

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 1

Затверджено науково-
методичною радою
протокол від «__»_____
20__ р. №__

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
для проведення практичних занять
з навчальної дисципліни
**«Сучасні технології оброблення інформації у телекомунікаціях та
радіотехніці»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «доктор філософії»
спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка»
освітньо-наукова програма «Електронні комунікації та радіотехніка»
факультет інформаційно-комп'ютерних технологій
кафедра комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях

Схвалено на засіданні
кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях
25 серпня 2026 р., протокол
№6
Завідувач кафедри
_____ Владислав ЧУХОВ

Розробник: к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях ЦИПОРЕНКО Валентин

Житомир
2026 – 2027 н.р.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 2

Зміст

Практична робота №1. Дослідження принципів функціонування цифрових мереж телекомунікацій та радіотехніки	3
Практична робота №2. Дослідження цифрових технологій наземних мереж телекомунікацій та радіотехніки	18
Практична робота №3. Дослідження технологій функціонування смарт антен	35
Практична робота №4. Дослідження технологій функціонування програмно визначених радіосистем	46
Практична робота №5. Дослідження мультимедійних технологій	54
Практична робота №6. Дослідження технологій супутникових мереж	64
Рекомендована література	83

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 3

Практична робота №1

Дослідження принципів функціонування цифрових мереж
телекомунікацій та радіотехніки

Мета роботи: експериментальне дослідження основних принципів дискретизації неперервних радіосигналів та основних властивостей дискретних послідовностей.

1. Підготовка до виконання роботи.

- 1.1. Опрацювати необхідний теоретичний матеріал в рекомендованому переліку літератури.
- 1.2. Опрацювати методичні вказівки до проведення лабораторної роботи, уявити мету роботи та принцип її виконання.
- 1.3. Вивчити технічні описи приладів, що входять до складу лабораторного робочого місця, а також спеціалізованого пакету прикладних програм ПЕОМ.
- 1.4. Виконати необхідні попередні розрахунки.
- 1.5. Відповісти на питання самотестування, готовності до виконання роботи.
- 1.6. Для кожного пункту третього розділу проробити та запропонувати свій варіант методики досліджень в загальному вигляді із обґрунтуванням використання конкретної моделюючої програми із пакету прикладних програм. Варіант методики досліджень узгодити із викладачем.
- 1.7. Вибрати тип і структуру моделюючих сигналів та розрахувати конкретні їх параметри і діапазони їх можливих значень. Підготувати програму модель із урахуванням проведених розрахунків та узгодити її з викладачем.
- 1.8. Проаналізувати можливість розширення досліджень стосовно особливостей процесів дискретизації радіосигналів. Запропонувати варіанти додаткових досліджень та відповідні методики їх проведення в доповнення програми розділу 3.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 4

2. Короткі теоретичні відомості

Для обробки радіосигналів за допомогою цифрових обчислювальних пристроїв необхідно їх попередньо перетворити в цифрову форму. Таке перетворення зазвичай виконується в два етапи. На першому етапі реалізується дискретизація в часі, а на другому – квантування по рівню.

Сигнали можуть бути: 1) аналогові; 2) дискретні; 3) квантовані; 4) цифрові.

Аналогові сигнали: задаються по вісі часу на незліченій множині точок і на вісі рівня – незліченою множиною точок.

Дискретні сигнали: задані на зліченій (дискретній) множині точок на вісі часу і на незліченій множині значень по рівню.

Квантовані сигнали: задані на зліченій (дискретній) множині точок по рівню і на незліченій множині значень часу.

Цифрові сигнали: задані на злічених множинах відліків по рівню і по часу.

Аналоговий сигнал можна перетворити в цифровий за допомогою процедури аналого-цифрового перетворення. В свою чергу аналого-цифрове перетворення можна уявити як послідовність двох операцій: 1) дискретизації по часу; 2) квантування по рівню. Зазвичай результати перетворення кодуються з використанням прямого, зворотного або доповняльного кодів.

Цифровий сигнал можна перетворити в аналоговий за допомогою процедури цифро-аналогового перетворення. Використовується також термін «відновлення сигналу».

При аналого-цифровому перетворенні необхідно забезпечити однозначну відповідність попереднього аналогового сигналу і його цифрового еквіваленту. Ця вимога виконується, якщо період дискретизації буде вибраний на основі теореми Котельникова (Найквіста) або теореми відліків.

У відповідності з теоремою відліків неперервний сигнал $S(t)$ в спектрі якого не містяться спектральні складові з частотою

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 5

вище $f_{\max}$, повністю описується вибірковими значеннями $S(n)$, відрхованими через інтервал $T_d \leq 1 / 2 f_{\max}$. Аналітично це виражається у вигляді ряду Котельникова.

В загальному випадку дискретизація неперервної функції часу складається у вимірюванні її значень в моменти часу, які рознесені один від одного на інтервал T_d , який зазвичай називають періодом дискретизації. Період дискретизації вибирають або постійним $t_k = k \cdot T_d$, або змінним. У другому варіанті змінний період дискретизації $T_d(t)$ є випадковою або детермінованою функцією часу. Пристрій часової дискретизації можливо розглядати як перемикач, що замикається на час τ із періодом T_d . В результаті на виході перемикача із вхідного неперервного сигналу $S(t)$ формується послідовність з миттєвих значень (виборок) $S(t_k)$, що відповідають певним дискретним відлікам часової шкали. Часові діаграми, що пояснюють принцип дискретизації наведені на рис. 1.

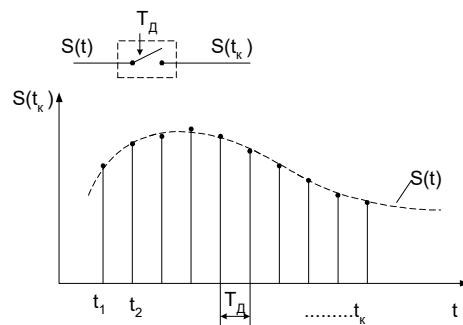


Рис. 1. Принцип дискретизації

Пристрій часової дискретизації можливо розглядати як перемикач, що замикається на час τ із періодом T_d . В результаті на виході перемикача із вхідного неперервного сигналу $S(t)$ формується

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 6

послідовність з миттєвих значень (виборок) $S(t_k)$, що відповідають певним дискретним відлікам часової шкали. Часові діаграми, що пояснюють принцип дискретизації наведені на рис. 1.

При ідеальній дискретизації час спостереження (замикання перемикача) τ сигналу в момент часу t_k є нескінченно малий, тобто $\tau \rightarrow 0$. В цьому випадку дискретизований сигнал $S(t_k)$ можливо представити як послідовність δ -імпульсів (дельта-імпульсів, імпульсів Дірака), вага яких рівна миттєвим значенням сигналу $S(t)$ в дискретні моменти часу t_k :

$$S(t_k) = \sum_{k=0}^{\infty} S(t_k) \cdot \delta(t - t_k) \quad (1)$$

Представлення неперервного сигналу $S(t)$ у вигляді послідовності $S(t_k)$ можливо тільки із певними обмеженнями. Основним таким обмеженням є вимога обмеженості спектра сигналу $S(t)$, що дискретизується. В цьому випадку згідно теореми відліків (теорема Шеннона, теорема Котельникова), неперервний сигнал $S(t)$ із обмеженим спектром повністю визначається зліченою множеною дискретних виборок (значень), що рознесені один відносно одного у часі на величину $T_d \leq 1/2 f_{\max}$ ($f_{\max}$ - гранична частота спектра вихідного сигналу $S(t)$). При цьому згідно теореми відліків (теореми Котельникова-Шеннона) сигнал $S(t)$, що обмежений по спектру найвищою частотою $f_{\max}$, можливо представити рядом:

$$S(t_k) = \sum_{k=0}^{\infty} S\left(\frac{K}{f_{\max}}\right) \cdot \frac{\sin 2\pi f_{\max}(t - K/2f_{\max})}{2\pi f_{\max}(t - K/2f_{\max})} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(KT_d) \cdot \varphi_K(t) \quad (2)$$

де $T_d = \frac{1}{2f_{\max}}$ - період дискретизації;

$S(K/2f_{\max}) = S(KT_d)$ - вибірки сигналу $S(t)$ в момент $t_k = K \cdot T_d$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 7

На практиці в радіоелектронних системах дискретизації підлягають сигнали, що обмежені в часі і мають тривалість T_c . В цьому випадку визначають найвищу частоту спектра $f_{\max}$, при якій похибка дискретизації за рахунок обмеження спектру сигналу була не більше допустимого значення. В результаті сигнал $S(t)$ повністю задається обмеженою сукупністю відліків $S(t_k)$ кількість яких дорівнює N :

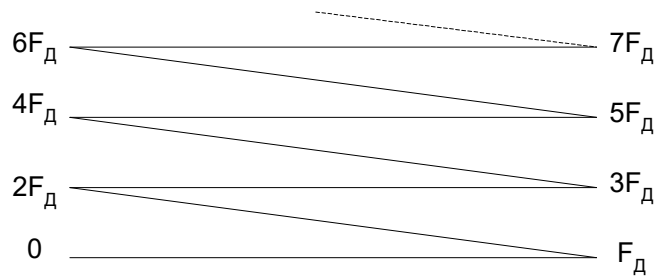
Обмежений у часі сигнал $S(t)$ представляється рядом:

$$N = \frac{T_c}{T_d} = T_c \cdot 2f_{\max}. \quad (3)$$

$$S(t_k) = \sum_{K=0}^{2f_{\max} \cdot T_c} S(K \cdot T_d) \cdot \frac{\sin 2\pi f_{\max}(t - K \cdot T_d)}{2\pi f_{\max}(t - K \cdot T_d)}. \quad (4)$$

При дискретизації періодичного сигналу $S(t)$ може виникнути явище підміни частот, при якому вибірки сигналів $S_1(t)$ і $S_2(t)$, які відрізняються тільки частотою (періодом) повторення, можуть бути однаковими. Явище підміни частот доцільно досліджувати за допомогою діаграми підмін, яка утворюється шляхом складання сегментами вісі частот із періодом $F_d = \frac{1}{2 \cdot T_d}$, рис.2.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 8



На рис.2 показані перші сім складок діаграми підмін. Можливість підмини частот необхідно враховувати при виборі частоти дискретизації F_D .

В частотній області визначення ефект підмини частот пояснюється явищем цифрового гетеродинування. Математично цифрове гетеродинування спектру вхідного сигналу $S(t)$ при його дискретизації із частотою F_D можна бачити із виразу спектра дискретизованого сигналу $S(t_K)$:

$$S_D(\omega) = \frac{1}{T_D} \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_f \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_D} \right) \quad (5)$$

де $S_f(\omega)$ - спектр початкового неперервного сигналу $S(t)$.

Із рівняння (5) витікає, що спектр дискретизованого сигналу $S(t_K)$ представляє собою періодичне повторення спектрів вихідного сигналу $S(t)$ із періодом, що дорівнює частоті дискретизації.

Якщо неперервний сигнал $S(t)$ має обмежений спектр, що дорівнює нулю за межами $\{f_s, f_n\}$ додатних частот, то його можливо дискретизувати із частотою $F_D \geq 2f_s$ або із частотою F_{Dc} , що задовольняє нерівність:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 9

$$\frac{(f_{сер} / \Delta f_c) + 1}{K + 1} < \frac{F_{Дс}}{2\Delta f_c} < \frac{(f_{сер} / B) - 1}{K} \quad (6)$$

де $f_{сер} = \frac{f_n + f_v}{2}$ - середня частота спектру сигналу;

$\Delta f_c = f_v - f_n$ - ширина спектру сигналу;

K - певне ціле число.

Явище, при якому використовують ефект цифрового гетеродинування і частоту дискретизації $F_{Дс}$, що менша частоти $F_{Д}$, називають субдискретизацією. Використання субдискретизації дозволяє зменшити число дискретних значень сигналу, що обробляються, а також спростити апаратно пристрої цифрової обробки сигналів.

При цифровій обробці радіосигналів об'єктом дискретизації у часі є випадковий процес $S_{П}(t)$ на виході аналогової частини приймача. Основною особливістю цього процесу $S_{П}(t)$ є його вузькосмуговість ($\Delta f_c / f_{сер} \ll 1$). В цьому випадку для представлення сигналу $S_I(t)$ доцільно використовувати метод огибаючих, у відповідності до якого вузько смуговий радіосигнал представляють у вигляді:

$$S_I(t) = U(t) \cos[2\pi f_0 t + \Psi(t)] \quad (7)$$

де $U(t)$ - низькочастотний сигнал (огибаюча);

$\Psi(t)$ - закон фазової модуляції;

f_0 - несуча частота, $f_0 = f_{сер}$.

В результаті часової дискретизації підлягають дві складові $U(t)$ і $\Psi(t)$, які змінюються у часі повільно із частотами:

$$F_{Д1} \geq f_{U \max}, F_{Д2} \geq f_{\Psi \max} \quad (8)$$

де $f_{U \max}$, $f_{\Psi \max}$ - найвищі частоти в спектрах огибаючої $U(t)$ та миттєвої фази $\Psi(t)$, або двох квадратурних складових:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 10

$$U_c(t) = U(t) \cos \Psi(t) \text{ і } U_s(t) = U(t) \sin \Psi(t)$$

Важливо відмітити, що частоти $f_{U \max}$ і $f_{\Psi \max}$ можуть бути різними, тобто $F_{D1} \neq F_{D2}$.

При обробці сигналів на проміжній частоті на виході радіоприймача доцільно враховувати параметри його амплітудно-частотної характеристики, що дозволяє вибрати оптимальне значення частоти дискретизації F_D .

Вибір значення частоти дискретизації суттєво залежить від типу подальшої обробки дискретної послідовності $S(t_k)$. Основними варіантами алгоритмів обробки дискретизованого сигналу є:

- 1) вимірювання часових параметрів (час прийому, затримка надходження, тривалість);
- 2) вимірювання параметрів спектра або частотних параметрів (ширина спектра, несуча частота, тощо);
- 3) обробка сигналу, що враховує форму сигналу (задачі розпізнавання, радіозв'язок, радіомовлення тощо);
- 4) вимірювання миттєвих значень сигналу з метою автоконтролю, регулювання та сигналізації;
- 5) виявлення цілей, та прогнозування параметрів траєкторій цілей в радіолокації.

В кожному із вказаних випадків значення частоти дискретизації або періоду дискретизації вибирають із врахуванням певних критеріїв та параметрів радіосигналу.

Розглянемо основні варіанти обробки радіосигналів.

- 1) Якщо сигнал стаціонарний і має обмежений спектр, то період дискретизації вибирають за умов теореми відліків:
 $T_D \leq 1/2f_{\max}$.
- 2) Якщо сигнал нестационарний випадковий, із обмеженою тривалістю T_c , тоді період дискретизації не повинен

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 11

перевищувати інтервалу кореляції $\tau_{кор}$ цього сигналу

$$T_d \leq \tau_{кор}$$

- 3) Якщо обробка сигналу направлена на отримання інформації, що передається, тоді період дискретизації вибирають із умови забезпечення допустимих втрат інформації $\sigma_{x\min}^2$ (дисперсії похибки) $\sigma_{x\min}^2 \leq (6\alpha - 1)/12\alpha^2$, де $\alpha = 1/\tau_{кор} \cdot T_d$
- 4) При обробці радіолокаційних сигналів в кожному періоді зондування не ставиться задача відновлення вихідного процесу після його дискретизації. Основною є вимога не пропустити корисний сигнал. В цьому випадку період дискретизації повинен бути не більше ефективної тривалості відбитого радіосигналу: $T_d \leq \tau_c$
- 5) При забезпеченні роздільної здатності РЛС по координаті r , період дискретизації повинен бути не більше тривалості зондування чого сигналу $T_d \leq \tau_c$
- 6) При забезпеченні необхідної точності дальності до цілі імпульсної РЛС, період дискретизації дорівнює $T_d \leq \sqrt{6D_z}$, де D_z - дисперсія допустимої помилки вимірювання дальності
- 7) При забезпеченні необхідної якості функціонування слідкуючих радіосистем період дискретизації дорівнює:

$$T_d \leq \varepsilon / V_{c\max}$$
де ε - допустима помилка слідкування, $V_{c\max}$ - максимальна швидкість зміни радіосигналу
- 8) При вимірюванні параметрів спектра радіосигналу період дискретизації T_d визначають з урахуванням ефекту цифрового гетеродинування, та параметрів передаточної частотної характеристики лінійного тракту радіоприймача

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 12

- 9) При аналізі форми сигналу у часі період дискретизації вибирають з урахуванням допустимої похибки дискретизації [], що визначається обмеженістю часу аналізу сигналу та не ідеальністю відновлюючого фільтра. За критерієм період дискретизації вибирають в 2-5 разів більшим, ніж за теоремою відліків.

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослідити залежність похибки вимірювання амплітуди, часу надходження, тривалості та періоду слідування прямокутного відео імпульсу від частоти дискретизації стосовно цифрової радіосистеми вимірювання дальності до цілі. Запропонувати для виконання досліджень методику та програмну модель..

3.2. Виконати дослідження п. 3.1 для умов наявності адитивного нормального шуму при відношенні с/ш=0, 10, 20, 30дБ. ($X_{дБ}=20\lg(A_c/A_{ш})$).

3.3. Дослідити в часовій області визначення ефект підміни частот для періодичних сигналів форми. За результатами досліджень побудувати діаграму підмін.

3.4. Дослідити в частотній та часовій областях визначення ефект цифрового гетеродинування при дискретизації сигналів. Дослідити режим прямого та інверсного гетеродинування. Зняти залежність кратності гетеродинування $K_{гет}$ від співвідношення частоти гармонічного та полігармонічного (сума 3-х синусоїд в інтерпретаторі формул) сигналу, та частоти його дискретизації. В частотній області визначення використовувати результати ДПФ із вікном Блекмана. Для цього використовувати інтерпретатор формул (5-1-1-1).

Щоб визначити наявність прямого гетеродинування потрібно спочатку визначити спектр сигналу при $F_d > 2F_c$ і зафіксувати таблицю відліків його прямої (на початку таблиці) та інверсної частини, що є

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 13

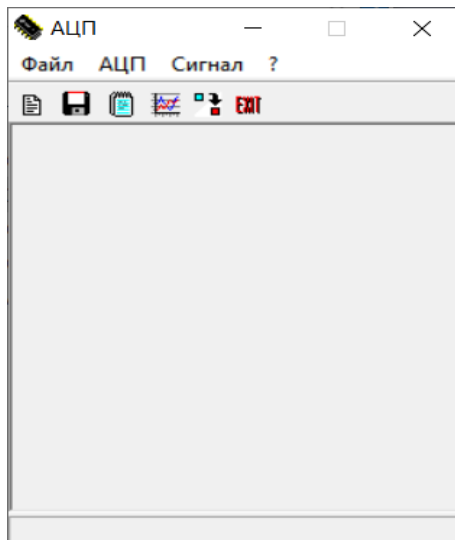
дзеркальним відображенням прямої з інверсними фазами. Потім вибирати F_d , значення якої менше F_c в $K=2,3,4$ разів. При прямому гетеродинуванні пряма частина спектра не зміниться. При інверсному гетеродинуванні пряма та інверсна частини спектра поміняються місцями.

3.5. Дослідити в частотній області залежність значення частоти дискретизації радіосигналу на проміжній частоті в залежності від параметрів передаточної АЧХ приймального радіо тракту. Експериментально визначити залежність мінімально допустимого значення частоти дискретизації від параметрів передаточної АЧХ приймального тракту (коеф. Прямокутності АЧХ ($A_c(-3дБ)/A_c(-30дБ)$), селективності-рівня подавлення сусіднього каналу). Параметри АЧХ тракту задавати через параметри сигналів на його виході за умови рівномірного вхідного амплітудного спектра (аналізувати спектр суми 4-х синусоїд: $f_{c1}=5$, $A_1=A_{max}/30$; $f_{c2}=10$, $A_2=A_{max}$; $f_{c3}=20$, $A_3=A_{max}$; $f_{c4}=25$, $A_4=A_{max}/30$).

3.6. Дослідити вплив у часовій та частотній областях визначення на радіосигнал, що перетворюється в цифрову форму **апертурної невизначеності** (інтервалу невизначеності) дискретизації його у часі. Дослідження виконати для вузькосмугового радіосигналу в залежності від його параметрів (амплітуди, частоти, початкової фази). Дослідження проводити за допомогою програми ADC та Numeri.

Для цього в програмі ADC в меню Сигнал – Синусоїда задаються параметри сигналу (амплітуда, частота та початкова фаза). В меню АЦП – Параметри задаються параметри аналого-цифрового перетворення: розрядність коду квантування R ; граничні значення амплітуди сигналу $[h_{min}; h_{max}]$; крок квантування h_{kv} , що визначається в програмі автоматично; період дискретизації T_d ; інтервал невизначеності ΔT_d ; кількість відліків сигналу накопичуваного масиву $N_s = 2^n$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 14



Отриманий масив відліків можливо проаналізувати у вигляді часової діаграми та таблиці відліків, вибравши на панелі інструментів програми ADC відповідні іконки.

Подальші дослідження необхідно виконувати в частотній області, аналізуючи комплексний спектр сигналу, який визначати за допомогою програми Numeri. Для цього необхідно зберегти отриманий масив відліків сигналу натиснувши іконку (дискета) на панелі інструментів програми ADC, та перенести отриманий файл (10.xu) в папку Numeri. Після запуску програми Numeri вибрати п. 5 (ДПФ), далі натиснути – 1 (Дані), далі – 1 (Створення даних), далі – 2 (дані з файлу на диску), загрузити файл: вводимо – 10 (назва свого файлу) + F10.

Щоб отримати спектр сигналу натиснути тричі Esc, далі – 4 (тип вікна) + 5 (Блекмана), далі – 3 (ДПФ), та оцінити спектр у вигляді таблиці 2 та графіка 1.

3.7. Виконати дослідження пункту 3.6 в залежності від періоду дискретизації.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 15

3.8. Виконати дослідження пункту 3.6 в залежності від форми сигналу у часі та його спектрального складу, а також для полісигнальної адитивної суміші.

3.9. Виконати дослідження пункту 3.6. за умови дискретизації адитивної суміші радіосигналу і білого гаусового шуму, для різних відношень сигнал/шум.

Для цього після запуску програми Numeri вибрати п. 5 (ДПФ), далі натиснути – 1 (Дані), далі – 1 (Створення даних), далі – 2 (дані з файлу на диску), загрузити файл: вводимо – 10 (назва свого файлу) + F10.

Щоб зашумити дані натиснути двічі Esc, далі – 3 (зашумлення даних), вводимо параметри + F10, далі двічі Esc і отримуємо спектр: 4-5 + 3-1(2)

4. Обробка результатів досліджень

4.1. За результатами кожного пункту програми виконання роботи (розділ 3) побудувати діаграми або графіки залежностей похибок вимірювань або параметрів радіосигналу від періоду дискретизації та параметрів сигналу або тракту радіосистеми.

4.2. Виконати аналіз отриманих результатів та визначити оптимальні значення параметрів процедури дискретизації для умов досліджень.

4.3. Використовуючи відомі методи розрахувати теоретичні значення параметрів сигналів та процедури дискретизації і порівняти їх з експериментальними даними.

4.4. За результатами досліджень зробити узагальнюючі висновки та розробити відповідні рекомендації.

4.5. Результати досліджень оформити у вигляді звіту, що підлягає індивідуальному захисту у викладача.

4.6. По кожному пункту досліджень розділу 3 виконати якісний аналіз отриманих результатів і виявити основні залежності.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 16

Обробку виконати шляхом аналізу часових та спектральних діаграм радіосигналу до і після АЦ-перетворення.

4.7. По кожному пункту досліджень зняти кількісні характеристики похибок та параметрів радіосигналів і побудувати відповідні графічні залежності (графіки, гістограми, тощо).

4.8. Виконати порівняльний аналіз отриманих результатів досліджень і виявити основні залежності якості впливу параметрів процедури АЦ-перетворення на радіосигнал.

4.9. По кожному пункту виконати теоретичні розрахунки і порівняти їх результати із отриманими експериментальними результатами.

4.10. По результатам виконаних досліджень та розрахунків зробити обґрунтовані аналіз та висновки.

4.11. Результати досліджень оформити у вигляді звіту, що полягає індивідуальному захисту.

Контрольні питання самоконтролю

1. Яка сутність процесу дискретизації і його математичні моделі?
2. Як визначити період дискретизації згідно теореми відліків?
3. В чому полягає процес цифрового гетеродинування при дискретизації сигналів?
4. В чому полягає ефект підміни частоти при дискретизації сигналів?
5. Як вибирається період дискретизації вузько смугових радіосигналів?
6. Як вибирається період дискретизації випадкових радіосигналів?
7. Які фактори впливають на вибір періоду дискретизації радіосигналів в радіотехнічних системах?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 17

8. Які параметри радіоприймального тракту впливають на період дискретизації його вихідного радіосигналу?
9. В чому сутність прямого та інверсного цифрового гетеродинування при дискретизації радіосигналів? Дати визначення процедури аналог-цифрового перетворення.
10. Дати визначення та навести причину виникнення апертурної невизначеності дискретизації у часі радіосигналу.
11. Дати визначення та навести причину виникнення похибки квантування по рівню при АЦ-перетворенні радіосигналу.
12. Як залежить максимальне та середньоквадратичне значення похибки квантування по рівню радіосигналу від кроку квантування h_a .
13. Як впливає на якість АЦ-перетворення радіосигналу апертурна невизначеність дискретизації у часі?
14. Як розраховується допустимий крок квантування по рівню h_a при АЦ-перетворенні радіосигналу, відеосигналу або одиночного відліку сигналу інформаційного датчика (детектора)?
15. Як розраховується допустима невизначеність дискретизації у часі при АЦ-перетворенні відеосигналу, радіосигналу або одиночного відліку сигналу інформаційного датчика (детектора)?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 18

Практична робота № 2

Дослідження цифрових технологій наземних мереж телекомунікацій та радіотехніки

Мета роботи: експериментальне дослідження основних принципів та цифрових технологій прийому сигналів в наземних мережах телекомунікацій та радіотехніки

1. Підготовка до виконання роботи

1.1. Опрацювати необхідний теоретичний матеріал в рекомендованому переліку літератури.

1.2. Опрацювати методичні вказівки до проведення лабораторної роботи, уявити мету роботи та принцип її виконання.

1.3. Вивчити технічні описи приладів, що входять до складу лабораторного робочого місця, а також спеціалізованого пакету прикладних програм ПЕОМ.

1.4. Виконати необхідні попередні розрахунки.

1.5. Відповісти на питання самотестування, готовності до виконання роботи.

1.6. Для кожного пункту третього розділу проробити та запропонувати свій варіант методики досліджень в загальному вигляді із обґрунтуванням використання конкретної моделюючої програми із пакету прикладних програм. Варіант методики досліджень узгодити із викладачем.

1.7. Вибрати тип і структуру моделюючих сигналів та розрахувати конкретні їх параметри і діапазони їх можливих значень. Підготувати програму модель із урахуванням проведених розрахунків та узгодити її з викладачем.

1.8. Проаналізувати можливість розширення досліджень стосовно особливостей процесів дискретизації радіосигналів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 19

Запропонувати варіанти додаткових досліджень та відповідні методики їх проведення в доповнення програми розділу 3.

2. Короткі теоретичні відомості

Головна особливість модуляції несучої цифровими сигналами полягає у тому, що параметр несучої може приймати через модуляцію ряд дискретних значень. Тому модуляцію називають **маніпуляцією**. Параметри несучого коливання змінюються дискретно і в часі. Інтервал часу, протягом якого ці параметри залишаються постійними, називають символьним інтервалом або інтервалом канального символу. Протягом кожного символьного інтервалу передається один біт або одночасно декілька бітів, які утворюють канальний символ.

Розглянемо питання про можливість одночасного виконання вимог ефективного використання смуги частот каналу зв'язку та забезпечення заданого рівня перешкодостійкості. Ці вимоги взаємно протилежні. Для підвищення ефективності використання смуги частот один канальний символ повинен містити як можна більше бітів інформації, яка передається. Для цього в кожен момент часу сигнал у каналі зв'язку повинен мати не 2, а більшу кількість можливих значень. У разі використання амплітудної маніпуляції це досягається завдяки вибору відповідної кількості рівнів амплітуди несучої, при частотній маніпуляції повинна бути відповідна кількість значень частоти, при застосуванні фазової маніпуляції – можливих значень фази сигналу і та інші.

Очевидно, що при цьому погіршується перешкодостійкість системи, оскільки приймач повинен одночасно розрізняти не 2, а більшу кількість значень сигналу. Щоб забезпечити впевнене розрізнення більшої кількості рівнів сигналу необхідно збільшувати відношення сигнал/шум у каналі зв'язку, тобто збільшити потужність передавача. Це відповідає основним положенням теорії зв'язку – для підвищення пропускної здатності каналу зв'язку при фіксованій ширині смуги частот необхідно підвищувати відношення сигнал/шум.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 20

Детальніше розглянемо особливості застосування окремих видів модуляції.

Амплітудна маніпуляція (АМн) полягає в дискретній зміні рівня амплітуди несучої. До найпростішого випадку можна віднести те, що одному рівню сигналу може відповідати наявність несучої, а другому – відсутність такої. Недоліком АМн є значні перепади потужності випромінювання та мала перешкодостійкість.

Частотна маніпуляція (ЧМн) здійснюється шляхом дискретної зміни частоти несучої при постійній амплітуді.

Фазова маніпуляція (ФМн) полягає в дискретній зміні фази несучої. У найпростішому випадку несуча може мати два значення фази: 0° і 180° . У приймачі може здійснюватись як когерентне детектування, яке вимагає фазової синхронізації приймача з передавачем, так і більш просте некогерентне детектування. В останньому випадку часто застосовують відносну фазову маніпуляцію, коли фаза несучої для кожного прийнятого символу порівнюється не з деякою абсолютною початковою фазою, а з фазою несучої попередньо прийнятого символу.

Для підвищення ефективності використання смуги частот каналу зв'язку застосовується багатопозиційна ФМн. На рис.1,а показана чотирьохпозиційна ФМн, при якій один канальний символ має два біти інформації, що дозволяє підвищити ефективність використання смуги частот у два рази.

Приклад відповідності фази несучої трирозрядному двійковому коду, який передається, для восьмипозиційної ФМн наведений на рис. 1,б. Зсув між дискретними значеннями фази несучої дорівнює 45° . Ефективність використання смуги частот у цьому випадку підвищується в три рази порівняно з простою двохпозиційною ФМн.

При розподілі кодових комбінацій, які передаються по позиціях використовують маніпуляційний код Грея, тобто сусідні позиції відрізняються одним бітом. Завдяки чому, якщо при демодуляції під дією перешкоди замість вірного значення фази буде

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 21

визначене сусіднє, в послідовності двійкових символів на виході демодулятора вийде тільки один помилковий біт, який буде виправлений в декодері коректувального коду.

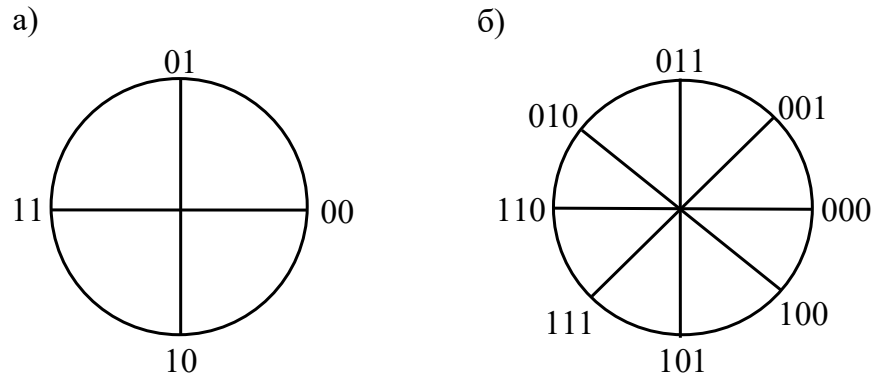


Рис. 1. Чотирипозиційна (а) та восьмипозиційна (б) фазова маніпуляція

Фазова маніпуляція використовується в стандарті DVB-S, який застосовується для супутникового телебачення.

Наступний вид маніпуляції, який часто застосовується для передачі цифрових сигналів, – це багатопозиційна квадратурна амплітудна маніпуляція (КАМн). Як відомо, квадратурна амплітудна модуляція полягає в одночасній амплітудній модуляції двома сигналами U_1 (in phase) і U_Q (quadrature) двох квадратурних складових несучої з частотою ω_0 та отриманні сумарного сигналу

$$U(t) = U_1(t) \cos \omega_0 t + U_Q \sin \omega_0 t . \quad (1)$$

Для демодуляції використовується синхронне детектування, яке полягає в домноженні сигналу $U(t)$ на $\cos \omega_0 t$ і на $\sin \omega_0 t$ з наступним заглушенням високочастотних складових фільтром НЧ. У результаті виділяються відповідно $U_1(t)$ та $U_Q(t)$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 22

Сама по собі квадратурна амплітудна модуляція вже забезпечує збільшення ефективності смуги частот у два рази тому, що на одній несучій частоті одночасно передаються два сигнали. У випадку КАМн рівні кожної квадратурної складової несучої змінюються дискретно. На рис. 2 наведена 4-позиційна КАМн, де кожна квадратурна складова може мати два можливі рівні. У випадку, наведеному на рис. 2,а, кожна складова може бути відсутньою або присутньою із заданою амплітудою.

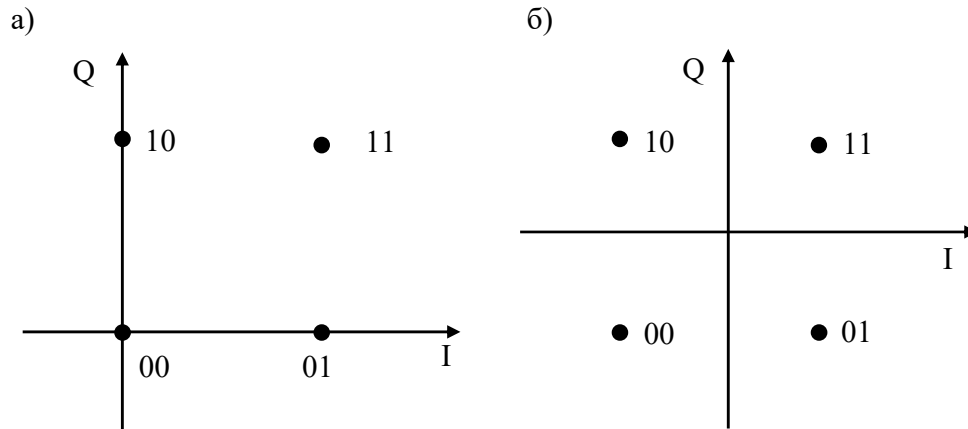


Рис. 2. Чотиріпозиційна квадратурна амплітудна модуляція

У випадку, наведеному на рис. 2,б, кожна складова може бути у фазі, що відповідає рівню $+0,5$, або у протифазі, що відповідає рівню $-0,5$. Другий варіант має перевагу тому, що має менше відношення пікової потужності несучої до її середньої потужності.

Якщо кожна квадратурна складова матиме 4 рівні, що відповідає двом бітам, отримаємо 16-позиційну КАМн, діаграма можливих комбінацій сигналів I та Q для неї наведена на рис. 3. Така модуляція дає вигоду в ефективності використання смуги частот у 4 рази, тому що одночасно передаються 4 біти. Розділення кодів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 23

комбінацій по позиціях (маніпуляційне кодування) здійснюється так, щоб коди в сусідніх позиціях відрізнялись одним бітом. Застосовуються також 64-позиційна та 256-позиційна КАМн, при використанні яких одночасно передається 6 та 8 бітів відповідно.

При дискретній зміні не амплітуди, а фази кожної із двох квадратурних складових несучої отримують квадратурну фазову маніпуляцію (КФМн). Сигнал, отриманий у цьому разі, може бути представлений відношенням

$$\cos(\omega_0 t + \theta_1) + \sin(\omega_0 t + \theta_Q) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0),$$

(2)

де: θ_1, θ_Q – фази квадратурних складових;

A_0, θ_0 – амплітуда і фаза результуючого сигналу.

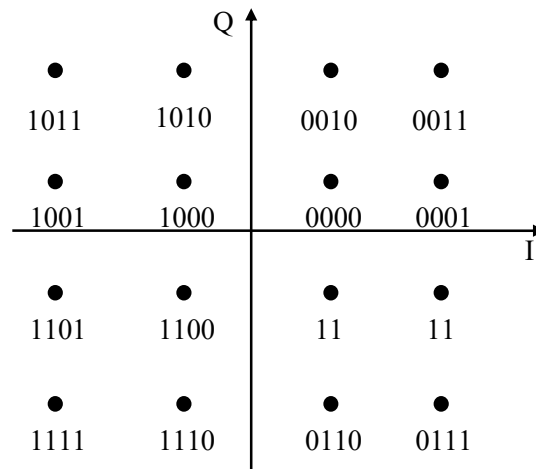


Рис. 3. 16-позиційна квадратурна амплітудна маніпуляція

У табл. 1 наведені значення фази результуючого сигналу у випадку, коли квадратурні складові модулюються за фазою

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 24

дворівневими сигналами.

θ_1	0	0	π	π
θ_Q	0	π	0	π
θ_0	$\pi/4$	$-\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$

У моменти часу, коли змінюються фази двох квадратурних складових, фаза θ_0 може змінюватися стрибком на 180° .

Це призводить до виникнення паразитної амплітудної модуляції при проходженні сигналу з КФМн через частотно-замкнені кола. Для уникнення цього небажаного ефекту використовують квадратурно-фазову маніпуляцію із зсувом (КФМн З). Сутність її полягає у тому, що фази двох квадратурних складових змінюються у різні моменти часу і можливість стрибка фази сумарного сигналу на 180° виключається.

Прийом сигналів, модульованих описаними вище методами, істотно відрізняється від прийому сигналів із звичайними видами аналогової модуляції. Структурна схема приймача сигналів з багатопозиційною ФМн, КАМн, КФМн наведена на рис. 4.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 25

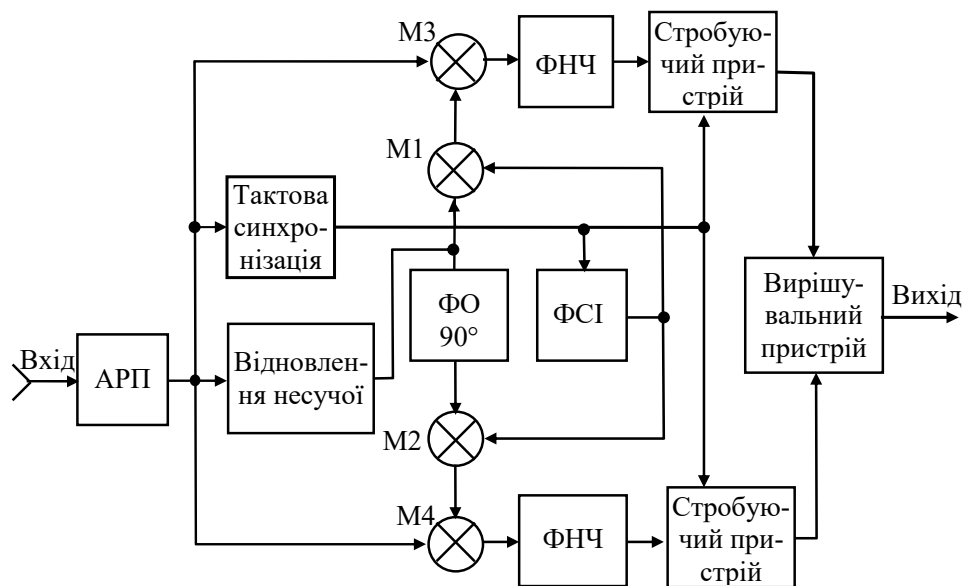


Рис. 4. Структурна схема приймача сигналу з квадратурною амплітудною маніпуляцією

На вхід цієї системи потрапляє аналоговий сигнал на проміжній частоті (ПЧ). Цей сигнал проходить через автоматичне регулювання підсилення (АРП), яке обов'язкове для ФМн та КФМн.

Далі відновлюється несуча частота. Відновлення несучої виконується з використанням фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ). Але в порівнянні, наприклад, з відновленням кольорової піднесучої в декодерах PAL, у даному випадку задача складніша тому, що пілот-сигнал відсутній. Для вирішення цієї задачі можуть застосовуватись схеми із «зворотним зв'язком». У таких пристроях декодер, який входить до петлі ФАПЧ, періодично приймає рішення про прийнятий символ. За цими рішеннями реконструюється сигнал, який порівнюється із затриманим вхідним сигналом. У результаті

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 26

формується сигнал помилки, на основі якого коректуються прийняті рішення [1–4].

Окрім несучої частоти в приймачі відновлюється тактова синхронізація, тобто виділення інтервалів часу передачі окремих канальних символів (символьних інтервалів) з урахуванням затримки поширення сигналу від передавача до приймача. Якщо у складі сигналу не передаються додаткові складові, які забезпечують тактову синхронізацію, а в більшості випадків так і є, тоді тактова синхронізація відновлюється безпосередньо із сигналу, що приймається. Також як і при відновленні несучої, для цього використовуються схеми із зворотними зв'язками типу ФАПЧ.

На вході блока відновлення несучої формується сигнал першої квадратурної складової $\cos(\omega_{\text{нт}} + \varphi)$, де $\omega_{\text{н}}$ – кругова частота несучої, φ – її фазовий зсув. Фазообертач на 90° градусів (ФО 90°) формує із цього сигналу другу квадратурну складову $\sin(\omega_{\text{нт}} + \varphi)$. Формувач сигнальних імпульсів (ФСІ), який керується сигналами тактової синхронізації, формує імпульси для «оцінки» сигналу, який приймається протягом символьного інтервалу. У найпростішому випадку сигнальні імпульси можуть мати прямокутну форму. Але краще застосовувати імпульси, спектр яких має форму відрізка косинусоїди або гаусоїди.

Сигнальні імпульси перемножуються в помножувачі М1 та М2 з квадратурними складовими несучої. Отримані пачки коливань, у свою чергу, перемножуються з прийнятим сигналом у помножувачах М3 та М4, вихідні сигнали яких проходять фільтри нижніх частот ФНЧ. У результаті виділяються квадратурні складові прийнятого сигналу. Стробуючі пристрої, які управляються сигналами тактової синхронізації, виділяють у кожному символьному інтервалі відрізки сигналу, за яким приймають рішення про прийнятий канальний символ.

Вирішувальний пристрій аналізує дані, які потрапляють на нього із стробуючих пристроїв, порівнює параметри квадратурних складових прийнятого сигналу в даному символьному інтервалі з

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 27

параметрами квадратурних складових сигналів, які формуються при передачі всіх можливих канальних символів для даного способу модуляції, та вибирає канальний символ, який дає модульований сигнал з найближчими до прийнятого сигналу параметрами. Вибраний символ видається на вихід приймача.

Описані операції, як правило, виконуються в цифровому вигляді, тому після блока АРП в схемі має бути АЦП.

Одним із сучасних методів передачі цифрових сигналів по радіоканалах наземних мереж телекомунікацій є метод ортогонального частотного мультимплексування [5–10]. У літературі така модуляція ще називається OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Сутність цього методу пояснюється на рис. 5.

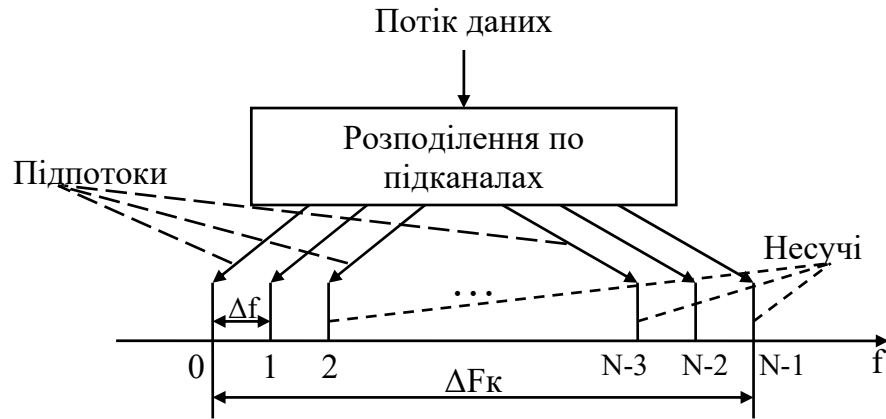


Рис. 5. Суть OFDM модуляції

У стандартному каналі телевізійного мовлення, який має ширину смуги частот ΔF_k , формують N несучих частот, які розташовані на однакових частотних інтервалах Δf .

Числа на осі частот показують номери несучих від 0 до $N-1$. Загальний потік цифрових даних, які передаються, має швидкість

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 28

передачі двійкових символів Q_0 , що розділяють на N паралельних підпотоків, кожен з яких має швидкість передачі двійкових символів $Q_1 = Q_0/N$.

Кожен підпотік передається на своїй несучій, наприклад, з використанням КАМн. Таким чином, у каналі телевізійного мовлення формується N вузькосмугових підканалів.

Кількість несучих відповідно до стандарту DVB-T може бути 6817 ($\Delta f = 1116$ Гц) або 1705 ($\Delta f = 4464$ Гц). Вибір частотних інтервалів між несучими відбувається так, щоб сусідні несучі коливання були ортогональні на відрізку часу, протягом якого передається один символ. Це дозволяє уникнути взаємного впливу сусідніх підканалів.

Модуляція та демодуляція виконується за допомогою ДПФ. При модуляції беруться одночасно символи всіх N підканалів, які передаються, та виконується зворотне ДПФ отриманого набору із N чисел. У результаті отримані інші N чисел послідовно перетворюються в аналогову форму. Ці інші N чисел еквівалентні відлікам сигналу, який містить N несучих коливань, промодульованих відповідно до символів, які передаються у цей момент часу у відповідних підканалах. Отриманий таким чином аналоговий сигнал може бути звичайним способом перенесений у потрібний частотний діапазон.

При демодуляції прийнятий сигнал переноситься на проміжну частоту та перетворюється у цифрову форму. Далі у групах по N відліків прийнятого сигналу виконується пряме ДПФ, в результаті якого формуються значення символів, які одночасно передаються в N підканалах.

Такий метод передачі має наступні переваги:

рівномірний розподіл енергії за смугою частот каналу зв'язку;

можливість передавати найважливішу частину інформації (синхронізацію, НЧ-складові сигналу яскравості) на тих ділянках смуги частот, де найменший рівень перешкод від сусідніх каналів. Області смуги частот каналу, які відповідають несучим зображенням та звуку звичайного телевізійного мовлення, взагалі не

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 29

використовувати;

завдяки тому, що кожен із підканалів вузькосмуговий, зменшується вплив відбитих сигналів при багатопроменевому прийомі.

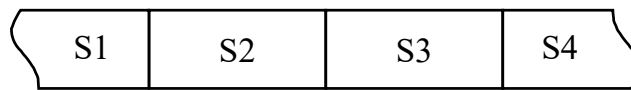
Остання властивість особливо важлива тому, що багатопроменевий прийом утворює складності для цифрового телевізійного транслявання у містах. При використанні OFDM тривалості інтервалів часу, протягом якого передаються окремі символи, збільшуються і стають більшими, ніж час затримки відбитих сигналів, тому забезпечується безпомилковий прийом.

Крім того, для виключення впливу відбитих сигналів вводяться захисні інтервали. На рис. 6,а показані відрізки часу, протягом яких на модулятор однієї із несучих потрапляють символи підпотoku даних S1, S2, S3 і так далі, який передається

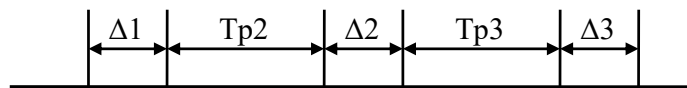
(залежно від методу модуляції несучих, кількість бітів в символі може бути різною). Перед початком передачі символу S2 формується захищений інтервал $\Delta 1$ (рис. 6,б), протягом якого на вході демодулятора у приймачі ще можуть бути присутні відбиті сигнали, які містять попередній символ S1 (рис. 6,в). Далі, протягом інтервалу часу T_{p2} передається символ S2. Аналогічно формується захисний інтервал $\Delta 2$ перед символом S3 і т. д.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 30

а)



б)



в)

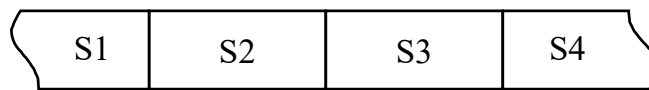


Рис. 6. Формування захисних інтервалів

У сучасних системах передачі цифрових сигналів, у тому числі у системах цифрового телебачення, модуляцію несучої суміщають з перешкодостійким кодуванням. При цьому кількість можливих станів несучої після модуляції перевищує кількість інформаційних символів, тобто в комбінацію, що передається, вводиться додаткова надлишковість для забезпечення підвищення перешкодостійкості. Таку модуляцію, суміщену з кодуванням, називають **кодованою модуляцією** (Coded Modulation). OFDM називають COFDM (Coded Orthogonal Frequency Multiplex).

Таким чином, при передачі сигналів цифрової системи телебачення по радіочастотних каналах зв'язку використовується два рівні перешкодостійкого кодування. На першому рівні, який називається зовнішнім, здійснюється кодування цифрової інформації за допомогою коду Ріда-Соломона. На другому рівні, який називається внутрішнім, здійснюється каналне кодування, суміщене

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 31

з модуляцією. Таким чином досягається необхідна перешкодостійкість.

Амплітудна маніпуляція (АМ) характеризується вмиканням та вимиканням несучої частоти (ООК, On/Off Keying) у залежності від двійкового модульовального сигналу, тому коливання з АМн має вигляд послідовності радіоімпульсів (рис. 7,а), при цьому прямокутна обвідна повторює, за формою, бінарний модульовальний сигнал.

У разі, якщо амплітуда АМн коливання може приймати значення, які відмінні від нуля, застосовуються терміни ASK (Amplitude Shift Keying) для дворівневої маніпуляції та MASK (Multiple ASK) - для багаторівневої.

На інтервалі T елементарного імпульсу АМн сигнал описується множиною

$$U_i(t) = U_i \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

де $0 < t < T$ і амплітуда U , може приймати M дискретних значень для $i = 1, 2, \dots, M$.

Спектр АМн сигналу представляє собою спектр послідовності бінарних сигналів, який перенесений на несучу частоту (рис. 7,б). Його ширина залежить від швидкості маніпуляції. Векторне представлення цифрових видів модуляції називається „сигнальним сузір'ям" (constellation diagram). Як правило, сусідні значення амплітуд відповідають інформаційним модульовальним комбінаціям, що різняться в одному розряді. Таке відображення називається **кодом Грея**. Під час демодуляції, коли найвірогіднішою є похибка з відхиленням від істинного значення на одну градацію, у прийнятій інформаційній комбінації виникає помилка лише в одному біті.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 32

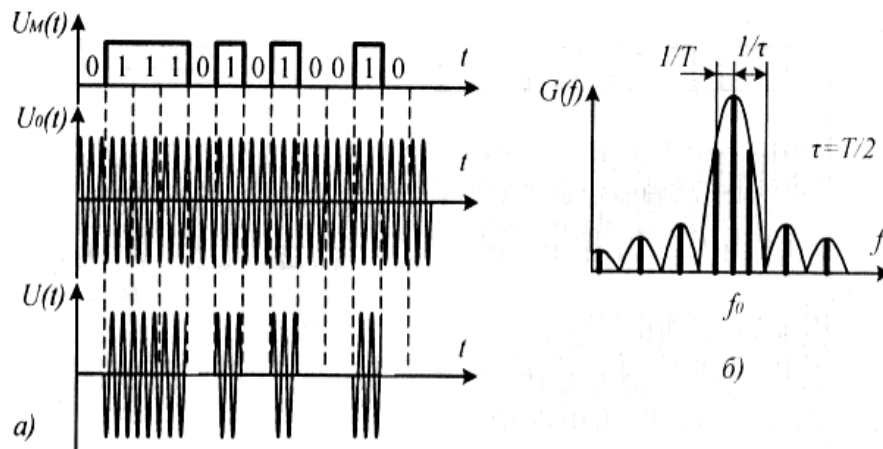


Рис. 7. Часовий графік і спектр АМн сигналу

Сигнальне сузір'я АМн сигналу зображене на рис. 8.

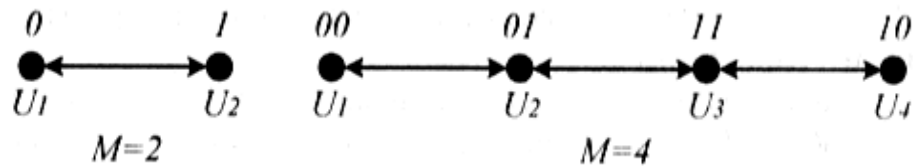


Рис. 8. Векторне представлення (сигнальне сузір'я) АМн сигналу

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослідити принципи та завадостійкість прийому сигналів з дворівневою АМн.

3.2. Запустити **Numeri** та вибрати в головному меню **розділ 5** (ДПФ).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 33

3.3. Задати параметри сигналів – амплітуду, частоту, початкову фазу піднесучих та режим їх прийому (період дискретизації та кількість відліків). Для цього вибрати послідовно: Дані – створення даних – дані з інтерпретатора формул. Форма сигналу – сума гармонічних коливань: $A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_0)$. (+F10) для збереження). Після F10 – натискати **Esc** для повернення в попереднє меню.

3.4. Здійснити зашумлення реалізації сигналу, використовуючи послідовно пункти: зашумлення даних – вид розподілу шуму (+F10).

3.5. Вибрати певний тип «вікна» у пункті 4 меню, повернувшись за допомогою **Esc** назад до цього пункту. Обробити сформовану зашумлену суміш сигналів за допомогою ДПФ. Виконати аналіз результатів оброблення, переглянувши результат ДПФ у формі таблиці, використовуючи форму представлення відліків: **дійсна/уявна частини**.

3.6. Визначити значення вимірюваних амплітуд під несучих, що задавалися та порівняти їх із пороговим значенням. Поріг вибрати рівним половині міжсимвольного інтервалу: $A_p = (A_0 + A_1)/2$.

3.7. Повторюючи пункти 3.4 – 3.6, визначити розподіл імовірності амплітуди під несучих та імовірність помилки їх прийому.

3.8. Дослідити залежність розподілу імовірності амплітуди піднесучих та помилки їх прийому в залежності від:

- частоти дискретизації;
- часу спостереження;
- відношення сигнал/шум;
- типу вікна;
- закону розподілу імовірності шуму;
- частоти піднесучих;
- величини порога A_p .

3.9. Дослідити принципи та завадостійкість когерентного прийому сигналів з 4-рівневою АМн піднесучих.

3.10. Дослідити принципи та завадостійкість некогерентного прийому сигналів з 2-рівневою та 4-рівневою АМн піднесучих.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 34

3.11. Дослідити принципи та завадостійкість некогерентного прийому сигналів з 2-рівневою та 4-рівневою ФМн і КАМ піднесучих.

3.12 Виконати параметричну оптимізацію параметрів модуляції OFDM сигналу та швидкості передачі інформації для заданого відношення сигнал/шум та ширини спектра.

3.13 Виконати параметричну оптимізацію тривалості префікса OFDM сигналу в залежності від затримки завад перевідбиття і вимог до завадостійкості.

3.14 Дослідити вплив внутрішньосимвольної та міжсимвольної інтерференцій на швидкість передачі даних OFDM сигналами.

3.15 Дослідити методи підвищення швидкості передачі даних при застосуванні технології OFDM/

Контрольні питання самоконтролю

1. Які особливості формування потоків цифрового ТВ сигналу?
2. Навести структурну схему системи передачі інформації, яка пояснює принцип канального кодування.
3. Як забезпечується підвищення перешкодостійкості системи?
4. Назвати цифрові методи модуляції.
5. Які особливості роботи багатопозиційної фазової маніпуляції?
6. Пояснити суть багатопозиційної квадратурної амплітудної маніпуляції, особливості роботи приймача за структурною схемою, переваги та недоліки.
7. Навести узагальнену структурну схему приймача для різних типів маніпуляцій.
8. Яка суть методу ортогонального частотного мультиплексування?
9. Навести переваги методу ортогонального частотного мультиплексування.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 35

Практична робота №3

Дослідження технологій функціонування смарт антен

Мета роботи: експериментальне дослідження основних принципів та властивостей технологій функціонування смарт антен.

1. Підготовка до виконання роботи

1.1. Опрацювати необхідний теоретичний матеріал в рекомендованому переліку літератури.

1.2. Опрацювати методичні вказівки до проведення лабораторної роботи, уявити мету роботи та принцип її виконання.

1.3. Вивчити технічні описи приладів, що входять до складу лабораторного робочого місця, а також спеціалізованого пакету прикладних програм ПЕОМ.

1.4. Виконати необхідні попередні розрахунки.

1.5. Відповісти на питання самотестування, готовності до виконання роботи.

1.6. Для кожного пункту третього розділу проробити та запропонувати свій варіант методики досліджень в загальному вигляді із обґрунтуванням використання конкретної моделюючої програми із пакету прикладних програм. Варіант методики досліджень узгодити із викладачем.

1.7. Вибрати тип і структуру моделюючих сигналів та розрахувати конкретні їх параметри і діапазони їх можливих значень. Підготувати програму модель із урахуванням проведених розрахунків та узгодити її з викладачем.

1.8. Проаналізувати можливість розширення досліджень стосовно особливостей процесів дискретизації радіосигналів. Запропонувати варіанти додаткових досліджень та відповідні методики їх проведення в доповнення програми розділу 3

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 36

2. Короткі теоретичні відомості

Цифрові антенні решітки (smart антени). на сьогодні широко застосовуються в телекомунікаційних системах, таких як мобільного наземного зв'язу і передачі даних(5G, 6G),системах супутникового зв'язу, системах телевізійного мовлення, системах радіомоніторингу, радіолокації та радіонавігації. Зазвичай цифрові антенні решітки використовують на базових станціях,станціях радіомоніторингу, супутникових та радіолокаційних літакових та наземних комплексах, що зумовлено їх відносно великими габаритами і складністю реалізації. Основною перевагоюsmart-антен є широкі функціональні можливості, здатність реалізовувати складні форми діаграми спрямованості, в тому числі, багатопроменеві МІМО, висока завадо захищеність за рахунок можливості реалізації ефективних технологій суттєвого подавлення завад в реальному масштабі часу.

Типові варіанти алгоритмів функціонування цифрових антенних решіток (АР) передбачають формування керованих за напрямком (просторовою частотою) нулів і екстремумів в їх діаграмі спрямованості (ДС),що дозволяєсуттєво послаблювати рівень завад і відповідно покращувати завадозахищеність прийому корисних випромінювань.Основними недоліками цих алгоритмів є значні апаратурні витрати,що зумовлені використанням додаткових каналів прийому, а такожчасові витрати, що зумовлені використанням складних трудомістких алгоритмів оброблення випромінювань, що приймаються усіма приймальними радіоканалами з круговою діаграмою спрямованості. При цьому основні нулі діаграми спрямованості цифрової антенної решітки практично не використовуються, що суттєво погіршує її ефективність функціонування. Також можливе використання спеціальних компенсаторів завад, які передбачають застосування додаткових приймальних радіоканалів із спрямованими антенами. Але в умовах функціонування систем мобільної передачі даних і мегаполісів такі компенсатори малоефективні, або занадто складні і гоміздкі. Тому актуальною задачею є розроблення і дослідження швидкодіючих

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 37

методів і алгоритмі, забезпечують ефективне подавлення завад і підвищення завадозахищеності без використання додаткових приймальних каналів. Перспективним варіантом таких методів є синхронне керування формою діаграми спрямованості цифрової антенної решітки, або спрямованістю їх основних нулів спрямованості. Суттєвим ресурсом забезпечення швидкодії таких методів є їх здатність адаптивно функціонувати в реальному часі при динамічно змінюваній електромагнітній обстановці без попереднього аналізу і оцінки напрямку на джерела потужних завад. В статті обґрунтовано принципи побудови антенних решіток з синхронним керуванням їх діаграми спрямованості і швидкодіючий метод адаптивного керуванням спрямованістю основних нулів їх діаграми спрямованості, що забезпечує суттєве підвищення завадозахищеності прийому корисних випромінювань.

Очевидно, що якість функціонування сучасних радіомереж безпосередньо залежить, зокрема, від антенних технологій і антенних систем, що використовуються. При проектуванні антенних систем для мереж 5G і 6G основним питанням є повноцінна реалізація так званих «розумних антен», здатних задовольнити вимоги сучасних радіомереж. Фізична реалізація «розумної антени» базується на сучасних інтерпретаціях фазованих антенних решіток, наприклад, очікується, що в радіомережах 6G будуть використовуватися антени MU-MIMO (Multi-User, Multiple-Input, Multiple-Output). Аналіз сучасної наукової літератури дозволяє визначити основні вимоги до антенних систем в області застосування мереж 6G, а саме, антени повинні забезпечувати: максимальну енергоефективність та широкосмуговість; можливість формування багатопроменевої діаграми спрямованості; можливість управління окремими променями діаграми спрямованості в реальному часі; можливість виділення окремого променя діаграми спрямованості для конкретного рухомого абонентського пристрою (АП).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 38

Дискретний варіант формування ДС АР в просторовій області визначення описується рівнянням:

$$S_{вих}(m) = \sum_{n=1}^m S_{вх}(n), \quad (1)$$

де m – кількість прийнятих відліків з відповідних каналів прийому.

В частотній просторовій області визначення комплексна характеристика ДС АР в межах смуги $\{0, Z/2\}$ при прямокутній формі вагової функції $W(z)$ описується рівнянням:

$$S(j\Omega, n) = \frac{2\sin(\Omega Zn)}{\Omega} e^{j\left(\frac{\Omega Z_0 n}{2}\right)}. \quad (2)$$

При використанні інших видів вагової функції $W(z)$ комплексна характеристика ДС АР в межах смуги $\{0, Z/2\}$ описується зваженою сумою діаграм по рівнянню(2) [14].

Аналіз рівнянь (1) і (2) показує, що ДС АР є дискретною функцією двох чинників: кількості радіоканалів Z і просторового кроку d . При зміні кроку d АР форма її ДС не змінюється, кількість пелюсток і нулів ДС також залишаються незмінним, а змінюються тільки діапазон $1/d$ просторових частот, ширина головної та бічних пелюсток, а також положення(просторові частоти) їх нулів і максимумів. При зміні кількості задіяних радіоканалів Z форма ДС АР також залишається незмінною, але її структура змінюється, а саме змінюються кількість бічних пелюсток їх ширина і розміщення (просторові частоти) їх нулів і максимумів. Таким чином, регулювання кількості радіоканалів Z або кроку d АР дає можливість дискретно регулювати і керувати положенням синхронно і одночасно усіх власних нулів ДС на вісі просторових частот.

Частота сигналу визначається таким чином:

$$\Omega_s = \frac{F_0}{m_0 + 1}, \quad (3)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 39

де m_0 – номер відліку, на якому відгук АР $S_{вих}(m)$ прийме мінімальне значення:

$$S_{вих}(m_0) = \min\{S_{вих}(m)\}.$$

Дискретність зміни положення нулів $S(j\Omega, n)$ зумовлює формування додаткової складової похибки вимірювання частоти в порівнянні з аналоговим варіантом (11):

$$\sigma_{f\phi}^2 = \sigma_{f\mu}^2 + \sigma_{f\phi\phi}^2, \quad (4)$$

де $\sigma_{f\phi\phi}^2$ – дисперсія похибки дискретизації при використанні дискретного формування ДС.

Абсолютне значення δf_ϕ і дисперсія $\sigma_{f\phi\phi}^2$ похибки дискретизації дорівнюють відповідно:

$$\begin{cases} \delta f_\phi \leq \frac{F_\phi}{2(m_0 - 1)m_0} \\ \sigma_{f\phi\phi}^2 = \frac{F_\phi^2}{12m_0^2(m_0 - 1)^2} \end{cases}. \quad (5)$$

Аналіз рівнянь (5) показує, що абсолютна похибка дискретизації і її дисперсія є функціями Звеличини апертури АР типу $1/z^2$ і $1/z^4$ відповідно.

Величина і характер залежності від змінної Z шумової складової при дискретному аналізі такі ж, як і при аналоговій обробці.

При реалізації синхронного керування ДС АР в цифровій формі доцільно використовувати співвідношення (1) – (5) тому що основним процесом формування ДС АР залишається просторова дискретизація з кроком d . Цифровий синтез ДС здійснюється в загальному випадку з використанням швидкодіючого алгоритму ШПФ або ДПФ наступним чином [13]:

$$U_{k,l}(j\Omega_p) = \sum_{z=0}^{Z-1} U_{z,l}(j\omega_k) \cdot \exp(-j\Omega_p \cdot z) \cdot W(z), \quad (6)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 40

де $U_{k,l}(j\Omega_p)$ – комплексний просторовий спектр для k -ї складової часового спектра $U_{z,l}(j\omega_k)$ прийнятої суміші $U_z(t)$ з L радіовипромінювань;

$\Omega_p = 2\pi \cdot p / d \cdot Z$ – значення просторової частоти, що визначає напрямок p -ї пелюстки багатопелюсткової ДС, $p = 0, 1, \dots, Z-1$;

d – відстань між елементами АР (її просторовий крок);

$W(z)$ – вагова функція просторового спектрального аналізу, що визначає форму пелюстки ДС.

Аналіз рівняння (6) показує, що синтезована ДС АР є багатопелюстковою і містить одну або декілька головних пелюсток, а також сукупність бічних пелюсток. Головні і бічні пелюстки ДС еквівалентні дії паралельного набору просторових узгоджених фільтрів для гармонічних просторових сигналів з можливістю відповідної селекції завад. Рівень і форма бічних пелюсток ДС цифрової АР суттєво визначається видом $W(z)$ – вагової функція просторового спектрального аналізу і синтезу ДС, яка визначає також ширину і форму головної пелюстки ДС.

Епюри, що пояснюють особливість форми ДС АР і формування сигнальної $\{U_{k,l}(j\Omega_p)\}_{p \in [p_{L,l}; p_{H,l}]}$ та двох маскуючих завадових груп $\{U_{k,l-1}(j\Omega_p)\}_{p \in [p_{L,l-1}; p_{H,l-1}]}$ та $\{U_{k,l+1}(j\Omega_p)\}_{p \in [p_{L,l+1}; p_{H,l+1}]}$ на її виході представлені на рис. 2.

Аналогічним чином формуються і завадові групи $\{U_{k,l-1}(j\Omega_p)\}_{p \in [p_{L,l-1}; p_{H,l-1}]}$ та $\{U_{k,l+1}(j\Omega_p)\}_{p \in [p_{L,l+1}; p_{H,l+1}]}$ на виході багатопелюсткової ДС на дію на її вході відповідних завадових радіовипромінювань $S_{l-1}(t)$ та $S_{l+1}(t)$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 41

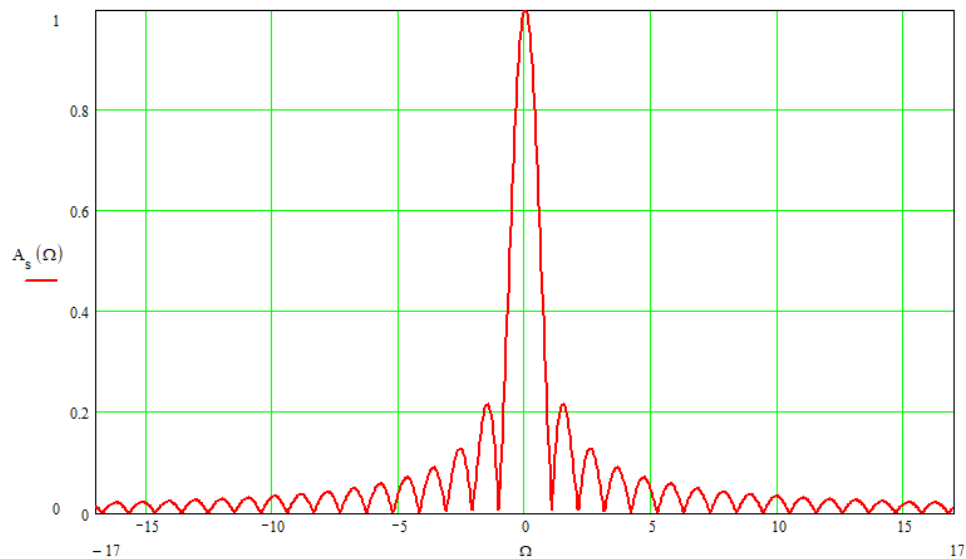


Рис. 1. Діаграма спрямованості антенної решітки з прямокутною ваговою функцією

Відмінність цифрової від дискретної обробки в АР полягає в тому, що шумова складова похибки суміщення і селекції буде залежати вже не тільки від змінної Z і рівня вхідного шуму N_0 , а також від розрядності і величини кроку квантування аналого-цифрового перетворення вхідного сигналу $S_{\text{вх}}(t)$. За рахунок похибок аналого-цифрового перетворення та виконання операцій обробки вхідного сигналу по алгоритму ШПФ на виході фільтра головної пелюстки ДС АР буде присутня додаткова адитивна шумова складова похибки по властивостям, аналогічним складовій від вхідного шуму [6].

Величина дисперсії шумової складової $\sigma_{\text{шпф}}^2$ при цифровій реалізації пропорційна при інших сталих умовах ширині еквівалентної шумової смуги головної пелюстки ДС АР:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 42

$$\sigma_{f_{\text{шум}}}^2 = \frac{F_{\theta}}{m} (N_0 + N_{\text{кв}}), \quad (19)$$

де $N_{\text{кв}}$ – одностороння спектральна щільність шумів аналого-цифрового перетворення та похибки квантування по рівню, перерахована на вхід пристрою.

Сучасна елементна база забезпечує умови $N_{\text{кв}} \leq N_0$, тому практично при розрахунках дискретні і цифрові аналізатори можуть розраховуватись по однакових співвідношеннях.

3. Порядок виконання роботи

3.1 Виконати дослідження положення залежності нулів ДС АР в залежності від кількості антенних елементів.

3.2. Виконати дослідження відношення сигнал/завада на виході АР при синхронному керуванні її нулями.

3.3. Виконати дослідження відношення сигнал/завада на виході АР в залежності від напрямку на джерело завади.

3.4 Виконати дослідження залежності відношення сигнал/завада від рівня бічних пелюсток ДС АР і типу вагової формуючої функції.

3.5 Обґрунтувати вибір методики досліджень та програмних моделей.

4. Обробка результатів досліджень

4.1 Виконати аналіз отриманих результатів досліджень, зробити висноки та надати відповідні рекомендації по ефективності АР в мережах телекомунікацій.

4.2 Виконати порівняльний аналіз результатів аналітичного та програмного моделювання та оцінити отримані результати.

4.3 Виконати аналіз перспектив застосування цифрових АР в телекомунікаціях та радіотехніці.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 43

Список використаної літератури:

1. D. Hardy, K. Macdonell and S. Gupta. Practical Considerations of a Multi-Port Leaky-Wave Antenna Array for Direction Finding. 2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Stockholm, Sweden, 2025, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP63536.2025.10999909.
2. M. K. Emara, D. J. King, H. V. Nguyen, S. Abielmona and S. Gupta. Millimeter-Wave Slot Array Antenna Front-End for Amplitude-Only Direction Finding. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 7, pp. 5365-5374, July 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2979284.
3. G. R. Friedrichs, M. A. Elmansouri and D. S. Filipovic. On the Use of Machine Learning for Direction Finding with Circular Monopole Antenna Arrays. 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Hamilton, ON, Canada, 2021, pp. 1-3.
4. Z. Ding, J. Chen, C. He and R. Jin. Elevation and Azimuth Direction Finding by Two-Element Pattern Reconfigurable Antenna Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 3, pp. 2261-2270, March 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3118820.
5. L. Xiang et al. A Wideband Differentially Fed Dual-Polarized Antenna Array for 5G/6G mmWave Application. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 23, no. 2, pp. 903-907, Feb. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2023.3338823.
6. S. Zhou, S. Zhu, Z. Ding, J. Geng, J. Chen and R. Jin. Single-Antenna Direction Finding With Harmonic Analysis Based on Phasor Beam-Steering Antenna. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 24, no. 12, pp. 4595-4599, Dec. 2025, doi: 10.1109/LAWP.2025.3605665.
7. C. Allmann, J. Springer, M. Oispuu and W. Koch. Optimized Array Geometry for 2D-DOA Estimation Using a Time-Multiplexed Co-Array Approach. 2024 Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications (SDF), Bonn, Germany, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/SDF63218.2024.10773976.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 44

8. C. J. Park, C. N. Pearce, A. Ackie, F. Vassallo and K. J. Duncan. Dynamically Reconfigurable Direction-Finding Antenna Array for Unmanned Arial Systems. 2021 IEEE 21st Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Sand Key, FL, USA, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/WAMICON47156.2021.9443604.

9. E. C. D. A. Bisneto, M. B. S. A. De Brito, S. R. Rondineau and D. M. Muñoz. Comparison of evolutionary algorithms for synthesis of linear array of antennas with minimal level of sidelobe. 2022 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Padua, Italy, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/CEC55065.2022.9870362.

10. V. L. Do, B. M. Tran, M. T. Duong and T. B. Nguyen. Wideband Direction Finding of UAVs/Drones using Log-periodic Antenna Array. 2025 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Hanoi, Vietnam, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATC67618.2025.11268573.

11. L. Grundmann and D. Manteuffel. Evaluation Method and Design Guidance for Direction-Finding Antenna Systems. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 9, pp. 7146-7157, Sept. 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3291424.

12. R. Ma and N. Behdad. A Spatially Confined, Platform-Based HF Direction Finding Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 2, pp. 1298-1308, Feb. 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3111311.

13. K. Ren. Direction-of-Arrival Estimation Using a Uniform Linear Array Considering Antenna Radiation Patterns. 2024 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM), Boulder, CO, USA, 2024, pp. 309-310, doi: 10.23919/USNC-URSINRSM60317.2024.10464535.

14. Smailov, N., Tsyporenko, V., Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Abdykadyrov, A., Kabdoldina, A., Kadyrova, R. (2024). Streamliningdigitalcorrelation-interferometricdirectionfindingwithspatialanalyticalsignal. Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 14(3), 43–48. doi: 10.35784/iapgos.6177

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 45

15. Ципоренко В.Г., Ципоренко В.В., Чухов В.В., Андреев О.В.
Дослідження принципів спектрально-просторового аналізу та оцінка
ширини спектра сигналу. Технічна інженерія. 2025. Вип. (1(95)). С.
346–356.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 46

Практична робота №4

Дослідження технологій програмно визначених радіосистем

Мета роботи: дослідити технології SDR- радіо та характеристики SDR засобу радіомоніторингу, оцінити програмне забезпечення для керування SDR трансівером Hack RF.

1. Підготовка до виконання роботи

1.1. Опрацювати необхідний теоретичний матеріал в рекомендованому переліку літератури.

1.2. Опрацювати методичні вказівки до проведення лабораторної роботи, уявити мету роботи та принцип її виконання.

1.3. Вивчити технічні описи приладів, що входять до складу лабораторного робочого місця, а також спеціалізованого пакету прикладних програм ПЕОМ.

1.4. Виконати необхідні попередні розрахунки.

1.5. Відповісти на питання самотестування, готовності до виконання роботи.

1.6. Для кожного пункту третього розділу проробити та запропонувати свій варіант методики досліджень в загальному вигляді із обґрунтуванням використання конкретної моделюючої програми із пакету прикладних програм. Варіант методики досліджень узгодити із викладачем.

1.7. Вибрати тип і структуру моделюючих сигналів та розрахувати конкретні їх параметри і діапазони їх можливих значень. Підготувати програму модель із урахуванням проведених розрахунків та узгодити її з викладачем.

1.8. Проаналізувати можливість розширення досліджень стосовно особливостей процесів дискретизації радіосигналів. Запропонувати варіанти додаткових досліджень та відповідні методики їх проведення в доповнення програми розділу 3

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 47

2. Завдання на роботу

- 2.1. Проведення сканування заданого діапазону частот.
- 2.2. Дослідження можливостей програм SDR++ та SDR sharp щодо пошуку сигналів певної частоти та оцінки їх параметрів.
- 2.3. Дослідження можливості Hack RF щодо аналізу частотного діапазону та виявлення сигналів з використанням антен різного типу.

3. Теоретичні відомості

Програмно визначена радіосистема (англ. Software-defined radio, SDR) – радіопередавач та/або радіоприймач, що використовує технологію, що дозволяє за допомогою програмного забезпечення встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи, зокрема, діапазон частот, тип модуляції або вихідну потужність виключенням зміни робочих параметрів, що використовуються під час звичайної попередньо визначеної роботи з попередніми установками радіопристрою, відповідно до тієї чи іншої специфікації або системи.

Програмно визначена радіосистема виконує значну частину цифрової обробки сигналів на звичайному персональному комп'ютері або ПЛІС. Метою такої схеми є радіоприймач або радіопередавач довільних радіосистем, що змінюється шляхом програмної переконфігурації (звідси походить альтернативне найменування таких систем - програмно-конфігуровані).

Яке залізо вибрати для SDR. Побутових (аматорських) SDR, які можна просто купити в магазині, багато: Funcube Dongle, RTL-SDR, USRP, OsmoSDR, BladeRF, HackRF, AirSpy, пристрої LimeSDR USB Type-A та інші. Одним із найпопулярніших пристроїв є HackRF. Цей пристрій має великий діапазон підтримуваних частот, а також прийнятна (порівняно з деякими іншими моделями) ціна.

HackRF One, рис. 4.1, має характеристики:

- Діапазон робочих частот: 1 MHz – 6 GHz;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 48

- Смуга пропускання: 8-20 MHz;
- Частота дискретизації: 8 – 20 Msps;
- Напівдуплексний ресівер;
- Збільшення потужності прийому та передачі, а також фільтр частот налаштовується програмно;
- Інтерфейс хоста: USB 2.0.

Як можна побачити, пристрій досить повільний інтерфейс USB 2.0, а також частота пропускання тільки 20 MHz, тобто це не самий «ТОП». Але для цього вистачить. До того ж останнім часом на пристрій сильно знизилася ціна. І ще, хоча в характеристиках зазначена частота, що підтримується 1 MHz - 6 GHz, але можна вийти за цей діапазон. Цей пристрій має прошивку з відкритим вихідним кодом. Воно сумісне з GNU Radio, SDR# та іншими програмами. Хороша сумісність із Linux.

Запобіжні заходи для HackRF

Не можна запускати прийом або передачу даних без підключеної антени! Це дуже важливо, оскільки прилад не контролює, чи антена під'єднана і в будь-якому випадку під навантаженням подає електрику, тому без антени HackRF може просто згоріти.

Або замість антени використовуйте заглушку – мається на увазі не пластикові червоні заглушки, які захищають від пилу, а заглушку з функцією споживання навантаження – золотиста «гайка», яка накручується на гніздо антени.

У приладі три однакові SMA female роз'єми: два на одній стороні і один на іншій стороні. Роз'єм для антени це той, який розташований один (інші два призначені для синхронізації кількох пристроїв HackRF), рис. 7.1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 49



Рис. 4.1

Структурна схема SDR трансивера наведена на рис. 4.2.

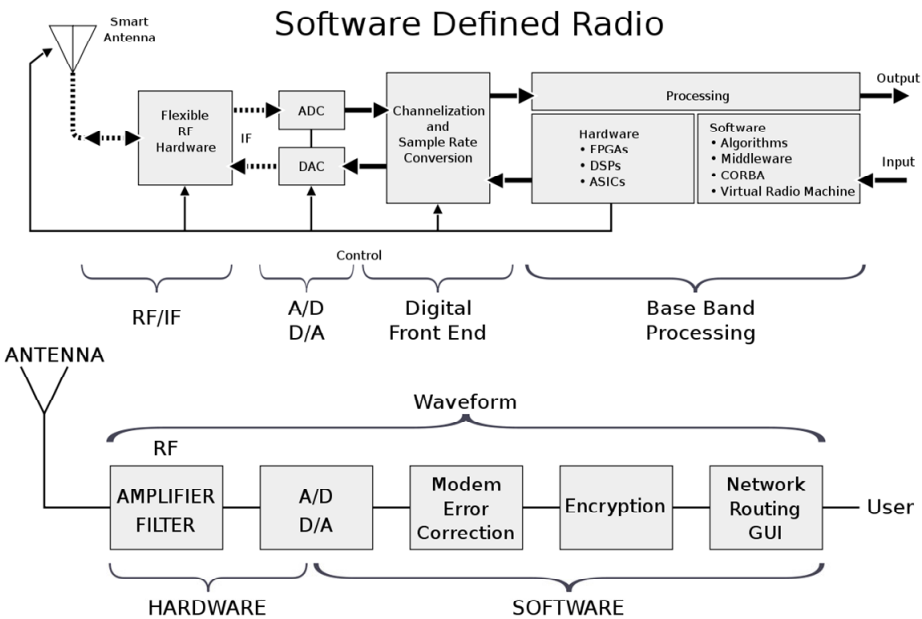


Рис. 4.2. Структурна схема SDR трансивера
Вигляд меню SDR sharp з HackRF наведено на рис. 4.3, 4.4.

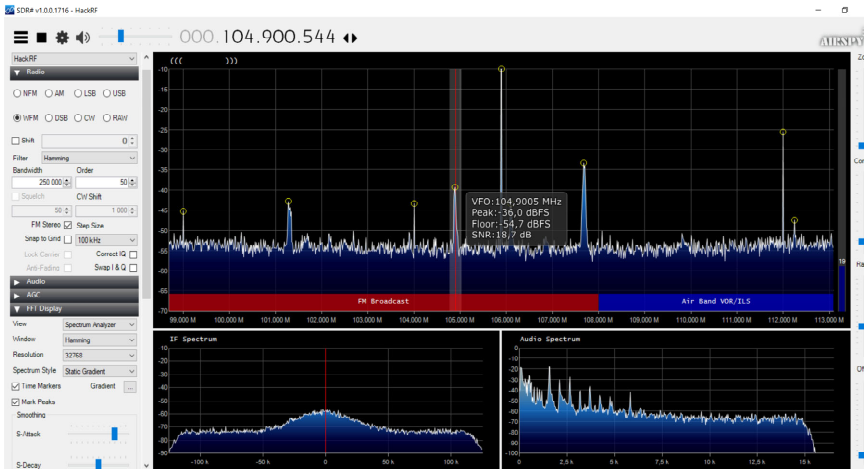


Рис. 4.3

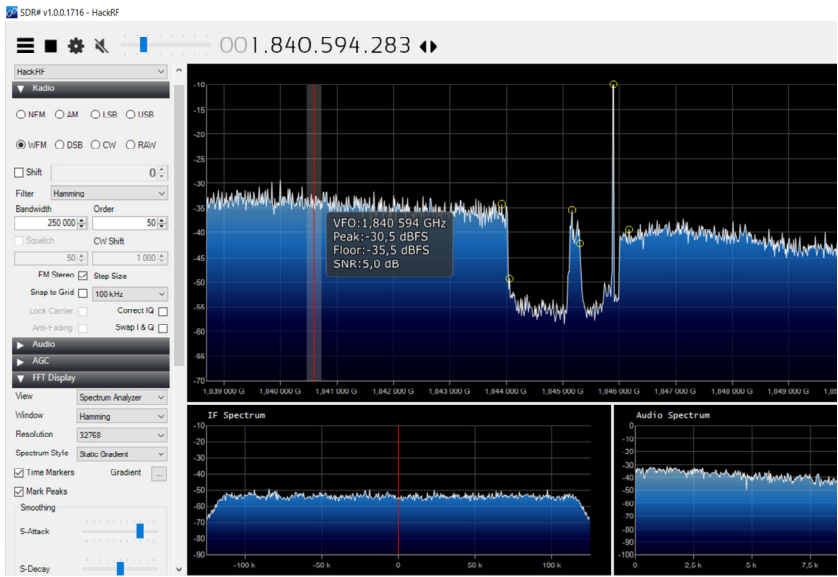


Рис. 4.4

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 51

4. Виконання роботи

1. Прикрутіть антену до Hack RF.
2. Підключіть Hack RF за допомогою USB до комп'ютера.
3. Дослідіть можливості широкосмугового радіоприймача Hack RF.
3. Встановіть програму SDR++ та SDR sharp на комп'ютері.
4. Дослідіть можливості щодо сканування певного діапазону частот у залежності від виставлених параметрів ширини смуги пропускання, типу антени, рівня підсилення сигналу, виставленого виду модуляції.
6. Виміряйте в ручному та автоматичному режимі параметри 4-х радіовипромінювань в різних частотних діапазонах за індивідуальним завданням.
7. Виконати дослідження функціональних можливостей та точностних характеристик доступних SDR-засобів радіомоніторингу в онлайн режимі в різних регіонах та виконати їх порівняльний аналіз.

5. Контрольні запитання

1. Призначення програм SDR++ та SDR sharp.
2. Призначення широкосмугового приймача Hack RF.
3. Можливості SDR++ та SDR sharp щодо сканування та вимірювання параметрів певного діапазону частот.
4. Можливості широкосмугового приймача AR 8200.
5. Особливості сканування частотного діапазону 1 MHz – 6 GHz.

6. Обробка результатів вимірювань та зміст звіту:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Інтерфейс програм SDR++ та SDR sharp.
3. Скріншоти виконання роботи по пунктах.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 52

4. Аналіз та порівняльна характеристика отриманих залежностей.

5. Висновки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 53

Література

1. Шолохов С.М., Самборський І.І., Вакуленко О.В., Ніколаєнко Б.А. Завадозахист радіоелектронних засобів. Частина 1. Основи завадозахисту систем зв'язку: навчальний посібник. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 210 с.
2. Основи та методи цифрової обробки сигналів: від теорії до практики: навч. посібник / Ушенко Ю.О., М.С. Гавриляк, М.В. Талах, В.В. Дворжак. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. – 2021. – 308 с.
3. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A. Radio monitoring. Springer, 2019. – 467 p.
4. Засоби радіопротидії в інформаційно-телекомунікаційних системах. Електронний навчальний посібник. Браїловський В. В., Рождественська М. Г., Гресь О. В., Косован Г. В. Чернівці Чернівецький нац. ун-т, 2021. – 129 с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 54

Практична робота №5

Дослідження мультимедійних технологій

Мета роботи: вивчення складу і функціонування технологій стиснення та кодування нерухомих зображень, оцінка їх ефективності.

Засоби для дослідження: ПК, програма FastStoneImageViewer, зображення формату JPEG.

1. Підготовка до виконання роботи

1.1. Опрацювати необхідний теоретичний матеріал в рекомендованому переліку літератури.

1.2. Опрацювати методичні вказівки до проведення лабораторної роботи, уявити мету роботи та принцип її виконання.

1.3. Вивчити технічні описи приладів, що входять до складу лабораторного робочого місця, а також спеціалізованого пакету прикладних програм ПЕОМ.

1.4. Виконати необхідні попередні розрахунки.

1.5. Відповісти на питання самотестування, готовності до виконання роботи.

1.6. Для кожного пункту третього розділу проробити та запропонувати свій варіант методики досліджень в загальному вигляді із обґрунтуванням використання конкретної моделюючої програми із пакету прикладних програм. Варіант методики досліджень узгодити із викладачем.

1.7. Вибрати тип і структуру моделюючих сигналів та розрахувати конкретні їх параметри і діапазони їх можливих значень. Підготувати програму модель із урахуванням проведених розрахунків та узгодити її з викладачем.

1.8. Проаналізувати можливість розширення досліджень стосовно особливостей процесів дискретизації радіосигналів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 55

Запропонувати варіанти додаткових досліджень та відповідні методики їх проведення в доповнення програми розділу 3

2. Короткі теоретичні відомості

Можливості скороченого опису зображень обумовлені двома основними факторами: обмеженнями зорового сприйняття людини, завдяки чому можна без шкоди для суб'єктивного якості зображення апроксимувати більш економним зображень, і надмірністю цифрового уявлення, яку можна зменшити різними методами, одним з яких є стандарт JPEG.

В даний час алгоритм стиснення нерухомих кадрів (відеозображень) ґрунтується на стандарті JPEG (Joint Photographic Experts Group). Алгоритм JPEG здійснює кодування елементів зображення в частотній області. Етапи кодування JPEG наведені на рис. 1:



Рис. 1 Основні етапи процедури стиснення за стандартом JPEG

Переклад в колірний простір YCbCr

Перший етап – перетворення початкового зображення з метою розподілу інформації про яскравість і колір точок зображення, субдискретизація інформації про колір. Розподіл інформації про

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 56

яскравість і колір точок зображення виконується шляхом перетворення кольорової схеми RGB в схему:

$$\begin{cases} Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B, \\ Cb = -0,169R - 0,331G + 0,500B + 128, \\ Cr = 0,500R - 0,419G - 0,081B + 128, \end{cases}$$

де R, G, B – червона, зелена і синя складові частини інформації про дискретну точку зображення, Cr, Cb – інформація про колір точки, відокремлена від інформації про яскравість (кольорорізницева інформація).

Зворотнє перетворення виконується відповідно до формул:

$$\begin{cases} R = Y + 1,402(Cr - 128), \\ G = Y - 0,844(Cb - 128) - 0,714(Cr - 128), \\ B = Y + 1,772(Cb - 128). \end{cases}$$

Субдискретизація компонент кольоровості

Субдискретизація інформації про колір полягає в збереженні тільки кожного другого або четвертого дискретного значення Cb і Cr.

Після перекладу в колірний простір YCbCr виконується дискретизація. Можливий один з трьох способів дискретизації:

4: 4: 4 - відсутня Субдискретизація;

4: 2: 2 - компоненти кольоровості міняються через одну по горизонталі;

4: 2: 0 - компоненти кольоровості міняються через один рядок по горизонталі, при цьому по вертикалі вони змінюються через рядок.

При використанні другого або третього способу ми позбавляємося від 1/3 або 1/2 інформації відповідно. Очевидно, що чим більше інформації ми втрачаємо, тим сильніше будуть спотворення в підсумковому зображенні.

Дискретне косинусне перетворення

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 57

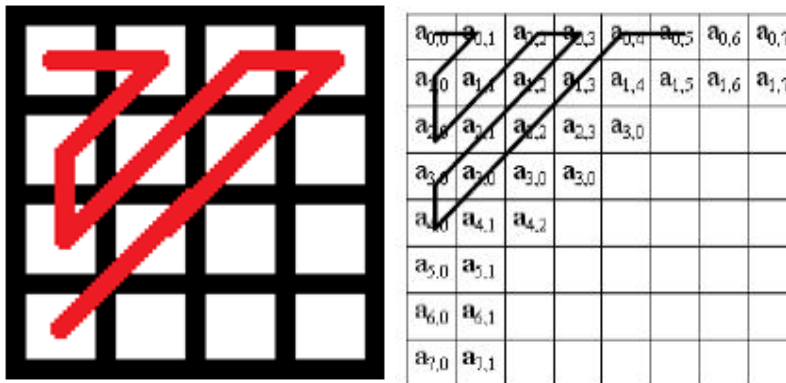
Зображення розбивається на компоненти $8 * 8$ пікселів, до кожної компоненті застосовуються ДКП. Це призводить до ущільнення енергії в коді. Перетворення застосовуються до компонентів незалежно.

Квантування

Людина практично не здатний помічати зміни в високочастотних складових, тому коефіцієнти, що відповідають за високі частоти можна зберігати з меншою точністю. Для цього використовується покомпонентне множення (і округлення) матриць, отриманих в результаті ДКП, на матрицю квантування. На даному етапі теж можна регулювати ступінь стиснення (чим ближче до нуля компоненти матриці квантування, тим менше буде діапазон підсумкової матриці).

Зигзаг-сканування матриць

Зигзаг-сканування матриці - це спеціальний напрям сканування, представлене на малюнку:



При цьому для більшості реальних зображень на початку будуть ненульові коефіцієнти, а ближче до кінця будуть нулі.

RLE- кодування

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 58

Використовується особливий вид RLE-кодування: виводяться пари чисел, причому перше число в парі кодує кількість нулів, а друге - значення після послідовності нулів. Тобто код для послідовності 0 0 15 42 0 0 0 44 буде наступним (2; 15) (0; 42) (3; 44).

Кодування методом Хаффмана

Використовується описаний вище алгоритм Хаффмана. При кодуванні використовується заздалегідь певна таблиця.

Алгоритм декодування полягає в зверненні виконаних перетворень.

До переваг алгоритму можна віднести високу ступінь стиснення (5 і більше разів), відносно невисока складність (з урахуванням спеціальних процесорних інструкцій), патентна чистота. Недолік - артефакти, помітні для людського ока.

Фрактальне стиснення

Фрактальне стиснення - це відносно нова галузь. Фрактал - складна геометрична фігура, що володіє властивістю самоподібності. Алгоритми фрактального стиснення зараз активно розвиваються, але ідеї, що лежать в їх основі можна описати такою послідовністю дій.

Процес стиснення:

Поділ зображення на області (домени), що не перекриваються. Набір доменів повинен покривати все зображення повністю.

Вибір рангових областей. Рангові області можуть перекриватися і не покривати цілком все зображення.

Фрактальне перетворення: для кожного домена підбирається така рангова область, яка після афінного перетворення найбільш точно апроксимує домен.

Стиснення і збереження параметрів афінного перетворення. У файл записується інформація про розташування доменів і рангових областей, а також стислі коефіцієнти афінних перетворень.

Етапи відновлення зображення:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 59

Створення двох зображень однакового розміру А і В. Розмір і зміст областей не мають значення.

Зображення В ділиться на домени так само, як і на першій стадії процесу стиснення. Для кожного домена області В проводиться відповідне Афінний перетворення рангових областей зображення А, описане коефіцієнтами з стисненого файлу. Результат поміщається в область В. Після перетворення виходить зовсім нове зображення.

Перетворення даних з області В в область А. Цей крок повторює крок 3, тільки зображення А і В помінялися місцями.

Кроки 3 і 4 повторюються до тих пір, поки зображення А і В не стануть непомітними.

Точність отриманого зображення залежить від точності афінного перетворення.

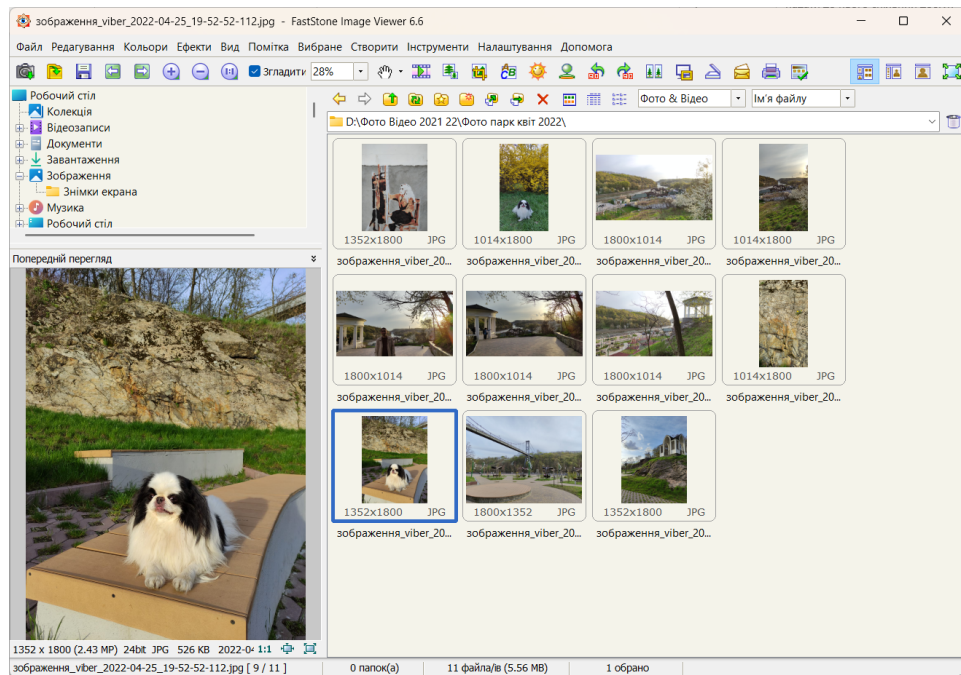
Складність алгоритмів фрактального стиснення в тому, що використовується цілочислова арифметика і спеціальні досить складні методи, що зменшують помилки округлення.

Відмінною особливістю фрактального стиснення є його яскраво виражена асиметрія. Алгоритми стиснення і відновлення істотно розрізняються (стиснення вимагає набагато більшої кількості обчислень).

Порядок виконання роботи:

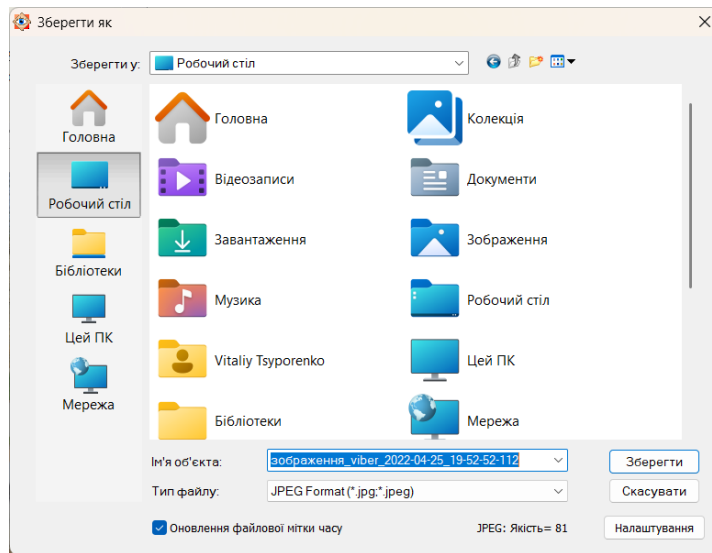
1. Запустити програму FastStone Image Viewer, вибрати зображення розширення jpeg, відкриється вікно:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 85 / 60</i>

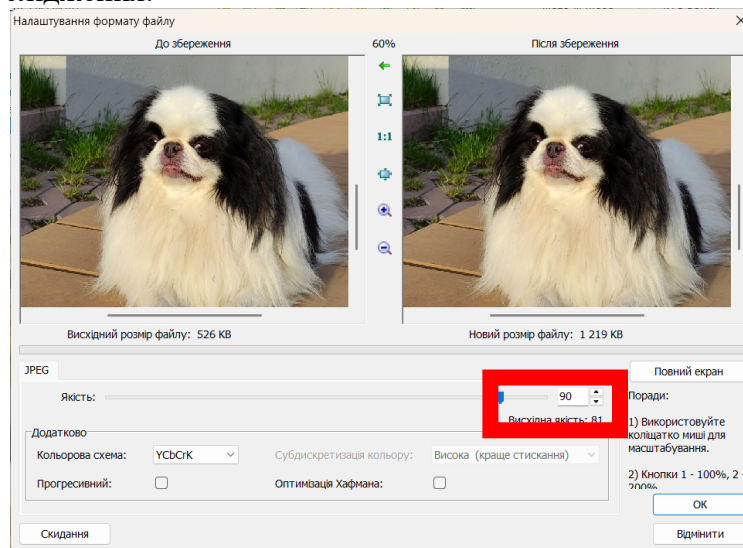


2. Натиснути Файл – Зберегти як. У вікні, що відкрилося натиснути кнопку Налаштування:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 61



3. Отримали робоче вікно, за допомогою якого слід провести дослідження:



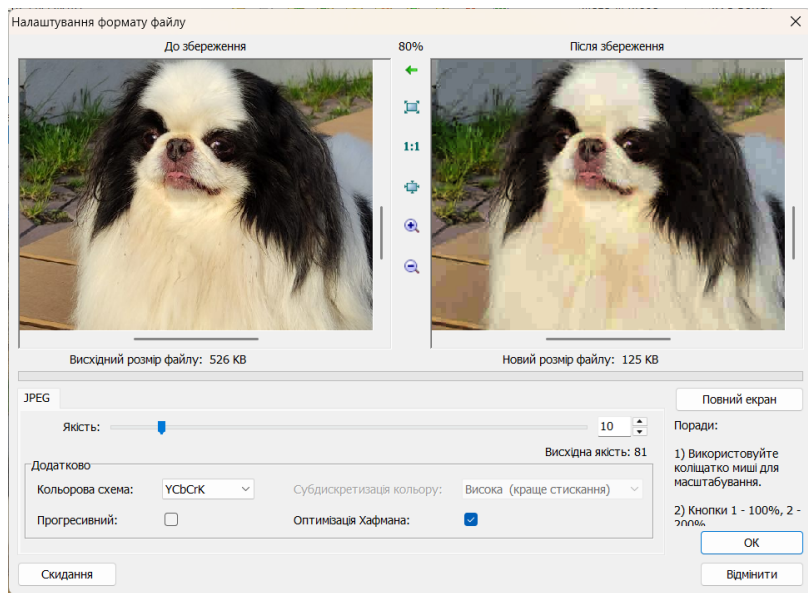
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 62

4. Змінюючи якість q зображення від $\min$ (0) до $\max$ (100%), визначити зміни в розмірі файлу (ΔM). Побудувати залежність $\Delta M(q)$ при різних установках меню. Використовуючи кнопку



«Повний екран» для спостереження, визначити, які блоки найбільш спотворені при найнижчому рівні якості.

5. При трьох вибраних значеннях якості, наприклад, (10%, 40%, 85%) змінюючи режими роботи субдискретизації кольору визначити характер спотворень зображень.
6. Дослідити характер спотворень при трьох значеннях якості (10%, 40%, 85%) при зміні кольорової схеми.
- 7.



8. Дослідити залежність розміру файлу від використання оптимізації Хаффмана
- Оптимізація Хаффмана: ☒
- Заповнити таблицю 1 та побудувати графік залежності.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 63

№п/п	Вихідний розмір файлу	Новий розмір файлу (без використання оптимізації Хаффмана), S_{NH}	Новий розмір файлу (з використання оптимізації Хаффмана), S_H	$\Delta S = S_{NH} - S_H$
1	758 кВ	77,9 КБ	67,9 КБ	10 КБ
...				
n				

9. Розрахувати коефіцієнти стиснення зображення при зміні якості зображення, зміні кольорової схеми, субдискретизації кольору за формулою:

де V_0 – розмір вихідного файлу, V – розмір нового (стисненого) файлу.

10. Повторити п.2 – п.8 для трьох різних зображень.
11. Зробити відповідні висновки.

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Мету роботи.
2. Описання ходу виконання роботи.
3. Графіки залежностей отриманих в п.3 та п.7. Зробити висновки.
4. Використані зображення (по 1-2 прикладам «до» та «після» стиснення). Описати видимі зміни в якості отриманих зображень.
5. Загальні висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 64

Практична робота 6

Дослідження технологій супутникових мереж

1. Мета роботи

Метою лабораторної роботи є поглиблення теоретичних знань, оволодіння розрахунковими методиками аналізу характеристик супутникових мереж передачі даних та їх дослідження..

2. Підготовка до виконання роботи

1.1. Опрацювати необхідний теоретичний матеріал в рекомендованому переліку літератури.

1.2. Опрацювати методичні вказівки до проведення лабораторної роботи, уянити мету роботи та принцип її виконання.

1.3. Вивчити технічні описи приладів, що входять до складу лабораторного робочого місця, а також спеціалізованого пакету прикладних програм ПЕОМ.

1.4. Виконати необхідні попередні розрахунки.

1.5. Відповісти на питання самотестування, готовності до виконання роботи.

1.6. Для кожного пункту третього розділу проробити та запропонувати свій варіант методики досліджень в загальному вигляді із обґрунтуванням використання конкретної моделюючої програми із пакету прикладних програм. Варіант методики досліджень узгодити із викладачем.

1.7. Вибрати тип і структуру моделюючих сигналів та розрахувати конкретні їх параметри і діапазони їх можливих значень. Підготувати програму модель із урахуванням проведених розрахунків та узгодити її з викладачем.

1.8. Проаналізувати можливість розширення досліджень стосовно особливостей процесів дискретизації радіосигналів. Запропонувати варіанти додаткових досліджень та відповідні методики їх проведення в доповнення програми розділу 3

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 65

3. Короткі теоретичні відомості

Starlink - розробка американської компанії SpaceX, що базується на використанні високопродуктивної супутникової платформи. Система надає доступ до широкосмугового Інтернету у будь-якій точці планети. Першою компанія почала обслуговувати Канаду та США у 2020 році.

Назва «Starlink» походить від роману Джона Гріна «Провина зірок». Розробка проекту почалась у 2015 році, а перші два супутники було запущено у тестовий політ 22 лютого 2018 року ракетою Falcon 9. Запуск наступної партії супутників у кількості 60 одиниць відбувся у травні 2019 року. У січні 2020 року SpaceX мала найбільшу кількість супутників на орбіті (180 штук). До середини 2020-х років компанія планувала відправити на навколоземні орбіти близько 12 тисяч супутників.

Starlink - це глобальна супутникова система передачі даних, що розгортається компанією SpaceX для забезпечення високошвидкісного широкосмугового повсемісного супутникового доступу в Інтернет.

Угруповання Starlink складається з двох окремих супутникових мереж. Перша мережа повинна складатися з 4425 супутників Ки- та Ка-діапазонів. Робоча орбіта супутників 550 та 1200 км.

У березні 2017 року компанія поділилася планами сформувати сузір'я супутників V-діапазону, що знаходитимуться на не геосинхронних орбітах для надання послуг зв'язку в спектрі, котрий раніше не був широко застосований для комерційних комунікаційних послуг. Сузір'я V-діапазону складається із 7518 супутників, що будуть виведені на орбіту з висотою 340 км.

У жовтні 2019 року стало відомо, що США на прохання SpaceX направила заявку до Міжнародного союзу електрозв'язку щодо збільшення сузір'я ще на 30 тис. одиниць. Вони працюватимуть на висоті 328 - 550 км.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 66

Варто зазначити, що супутники Starlink є відносно невеликими і їх утилізація після завершення терміну експлуатації відбувається шляхом згоряння в щільних прошарках атмосфери Землі. Один з основних недоліків супутників Starlink є чутливість до природніх космічних електромагнітних збурень, наприклад, після запуску 3 лютого 2022 року та виконання перших тестових маневрів, 40 із 49 супутників пошкодила потужна геомагнітна буря.

Основні технічні характеристики супутників Starlink

Супутники Starlink виробляються серійно (~120 штук на місяць), тому коштують значно менше подібних, але випущених в одиничній версії. Вони належать до класу малих і важать ~260 кг. На відміну від поширених кубічних супутників, Starlink мають значно плоскішу форму та є стійкішими до механічних пошкоджень. Це дозволяє поміщати їх велику кількість (60 шт.) всередині контейнера ракетноносія (рис. 1) та здійснювати їх від'єднання у космосі без наявності спеціального механізму для кожного із них. Замість двох стандартних сонячних панелей Starlink має одну велику, потужністю 3 кВт (рис. 2). Використовуючи іонний двигун на криптоні, кожен апарат здатен маневрувати (рис. 2), облітаючи космічну перешкоду, а після закінчення терміну служби спеціально сходити з орбіти і згорати в атмосфері, щоб самому не засмічувати простір. Застосування криптоноу, а не ксенону здешевлює кожен супутник на ~\$50 тис.5

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 67



Рисунок 1 – Супутники Starlink у стартовому контейнері

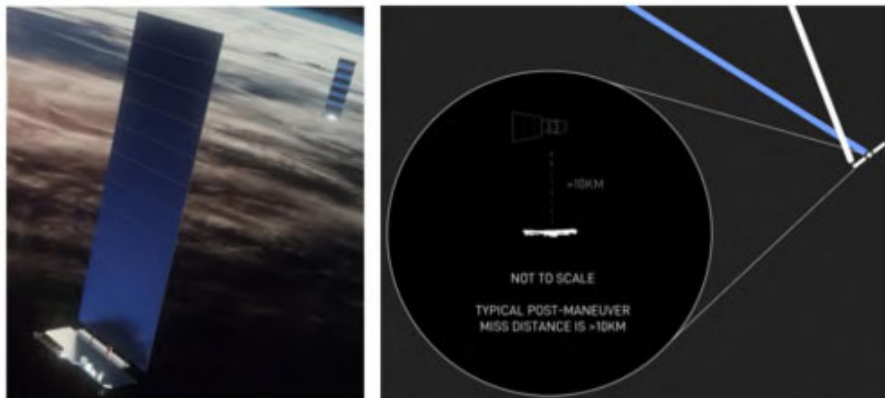


Рисунок 2 – Супутники Starlink у космосі

Точне визначення місця перебування всіх супутників допомагатиме визначати навігаційна система відстеження зірок. Відповідно документам, поданим до Федеральної комісії зі зв'язку США,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 68

супутники у космосі спілкуватимуться між собою на частоті понад 10 ГГц за допомогою лазерного променя. Із наземними станціями та терміналами користувачів зв'язок здійснюватиметься у радіо (Ku та Ka) діапазонах на частоті 12 ГГц. Ku-діапазон більш надійні у роботі навіть у хмарну та дощову погоду, а Ka-діапазон забезпечує значно більшу пропускну здатність.

Регламентована швидкість передачі даних - 1 Гбіт/с для кожного споживача. Кожен запуск 60 супутників може забезпечити 1 Терабіт пропускну здатності, що потенційно може підтримувати 40 000 користувачів, які одночасно передають контент високої якості. Зазвичай зв'язок із геостационарним супутником має мінімальну кругову затримку сигналу (туди-назад) у 239 мс, але іноді вона може сягати і 600 мс. Супутники Starlink будуть обертатися на висоті в 1/30 цієї відстані, тому затримка сигналу становитиме лише 25 - 30 мс, що еквівалентно з кабельним або оптоволоконним зв'язком. SpaceX навіть намагається досягти величини у 10 мс.

Основні технічні характеристики та принцип роботи терміналів користувача Starlink

Особливість терміналів Starlink, наприклад, у порівнянні з терміналом Iridium Satellite Constellation, сигнал від якого подається безпосередньо у телефон, є в тому, що Starlink потребуватиме додаткового обладнання (супутникової антенної системи суміщеної з прийомопередавачем (рис. 3) і з'єднаної з роутером). Загальна схема розгорнутого терміналу Starlink показана на рис. 4.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 85 / 69</i>

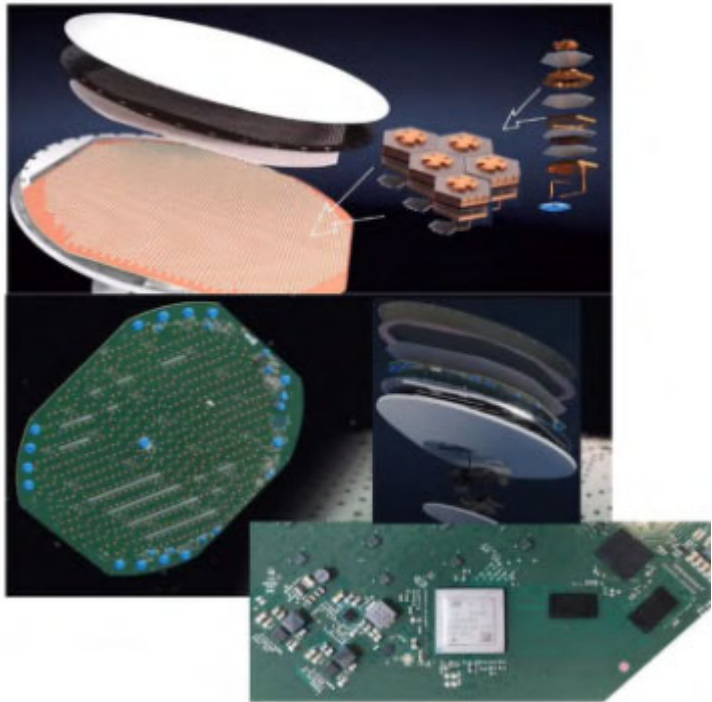


Рисунок 3 – Фазована антенна система Starlink інтегрована з прийомопередавачем

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 70



Рисунок 4 – Загальна схема розгорнутого терміналу Starlink



Рисунок 5 – Встановлення з’єднання між терміналом Starlink і космічним сегментом системи

Загальний алгоритм встановлення з’єднання між терміналом Starlink і космічним сегментом системи такий (рис. 5): після включення термінал Starlink визначає своє місцезнаходження за допомогою системи Navstar GPS; далі за допомогою сервомоторів (за їх наявності) позиціонується площина фазованої антенної системи у напрямку вірогідного знаходження супутника (супутників) Starlink на

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 71

небосхилі; на наступному кроці фазована антенна система формує пелюстку діаграми спрямованості на конкретний супутник (супутники) (рис. 6). Зміна кута напрямку пелюстки діаграми спрямованості може відбувається, за необхідності, кожні кілька мікросекунд - це відбувається з метою підтримки зв'язку з супутником, що рухається по орбіті, або з метою перемикання на інший супутник, який знаходиться в зоні видимості наземного терміналу.

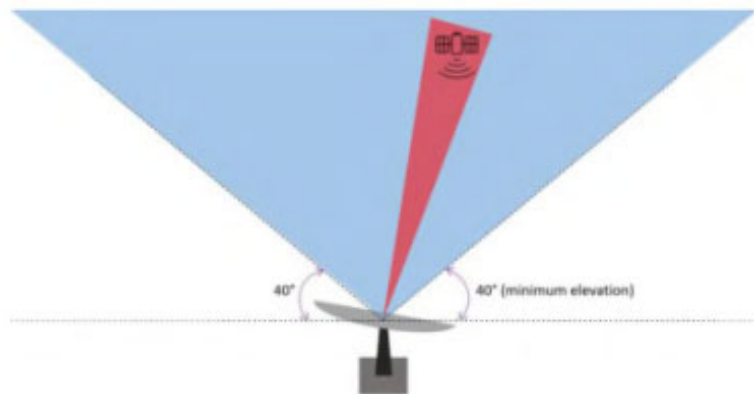


Рисунок 6 – Встановлення зв'язку між наземним терміналом і супутником Starlink

На сьогоднішній день існує кілька версій реалізації користувацьких терміналів Starlink (зовнішня геометрія і основні технічні характеристики наведені на рис. 7)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 72

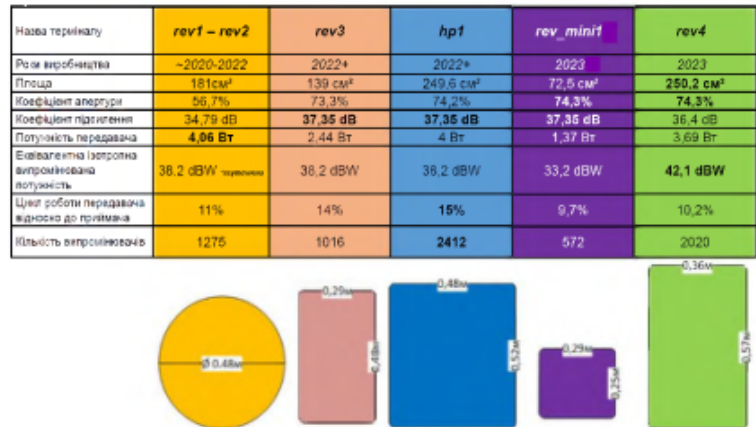


Рисунок 7 – Основні технічні характеристики терміналів Starlink

Радіоінтерфейси (радіолінії) між складовими мережі Starlink реалізуються на частотах, що наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Радіоінтерфейси Starlink

Тип радіоінтерфейсу	Задіяні частотні діапазони, ГГц.	Заплановані до задіяння частотні діапазони, ГГц.
Лінія вниз, супутник – термінал користувача	10,7 – 12,7	10,7 – 12,7
Лінія вверх, термінал користувача – супутник	14,0 – 14,4	12,75 – 13,25 14,0 – 14,4
Лінія вниз, супутник – наземний шлюз	10,7 – 12,7	10,7 – 12,7 17,8 – 18,6 18,8 – 19,3 19,7 – 20,2
Лінія вверх, наземний шлюз – супутник	14,0 – 14,4	14,0 – 14,4 27,5 -29,1 29,5 – 30,0

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 73

Архітектура мережі Starlink

Архітектура мережі Starlink класично для супутникових систем має три основні складові: космічний сегмент, наземний сегмент керування й передачі даних, сегмент користувачів (рис. 8)

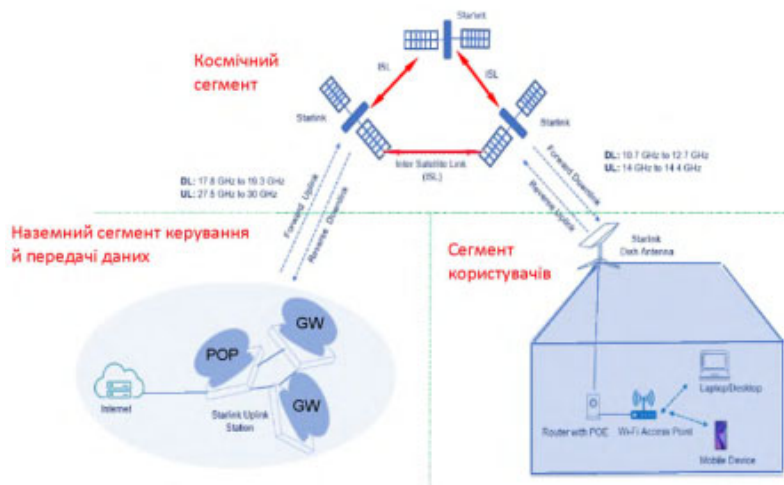


Рисунок 8 – Архітектура мережі Starlink

Космічний сегмент складається із супутникового угруповання Starlink. Кожен супутник Starlink повинен безперервно підтримувати зв'язок з наземним сегментом керування та передачі даних через відповідні радіоінтерфейси. У разі, якщо безпосередній зв'язок між супутником та наземним шлюзом неможливий в силу тих чи інших причин, то з'єднання з наземним шлюзом відбувається через проміжні супутники. Зв'язок між проміжними супутниками реалізується за допомогою оптичного (лазерного) міжсупутникового інтерфейсу (ISL, рис. 8). Кожен супутник Starlink реалізує кругову

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 74

зону покриття радіосигналом (радіусом від 573 до 940 км.), що призначений для роботи з користувацькими терміналами.

Наземний сегмент керування та передачі даних - це комплекс функціональних вузлів, обладнання і програмного забезпечення, що реалізує передачу даних між мережею Інтернет та космічним сегментом (угрупованням супутників Starlink). Також наземний сегмент забезпечує функції моніторингу і керування всією системою Starlink. До наземного сегменту входять центр керування та низка шлюзів (GW - Gateway) розкиданих по всій планеті. Декілька шлюзів об'єднуються включенням в точку доступу до мережі Інтернет (POP - Point Of

Presence). POP забезпечує узгоджену роботу мережі Інтернет з мережею Starlink.

Сегмент користувача - це комплекс функціональних вузлів, обладнання і програмного забезпечення, що реалізує доступ користувача до системи супутникового зв'язку Starlink. До стандартного складу обладнання сегменту користувача входить: супутникова антенна система суміщена з прийомопередавачем, роутер, адаптер живлення, з'єднувальні кабелі.

Варто зазначити, що система Starlink постійно вдосконалюється і динамічно розвивається. На сьогоднішній день відомо про існування чотирьох версій Starlink: Starlink v0.9 (тестова версія), Starlink v1.0, Starlink v1.5, Starlink v2.0. Таким чином, щоб мати актуальні знання про систему Starlink необхідно слідкувати за змінами в системі на офіційному сайті проекту, який наведений у списку рекомендованої літератури даних методичних рекомендацій.

4. Підготовка до проведення роботи

1. Вивчити теоретичні положення (ключові положення), використовуючи методичні рекомендації, **конспект лекцій** і **рекомендовану літературу**.
2. Підготуйте відповіді на ключові запитання (запитання для допуску до лабораторної роботи).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 75

3. Перегляньте матеріал «Що таке Starlink?» за посиланням <https://www.starlink.com/videos/1>, підготуйтеся до обговорення основних тез матеріалу.
4. Перегляньте матеріал «Перешкоди» за посиланням <https://www.starlink.com/videos/2>, підготуйтеся до обговорення основних тез матеріалу.
5. Перегляньте матеріал «Швидкий старт для MINI» за посиланням <https://www.starlink.com/videos/12>, підготуйтеся до обговорення основних тез матеріалу.
6. Перегляньте матеріал «Швидке налаштування» за посиланням <https://www.starlink.com/videos/3>, підготуйтеся до обговорення основних тез матеріалу.
7. Перегляньте матеріал «Стаціонарне встановлення стандартного комплекту» за посиланням <https://www.starlink.com/videos/4>, підготуйтеся до обговорення основних тез матеріалу.
8. Перегляньте матеріал «Стаціонарне встановлення стандартного комплекту з приводом» за посиланням <https://www.starlink.com/videos/5>, підготуйтеся до обговорення основних тез матеріалу.
9. Перегляньте матеріал «Націлення» за посиланням <https://www.starlink.com/videos/9>, підготуйтеся до обговорення основних тез матеріалу.
10. Підготуйте макет звіту до лабораторного дослідження.
11. Вивчіть опис алгоритму та структуру програмного комплексу «STARLINKSIMULATION» <https://starlink.sx/>.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 76

5. Порядок виконання завдання

1. Під керівництвом викладача детально вивчіть наявне в лабораторії обладнання користувача Starlink.
2. Запустіть програмний комплекс «STARLINK SIMULATION» <https://starlink.sx/> та налаштуйте його для дослідження. Особливості роботипрограмного комплексу обговоріть з викладачем.
3. Виберіть місто, де розташовуватиметься модель користувацького терміналу, відповідно до свого варіанту та проаналізуйте середню кратність супутникового сузір'я в інтервалі 5 хвилин, кількість наземних шлюзів, що працюють з супутниками вашого сузір'я, зафіксуйте місце розташування шлюзів GW. Та12
кож зафіксуйте місце розташування найближчих точку доступу до мережі Інтернет POP (результати аналізу занесіть в протокол).
4. Проаналізуйте параметри 3 - 4 супутників, що будуть мати зв'язок з моделлю вашого користувацького терміналу, а саме, зафіксуйте в протоколі назву супутника, висоту орбіти, нахилення орбіти, ID номер, максимальну пропускну здатність радіобладнання (результати аналізу занесіть в протокол у вигляді таблиці). Візуально проаналізуйте зони покриття радіосигналом, що реалізуються супутниками.
5. Проаналізуйте кратність сузір'я Starlink (визначте кількість супутників в зоні радіовидимості вашого терміналу та наявність зв'язку) в залежності від висоти орбіти в діапазоні від 300 км до 800 км з кроком 50 км (результати аналізу занесіть в протокол у вигляді таблиці, нарисуйте графічну залежність).
6. У висновках до роботи зробіть загальний аналіз орбітальної схеми Starlink, особливостей формування зон покриття радіосигналом з супутника, особливостей щодо керування діаграмою спрямованості фазованої антенної системи користувацького терміналу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 77

6. Опис алгоритму і структури програмного комплексу

Макет лабораторної роботи «Дослідження принципів побудови супутникової системи передачі даних Starlink та її характеристик» «STARLINK SIMULATION» можна відкрити за посиланням <https://starlink.sx/> (рис. 9).

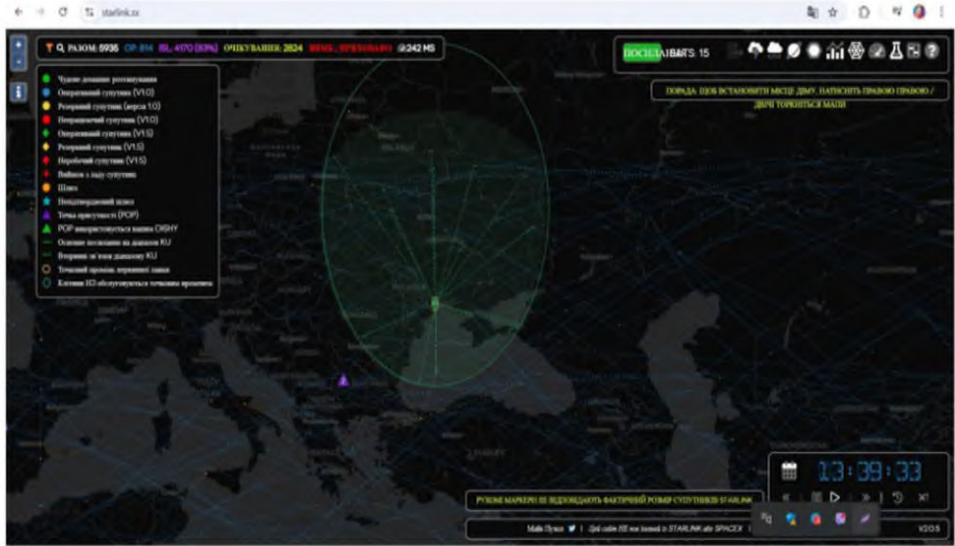


Рисунок 9 – Інтерфейс програмного комплексу «STARLINK SIMULATION»

Для виконання лабораторного дослідження рекомендовано використовувати web-версію програмного комплексу. Проаналізуємо та пояснимо робочий інтерфейс програмного комплексу «STARLINK SIMULATION» рис. 10.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 78



Рисунок 10 – Пояснення до інтерфейсу програмного комплексу
«STARLINK SIMULATION»

На рис. 10 цифрами позначено наступні складові інтерфейсу:
> «1» – панель зміни масштабу робочої області;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 79

- > «2» – інформаційна панель, що дозволяє зрозуміти значення схематичних позначень, які використовуються в програмному комплексі;
 - > «3» – панель фільтрів, що дозволяє налаштовувати параметри моделювання, наприклад, змінювати висоту над Землею для проведення моделювання;
 - > «4» – інформаційна та конфігураційна панель, що дозволяє вносити зміни в конфігурацію середовища моделювання. Деякі з кнопок дозволяють відразу після зміни конфігурації отримувати інформацію ще до початку процесу моделювання.
 - > «5» – робочий простір, де графічно відображуються результати моделювання.
 - > «6» – панель запуску та зупинки моделювання / панель керування інтервалами часу моделювання.
- Зазначимо, що деталі процесу моделювання при виконанні лабораторного завдання необхідно узгоджувати з викладачем.

7. Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Тему роботи.
2. Мету роботи.
3. Завдання на домашні дослідження та їхні результати.
4. Завдання на лабораторні дослідження.
5. Результати лабораторних досліджень.
6. Висновки.

Висновки по роботі мають містити як констатувальну частину, що відображає основні отримані результати, так і аналітичну, у якій проводиться порівняльний аналіз даних теоретичного й експериментального досліджень, а також пояснення отриманих результатів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 80

Контрольні питання

Запитання для допуску до лабораторної роботи:

1. Поясніть призначення супутникових систем передачі даних, опишіть архітектуру таких систем.
2. Які супутникові системи передачі даних вам відомі, коротко охарактеризуйте їх.
3. Перелічіть сегменти супутникових систем передачі даних, поясніть їхні функції.
4. Дайте коротку характеристику супутникової системи передачі даних Starlink.

Запитання до захисту лабораторної роботи:

1. Дайте детальну характеристику космічного сегменту Starlink.
2. Розкрийте основні технічні характеристики супутників Starlink.
3. Розкрийте основні технічні характеристики користувацьких терміналів Starlink.
4. Опишіть алгоритм встановлення з'єднання між терміналом Starlink і космічним сегментом системи.
5. Назвіть діапазони частот, та їх використання в системі Starlink.
6. Опишіть архітектуру мережі Starlink, дайте характеристику кожному сегменту архітектури.
7. Коротко охарактеризуйте основні тези з матеріалу «Перешкоди».
8. Коротко охарактеризуйте основні тези з матеріалу «Швидкий старт для MINI».
9. Коротко охарактеризуйте основні тези з матеріалу «Швидке налаштування».
10. Коротко охарактеризуйте основні тези з матеріалу «Стаціонарне встановлення стандартного комплекту».
11. Коротко охарактеризуйте основні тези з матеріалу «Стаціонарне встановлення стандартного комплекту з приводом».
12. Коротко охарактеризуйте основні тези з матеріалу «Націлення».

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 81

Рекомендована література

1. Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч.посібник. К.: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.
2. Starlink [режим доступу]: <https://www.starlink.com/>
3. STARLINK SIMULATION [режим доступу]: <https://starlink.sx/>
4. Народний Starlink [режим доступу]:
<https://www.facebook.com/groups/starlinkforukraine/permalink/66196614250312>
5. Starlink Вікіпедія [режим доступу]:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Starlink>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 82

Додаток А. Вихідні дані для виконання досліджень

Таблиця А.1 - Регіони Землі для проведення досліджень

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Місто	Одеса	Львів	Київ	Харків	Донецьк	Севастополь	Ужгород	Черкаси	Дніпро	Чернівці

m - передостання цифра номера залікової книжки;
n - остання цифра номера залікової книжки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 83

Рекомендована література

Основна література

1. Голь В.Д., Ірха М.С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі навчальний посібник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 250с.
2. Фещенко А. Б. Телекомунікаційні системи та інформаційні технології у сфері цивільного захисту: підручник /А. Б. Фещенко, Л. В. Борисова, О. В. Закора, В. О. Собина, Д. В. Тарадуда, М. О. Демент, І. М. Неклонський. – Х.: НУЦЗУ, 2021. – 728 с.
3. Комп'ютерні мережі: [Книга 1. Технології комп'ютерних мереж]: Навчальний посібник / Євсєєв С.П., Дженюк Н.В., Толкачов М.Ю та ін. – Харків, – Львів: Видавництво ПП «Новий Світ – 2000», 2024. – 471 с.
4. Уривський Л.О., Мошинська А.В., Осипчук С.О. Імітаційне моделювання систем і процесів у телекомунікаціях: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 202 с.
5. Заїка В.Ф., Варфоломеева О.Г., Домрачева К.О., Гринкевич Г.О. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління. Навчальний посібник. Київ: Видавництво Державного університету Телекомунікацій, 2019. – 315 с.
6. Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник. К.: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.
7. Срібна І.М., Є.І. Махонін, Власенко Г.М., Кирпач Л.А. Супутникові системи зв'язку і навігації. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2019. –123 с.
8. Основи та методи цифрової обробки сигналів: від теорії до практики: навч. посібник / Ушенко Ю.О., М.С. Гавриляк, М.В. Талах, В.В. Дворжак. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. – 2021. – 308 с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 84

Допоміжна література

1. Організація комп'ютерних мереж [Електронний ресурс]: підручник: для студ. спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» та 122 «Комп'ютерні науки»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського ; Ю.А.Тарнавський, І.М.Кузьменко. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. –259с.

2. Інтелектуальне моделювання нелінійних динамічних процесів в керуванні, кібербезпеці, телекомунікаціях: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О. В. Герасіна. – Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». – Дніпро, НТУ «ДП», 2020. – 531 с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/ PhD /OK7-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 85 / 85

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/Категорія:Цифрові_технології
2. <https://www.mathcad.com/en/try-and-buy/mathcad-express-free-download>
3. <https://ocw.mit.edu/courses/res-6-008-digital-signal-processing-spring-2011/>
4. <https://tpolis.com>
5. <https://www.wikidata.uk-ua.nina.az/Mathcad.html>