НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Радіотехнічних пристроїв та систем
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 51-74

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ **С.Я. Жук**
(підпис) (ініціали, прізвище)
"14" грудня 2018 р.

Магістерська дисертація

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
за спеціалізацією Радіотехнічні інформаційні технології
(код і назва спеціальності)

на тему: Відновлення символьної синхронізації в системах зв'язку з квадратурними видами модуляції

Виконав (-ла): студент (-ка) VI курсу, групи РТ-71мп
(шифр групи)

Бернацький Сергій Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц. Шпилька О.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант ох. праці к.т.н., доц. Каштанов С.Ф
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., доц., доц. каф. РС Сумко І.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет (інститут) Радіотехнічний факультет
(повна назва)

Кафедра Радіотехнічних пристроїв та систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
спеціалізація Радіотехнічні інформаційні технології
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ С.Я.Жук
(підпис) (ініціали, прізвище)
«29» жовтня 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Бернацький Сергій Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Відновлення символьної синхронізації в системах звязку з квадратурними видами модуляції

науковий керівник дисертації к.т.н. Шрилька О.О.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «06» листопада 2018 р. № 4093-с

2. Строк подання студентом дисертації 14 грудня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження Синхронізація в цифровій системі звязку із квадратурними видами модуляції

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Системи цифрового звязку з квадратурними видами модуляції

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Аналіз системи синхронізації.
2. Дослідження залежності помилки при різних значеннях кількості дискретів на символ.
3 Дослідження залежності помилки при застосуванні кубічного та параболічного інтерполятора. 4 Повторити п.2,3 при різних видах модуляції.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу

Презентація в електронному та паперовому вигляді з 11 плакатів.

7. Орієнтовний перелік публікацій 1. Студентський науковий семінар „Наукові розробки РТФ-2018", 2018 рік. 2. Міжнародна науково-технічна конференція „Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" 2018 рік.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С.Ф., к.т.н., доцент		

9. Дата видачі завдання 26.09.2018 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз системи синхронізації	1.10.18 – 13.10.18	
2	Залеж. помилки від кіл. дискретів насит.	27.10.18 – 10.11.18	
3	Залеж. помилки від інтерполятора	22.11.18 – 5.12.18	
4	Охорона праці	13.10.18 – 27.10.18	
5	Пункт 2,3 для різних видів модуляц.	10.11.18 – 22.11.18	
6	Розробка стартап-проекту	5.12.18 – 14.12.18	

Студент (підпис) Бернацький С.О. (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації (підпис) Шишка О.О. (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 81 с., 25 рис., 25 табл., 2 додатків, 13 джерел.

Ключові слова: СИМВОЛЬНА СИНХРОНІЗАЦІЯ, СИСТЕМИ ЗВ’ЯЗКУ, КВАДРАТУРНА МОДУЛЯЦІЯ, ІНТЕРПОЛЯЦІЯ, СИМВОЛЬНА ПОМИЛКА.

Актуальність теми. Системи радіозв'язку широко використовуються в різних сферах діяльності людини і в даний час активно розвиваються: зростають дальність дії радіозв'язку, швидкість передачі даних та спектральна ефективність. Разом з цим підвищуються і вимоги до системи синхронізації. У сучасних цифрових системах радіозв'язку підсистема синхронізації є комплексом програмно-апаратного забезпечення, в якому реалізовані оцінки неузгодженості параметрів сигналів на основі алгоритмів із різною складністю реалізації та точністю синхронізації.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської дисертації є дослідити вплив параметрів інтерполятора в складі системи символьної синхронізації та характеристики системи зв’язку з квадратурними видами модуляції.

Об'єкт дослідження: синхронізація в цифровій системі зв’язку із квадратурними видами модуляції.

Предмет дослідження: ймовірність символьної помилки як ефективність інтерполятора в залежності від співвідношення сигнал-шум.

Методи дослідження: методи комп’ютерного моделювання у середовищі MATLAB для дослідження ймовірності символьної помилки.

Практичне значення одержаних результатів: дослідження зроблені на основі комп'ютерного моделювання носять практичний характер щодо рекомендацій у виборі символьного інтерполятора у системах зв'язку із символьною синхронізацією на основі ймовірності символьної помилки.

Публікації: Студентський науковий семінар "Наукові розробки РТФ-2018", 2018 рік. Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» 2018 рік.

ABSTRACT

Master's thesis: 81 p., 25 fig., 25 tab., 2 annexes, 13 sources.

Key words: SYMBOL SYNCHRONIZATION, COMMUNICATION SYSTEM, QUADRATURAL MODULATION, INTERPOLATION, SYMBOL ERROR.

Relevance of the topic. The growing speed and range requirements of the radio need to improve the quality of synchronization as the first unit of digital information processing.

The purpose and tasks of the study. The purpose of the master's thesis is to explore the influence of interpolator parameters in the system of symbolic synchronization and the characteristics of the system of communication with quadrature modulation types.

Object of research: synchronization in a digital communication system with quadrature modulation types.

Subject of research: the probability of a character error as the efficiency of an interpolator, depending on the signal-to-noise ratio.

Methods of research: computer-modeling methods in the MATLAB environment to investigate the probability of a character error.

The practical value of the results: researches made on the basis of computer simulation are practical in terms of recommendations in choosing a symbolic interpolator in communication systems with symbolic synchronization based on the probability of a character error.

Publications: Student Scientific Workshop "Scientific developments of RTF-2018", 2018. International scientific and technical conference "Radio-engineering fields, signals, devices and systems" 2018.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ……...11

ВСТУП…….……..12

1. ОСОБЛИВОСТІ АЛГОРИТМІВ СИМВОЛЬНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ…….15

1.1 Ціль синхронізації…….…...….15

1.2 Класифікація алгоритмів синхронізації 16

1.3 Цифровий алгоритм встановлення символьної синхронізації....……..17

1.4 Принципи роботи цифрових символьних інтерполяторів…….20

1.5 Алгоритм синхронізації випереджаючого і запізнілого стробування..31

1.5.1 Алгоритм Мюллера і Міллера (Mueller and Muller)……..33

1.5.2 Алгоритм Гарднера……..……34

2. ОЦІНКА ПАРАМЕТРУ ЙМОВІРНОСТІ СИМВОЛЬНОЇ ПОМИЛКИ….37

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛГОРИТМУ ГАРДНЕРА……..40

4. МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМУ СИМВОЛЬНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ.....44

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯ..….47

5.1 Визначення основних потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів…...….……..47

5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії……..…….……48

5.2.1 Вимоги щодо організації робочих місць користувачів ВДТ, ПЕОМ.....48

5.2.2 Електробезпека……...……..……...52

5.2.3 Оптичне випромінювання монітору……...54

5.2.4 Електричне поле……..….56

5.2.5 Іонізація…….....56

5.3 Заходи щодо нормалізації умов праці….....….58

5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях……..….....……...59

5.4.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи систем оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації……..….……..59

5.4.2 Обов’язки та дії персоналу у разі виникнення НС……..…..……61

5.4.3 План евакуації при НС……..……..…….62

5.4.4 Пожежна безпека……..…….……..…….62

6. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ……..……..…….66

6.1 Опис ідеї проекту……..……...……..66

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту…….……..……67

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту…….....68

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту……..…..74

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту……..…….76

ВИСНОВКИ……..……79

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..80

ДОДАТОК А. Публікації по темі дисертації……...……82

ДОДАТОК Б. Публікації по темі дисертації…….……...……85

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ПФ – петлевий, кільцевий (зворотнього зв'язку) фільтр

ДО – детектор огинаючої

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

QPSK – квадратурна фазова модуляція

QAM – квадратурна амплітудна модуляція

ГКН – генератор керований напругою

ВСТУП

Системи радіозв'язку широко використовуються в різних сферах діяльності людини і в даний час активно розвиваються: зростають дальність дії радіозв'язку, швидкість передачі даних та спектральна ефективність. Разом з цим підвищуються і вимоги до системи синхронізації, яка здійснює автоматичну підтримку параметрів сигналів, що генеруються в приймачі (частота несучої, тактова частота, фаза несучої), а також визначення моменту часу початку обміну інформаційними сигналами. Від того, наскільки якісно здійснена синхронізація, залежить процес подальшої обробки сигналів - демодуляція і декодування, а також характеристики прийому в цілому. Так, для сигналу з модуляцією BPSK при адитивному білому гаусовому шумі зі спектральною щільністю потужності $No/2$ і енергією, що витрачається на передачу одного біта повідомлення Eb, досягнення рівня ймовірності бітової помилки 10^{-3} вимагає відношення сигнал/шум Eb/No = 6,7 дБ при відсутності будь-якого випадкового зсуву синхронізації. При відносному випадковому зсуві синхронізації 10% необхідне відношення сигнал/шум зростає до величини 12,9 дБ [1].

При генерації опорних сигналів приймач повинен бути синхронізований з несучою частотою. Це означає, що фаза несучої і її копії в приймачі повинні бути узгоджені. Такий процес забезпечується фазовим автопідстроюванням частоти. В результаті підстроювання гетеродин приймача синхронізується по частоті і фазі з прийнятим сигналом. Таким чином здійснюється фазова синхронізація.

Крім того, необхідно, щоб приймач точно знав, де починається і закінчується приймальний символ. Ця інформація необхідна, щоб знати відповідний інтервал інтегрування символу. Якщо інтегрування здійснюється

по інтервалу невідповідної довжини або по інтервалу, що захоплює два символи, здатність до прийняття рішення, щодо прийнятого символу, буде знижуватися [1].

Часто на практиці, внаслідок нестабільності тактового генератора, змін параметрів каналу передачі в часі виникають випадкові відхилення меж символів щодо їх ідеального положення. Для усунення впливу цього явища і застосовують символьну синхронізацію [2].

Оскільки один період передачі символу зазвичай містить велику кількість періодів несучої, другий рівень синхронізації значно грубіше фазової синхронізації і зазвичай виконується за допомогою іншої схеми, відмінної від використовуваної при фазовій синхронізації.

У сучасних цифрових системах радіозв'язку підсистема синхронізації є комплексом програмно-апаратного забезпечення, в якому реалізовані алгоритми оцінки неузгодженості параметрів сигналів, що генеруються в приймачі і передавачі (несуча частота, зсув у часі щодо початку прийому сигналу).

На сьогоднішній день відомо багато цифрових алгоритмів символьної синхронізації, але найбільшу поширеність отримали наступні: з випереджаючим і запізнілим стробуванням, Мюллера і Міллера, Гарднера [3].

При проектуванні пристроїв на сучасній електронній базі виникає проблема вибору елементної бази цифрових пристроїв з урахуванням необхідної продуктивності. З одного боку, необхідно забезпечити обробку сигналів із заданою швидкістю, а з іншого - мати низьку вартість, мале енергоспоживання, тепловиділення і бути забезпеченим усіма необхідними для пристрою портами введення / виведення.

В рамках даної роботи проаналізований алгоритм символьної синхронізації з різними видами інтерполятора та різною кількістю семплів на символ, що на підставі отриманих ймовірностей бітових помилок дозволяє зробити вибір складності символьного синхронізатора при проектуванні системи зв’язку.

Варто зазначити, що для синхронізації системи зв'язку може використовуватися спеціальний синхронізуючий сигнал, що генерується спеціально для полегшення даного процесу. Однак на передачу такого сигналу витрачається додаткова потужність, тому в даній роботі синхронізація виконується безпосередньо з інформаційного сигналу.

Відповідно до поставленої мети у роботі необхідно провести аналіз параметрів системи символьної синхронізації відносно результуючого параметру – ймовірності символьної помилки. У системі символьної синхронізації буде проводитись заміна інтерполятора на кубічний, квадратичний чи лінійний. Також змінюватиметься кількість відліків на символ від АЦП, та формування сигналу за квадратурними видами модуляції QAM, QPSK, 16QAM, 64QAM. Потрібно показати як саме ці параметри впливають на ймовірність символьної помилки та що для системи є найважливішим при виборі її конфігурації.

Тестування та аналіз будуть проводитись у програмному середовищі MATLAB.

1. ОСОБЛИВОСТІ АЛГОРИТМІВ СИМВОЛЬНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

1.1 Ціль синхронізації

Більшість систем цифрового зв'язку, що використовують когерентну модуляцію, вимагають фазову і символьну синхронізації. [1].

До основних видів синхронізації належать:

- символьна (тактова) синхронізація;
- фазова синхронізація;
- частотна синхронізація.

Системи з некогерентного модуляцією зазвичай вимагають символьної синхронізації. Крім того, при некогерентній модуляції, необхідна частотна синхронізація. Частотна синхронізація відрізняється від фазової тим, що копія несучої, що генерується приймачем, може мати довільні зсуви фази від прийнятої несучої [1].

Завдання синхронізації в системах цифрового зв'язку тісно пов'язані з питаннями, розглянутими в дисциплінах статистична радіотехніка, де завдання синхронізації зводяться до задачі оцінювання параметрів сигналу, і системи радіоавтоматики, де завдання корекції частотних, фазових і часових помилок часто вирішується за допомогою замкнених слідкуючих систем. Особливістю роботи слідкуючих систем в системах зв’язку є те, що сигнал помилки в більшості випадків містить в собі випадкову складову, обумовлену випадковим характером переданих даних, що ускладнює процес синхронізації.

Вважаючи, що фазова синхронізація виконана, в рамках даної роботи буде розглянута символьна синхронізація.

1.2 Класифікація алгоритмів синхронізації

Алгоритми синхронізації можна класифікувати за різними ознаками [4]:

Алгоритми з використанням і без використання даних - в залежності від того, чи відомі значення переданих символів. Алгоритми з використанням даних можуть бути реалізовані в двох варіантах:

1) Дані відомі, якщо синхронізація проводитися по преамбулі, яка генерується передавачем за відомим, приймальній стороні, законом.

2) Замість дійсних значень даних можуть використовуватися їх оцінки.

Алгоритми розімкнуті і замкнуті. Розімкнуті - оцінюють параметр, потім результат оцінювання використовують для корекції відповідної помилки. Зворотній зв'язок в таких системах відсутній.

Замкнені - слідкуючі, в яких прийнятий сигнал спочатку піддається корекції потрібного параметра, а потім із скоригованого сигналу визначається сигнал помилки. Далі визначений сигнал помилки надходить на кільцевий фільтр, для згладжування. Вихідний сигнал фільтра являє собою оцінку шуканого параметра. Оцінка параметра надходить на блок корекції сигналу за знайденим параметром, замикаючи петлю зворотного зв'язку.

Алгоритми, засновані на принципі максимальної правдоподібності, та евристичні: вивід формул, за якими оцінюється шуканий параметр в розімкнутих системах, або формується сигнал помилки в замкнутих системах, може основуватись на максимізації функції правдоподібності (для оцінки параметрів існує не тільки МП метод, але він найчастіше використовується на практиці), а може базуватися на будь-яких евристичних міркуваннях.

1.3 Цифровий алгоритм встановлення символьної синхронізації

На сьогоднішній день в сучасних системах передачі інформації використовується переважно лише цифрова модуляція (маніпуляція). Це стало загальнодоступним рішенням за рахунок розвитку у мікроелектроніці. Одним із головних пристроїв є аналого-цифровий перетворювач, що перетворює сигнал у цифрові дискрети (семпли). До АЦП сигнал проходить попередню обробку, вона варіюється від загальної складності системи та може містити: узгоджувальний пристрій з антеною, фільтр по дзеркальному каналу, фільтри низької частоти (ФНЧ), перетворювачі частоти на проміжну частоту (ПЧ) тобто змішувачі, квадратурні змішувачі, фільтри проміжної частоти (ФПЧ), підсилювачі відповідних частот. Як приклад приведено рисунок 1.1 на якому зображено структурну схему цифрового приймача.

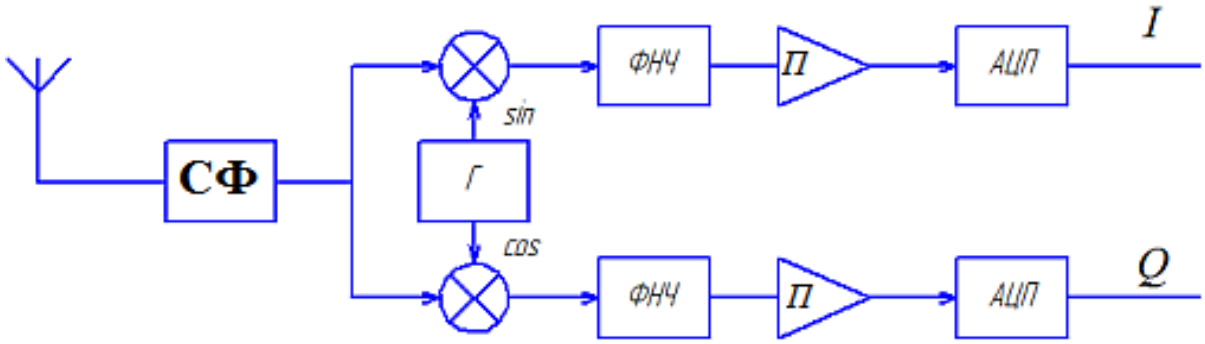


Рисунок 1.1 – Структура цифрового приймача

Де СФ - це смуговий фільтр, який теж має цифровий інтерфейс керування, ФНЧ- фільтр низької частоти, П - підсилювач, Г – гетеродин, та АЦП.

У наведеному рисунку на виході квадратурного змішувача для кожної із квадратурних компонент I і Q використовується окремий канал АЦП, що покращує швидкодію. Дискретизовані сигнали I і Q на виході АЦП ми отримуємо раз на період Ts секунд, де Ts за теоремою Найквіста $Ts \leq T/2$, де T- це період аналогового сигналу. Після АЦП дискретний сигнал надходить до

узгодженого фільтру. Де узгоджений фільтр це - лінійний оптимальний фільтр, побудований на основі відомих спектральних характеристик корисного сигналу і шуму. Узгоджені фільтри призначені для виділення сигналів відомої форми на фоні шумів. Під оптимальністю розуміється максимальне відношення сигнал/шум на виході фільтра, при цьому форма сигналу при проходженні через фільтр змінюється.

На рисунку 1.2 зображено один із методів реалізації приймача з використанням АЦП. Такий підхід обчислює значення помилки синхронізації, яке далі використовується для регулювання фази генератора що керується напругою (VCC – voltage controlled clock), який, в свою чергу, керує частотою дискретизації.

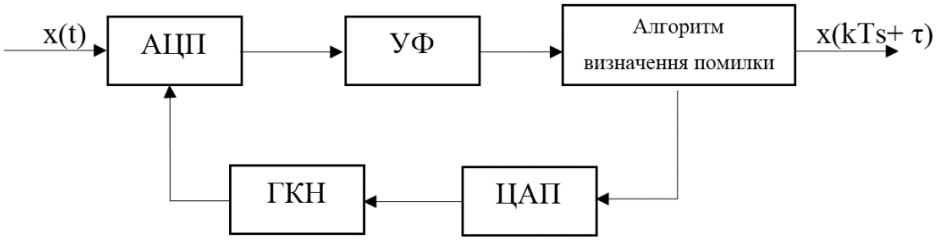


Рисунок 1.2 – Структурна схема цифрового алгоритму синхронізації з керованою частотою дискретизації

Інший підхід для визначення символьної помилки у якому сигнал надходить до системи символьної синхронізації, який теж містить замкнену петлю, зображений на рисунку 1.3 і складається із наступних блоків:

- блок визначення символьної помилки;
- кільцевий фільтр;
- блок контролю інтерполятора;
- інтерполятор.

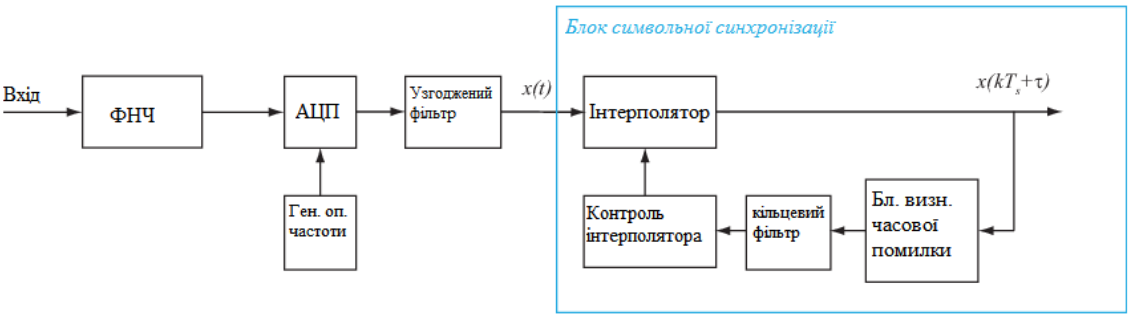


Рисунок 1.3 – структурна схема символьного синхронізатора

З виходу інтерполятора через блок визначення часової помилки та кільцевий фільтр формується сигнал помилки синхронізації для керування інтерполяційним фільтром вторинної дискретизації [7].

Кільцевий фільтр виконує роль пропорційно плюсового інтегратора (ПІ) та має структуру наведену на рисунку 1.4.

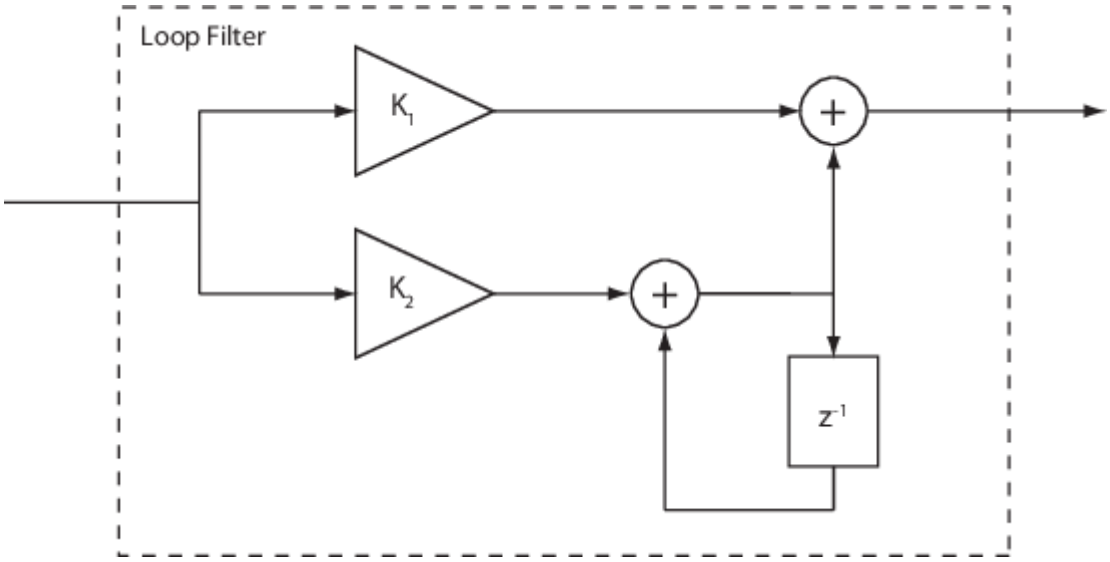


Рисунок 1.4 – Кільцевий фільтр

Пропорційний коефіцієнт підсилення, K1 та K2, розраховуються за:

$$K_1 = \frac{-4\zeta\theta}{(1+2\zeta\theta+\theta^2)K_p} \tag{1.1}$$

$$K_1 = \frac{-4\theta^2}{(1+2\zeta\theta+\theta^2)K_p} \tag{1.2}$$

Проміжний термін, θ, визначається як:

$$\theta = \frac{\frac{B_n T_s}{N}}{\zeta + \frac{1}{4\zeta}} \tag{1.3}$$

де *N*, *ζ*, *Bn*, *Ts* та *Kp* відповідають показникам: дискретів на символ, коефіцієнту затухання, нормованої смуги пропускання петлі та властивостями підсилення детектора відповідно.

На сьогоднішній день найбільш широко використовувані є наступні алгоритми символьної синхронізації: з випереджаючого і запізнілого стробування, Мюллера і Міллера, Гарднера [3].

1.4 Принципи роботи цифрових символьних інтерполяторів

Реалізація схеми символьної синхронізації в цифрових пристроях на програмованих логічних інтегральних схемах і цифрових сигнальних процесорах (ЦСП) являє собою схему передискретизації з довільним кроком зміни тактової частоти, побудовану на основі інтерполятора.

Одним із методів побудови такого інтерполятора, який може бути реалізований для високошвидкісних систем, є інтерполяція на основі многочленів, що носить назву інтерполяція Лагранжа. Інтерполятор Лагранжа, представлений в дискретній формі із скінченим числом вибірок сигналу, називається інтерполятором Ферроу. Метою даної роботи є дослідження впливу параметрів інтерполятора на рівень бітової помилки під час прийому квадратурних сигналів.

Інтерполятор Ферроу можна представити цифровим фільтром з кінцевою імпульсною характеристикою. Що описується в часовій області виразом:

$$y(k)=\sum_{m=0}^{M}\left\{h\left(m,e\right)\cdot x\left(k-m\right)\right\} \tag{1.4}$$

де y (k) - сигнал на виході фільтра, x (k) – сигнал на вході фільтра, h(m,ε) - коефіцієнти фільтра, залежать від керуючого значення ε.

Також буває необхідно зробити перетворення частоти дискретизації в дробове число $\frac{P}{Q}$ раз, де P і Q - цілі числа. Тобто необхідно провести пере-розрахунок цифрових значень вхідного сигналу s(n) в цифрові значення сигналу y(k), де n=0,1,2..N-1 відліки сигналу взяті із частотою дискретизації Fs і k=0,1,2... відліки вихідного сигналу взяті з частотою $F_y=\frac{P}{Q}\cdot F_S$. Окрім того перший відлік y(0) повинен бути затриманий в часі відносно першого відліку сигналу s(0) на інтервал $\Delta t=\frac{x_0}{F_S}\,сек, -1\le x_0\le 0$. Таким чином, k-тий відлік сигналу y(k) відповідає моменту часу t_k що визначається:

$$t_k=k\cdot\frac{Q}{P\cdot F_S}-\frac{x_0}{F_S} \tag{1.5}$$

Виконавши нормування до частоти дискретизації Fs=1 Гц, можна записати що дробова затримка k-того символу:

$$x_k=t_k\cdot F_S=k\cdot\frac{Q}{P}-x_0 \tag{1.6}$$

Для прикладу, на рисунку 1.5 показано часові співвідношення моментів взяття відліків сигналів s(n) та y(k) при випадку $P=5, Q=4, x_0=0.2, F_y=\frac{5}{4}\cdot F_s$:

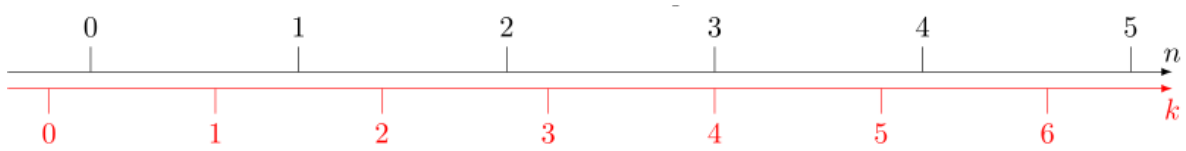


Рисунок 1.5 - часові співвідношення моментів взяття відліків сигналів s(n) та y(k)

Процес передискретизації для випадку коли $P = Q = 1$, $F_Y = F_s$, $x_0 = 0.2$ зображено на рисунку 1.6.

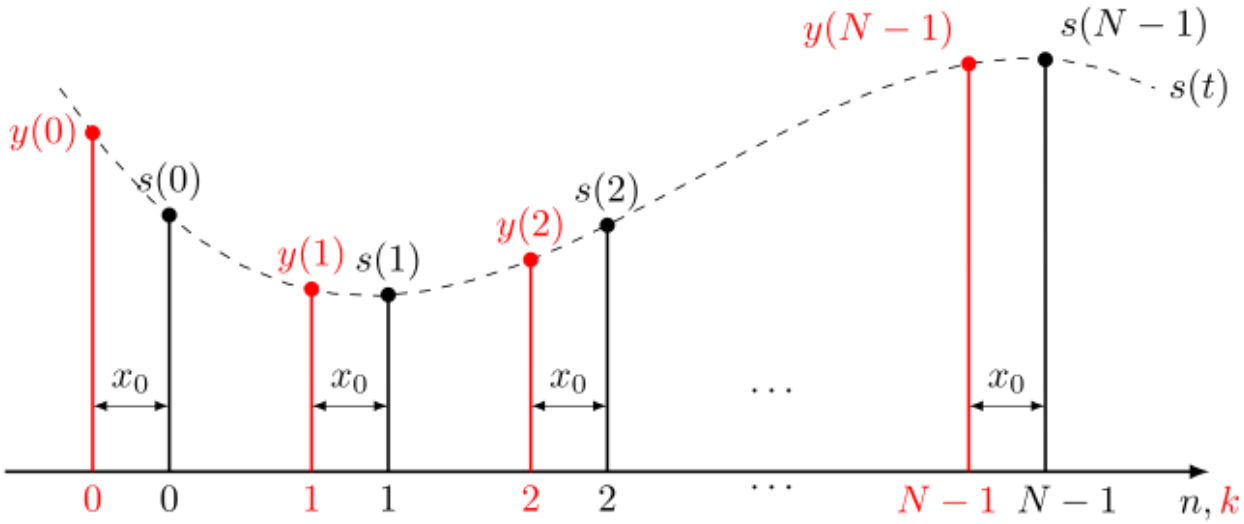


Рисунок 1.6 – Передискретизація сигналу

В курсі математичного аналізу доводиться, що через N точок проходить єдиний поліном ступеня N-1. Наприклад, через дві точки можна провести тільки одну пряму, через три точки можна провести тільки одну параболу. Єдиний поліном ступеня N-1, що проходить через N точок, називається інтерполяційним поліномом Лагранжа:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot t^n \tag{1.7}$$

де a_n - коефіцієнти полінома, які розраховуються на основі дискретних значень s(n), n=0...N-1.

Для розрахунку коефіцієнтів a_n ми можемо скласти систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 0^2 + \ldots + a_{N-1} \cdot 0^{N-1} = s(0), \\ a_0 + a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot 1^2 + \ldots + a_{N-1} \cdot 1^{N-1} = s(1), \\ a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 2^2 + \ldots + a_{N-1} \cdot 2^{N-1} = s(2), \\ \vdots \\ a_0 + a_1 \cdot (N-1) + a_2 \cdot (N-1)^2 + \ldots + a_{N-1} \cdot (N-1)^{N-1} = s(N-1). \end{cases} \quad (1.8)$$

Дана система може бути записана в матричній формі як:

$$M \cdot a = s \quad (1.9)$$

де

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0^2 & \ldots & 0^{N-1} \\ 1 & 1 & 1^2 & \ldots & 1^{N-1} \\ 1 & 2 & 2^2 & \ldots & 2^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & N-1 & (N-1)^2 & \ldots & (N-1)^{N-1} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{N-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} s(0) \\ s(1) \\ s(2) \\ \vdots \\ s(N-1) \end{bmatrix}.$$

(1.10)

Рішення системи рівнянь може бути отримано у вигляді:

$$a = M^{-1} \cdot s \tag{1.11}$$

де M^{-1} — зворотня матриця для матриці M .

Процедура обчислення зворотної матриці є однією з найбільш витратних, з точки зору обчислювальних ресурсів. У загальному випадку потрібна кількість операцій O(N)~N^3, пропорційне кубу розмірності квадратної матриці. Наприклад, для розрахунку коефіцієнтів кубічного полінома для $(N = 4)$ в загальному випадку потрібно $O(4) \sim 4^3 = 64$ множення, що важко реалізується на практиці. Надалі ми побачимо, як можна скоротити кількість операцій множення до трьох, причому дві з них будуть множення на $\frac{1}{2}$, що легко реалізується в обчислюваній арифметиці шляхом бітового зсуву на один розряд вправо.

За схемою Горнера для $N = 4$ отримаємо кубічний поліном з формули (1.7):

$$s(t) = t \cdot (t \cdot (t \cdot a_3 + a_2) + a_1) + a_0 \tag{1.12}$$

Структура такого поліному може бути представлена схемою на рисунку 1.7:

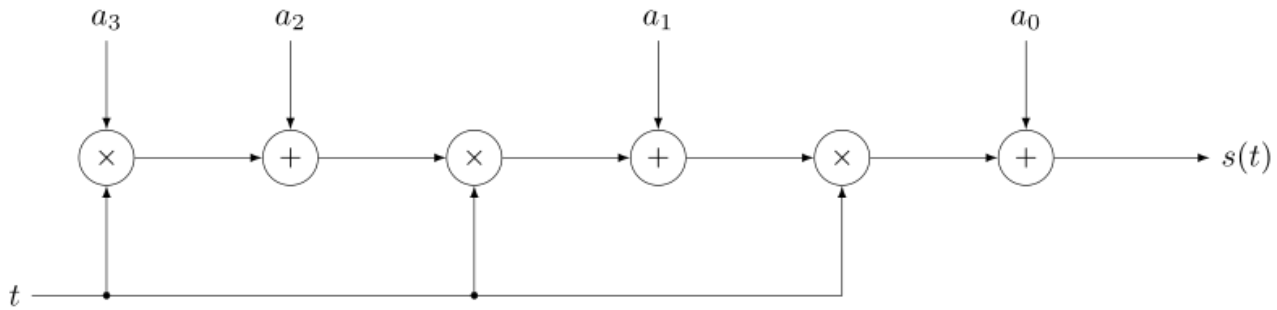


Рисунок 1.7 – Розрахунок кубічного поліному за схемою Горнера

Таке представлення називається схемою Горнера (Horner structure) і широко використовується для ефективного розрахунку значень поліномів [10]. Її основна перевага в тому, що для розрахунку значення полінома ступеня $N-1$, при відомих коефіцієнтах, потрібно $N-1$ помножувач і суматор.

Побудову полінома для інтерполяції часто проводять при використанні ортогональних поліномів Лагранжа. Однак рішення системи лінійних рівнянь (1.8) є більш загальним підходом, який може бути застосований не тільки для Лагранжевої інтерполяції, але і для інших методів поліноміальної інтерполяції (Ермітова поліноміальна інтерполяція, сплайн-інтерполяція та інших).

Оскільки операція визначення зворотної матриці є обчислювано складним завданням, а також вхідний потік даних може бути дуже довгим то для обробки ми можемо застосувати кусково-поліноміальну інтерполяцію. При цьому постає питання вибору порядку полінома (кількість відліків вхідного сигналу для інтерполяції).Найбільш часто використовуваним методом є кусково-поліноміальна кубічна інтерполяція в наслідок компромісу між точністю і обчислювальними витратами. Розглянемо метод кусочно-поліноміальної кубічної інтерполяції більш детально.Згідно виразу (1.11) кубічний поліном може бути побудований по чотирьох точках. Для будь-якого $1 \leq x_k < N-2$ можна отримати два відліки правіше та два відліки лівіше x_k як це показано на рисунку 1.8а.

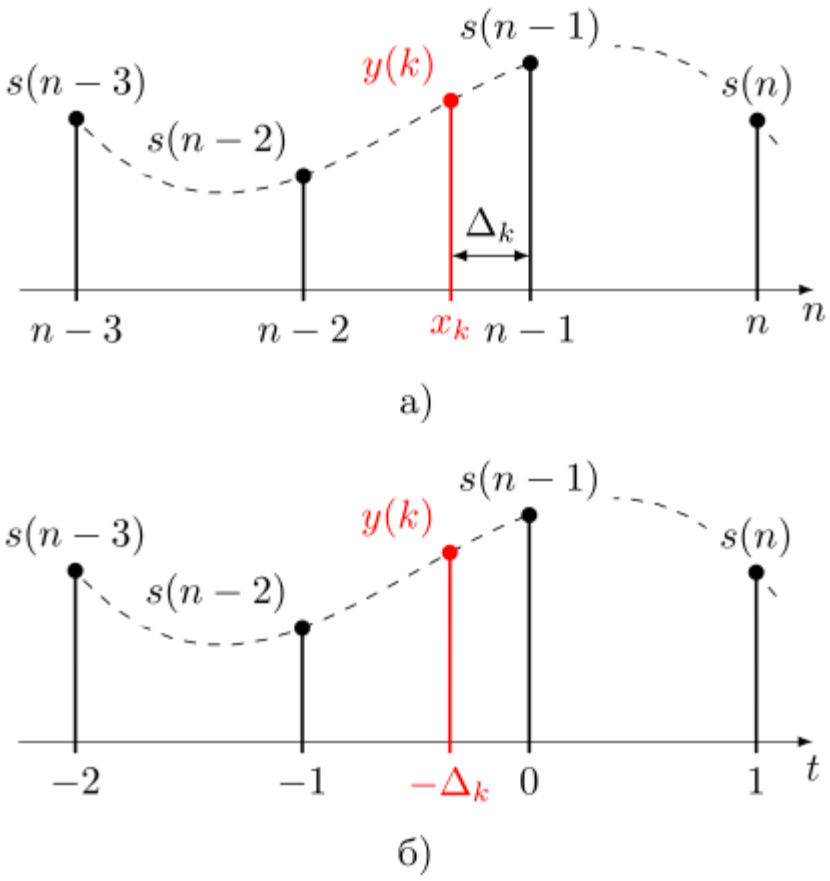


Рисунок 1.8 Перерахунок індексів відліків вхідного сигналу в інтервал $[-2,..1]$.

Оскільки частоти дискретизації вхідного і вихідного сигналів різні, то одні і ті ж індекси вхідного і вихідного відліків відповідають різним моментам часу. Наприклад, 5-тий відлік вихідного сигналу y(5) після передискретизації не збігається з 5-тим відліком вхідного сигналу s(5). Тому ми повинні вказувати, за якою шкалою ми індексуємо відлік. Ми будемо використовувати три шкали: шкала n для моментів часу відносно відліків вхідного сигналу s(n), шкала k для моментів часу відносно вихідного сигналу і шкала t в інтервалі $[-2,..1]$ для розрахунку коефіцієнтів кубічного полінома.

Для k-го відліку вихідного сигналу y(k) за шкалою k необхідно розрахувати відповідні індекси n вхідного сигналу s(n) за шкалою n (рисунок 1.8а), а потім перейти до шкали t в інтервалі $[-2,..1]$ для розрахунку

коефіцієнтів кубічного полінома (рисунок 1.8б). При цьому момент отримання k-го вихідного відліку за шкалою n повинен бути перерахований в значення $0 \leq \Delta_k < 1$ за шкалою t. Момент x_k взяття k-го вихідного відліку після передискретизації за шкалою n вхідного сигналу відповідає формулі (1.6).

Для розрахунку кубічного поліному нам потрібно чотири відліки вхідного сигналу $s(n)$, $s(n-1)$, $s(n-2)$ і $s(n-3)$, як це зображено на рисунку 1.8а. Тоді індекс n відліку сигналу s(n), який відповідає часу t=1 по шкалі t від -2 до 1, дорівнює:

$$n = \lfloor x_k \rfloor + 2, \tag{1.13}$$

де оператор $\lfloor x_k \rfloor$ означає округлення до найближчого меншого цілого.

Значення Δ_k по шкалі t відповідно:

$$\Delta_k = \lfloor x_k \rfloor + 1 - x_k \tag{1.14}$$

На рисунку 1.9 зображено приклад перерахунку індексів вхідного і вихідного сигналів 5-го вихідного відліку $y(5)$ при $P = 4, Q = 3, x_0 = 0.2$.

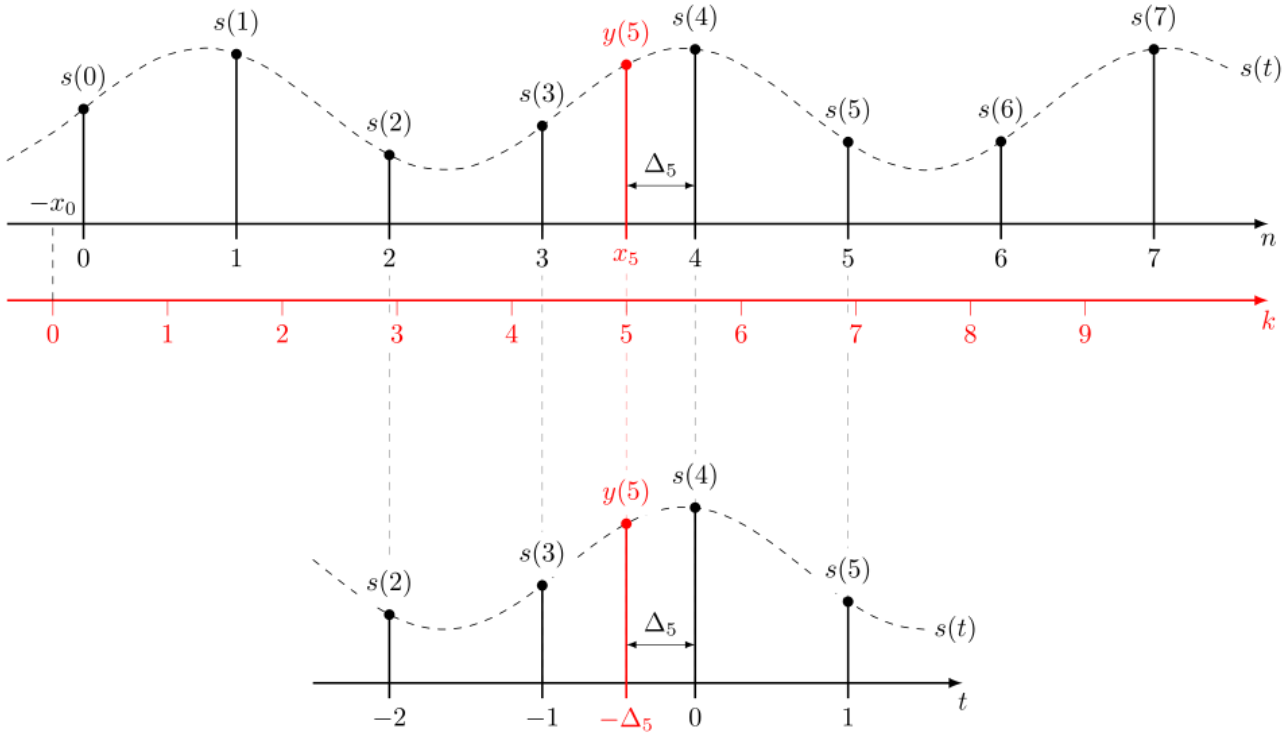


Рисунок 1.9 – Приклад перерахунку індексів при $P = 4, Q = 3, x_0 = 0.2$

Повертаючись до матриці M слід зазначити що вона залежить лише від індексів вхідних відліків сигналу. Тобто, щоб не перераховувати матрицю M і обернену M^{-1} для кожного нового k, ми можемо зафіксувати індекси по осі абсцис. Нехай $x_k = n - 1 - \Delta_k$ (див. рисунок 1.8а), тоді замість x_k ми будемо використовувати значення $0 \leq \Delta_k < 1$, як це показано на рисунку 1.8б. У цьому випадку ми можемо один раз розрахувати обернену матрицю M^{-1} і використовувати її для будь-кого x_k.

Система рівнянь для розрахунку коефіцієнтів полінома при фіксованих індексах, згідно з рисунком 1.8б, має вигляд:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot (-2) + a_2 \cdot (-2)^2 + a_3 \cdot (-2)^3 = s(n-3), \\ a_0 + a_1 \cdot (-1) + a_2 \cdot (-1)^2 + a_3 \cdot (-1)^3 = s(n-2), \\ a_0 + a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 0^2 + a_3 \cdot 0^3 = s(n-1), \\ a_0 + a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot 1^2 + a_3 \cdot 1^3 = s(n). \end{cases} \tag{1.15}$$

Тоді ми можемо представити матрицю M і отримати обернену їй M^{-1}:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 4 & -8 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M^{-1}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{6} & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6} \end{bmatrix}. \tag{1.16}$$

Коефіцієнти полінома, згідно (1.11), можуть бути отримані як результат множення зворотної матриці на вектор відліків вхідного сигналу s :

$$\mathbf{a} = \mathbf{M^{-1}} \cdot \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{6} & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s(n-3) \\ s(n-2) \\ s(n-1) \\ s(n) \end{bmatrix}. \tag{1.17}$$

Зробимо матричне множення (1.17) і отримаємо вирази для коефіцієнтів полінома:

$$\begin{cases} a_0 = s(n-1), \\ a_1 = \frac{1}{6} \cdot s(n-3) - s(n-2) + \frac{1}{2} \cdot s(n-1) + \frac{1}{3} \cdot s(n), \\ a_2 = \frac{1}{2} \cdot s(n-2) - s(n-1) + \frac{1}{2} \cdot s(n), \\ a_3 = -\frac{1}{6} \cdot s(n-3) + \frac{1}{2} \cdot s(n-2) - \frac{1}{2} \cdot s(n-1) + \frac{1}{6} \cdot s(n). \end{cases} \tag{1.18}$$

З виразу (1.18) можна зазначити, що коефіцієнти полінома залежать від затриманих значень вхідного сигналу $s(n)$. Допускається трактувати формули

(1.18) для розрахунку коефіцієнтів як різницеві рівняння КІХ-фільтра. Тоді розрахунок кожного коефіцієнта буде виконувати свій КІХ-фільтр, і структурна схема фільтру передискретизації може бути представлена, як це показано на рисунку 1.10.

Кожен КІХ-фільтр розраховує один коефіцієнт полінома, після чого вони подаються на схему Горнера для розрахунку поліному при поточному значенні дробової затримки Δ_k. Структура, наведена на рисунку 1.10, має назву фільтра Ферроу (Farrow filter) в честь вченого, котрий вперше застосував подібний фільтр для зміни затримки сигналу [2-5].

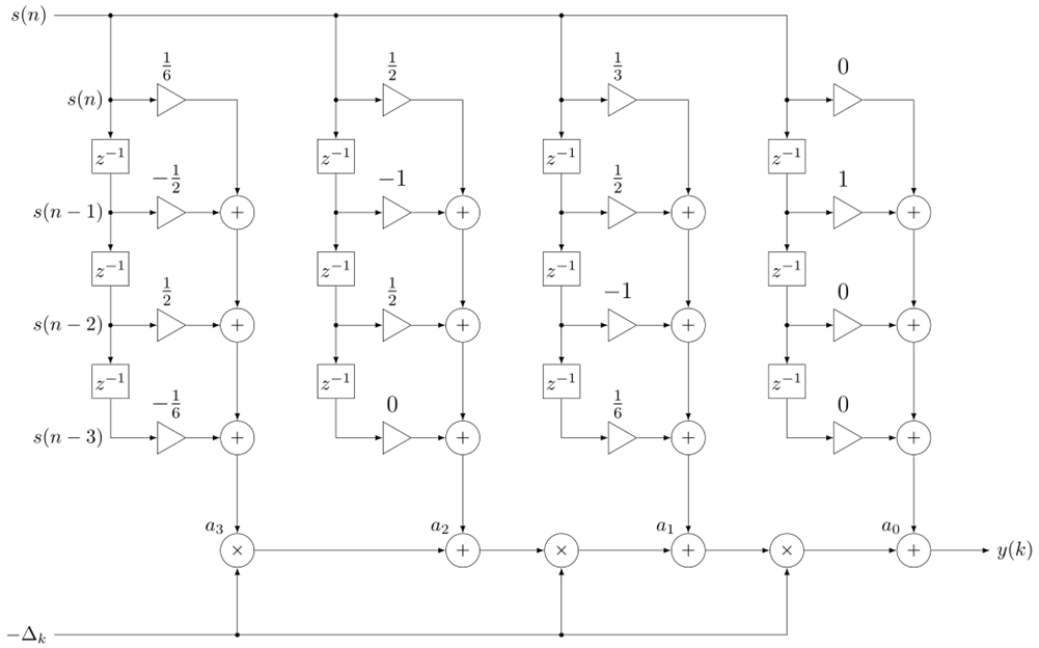


Рисунок 1.10 Структура фільтра Ферроу для цифрової передискретизації сигналів на основі поліноміальної Лагранжевої інтерполяції

Важливо відзначити, що вихід фільтра Ферроу $y(k)$ відстає від вхідного сигналу $s(n)$ на один відлік в одиницях вхідного сигналу (при частоті дискретизації F_s).

Використання фіксованих значень осі абсцис дозволяє позбутися необхідності обернення матриці в реальному часі. Однак фільтр Ферроу також

вимагає значної кількості множень на $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{3}$ і $\frac{1}{2}$. При цьому, в разі реалізації в цілочисельній арифметиці, множення на $\frac{1}{2}$ можна вважати тривіальним, оскільки реалізується як зміщення на один розряд вправо.

1.5 Алгоритм синхронізації випереджаючого і запізнілого стробування

Алгоритм синхронізації з випереджаючим і запізнілим стробуванням (Early-Late Gate, ELG) - алгоритм встановлення синхронізації генерує помилку за допомогою відліків, які є ранніми і запізнілими в порівнянні з ідеальною точкою вибірки [3,8]. Рівняння, що описує роботу синхронізатора:

$$e(k) = y_2(k) - y_1(k) \tag{1.19}$$

$$y_2(k) = x_I\left(kTs + \hat{\tau}\right) \cdot x_I\left(\left(k + 1/2\right)Ts + \hat{\tau}\right) + x_Q\left(kTs + \hat{\tau}\right) \cdot x_Q\left(\left(k + 1/2\right)Ts + \hat{\tau}\right) \tag{1.20}$$

$$y_I(k) = x_I\left(kTs + \hat{\tau}\right) \cdot x_I\left(\left(k - 1/2\right)Ts + \hat{\tau}\right) + x_Q\left(kTs + \hat{\tau}\right) \cdot x_Q\left(\left(k - 1/2\right)Ts + \hat{\tau}\right) \tag{1.21}$$

де $e(k)$- є оцінкою помилки синхронізації символів приймача;

$x_I(kT_s + \hat{\tau})$- це I компонента k-того символу;

$x_Q(kT_s + \hat{\tau})$- це Q компонента k-того символу;

k – індекс прийнятого символу;

$\hat{\tau}$ - сформована часова затримка на основі попередніх оцінок.

Приклад синхронізатора, в основі якого лежить алгоритм з випереджаючим і запізнілим стробуванням, схематично зображено на рисунку 1.11.

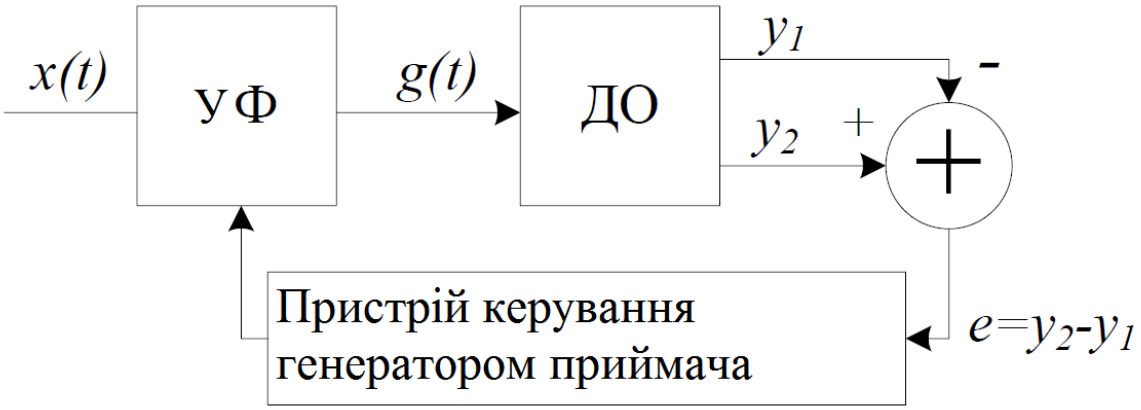


Рисунок 1.11 – Синхронізатор з випереджаючим і запізнілим стробуванням.

Вхідний сигнал надходить в блок узгодженої фільтрації (УФ), з виходу якого сигнал слідує на детектор огинаючої (ДО). На виході ДО вибираються два значення обвідної: в момент часу $(k+1/2)Ts$ (значення y_1) і в момент часу $(k-1/2)Ts$ (значення y_2), де Ts - тривалість символу. Різниця y_1 і y_2 є мірою помилки синхронізації символів приймача і може подаватися на блок управління для подальшої корекції прийому.

Вид сигналу на виході УФ зображений на рисунку 1.12. По осі ординат відкладено рівень сигналу, по осі абсцис - момент часу, в який розглядається відлік, наприклад, τ_e - час вибору запізнілого відліку.

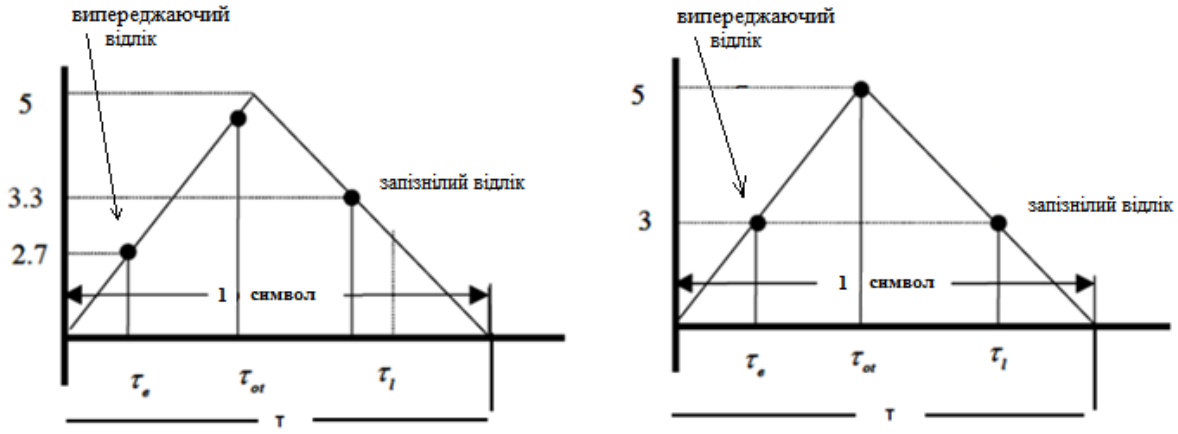


Рисунок 1.12 – Алгоритм з випереджаючим і запізнілим стробуванням

На лівому графіку зображено випадок, коли відлік запізнюється. При цьому відліки, що розглядаються мають різні амплітуди. Ця різниця в рівнях амплітуди використовується для того, щоб обчислити помилку циклу встановлення синхронізації. Як тільки цикл сходиться, ранні та пізні відліки будуть мати однаковий рівень амплітуди, що при відніманні призведе нульвої часової помилки.

Головним недоліком алгоритму є те, що при такому знаходженні помилки синхронізації потрібно, принаймні, три відліки на символ. Розглянутий метод неефективно використовувати для систем з високими швидкостями передачі даних.

1.5.1 Алгоритм Мюллера і Міллера (Mueller and Muller)

Алгоритм Мюллера і Міллера (Mueller and Muller) – алгоритми, який потребує тільки одного відліку на символ [3,8]. Приклад синхронізатора, в основі якого лежить алгоритм Міллера і Мюллера, схематично зображено на рисунку 1.13.

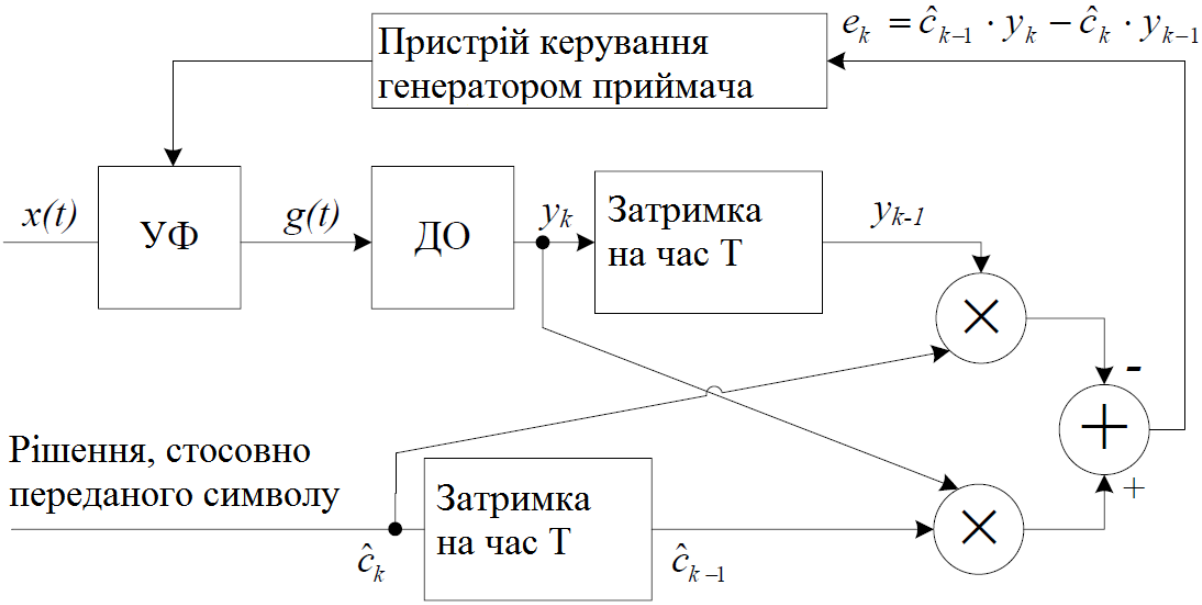


Рисунок 1.13 – Синхронізатор з алгоритмом Мюллера і Міллера

Помилка встановлення синхронізації обчислюється, використовуючи наступне рівняння:

$$e_k = \hat{c}_{k-1} \cdot y_k - \hat{c}_k \cdot y_{k-1} \tag{1.22}$$

де $\widehat{c_k}$- рішення про переданий символ на k-му кроці, y_k- результат узгодженої фільтрації вхідного сигналу на k-му кроці.

На відміну від ELG алгоритму даний алгоритм вимагає знаходження тільки одного значення узгодженої фільтрації вхідного сигналу на проміжку тривалістю T (тобто на цілому символьному інтервалі). Це значення зберігається в пам'яті, протягом часу T. При цьому, також запам'ятовується і рішення, щодо переданого символу, що отримується від схеми прийому. При ідеальній синхронізації результати узгодженої фільтрації на двох різних проміжках (на різних символьних інтервалах) будуть однакові і сигнал неузгодженості e_k буде також дорівнювати нулю. У разі порушення синхронізації сигнал неузгодженості є мірою помилки синхронізації символів приймача і може подаватися на блок управління для подальшої корекції прийому.

1.5.2 Алгоритм Гарднера

Алгоритм Гарднера знайшов широке застосування в багатьох реалізаціях циклів встановлення синхронізації [3,8,9]. Алгоритм використовує два відліки на символ. Помилка для алгоритму Гарднера обчислюється, використовуючи наступні рівняння:

$$e(k) = a_I(k) + a_Q(k) \tag{1.23}$$

$$a_I(k) = x_I((k-1/2)Ts + \hat{\tau})[x_I((k-1)Ts + \hat{\tau}) - x_I(kTs + \hat{\tau})] \tag{1.24}$$

$$a_Q(k) = x_Q((k-1/2)Ts+\hat{\tau})[x_Q((k-1)Ts+\hat{\tau}) - x_Q(kTs+\hat{\tau})] \quad (1.25)$$

де $e(k)$ – є оцінкою помилки синхронізації символів приймача;

$x_I(kT_s + \hat{\tau})$ – це I-та компонента k-того символу;

$x_Q(kT_s + \hat{\tau})$ – це Q компонента k-того символу;

k – індекс прийнятого символу;

$\hat{\tau}$ – сформована часова затримка на основі попередніх оцінок.

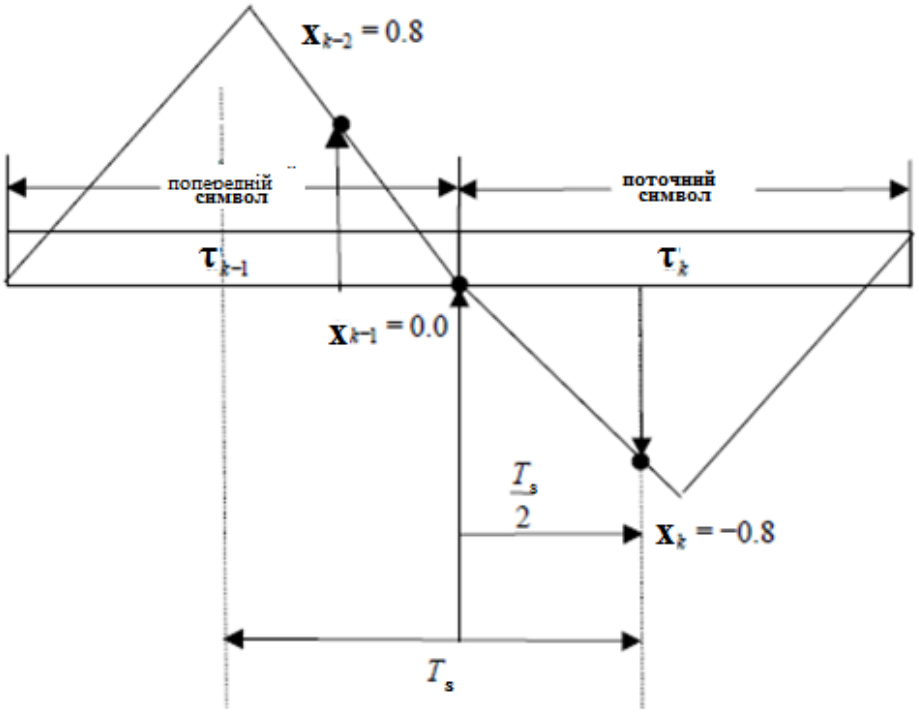


Рисунок 1.14 –Алгоритм Гарднера

Алгоритм приймає рішення стосовно символьної помилки на основі двох відліків в момент часу $((k-1)T_s + \hat{\tau})$ (значення символу $x((k-1)T_s + \hat{\tau})$) і в момент часу $(kT_s + \hat{\tau})$ (значення символу $x(kT_s + \hat{\tau})$), де Ts - тривалість символу. Значення відліків аналізується на перетин нуля, тобто зміну знаків, і тільки при оберненні знаків I чи Q компоненти на поточному відліку відносно попереднього, вираховується час символьної затримки. Різниця

$x((k-1)T_s + \hat{\tau})$ і $x(kT_s + \hat{\tau})$ є мірою помилки синхронізації символів приймача. відмінність в рівнях амплітуди використовується для того, щоб обчислити помилку циклу встановлення синхронізації. Як тільки цикл сходиться, попередній та поточний відліки будуть мати однаковий рівень амплітуди з протилежним знаком, що при відніманні призведе нульової часової помилки.

2. ОЦІНКА ПАРАМЕТРУ ЙМОВІРНОСТІ СИМВОЛЬНОЇ ПОМИЛКИ

Коефіцієнт похибки модуляції (modulation error ratio) призначений для вимірювання співвідношення сигнал-шум (SNR) у системах із цифровою модуляцією. MER використовується щоб визначити продуктивність приймання сигналу у системах зв'язку та розраховується в дБ. MER для N символів розраховується за формулою:

$$MER = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{k=1}^{N} \left(I_k^2 + Q_k^2 \right)}{\sum_{k=1}^{N} \left(e_k \right)} \right) dB, \tag{2.1}$$

MER для k-того символу:

$$MER_k = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left(I_k^2 + Q_k^2 \right)}{e_k} \right) dB, \tag{2.2}$$

Де e_k- це показник різниці ідеальної $\hat{I}_k$ і $\hat{Q}_k$ компоненти від прийнятої I_kта Q_k компоненти та розраховується за формулою:

$$e_k = (I_k - \hat{I}_k)^2 + (Q_k - \hat{Q}_k)^2 \tag{2.3}$$

Де I_k- синфазна складова прийнятого квадратурного сигналу;

Q_k – квадратурна складова прийнятого квадратурного сигналу;

$\hat{I}_k$ і $\hat{Q}_k$ – є ідеальними (або опорними) значеннями для прийнятих сигналів I_k та Q_k;

N – довжина вхідного вектора.

Альтернативної характеристикою визначення якості прийнятого сигналу цифровою системо є величина помилки вектора (EVM – error vector

magnitude), що вимірює продуктивність модулятора або демодулятора з погіршенням сигналу. Ви можете нормалізувати вимірювання відповідно до середньої потужності опорного сигналу, середньої потужності сузір'я. Обчислення значень RMS EVM проводиться по різному для кожного методу нормалізації та наведено у наступних формулах:

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(e_k)}{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(I_k^2 + Q_k^2\right)}} \cdot 100 \tag{2.4}$$

У формулі (2.9) нормалізація вимірювання відповідно до середньої потужності опорного сигналу;

$$EVM_{RMS}(\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(e_k)}{P_{avg}}} \tag{2.5}$$

У формулі (2.10) нормалізація вимірювання відповідно до середньої потужності сузір'я.

де e_k- це показник різниці ідеальної $\hat{I}_k$ і $\hat{Q}_k$ компоненти від прийнятої I_kта Q_k компоненти та розраховується за формулою (8).

I_k- Синфазна складова прийнятого квадратурного сигналу;

Q_k – Квадратурна складова прийнятого квадратурного сигналу;

$\hat{I}_k$ і $\hat{Q}_k$ – Є ідеальними (або опорними) значеннями для прийнятих сигналів I_k та Q_k;

N – Довжина вхідного вектора.

P_{avg} – Це величина усередненої енергії сузір’я.

Визначення EVM_k залежить від того, який метод нормування ви вибрали для обчислення вимірювань. Для методу з опорним сигналом використовується наступна[10]:

$$EVM_k = \sqrt{\frac{e_k}{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(I_k^2 + Q_k^2\right)}} \cdot 100 \tag{2.6}$$

У дослідженні символьного синхронізатора було вирішено використовувати саме EVM як показник якості роботи алгоритмів.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛГОРИТМУ ГАРДНЕРА

Функціональна схема символьної синхронізації, що використовує в якості схеми оцінки тактового неузгодженості алгоритму Гарднера, наведена на рисунку 3.1. На рисунку 3.2 показана модель розглянутої синхронізації в середовищі MATLAB.

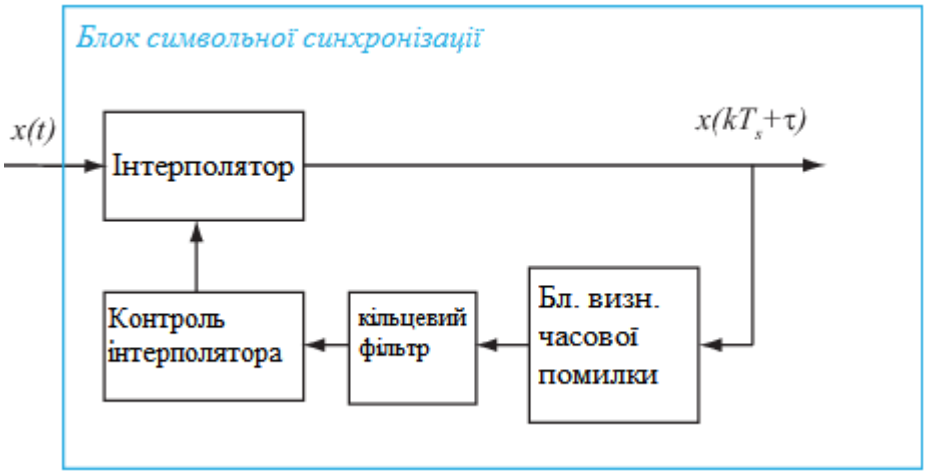


Рисунок 3.1 – Функціональна схема символьної синхронізації

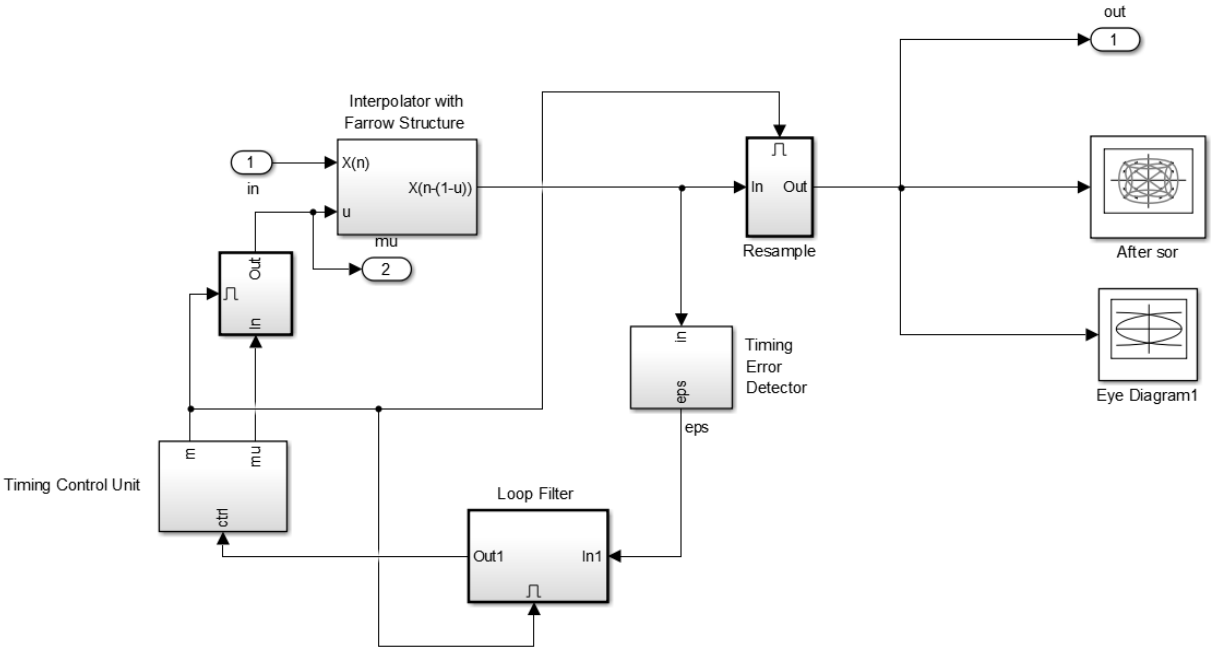


Рисунок 3.2 – Модель алгоритму символьної синхронізації на основі алгоритму Гарднера

Виходячи з [10] в якості інтерполятора був реалізований кубічний інтерполятор Ферроу, який зображений на рисунку 3.3. Такий вид інтерполятора дозволяє легко обчислювати відлік між вхідними відліками з будь-яким положенням (дробовою затримкою).

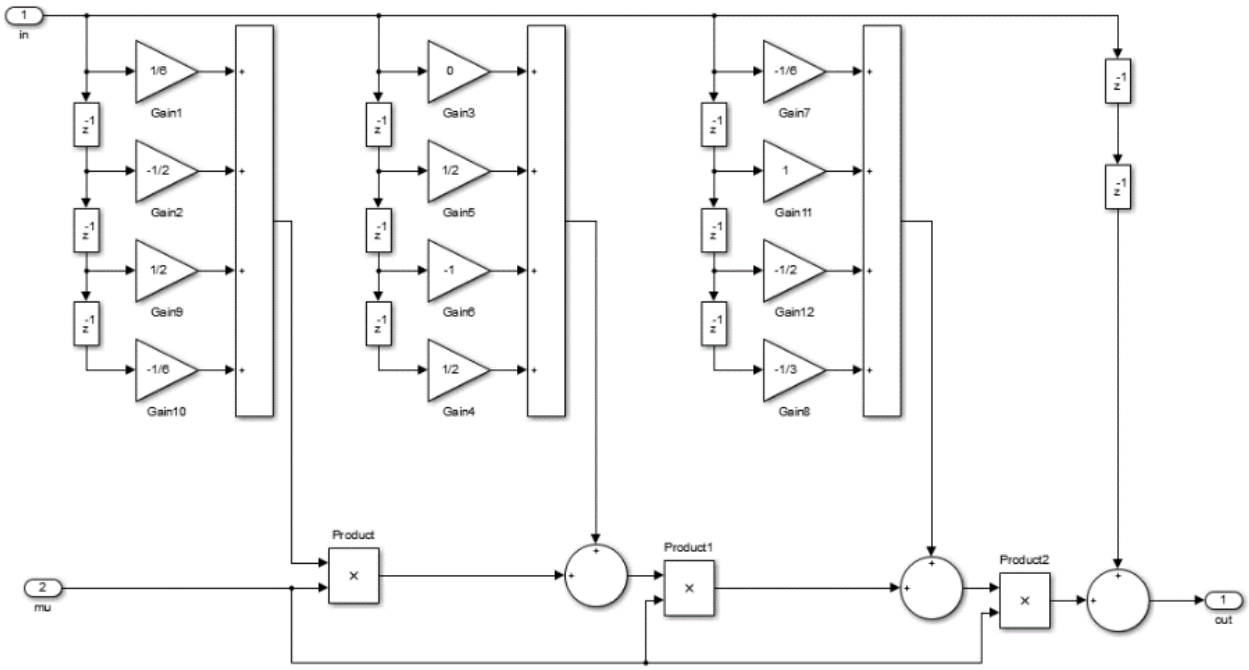


Рисунок 3.3 – Кубічний інтерполятор Ферроу

Сигнал з виходу інтерполятора надходить на схему оцінки тактової неузгодженості, яка показана на малюнку 3.4. Для оцінки неузгодженості використовується алгоритм Гарднера.

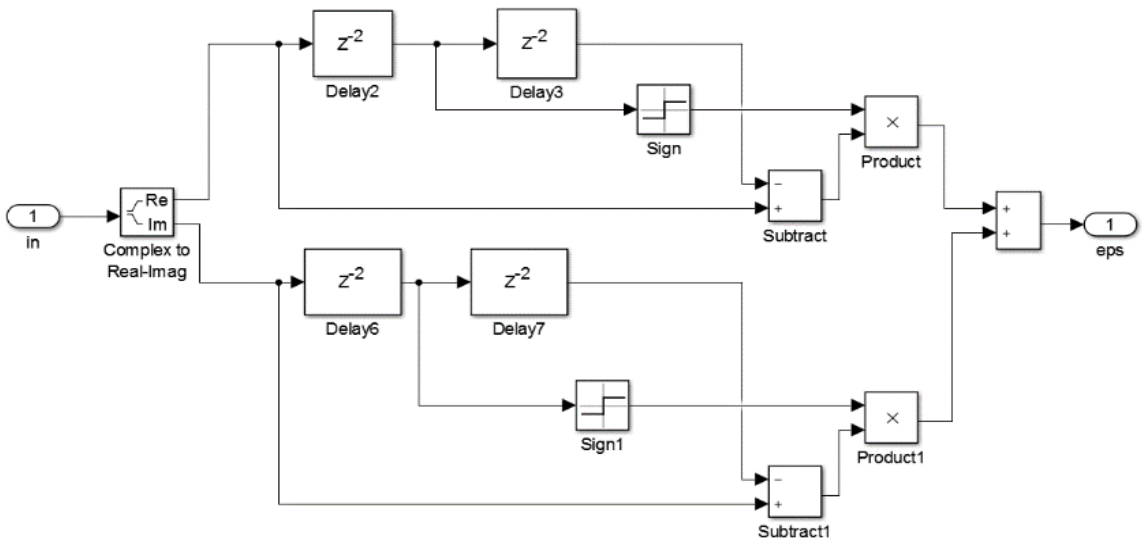


Рисунок 3.4 – Алгоритм Гарднера

Далі для згладжування сигналу помилки слід кільцевий фільтр (КФ). Сигнал з виходу КФ надходить на вхід блоку контролю інтерполятора, який формує дробову затримку (керуючий параметр) для регулювання роботи інтерполятора. В ході виконання роботи, було проведено дослідження властивостей алгоритму Гарднера при використанні модуляції 16 – APSK. Отриманий результат представлений на рисунку 3.5.

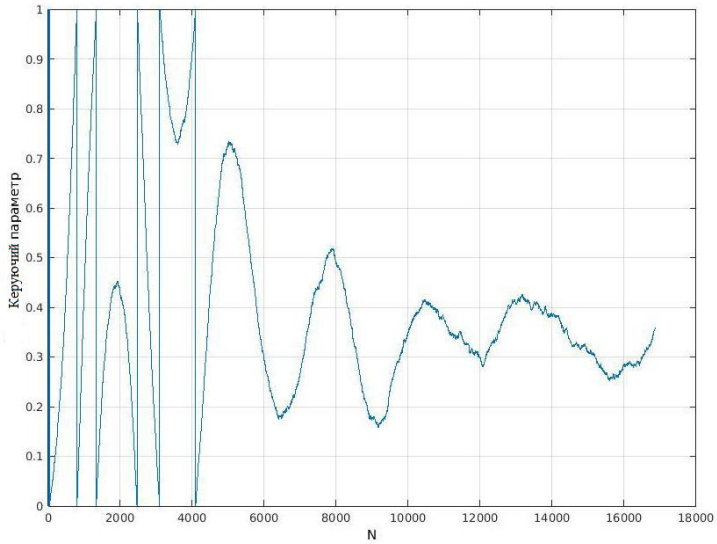


Рисунок 3.5 – Встановлення синхронізації передачі інформації з 16 – APSK модуляцією при Eb/No = 4 дБ

З представлених результатів видно, що алгоритм Гарднера, в разі використання спектрально-ефективних методів модуляції (16-APSK), для встановлення синхронізації вимагає більше 16000 символів, що дуже важливо для проектування високошвидкісної системи передачі даних. Виходячи з цього, на рисунку 3.6 приведена залежність частоти бітових помилок від відношення Eb/No.

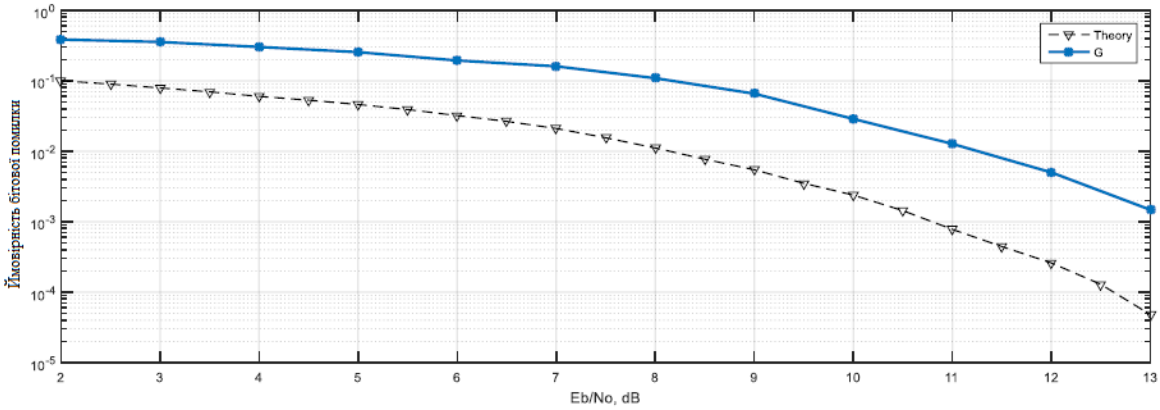


Рисунок 3.6 - Залежність бітових помилок від відношення Eb/No

Таким чином, проведене дослідження показало, що застосування алгоритму Гарднера доцільно при безперервному зв'язку, коли час перехідного процесу некритично. Порівняння методу із альтернативними у наступному розділі.

4. МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМУ СИМВОЛЬНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

У цьому розділі приведено графіки симуляції алгоритмів символьної синхронізації в залежності від керуючих факторів.

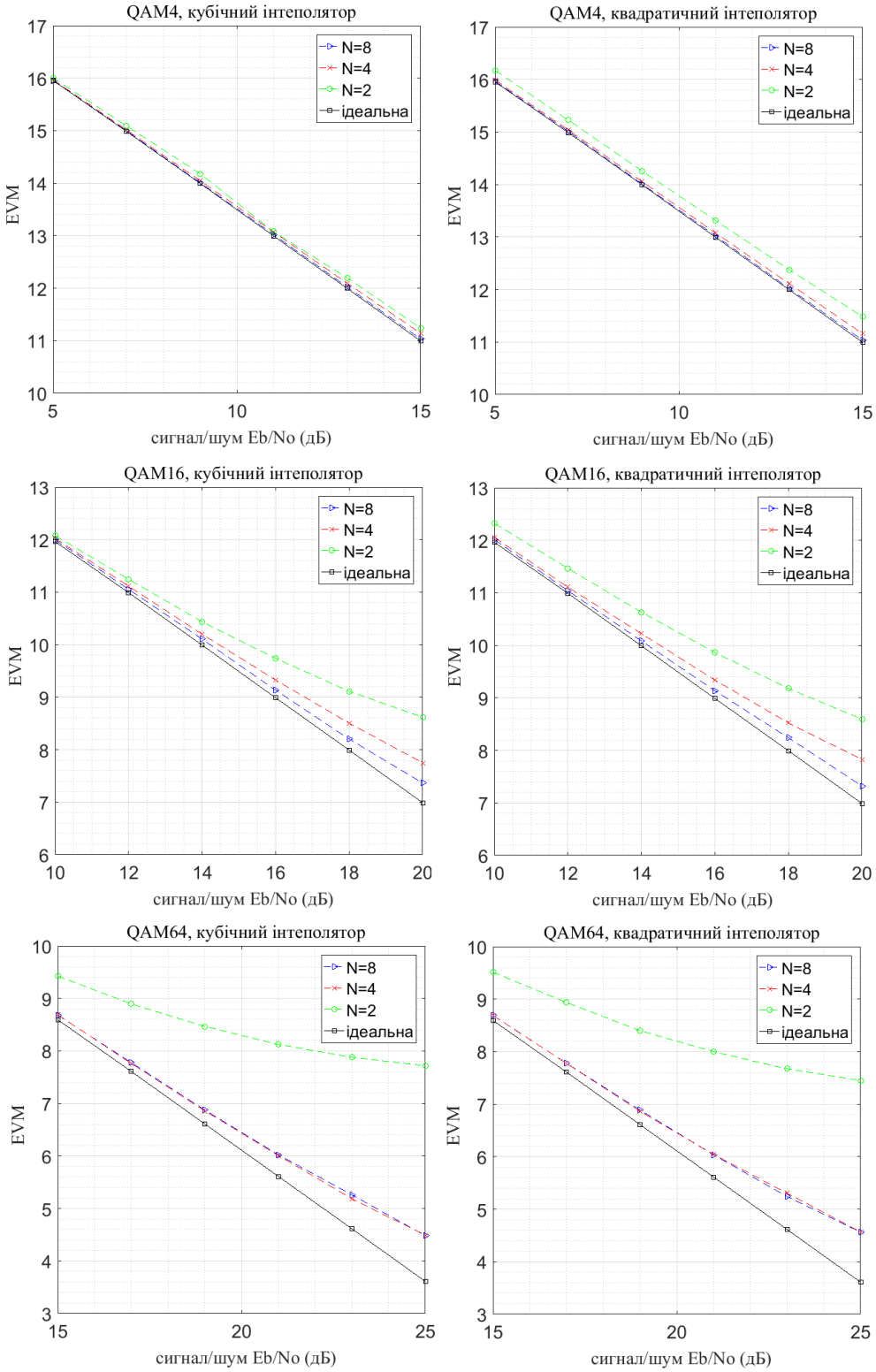


Рисунок 4.1 – Результати порівняння кількості дискретів на символ

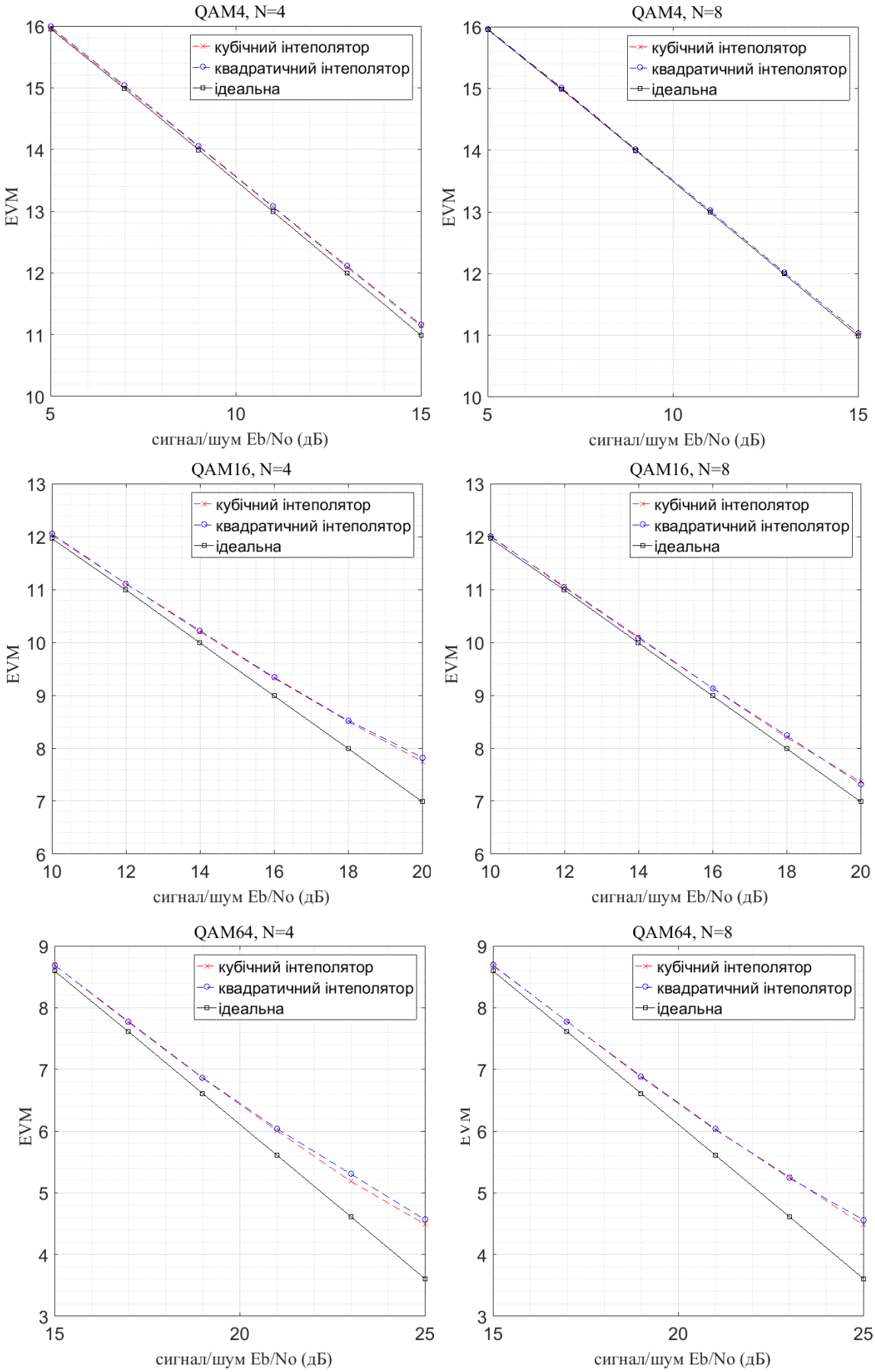


Рисунок 4.2 – Результати порівняння інтерполяторів

На рисунку 4.1 та рисунку 4.2 представлені результати порівняння величини помилки вектора від відношення сигнал/шум для чотирьох видів модуляції QAM4, QAM16, QAM64 та для змінної кількості дискретів на символ N=2,4,8. На рисунку 4.1 зображено залежність помилки від кількості дискретів на символ при кожному з видів модуляції, яка вказує на суттєве погіршення синхронізації сигналу при зменшенні кількості дискретів менше 4, тобто N=2. Хоч при збільшенні кількості дискретів, N=8, суттєвого зменшення помилки не відбувається.

На рисунку 4.2 зображено графіки із фіксованою кількістю дискретів та різними інтерполяторами в залежності від виду модуляції. З величини помилки вектора можна зробити висновок, що різниця при квадратичному та кубічному інтерполяторах не дає суттєвих змін у якості символьної синхронізації хоча потребує більших обчислювальних затрат.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Так як виконання магістерської дисертації потребує використання засобів обчислювальної техніки, то в цьому розділі буде доцільним розглянути питання, що пов'язані з забезпеченням безпечних умов праці при їх використанні, а також питання з електробезпеки та безпеки в надзвичайних ситуаціях (НС).

Згідно з вимог ДСанПіН 3.3.2.007 та ДНАОП 0.00-1.31-99, в першу чергу необхідно визначити основні потенційно небезпечні і шкідливі фактори, що виникають при експлуатації ВДТ ПЕОМ, вплив цих факторів на користувачів ВДТ, розглянути принципи їх нормування, а також передбачити можливі комплексні заходи щодо запобігання шкідливого впливу цих факторів на людину.

Також в цьому розділі визначено основності потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори, запропоновано технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії, а також сформульовано основні заходи з безпеки життєдіяльності.

5.1 Визначення основних потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів

При виконанні цієї роботи, основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами, які пов'язані з використанням ПЕОМ є наступні фактори:

- електромагнітне та рентгенівське випромінювання ВДТ, ПЕОМ;

- можливість поразки електричним струмом;

- механічні шуми, які пов’язані з роботою принтера і вентиляційної системи комп’ютера;

- значна напруга зорових органів і пов’язане з цим перевтомлення користувача ПЕОМ;

- значне навантаження на пальці і кисті рук, що при відсутності профілактики і медичного контролю, може викликати професійні захворювання,

- тривале перебування в одному й тому ж самому положенні сидячи, що викликає застійні явища в організмі людини;

- електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону;

- випромінювання оптичного діапазону (ультрафіолетове, інфрачервоне і випромінювання видимого діапазону);

- електростатичне поле;

- відблиски на екрані монітора

5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Вимоги щодо організації робочих місць користувачів ВДТ, ПЕОМ

За даними Всесвітньої організації охорони здоров’я професійна діяльність користувача ПК маже в окремих випадках приводити до порушення функцій зорових аналізаторів, кістково - м’язової системи

(примусова поза) і порушень, зв’язаних зі стресовими ситуаціями і нервово - емоційною напругою при роботі.

Комп’ютерна техніка, яка встановлена в приміщенні лабораторії, є сучасною технікою, виконаною з урахуванням багатьох вимог охорони праці. Зокрема, ВДТ ПЕОМ мають тип LR/NI. Тип (Low Radiation) має низький рівень випромінювання екрана монітора, а тип NI (Non - Interlaced) має порядкове розгорнення, що сприяє меншому стомленню очей при роботі з відео монітором.

ВДТ ПЕОМ є пристроєм для візуального зображення інформації, збереженої електронним засобом. Він складається з дисплейного екрана, системного блока обробки виведеної інформації, і клавіатури.

ВДТ ПЕОМ є джерелом як електромагнітних випромінювань (м’якого рентгенівського, ультрафіолетового, інфрачервоного та радіочастотного діапазону) так і електростатичного поля.

Класифікація ВДТ стосовно до проблеми їхнього впливу на здоров'я базується головним чином на конструктивних особливостях і визначених параметрах самого дисплея (наприклад, можливість одержання багатокольорового, позитивного, негативного зображення).

Найбільш широко поширені ВДТ з електронно-променевими трубками (ЕПТ), хоча використовуються також ВДТ з рідино кристалічними дисплеями, менше поширені ВДТ із плазменими і електролюмінісцентними дисплеями. Розглянемо ВДТ на основі ЕПТ. Принципи дії і конструкція ЕПТ однакові і не залежать від того, чи застосовуються вони в телевізорах, ВДТ або інших пристроях.

Проаналізуємо основні потенційно шкідливі і небезпечні виробничі чинники, що виникають у процесі експлуатації ВДТ на основі ЕПТ.

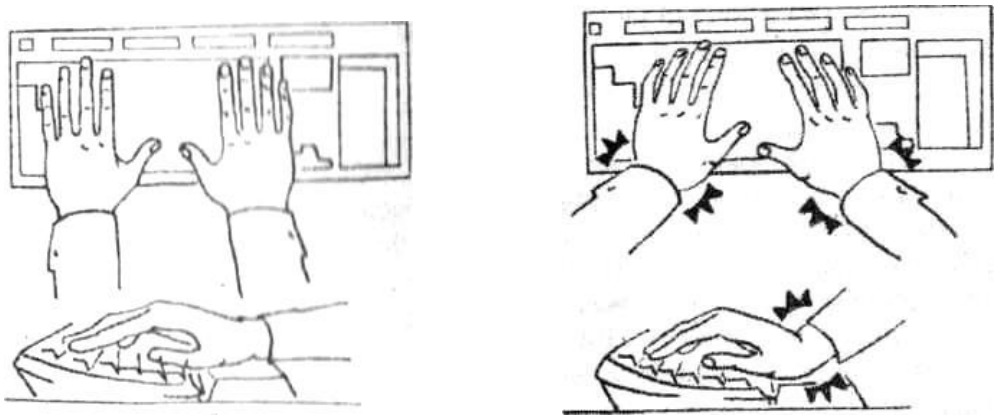
Випромінювання НВЧ діапазону, ультрафіолетове, НРВ іонізують повітря, змінюють його хімічний склад (у робочій зоні утворяться O_3, NO, H_3O, HC_2 і ін.). Робота ЕОМ супроводжується виділенням надлишкового тепла, що призводить до порушення параметрів мікроклімату в робочій зоні.

Тривала робота за комп'ютером при неправильному, з фізіологічної точки зору, положенні тіла може викликати в організмі людини такі види захворювань, як сколіоз - дугоподібне викривлення хребта, чи остеохондроз - дистрофічний процес у кістковій та хрящовій тканині. Частіше всього користувачі комп’ютерної техніки скаржаться на біль у руках, плечових суглобах, шиї, у верхній частині ніг та у спині. Основні симптоми захворювань, що пов’язані з постійним інтенсивним використанням клавіатури, це больові відчуття у суглобах та м'язах кистей рук, оніміння та дуже повільна рухливість пальців, судоми м'язів кистей рук, поява ниючого болю в ділянках зап'ястка.

Саме праця за клавіатурою потребує найбільш інтенсивної динамічної роботи кістково-м’язового апарату кистей рук і одночасно статичного напруження м'язів передпліччя і плеча. Виконання однотипних, фізично неважких рухів кистей, що здаються зовсім необтяжливими для людини, можуть призвести навіть до функціональних змін в її організмі, при цьому розвиватися вони можуть непомітно протягом кількох років.

Виникненню захворювань кістково-м'язового апарату кистей рук сприяє неправильне положення тіла щодо клавіатури, значне відхилення ліктів від тулуба нераціональне взаємне спрямування передпліччя та кистей

рук. На рис.5.1 наведено неправильне та правильне положення кисті та передпліччя стосовно клавіатури.



а) б)

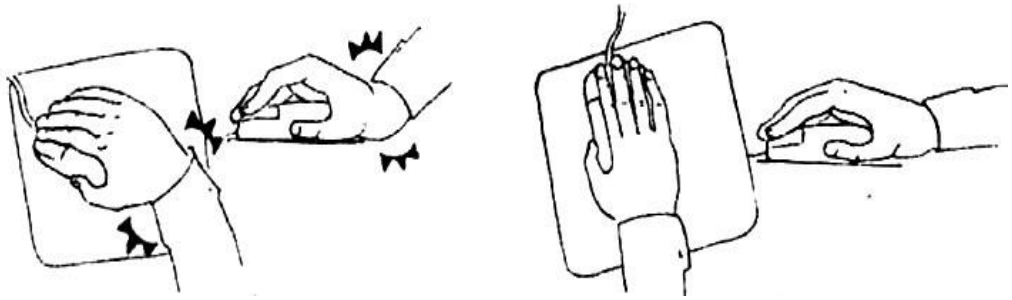
Рисунок 5.1 — Положення кисті та передпліччя стосовно клавіатури: а - неправильне; б - правильне

Слід зауважити, що не тільки робота за клавіатурою призводить до виникнення порушень у кістково-м'язовому апараті рук. Як вже було сказано вище, використання в роботі такого пристрою як «миша», також несприятливо впливає на організм користувача комп'ютерної техніки. Маніпулюючи «мишею» людина здійснює велику кількість дрібних однотипних рухів, що призводить до постійного навантаження на кисть руки, передпліччя та плече. Все це обумовлює появу неприємних, а згодом і болісних відчуттів у ділянці зап'ястка, у ліктьовому і особливо плечовому суглобах.

На рис.5.2 показано правильне та неправильне положення кисті та передпліччя при роботі з пристроєм типу «миша».

Таким чином, можна констатувати, що основне перенапруження опорно-рухової системи людини при роботі з комп’ютерною технікою

спричиняється, в першу чергу, багатогодинною напруженою роботою в одноманітному положенні сидячи, а значить і обмеженою загальною руховою активністю (гіподинамією), а також однотипними інтенсивними циклічними навантаженнями, які мають місце при роботі з клавіатурою та з пристроєм типу «миша».



а) б)

Рисунок 5.2 — Положення кисті та передпліччя при роботі з пристроєм типу «миша»: а - неправильне; б - правильне

Крім того, праця користувачів персональних комп'ютерів супроводжується активізацією уваги й інших вищих психічних функцій, а також може супроводжуватися порушенням режиму праці і відпочинку

5.2.2 Електробезпека

Все наявне в лабораторії електроустаткування можна віднести до I (системні блоки) та II (ВДТ) класів за електрозахистом (ГОСТ12.2.007.0-75).

Вимірювальні прилади мають 0I клас, а допоміжне обладнання – III клас за електрозахистом.

Помешкання лабораторії по рівню небезпеки поразки людей електричним струмом згідно ОНТП 24-86 та ПБЕ можна віднести, до помешкань без підвищеної небезпеки, тому що:

- відносна вологість повітря не перевищує 75%;
- матеріал підлоги (паркет) є діелектриком;
- температура повітря не досягає значень, більших 35 °С;
- відсутня можливість одночасного доторку людини до з'єднаних із землею металоконструкцій будівлі, технологічних апаратів, механізмів і т.п., з одного боку, і до металевих корпусів електроустаткування - з іншого боку;
- відсутні хімічно агресивні середовища.

Електромережа трьох-фазна з глухо заземленою нейтраллю, із зануленням і повторним заземленням нульового проводу відповідно до вимог ПБЕ та ПУЕ. Мережа обладнана автоматом струмового захисту, розрахованого на струм 10 А. Час спрацювання автомату 0,1с.

Для того, щоб не допустити ураження людини електричним струмом при виникненні аварійних ситуацій необхідно заземлити все обладнання, що працює від мережі 220В, 50Гц. Опір нульового проводу повинен бути таким, щоб при замиканні на корпус або нульовий провід виникав струм короткого замикання, сила якого повинна перевищувати в 1,4 рази номінальний струм спрацювання автомата струмового захисту (при струмі короткого замикання менше 100А).

$$I_{kz} = \frac{U_\phi}{R_0 + R_\phi + Z_{TR}}, \text{ А}$$

де $U_\phi = 220\ B$ - напруга фазного проводу;

$R_0 = 0{,}8\ Ом$ - опір нульового проводу;

$R_\phi = 1{,}9\ Ом$ - опір фазного проводу;

$Z_{TR} = 0{,}12\ Ом$ - еквівалентний опір трансформатора.

$$I_{КЗ} = \frac{220}{0,8+1,9+0,12} = 78,01$$

Визначаємо коефіцієнт кратності, відношення $I_{кз}$ до $I_{ном}$, де $I_{ном}$=10А – це номінальний струм, а $I_{кз}$ – це максимальний струм короткого замикання.

$$K = \frac{I_{кз}}{I_{ном}} = \frac{78,01}{10} = 7,8$$

Таким чином струм короткого замикання при виникненні аварійної ситуації в 7,8 рази перевищує номінальний струм спрацювання автомата, що задовольняє встановленим нормам (K > 1,4 при $I_{кз}$ < 100 A) .

Опір заземлюючих пристроїв не перевищує значень встановлених ГОСТ12.1.030-81 ($R_з$ < 4 Ом) .

Виконано всі необхідні заходи щодо електробезпеки відповідно до ГОСТ12.3.019-80 та ПУЕ. Додаткових заходів по електробезпеці впроваджувати не потрібно.

5.2.3 Оптичне випромінювання монітору

Як вказувалося раніше, енергія електронного пучка за допомогою люмінофора перетвориться в тому числі й у випромінювання оптичного діапазону, що містить іонізуюче ультрафіолетове (УФВ), видимого діапазону й інфрачервоне (ІЧВ) випромінювання.

УФВ залежить від використовуваного складу люмінофору й в основному пов'язано з зелено-блакитними видами люмінофору, а не з жовто-жовтогарячими. Інтенсивність випромінювання видимого діапазону 400-700 нм залежить від відстані. Яскравість випромінювання від екрана залежить від типу ЕПТ і анодної напруги.

Відповідно до НРБУ-97 визначається нормування іонізуючого випромінювання. Щільність потоку УФВ в області А не повинна перевищувати значень, зазначених у таблиці 5.1, а ІЧВ - у таблиці 5.2.

Таблиця 5.1

Область випромінювання	Діапазон довжин хвиль, нм	Припустима щільність потоку, Вт/м^2
А	400 - 315	10
В	315 - 280	0,01
С	280 - 200	0,001

Таблиця 5.2

Джерело випромінювання	Опромінення поверхні тіла людини, %	Припустима щільність потоку ІЧВ, Вт/м^2
Нагріта поверхня	>50	35
	25... 50	70
	<25	100

Для ВДТ, які використовуються фактичне значення щільності потоку УФВ і ближнього ІЧВ по паспортним даним істотно нижче чинних норм відповідно до (Санітарних норм мікроклімату і виробничих помешкань №455988) і не мають загрози для користувача.

5.2.4 Електричне поле

Джерелом електростатичного поля є напруга, підведена до аноду ЕПТ, що для різних типів кінескопів лежить у межах 6-30 кВ. На ЕПТ накопичується електростатичний заряд. Розмір цих зарядів залежить від таких чинників:

- потенціалу розгону для прискорення руху електронів у напрямку до кінескопу;
- накопичення заряджених часток на поверхні кінескопу (який буде зменшувати результуюче поле);
- - вологості повітря.

На відстані 0,1-0,5 м від екрана напруженість електричного поля слабко залежить від відстані і її можна вважати постійної, далі вона зменшується обернено-пропорційно відстані, а на великих відстанях – обернено-пропорційно квадрату відстані. Максимальна напруженість поля знаходиться у самої поверхні екрана.

Для учнів і студентів, відповідно до «Тимчасової санітарної норми і правила устрою устаткування, утримання і режиму роботи на ЕОМ і ВДТ у кабінетах обчислювальної техніки і дисплейних класів усіх типів середніх навчальних закладів» № 5146-89, напруженість електростатичного поля при роботі на ВДТ повинна бути не більш 15 кВ/м, що й забезпечується у використаному ВДТ.

5.2.5 Іонізація

Під час роботи ВДТ при наявності радіовипромінювань високих частот, сильних електричних полів, а також НРВ в повітрі закритих

помешкань створюється підвищене утримання позитивних і негативних легких іонів.

Експериментально встановлено, що аероіони є найбільш чутливим фізичним індикатором забруднення повітря, а головне - роблять безпосередній вплив на здоров'я людини. Негативні іони діють цілюще на організм, підвищуючи його опір, у той час як позитивні іони гальмують життєдіяльність організму і сприяють розвитку психічних захворювань.

Кількість легких аеро-іонів повинно відповідати вимогам «Санітарно-гігієнічних норм припустимих рівнів іонізації повітря виробничих і суспільних помешкань» №2152-80, що представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 Мікроклімат робочих зон

Рівні	Кількість іонів в 1 $см^3$ повітря позитивних, n^+	негативних, n^-	Коефіцієнт полярності, □
Мінімально необхідний	400	600	-0,2
Оптимальний	1000-3000	3000-5000	-0,67…0
Максимально припустимий	50000	50000	0,05…0,05

В усіх помешканнях з ПЕОМ параметри мікроклімату повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 і дотримуватися оптимальні норми:

- у холодні періоди року температура повітря, швидкість його прямування і відносна вологість повітря повинні відповідно складати: 22-24°С, 0,1м/с, 60-40%; температура повітря може коливатися в межах від 21 до 25°С при зберіганні інших параметрів мікроклімату в зазначених вище межах;

- у теплі періоди року температура повітря, його рухливість і відносна вологість, повинні відповідно складати: 23-25 °С, 0,1-0,2м/с, 60-40%; температура повітря може коливатися від 22 до 26 °С при зберіганні інших параметрів мікроклімату в зазначених вище межах.

5.3 Заходи щодо нормалізації умов праці

Для усунення шкідливого впливу НРВ на організм інженерів-програмістів можна рекомендувати скоротити час перебування за екраном дисплея до 4 годин у зміну, причому після 2 годин безупинної роботи радиться 30-хвилинна перерва (бажано на відкритому повітрі).

З метою автоматичної підтримки параметрів мікроклімату в необхідних межах протягом всіх сезонів року, очищення повітря від пилюки і шкідливих речовин, зниження рівня іонізації в помешканні лабораторії провадиться вентиляція за допомогою двох витяжних вентиляторів типу АИСИ-4 і щоденне вологе прибирання.

Світильники розташовані в два ряди і під’єднані до різних фаз електромережі для усунення мерехтіння світлового потоку (коефіцієнт пульсацій менше 10%).

Для ослаблення шкідливого впливу електростатичних полів у лабораторії застосовуються захисні скляні фільтри (екрани) з

електропровідним покриттям, що має відвід для заземлення, що прикріплюються на екран монітора.

Для зниження рівня шуму в лабораторії використовується шумопоглинаюче облицювання з перфорованим покриттям: гіпсові плити товщиною 7-9 мм із заповненням із склотканини.

5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в НС регламентується ПЛАС. Основними складовими частинами ПЛАС є розробка технічних рішень та організація заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу при виникненні НС, а також вирішення питань з пожежної безпеки.

5.4.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи систем оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації

Розміри зон оповіщення, черговість оповіщення та час початку оповіщення людей в окремих зонах визначаються, виходячи з умов забезпечення безпечної та своєчасної евакуації людей у разі виникнення НС.

Оповіщення про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямок руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;
- трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;

- розміщенням знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO 6309;

- ввімкненням евакуаційних знаків «Вихід»;

- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових покажчиків напрямку евакуації.

Кількість оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідну чутність у всіх місцях постійного чи тимчасового перебування людей.

У місцях, де є небезпека механічного ушкодження оповіщувачів, повинен бути забезпечений їх захист, що не порушує працездатності оповіщувачів. Встановлення звукових та мовних оповіщувачів у виробничих приміщеннях повинно виключати можливість концентрації та нерівномірного розподілу звуку.

Оповіщувачі повинні підключатися до мережі без роз'ємних пристроїв і не мати регуляторів гучності. Сигнали оповіщення про пожежу повинні відрізнятися від сигналів іншого призначення. Комунікації системи оповіщення людей про пожежу можуть проектуватися суміщеними з радіотрансляційної мережею будівлі.

Електропостачання, заземлення, занулення, вибір та прокладання мереж оповіщення приймаються згідно з вимогами ДБН В.2.5-56-2014.

Управління системою оповіщення слід передбачати з приміщення пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення. Вимоги до такого приміщення приймаються за аналогією з вимогами до приміщень чергового персоналу з ДБН В.2.5-56-2014.

5.4.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив, повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку органи ДСНС, вказати при цьому адресу, місце виникнення НС, наявність людей, а також своє прізвище;

- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;

- організувати оповіщення людей про НС;

- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;

- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установи, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні :

- перевірити, чи викликано підрозділ ДСНС;

- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;

- у разі загрози життю людей негайно організувати їхню евакуацію та рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації НС;

- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;

- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації наслідків НС;

- організувати зустріч підрозділів ДСНС, надати їм допомогу у локалізації та ліквідації НС.

Після прибуття підрозділів ДСНС повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

5.4.3 План евакуації при НС

У науково-дослідній лабораторії є план евакуації у випадку виникнення НС. Максимальна віддаленість робочих місць від евакуаційних виходів і ширина евакуаційних проходів відповідає вимогам СНиП 2.04.09-85. Час евакуації відповідає вимогам СНиП 2.01.02-85. Відсутній запасний евакуаційний вихід, що є головним недоліком з точки зору безпечної евакуації людей і це питання потребує доопрацювання.

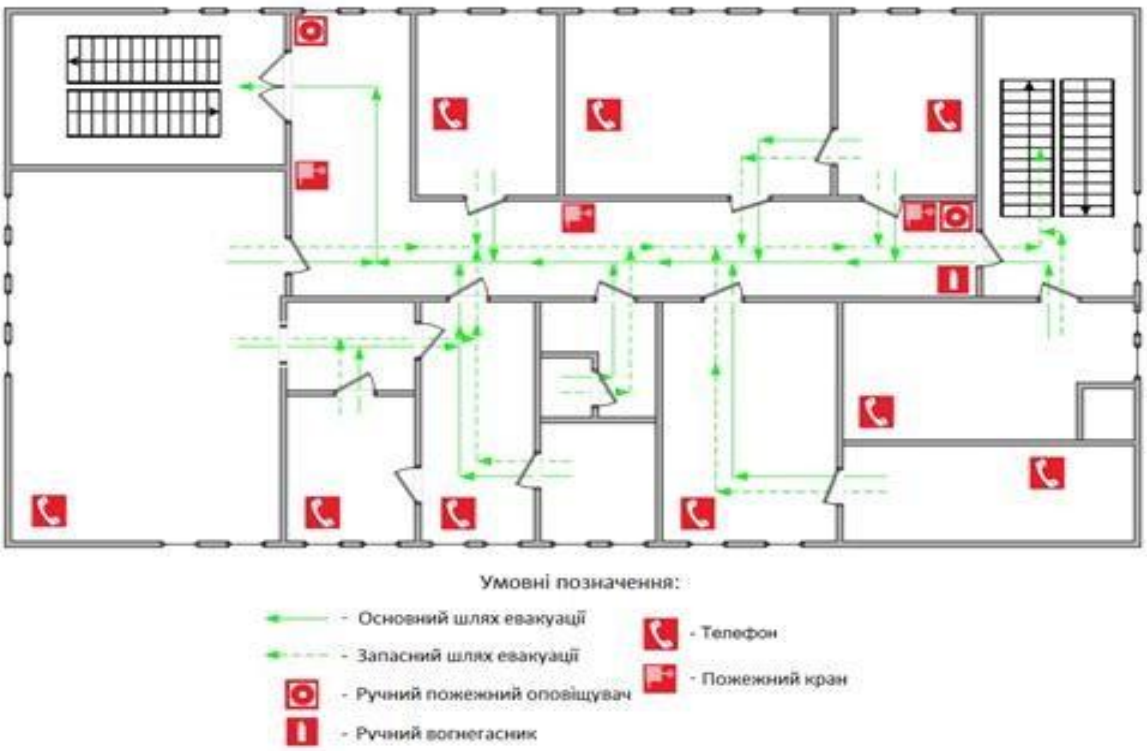


Рисунок 5.3 — План евакуації

5.4.4 Пожежна безпека

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 робоче приміщення лабораторії відноситься до категорії В по вибухопожежній небезпеці. Відповідно до

ПУЕ-87 та ДНАОП 0.00-1.32-01 клас робочих зон приміщення лабораторії по пожежонебезпеці - П-IIа. Можливими причинами пожежі в приміщенні є несправність електроустаткування, коротке замикання проводки, і порушення протипожежного режиму (використання побутових нагрівальних приладів, паління).

У зв'язку з цим, відповідно до вимог ПБЕ та ПУЕ, необхідно передбачити наступні заходи:

- постійний контроль стану засобів пожежогасіння;
- застосування автоматичних установок пожежної сигналізації;
- організація за допомогою технічних засобів, включаючи автоматичні, своєчасного оповіщення та евакуації людей.
- контроль за станом ізоляції струмоведучих дротів;
- заборонено паління в приміщенні;
- неприпустимість знаходження у приміщенні горючих і вибухонебезпечних речовин;
- допуск до роботи осіб, які в установленому порядку пройшли навчання, інструктаж і перевірку знань з пожежної безпеки.

Для гасіння пожежі в робочому приміщені лабораторії (клас пожежі «Е»- наявність електрообладнання під напругою) використовуються вогнегасники ОП-1 — «Момент» (2 шт.). Додатково в коридорі розташовані вогнегасники ОХП-10. Також на сходовій клітці розташований пожежний кран. Така кількість первинних засобів пожежогасіння відповідає вимогам ДСТУ 3675-98 та ISO3941-77, якими передбачене обов'язкова наявність двох

вогнегасників до 100 м^2 площі підлоги для приміщення типу конструкторське бюро.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56-2014 робоче приміщення лабораторії необхідно оснастити системою автоматичної пожежної сигналізації.

Будинок має два евакуаційних виходів: через головний хід і додатковий евакуаційний вихід. Шляхи евакуації відповідають установленим нормам. Двері відкриваються назовні. Коридор веде до двох сходових кліток, одна з яких виходить безпосередньо на вулицю, а друга має вихід на вулицю через вестибюль і головний вхід. Сходова клітка виконана з не пальних матеріалів. Сходи мають природне бічне освітлення і штучне евакуаційне освітлення. Сходові площадки ширше коридорів. Усі співробітники ознайомлені з планом евакуації.

Дотримано усі вимоги СНиП 2.09.02-85 по вогнестійкості будинку і ширині евакуаційних проходів і виходів із приміщень назовні. Значення основних параметрів шляхів евакуації приведені в табл.5.4.

Таблиця 5.4 — Характеристики і норми еваковиходів

Параметр	Фактичне значення	Норма
Висота дверних прорізів	2,0 м	Не менше 2 м
Ширина дверних прорізів	0,8 м	Не менше 0,8 м
Ширина проходу для евакуації	Більше 1,5 м	Не менше 1 м
Ширина коридору	2 м	Не менше 2 м
Число виходів з коридору	2	Не менше 2
Ширина сходового маршу	1,2 м	Не менше 1 м
Висота поруччя сходів	1 м	Не менше 0,9 м

У приміщенні є план евакуації. Мінімальний час евакуації в разі виникнення пожежі відповідає вимогам СНиП 2.01.02-85, а максимальне видалення робочих місць від евакуаційних виходів вимогам СНиП 2.09.02-85.

У приміщенні виконуються усі вимоги по пожежній безпеці відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні».

6. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Даний розділ присвячено висвітленню маркетингових аспектів створення стартап-проекту. Метою розділу є проведення маркетингового аналізу для оцінки та формування заходів із ринкового впровадження, а також можливих напрямків реалізації цього впровадження [6].

6.1 Опис ідеї проекту

В підрозділі проведено аналіз змісту ідеї, наведено можливі напрямки застосування, показано основі вигоди які можна отримати використовуючи розроблений метод та відмінності від існуючих методів.

Таблиця 6.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Дослідження впливу параметрів інтерполятора в складі системи символьної синхронізації та характеристики системи зв’язку з квадратурними видами модуляції.	Наука	Підвищена ефективність вибору символьного інтерполятора у системах зв’язку із символьною синхронізацією на основі ймовірності символьної помилки.

Основним конкурентом можуть бути системи символьної синхронізації з великою обчислюваною спроможністю для реалізації інтерполяційних фільтрів високих порядків та швидкісні АЦП з великою

кількістю вибірок сигналу на символ. Досліджені параметри дозволяють балансувати у виборі якості символьного синхронізатора та вартості більш високих обчислювальних потужностей чи швидкісних АЦП.

Таблиця 6.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1	Простота					✓
2	Дешевизна					✓
3	Швидкодія					✓

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Для реалізації пропонується такі варіанти методу визначення оптимальних параметрів:

Суть першого варіанту полягає у фіксації конкретного інтерполятора з однією модуляцією і зміна кількості відліків на символ..

Суть другого варіанту методу, передбачає порівняння інтерполяторів при фіксованій модуляції та кількості дискретів на символ.

Таблиця 6.3 Технологічна здійсненність проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Дослідження впливу параметрів інтерполятора в складі системи символьної синхронізації.	І-ий варіант	Так	Так
2		ІІ-ий варіант	Так	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: І-ий варіант				

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В межах цього підрозділу проводиться визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту. Визначення ринкових можливостей дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. У ході даних досліджень вивчають особливості і перспективи розвитку попиту на конкретні товари, позиції конкурентів на ринку, їх сильні і слабкі сторони, динаміку цін тощо. На основі цієї інформації розробляють стратегію і тактику маркетингу. Важливою характеристикою ринку є його місткість, під якою розуміють максимально можливий обсяг продажу певного товару протягом року, виражений у натуральних або вартісних одиницях [6].

Таблиця 6.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1
2	Загальний обсяг продаж, ум. од.	
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Невідома
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	Невідома

За результатами аналізу важно зробити висновок щодо привабливості для входження за попереднім оцінюванням.

Визначимо потенційні групи клієнтів та їх характеристики. Також потрібно сформувати орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 6.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару

1	Дослідження впливу параметрів інтерполятора в складі системи символьної синхронізації	Науковці	Невідомі	Точність, швидкість обрахунку, адекватність результату

Проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Таблиця 6.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Новий алгоритм	Впровадження нової розробленої формули для розрахунку, аналогічної як у цьому проекті	Вихід з ринку

Таблиця 6.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії

1	Новий модифікований алгоритм	Додавання нових функцій та способів розрахунку, що покращують метод	Розроблення цього функціоналу

Проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 6.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	У чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції – чиста	Ніхто не може впливати на загальну ситуацію на ринку	Не значний
За рівнем конкурентної боротьби – національне	Дане підприємство відомо по усьому світу	Значний
За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Конкуренція виконується в рамках однієї галузі	Значний
Конкуренція за видами товарів – невідомо		
За характером конкурентних переваг – цінова	Товар даного підприємства має дуже високу вартість	Значний

За інтенсивністю – невідомо		

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції у галузі.

Таблиця 6.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Градієнтний метод	Метод імпульсу	Невідомо	Невідомо	Невідомо
Висновки	Маючи чисте положення на ринку розробник цього методу не буде звертати увагу на конкурентів	Є можливість виходу на ринок	Невідомо	Невідомо	Невідомо

За результатами аналізу можна зробити висновок, що працювати на даному ринку, зважаючи на чисту конкурентну ситуацію, потрібно. Для поширення продукту він повинен володіти рядом факторів, які відрізняють його від існуючого конкурента [6].

Перелічимо фактори конкурентоспроможності:

Таблиця 6.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Простота	Дана розробка не вимагає від користувача особливих знань у галузі
2	Дешевизна	Поширюється безкоштовно і кожний має можливість користуватися нею
3	Швидкодія	Результат отримується значно швидше ніж у продукті конкурента

Проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 6.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів –конкурентів у порівнянні з проектом, що розробляється						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Простота								
2	Дешевизна								
3	Швидкодія								

Проведемо SWOT-аналіз

Таблиця 6.12 SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: простота, дешевизна, швидкодія	Слабкі сторони: невідома компанія, відсутність стартового капіталу
Можливості: розширення алгоритму, нові технології	Загрози: продукти-замінники

З огляду на SWOT-аналіз можна прийти до висновку що нема потреби розробляти альтернативи ринкового впровадження цього проекту [6].

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку, а саме опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 6.13 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Науковці	Готові	Високий	У сегменті мала конкуренція	Легко
Які цільові групи обрано: науковці.					

Для роботи в обраних сегментах ринку сформулюємо базову стратегію розвитку.

Таблиця 6.14 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія ринку
1	Диференційований маркетинг	Простота, дешевизна, швидкодія	Стратегія диференціації

Виберемо конкурентну поведінку

Таблиця 6.15 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкуренту?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Ні	Ні	Заняття конкурентної ніші

Розробимо стратегію позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 6.16 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартаппроекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Точність			
2	Швидкодія			

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач.

Таблиця 6.17 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Підвищення якості синхронізації у системі зв’язку з квадратурними видами модуляції	Підвищення якості символьної синхронізації у системах зв’язку	Точніший вибір параметрів

Таблиця 6.18 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом	Програмний код на популярній мові програмування
2. Товар у реальному виконанні	Властивості: простота, швидкодія
	Якість: перевірка на багатьох функціях
	Пакування: відсутнє
	Марка: відсутня
3. Товар із підкріпленням	До продажу: невідомо
	Після продажу: невідомо

Визначимо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на товар.

Таблиця 6.19 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
1	100-150 тис. ум. од.	До 10 тис ум. од.	Високий	Безкоштовно

Визначимо оптимальну систему збуту

Таблиця 6.20 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Невідома	Вільний доступ до товару	Невідома	Вільний доступ до товару

Розробимо концепцію маркетингових комунікацій

Таблиця 6.21 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Невідома	Інтернет, наукові публікації	Можливості проекту	Донести про можливості проекту	Донесення про можливості та сильні стороні проекту

ВИСНОВКИ

Дослідження впливу параметрів інтерполятора в складі системи символьної синхронізації показали наступне:

1. Представлені результати порівняння величини помилки вектора від відношення сигнал/шум для чотирьох видів модуляції QAM4, QAM16, QAM64 та для змінної кількості дискретів на символ N=2,4,8 вказують на суттєве погіршення синхронізації сигналу при зменшенні кількості дискретів менше 4, тобто N=2. Хоча при подальшому збільшенні кількості дискретів, N=8, суттєвого зменшення помилки не відбувається.

2. При фіксованій кількості дискретів в залежності від виду модуляції різниця при квадратичному та кубічному інтерполяторах не дає суттєвих змін у якості символьної синхронізації. Хоча потребує більших обчислювальних затрат для цифрової системи і відповідно збільшує її складність та вартість.

3. Рекомендованими параметрами для цифрової системи синхронізації на основі отриманих результатів є квадратичний інтерполятор та кількість відліків на символ N=4 для QAM64 при виграші у відношенні сигнал шум 5 дБ відносно N=2 при фіксованому EVM.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бернанд Скляр. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с. : ил. – Парал. тит. англ.

2. В.А. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов, 2007.

3. Litwin. Matched filtering and timing recovery in digital receivers [Електроний ресурс], 2001

4. А. Б. Сергиенко. Цифровая связь: Учеб. пособие. СПб.:Изд-во С32 СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012 - 164с.

5. R. D. Gitlin, 1. Salz. Timing recovery in PAM systems R. Bell Syst. Tech. J.vol. 50, pp. 1645-1669. May-June 1971.

6. Fredric J. Harris, Senior Member, IEEE, and Michael Rice, Senior Member, IEEE Multirate Digital Filters for Symbol Timing Synchronization in Software Defined Radios, December, 2011.

7. Mehmood-ur-Rehman Awan, Peter Koch. Combined Matched Filter and Arbitrary Interpolator for Symbol Timing Synchronization in SDR Receivers. Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems. April, 2010.

8. MohamedK. Nezami. RF Architectures & Digital Signal Processing Aspects of Digital Wireless Transceivers 2001.

9. F. M. Gardner, “A BPSK/QPSK Timing Error Detector for Sampled Receivers,” IEEE Transactions on Communications, vol. COM-34, pp.423-429, May 1986.

10. Rice, Michael. *Digital Communications: A Discrete-Time Approach*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009.

11. F. Gardner, "Demodulator reference recovery techniques suited for digital implementation,"Final report, European Space Agency, August 1988, ESTEC Contract No. 6847/86/NLIDG.

12. F. Gardner, "A BPSKlQPSK timing error detector for sampled receivers," IEEE Transactions on Communication, vol. 34, pp. 423-429, May 1986.

13. K. Mueller and M. MUller, "Timing recovery in digital synchronous data receivers," IEEE Transactions on Communications, vol. 24, pp. 516-531, May 1976.

ДОДАТОК А. ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ІНТЕРПОЛЯТОРА В БЛОЦІ СИМВОЛЬНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИМИ СИГНАЛАМИ

Автор Бернацький Сергій Олегович
науковий керівник — доц. Шпилька Олександр Олександрович

Під час розробки повністю цифрового приймача фазоманіпульованих сигналів найбільш складним завданням є синхронізація тактової частоти демодулятора (символьна синхронізація) і опорної частоти гетеродинів. Загальна теорія синхронізації добре вивчена і широко представлена в наукових працях [1, 2], однак існують невизначеності під час вибору тих чи інших параметрів в застосування з певними видами модуляції.

Реалізація схеми символьної синхронізації в цифрових пристроях на ПЛІС і цифрових сигнальних процесорах (ЦСП) являє собою схему передискретизації з довільним кроком зміни тактової частоти, побудовану на основі інтерполятора. Одним із методів побудови такого інтерполятора, який може бути реалізований для високошвидкісних систем, являється інтерполяція на основі многочленів, що носить назву інтерполяція Лагранжа. Інтерполятор Лагранжа, представлений в дискретної формі з скінченим числом вибірок сигналу, називається інтерполятором Ферроу [3]. Метою даної роботи є дослідження впливу параметрів інтерполятора на рівень бітової помилки під час прийому фазоманіпульованих сигналів.

Інтерполятор Ферроу можна представити цифровим фільтром з кінцевою імпульсною характеристикою. Що описується в часовій області виразом:

$$y(k) = \sum_{m=0}^{M} \left\{ h(m,\varepsilon) \cdot x(k-m) \right\}$$

де y (k) - сигнал на виході фільтра, x (k) – сигнал на вході фільтра, h(m,ε) - коефіцієнти фільтра, залежать від керуючого значення ε.

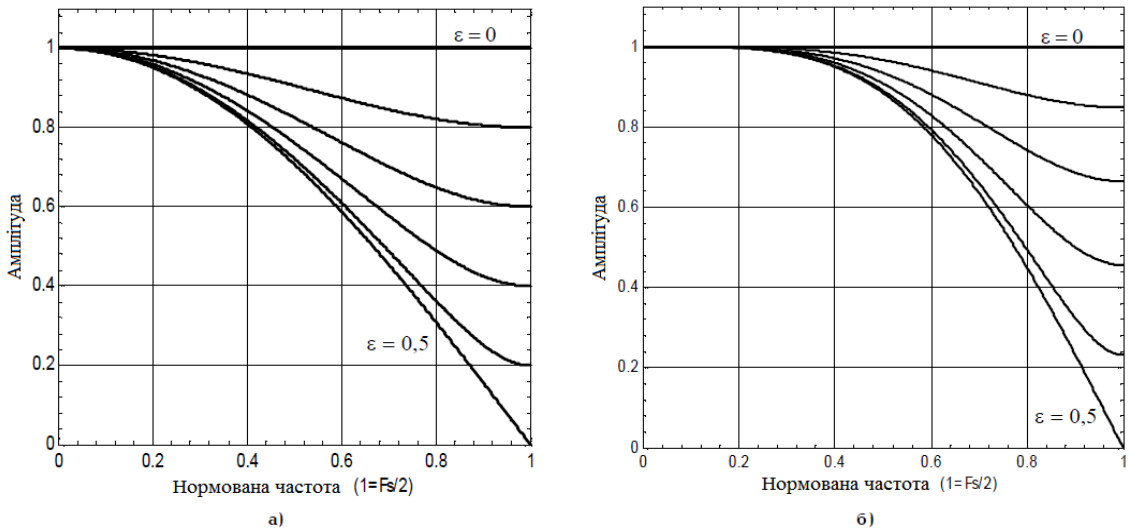


Рисунок 1. АЧХ лінійного (а) і кубічного (б) інтерполятора Ферроу

На рис.1 зображені АЧХ лінійного (рис. 1а) і кубічного (рис. 1б) інтерполяторів Ферроу, в залежності від нормованої частоти для різних точок інтерполяції ε. АЧХ інтерполятора Ферроу спотворює сигнал тим більше, чим вище верхня частота спектра сигналу, тобто чим менше відліків на символ. З рис. 1а видно, що для лінійного інтерполятора нерівномірність АЧХ в зоні нижніх частот вище, таким чином даний інтерполятор буде сильніше спотворювати сигнал. Також з рисунків видно, що при ε = 0 (точка інтерполяції співпадає з вибіркою сигналу)АЧХ рівномірна і постійна, а зі збільшенням ε АЧХ на верхніх частотах починає спадати і при ε = 0,5 (точка знаходиться посередині між двома відліками) сигналу, спотворення найбільші.

Для реалізації кубічного інтерполятора Ферроу в оптимізованому вигляді потрібно всього 3 множення на змінну, 3 множення на константу, 8 затримок і 11 складань [4]. Для реалізації лінійного інтерполятора Ферроу потрібно всього одне множення на змінну і два складання.

Для того, щоб оцінити вплив помилки інтерполяції методом статистичного моделювання в програмі Matlab були отримані графіки залежності ймовірності символьної помилки від відношення сигнал / шум (рис. 2) для різних параметрів інтерполяції. В якості сигналу вибрано восьми позиційну фазову маніпуляцію. Також, слід зазначити, що вплив інтерполятора на сигнал оцінювалось для найгіршого випадку, тобто при ε = 0,5. Моделювання проводилося при ідеальній символьній і фазовій синхронізації для лінії зв'язку з адитивним білим Гаусовим шумом. Частотні характеристики каналу зв'язку - «піднятий косинус» з коефіцієнтом згладжування β = 0.5.

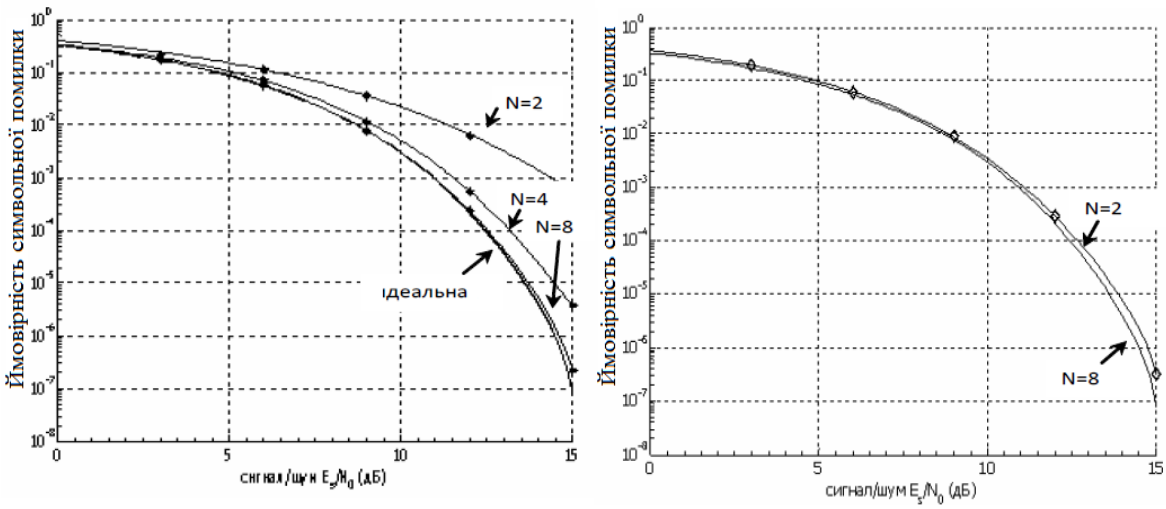
Результати моделювання представлені на рис.2. З результатів видно, що для лінійного інтерполятора енергетичні втрати для N=2 і N=4, де N-кількість відліків на символ, настільки високі, що застосування його для 8-ФМн-сигналу недоцільно. У табл.1 наведено втрати на лінійному і кубічному інтерполяторі для 8-ФМн для різних значень кількості відліків на символ.

Таблиця1

Тип інтерполятора	Втрати при $P_e = 10^{-2}$, дБ	Втрати при $P_e = 10^{-6}$, дБ
Лінійний N=8	0,03	0,13
Лінійний N=2	2,26	~5
Кубічний N=8	0,006	0,01
Кубічний N=2	0,14	0,35

Рисунок 2. Залежність ймовірності символьної помилки від відношення сигнал/шум для 8-ФМн-сигналу для лінійного (а) і кубічного (б) інтерполятора Ферроу

Таким чином, коли кількість відліків на символ не може перевищувати N=2, в схемі символьної синхронізації необхідне застосування кубічного інтерполятора Ферроу. У разі ж, якщо кількість відліків на символ може бути



а) б)

збільшено стає можливим застосування лінійного інтерполятора, тому що загальна кількість множень, що припадають на один символ, буде менше, ніж у кубічного інтерполятора. При цьому втрати на лінійному і кубічному інтерполятора будуть одного рівня.

Перелік посилань

1.Mengali U. Synchronization techniques for digital receivers / U. Mengali, A. D'Andrea. – New York: Видав. «Plenum Press», 1997. – 530 с.

2. Nezami, M. K. RF architectures & digital signal processing: Aspects of digital wireless transceivers / Mohamed K. Nezami.–2003.

3. Farrow, C. W. A continuously variable digital delay element / C. W. Farrow // IEEE Int. Symp. «Circuits and Systems».–Espoo, Finland, 1988.– P. 2641–2645.

4. Gardner, F. M. Interpolation in Digital Modems–Part II: Implementation and Performance / F. M. Gardner // IEEE Trans. Commun. – 1993. - vol. 41 , P. 998–1008.

Анотація

В статті досліджено вплив параметрів інтерполятора у системах символьної синхронізації з цифровими фазоманіпульованими сигналами. Приведені результати впливу інтерполяції на завадостійкість фазоманіпульованих сигналів.

Ключові слова: інтерполятор, символьна синхронізація, фазова маніпуляція.

Abstract

The article gives reasons for choosing an interpolator paremeter in symbol synchronization systems with digital phase-manipulated signals. The results of the influence of interpolation on the noise protection of phase-manipulated signals are presented.

Keywords: interpolator, symbol synchronization, phase manipulation.

ДОДАТОК Б. ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

ДЕТЕКТУВАННЯ СИГНАЛІВ В ПРИЙМАЧАХ КАНАЛІВ MIMO

Головін В. А., к.т.н., доцент; Бернацький С. О., магістр
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Канали зв'язку, побудовані на основі MIMO, забезпечують високі швидкості передачі даних, ефективне використання частотного ресурсу. В одній смузі частот передаються декілька інформаційних потоків які розділяються в приймачі на основі просторових відмінностей за технологією V-BLAST.

Запишемо сигнал на вході приймача каналу MIMO з M антенами передавача та N антенами приймача:

$$r = H \cdot a + n, \tag{1}$$

де H — $N \times M$ матриця каналу; $a = (a_1, a_2, \ldots, a_M)$ — комплексний вектор сигналів передавача; $r = (r_1, r_2, \ldots, r_N)$ — комплексний вектор сигналів приймача; $n = (n_1, n_2, \ldots, n_N)$ — вектор шуму.

Коваріаційна матриця шуму

$$R_{nn} = E\left\{\left(nn^H\right)\right\} = \sigma_n^2 I, \tag{2}$$

де σ_n^2 — дисперсія шуму. Потоки даних кожної антени випадкові та незалежні і потужність між ними розподілена рівномірно та коваріаційна матриця має вигляд:

$$R_{aa} = E\left\{\left(aa^H\right)\right\} = \sigma_a^2 I, \tag{3}$$

де σ_a^2 — середня потужність сигналу, який випромінює одна антена. Вона пов'язана з загальною потужністю передавача:

$$\sigma_a^2 = \frac{P}{M}. \tag{4}$$

Задача приймача мінімізувати вектор похибки по відомій матриці H, характеристиках шуму, апріорної та апостеріорної інформації переданого та прийнятого сигналу.

Існує багато методів детектування для просторового мультиплексування каналів MIMO. Розглянемо тільки декілька можливих алгоритмів V-BLAST [1, 2, 3] які використовують різну інформацію для вибору порядку виділення символів для детектування та мають різну складність обчислення.

Алгоритм V-BLAST/ZF [2] використовує значення елементів матриці H згідно (5.в).

Ініціалізація:

$$W_1 = H^+, \tag{5.а}$$

$$i = 1. \tag{5.б}$$

Рекурсія:

$$k_i = \underset{j \notin \{k_1,\ldots,k_{i-1}\}}{\arg\min} \left\| \left(W_i\right)_j \right\|, \tag{5.в}$$

$$y_{k_i} = \left(W_i\right)_{k_i} r_i, \tag{5.г}$$

$$\hat{a}_{k_i} = Q\left(y_{k_i}\right), \tag{5.д}$$

$$r_{i+1} = r_i - \hat{a}\left(H\right)_{k_i}, \tag{5.е}$$

$$W_{i+1} = H^+_{\overline{k_i}}, \tag{5.є}$$

$$i = i + 1, \tag{5.з}$$

де $H^+ = \left(H^H H\right)^{-1} H^H$ псевдообернена матриця; H^H — транспонована комплексно спряжена матриця.

Алгоритм V-BLAST-MAP [2] ідентичний VBLAST-ZF, за винятком порядку, в якому детектуються символи. Замість того, щоб вибирати наступний символ згідно (5.в), тут набір усіх рішень потенційних символів класифікується з урахуванням їх апостеріорній вірогідності, так як оцінюється P_{ij} (6.д), апроксимація того, наскільки вірогідним є те, що $s_{ij} = a_j$.

Ініціалізація:

$$i = 1, \tag{6.а}$$

$$W_i = \frac{\rho}{M} H_i^H \left(\frac{\rho}{M} H_i H_i^H + N_0 I_N \right). \tag{6.б}$$

Рекурсія:

$$y_i = W_i r_i, \tag{6.в}$$

$$s_i = Q\left(y_i\right), \tag{6.г}$$

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}\left(y_{ij} \mid s_{ij}\right)}{\sum\limits_{s' \in A} f_{ij}\left(y_{ij} \mid s\right)}, j \notin \left\{k_1,\ldots,k_{i-1}\right\}, \tag{6.д}$$

$$k_i = \underset{j \notin \{k_1,\ldots,k_{i-1}\}}{\arg\min} \left\{ p_{ij} \right\}, \tag{6.е}$$

$$\overline{a}_{k_i} = s_{ik_i}, \tag{6.є}$$

$$r_{i+1} = r_i - \hat{a}\left(H_i\right)_{k_i}, \tag{6.ж}$$

$$W_{i+1} = \frac{\rho}{M} H_{k_i}^H \left(\frac{\rho}{M} H_{k_i} H_{k_i}^H + N_0 \mathrm{I}_N \right), \tag{6.з}$$

$$i = i + 1. \tag{6.и}$$

В (6.д) функція щільності задається:

$$f_{ij}\left(y_{ij} \mid \mathrm{s}_{ij}\right) = \frac{1}{\pi\sigma_j^2} \exp\left\{ -\frac{1}{\sigma_j^2} \left\| y_{ij} - s_{ij} \right\|^2 \right\} t \,,\ \sigma_j^2 = N_0 \left\| \left(W_i\right)_j \right\|^2. \tag{7}$$

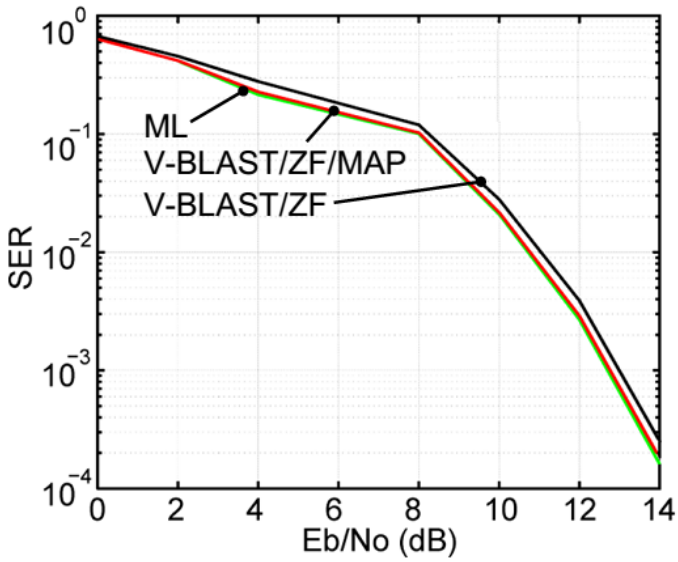


Рисунок 1. Імовірність символьної похибки для алгоритмів V-BLAST/ZF, V-BLAST/ZF/MAP

Складність обчислень в даному алгоритмі значно зросла. Для зменшення обчислювальних витрат замінимо розрахунок оберненої матриці на рішення відповідної системи лінійних рівнянь, а для рішення системи використаємо ітераційні методи. Результати моделювання вказаних алгоритмів в MatLab показані на рис. 2 (M, N)=(4, 10).

Для порівняння алгоритмів також приведені результати моделювання методом максимальної правдоподібності.

Перелік посилань

1. Golden G. D., Foschini G. J., Valenzuela R. A., Wolniansky P. W. Detection algorithm and initially laboratory results using VBLAST space-time communication architecture // Electronics Letters. — 1999. — Vol. 35, № 1. — p. 14 – 15

2. В. Джиган. Алгоритмические основы технологии V-BLAST для беспроводной передачи данях // Первая миля. — 2007. — № 1. — с. 19 – 25.

Анотація

Розглянуті обчислювальні особливості алгоритмів детектування сигналів V-BLAST, приведені результати моделювання.

Ключові слова: MIMO,V-BLAST/ZF, V-BLAST/ZF/MAP.

Аннотация

Рассмотрены вычислительные особенности алгоритмов детектированя сигналов V-BLAST, приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: MIMO,V-BLAST/ZF, V-BLAST/ZF/MAP.

Abstract

The computational features of the algorithms for detecting the signal V-BLAST are considered, the simulation results are given.

Keywords: MIMO, V-BLAST/ZF, V-BLAST/ZF/MAP.