Лабораторна робота № 6

Моделювання систем зв’язку в середовищі MATLAB

Мета роботи - Отримання навичок моделювання систем зв’язку в середовищі **MATLAB**. Дослідження завадостійкості алгоритмів демодуляції для багатоантенних систем **MIMO**.

Вказівки до виконання роботи

1. Побудова моделі багатоантенних систем зв’язку в середовищі MATLAB

MIMO (**Multiple Input Multiple Output**) – метод просторового кодування сигналу, що дає змогу збільшити смугу пропускання каналу, за якого передача даних здійснюється за допомогою N антен і їх приймання M антенами. Передавальні та приймальні антени рознесені настільки, щоб досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами.

Застосування технологій **MIMO** вирішує два завдання:

– збільшення якості зв’язку за рахунок просторово-часового/частотного кодування та (або) формування променів (**beamforming**);

– підвищення швидкості передачі при застосуванні просторового мультиплексування.

У різних реалізаціях **MIMO** мається на увазі одночасна передача в одному фізичному каналі кількох незалежних повідомлень. З метою реалізації дії **MIMO** застосовують багатоантенні системи: на передавальній стороні є N_{t} передавальних антен, а на приймальній стороні N_{r} приймальних. Дана структура наведена на рис. 1.

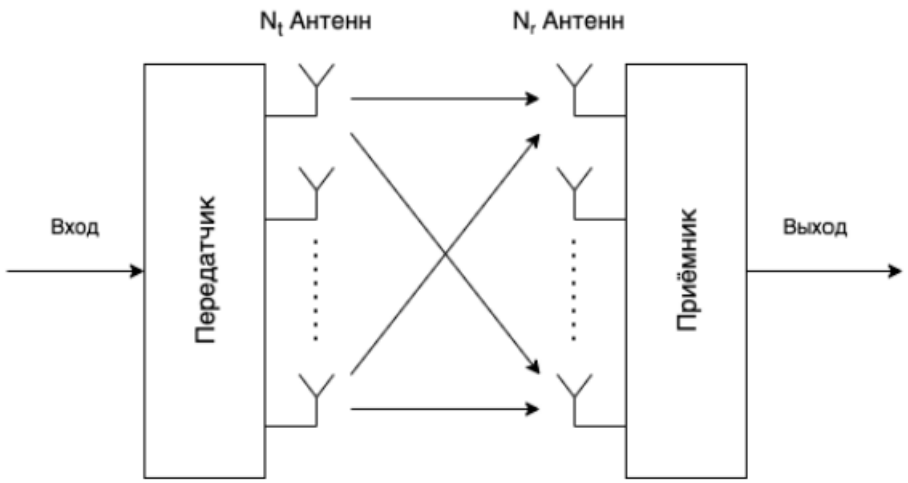


Рис. 1– Структура **MIMO**

Для побудови моделі запустіть програму **MATLAB**, у відкритому вікні на панелі інструментів натисніть на піктограму **New Script** (рис. 2).

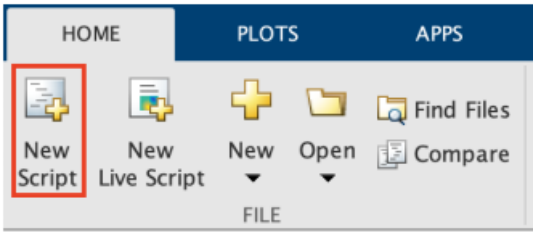


Рис. 2 Піктограма **New Script** на панелі інструментів

З’явиться порожнє вікно нового скрипту (рис. 3).



Рис.3 Порожнє вікно нового скрипту

Спочатку напишемо команди, які очищатимуть увесь текст із вікна командного рядка під час запуску нової програми.

```
clc; clear;
```

Спочатку визначимо параметри для моделювання:

– кількість передавальних і приймальних антен,

– кількість каналів,

– вихідну потужність базової станції,

– діапазон відношення енергії сигналу до енергетичної спектральної густини шуму (E_b / N_0),

– кількість бітів на один символ (розмір сузір'я).

```
Nt = 4; % передаючі антени
Nr = 4; % прймальні антени
Kch = 4;
Es = 1; % потужність БС
EbNoVec = 5:5:30; % діапазон Eb/N0
modOrd = 2; % кількфсть біт на один символ
hStr = RandStream('mt19937ar');  % For random objects
```

Переходимо до налаштування симуляції:

1. Створюємо системні об'єкти QAM-модулятора та QAM-демодулятора.

```
% Створення QAM-модулятору
hMod    = comm.RectangularQAMModulator(...
              'ModulationOrder',  2^modOrd, ...
              'PhaseOffset', 0,'BitInput',true, 'NormalizationMethod',
'Average power');

% Створення QAM-демодулятору
hDemod = comm.RectangularQAMDemodulator(...
              'ModulationOrder',  2^modOrd, ...
              'PhaseOffset', 0,'BitOutput',true, 'NormalizationMethod',
'Average power');
```

2. Створюємо системні об'єкти розрахунку частоти помилок для приймача

```
hBERCalc    = comm.ErrorRate('ComputationDelay',modOrd);
```

3. Також попередньо виділимо змінну для зберігання результатів **BER**, щоб збільшити швидкість виконання симуляції

```
BER_final = zeros(length(EbNoVec), 3);
```

Налаштуємо параметри рисунка для візуалізації результатів **BER**

```
h = gcf; % повертає дескриптор поточного рисунка
grid on; % відображає основні лінії сітки для поточних осей
hold on; % зберігає графіки в поточних осях
ax = gca; ax.YScale = 'log'; % встановлюємо логарифмічний масштаб для осі Y
xlim([EbNoVec(1)-0.01 EbNoVec(end)]); ylim([1e-3 1]); % встановлює обмеження по
осі X і Y
xlabel('Eb/No (dB)'); ylabel('Uncoded BER'); % мітки для осей X і Y
h.NumberTitle = 'off'; % прибираємо номер фігури
h.Renderer = 'zbuffer';
h.Name = 'Precoding'; % встановлюємо ім’я фігури
% встановлюємо назву графіка
title(['MU-MIMO ', num2str(Ntx), 'x', num2str(Ntx/Kch), 'x', num2str(Kch), 'QAM-
' , num2str(modOrd^2)]);
```

2. Моделі системи MIMO.

Передбачається, що сигнали на передавальній стороні випромінюються одночасно і в одній смузі частот через M передавальних антен.

Дискретна в часі модель каналу включає:

– $x_{\mu}[k]$: символ, переданий μ-ю антеною, індекс часу k;

– $h_{\upsilon,\mu}$: характеристика каналу – комплексний коефіцієнт передачі тракту поширення сигналу між μ-ю передавальною та υ-ю приймальною антенами. Амплітуда $|\, h_{\upsilon,\mu} \,|$ має розподіл Релея, коефіцієнт передачі каналу являє собою комплексну змінну з гауссівським законом розподілу ймовірності;

– $n_{\upsilon}[k]$: вибірка адитивного білого гауссівського шуму (АБГШ) на приймальній ν-й антені в момент часу k;

– $y_{\upsilon}[k]$: прийнятий символ υ-ю антеною в момент часу k.

Векторно-матрична модель визначає:

–- переданий вектор: $x[k] = [x_1[k], \dots, x_M[k]]^T$;

– вектор шуму: $n[k] = [n_1[k], \dots, n_N[k]]^T$;

– прийнятий вектор: $y[k] = [y_1[k], \dots, y_N[k]]^T$.

Матриця каналу записується у вигляді:

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & \cdots & h_{N,M} \end{bmatrix}. \qquad (6.1)$$

Рівняння спостереження визначається як:

$$y[k] = Hx[k] + n[k]. \quad (6.2)$$

Модель каналу зображено на рис. 4.

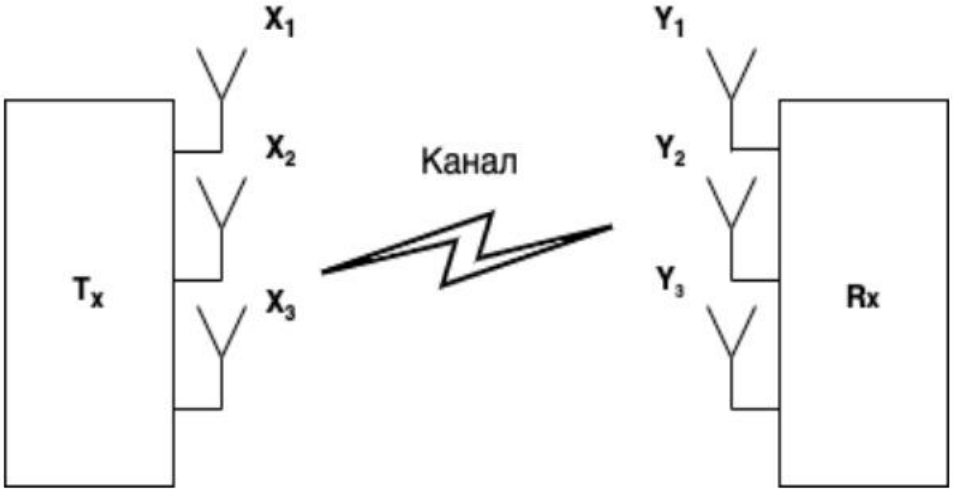


Рис. 4 Просторове мультиплексування сигналу

3. Алгоритм МСКО.

Алгоритм демодуляції МСКО (МСКО, або Minimum MeanSquare Error – MMSE) використовує критерій мінімуму середньоквадратичної помилки оцінювання вектора s інформаційних символів. Оцінка ŝМСКО знаходиться лінійним перетворенням прийнятого вектора y:

$$\hat{s}^{\text{МСКО}} = W_{\text{МСКО}} y, \quad (6.3)$$

де матриця $W_{\text{МСКО}}$ лінійного перетворення знаходиться таким чином:

$$W_{\text{МСКО}} = arg_{W \in C^{M \times N}} min E\{\|W_y - s\|^2\}, \quad (6.4)$$

де C^{MxN} – множина комплексних матриць розмірності N×M. Із виразу (6.4) випливає, що задача пошуку оптимальної матриці $W_{\text{МСКО}}$ зводиться до задачі мінімізації дійсної скалярної функції $U(W) = E\{\|W_y - s\|^2\}$ комплексного матричного аргументу W. Функція $U(W)$ називається середньоквадратичною функцією помилки і може бути записана у такій формі:

$$U(W) = E\left\{tr\left[(W_y - s)(W_y - s)'\right]\right\}, \quad (6.5)$$

де tr(·) – слід матриці (дорівнює сумі її діагональних елементів).

Функція *U(W)* є квадратичною і має рівно один мінімум. Точку цього мінімуму можна знайти традиційним методом, прирівнявши до нуля похідну функції *U(W)* за матрицею *W*:

$$\frac{\partial U(W)}{\partial W} = 2E\{(W_y - s)y'\} = 2WE\{yy'\} - 2E\{sy'\} = 0. \quad (6.6)$$

Введемо позначення для кореляційної матриці R_{yy} прийнятого вектора y та взаємної кореляційної матриці R_{sy} переданого вектора s інформаційних символів і прийнятого вектора y:

$$R_{yy} = E\{yy'\};\ R_{sy} = E\{sy'\}. \quad (6.7)$$

Із (6.6) і (6.7) отримаємо вираз для шуканої матриці WMCKO лінійного перетворення:

$$W_{МСКО} = R_{sy}\, R_{yy}^{-1}. \quad (6.8)$$

Вираз (6.8) описує відоме вінерівське розв’язання задачі оптимального оцінювання за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки.

Вираз для кореляційної матриці Ryy прийнятого вектора y нескладно отримати, підставивши в перше рівняння (6.7):

$$R_{yy} = E\{yy'\} = E\{(H_s + \eta)(H_s + \eta)'\} = \\ = HE\{ss'\}H' + E\{\eta\eta'\} + E\{\eta s'\}H' \\ + HE\{s\eta'\}. \quad (6.9)$$

Враховуючи, що вектор η шуму спостереження, очевидно, не корелює з переданим вектором інформаційних символів, вираз (6.9) можна переписати у наступній формі:

$$R_{yy} = HE\{ss'\}H' + E\{\eta\eta'\} = HH' + 2\sigma_\eta^2 1. \quad (6.10)$$

В (6.10) враховано, що потужність сигналу, який випромінюється кожною передавальною антеною, передбачається рівною одиниці (тобто $E\{ss'\} = 1$). Вираз для взаємної кореляційної матриці R_{sy} переданого вектора *s*

інформаційних символів і прийнятого вектора y можна аналогічно отримати підстановкою у друге рівняння (6.7):

$$R_{sy} = E\{s(H_s + \eta)'\} = E\{ss'\}H' + E\{s\eta'\} = H'. \qquad (6.11)$$

Після підстановки (6.10) і (6.11) у (6.8) отримаємо такий вираз для матриці $W_{МСКО}$:

$$W_{МСКО} = H'\left(HH' + 2\sigma_\eta^2 1\right)^{-1}. \qquad (6.12)$$

Вираз (6.12) еквівалентний наступному виразу:

$$W_{МСКО} = \left(HH' + 2\sigma_\eta^2 1\right)^{-1} H'. \qquad (6.13)$$

Точність демодуляції характеризується кореляційною матрицею помилок

$$R_{МСКО} = E\{(\hat{s}^{МСКО} - s)(\hat{s}^{МСКО} - s)'\}. \qquad (6.14)$$

Для знаходження кореляційної матриці помилок $R_{МСКО}$, використовуючи (6.1) і (6.13), знайдемо різницю

$$\begin{aligned} \hat{s}^{МСКО} - s &= \left(HH' + 2\sigma_\eta^2 1\right)^{-1} H'(H_s + \eta) - s = \\ &= -\left(HH' + 2\sigma_\eta^2 1\right)^{-1} 2\sigma_\eta^2 s \\ &+ \left(HH' + 2\sigma_\eta^2 1\right)^{-1} H'\eta. \end{aligned} \qquad (6.15)$$

Підставляючи (6.15) у (6.14), після нескладних перетворень отримаємо остаточний вираз для кореляційної матриці помилок оцінювання (демодуляції) за методом МСКО:

$$R_{МСКО} = 2\sigma_\eta^2\left(HH' + 2\sigma_\eta^2 1\right)^{-1}. \qquad (6.16)$$

Моделюємо алгоритм з MMSE-приймачем для кожного значення E_b / N_0.

```
% Проходимо циклом по всьому діапазону Eb/No
for idx = 1:length(EbNoVec)
    reset(hBERCalc);
    snrIndB = EbNoVec(idx) + 10*log10(modOrd);
    snrLinear = 10^(0.1*snrIndB);
    disp_noise = 1/snrLinear;
    while (BER_?nal(idx, 3) < 10000) || (BER_?nal(idx, 2) < 1)
        msg = randi([0 1], [Nrx*modOrd, 1]);
        s = step(hMod, msg);
        H = (randn(Nrx, Ntx) +  1i*randn(Nrx, Ntx))/sqrt(2);
        y = H*s;
        rxSig = awgn(y, snrIndB, 0, hStr);
        G = H'*inv(H*H'+((Ntx)*disp_noise)*eye(Ntx));
        UE = G*rxSig;
        demod = step(hDemod, UE);
        BER_?nal(idx, :) = step(hBERCalc, msg, demod);
```

```
        display(BER_?nal);
    end
    semilogy(EbNoVec(1:idx), BER_?nal(  1:idx, 1), 'm^', 'linewidth', 1);
    drawnow;
end
```

У циклі вище на рисунку будуємо точки графіка, зараз необхідно їх з'єднати лінією, і це можна зробити таким чином:

```
semilogy(EbNoVec, BER_final(  :, 1), 'm-^', 'linewidth', 1);
hold off;
```

Запустіть скрипт симуляції та спостерігайте за змінами точок **BER** на графіку. Після завершення виконання скрипту збережіть модель, надавши їй відповідне ім'я, та перенесіть зображення графіка у створений документ Word, використовуючи команду меню **File** => **Save As** у вікні графіка.

4. Дослідження завадостійкості алгоритмів демодуляції для багатоантенних систем MIMO.

Модифікуйте скрипт моделі, змініть тип модуляції з QAM-4 на QAM-16 і QAM-64, при цьому діапазон відношення енергії сигналу до енергетичної спектральної густини шуму (E_b/N_0) залиште таким самим.

Запустіть скрипти симуляції з відповідними типами модуляцій та спостерігайте за змінами точок BER на графіку. Після завершення виконання перенесіть зображення графіків у створений документ Word, використовуючи команду меню **File** => **Save As** у вікні графіка.

Зміст звіту

1. Скрипти трьох моделей із короткими коментарями використовуваних функцій.

2. Побудовані графіки завадостійкості кожної моделі.

3. Висновки.