

Моделювання узгодженого фільтра за допомогою програми Simulink

Мета роботи: навчитись моделювати перетворення сигналів із дискретним часом у лінійних системах засобами Simulink та дослідити перетворення форми сигналу при узгодженій фільтрації

1. Теоретичні відомості.

Узгоджений фільтр (matched filter) - це лінійний пристрій, що забезпечує на виході максимально можливе відношення сигнал/шум для даного переданого сигналу. Припустимо, що на вхід лінійного фільтра прийому, інваріантного щодо часу τ , за яким виконується дискретизація, подається відомий сигнал $s(\tau)$ і шум $n(\tau)$:

$$u(\tau) = s(\tau) + n(\tau)$$

У деякий момент часу t сигнал на виході пристрою дискретизації складатиметься з компонентів сигналу і компонентів шуму

$$v(t) = v_s(t) + v_n(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau) u(\tau) d\tau \equiv h(t) * u(t)$$

де $h(\tau)$ – імпульсна реакція фільтра з постійними параметрами. Інтегральна операція в правій частині останньої формули має назву згортки. Задача максимізації відношення інтенсивності сигналу у вибраний момент часу до інтенсивності шуму η зводиться, таким чином, до максимізації функціоналу

$$\eta = \frac{I_s(t)}{\langle I_n \rangle} = \frac{|v_s(t)|^2}{\langle |v_n(t)|^2 \rangle} = \max$$

Враховуючи що

$$\langle |v_n(t)|^2 \rangle = \text{const} = \int_{-\infty}^{\infty} |H(\nu)|^2 N(\nu) d\nu$$

де $H(\nu)$ – передавальна функція фільтра, а $N(\nu)$ – спектральна густина шуму, маємо, таким чином

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)s(\tau)d\tau \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |H(\nu)|^2 N(\nu)d\nu} = \max$$

Взагалі, цей максимум залежить не тільки від імпульсної характеристики фільтра $h(\tau)$, але і від спектральної густини шумів $N(\nu)$. Проте, у випадку, коли шум “максимально випадковий”, тобто $N(\nu) = N_0 = \text{const}$ (такий шум прийнято називати білим), максимум останнього відношення визначається лише передавальною характеристикою (імпульсним відгуком) фільтру. Дійсно, з нерівності

$$\left| \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau)f_2(\tau)d\tau \right|^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} |f_1(\tau)|^2 d\tau \int_{-\infty}^{\infty} |f_2(\tau)|^2 d\tau$$

маємо

$$\eta \leq \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |s(\tau)|^2 d\tau \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)|^2 d\tau}{N_0 \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\nu)|^2 d\nu} = W_s \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)|^2 d\tau}{N_0 \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\nu)|^2 d\nu}$$

де W_s – повна енергія вхідного сигналу. Нарешті, рівність в останньому виразі досягається при

$$h(t-\tau) = s^*(\tau)$$

Враховуючи також, що

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)|^2 d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\nu)|^2 d\nu$$

остаточно отримуємо максимальне значення відношення сигнала/шум для узгодженого фільтра:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{W_s}{N_0}$$

Фізичний зміст узгодженої фільтрації очевидний з наведених співвідношень:

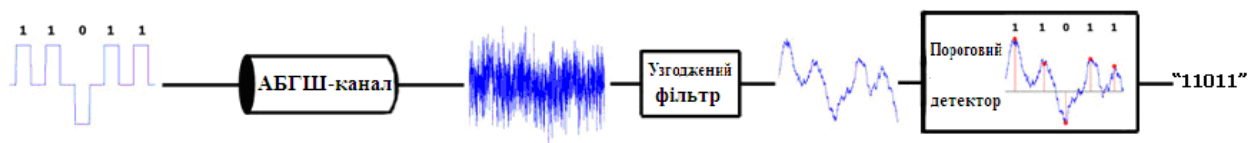
- По перше, підсилення вхідного сигналу в кожний момент часу пропорційне його амплітуді в цей момент (малі значення відліків сигналу не підсилюються, але одночасно не підсилюються і відповідні компоненти шуму).
- Крім того, має місце фазове узгодження компонентів сигналу на виході, оскільки, як ми бачили, $h(t-\tau) = s^*(\tau)$

- Нарешті, неважко пересвідчитися, що затримка вхідного сигналу на певний проміжок часу відповідає аналогічному зсуву максимуму на виході узгодженого фільтра. Отже, можна вважати, що вибір фіксованого моменту часу t є просто початком відліку прийнятого сигналу.

Таким чином ми бачимо, що відношення сигналу до шуму на виході узгодженого фільтра визначається двома фізичними величинами – повною енергією корисного сигналу і спектральною інтенсивністю завади, тобто потужністю, що припадає на смугу в 1 Гц. Отже, виявлення повністю відомого сигналу на тлі «абсолютно випадкового процесу» – білого шуму можна поліпшити лише шляхом збільшення енергії корисного сигналу, в той час як при інших, не білих шумах, той же результат можна отримати, змінюючи спектр сигналу, тобто його форму.

Узгоджений фільтр у цифровому зв'язку

У попередньому викладенні не відображена можливість використання узгодженої фільтрації для цифрових технологій і дискретних сигналів. Приклад такої реалізації приведений на рисунку, де показаний узгоджений фільтр, який використовує цифрову апаратуру.



У випадку цифрової системи зв'язку, яка відправляє двійкові повідомлення від передавача до приймача через шумовий канал, узгоджений фільтр може використовуватися для виявлення переданих імпульсів у шумовому сигналі, що приймається. При дискретизації (взяття вибірки) неперервний час τ замінюється дискретними відліками kT , що дає можливість подати вхідний сигнал $s(\tau)$ у дискретній формі:

$$u(kT) = s_i(kT) + n(kT)$$

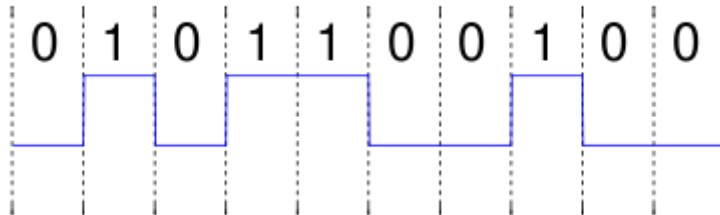
Тут індекс i визначає певний символ з M -ічного набору (в нашому випадку – двійкового), а kT – дискретний час. Припустимо, що ми хочемо відправити послідовність "0101100100", закодовану в неполярному вигляді через певний канал. Математично, інформація в **NRZ-** коді (**Non Return to Zero** – дворівневий код, в якому логічному нулю відповідає низький рівень сигналу, а логічній одиниці – високий) може бути описана як послідовність одиничних імпульсів (зсунутої у часі прямокутної функції **rect**), з ваговим коефіцієнтом $+1$, якщо біт є "1", і -1 , якщо біт "0". Формально коефіцієнт масштабування для біта становить

$$a_k = \begin{cases} +1, & \text{якщо } k - \text{біт} \in 1 \\ -1, & \text{якщо } k - \text{біт} \in 0 \end{cases}$$

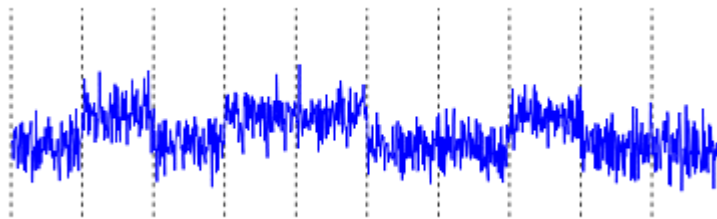
Тоді повідомлення може бути представлене у вигляді суми зміщених одиничних імпульсів

$$s(\tau) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k \text{rect}\left(\frac{\tau - kT}{T}\right)$$

де T – тривалість одного біта. Таким чином, сигнал, який має бути відправлений передавачем має вигляд



Нехай ми моделюємо наш шумовий канал як канал з адитивним білим гаусівським шумом (AWGN-channel). На кінцевому приймачі при співвідношенні сигнал / шум 3 дБ це може виглядати так:

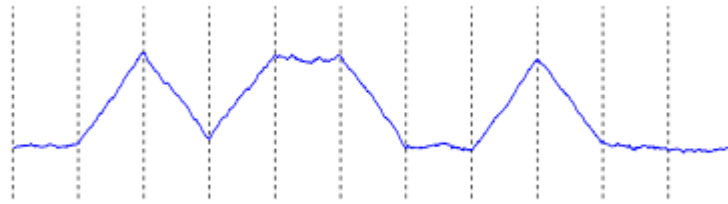


На перший погляд видається досить складним виявлення оригінальної послідовності через присутність шуму відносно високої потужності (тобто низького співвідношення сигналу до шуму).). Якщо приймач узгоджений з сигналом навіть в правильні моменти часу, отримане бінарне повідомлення може розходитися з оригіналом, що передається. Для збільшення співвідношення сигнал/шум, пропустимо сигнал крізь узгоджений фільтр. Як ми бачили, імпульсний відгук ідеального узгодженого фільтру у присутності білого адитивного гаусівського шуму повинен бути інвертованим у часі і комплексно-спряженим до очікуваного сигналу. В нашому випадку через симетрію сигналу інвертований і комплексно спряжений сигнал співпадає з самим сигналом, так що імпульсний відгук відповідного узгодженого фільтра:

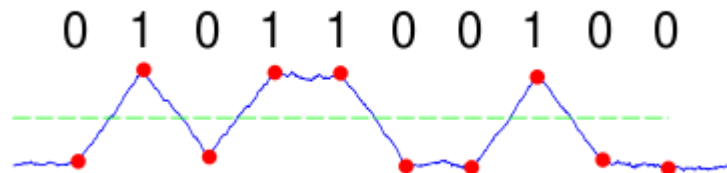
$$h(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T}\right)$$

На виході узгодженого фільтра результуючий сигнал матиме вигляд згортки:

$$v(t) = h(t) * u(t)$$



Тепер бінарна послідовність може бути коректно розпізнана приймачем при коректному виборі моментів відліку часу і правильному виборі порогу розпізнавання:



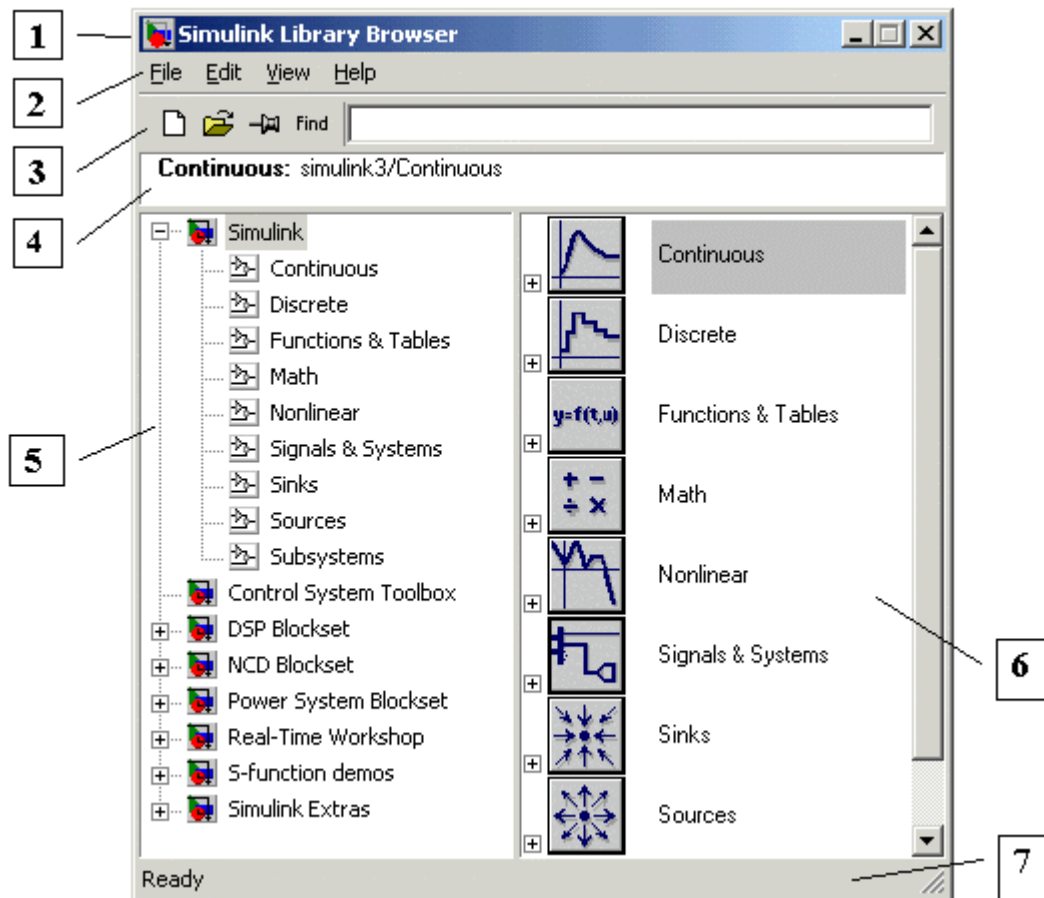
2. Знайомство з програмою Simulink

Програма **Simulink** є додатком до пакету **MATLAB**. При моделюванні з використанням **Simulink** реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки. При цьому, на відміну від класичних способів моделювання, користувачеві не потрібно досконально вивчати мову програмування і чисельні методи математики, а досить загальних знань, потрібних при роботі на комп'ютері і, природно, знань тієї предметної області в якій він працює.

Після відкриття основного вікна програми **MATLAB** потрібно запустити програму **Simulink**. Це можна зробити одним з двох способів:

- Натиснути кнопку (Simulink) на панелі інструментів командного вікна **MATLAB**.
- У командному рядку головного вікна **MATLAB** надрукувати Simulink і натиснути клавішу Enter на клавіатурі.

Використання першого і другого способів призводить до відкриття вікна огляду розділів бібліотеки Simulink (див. рисунок).

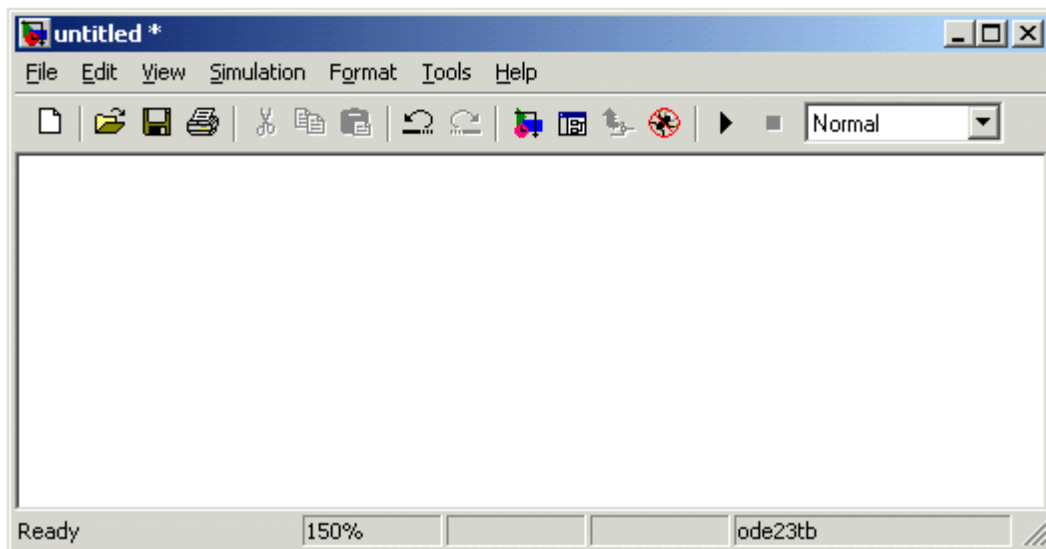


Вікно оглядача бібліотеки блоків містить наступні елементи:

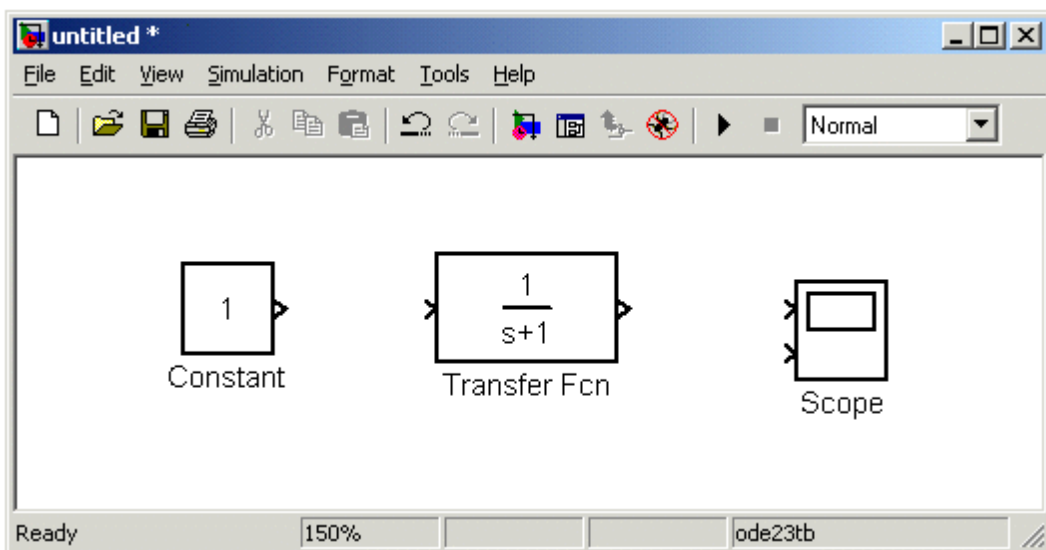
1. Назва вікна - Simulink Library Browser.
2. Меню з командами File, Edit, View, Help.
3. Панель інструментів, з ярликами найбільш часто використовуваних команд.
4. Вікно коментарів для виведення інформації про обраний блок.
5. Список розділів бібліотеки, реалізований у вигляді дерева.
6. Вікно змісту розділу бібліотеки (список вкладених розділів бібліотеки або блоків)
7. Рядок стану, який містить підказку про дію, що виконується.

Для створення моделі в середовищі SIMULINK необхідно послідовно виконати ряд дій

- Створити новий файл моделі за допомогою команди File / New / Model, або використовуючи кнопку на панелі інструментів (тут і далі, за допомогою символу "/", вказані пункти меню програми, які необхідно послідовно вибрати для виконання зазначеної дії). Новостворене вікно моделі показано на рисунку.



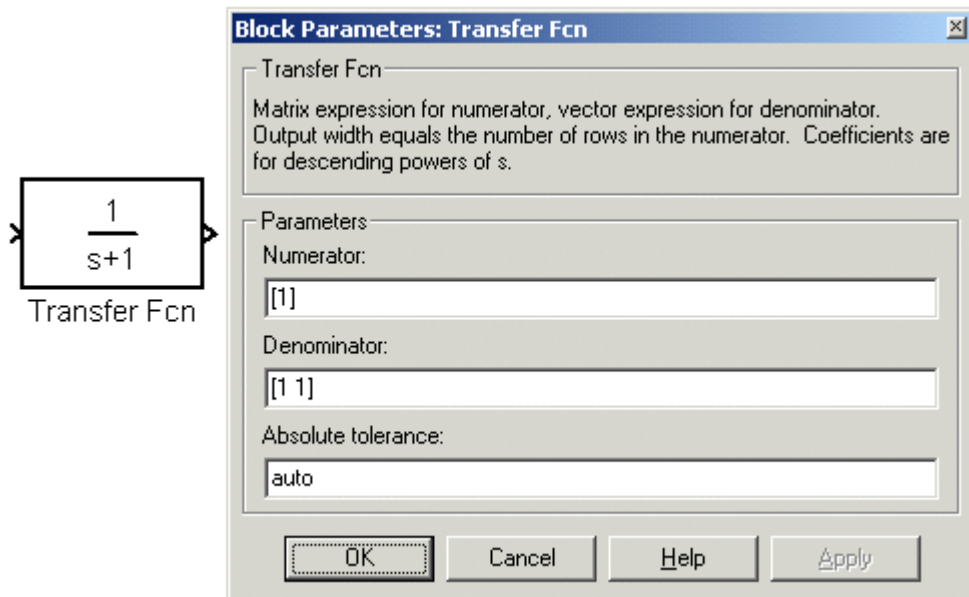
- Розташувати блоки у вікні моделі. Для цього необхідно відкрити відповідний розділ бібліотеки (Наприклад, Sources - Джерела). Далі, вказавши курсором на необхідний блок і натиснувши на ліву клавішу "миші" - "перетягнути" блок у створене вікно. Клавішу миші потрібно тримати натиснутою. На зображенні показано вікно моделі, що містить блоки.



Для видалення блоку необхідно вибрати блок (вказати курсором на його зображення і натиснути ліву клавішу "миші"), а потім натиснути клавішу Delete на клавіатурі.

Для зміни розмірів блоку потрібно вибрати блок, встановити курсор в один з кутів блоку і, натиснувши ліву клавішу "миші", змінити розмір блоку (курсор при цьому перетвориться в двосторонню стрілку).

Далі, якщо це потрібно, слід змінити параметри блоку, встановлені програмою "за замовчуванням". Для цього необхідно двічі клацнути лівою клавiшею "миші", вказавши курсором на зображення блоку. Відкриється вікно редагування параметрів даного блоку. При завданні числових параметрів слід мати на увазі, що в якості десяткового роздільника повинна використовуватися точка, а не кома. Після внесення змін потрібно закрити вікно кнопкою ОК. На рисунку як приклад показаний блок, що моделює передавальну функцію і вікно редагування параметрів даного блоку.



Після установки на схемі всіх блоків з необхідних бібліотек потрібно виконати з'єднання елементів схеми. Для з'єднання блоків необхідно вказати курсором на "вихід" блоку, а потім, натиснути і, не відпускаючи ліву клавiшу "миші", провести лінію до входу іншого блоку. Після чого відпустити кнопку. У разі правильного з'єднання зображення стрілки на вході блоку змінює колір. Для створення точки розгалуження в лінії сполучення потрібно підвести курсор до передбачуваного вузла і, натиснувши праву клавiшу "миші", протягнути лінію. Для видалення лінії потрібно вибрати лінію (так само, як це виконується для блоку), а потім натиснути клавiшу Delete на клавіатурі.


Час розрахунку задається зазначенням початкового (Start time) і кінцевого (Stop time) значень часу розрахунку. Початковий час, як правило, задається рівним нулю. Величина кінцевого часу задається користувачем виходячи з умов розв'язуваної задачі. У даній роботі зручно використовувати умовну одиницю часу, а кінцевий час роботи встановлювати в межах від 10 до 20 одиниць.

При виборі параметрів розрахунку необхідно вказати спосіб моделювання (Type) і метод розрахунку нового стану системи. Для параметра Type доступні два варіанти - з фіксованим (Fixed-step) або зі змінним (Variable-step) кроком. Як правило, Variable-step використовується для моделювання неперервних систем, а Fixed-step - для дискретних. Оскільки в даній роботі моделюється дискретний канал зв'язку, слід вибрати спосіб моделювання Fixed-step.

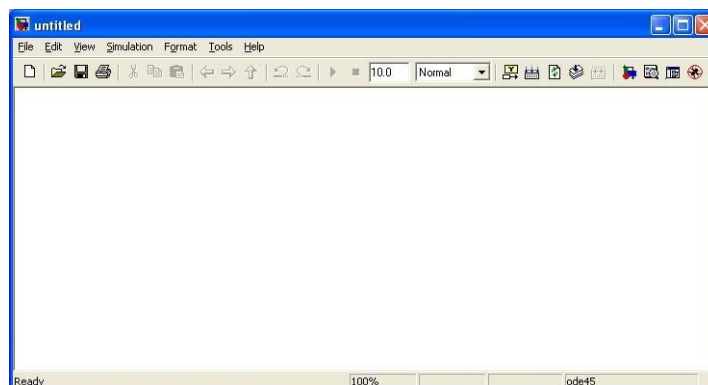
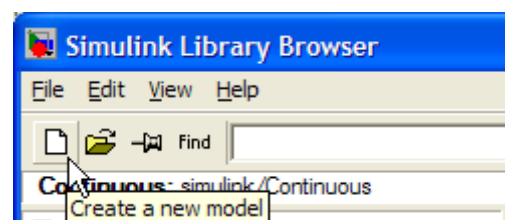
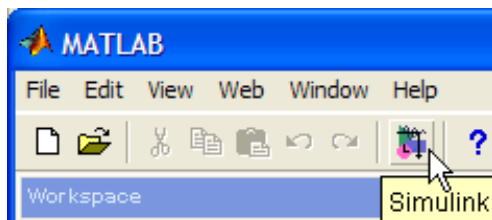
Список методів розрахунку нового стану системи містить кілька варіантів. Перший варіант (discrete) використовується для розрахунку дискретних систем. Решта методи використовуються для розрахунку неперервних систем.

3. Хід виконання роботи

Запуск Simulink та створення порожньої моделі.

Завантажте програму MATLAB. 

Натисніть у панелі інструментів кнопку Simulink або введіть у командному рядку MATLAB команду simulink. Відкриється вікно бібліотеки **Simulink** (**Simulink Library Browser**). Клацніть у вікні **Simulink Library Browser** по кнопці **Create a new model**. З'явиться порожнє вікно нової моделі (див. малюнки).



Побудова моделі узгодженого фільтра.

Будь-яка система зв'язку починається з джерела інформації, а закінчується її отримувачем. У якості джерела зручно використовувати псевдовипадковий некорельований бітовий потік (блок **Communications Blockset** → **Comm Sources** → **Random Data Sources** → **Bernoulli Binary Generator**). Метою моделювання системи зв'язку в більшості випадків є оцінка її завадостійкості, тобто вимір імовірності помилки.

У зв'язку із цим одержувачем буде блок, призначений для такого вимірювання – **Communications Blockset** → **Comm** → **Sinks** → **Error Rate Calculation**. Розтошуйте зазначені блоки в складі моделі, переміщуючи їх за допомогою миші.

Для візуальної демонстрації результатів виміру ймовірності бітової помилки (**Bit Error Rate** – **BER**) необхідно зробити так, щоб вони виводились у вигляді вихідного сигналу блоку **Error Rate Calculation**. Для цього необхідно настроїти параметри блоку. Відкрийте вікно параметрів і виберіть для параметра **Output Data** варіант **Port**.

Зауваження

Вікно параметрів блоку відкривається подвійним клацанням на зображенні блоку.

Після закриття вікна параметрів у блоку з'явиться вихідний сигнал. Помістіть в модель блок числового дисплею (**Simulink** → **Sinks** → **Display**) і приєднаєте його до виходу блоку **Error Rate Calculation**. При роботі моделі блок **Display** буде виводити стовпчик із трьох чисел, тому заздалегідь збільшіть його вертикальний розмір за допомогою миші.

Зауваження

Зв'язки між блоками проводяться мишкою; крім того, якщо потрібно підключити єдиний вихід одного блоку до входу іншого, можна виділити блок-джерело і потім клацнути по блоку-приймачу, утримуючи клавішу **Ctrl**.

Для передачі цифрового сигналу по каналу зв'язку його необхідно перетворити у сигнал аналоговий, тобто виконати операцію цифрової модуляції. У даній роботі розглядається найпростіший спосіб низькочастотної двійкової передачі, коли «0» і «1» передаються у вигляді імпульсів однакової форми, що різняться лише полярністю. Для

формування імпульсів, що задають полярність, бітові значення 0/1 необхідно перетворити у біполярні значення +1/-1 (що чому буде відповідати, не має значення). Реалізуйте таке перетворення, використовуючи блоки бібліотек **Simulink** → **Math Operations** і **Simulink** → **Sources**.

При отриманні такого сигналу рішення приймається за знаком отриманого значення. Можна реалізувати ухвалення рішення, порівнюючи прийнятий сигнал з нульовим порогом за допомогою блоку **Simulink** → **Logic and Bit Operations** → **Relational Operator**. Вихідний сигнал цього блоку має логічний тип, який потрібно перетворити до числового за допомогою блоку **Simulink** → **Signal Attributes** → **Data Type Conversion**.

Зауваження

Тип порівняння в блоці **Relational Operator** необхідно вибрати виходячи із заданої раніше відповідності між бітами 0/1 та рівнями сигналу +1/-1.

Настав час перший раз з'єднати все в єдине ціле: бітовий генератор – перетворювач у біполярний сигнал — порівняння з порогом. Блок **Error Rate Calculation** має 2 входи: Tx (передавач) і Rx (приймач). На перший з них потрібно подати вихідну інформацію (з виходу генератора бітового потоку), на другий — прийняті дані.

Тепер можна запустити модель, клацнувши в її панелі інструментів по кнопці **Start Simulation**. Дисплей повинен показати нульові значення у двох перших рядках (імовірність помилки й число помилок) і 11 у третьому рядку (число оброблених біт).



Розглянута система не містить аналогових блоків, тому доцільно використовувати режим моделювання з дискретним часом. Крім того, потрібно, щоб модель працювала без зупинки. Для виконання вказаних налаштувань відкрийте вікно параметрів моделювання командою меню **Simulation Configuration Parameters** або клавішами **Ctrl+E** і задайте для параметра **Stop time** значення **inf**, а для параметрів **Type** і **Solver** у розділі **Solver options** виберіть **Fixed-step** і **discrete (no continuous states)** відповідно.

Зауваження

Час закінчення роботи моделі також можна задавати безпосередньо в її панелі інструментів — у полі *Simulation stop time*.

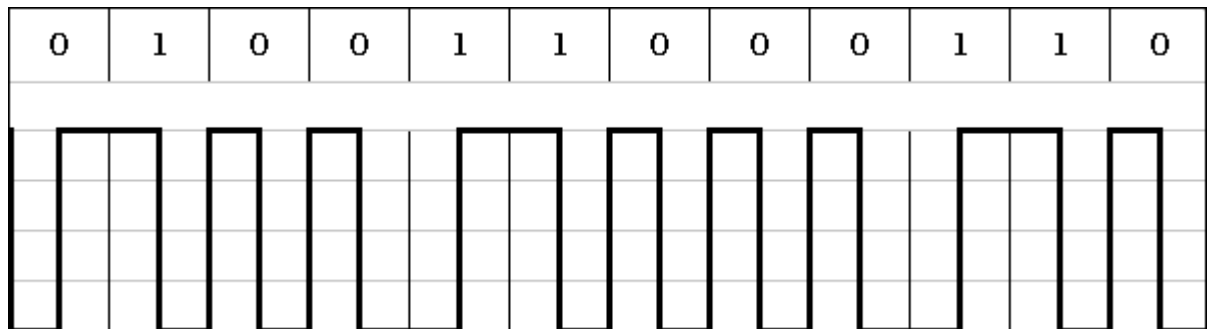
Зачиніть вікно параметрів моделювання і знову запустіть модель. Вона буде працювати не зупиняючись, демонструючи нульову кількість помилок. Припиніть роботу моделі клацанням по кнопці *Stop simulation*.

Зараз у моделі використовується один відлік сигналу на кожен біт, що передається. Для використання при передачі інформації імпульсів заданої форми необхідно спочатку збільшити частоту дискретизації сигналу, а потім пропустити «рідко» слідуючі імпульси крізь формуючий фільтр із заданою імпульсною характеристикою (ІХ). Підвищити частоту дискретизації можна за допомогою блоку **Signal Processing Blockset** → **Signal Operations** → **Upsample**. Помістіть цей блок у модель після формувача біполярного сигналу та задайте підвищення частоти дискретизації у 8 разів. Дискретний фільтр можна реалізувати за допомогою блоку **Simulink** → **Discrete** → **Discrete Filter**. Помістіть цей блок у модель після блоку *Upsample* і реалізуйте манчестерське кодування, задавши імпульсну характеристику у вигляді $\{1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1\}$.

У жодній з версій Ethernet не застосовується пряме бінарне кодування біта 0 напругою 0В і біта 1 - напругою 5В, так як такий спосіб призводить до неоднозначності. Якщо одна станція посилає бітовий рядок 00010000, то інша може інтерпретувати її як 10000000 або 01000000, так як вони не зможуть відрізнити відсутність сигналу (0 В) від біта 0 (0 В). Можна, звичайно, кодувати одиницю позитивною напругою +1 В, а нуль - негативною напругою -1В. Але при цьому все одно виникає проблема, пов'язана із синхронізацією передавача і приймача. Різні частоти роботи їх системного годинника можуть привести до розсинхронізації і невірної інтерпретації даних. В результаті приймач може втратити границю бітового інтервалу. Особливо велика ймовірність цього в разі довгої послідовності нулів або одиниць.

Таким чином, приймаючому пристрою потрібен спосіб однозначного визначення початку, кінця і середини кожного біта без допомоги зовнішнього таймера. Це і реалізується за допомогою манчестерського кодування. У манчестерському коді кожен часовий інтервал передачі одного біта ділиться на два рівні періоди. Біт зі значенням 1 кодується високим рівнем напруги в першій половині інтервалу і низьким – у другій половині, а нульовий біт кодується зворотною послідовністю – спочатку низька напруга, потім висока. Така схема гарантує зміну напруги в середині періоду бітів, що дозволяє

приймачу синхронізуватися з передавачем. Недоліком манчестерського кодування є те, що воно вимагає подвійної пропускної здатності лінії по відношенню до прямого двійкового кодування, так як імпульси мають половинну ширину. Наприклад, для того щоб відправляти дані зі швидкістю 10 Мбіт / с, необхідно змінювати сигнал 20 мільйонів разів на секунду. Манчестерське кодування показано нижче, на рисунку.



Зауваження

Параметр **Numerator** блоку фільтра задає коефіцієнти полінома чисельника функції передачі. Ці коефіцієнти повинні бути задані у вигляді вектора у форматі MATLAB, тобто перераховані у квадратних дужках через пробіли або коми: [1 1 1 1 -1 -1 -1 -1]. Параметр **Denominator** задає коефіцієнти полінома знаменника функції передачі. Уведіть тут число 1, тому що в цьому випадку необхідний нерекурсивний фільтр. Параметр **Sample time** задає період дискретизації сигналу. Щоб використовувати той період, з яким вже дискретизований вхідний сигнал, уведіть тут значення -1.

При прийманні сигналу необхідна узгоджена фільтрація з подальшим зниженням частоти дискретизації. Помістіть в модель ще один дискретний фільтр (відразу після формуючого фільтра) і задайте для нього дзеркально-перевернену ІХ виду $\{-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1\}$. Для зниження частоти дискретизації з вихідного сигналу прийомного фільтра необхідно вибрати окремі відліки за допомогою блоку **Signal Processing Blockset** → **Signal Operations** → **Downsample**. Введіть в параметрах цього блоку зниження частоти в 8 разів.

Запустіть модель і переконайтеся в тому, що вона працює невірно (імовірність помилки становить близько 50 %). Справа в тому, що після введення передавального і формуючого фільтрів необхідно врахувати 2 моменти:

5. відліки після узгодженого фільтра повинні братися в строго визначені моменти часу (необхідна часова синхронізація);
5. процедури фільтрації вносять затримку, яку необхідно врахувати при порівнянні переданого та прийнятого сигналів.

Для контролю форми сигналу і підбору моментів узяття відліків під'єднайте 2 осцилографи (блоки **Simulink** → **Sinks** → **Scope**) до виходів прийомного фільтра та блоку зниження частоти дискретизації. Запустіть модель. Ви побачите, що максимальний розмах сигналів до і після зниження частоти дискретизації не збігається. Це означає, що відліки отримуються не в ті моменти, коли сигнал на виході узгодженого фільтра досягає свого максимуму. Скорегуйте моменти узяття відліків, регулюючи параметр **Sample offset** блоку **Downsample**.

Зауваження

Для відкриття вікна осцилографа зробіть подвійне клацання на блоці **Scope**; для автопідбору масштабу зображення клацніть у вікні осцилографа правою кнопкою миші та оберіть у контекстному меню команду **Autoscale**; для аналізу осцилограм призупиніть роботу моделі кнопкою **Pause simulation**.

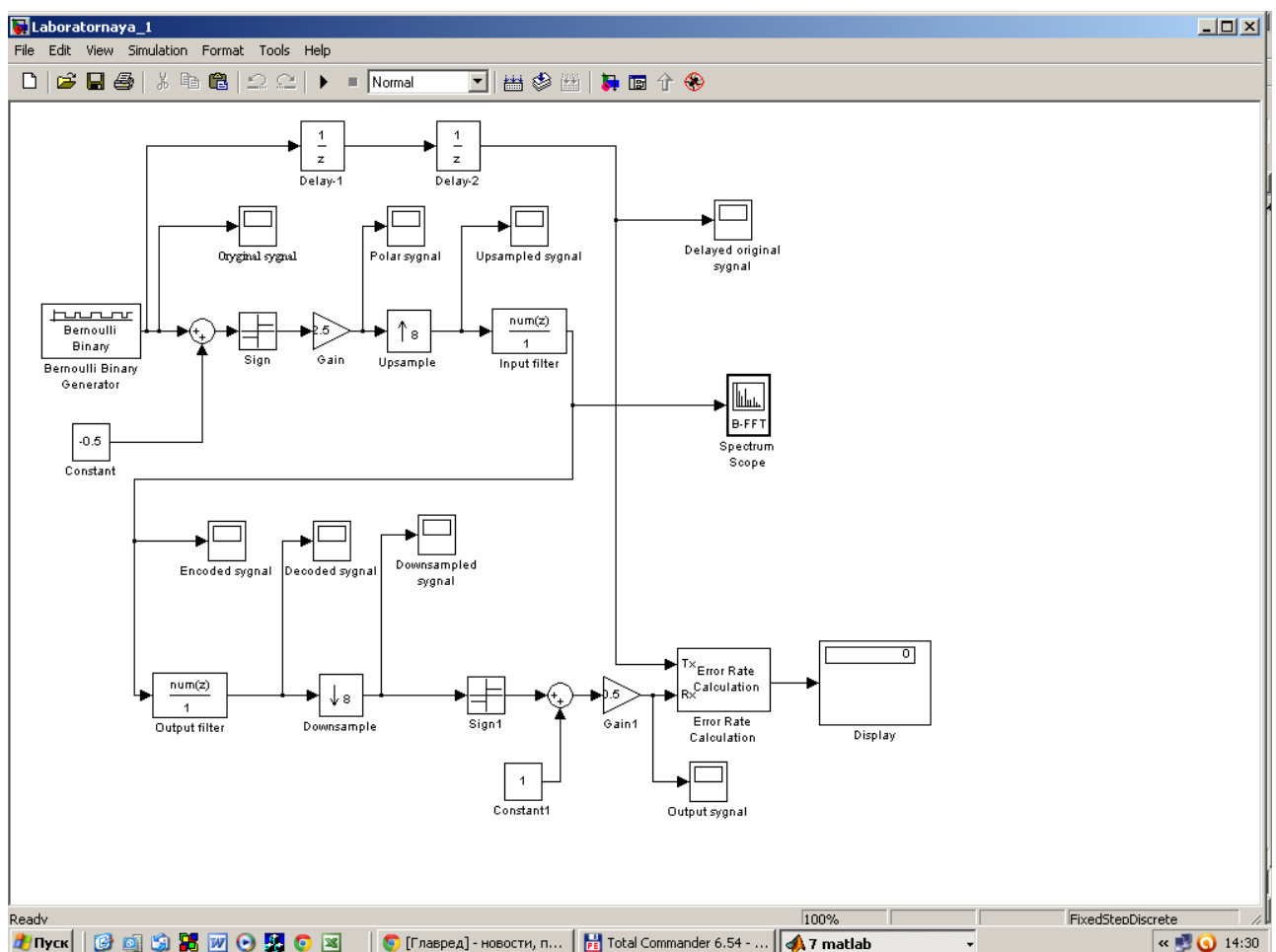
Увага!

При підборі моментів взяття відліків необхідно звернути увагу на те, що сигнал після зниження частоти дискретизації повинен приймати тільки більші по модулю значення. Справа в тому, що при використанні манчестерського кодування можлива невірна (зі зміщенням на половину символу) синхронізація, розмах сигналу при цьому такий же, як і при вірній синхронізації, але, крім більших за модулем, сигнал приймає також і значення, близькі до нуля.

Компенсація затримки, внесеної в сигнал при його обробці, робиться безпосередньо в блоці **Error Rate Calculation** (параметр **Receive delay**). Проаналізуйте, що з'являються в моделі затримки та підберіть таке значення цього параметра, щоб модель працювала без помилок.

Наразі, залишилось перетворити створену модель в модель реального каналу зв'язку, в якому завжди присутні завади. З метою моделювання такого каналу будемо використовувати блок Communications **Blockset -> Channels -> AWGN Channel**, який реалізує додавання до сигналу адитивного білого гаусівського шуму. Цей блок потрібно вставити до схеми між формуючим та прийомним фільтрами. У вікні параметрів цього блоку є поле Signal to noise ratio, яке задає відношення сигнал/шум у децибелах. Чим менше це відношення, тим більш зашумленим виявляється канал зв'язку. Для перевірки коректності роботи моделі введіть в це поле значення *inf* (від infinity – нескінченність). Це буде позначати, що шуму при передачі немає, тобто модель повинна працювати без виникнення помилок, як і раніше. Переконайтесь у цьому, запустивши модель.

Після цього експериментальним шляхом підберіть відношення сигнал/шум таке, щоб на 20 відліках часу роботи моделі виникали 1-3 помилки при прийомі сигналу. Увага: цілком можливо, що помилки при прийомі з'являться лише при від'ємних значеннях сигнал/шум у децибелах. Подивіться рисунки з осцилографів та порівняйте їх з тими, що ви їх бачили за відсутності шуму.



4. Склад звіту з виконання роботи

Оскільки в даній роботі від студента не вимагаються будь-які кількісні розрахунки, звіт може бути поданий в досить довільній формі. Тим не менш, студент має продемонструвати розуміння фізичних процесів, які відбуваються в складеній ним моделі.

Отже, в звіті обов'язково повинні бути представлені отримані рисунки з усіх наявних у схемі осцилографів з короткими поясненнями щодо змісту зображення. Бажано також на певних рисунках відмітити точки, в яких відбувається зчитування сигналу детектором та пояснити причини спотворення форми сигналу при проходженні крізь узгоджений фільтр та наявність побічних максимумів та мінімумів у вихідному сигналі.

В частині роботи, в якій до схеми додається адитивний гаусівський шум, потрібно вказати приблизну величину відношення сигнал/шум, при якій детектор починає давати імовірність помилки 5%.

5. Контрольні питання

1. Який вигляд має операція згортки? Якому лінійному фільтру вона відповідає?
2. Що таке білий адитивний шум?
3. Який вигляд мають імпульсна реакція та передавальна функція узгодженого фільтра?
4. Яку форму має відгук узгодженого фільтра на прямокутний вхідний імпульс? Дайте графічне пояснення.
5. Які переваги та недоліки має манчестерське кодування?
6. Що таке децибел? Поясніть фізичний зміст від'ємного значення відношення сигнал/шум у децибелах.
7. Поясніть механізм формування біполярного сигналу в побудованій схемі.
8. Які функції в сформованій схемі виконують блоки Upsample і Downsample?
9. Яким чином задається імпульсні характеристики формуючого та прийомного фільтрів?

6. Список посилань.

1. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: «Вильямс». 2003. – 1104с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. - М.: «Радио и связь». 2000. – 800с.
3. Черных, И.В. «Simulink: Инструмент моделирования динамических систем»./ И.В. Черных. – СПб.: ДМК Пресс, 2008. – 400 с.