

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  $\mu$  (идентификатор `mu`), равный половине максимального шага адаптации (идентификатор `mu_max`) в (21.22);

При вычислении шага адаптации  $\mu$  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  $\epsilon$  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  $\lambda$  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  $L$ :

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

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*.