

Лабораторная работа № 4

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение методов измерения временного положения импульсного сигнала на фоне шума и принципов их технической реализации.

2. КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Процесс приема сигналов в РТС всегда сопровождается действием помех, что приводит к появлению случайных ошибок при оценивании параметров сигналов, в частности - при определении временного положения радиоимпульса. Подобная задача возникает при измерении дальности в импульсной локации, приеме сигналов импульсной модуляции в системах передачи информации, синхронизации таких систем. Все эти практические задачи требуют минимизации ошибок измерения, что достигается за счет оптимального построения измерителей.

На вход измерителя поступает смесь $U(t)$ полезного сигнала $S(t, \alpha)$ и белого шума $U_n(t)$

$$U(t) = S(t, \alpha) + U_n(t) \quad t \in [0, T],$$

где α - измеряемый параметр, представляющий собой в данной задаче временное положение сигнала. Предполагается, что в течение интервала наблюдения T параметр α сохраняет постоянное значение. Ставится задача синтеза измерителя, вырабатывающего к концу времени наблюдения оценку $\hat{\alpha}$, обладающую минимальной дисперсией ошибки

$$\sigma_{\alpha}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha - \hat{\alpha})^2 \cdot W(\alpha) \cdot W(\hat{\alpha}/\alpha) d\alpha d\hat{\alpha} = \min_{\hat{\alpha}}, \quad (1)$$

где $W(\alpha, \hat{\alpha}) = W(\alpha) \cdot W(\hat{\alpha}/\alpha)$ - совместное распределение измеряемого параметра α и его оценки $\hat{\alpha}$; $W(\alpha)$ - априорное распределение α , которое характеризует предварительные представления о значениях измеряемой величины; $W(\hat{\alpha}/\alpha)$ - условное распределение результата измерения $\hat{\alpha}$ при наличии сигнала с параметром равным α .

В результате математического синтеза [1] измерителя, работающего в соответствии с критерием (1), получено следующее правило формирования оптимальной оценки:

$$\hat{\alpha} = K \int \alpha \cdot W(\alpha) \cdot I[U(t)/\alpha] d\alpha, \quad (2)$$

где K - нормирующая константа [1]; $I[U(t)/\alpha] = W_1[U(t)/\alpha] / W_0[U(t)]$ - отношение правдоподобия, зависящее от измеряемого параметра, так как плотность вероятности $W_1[U(t)/\alpha]$ вычисляется в предположении о наличии сигнала с параметром α . Плотность вероятности $W_0[U(t)]$ вычисляется в предположении, что реализация $U(t)$ содержит только шум.

Согласно (2) оптимальная оценка представляет собой "центр тяжести" функции $K \cdot W(\alpha) \cdot I[U(t)/\alpha]$, который при равномерном распределении $W(\alpha)$ и симметрии функции $I_u(\alpha) = I[U(t)/\alpha]$ относительно своего максимума совпадает с положением этого максимума, т.е. оценка $\hat{\alpha}$ находится из условия $I_u(\hat{\alpha}) = \max_{\alpha}$. Для удобства практической реализации целесообразно максимизировать функцию $\ln I_u(\alpha)$, что не изменяет результата $\hat{\alpha}$ в силу монотонности логарифмической функции.

При гауссовом распределении шума $U_n(t)$ вычислителем является корреляционный приемник или эквивалентная ему схема, содержащая согласованный фильтр и амплитудный детектор [1]. Корреляционный приемник удобно использовать в следящих измерителях, а фильтровой - при получении последовательности однократных оценок. Структурная схема оптимального измерителя временного положения показана на рис. 1.

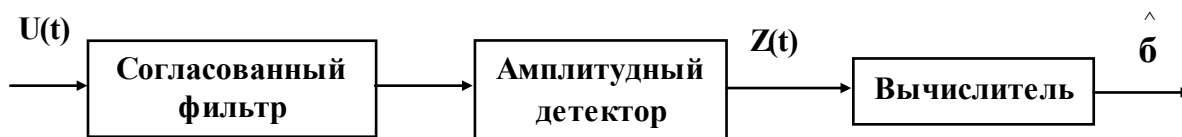


Рис.1.

В теории оптимального измерения доказано, что при оценке временного положения импульсного сигнала среднеквадратическая ошибка

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{q \cdot \Pi_{\text{э}}}, \quad (3)$$

где $q = \sqrt{2E/N_0}$ - отношение сигнал/шум; E - энергия полезного сигнала; N_0 - спектральная плотность мощности белого шума $U_n(t)$;

$$\Pi_{\text{э}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |2\pi f G(f)|^2 df / \int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 df} - \text{эффективная ширина спектра сигнала}$$

$S(t, \alpha)$; $G(f)$ - спектральная плотность комплексной огибающей сигнала (т.е. при её записи учитывается амплитудная и угловая модуляции).

Таким образом, минимальная ошибка измерения согласно (3) определяется отношением сигнал/шум и эффективной шириной спектра сигнала и достигается, если вычислитель (рис. 1) формирует оценку $\hat{\alpha}$, исходя из условия:

$$\ln l_u(\hat{\alpha}) = \max_{\alpha}.$$

На практике часто отдают предпочтение более простым по реализации квазиоптимальным вычислителям $\hat{\alpha}$. К их числу относятся вычислители, вырабатывающие оценку временного положения импульса по пересечению выходным напряжением детектора $Z(t)$ порогового уровня Z_0 (рис.2). При этом оценка может быть получена по пересечению порога передним фронтом (величина $\hat{\alpha}_1$), либо задним фронтом (величина $\hat{\alpha}_2$), либо как среднее арифметическое этих величин $\hat{\alpha}_3 = (\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2)/2$. Квазиоптимальное построение вычислителя приводит к увеличению ошибок измерения. Так при колокольной

форме огибающей радиоимпульса среднеквадратическая ошибка измерения по одному фронту ($\bar{\alpha}_1$ и $\bar{\alpha}_2$) увеличивается по сравнению с (3) в 2,1 раза, а при измерении по двум фронтам ($\bar{\alpha}_3$) – в 1,2 раза. Эти результаты получены в предположении об оптимально выбранном пороге, составляющем 0,607 от амплитуды импульса [3].

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Структурная схема лабораторного макета показана на рис.3. Ее основными элементами являются имитатор и измеритель. Управление работой этих элементов осуществляет синхронизатор.

Имитатор вырабатывает смесь импульсного сигнала с шумом. Импульсный сигнал формируется генератором ГС, который может работать в одном из двух режимов: автоматическом, когда вырабатывается периодическая последовательность импульсов, и однократном, в котором генерируется одиночный импульс по команде "Пуск". Автоматический режим позволяет наблюдать на экране осциллографа процессы, происходящие в имитаторе и измерителе, и является вспомогательным. Однократный режим предназначен для исследования точности измерителей. Генератор шума (ГШ) имитирует воздействие помех на измеритель. В макете предусмотрена возможность изменения отношения сигнал/шум за счет регулировки уровня шума аттенуатором. Имитация сигнала и шума выполнена на видеочастотах. После суммирования сигнала и шума результирующее напряжение поступает на фильтр нижних частот (Ф), имитирующий квазиоптимальную обработку в приемнике. Используемый в макете метод имитации на видеочастотах эквивалентен формированию смеси сигнала с шумом на радиочастоте с последующим амплитудным детектированием для достаточно большого отношения сигнал/шум ($q \geq 3$).

Измеритель реализует оценку временного положения импульса по одному из трех методов: максимума, по переднему фронту, по двум фронтам. Выбор метода осуществляется переключателем *SI*. Съём результатов

измерения производится в цифровом виде. Для этого генератор счетных импульсов (Г) через делитель частоты на 2 подключен к одному из входов логического элемента И. На его второй вход с триггера поступает импульс, длительность которого равна измеряемому временному интервалу. Начало этого импульса формируется синхросигналом, подаваемым на вход S триггера (Устанавливает на выходе триггера “1”). Окончание импульса задает сигнал, подаваемый на вход R (устанавливает триггер в “0”), и зависящий от метода измерения. Таким образом, число счетных импульсов, поступивших на счетчик, пропорционально измеряемому временному интервалу. Результат измерения отображается на трехразрядном десятичном индикаторе.

Период $T_{Cч}$ следования счетных импульсов выбран так, чтобы среднеквадратическая ошибка $\sigma_{\Delta} = T_{Cч} / 2\sqrt{3}$ квантования измеряемого временного интервала была значительно меньше исследуемых шумовых ошибок. Делитель частоты счетных импульсов на 2 включается только в режиме измерения по двум фронтам на время действия импульса превышения с выхода порогового устройства ПУ2. Передний фронт этого импульса соответствует моменту времени $\hat{\alpha}_1$, а задний $-\hat{\alpha}_2 = \hat{\alpha}_1 + \Delta\hat{\alpha}$ (рис. 2). Поскольку при определении временного положения по двум фронтам $\hat{\alpha}_3 = (\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2) / 2 = \hat{\alpha}_1 + \Delta\hat{\alpha} / 2$, то в данном методе на интервале $\hat{\alpha}_1$ генератор работает на частоте $F_{Cч}$, а на интервале $\Delta\hat{\alpha}$ - на частоте $F_{Cч} / 2$, чем и достигается требуемый результат измерения.

При методе максимума (SI в положении 1) напряжение $Z(t)$ дифференцируется, после чего поступает на пороговое устройство ПУ1 с нулевым порогом $U_{пор}$, на выходе которого формируется последовательность импульсов, соответствующая отрицательным значениям производной (рис.2).

Эта последовательность поступает на схему совпадения, на второй вход которой подается **импульс превышения** с выхода ПУ2, в результате чего на ее выходе образуется импульс, передний фронт которого определяется положением максимума напряжения $Z(t)$, т.е. соответствует оптимальной

оценке $\hat{\alpha}$. Этот импульс подается на вход R триггера и переводит его в состояние “0”.

При измерении по одному фронту (SI в положении 2) переход триггера в нулевое состояние производится передним фронтом импульса превышения.

В методе измерения по двум фронтам (SI в положении 3) переход триггера в нулевое состояние происходит в момент окончания импульса превышения. Для этого используется инвертированный импульс превышения (рис. 2), подаваемый на вход R триггера. Одновременно импульс превышения поступает на делитель частоты счетных импульсов, уменьшая ее в 2 раза на интервале $\Delta\hat{\alpha}$. В результате такого построения схемы обеспечивается получение оценки $\hat{\alpha}_3$.

4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить теоретическое введение к лабораторной работе.
2. Продумать методику выполнения экспериментальной части лабораторного задания.
3. Подготовить бланки лабораторного отчета, необходимые таблицы и заготовки для графиков.
4. Определить отношение $T_{сч}/\tau_u$, при котором дисперсия ошибок, обусловленных дискретностью счета, не превышает 10 % от дисперсии шумовой ошибки σ_α^2 . Принять $q^2 = 36$.
5. Для $q^2 = 36$ и $\tau_u = 10$ мкс вычислить среднеквадратическую ошибку измерения дальности на основе трех методов.
6. Нарисовать кривую нормальной плотности вероятности. Указать на рисунке трехсигмовый интервал и определить вероятность выхода шума за границы этого интервала.

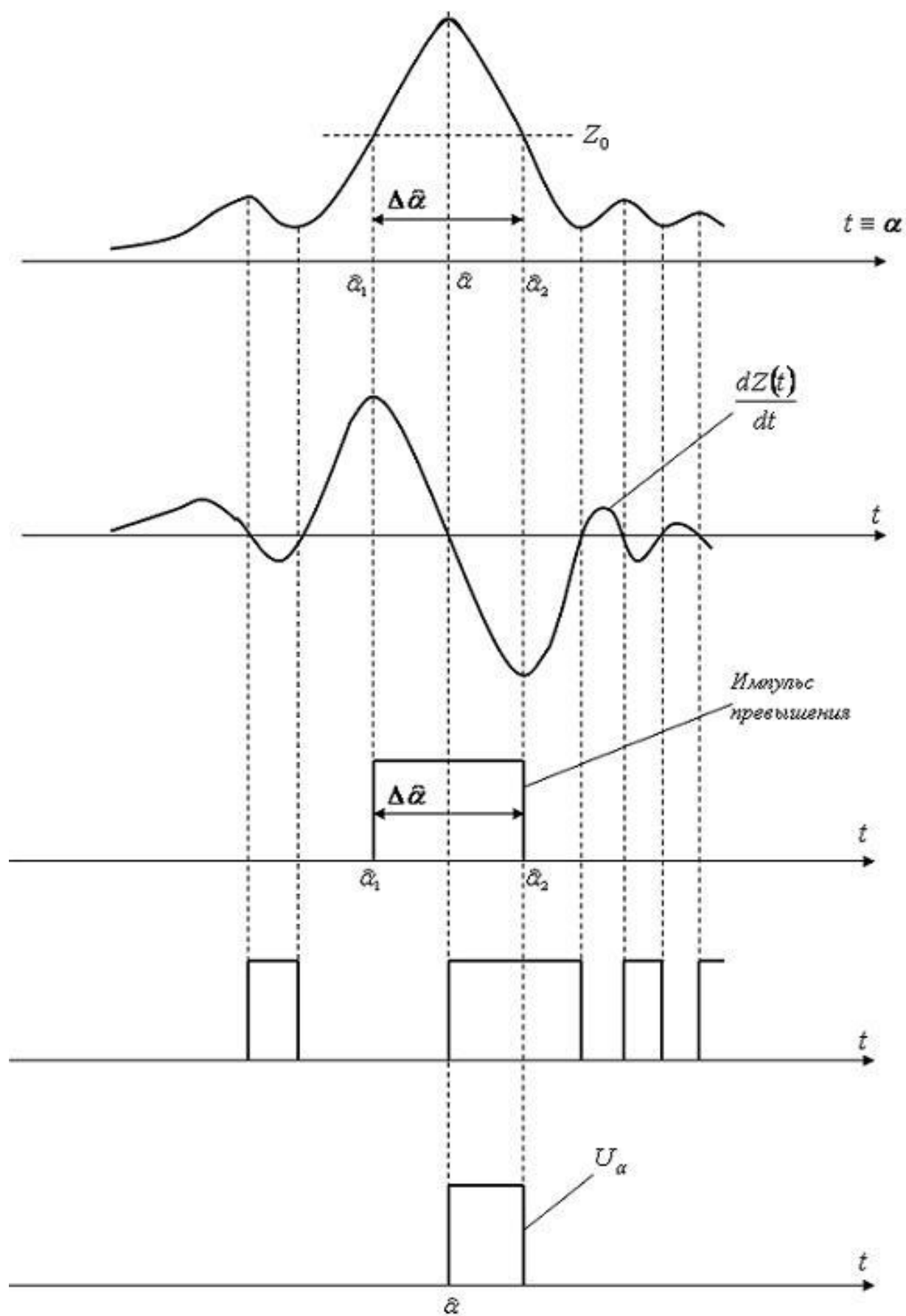


Рис.2

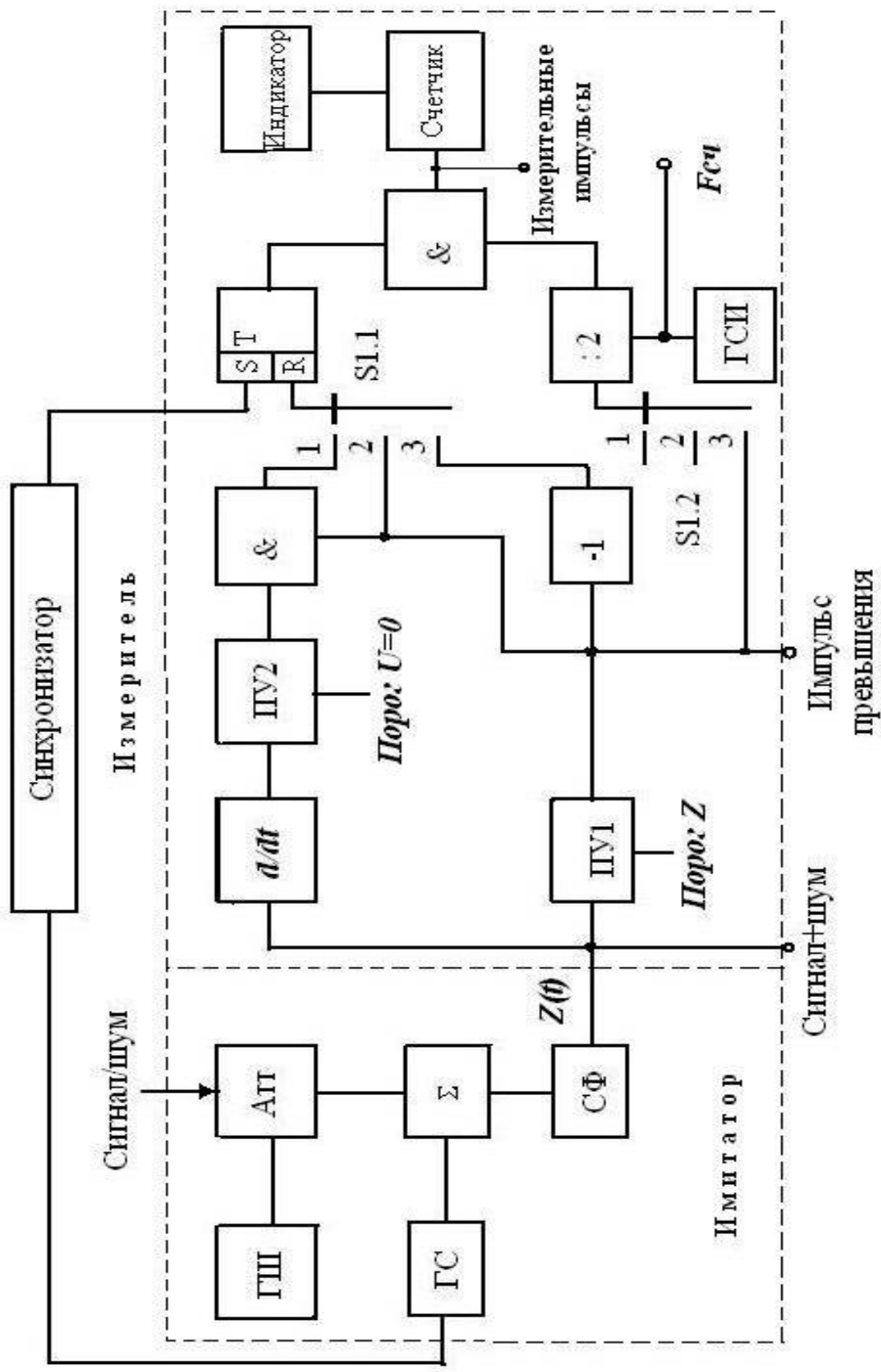


Рис.3

5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с работой макета, зарисовать осциллограммы напряжений на гнездах. Наблюдение проводить в автоматическом режиме при внешней синхронизации осциллографа сигналом "синхр". Напряжение измерительных импульсов ("изм. имп.") наблюдать в трех режимах работы.

2. Измерить длительность импульса на уровне 0,7.

3. Измерить период повторения $T_{сч}$ счетных импульсов.

4. Для заданного преподавателем положения регулятора "сигнал/шум" определить с помощью осциллографа отношение сигнал/шум, для чего воспользоваться правилом "трех сигм".

5. В режиме однократного пуска для трех значений порога $Z'_0 < Z''_0 < Z'''_0$ и установленного в п.3 отношения сигнал/шум произвести измерение временного положения импульсного сигнала с использованием трех методами. Для каждого метода повторить измерение 10 раз, фиксируя получаемые результаты в таблицах.

Примечание. Установив порог Z'_0 , выполнить измерения тремя методами, после чего ввести новое значение порога. Такой ход эксперимента позволит получить сопоставимые результаты.

6. Выполнить статистическую обработку экспериментальных данных:

а) вычислить оценку математического ожидания времени запаздывания импульсного сигнала

$$\bar{r} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} r_i ,$$

где r_i - результат i – го эксперимента;

б) вычислить оценку среднеквадратической ошибки измерения:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (r_i - \bar{r})^2} ;$$

в) определить абсолютную ошибку измерения

$$\sigma_{изм} = \sigma_r \cdot T_{сч} .$$

7. Рассчитать теоретические значения ошибок измерения трех методов для оптимального порога Z_0 и измеренных длительности импульса (п.2) и отношения сигнал/шум (п. 4). Учесть, что эффективная ширина спектра импульса колокольной формы связана с его длительностью τ_u соотношением $P_s = \sqrt{\pi}/\tau_u$.

8. Сравнить экспериментальные и теоретические ошибки измерения. Для метода одного и двух фронтов проанализировать влияние порога Z_0 на величину ошибок; определить, какое из принятых в эксперименте значений порога наиболее близко к оптимальному.

9. По пунктам 6, 7 и 8 задания сделать выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как формулируется задача оптимального измерения параметров сигнала при наличии помех?

2. Каковы алгоритм и структура оптимального измерителя времени запаздывания импульсного сигнала?

3. Что называют отношением правдоподобия и какова его роль при измерении параметров сигнала?

4. Какова минимальная среднеквадратическая ошибка измерения временного положения сигнала и от чего она зависит?

5. Что называют эффективной шириной спектра сигнала?

6. Какие квазиоптимальные методы измерения временного положения сигнала находят практическое применение? Каковы ошибки этих методов?

7. Каковы назначение и принцип действия имитатора сигнала, используемого в макете?

8. Каков принцип действия измерителей, изучаемых в лабораторной работе?

9. Как в лабораторном макете реализовано измерение по методу двух фронтов?

10. На что влияет и как выбирается частота следования счетных импульсов? Чему равна ошибка за счет дискретизации измеряемого интервала?
11. Каков механизм влияния величины порога на ошибки измерения по методам одного и двух фронтов?
12. Как влияют флюктуации амплитуды сигнала на ошибки измерения его временного положения в трех рассматриваемых методах?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» Под ред. Ю.М.Казаринова. – М.: Высшая школа 1990. – 496 с.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. Радио, 1970. 560 с.
3. Митяшев Б.Н. Определение временного положения импульсов при наличии помех. – М.: Сов. Радио, 1962.
4. Скляр Б. Цифровая связь / Б.Скляр. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
5. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. 398 с.