

Задание на лабораторную работу заключается в моделировании систем адаптивной фильтрации и включает в себя следующие пункты:

1. Моделирование нормального белого шума.

Создать модель нормального белого шума $r(n)$ (идентификатор `r_gauss`) длины L с нулевым средним значением и единичной дисперсией, которая будет использована в дальнейших исследованиях.

2. Моделирование структуры АФ с алгоритмом LMS.

Создать модель структуры АФ с алгоритмом LMS в виде объекта `adaptfilt.lms` с именем `h_lms` и вывести его свойства.

Задать входные параметры объекта `adaptfilt.lms`:

- длину КИХ-фильтра N ;
- шаг адаптации μ (идентификатор `mu`), равный половине максимального шага адаптации (идентификатор `mu_max`) в (21.22);

При вычислении шага адаптации μ в качестве входного сигнала АФ $x(n)$ (идентификатор `x`) использовать нормальный белый шум $r(n)$ (см. п. 1):

$$x(n) = r(n);$$

- остальные параметры — по умолчанию.

Пояснить:

- какой из входных параметров объекта `adaptfilt.lms` соответствует шагу адаптации и как он определяется;
- свойства объекта `adaptfilt.lms`.

3. Моделирование структуры АФ с алгоритмом NLMS.

Создать модель структуры АФ с алгоритмом NLMS в виде объекта `adaptfilt.nlms` с именем `h_nlms` и вывести его свойства.

Задать входные параметры объекта `adaptfilt.nlms`:

- длину КИХ-фильтра N ;
- константу $\epsilon = 10^{-6}$ (идентификатор `epsilon`) в (21.25);
- остальные параметры — по умолчанию.

Пояснить:

- какой из входных параметров объекта `adaptfilt.nlms` соответствует константе ϵ и что она определяет;
- свойства объекта `adaptfilt.nlms`.

4. Моделирование структуры АФ с алгоритмом RLS.

Создать модель структуры АФ с алгоритмом RLS в виде объекта `adaptfilt.rls` с именем `h_rls` и вывести его свойства.

Задать входные параметры объекта `adaptfilt_rls`:

- длину КИХ-фильтра N ;
- остальные параметры — по умолчанию.

Пояснить:

- какой из входных параметров объекта `adaptfilt_rls` соответствует коэффициенту забывания λ в (21.53)—(21.54) и с какой целью он вводится;
- свойства объекта `adaptfilt_rls`.

5. Оценка импульсной характеристики неизвестной ЛДС.

Вычисление оценки ИХ неизвестной ЛДС включает в себя следующие шаги:

- моделирование входного сигнала неизвестной ЛДС — входного сигнала АФ $x(n)$ (идентификатор `x`) в виде нормального белого шума $r(n)$ (см. п. 1):

$$x(n) = r(n);$$

- моделирование неизвестной ЛДС — КИХ-фильтра ФНЧ (см. разд. 11.2.5) порядка $R_1 = \text{int}(N/2)$ (идентификатор `R1`) с нормированной частотой разрыва $f_c = 0,5$ (идентификатор `wc`);
- вычисление выходного сигнала неизвестной ЛДС — образцового сигнала АФ $d(n)$ (идентификатор `d`) с помощью функции `filter`;
- вычисление истинной ИХ неизвестной ЛДС $h(n)$ (идентификатор `h`);
- моделирование структур АФ — объектов `adaptfilt` с именами `hlms` (см. п. 2) и `hrls` (см. п. 3);
- вычисление выходного сигнала $y(n)$ и сигнала ошибки $e(n)$ АФ с именем `hlms` (идентификаторы `y_lms` и `e_lms`) и АФ с именем `hrls` (идентификаторы `y_rls` и `e_rls`) с помощью функции `filter`;
- определение параметров АФ с именами `hlms` и `hrls` (идентификаторы `h_lms` и `h_rls`) — оценок ИХ неизвестной ЛДС $\hat{h}(n)$.

Вывести графики:

- сигналов ошибки АФ — объектов с именами `hlms` и `hrls`;
- истинной ИХ и ее оценок на одинаковом интервале времени $n \in [0; (N-1)]$.

Сравнить оценки ИХ с истинной ИХ по критерию среднего абсолютного отклонения их отсчетов на основе нормы $\|\mathbf{x}\|_1$ (идентификаторы `norm1_lms` и `norm1_rls`).

Повторить процедуру для другой неизвестной ЛДС — БИХ-фильтра ФВЧ Баттерворта (см. разд. 13.1.5) порядка $R_1 = \text{int}(N/2)$ (идентификатор `R1`) с нормированной частотой среза $f_0 = 0,3$ (идентификатор `wDn`).

Пояснить:

- на основе какой системы решается задача оценки ИХ неизвестной ЛДС;
- чему в АФ соответствует оценка ИХ неизвестной ЛДС;
- на каком интервале дискретного нормированного времени определяются оценки ИХ неизвестной ЛДС;
- какой из алгоритмов (LMS или RLS) обеспечивает более точную оценку ИХ по заданному критерию;
- какой из неизвестных ЛДС (КИХ или БИХ) соответствует сигнал ошибки АФ с большей дисперсией.

б. Очистка сигнала от шума.

Моделирование процесса очистки сигнала от шума включает в себя следующие шаги:

- моделирование входного сигнала неизвестной ЛДС — входного сигнала АФ $x(n) = x_{\text{ш}}(n)$ (идентификатор `x`);

В качестве шума $x_{\text{ш}}(n)$ (идентификатор `x_noise`) выбрать нормальный белый шум $r(n)$ (см. п. 1):

$$x_{\text{ш}}(n) = r(n);$$

- моделирование неизвестной ЛДС — КИХ-фильтра ФНЧ (см. п. 5), искажающего шум $x_{\text{ш}}(n)$, и вычисление его реакции $\tilde{x}_{\text{ш}}(n)$ (идентификатор `x_noiseNEW`) с помощью функции `filter`;
- моделирование полезного сигнала $s(n)$ (идентификатор `s`) в виде периодической последовательности (суммы двух гармоник) с периодом L :

$$s(n) = A_1 \cos(2\pi f_1 nT) + A_2 \cos(2\pi f_2 nT), \quad (21.75)$$

используя ее тождественное представление в виде:

$$s(n) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1}{f_d} n\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi f_2}{f_d} n\right) = A_1 \cos(\omega_1 n) + A_2 \cos(\omega_2 n); \quad (21.76)$$

- моделирование выходного сигнала неизвестной ЛДС — образцового сигнала АФ $d(n)$ (идентификатор `d`) в виде аддитивной смеси сигнала $s(n)$ с искаженным шумом $\tilde{x}_{\text{ш}}(n)$:

$$d(n) = s(n) + \tilde{x}_{\text{ш}}(n); \quad (21.77)$$

- моделирование структур АФ — объектов `adaptfilt` с именами `hlms` (см. п. 2) и `hrls` (см. п. 3);

- вычисление выходного сигнала $y(n)$ и сигнала ошибки $e(n)$ АФ с именем Hlms (идентификаторы y_lms и e_lms) и АФ с именем Hrls (идентификаторы y_rls и e_rls) с помощью функции filter.

Вывести графики:

- полезного сигнала $s(n)$ и его аддитивной смеси с шумом $d(n)$;
- сигналов ошибки АФ (оценок полезного сигнала) — объектов с именами Hlms и Hrls;
- следующих амплитудных спектров на периоде $[0; f_d]$:
 - полезного сигнала (идентификатор MOD_s);
 - его аддитивной смеси с шумом (идентификатор MOD_d);
 - оценок полезного сигналов в установившемся режиме с использованием алгоритмов LMS и RLS (идентификаторы MOD_lms и MOD_rls).

Начальный момент установившегося режима $n_{\text{нач}}$ (идентификатор n_start) задать равным $0,05L$.

Вычислить значения RMSE (см. разд. 21.1.4.3) для оценок полезного сигнала с использованием алгоритмов LMS и RLS (идентификаторы RMSE_lms и RMSE_rls) в установившемся режиме на интервале дискретного нормированного времени $n \in [n_{\text{нач}}; (L-1)]$.

Пояснить:

- на основе какой системы решается задача очистки сигнала от шума;
- какому сигналу АФ соответствует оценка полезного сигнала;
- как по графику сигнала ошибки АФ оценить длительность переходного процесса в АФ;
- какой из алгоритмов (LMS или RLS) обеспечивает лучшую очистку сигнала от шума (по результатам визуального сравнения амплитудных спектров и значениям RMSE).

7. Выравнивание частотной характеристики неизвестной ЛДС.

Моделирование выравнивания частотной характеристики неизвестной ЛДС включает в себя следующие шаги:

- моделирование входного сигнала неизвестной ЛДС — образцового сигнала АФ $d(n)$ (идентификатор d);

В качестве входного сигнала неизвестной ЛДС $d(n)$ выбрать аддитивную смесь сигнала $s(n)$ (21.76) (идентификатор s) с нормальным белым шумом $r(n)$ (см. п. 1) с СКО, равным $3 \max\{A_1, A_2\}$:

$$d(n) = s(n) + 3 \max\{A_1, A_2\} r(n). \quad (21.78)$$

Для сигнала $s(n)$ оставить неизменной частоту f_1 , а частоту f_2 задать равной $f_2 = 3f_1$.

- моделирование задержанного образцового сигнала $d(n-D)$ (идентификатор `d_delay`) посредством обнуления $D = \text{int}(N/2)$ (идентификатор `D`) начальных значений сигнала $d(n)$;
- моделирование неизвестной ЛДС — КИХ-фильтра ФНЧ (см. разд. 11.1.5) порядка $R_2 = \text{int}(N/7)$ (идентификатор `R2`) с нормированной частотой разрыва $f_c = 0,5$ (идентификатор `wc`);
- моделирование структуры АФ — объекта `adaptfilt` с именем `hrls` (см. п. 3);
- вычисление выходного сигнала неизвестной ЛДС — входного сигнала АФ $x(n)$ (идентификатор `x`) с помощью функции `filter`;
- вычисление выходного сигнала АФ $y(n) = \hat{x}(n-D)$ и сигнала ошибки $e(n)$ (идентификаторы `y_rls` и `e_rls`) с помощью функции `filter`;
- определение параметров АФ — ИХ $h(n)$ его КИХ-фильтра (идентификатор `h_rls`);
- вычисление ИХ $v(n) = g(n) * h(n)$ (идентификатор `h_conv`) каскадного соединения неизвестной ЛДС и АФ $h(n)$.

Вывести графики:

- входного сигнала неизвестной ЛДС и его амплитудного спектра (идентификатор `MODS`) на периоде $[0; f_d]$;
- выходного сигнала неизвестной ЛДС и его амплитудного спектра (идентификатор `MODX`) на периоде $[0; f_d]$;
- импульсных характеристик неизвестной ЛДС, КИХ-фильтра в составе АФ и каскадного соединения неизвестной ЛДС и АФ;
- АЧХ неизвестной ЛДС (идентификатор `MAG_US`), КИХ-фильтра в составе АФ (идентификатор `MAG_AF`) и их каскадного соединения (идентификатор `MAG`) в основной полосе частот $[0; f_d/2]$;
- ФЧХ неизвестной ЛДС (идентификатор `PH_US`), КИХ-фильтра в составе АФ (идентификатор `PH_AF`) и их каскадного соединения (идентификатор `PH`) в основной полосе частот $[0; f_d/2]$;
- выходного сигнала АФ и его амплитудного спектра на периоде $[0; f_d]$.

Пояснить:

- чему равны частоты дискретных гармоник входного сигнала неизвестной ЛДС;
 - на основе какой системы решается задача выравнивания частотной характеристики неизвестной ЛДС;
 - вид амплитудного спектра входного сигнала неизвестной ЛДС;
 - какому сигналу АФ соответствует входной сигнал неизвестной ЛДС;
 - чему равна задержка образцового сигнала АФ $d(n - D)$;
 - вид амплитудного спектра выходного сигнала неизвестной ЛДС и причину его изменения относительно амплитудного спектра входного сигнала;
 - вид импульсных характеристик неизвестной ЛДС, КИХ-фильтра в составе АФ и их каскадного соединения;
 - какому виду ИХ соответствует выровненная АЧХ;
 - вид ФЧХ неизвестной ЛДС, КИХ-фильтра в составе АФ и их каскадного соединения;
 - результат сравнения амплитудных спектров выходного сигнала неизвестной ЛДС и выходного сигнала АФ.
8. Вычисление оценок параметров АР-модели и оценок параметров линейного предсказания.

Вычисление оценок параметров АР-модели и оценок параметров линейного предсказания включает в себя следующие шаги:

- моделирование входного сигнала АР-модели — нормального белого шума $e_{AR}(n)$ (идентификатор e_{AR}).

В качестве входного сигнала АР-модели выбрать нормальный белый шум $r(n)$ (см. п. 1):

$$e_{AR}(n) = r(n); \quad (21.79)$$

- задание вектора \mathbf{a} известных параметров АР-модели (известных параметров линейного предсказания).

В *MATLAB* параметры АР-модели — элементы вектора \mathbf{a} — вводятся с добавлением элемента $a_0 = 1$ (см. табл. 21.1);

- вычисление выходного (моделируемого) сигнала АР-модели $y_{AR}(n)$ (идентификатор y_{AR});
- вычисление оценок параметров АР-модели $\hat{\mathbf{a}}$ методом Юла—Уолкера (идентификатор a_{AR}) в предположении, что анализируемый сигнал $x(n)$ (идентификатор x) совпадает с моделируемым сигналом $y_{AR}(n)$:

$$x(n) = y_{AR}(n); \quad (21.80)$$

- моделирование структуры АФ — объекта `adaptfilt` с именем `h_rls` (см. п. 3);
- моделирование образцового сигнала АФ $d(n)$ (идентификатор `d`), совпадающего с анализируемым сигналом $x(n)$:

$$d(n) = x(n); \quad (21.81)$$

- моделирование входного сигнала АФ — задержанного сигнала $x(n-1)$ (идентификатор `x_delay`) посредством обнуления первого отсчета сигнала $x(n)$;
- вычисление выходного сигнала АФ $y(n-1)$ и сигнала ошибки $e(n)$ (идентификаторы `y_rls` и `e_rls`) с помощью функции `filter`;
- определение параметров АФ с противоположным знаком — вектора оценок параметров линейного предсказания (идентификатор `h_rls`).

Вывести графики на интервале дискретного нормированного времени $n \in [0; (N-1)]$:

- вектора заданных параметров АР-модели (без учета $a_0 = 1$);
- вектора оценок параметров АР-модели;
- вектора оценок параметров линейного предсказания.

Для наглядности вывести графики векторов в одинаковом диапазоне по оси ординат $[-\text{MAX} \text{ MAX}]$ с помощью функции `ylim`, где `MAX` равно максимальному по модулю элементу среди всех векторов.

Вычислить значения МАЕ оценок параметров АР-модели и линейного предсказания (идентификаторы `MAE_AR` и `MAE_LP`) на одинаковой длине N КИХ-фильтра в составе АФ (см. разд. 21.1.4.5).

Пояснить:

- связь параметров АФ с оценками параметров линейного предсказания;
- связь параметров АР-модели с параметрами линейного предсказания;
- связь между порядками АР-модели и КИХ-фильтра в составе АФ;
- какая из оценок параметров (АР-модели или линейного предсказания) определена с большей точностью по критерию МАЕ.

21.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должна быть представлена табл. 21.1 исходных данных для своего номера бригады $N_{бр}$.

Для запуска лабораторной работы необходимо обратиться к script-файлу `lr_21` по его имени:

>> 1r_21

Для *принудительного снятия* script-файла с выполнения следует нажать комбинацию клавиш <Ctrl>+<Break>.

При выполнении script-файла текущие окна с графиками *не закрывать*.