \exp(-j2\pi Ft) dt \right|, \quad (6.2)$$

где $E_c = \frac{1}{2} R(0,0) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(t) \dot{S}^*(t) dt$ - энергия сигнала.

Эта функция $R(\tau, F)$ является обобщением автокорреляционной функции сигнала (его комплексной амплитуды, т.е. огибающей) на две переменные - τ и F . Она показывает относительную величину отклика оптимального фильтра на сигнал, сдвинутый по времени на τ и по частоте на F относительно сигнала, оптимального для данного фильтра. Каждое сечение этой двумерной корреляционной функции (см. рис. 6.1) плоскостью (τ, R) можно рассматривать как выходной сигнал схемы корреляционной обработки при наличии частотной расстройке $F = \text{const}$.

В прямоугольной системе координат τ, F, R функция $R(\tau, F)$ представляет собой куполообразную поверхность (рис. 6.1), опирающуюся на плоскость (τ, F) , и называется функцией неопределенности (ФН).

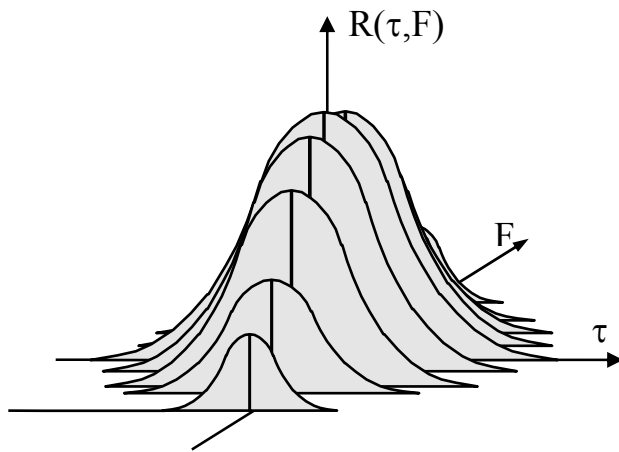


Рисунок 6.1 - Двумерная нормированная корреляционная функция (ФН) импульсного сигнала

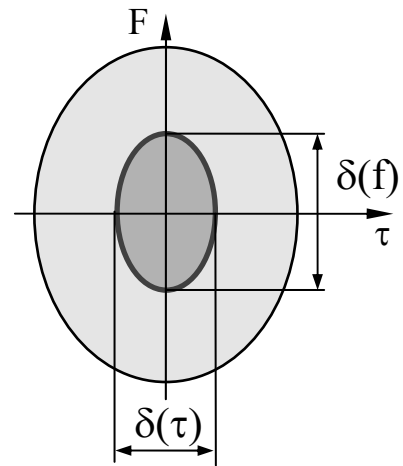


Рисунок 6.2 - Диаграмма неопределенности (ДН) импульсного сигнала

Для обеспечения высокой разрешающей способности и по времени и по частоте в РЭС следует применять сигналы, ФН которых имеют острый иглообразный пик в области $\tau = F = 0$.

Однако для простых импульсных сигналов это условие обеспечить невозможно, так как укорочение длительности простого радиоимпульса приводит к сжатию его ФН по оси τ , но вызывает одновременное расширение его амплитудного частотного спектра и ФН по оси F . Для упрощения анализа вместо двумерной корреляционной функции обычно исследуют область ее высокой корреляции (диаграмму неопределенности), которая объединяет все значения τ и F , для которых $0,5 \leq R(\tau, F) \leq 1$.

Диаграмма неопределенности (ДН) представляет собой проекцию на плоскость (τ, F) сечения функции неопределенности на уровне $R(\tau, F) = 0,5$. На рис. 2.36 приведены сечения этой ФН плоскостями $R=0,1$ (светло-серая область) и $R=0,5$ (темно-серая область). Оценка разрешающей способности системы по времени может быть произведена по протяженности диаграммы неопределенности по оси τ , а разрешающей способности по частоте - по оси F .

Следует различать простые и сложные сигналы, имеющие различную базу:

$$B = \tau_{\text{и}} \Delta F, \quad (6.3)$$

где: $\tau_{\text{и}}$ - эффективная длительность сигнала;

ΔF - эффективная ширина спектра сигнала.

Для простых сигналов (прямоугольные и гауссовы импульсы без внутриимпульсной модуляции), база которых близка к единице, площадь диаграммы неопределенности постоянна. Укорочение длительности импульса приводит к сжатию диаграммы по оси τ , и одновременному расширению её по оси F .

Для сложных сигналов с внутриимпульсной модуляцией база значительно больше единицы. Площадь диаграммы неопределенности для таких сигналов (по сравнению с простыми сигналами) снижается и возникает возможность повышения разрешающей способности по времени и по частоте.

В ходе теоретических расчетов должны быть построены диаграммы неопределенности не только для простых сигналов, подробно описанных в предыдущих заданиях, но и для ЛЧМ сигнала, параметры которого заданы таблицей 6.1.

Таблица 6.1 - Исходные данные для расчета диаграммы неопределенности ЛЧМ импульса с прямоугольной огибающей.

Последняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длительность импульса $\tau_{\text{и}}$, мкс	8,0	1,2	4,9	1,0	12	0,8	2,3	1,8	6,0	1,4
Предпоследняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Полоса частотной модуляции ΔF , МГц	1,0	22	1,5	13	2,1	17	26	5,0	1,7	0,9

6.3 Методические рекомендации по выполнению работы на ПК

Для выполнения лабораторной работы на ПК необходимо войти в директорию «RTS-LAB», запустить программу лабораторного практикума через файл «RTS.exe» и после вывода на экран главного меню выбрать лабораторную работу № 6 «Исследование совместной разрешающей способности импульсных сигналов в частотно-временной области».

Программа лабораторной работы содержит краткий справочный раздел, поясняющий понятия совместной разрешающей способности по времени и частоте.

Для выполнения модельных расчетов необходимо сначала выбрать вид исследуемого сигнала: простого (без внутриимпульсной модуляции), линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) или фазоманипулированного. Огибающая сигнала может быть задана ступенчатой или гладкой функцией. Затем следует задать длительность и форму огибающей, временной и частотный интервал анализа. В результате работы на экране будет произведено построение ФН (рис.6.3) и ДН (Рис. 6.4).

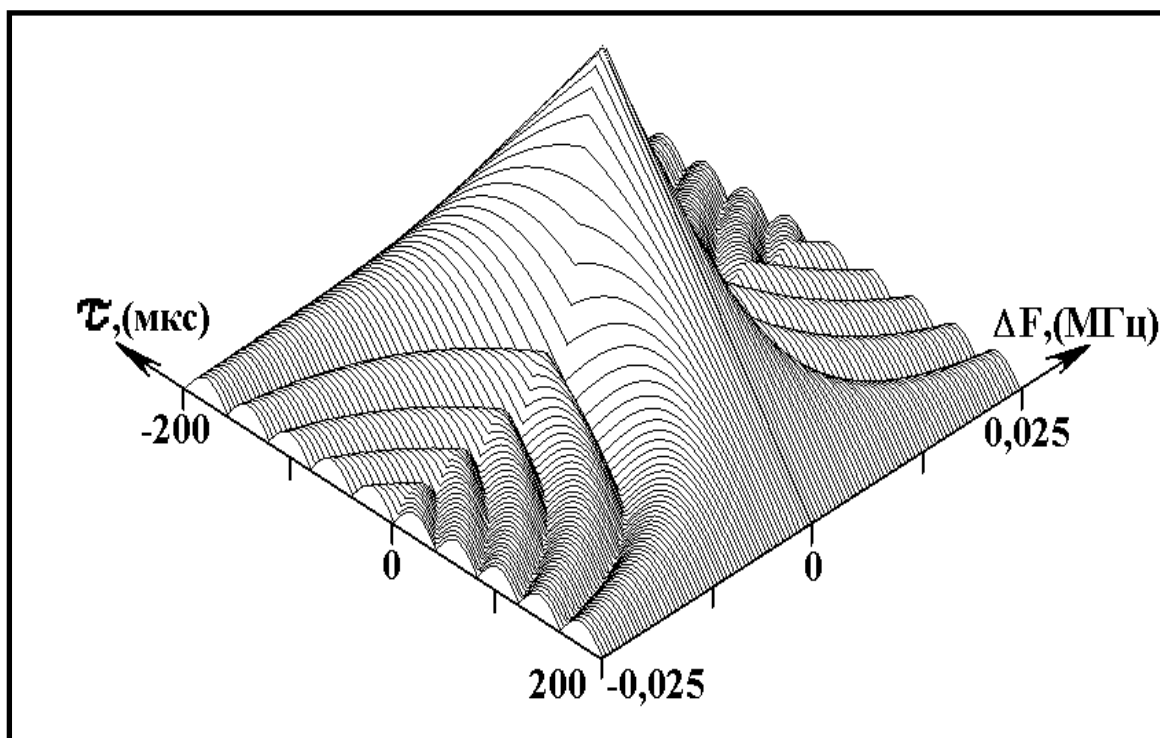


Рисунок 6.3 - Двумерная нормированная АКФ (функция неопределенности) прямоугольного импульса без внутриимпульсной модуляции длительностью 200 мкс.

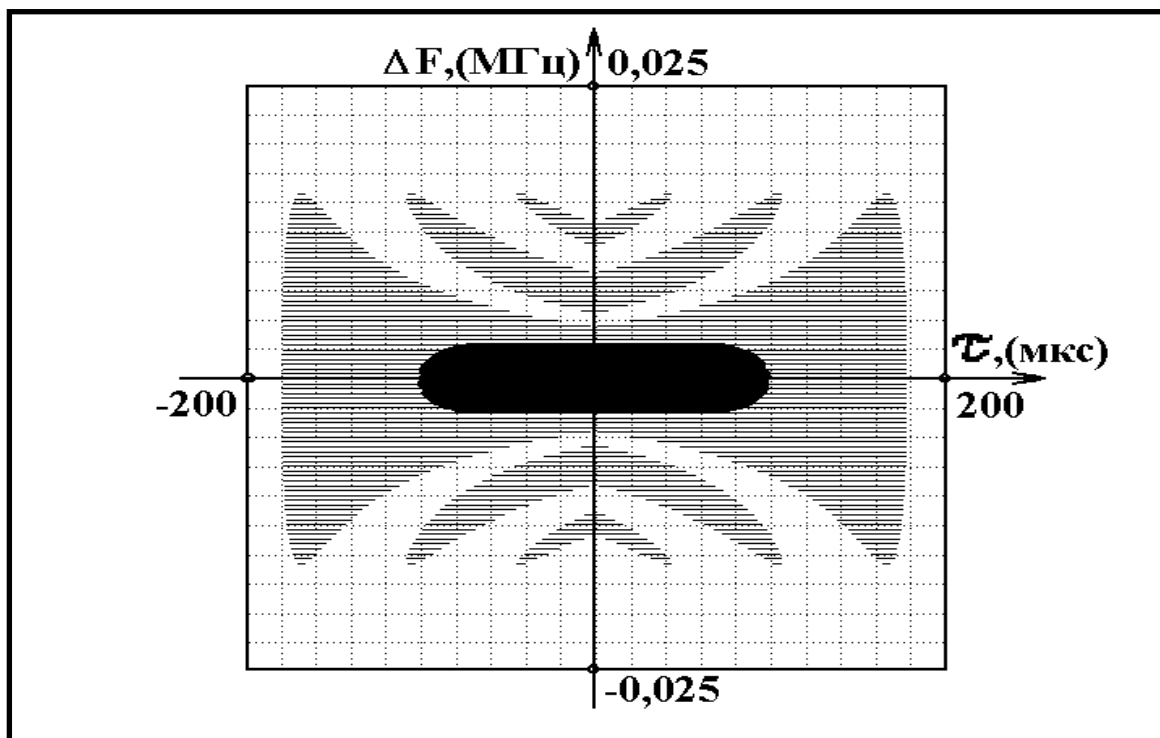


Рисунок 6.4 - Диаграмма неопределенности для прямоугольного импульса

7 РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

Исследование погрешности измерения временного положения импульсных сигналов на фоне помех

7.1 Задание для выполнения работы

На вход оптимального приемника радиосистемы, основные характеристики которого рассчитаны в предыдущих заданиях, поступает сигнальный радиоимпульс на фоне нормального белого шума.

Требуется:

1. Рассчитать эффективную ширину спектра $\Delta f_{\text{эфф}}$ импульсных сигналов, заданных таблицей 4.2.

2. Рассчитать и построить зависимости потенциальной среднеквадратической ошибки измерения временного положения откликов СФ на заданные сигналы при изменении отношения сигнал/шум в системе ($q = 3 \dots 10$). Сравнить полученные результаты для заданных сигналов с погрешностями измерения для прямоугольного и треугольного симметричного импульса.

3. Исследовать зависимости среднеквадратической погрешности измерения временного положения для заданных сигналов в модельном эксперименте на ПК при различных схемотехнических алгоритмах измерения (по переднему фронту отклика -ПФ, усреднением по двум фронтам -ДФ, по максимуму отклика -МАКС, центру тяжести отклика -ЦТ, по медиане отклика -МЕД) в соответствии с таблицей 7.1. Повести сравнительный анализ эффективности различных методов измерения и сделать подробные выводы.

Таблица 7.1 - Варианты для выполнения расчетно-лабораторных заданий

Последняя цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Методы измерения	ПФ МАК	ДФ ЦТ	МАК МЕД	ПФ ЦТ	ДФ МАК	ПФ МЕД	МАК ЦТ	ПФ ДФ	ДФ МЕД	МЕД ЦТ
Предпоследн. цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Относительн. порог	0,5	0,7	0,9	0,6	0,8	0,7	0,6	0,9	0,5	0,8

7.2 Методические рекомендации по теоретическим расчетам

Повышение точности измерения временного положения импульсного радиосигнала является актуальной задачей систем радиолокации, навигации, телеметрии, радиосвязи. В навигационных и локационных системах временное запаздывание Δt принятого сигнала относительно зондирующего характеризует дальность D до объекта: $\Delta t = 2D/c$, где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость распространения радиоволн.

Погрешности измерения временного положения могут быть классифицированы на систематические и случайные.

Систематические погрешности обусловлены влиянием известных факторов, имеют постоянный знак и величину. Причины систематических ошибок могут быть установлены, их величины рассчитаны и они могут быть устранены путем введения соответствующих поправок в результаты измерения. Результирующая систематическая погрешность Δt может быть оценена путем суммирования отдельных составляющих: $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$.

Случайные погрешности обусловлены влиянием большого числа факторов, эффект действия которых нельзя выделить и учесть в отдельности. Случайную ошибку можно рассматривать, как суммарный эффект действия таких факторов. Случайная погрешность наиболее часто оценивается среднеквадратической ошибкой σ_t , которая может быть оценена по отдельным составляющим путем среднеквадратического суммирования:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{t1}^2 + \sigma_{t2}^2 + \sigma_{t3}^2}$$

Случайная ошибка измерения временного положения радиосигнала включает следующие составляющие: потенциальную ошибку, ошибку из-за изменения условий распространения радиоволн и инструментальную ошибку, обусловленную схмотехнической реализацией метода измерения. Аппаратурные ошибки и ошибки распространения радиоволн будут подробно рассматриваться нами впоследствии, при изучении конкретных видов радиосистем, а целью данной лабораторной работы является исследование потенциальную погрешности.

Потенциальная погрешность характеризует отклонение результатов измерения от истинного значения, при условии оптимального выделения сигнала на фоне помех в идеальном согласованном фильтре (СФ).. Она определяет теоретически предельно достижимую точность измерения.

При наличии сигнала $s(t)$ на входе согласованного фильтра отклик $u_c(t)$ на выходе СФ повторяет автокорреляционную функцию сигнала, которая является четной. При отсутствии шумов момент t_0 соответствует положению максимума отклика и может быть оценен сколь угодно точно (Рис.7.1). Наличие же шума $u_{ш}(t)$ приводит к смещению максимума, т.е. к ошибке измерения Δt , величина которой будет тем меньше, чем больше отношение сигнал/шум и чем уже пик сигнальной функции.

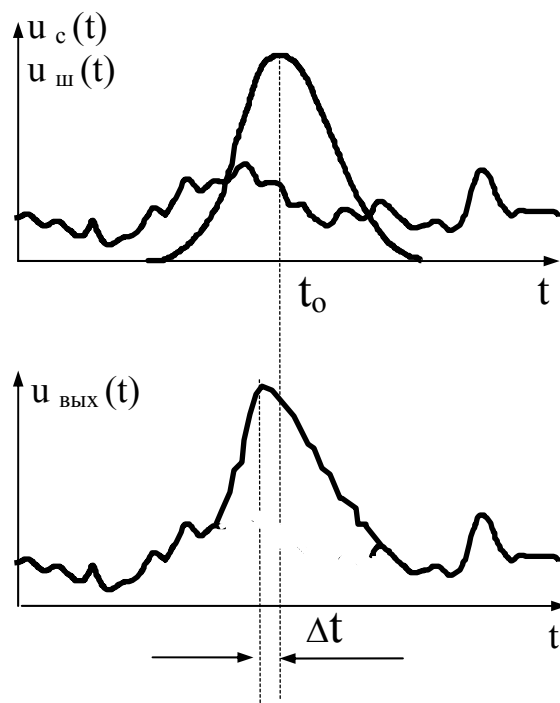


Рисунок 7.1 - Смещение максимума отклика на выходе приемника из-за влияния шума

Теоретический анализ потенциальной погрешности измерения временного положения сигнала на фоне белого гауссова шума показывает [1,2], что при больших отношениях сигнал/шум оценки по «центру тяжести» плотности вероятности и максимуму правдоподобия совпадают.

На основе статистической теории максимума апостериорного распределения и максимума функции правдоподобия получено выражение для потенциальной среднеквадратической ошибки измерения временного положения сигнала:

$$\sigma_{t \text{ пот}} = \frac{1}{2\pi \Delta f_{\text{эфф}} \sqrt{2E_c/N_0}}, \quad (7.1)$$

где: $\sqrt{2E_c/N_0}$ - отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра;

$\Delta f_{\text{эфф}}$ - эффективная (среднеквадратическая) ширина спектра сигнала.

$$\Delta f_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df}}. \quad (7.2)$$

Как видно, $\Delta f_{\text{эфф}}^2$ является моментом инерции плоской фигуры под кривой $|S(f)|^2/E$ (энергетическим спектром сигнала, нормированным так, чтобы площадь его была единичной) относительно оси $f = 0$ и потому характеризует «размах» спектра относительно нулевой частоты. Если измеряется время запаздывания видеосигнала, спектр $S(f)$ которого сосредоточен вблизи нулевой частоты, то $f_{\text{эфф}}$ имеет смысл ширины спектра сигнала $s(t)$. Эта ширина спектра связана обратной зависимостью с длительностью отклика оптимального приемника (СФ) на $s(t)$, т.е. с протяженностью корреляционной функции сигнала.

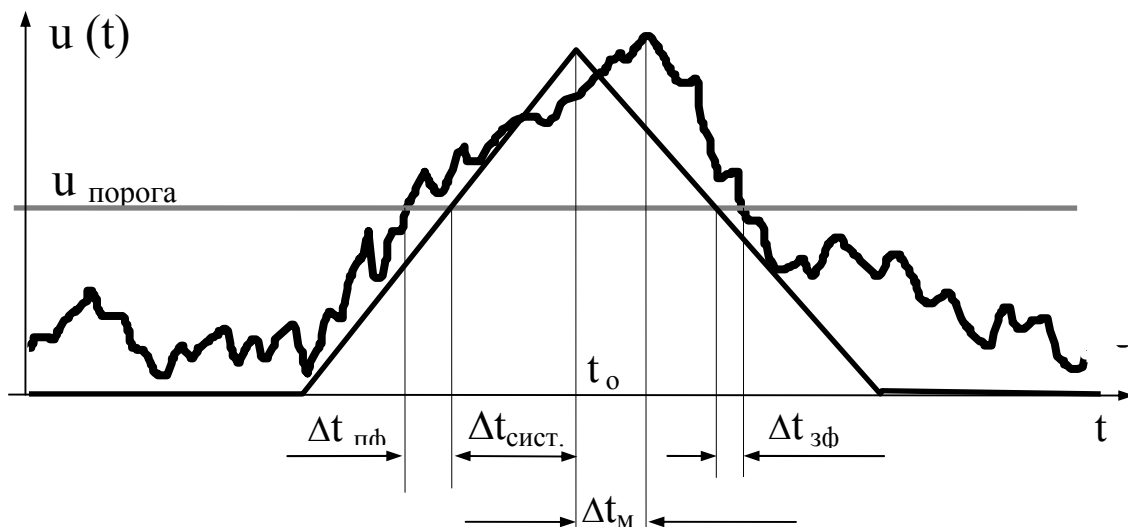


Рисунок 7.2 - Временная диаграмма, поясняющая процесс измерения временного положения импульсного сигнала в присутствии шума

Следовательно, расширение спектра «обостряет» отклик сигнала на выходе СФ и по острому максимуму отклика может быть произведена более точная оценка временного положения сигнала на фоне шума..

Если в качестве зондирующего сигнала используется прямоугольный радиоимпульс, то отклик на выходе согласованного фильтра (корреляционная функция) имеет треугольную форму (Рис.7.2) с «острым максимумом», по положению которого производится измерение временного интервала. Если же в системе используются более узкополосные сигналы - Гауссовы, треугольные, трапецевидные и др., то «острота» отклика уменьшается и следует ожидать возрастания погрешности измерения.

В практике радиоизмерений применяются различные схмотехнические методы фиксации временного положения импульсных сигналов:

* *по максимуму отклика*, для реализации которого (Рис.7.3а) кроме согласованного фильтра (СФ) требуются: пороговое устройство (ПУ), производящее временную селекцию сигнального импульса и устройство для формирования импульса максимума (ФИМ) отклика по моменту перехода через нуль процесса

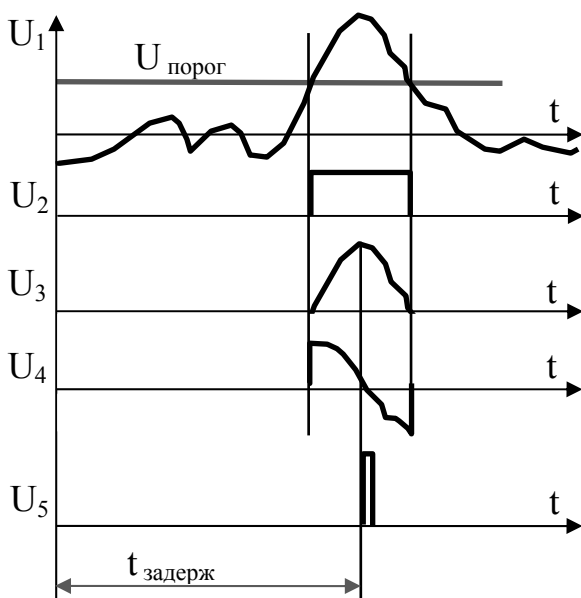
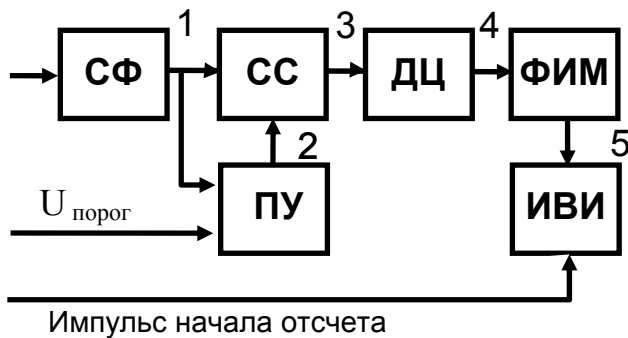


Рисунок 7.3а - Структурная схема и диаграммы работы измерителя временного положения максимума импульса

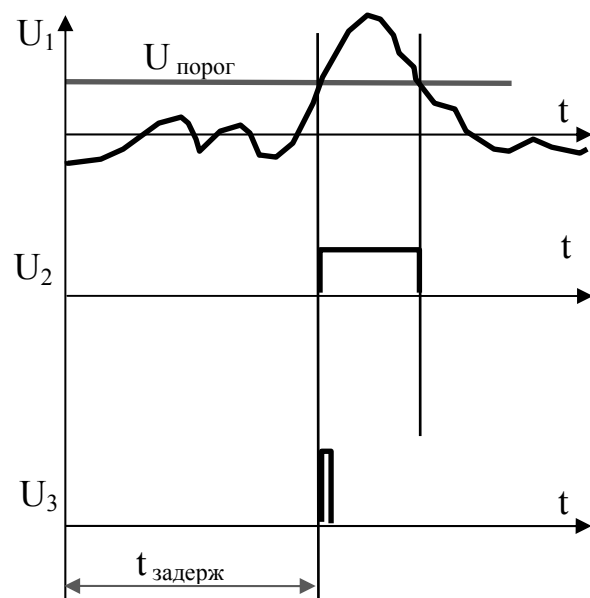
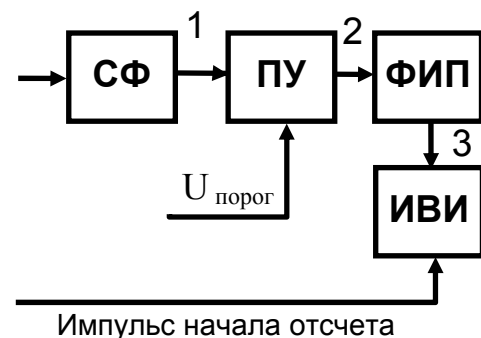


Рисунок 7.3б - Структурная схема и диаграммы работы измерителя временного положения фронта импульса

на выходе дифференцирующей цепи (ДЦ). Измерение временного интервала (ИВИ) производится между импульсом начала отсчета и импульсом, соответствующим максимуму сигнала U_5 ;

* *по переднему фронту импульса отклика* - при этом методе достаточно зафиксировать положение переднего фронта сигнального импульса на выходе порогового устройства. Достоинством метода является простота устройства (Рис. 7.3б), а недостатком - наличие систематической ошибки, зависящей от уровня порога $U_{\text{порог}}$, которая приобретает случайный характер при флуктуациях амплитуды отклика на выходе согласованного фильтра.

* *усреднение по переднему и заднему фронтам* (Рис. 7.4а) позволяет уменьшить эту ошибку, так как при изменении уровня порога импульсы U_3 и U_4 на выходах формирователей переднего (ФИП) и заднего (ФИЗ) фронтов смещаются в противоположные стороны. Усредненный измерительный импульс U_5 формируется в измерителе временного интервала (ИВИ) по двум описанным отсчетам;

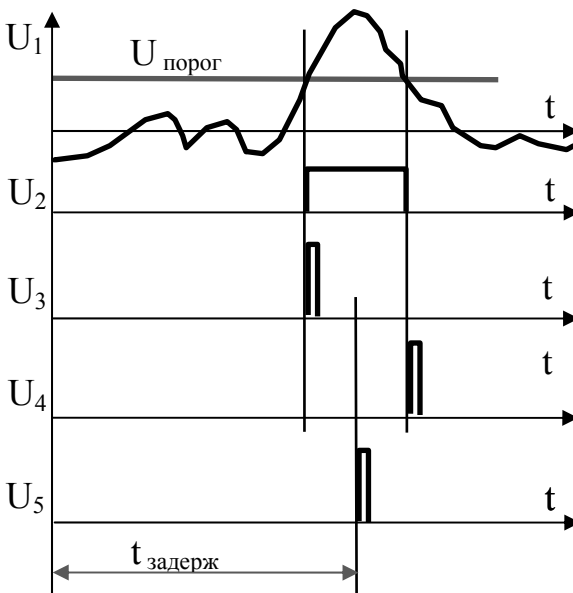
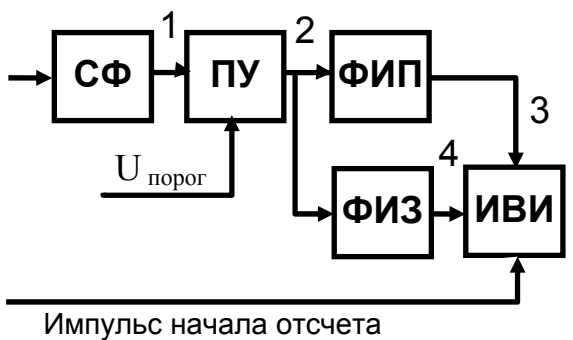


Рисунок 7.4а - Структурная схема и диаграммы работы измерителя временного положения импульса по двум фронтам

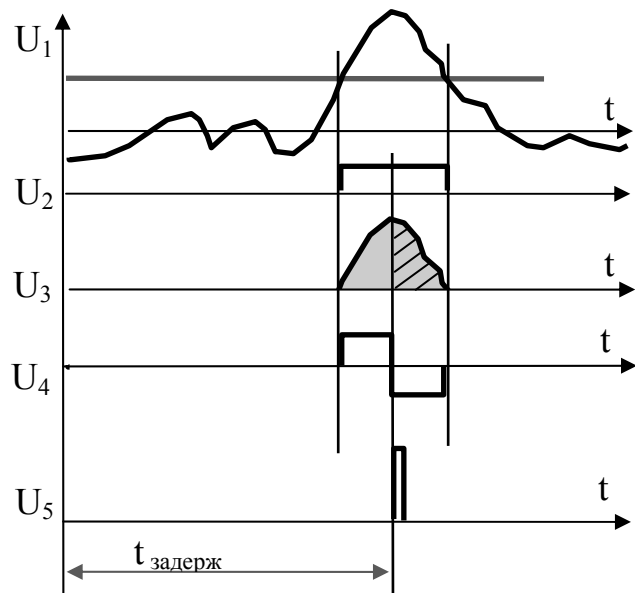
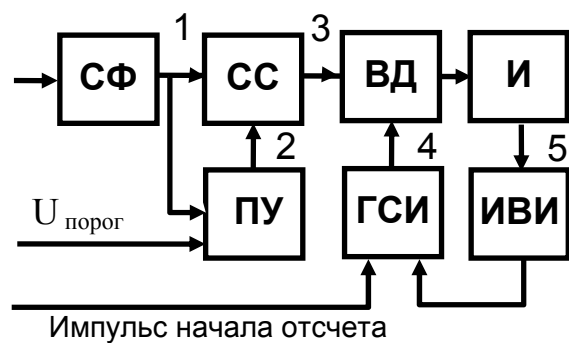


Рисунок 7.4б - Структурная схема и диаграммы работы измерителя временного положения импульса по медиане

* *фиксация по значению медианы, разделяющей отклик на области равной площади* применяется в системах автоматического сопровождения. При этом (Рис 7.4б) в ГСИ формируются дополнительно два разнополярных селекторных импульса U_4 , которые совмещаются во временном дискриминаторе (ДС) с сигнальным откликом U_3 , разбивая его на две области (заштрихованы). Если площади этих областей одинаковы то отклик ВД равен нулю, а интегратор (И) и ИВИ сохраняют результат предыдущего измерения. Если же сигнальный отклик U_3 не совпадает с центром селекторных импульсов U_4 , то площади указанных областей U_5 не равны и ВД формирует сигнал рассогласования, который через И и ИВИ изменяет временное положение селекторных импульсов, стремясь совместить их с центром отклика U_5 ;

* *фиксация по «центру тяжести» отклика* предусматривает регистрацию огибающей проселектированного отклика СФ и нахождение по ней положения «центра тяжести» отклика. Реализация такого алгоритма методами аналоговой обработки затруднительна, но сравнительно просто такая обработка сигнала может быть произведена цифровыми методами на базе микропроцессоров.

Сравнительный анализ [7] показывает, что при больших отношениях сигнал/шум среднеквадратические погрешности измерения различными методами близки и соответствуют выражениям (7.1; 7.2).

7.3 Методические рекомендации по выполнению работы на ПК

Задачей модельного эксперимента является исследование зависимости потенциальной среднеквадратической погрешности измерения временного положения импульса от отношения сигнал/шум для разных методов измерения.

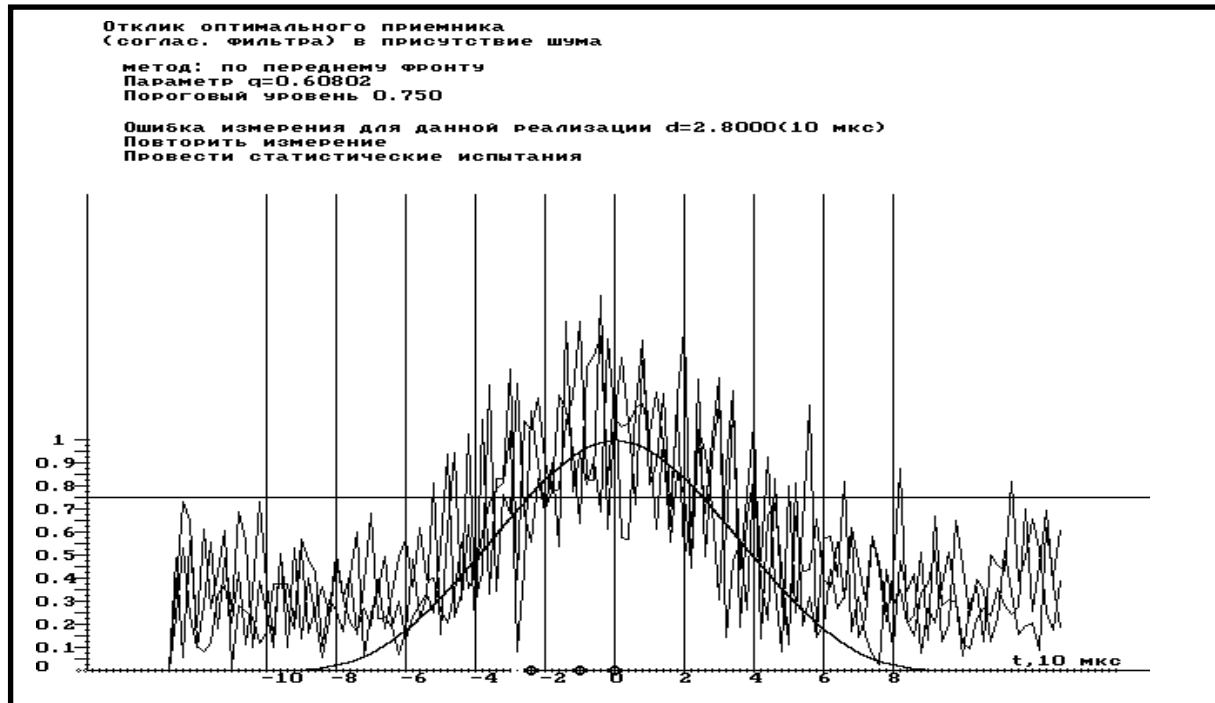


Рисунок 7.5 - Построение ПК отклика согласованного фильтра, выбор метода обработки и задание уровня относительного порога.

Для выполнения лабораторной работы следует выбрать из главного меню комплекса RTS-LAB работу №7 «Исследование погрешности измерения временного положения импульсного сигнала». После просмотра справочной информации следует перейти в режим «Выполнение работы».

Программа позволяет задать длительность сигнальных импульсов от 1 мс до 1 нс. Форма сигнала задается клавишами «↑», «→» и фиксируется «Enter», после чего вычисляется нормированная энергия сигнала $E_{\text{С норм}}$ и должна быть введена нормированная спектральная плотность шума N_0 .

При переходе к выполнению эксперимента студент должен задать пороговый уровень обнаружения и выбрать метод фиксации временного положения сигнала, после чего будет построена временная диаграмма отклика СФ на сигнальный импульс и на смесь сигнала с шумом (Рис.7.4). Далее процесс эксперимента и накопления данных может быть продолжен, как в ручном, так и в автоматическом режимах.

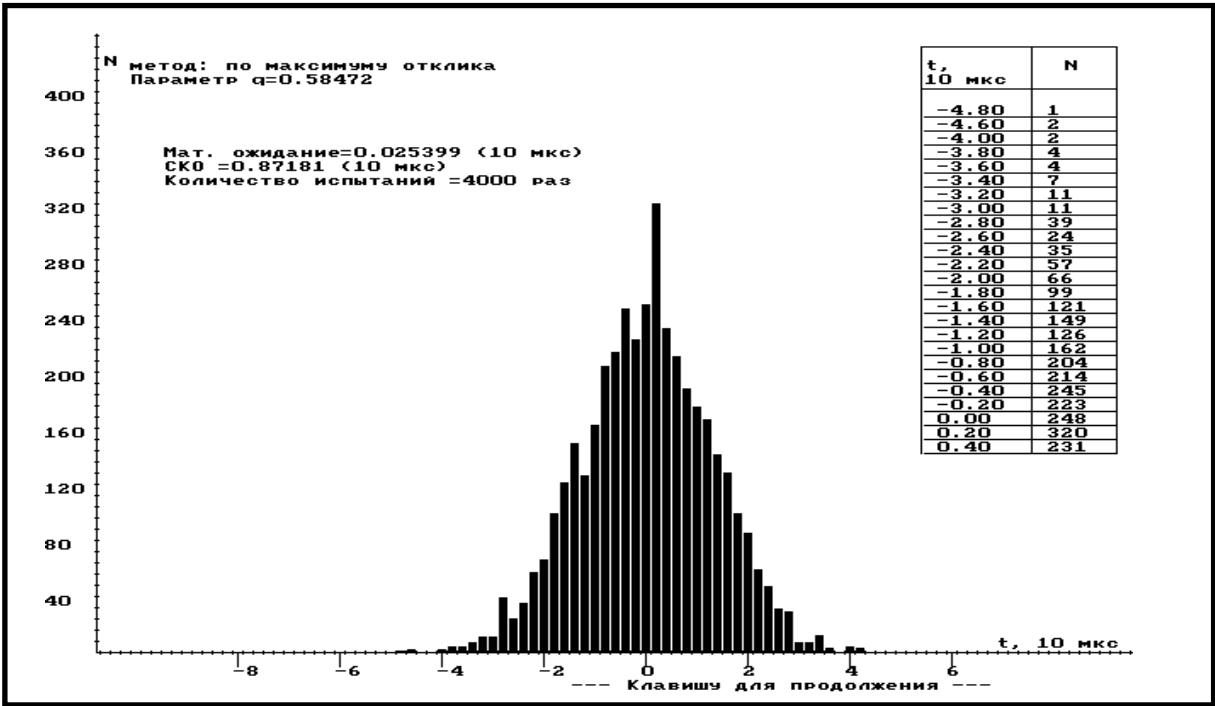


Рисунок 7.5 - Гистограмма и таблица распределения ошибки измерения временного положения импульсного сигнала на фоне помех.

Для получения достоверных результатов целесообразно выбирать количество испытаний более 1000.

В результате выполнения программы моделирования на экране монитора будет построена гистограмма распределения ошибки, её табличные данные. и статистические результаты эксперимента. Результаты модельного эксперимента могут быть записаны в память для дальнейшего анализа и построения результирующих зависимостей.

БИБЛИОГРАФИЯ

- 1 Радиотехнические системы / Под ред. Ю.М.Казаринова: Учебник для вузов.— М.: Высш. шк., 1990.— 496 с.
- 2 Чердынцев В.А. Радиотехнические системы: Учебное пособие для вузов.— Мн.: Высш. шк., 1988.— 369 с.
- 3 Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику РЭС: Учебное пособие для вузов.— М.: Радио и связь, 1986.— 290 с.
- 4 Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов.— М.: Радио и связь, 1983.— 536 с.
- 5 Васин В.В. ,Степанов Б.М. Справочник-задачник по радиолокации. - М.: Советское радио, 1977. –320 с.
- 6 Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1981. — 416 с.

Таблица интеграла вероятности $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$

х	Φ(х)	х	Φ(х)	х	Φ(х)	х	Φ(х)
0,00	0,5000	2,00	0,977 2	4,00	0,999 968 32	6,00	0,999 999 999 013
0,05	0,5199	2,05	0,979 8	4,05	0,999 974 39	6,05	0,999 999 999 275
0,10	0,5398	2,10	0,982 1	4,10	0,999 979 32	6,10	0,999 999 999 469
0,15	0,5596	2,15	0,984 2	4,15	0,999 983 37	6,15	0,999 999 999 612
0,20	0,5792	2,20	0,986 0	4,20	0,999 986 65	6,20	0,999 999 999 717
0,25	0,5987	2,25	0,987 7	4,25	0,999 989 31	6,25	0,999 999 999 794
0,30	0,6179	2,30	0,989 2	4,30	0,999 914 60	6,30	0,999 999 999 851
0,35	0,6368	2,35	0,990 61	4,35	0,999 993 193	6,35	0,999 999 999 892
0,40	0,6554	2,40	0,991 80	4,40	0,999 994 587	6,40	0,999 999 999 9223
0,45	0,6736	2,45	0,992 85	4,45	0,999 995 706	6,45	0,999 999 999 9440
0,50	0,6914	2,50	0,993 79	4,50	0,999 996 602	6,50	0,999 999 999 9598
0,55	0,7088	2,55	0,994 61	4,55	0,999 997 317	6,55	0,999 999 999 9712
0,60	0,7257	2,60	0,995 33	4,60	0,999 997 887	6,60	0,999 999 999 9794
0,65	0,7421	2,65	0,995 97	4,65	0,999 998 340	6,65	0,999 999 999 9853
0,70	0,7580	2,70	0,996 53	4,70	0,999 998 699	6,70	0,999 999 999 9895
0,75	0,7733	2,75	0,997 02	4,75	0,999 998 982	6,75	0,999 999 999 99260
0,80	0,7881	2,80	0,997 44	4,80	0,999 999 206	6,80	0,999 999 999 99477
0,85	0,8023	2,85	0,997 81	4,85	0,999 999 382	6,85	0,999 999 999 99630
0,90	0,8159	2,90	0,998 13	4,90	0,999 999 520	6,90	0,999 999 999 99740
0,95	0,8289	2,95	0,998 41	4,95	0,999 999 628	6,95	0,999 999 999 99817
1,00	0,8413	3,00	0,998 65	5,00	0,999 999 713	7,00	0,999 999 999 99872
1,05	0,8531	3,05	0,998 85	5,05	0,999 999 779	7,05	0,999 999 999 999106
1,10	0,8643	3,10	0,999 032	5,10	0,999 999 830	7,10	0,999 999 999 999375
1,15	0,8749	3,15	0,999 183	5,15	0,999 999 869	7,15	0,999 999 999 999567
1,20	0,8849	3,20	0,999 312	5,20	0,999 999 900 3	7,20	0,999 999 999 999699
1,25	0,8943	3,25	0,999 422	5,25	0,999 999 923 9	7,25	0,999 999 999 999791
1,30	0,9031	3,30	0,999 516	5,30	0,999 999 942 1	7,30	0,999 999 999 999856
1,35	0,9114	3,35	0,999 595	5,35	0,999 999 956 0	7,35	0,999 999 999 999 901
1,40	0,9192	3,40	0,999 663	5,40	0,999 999 966 7	7,40	0,999 999 999 999 932
1,45	0,9264	3,45	0,999 719	5,45	0,999 999 974 8	7,45	0,999 999 999 999 952
1,50	0,9331	3,50	0,999 767	5,50	0,999 999 981 0	7,50	0,999 999 999 999 968
1,55	0,9394	3,55	0,999 807	5,55	0,999 999 985 7	7,55	0,999 999 999 999 978
1,60	0,9452	3,60	0,999 840	5,60	0,999 999 989 2	7,60	0,999 999 999 999 985
1,65	0,9505	3,65	0,999 868	5,65	0,999 999 991 97	7,65	0,999 999 999 999 990
1,70	0,9554	3,70	0,999 892	5,70	0,999 999 994 01	7,70	0,999 999 999 999 993
1,75	0,9599	3,75	0,999 912	5,75	0,999 999 995 53	7,75	0,999 999 999 999 995
1,80	0,9640	3,80	0,999 927	5,80	0,999 999 996 68	7,80	0,999 999 999 999 997
1,85	0,9678	3,85	0,999 941	5,85	0,999 999 997 54	7,85	0,999 999 999 999 998

1,90	0,9712	3,90	0,999 953	5,90	0,999 999 998 18	7,90	0,999 999 999 999 999
1,95	0,9744	3,95	0,999 961	5,95	0,999 999 998 65	7,95	0,999 999 999 999 999