

## 5. ЭФФЕКТЫ КВАНТОВАНИЯ И ОКРУГЛЕНИЯ

### 5.1. Цели работы

- Исследование свойств шума квантования.
- Исследование влияния округления коэффициентов фильтра на его параметры.
- Исследование собственного шума цифрового фильтра.

### 5.2. Индивидуальное задание

Параметры квантуемого гармонического сигнала являются индивидуальными для каждой бригады и выдаются преподавателем в виде табл. 5.1. Кроме того, в данной лабораторной работе используется фильтр из индивидуального задания для лабораторной работы № 2. Параметры, которые были использованы при синтезе этого фильтра, также приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры гармонического сигнала			Параметры фильтра			
Амплитуда	Частота	Начальная фаза	Тип	Частота среза	Пульсации в полосе пропускания	Пульсации в полосе задерживания
$A$	$\omega_0$	$\varphi_0$			$A_{\text{pass}}$	$A_{\text{stop}}$
	рад/отсчет	радиан			дБ	дБ

### 5.3. Указания к выполнению работы

#### 1. Подготовка к началу работы

Запустите MATLAB и сделайте текущей папкой папку вашей бригады на сервере дисплейного класса.

#### 2. Исследование свойств шума квантования

Эта часть работы выполняется путем создания MATLAB-программы. Создайте в редакторе MATLAB новый файл MATLAB-программы и сохраните его с осмысленным именем.

Создайте вектор из  $10^5$  отсчетов вещественного гармонического сигнала с заданными амплитудой, частотой и начальной фазой.

$$x(k) = A \cos(\omega_0 k + \varphi_0), \quad k = 0, 1, \dots, 10^5 - 1.$$

Произведите квантование сигнала, округлив его значения с шагом в  $1/256$ . Для этого можно умножить сигнал на 256, округлить результат функцией **round**, а затем разделить его на 256:

```
x_q = round(x*256)/256;
```

Вычислите шум квантования как разность между квантованным (**x\_q**) и исходным (**x**) сигналами.

Исследуйте свойства шума квантования, получив для этого графики следующих его характеристик:

- гистограмма;

**Справка.** Для расчета и отображения гистограммы служит функция **hist**. Формат вызова: **hist(x, nbins)**, где **x** — анализируемый сигнал, **nbins** — число интервалов гистограммы. Для целей данной работы это число следует выбрать равным 100.

- корреляционная функция для диапазона сдвигов  $\pm 100$  отсчетов;

**Справка.** Для расчета авто- и взаимных корреляционных функций служит функция **xcorr**. Формат вызова для оценки АКФ случайного процесса: **[Rx, dk] = xcorr(x, kmax, 'unbiased')**, где **x** — анализируемый сигнал, **kmax** — максимальный сдвиг в отсчетах, **Rx** — вектор значений рассчитанной АКФ, **dk** — вектор задержек (**-kmax:kmax**). Полученная АКФ является ненормированной, уровень ее пика (при нулевом сдвиге) равен *средней мощности* сигнала.

- оценка спектральной плотности мощности (СПМ).

**Справка.** Для расчета оценки и построения графика СПМ шума квантования в данной работе используется функция **pwelch**. Формат вызова для использования в данной лабораторной работе: **pwelch(x, Lb)**, где **x** — анализируемый сигнал, **Lb** — размер блоков, на которые делится сигнал при анализе. Чем больше размер блока, тем лучше частотное разрешение, но тем больше дисперсия оценки СПМ (из-за уменьшения числа блоков). Рекомендуемая длина блока для целей данной лабораторной работы — **256**.

Сохраните в отчете три полученных графика.

Повторите квантование сигнала, расчет шума квантования и получение графиков для следующих ситуаций:

- используется тот же синусоидальный сигнал, но шаг квантования равен  $1/16$ ;
- используется тот же синусоидальный сигнал, но шаг квантования равен 1;
- дискретный белый гауссов шум (БГШ) с нулевым средним значением и числом отсчетов  $10^5$ , шаг квантования —  $1/256$ . Сгенерированный случайный сигнал необходимо отмасштабировать так, чтобы его максимальное (по модулю) значение было равно единице: **x = x/max(abs(x))**;

**Справка.** Сгенерировать дискретный БГШ можно с помощью функции **randn**, которая генерирует некоррелированные псевдослучайные числа с гауссовым распределением, нулевым средним и единичной дисперсией. Формат вызова функции для целей данной

работы: **sn = randn(1, N)**, где **1** — число строк генерируемой матрицы, **N** — число ее столбцов (в результате использования такой комбинации параметров получается вектор-строка длиной **N** отсчетов), **sn** — вектор отсчетов шума.

- речевой сигнал из файла **mtlb.mat** (он входит в набор имеющихся в MATLAB тестовых сигналов), шаг квантования — 1/256. Для его загрузки используйте команду **load mtlb**, после ее выполнения в памяти появятся переменные **mtlb** (вектор отсчетов сигнала) и **Fs** (частота дискретизации; в данной лабораторной работе это значение не используется). Загруженный сигнал необходимо отмасштабировать так, чтобы его максимальное (по модулю) значение было равно единице: **x = mtlb/max(abs(mtlb))**.

### 3. Исследование влияния округления коэффициентов фильтра на его параметры


Эта часть работы выполняется в среде **Filter Design and Analysis Tool**.


Запустите среду командой **fdatool** и выполните синтез рекурсивного (IIR) ФНЧ с заданными параметрами:

- Тип АЧХ (раздел **Response Type**): ФНЧ (**Lowpass**).
- Тип фильтра (раздел **Design Method**): рекурсивный (**IIR**), конкретный тип выбрать из выпадающего списка в соответствии с заданием.
- Порядок фильтра (раздел **Filter Order**): задать вручную, выбрав вариант **Specify order** и введя в поле значение **4**.
- Частота среза (раздел **Frequency Specifications**): задать нормированные частоты (вариант **Normalized (0 to 1)** в списке **Units**) и ввести значение из задания в поле, которое в зависимости от типа фильтра будет называться **wc**, **wpass** или **wstop**.
- Неравномерность АЧХ (раздел **Magnitude Specifications**): задать измерение в децибелах (вариант **dB** в списке **Units**) и ввести параметры из задания (при их наличии) в поля **Apass** и/или **Astop**.

Закончив задание параметров, щелкните на кнопке **Design Filter**.


По умолчанию фильтр представлен в виде каскада секций второго порядка. Преобразуйте его к одной секции, щелкнув правой кнопкой мыши в поле **Current Filter Information** и выбрав в контекстном меню команду **Convert to Single Section**.

**Замечание.** После перехода к одной секции можно убедиться в том, что коэффициенты синтезированного фильтра совпадают с теми, что были приведены в задании на лабораторную работу № 2. Просмотреть коэффициенты можно, щелкнув на кнопке  **Filter Coefficients** в панели инструментов. После этого вернитесь к просмотру АЧХ фильтра.

Щелкните на кнопке  **Set quantization parameters** из набора кнопок, расположенных в нижней части левой стороны окна. Появится панель задания параметров квантования.

В списке **Filter arithmetic** (тип арифметики фильтра) выберите вариант **Fixed-point** (с фиксированной точкой).

По умолчанию будет выбрана вкладка **Coefficients**, на которой задаются параметры квантования коэффициентов фильтра. Чтобы эффекты округления коэффициентов были более явными, в данной лабораторной работе используется 8-битовое квантование. Введите в поле **Coefficient word length** значение 8 и щелкните на кнопке **Apply** (для остальных элементов данной вкладки оставьте значения по умолчанию).

В поле графиков сейчас выводятся две кривых, соответствующих исходному (**Reference**) и квантованному (**Quantized**) фильтрам. Скорее всего, различия двух АЧХ будут весьма сильными, квантованный фильтр может даже оказаться неустойчивым. Перейдите в визуализатор фильтров FVTool, щелкнув на кнопке панели инструментов  **Full View Analysis** и сохраните в отчете графики АЧХ (**Magnitude Response**) и расположения нулей и полюсов на комплексной плоскости (**Pole/Zero Plot**).

Теперь преобразуем исходный (неквантованный) фильтр к каскаду секций второго порядка. Для этого в списке **Filter arithmetic** выберите вариант **Double-precision floating-point** (с плавающей точкой двойной точности), затем щелкните правой кнопкой мыши в поле **Current Filter Information** и выберите в контекстном меню команду **Convert to Second-Order Sections**.

Снова вернитесь к квантованному варианту с фиксированной точкой, выбрав в списке **Filter arithmetic** вариант **Fixed-point**.

Заметные различия между АЧХ исходного и квантованного фильтров должны исчезнуть. Перейдите в FVTool и сохраните в отчете график АЧХ, *увеличив его* таким образом, чтобы на нем крупным планом отображалась полоса пропускания и были видны небольшие различия между двумя АЧХ в этой области.

#### 4. Исследование собственного шума цифрового фильтра

Эта часть работы также выполняется в среде **Filter Design and Analysis Tool**. Для упрощения сопоставления результатов моделирования с результатами теоретических расчетов рассматривается фильтр, представленный в виде *одной секции*, реализованной в *прямой* форме. Поскольку в предыдущем разделе работы было показано, что 8-разрядное квантование коэффициентов не обеспечивает достаточной точности при реализации фильтра в виде одной секции, в данном разделе число двоичных разрядов увеличивается до 16.


Для преобразования исходного (неквантованного) фильтра к одной секции выберите в списке **Filter arithmetic** вариант **Double-precision floating-point**, затем щелкните правой кнопкой мыши в поле **Current Filter Information** и выберите в контекстном меню команду **Convert to Single**

**Section.** Затем выберите в этом же контекстном меню команду **Convert Structure**. В появившемся одноименном окне выберите первый вариант из списка: **Direct-Form I** (прямая форма реализации).


Снова вернитесь к квантованному варианту с фиксированной точкой, выбрав в списке **Filter arithmetic** вариант **Fixed-point**.

На вкладке **Coefficients** задайте 16-битовое представление в поле **Coefficient word length**, для остальных параметров сохраните значения по умолчанию. Щелкните на кнопке **Apply**.

Перейдите на вкладку **Filter Internals** (параметры промежуточных вычислений) и принудительно задайте усечение результатов умножения до 16 старших битов. Для этого в списке **Product mode** (режим вычисления произведений) выберите вариант **Keep MSB** (сохранять старшие биты). После этого станет доступно для ввода поле **Product word length** (число разрядов для результатов умножения). Введите в это поле число 16. Щелкните на кнопке **Apply**.

Щелкните на кнопке  (**Round-off Noise Power Spectrum**) для вывода графика оценки СПМ собственного шума цифрового фильтра. Перейдите в FVTool и сохраните в отчете этот график, увеличив в нем масштаб по вертикали так, чтобы был виден только график, относящийся к квантованному фильтру (он изображен сплошной линией и обозначен в легенде как **Lowpass...: Quantized**).

## 5. Сохранение информации о фильтре

Сохраните сеанс среды FDATool командой меню **File ► Save session** или **Save session as**. Кроме того, необходимо записать значения коэффициентов числителя и знаменателя функции передачи рассматриваемого фильтра — они будут необходимы для теоретического расчета СПМ собственного шума цифрового фильтра. Для этого щелкните на кнопке  (**Filter Coefficients**) и запишите значения коэффициентов квантованного числителя (**Quantized Numerator**) и квантованного знаменателя (**Quantized Denominator**) с не менее чем 4 значащими цифрами.

**Примечание.** Для расчета теоретической СПМ собственного шума в MATLAB можно вместо ручной записи коэффициентов экспортировать их из среды FDATool в виде переменных, содержащих векторы коэффициентов числителя и знаменателя. Для этого воспользуйтесь командой **File ► Export**.

### 5.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- **по разделу 2:** созданный в процессе работы программный код, оформленный в виде законченного документа и сопровождаемый полученными в ходе работы графиками.
- **по разделам 3 и 4:** полученные графики характеристик фильтра.

- теоретический график СПМ собственного шума цифрового фильтра, реализованного в прямой форме. Расчет производится в соответствии с общими принципами, рассмотренными на лекции.
- выводы по результатам работы.