

Лабораторная работа «ЦИФРОВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ»

Целью работы является изучение основ цифровой обработки сигналов на примере цифрового осциллографа – одного из важнейших научных приборов. В данной работе цифровой осциллограф реализован на основе блока «Signal 6501», действующего совместно с персональным компьютером (ПК). Блок «Signal 6501» по существу является аналоговым интерфейсом для ПК и включает в себя:

- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- буферное запоминающее устройство;
- генератор синусоидальных и импульсных сигналов на основе цифрового аналогового преобразователя (ЦАП);
- свип-генератор для получения полосовых радиосигналов;
- программы для ПК для изображения на экране ПК рабочей панели осциллографа со всеми органами управления (с помощью мыши) и наблюдаемых сигналов, и их спектров;
- программы быстрого преобразования Фурье (БПФ) для вычисления на ПК дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Общие сведения по осциллографу

Подаваемые на вход усилителя вертикального отклонения сигналы нормируются и усиливаются до необходимой величины. Усиленные сигналы поступают на вход АЦП (аналого-цифрового преобразователя), где происходит их дискретизация и преобразование в эквивалентный цифровой код. Данные после АЦП накапливаются в буферном ОЗУ. Для этого предназначена опция **Sampling** в меню **Options**. Размер памяти задаётся в отсчётах и может быть по желанию установлен равным 1000, 2500, 5000, 8000. В этом же окне должен быть установлен режим **Normal**. Частота дискретизации f_d уменьшается при увеличении длины развёртки во избежание переполнения буферной памяти. Сам АЦП работает с постоянной тактовой частотой 100 МГц. Уменьшение частоты дискретизации осуществляется путём прореживания в целое число раз отсчётов АЦП. Однако нужно следить за тем, чтобы в спектре входного сигнала не было компонент с частотами выше частоты Найквиста $f_d / 2$. В противном случае возникает *эффект наложения*, в результате которого все частоты в спектре сигнала, превышающие половинную частоту дискретизации, как бы отражаются от этой частоты и переносятся на более низкие частоты, искажая исходный спектр ([1], п. 7.1). Для синусоидальных входных сигналов это приводит к парадоксальным результатам [см. задание 1].

Для работы осциллографа в режиме анализатора спектра необходимо выбрать опцию **FFT** (в переводе БПФ – быстрое преобразование Фурье) в ме-

ню **View**. Осциллограф одновременно покажет наблюдаемый сигнал и модуль его спектра (тип спектра – амплитудный dBV – спектр амплитуд в децибелах относительно 1В). Полезно установить разные цвета изображений сигнала и его спектра. В цифровых системах дискретно и время, и частота. Адекватным этому является *дискретное преобразование Фурье* (ДПФ). При этом БПФ – эффективный алгоритм для вычисления ДПФ. В данном осциллографе дискретность по частоте при изображении спектра принудительно устраняется путём соединения соседних отсчётов ДПФ прямолинейными отрезками. Индикация спектра выполняется в диапазоне $[0, f_d / 2]$. Это связано с симметрией на отрезке $[0, f_d]$ модуля спектра дискретизованных действительных сигналов. Параметры FFT устанавливаются в окне **FFT Settings** (меню **Options**, опция **FFT**). Размер БПФ может по желанию выбран равным 1024, 2048, 4096, 8192. Рекомендуемые окна при выполнении задания – прямоугольное и Ханна. Полезно включить в меню **View** индикацию частоты дискретизации, частоты спектрального пика и других измерений (подобрать разные цвета для удобства наблюдений).

Шум квантования n-разрядного АЦП

Для преобразования аналогового сигнала в цифровую форму в системах цифровой обработки сигналов используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП формирует цифровые отсчёты сигналов, т.е. выполняет дискретизацию сигналов по времени и квантование отсчётов по уровню. Передаточная функция идеального АЦП имеет вид

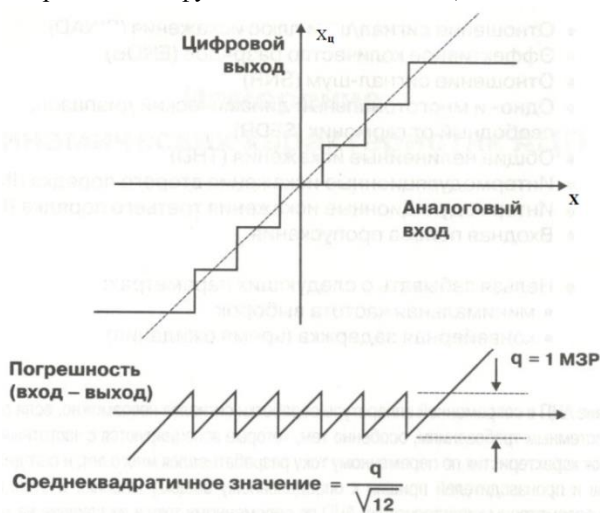


Рис. 1. Шум квантования как функция времени

Погрешность квантования обозначим через $e = x - x_{\text{к}}$. Как видно из графика передаточной функции максимальная погрешность при преобразовании сигнала равна $(\pm 1/2)$ МЗР (*младшего значащего разряда*). Погрешность квантования сигнала с размахом, большим нескольких МЗР, можно аппроксимировать некоррелированной пилообразной ломанной с амплитудой от пика до пика, равной q – весу МЗР.

Пилообразная погрешность

$$e(t) = st, \quad -\frac{q}{2} < st < \frac{q}{2}$$

Из графика видно, что фактическая погрешность квантования с равной вероятностью может появиться в любой точке диапазона $(\pm 1/2) q$. Ни-

же показано, что действующее значение этой пилы равно $\frac{q}{2\sqrt{3}}$.

Пилообразная погрешность создаёт гармоники, лежащие дальше полосы $[0, f_{\text{д}}/2]$ - первой полосы Найквиста. Однако все высшие гармоники должны переноситься (эффект дискретизации) в эту полосу и, затем суммируясь, произвести шум с действующим значением $\frac{q}{2\sqrt{3}}$. Шум кван-

тования не коррелирован с входным сигналом и имеет равномерное распределение в пределах шага квантования

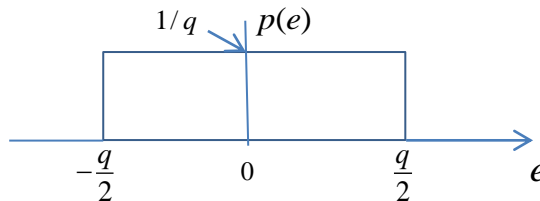


Рис. 2. Плотность вероятности ошибки квантования

Из рис. 2 видно, что ошибка квантования имеет среднее значение

$$M[e] = \int_{-q/2}^{q/2} e p(e) de = 0$$

и дисперсию (мощность шума квантования с нулевым средним)

$$\sigma_e^2 = M[e - M[e]]^2 = M[e^2] = \int_{-q/2}^{q/2} e^2 p(e) de = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} e^2 de = \frac{q^2}{12}.$$

Среднеквадратичное значение шума квантования

$$\sigma_e = \frac{q}{2\sqrt{3}}.$$

Пусть на входе АЦП с диапазоном напряжения входного сигнала

$$V_{in} = \left[-\frac{q \cdot 2^n}{2}, \frac{q \cdot 2^n}{2} \right]$$

действует полномасштабная синусоида

$$x(t) = \frac{q \cdot 2^n}{2} \sin 2\pi f t.$$

Среднеквадратичное значение входного сигнала

$$\sigma_x = \frac{q \cdot 2^n}{2\sqrt{2}}.$$

Отсюда получаем отношение «сигнал/шум» (Signal to Noise Ratio)

$$SNR = 20 \lg \left[\frac{q \cdot 2^n / 2\sqrt{2}}{q / 2\sqrt{3}} \right] = 20 \lg 2^n + 20 \lg \sqrt{2/3} = [6,02n + 1.76] \text{ дБ}.$$

Относительный уровень шума квантования

$$\gamma = 20 \lg \left[\frac{q / 2\sqrt{3}}{q \cdot 2^n / 2\sqrt{2}} \right] = 20 \lg \frac{1}{2^n \sqrt{1,5}} = -20 \lg(2^n \sqrt{1,5}) = -[6,02n + 1.76] \text{ дБ}.$$

Для восьмиразрядного АЦП, используемого в блоке «Signal 6501», относительный уровень шума квантования в дБ будет

$$\gamma = -[6,02n + 1.76] \text{ дБ} \approx -50 \text{ дБ}.$$

Проводить измерения сигналов и их спектров ниже этого уровня бессмысленно.

Вопросы для допуска к выполнению задания (выставляется отдельная оценка)

1. Что представляет собой спектр дискретизованного сигнала? Проиллюстрировать эффект наложения ([1], п.7.1) на частотной оси для синусоидальных сигналов.

2. Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ) ([1], п. 2.3, стр. 10-11). Основные особенности. В чём отличие ДВПФ от непрерывного преобразования Фурье (НПФ)?

3. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) ([1], п. 2.5, стр. 21 – 28). Циклический сдвиг сигнала и его спектра (стр. 23).
4. Соответствие между ДПФ и рядом Фурье([1], п. 3).
5. Соответствие между ДПФ и НПФ([1], п. 4).
6. Связь ДПФ и ДВПФ ([1], п. 5).
7. Временная и частотная оси ДПФ([1], п. 6).
8. Особенности Фурье-анализа методом ДПФ([1], п. 7).
9. Особенности применения окон при спектральном анализе методом ДПФ ([1], п. 8).
10. Понятие о быстром преобразовании Фурье (БПФ) ([1], п. 10).
11. Что показывает цифровой осциллограф в режиме анализатора спектра?

Задание к выполнению работы

Для удобства проведения расчётов рекомендуется установить: ёмкость буферной памяти осциллографа $S_{\text{smpl}} = 1000$, размерность БПФ $N = 2^{10} = 1024$. Все спектрограммы сначала снимаются с окном Ханна, у которого малый уровень боковых лепестков, а затем с прямоугольным. В меню **View** включить индикацию частоты дискретизации, числа отсчётов в буфере, частоты спектрального пика и других измерений. Подобрать разные цвета для сигнала, спектра и маркеров.

1. Спектр дискретизованной синусоиды

1.1. Получить выражение для спектра отрезка синусоиды ([2], стр. 59-60). Как влияет длительность отрезка на спектр синусоиды?.

1.2. Установить частоту синусоиды $f_0 = 100 \text{ кГц}$ (диапазон 1М), амплитуду 4 В. Для двух окон (Ханна и прямоугольного) снять спектрограммы при трёх значениях частоты дискретизации $f_d = 1 \text{ МГц}$, 10 МГц и 100 МГц . Определить длительности отрезков сигнала, записываемых при этом в буферную память. Что выбирает БПФ-процессор в качестве недостающих 24 отсчётов?

Измерить ширину спектральной линии. Чем определяется эта ширина. Сколько отсчётов ДПФ укладывается в этой ширине? Почему они не изображаются?

1.3. Снять спектрограммы, иллюстрирующие эффект наложения при дискретизации синусоидальных сигналов. Для этого установить частоту синусоиды $f_0 = 100 \text{ кГц}$ (диапазон 1М), частоту дискретизации $f_d = 1 \text{ МГц}$. Постепенно увеличивая частоту синусоиды снять спектрограммы при

$f_0 = 600 \text{ кГц}$ и $f_0 = 900 \text{ кГц}$. Объяснить, почему в информационной полосе $[0, f_d / 2]$ появляются компоненты с более низкими частотами.

1.4. По спектрограммам оценить относительный уровень шума квантования в ДБ и сравнить с расчётным.

1.5. Объяснить влияние оконных функций на результат спектрального анализа ([1], п. 8).

2. Субдискретизация полосовых радиосигналов

Рассматриваем полосовой сигнал со спектром вида рис.1. На этом рисунке изображается модуль спектра *действительного* полосового сигнала. Характерна чётная симметрия амплитудного спектра относительно оси ординат. Компонента $X_+(f)$ носит название прямого спектра, а компонента $X_-(f)$ – инверсного.

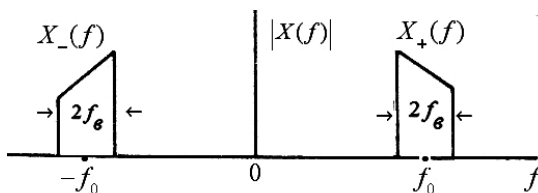


Рис. 1

В соответствии с теоремой отсчетов для такого сигнала необходимая частота дискретизации

$$f_d = 2(f_0 + f_0)$$

может оказаться очень высокой (за пределами быстродействия аналого-цифрового преобразователя). Равномерная дискретизация с шагом $\Delta t = 1/2f_0$ оказывается недостаточной, т. к. составляющие $X_+(f)$ и $X_-(f)$ при периодическом продолжении с периодом $f_d = 2f_0$ будут налагаться друг на друга, в результате частичные спектры будут отличаться от исходного и точное восстановление сигнала по его дискретным отсчетам становится невозможным. Тем не менее для полосовых сигналов существуют методы дискретизации с частотой $4f_0$, которые позволяют сохранить информацию, необходимую для восстановления исходного сигнала.

Субдискретизация полосовых радиосигналов предполагает, что частота дискретизации должна быть в два раза выше не абсолютно наивысшей ча-

стоты $(f_0 + f_\epsilon)$, а величины, характеризующей информационную полосу $2f_\epsilon$. Однако правильная субдискретизация налагает некоторые ограничения. Рассмотрим их подробнее.

Если граничные частоты спектра $f_0 - f_\epsilon$ и $f_0 + f_\epsilon$ кратны его ширине $2f_\epsilon$, т. е. если

$$f_0 - f_\epsilon = m(2f_\epsilon), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

то минимальную частоту дискретизации можно взять равной

$$f_{\text{дmin}} = 4f_\epsilon.$$

Для этого случая периодическое повторение прямого и инверсного спектров, вызванное дискретизацией полосового сигнала, показано на рис. 2. Число m показывает сколько переносов прямого спектра нужно совершить, чтобы точка $f_0 - f_\epsilon$ попала в начало координат. Чем больше это число, тем меньше частота дискретизации.

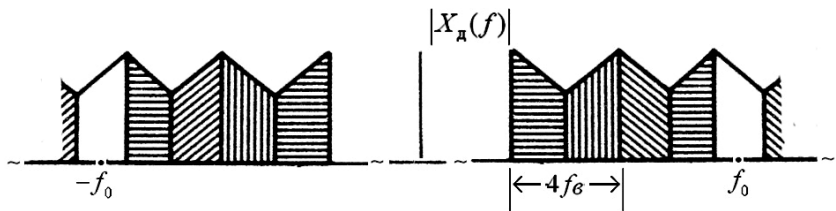


Рис. 2

Такая плотная упаковка отображений спектров $X_+(f)$ и $X_-(f)$ практически может быть использована при условии, что компоненты $X_+(f)$ и $X_-(f)$ строго финитные функции. В этом случае эффект наложения частичных спектров друг на друга будет отсутствовать. Этот метод дискретизации называется ещё *полосовой дискретизацией с недостаточной выборкой для целочисленных полос*. На рис. 3а в качестве примера показано устройство предварительной обработки данных приёмника многоканальной системы связи.

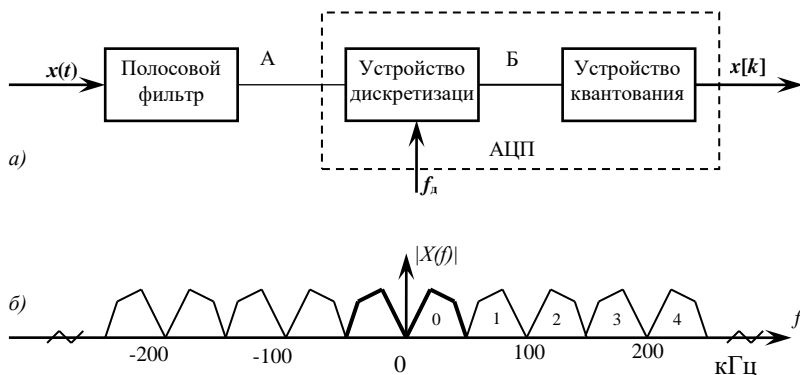


Рис. 3

Спектр принимаемого сигнала показан на рис. 3б с указанием номеров каналов. Для выделения сигнала в нужном канале перед дискретизацией с наименьшей возможной частотой служит полосовой фильтр. Будем считать его идеальным (Рис. 4).

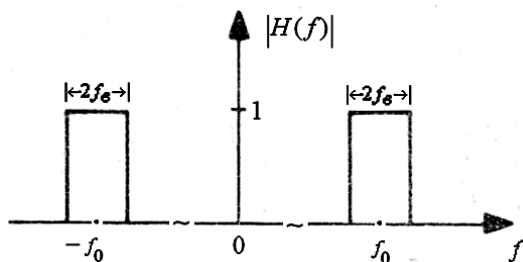


Рис. 4

2.1. Найти минимальную частоту дискретизации $f_{d \min}$ для канала 4 на рис. 3. Изобразить спектр сигнала до дискретизации (точка А). Найти и изобразить спектр дискретного сигнала (точка Б) в полосе Найквиста $[-f_d/2, f_d/2]$.

2.2. С помощью встроенного в цифровой осциллограф генератора сигналов (в режиме синусоидального сигнала со свипированием частоты) реализовать полосовой сигнал для каналов 0, 4, 10. Найти минимальную частоту дискретизации $f_{d \min}$ для этих каналов. С использованием окна Ханна в

БПФ-процессоре снять спектрограмму дискретного сигнала для каждого из этих каналов в полосе Найквиста $[-f_d/2, f_d/2]$.

2.3. Повторить п. 2.1-2.2 для частоты дискретизации $f_d = 2f_{d \min}$. Объяснить результат.

Выбор частоты дискретизации для нецелочисленных полос

Плотная упаковка отображений спектров $X_+(f)$ и $X_-(f)$ на рис. 2 может быть использована, если компоненты $X_+(f)$ и $X_-(f)$ строго финитные функции и выполняется условие (1) для целочисленных полос. В общем случае компоненты $X_+(f)$ и $X_-(f)$ имеют «хвосты» и нецелочисленные полосы.

Для нахождения частоты дискретизации f_d необходимо использовать условие, что m и $m+1$ переносов $X_-(f)$ не дают пересечений с $X_+(f)$. Ясно, что при этом пересечения отсутствуют везде. Пересечения отсутствуют, если выполнены неравенства (рис. 5):

$$\begin{aligned} -f_0 + f_e + mf_d &< f_0 - f_e, \\ -f_0 - f_e + (m+1)f_d &> f_0 + f_e. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) получаем

$$mf_d < 2(f_0 - f_e), \quad (m+1)f_d > 2(f_0 + f_e) \quad (3)$$

или

$$\frac{2(f_0 + f_e)}{m+1} < f_d < \frac{2(f_0 - f_e)}{m}. \quad (4)$$

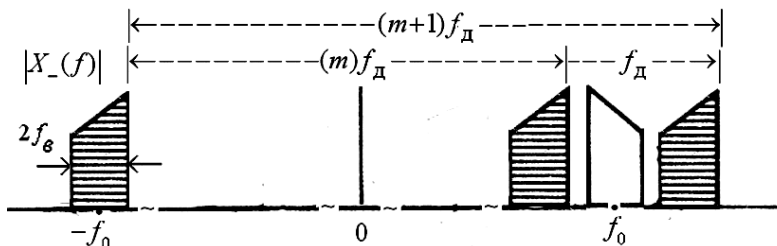


Рис. 5

Субдискретизация возможна, если

$$\frac{(f_0 + f_g)}{m+1} < \frac{f_0 - f_g}{m},$$

т. е.

$$m < \frac{f_0 - f_g}{2f_g}. \quad (5)$$

Число m называется *порядком субдискретизации*.

Поскольку общая протяженность спектра $X_-(f)$ и $X_+(f)$ равна $4f_g$, то при отсутствии перекрытий должно быть выполнено неравенство

$$f_d > 4f_g \quad (6)$$

Пример. Рассмотрим полосовой радиосигнал, у которого $2f_g = 10^4$ Гц и $f_0 = 10^6$ Гц. Тогда $\frac{f_0}{f_g} = 200$. Частота дискретизации, выбираемая по теореме отсчетов, должна быть

$$f_d = 2(f_0 + f_g) = 2f_g(v_0 + 1) = 201 \cdot 10^4 \text{ Гц.}$$

Из (5) находим для порядка дискретизации: $m < 99,5$. Выберем $m = 99$, тогда $22,08 \text{ кГц} < f_d < 22,11 \text{ кГц}$. Частота дискретизации может взята равной $f_d = 22090$ Гц.

Таким образом, за счет применения субдискретизации частота f_d может быть взята значительно ниже значения, требуемого по теореме отсчетов. Ясно также, что для уменьшения f_d , порядок субдискретизации следует брать максимально возможным.

2.4. В используемом осциллографе возможные частоты дискретизации получаются кратным делением частоты 100 МГц, с которой работает АЦП. Установить частоту дискретизации 20 кГц. Для свипированной синусоиды подобрать частоты $f_0 - f_g$ и $f_0 + f_g$ так, чтобы реализовать приведенный выше пример ($m = 99$). Снять изображение сигнала и его спектра для этого полосового сигнала

3. Спектр дискретной последовательности прямоугольных импульсов.

3.1 Получить выражение для спектра *периодической* последовательности прямоугольных импульсов. Изобразить амплитудный спектр такой последовательности ([2], п. 1.9).

3.2 Получить выражение для спектра *конечной* последовательности из N прямоугольных импульсов. Изобразить амплитудный спектр такой последовательности ([2], стр. 60-62).

3.3 Изобразить амплитудный спектр *дискретной* последовательности из N прямоугольных импульсов.

3.4 С помощью встроенного в цифровой осциллограф генератора сигналов реализовать в диапазоне $0,1\text{ мС}$ последовательность прямоугольных импульсов с параметрами: длительность импульса $\tau = 1\text{ }\mu\text{С}$, интервал повторения $T_0 = 10\text{ }\mu\text{С}$, амплитуда 4 В, развёртка $\text{Time/div} = 10\text{ }\mu\text{С/div}$. Снять изображение сигнала и его спектра. Объяснить особенности спектрограммы. Определить длину последовательности, записанной в буфер. Какие параметры спектра связаны с длиной последовательности, длительностью импульса и интервалом его повторения?

3.5 Получить сигнал с логической инверсией. Снять изображение сигнала и его спектра. В чём сходство и отличие наблюдаемого спектра со спектром последовательности из предыдущего пункта?

4. Контрольные вопросы

1. В чём заключается «эффект наложения» при дискретизации сигналов?
2. Почему в данном цифровом осциллографе с переключением длительности развёртки изменяется частота дискретизации? Каким образом происходит это изменение?
3. В чём заключается условие Найквиста правильной дискретизации сигналов? Каковы последствия нарушения этого условия при дискретизации синусоидальных и полосовых сигналов?
4. В чём заключается метод дискретизации с недостаточной выборкой для сигналов с целочисленной полосой?
5. В чём заключается метод субдискретизации полосовых сигналов? Рассмотреть случай нецелочисленной полосы.
6. Что показывает цифровой осциллограф в режиме анализатора спектра? Почему в спектрограммах отсутствует дискретная структура?
7. Как зависят наблюдаемые спектры от количества отсчётов, записываемых в буфер?
8. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и его особенности.
9. Соответствие между ДПФ и непрерывным преобразованием Фурье.
10. Соответствие между ДПФ и рядом Фурье.
11. Особенности спектрального анализа методом ДПФ.
12. Для чего при ДПФ анализе используются окна?

13. Особенности применения окон при спектральном анализе методом ДПФ.
14. Понятие о быстром преобразовании Фурье.
15. Как зависят наблюдаемые спектры от размерности БПФ?
16. Получить выражение для спектра отрезка синусоиды. Как влияет длительность отрезка на спектр синусоиды?
17. Получить выражение для спектра *периодической* последовательности прямоугольных импульсов. Изобразить амплитудный спектр такой последовательности. На этом же чертеже изобразить спектр логически инвертированной последовательности.
18. Получить выражение для спектра *конечной* последовательности из N прямоугольных импульсов. Изобразить амплитудный спектр такой последовательности.
19. Изобразить амплитудный спектр *дискретной* последовательности из N прямоугольных импульсов.

Литература

1. Романюк Ю.А. Дискретное преобразование Фурье при цифровом спектральном анализе. – М.: 2007.
2. Романюк Ю.А. Основы цифровой обработки сигналов. – М.: 2007.

Приложение. Описание и работа осциллографа Signal–6501USB

Цифровой осциллограф предназначен для исследования периодических и однократных электрических сигналов путем их оцифровки, занесения в память компьютера, отображения на экране стандартного монитора и измерения амплитудных и временных параметров. Исследуемые сигналы могут быть подвергнуты дополнительной математической обработке и анализу с помощью программных средств осциллографа и компьютера..

Дополнительно осциллограф предоставляет: режимы генератора сигналов, цифрового вольтметра и частотомера; измерение с помощью курсоров; автоматическое измерение параметров входного сигнала; спектральный анализ сигналов; возможности протоколирования результатов измерений.

Осциллограф позволяет проводить измерения однократных и периодических сигналов в диапазоне напряжений ± 16 В, в диапазоне частот 0...20 МГц.

Генератор позволяет генерировать функциональные, импульсные и ГЧЧ сигналы в диапазоне 0...10 МГц.

Частотомер позволяет измерять частоту периодических сигналов диапазоне 2...30 МГц (со входа внешней синхронизации до 250 МГц).

Режим анализатора спектра.

Экспорт результатов измерений в файл.

Осциллограф является универсальным измерительным прибором широкого применения. Области его возможного использования — автоматизация научных исследований и диагностика в физике, биологии, медицине; настройка электронных схем, телевизионной и радиоаппаратуры; производственные нужды. Осциллограф представляет особую ценность при исследованиях быстропротекающих однократных и нестационарных сигналов.

Принцип работы осциллографа заключается в следующем. Подаваемые на вход усилителя вертикального отклонения сигналы нормируются и усиливаются до необходимой величины. Усиленные сигналы поступают на вход АЦП, где происходит их преобразование в эквивалентный цифровой код. Данные после АЦП накапливаются в буферном ОЗУ.

В режиме внутренней синхронизации сигнал с входа подается на усилитель синхронизации для формирования синхронизирующих импульсов.

Компьютер управляет всеми режимами работы осциллографа, осуществляет считывание информации из буферного ОЗУ, ее обработку и передачу в видеопамять компьютера для наблюдения на экране монитора.

Непосредственное управление работой осциллографа осуществляется в рамках соответствующего программного обеспечения посредством манипулятора «Мышь» и клавиатуры.

Технические характеристики.

1. Осциллограф.

Характеристики.

- 1) Максимальная частота дискретизации в реальном времени – 100 МГц.
- 2) Разрядность АЦП – 8 бит.
- 3) Полоса пропускания усилителя вертикального отклонения – 20 МГц.
- 4) Входное сопротивление – 1 МОм, входная емкость – 20 пФ.
- 5) Максимальное допустимое входное напряжение (сумма постоянной и переменной составляющих) – 150 В.
- 6) Режим открытого/закрытого входа¹.
- 7) Режим регистрации выбросов (глитчей) и подавление эффекта наложения спектров «Peak detect».
- 8) Объем памяти – 8000 отсчетов.
- 9) Коэффициенты отклонения по вертикали – 50 мВ/дел ... 2 В/дел (6 калиброванных значений с шагом 1-2-5).
- 10) Коэффициенты развертки по горизонтали – 50 нС/дел ... 2 С/дел² (24 калиброванных значения с шагом 1-2-5).
- 11) Входное сопротивление входа внешней синхронизации – 1 МОм, входная емкость – 20 пФ.
- 12) Уровень срабатывания по входу внешней синхронизации – 1.3 В (триггер Шмидта с порогами 1.0 В и 1.6 В).
- 13) Максимально допустимое напряжение на входе внешней синхронизации (сумма постоянной и переменной составляющих) – 150 В.
- 14) Маркерные измерения, автоизмерения параметров сигнала, масштабирование сигнала (лупа времени), запись осциллограмм в файл (в графическом или текстовом виде).

Синхронизация.

- 1) Внутренняя и внешняя синхронизация.
- 2) По фронту/срезу входного сигнала.
- 3) Ждущая (запуск развертки при выполнении условия синхрониза-

¹ Для корректных измерений с закрытым входом значение постоянной составляющей должно быть от -20 до 20 В.

² На развертках 100 мС/дел...2 с/дел включается непрерывный циклический режим (без мертвой зоны) с непрерывной визуализацией.

ции), автоматическая (запуск развертки производится автоматически независимо от условия синхронизации)³.

- 4) Настраиваемый уровень - +/- 4 деления.
- 5) Настраиваемая длина предвыборки – 0...9 делений.
- 6) Настраиваемый уровень шумоподавления при синхронизации (гистерезис) – 0...2 дел.
- 7) Настраиваемый номер фронта/среза, вызывающий синхронизацию – 1...255.

2. Генератор.

- 1) Диапазон генерируемых частот – 0 Гц ... 10 МГц
- 2) Работа на основе прямого цифрового синтеза частоты (DDS).
- 3) Частота дискретизации – 100 МГц.
- 4) Разрядность ЦАП – 9 бит.
- 5) Разрядность аккумулятора фазы – 40 бит.
- 6) Форма генерируемого сигнала – синусоидальная, меандр, треугольная пилообразная (в диапазоне 1...10 МГц форма генерируемого сигнала только синусоидальная).
- 7) Шаг установки частоты – 5 значащих разрядов (но не менее 0.1 Гц).
- 8) Режим качания частоты синхронно с разверткой осциллографа (ГКЧ).
- 9) Режим генератора импульсов с произвольной скважностью. Диапазон – 10 нс ... 1 с.
- 10) Диапазон подстройки амплитуды – 1 В ... 4 В (значения от пика до пика)⁴.
- 11) Шаг подстройки амплитуды – 8 мВ.
- 12) Выходное сопротивление – 50 Ом.

3. Электронно-счетный частотомер

- 1) Принцип действия основан на одновременном измерении частоты и периода сигнала на интервале времени 1 сек.
- 2) Диапазон измеряемых частот со входа осциллографа – 2 Гц ... 30 МГц, со входа внешней синхронизации – до 250 МГц.
- 3) Чувствительность со входа осциллографа – не менее 20 мВ, со входа внешней синхронизации – триггер Шмидта с порогами 1.0

³ Возможен однократный или многократный запуск развертки.

⁴ Выходной сигнал генератора имеет постоянную составляющую = 1/2 значения от пика до пика.

В и 1.6 В.

- 4) При работе со входа осциллографа частотомер работает по уровню синхронизации. При это возможна настройка уровня шумоподавления (гистерезис) – $0...2 \text{ дел} \times \text{коэффициент отклонения по вертикали осциллографа}$.
- 5) Разрядность – 7 значащих цифр.

4. Установка и подключение.

Программа не требует установки на компьютер, в ходе работы программа не изменяет содержимое системных файлов и не делает записей в системный реестр. В систему устанавливается только драйвер интерфейса USB.

- 1) Скопируйте директорию PV6501 в удобное Вам место на винчестере.
- 2) Подключите прибор к USB. Когда Windows обнаружит устройство, укажите «Установка из указанного места» на директорию .../PV6501/Driver.
- 3) Запустите файл PV6501.exe. При первом включении проведите калибровку уровня нуля устройства.

При работе создается файл PV6501.ini, в котором хранятся текущие настройки оболочки. Если вы хотите вернуться к значениям по умолчанию, удалите этот файл.

5. Удаление.

Удалите директорию PV6501.

6. Управление оболочкой.

SCOPE

[Run] – многократный запуск развертки.

[Single] – однократный запуск развертки.

Time/D – кнопки установки Время/Дел.

Volts/D – кнопки установки Вольт/Дел.

[≡] – открытый/закрытый вход.

Trigger

[On] – включение синхронизации.

[/] – выбор синхронизации по фронту/срезу входного сигнала.

[>|<] – установка позиции отображения момента синхронизации в начало экрана.

[Ext.] – внешняя синхронизация.

GENERATOR

Генератор включается кнопкой [On]. Генератор может работать в трех режимах: функциональный генератор, генератор импульсов, генератор качающейся частоты.

Функциональный генератор.

[10K] ... [10M] – выбор диапазона частоты.

Кнопки формы генерируемого сигнала – синусоидальная, меандр, треугольная, пилообразная (в диапазоне 10M – форма генерируемого сигнала только синусоидальная).

Верхний регулятор – установка частоты грубо.

Нижний регулятор – установка частоты точно.

Регулятор амплитуды выходного сигнала 1V...4V.

Генератор импульсов – [Pulse]

[1S]...[10uS] – выбор диапазона периода импульсов.

Верхний регулятор – длительность импульса.

Нижний регулятор – период повторения импульсов.

Регулятор амплитуды выходного сигнала 1V...4V.

Генератор качающейся частоты (синхронной с разверткой осциллографа) – [Sweep]

[10K] ... [10M] – выбор диапазона частоты.

Кнопки форму генерируемого сигнала – синусоидальная, меандр, треугольная, пилообразная (в диапазоне 10M – форма генерируемого сигнала только синусоидальная).

Верхний регулятор – начальная частота.

Нижний регулятор – конечная частота.

Регулятор амплитуды выходного сигнала 1V...4V.

7. Меню программы

File

Data format – формат сохраняемого файла данных:

- Text – текстовый формат ASCII;
- Row binary – сохранение данных в двоичном виде, 1 байт соответствует одному отсчету.

Save data – сохранение файла данных.

Save image – сохранение графического файла (BMP).

Для сохранения файла остановите запуск программы.

Options

Trigger – режимы синхронизации:

- Pre trigger – длина предвыборки – 0...9 делений;
- Noise reject – уровень шумоподавления при синхронизации (гистерезис) – 0...2 дел.;
- Trigger N – номер фронта/среза вызывающего синхронизацию – 1...255.

Sampling:

- Normal – частота дискретизации зависит от значения Time/D;
- Peak detect – режим регистрации выбросов (глитчей) и подавление эффекта наложения спектров. При всех значениях частоты горизонтальной развертки частота дискретизации максимальная (100 МГц), в память записываются минимальные и максимальные значения сигнала за период выборки.

Probe – установить в соответствии с типом подключенного пробника (1:1, 1:10).

Freq. meter – выбор источника сигнала для частотомера:

- Internal trig. – внутренняя синхронизация (от сигнала осциллографа);
- Ext. trig. – внешний вход синхронизации (от 2 Гц до 30 МГц);
- Ext. trig. HF – внешний вход синхронизации (от 16 Гц до 250 МГц).

Time calibrate – калибровка внутреннего источника частоты. Для калибровки необходим эталонный источник частоты (генератор) либо частотомер. $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$.

Zero calibrate – калибровка уровня нуля. Процедура калибровки:

- Отключить разъемы BNC осциллографа и генератора.
- Нажать кнопку [Start]. Процедура занимает 3-5 сек.
- По окончании нажмите [OK].

View

Markers – включает маркеры.

Measure – выводит на экран результаты автоматических измерений:

- V_{p-p} – амплитуда (значения от пика до пика);
- V_{dc} – величина постоянной составляющей;
- F_{in} – результат работы частотомера.

Ext. trig – включает отображение сигнала на входе внешнего триггера.

Vectors/Dots – способ отображения сигнала:

- Vectors – отсчеты соединяются с помощью векторов;
- Dots – при развертках 0,2 мкс – 50 нс сигнал отображается в виде точек, соответствующих выборках АЦП.

Colors – установка цветов программы. [Default] – сброс в значения по умолчанию.

Always on top – окно программы отображается поверх других окон.

Изменения в версии 1.31.

Добавлено:

- 1) АМ и ЧМ модуляции в генераторе (Options/Generator Mod).
- 2) Уменьшена нестабильность внешней синхронизации.
- 3) Сохранение и открытие файлов данных (*.pvd) и настроек (*.pvs). При сохранении данных автоматически сохраняется файл настроек. Данные и настройки можно сохранять и открывать независимо.
- 4) Настройка количества набираемых отсчетов (Options/Sampling – 1000. 2500. 5000. 8000).
В некоторых случаях бывает полезно изменить количество набираемых отсчетов. Например, можно повысить скорость обновления экрана, выставив меньшее число отсчетов.
- 5) Дополнительная информационная строка (View/Sampling Info).
Состав строки:
 - F_{smp} – частота дискретизации снятого сигнала;
 - Smp1 – количество набранных отсчетов на одну осциллограмму;
 - Div – количество клеток сетки по горизонтали, на которых отображается осциллограмма;

- FPS – скорость обновления экрана (осциллограмм в секунду).
- 6) Добавлены абсолютные маркерные измерения (1 верт. + 1 гориз. маркер) (View/Markers).
- 7) Time Calibrate – калибровка частотомера с дискретом 0.2 ppm.
- 8) В генераторе импульсов добавлено отображение скважности в процентах.
- 9) Добавлена надпись в верхней строке экрана “p.d.” – если осциллограмма снята с Peak Detect.
- 10) В функции FFT добавлен размер выборки 8192. Реализовано накрытие окном только существующего сигнала, недостающие отсчеты дополняются нулевыми значениями. Добавлен +1 разряд F_p .
- 11) Изменена иконка, изменена картинка на кнопке, убран синий цвет кнопок, добавлены пометки на кнопках непрерывных разверток.
- 12) Оформлены иконками все MessageBox.

Исправлено:

- 1) Устранена задержка при закрытии программы (долгая запись ini-файла). Особенно заметно при запуске с мобильных носителей (usb flash дисков).
- 2) Отображение dF при маркерных измерениях при sweep не переполняется после 1000 ГГц.