

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 1</i>

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»

протокол від 29 червня 2023 р.  
№ 9

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

для проведення практичних занять  
з навчальної дисципліни

### **«Моделювання та оптимізація радіоелектронних сигналів і систем»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «магістр»  
спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»  
освітньо-професійна програма «Телекомунікації та радіотехніка»  
факультет інформаційно-комп'ютерних технологій  
кафедра комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях

Рекомендовано на засіданні  
кафедри комп'ютерних  
технологій у медицині та  
телекомунікаціях  
28 серпня 2023 р., протокол №7

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

Житомир  
2023

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 2</i>

## Зміст

<b>Практична робота №1.</b> Формування елементарних сигналів та визначення їх спектрів	3
<b>Практична робота №2.</b> Автокореляційні функції сигналів та моделювання завад	15
<b>Практична робота №3.</b> Моделювання безпошукових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з 2-елементною АР	23
<b>Практична робота №4.</b> Моделювання безпошукових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з 64-елементною АР	37
<b>Література</b>	44

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 3

## Практична робота №1

### Формування елементарних сигналів та визначення їх спектрів

**Тема.** Формування елементарних сигналів та визначення їх спектрів

- 1.1. Прямокутний імпульс та його спектр
- 1.2. Прямокутний радіоімпульс та його спектр
- 1.3. Прямокутний відеоімпульс з експоненційними фронтами та його спектр
- 1.4. Порівняння спектрів прямокутного та колоколоподібного (гаусового) імпульсів
- 1.5. Особливості застосування ШПФ (FFT) для гармонічних сигналів
- 1.6. Спектр амплітудно-модульованих сигналів
- 1.7. Спектр частотно-модульованих сигналів

**Мета.** Навчитись проводити дослідження систем шляхом моделювання

### Хід виконання роботи

За текстовими файлами «**Формування сигналів в середовищі MathCAD**» і «**Спектральний аналіз сигналів**» ознайомитися зі способами формування сигналів і особливостями обчислення їх спектрів вбудованими функціями. Також ознайомитися з файлом MathCAD «**Формування елементарних сигналів**».

1.1. Прямокутний імпульс та його спектр.

Тим чи іншим способом сформувати прямокутний відеоімпульс і, використовуючи вбудовану функцію БПФ(FFT), побудувати його амплітудний спектр.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 4

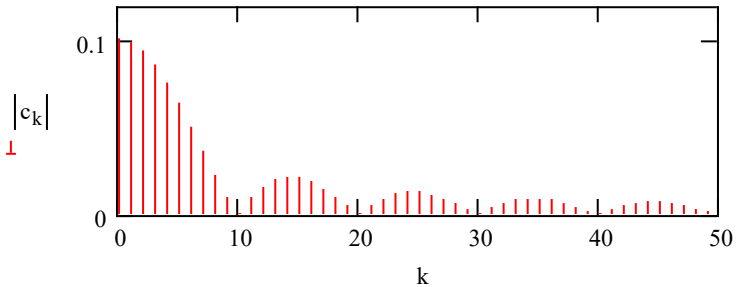


Рис.1.1 – Амплітудний спектр прямокутного імпульсу

Тривалість сигналу вибрати з міркувань наочності уявлення спектра.

1.1.1. Визначити рівні 2-ої, 3-го, 4-го пелюсток спектра по відношенню до головного (відношення рівня пелюсток спектра до постійної складової).

1.1.2. Визначити зміну амплітудного спектра при зміні тривалості імпульсу.

1.1.3. Визначити вплив зміщення початку імпульсу на його спектр.

1.1.4. Визначити спектр сигналу типу «меандр» (тривалість імпульсу =  $T / 2$ ).

Тут і далі в якості звіт<sup>у</sup> по виконуваних завданнях продемонструвати файли *MathCAD*, що містять необхідні пояснення за результатами виконуваних завдань.

Рекомендується кожне завдання оформляти окремим файлом.

Для ілюстрації різних операцій, які потребують порівняння результатів (наприклад, як за даним завданням для визначення впливу

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 5

на вигляд спектра тривалості імпульсу) слід в файлі одночасно представити кілька варіантів.

### 1.2. Прямокутний радіоімпульс і його спектр.

Сформувати прямокутний радіоімпульс і, використовуючи БПФ (FFT), побудувати його амплітудний спектр.

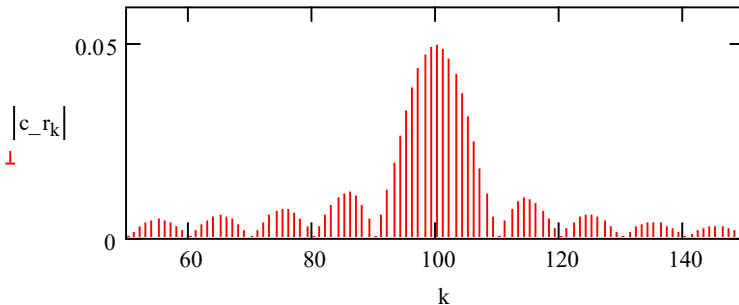


Рис. 1.2 – Амплітудний спектр радіоімпульса

1.3. Прямокутний відеоімпульс з експонентними фронтами і його спектр.

Сформувати прямокутний відеоімпульс з експонентними фронтами (див. «Формування сигналів в середовищі MathCAD») і, використовуючи БПФ (FFT), побудувати його амплітудний спектр.

Визначити вплив на вигляд амплітудного спектра «завалу» фронтів прямокутного імпульсу (постійної часу формування фронтів). Для цього сформувати 2-3 сигналу з різною постійної часу фронту і побудувати їх спектри, що дозволяють якісно порівняти зміна рівнів пелюсток спектра.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 6

#### 1.4. Порівняння спектрів прямокутного і колоколообразного (гаусового) імпульсів.

Колоколообразний (гаусів) відеоімпульс описується виразом:

$$U_{e_t} := \exp \left[ - \frac{\left( t - \frac{T}{2} \right)^2}{\tau_e^2} \right]$$

- опис форми гаусівського відеоімпульсу, центрованого щодо середини інтервалу формування T.

$$\tau_e := \frac{\tau_i}{2 \cdot \sqrt{-\ln(U_o)}}$$

- параметр гаусівського імпульсу, який визначає його тривалість на відносному рівні O\_o.

Сформувати прямокутний імпульс тривалістю  $\tau_i$  (в межах  $T / 10 \dots T / 15$ ) і гаусів імпульс такої ж тривалості за рівнем 0.1.

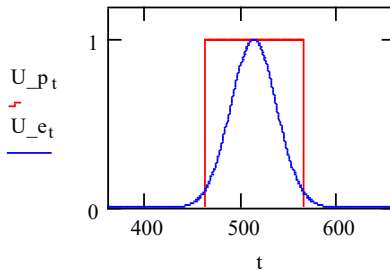


Рис. 1.3 – Прямокутний і гаусівські імпульси.

Обчислити по FFT спектри імпульсів.

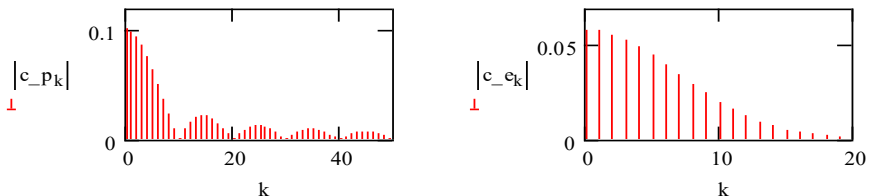


Рис. 1.4 – Амплітудні спектри прямокутного і гаусівського імпульсів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 7

Визначити співвідношення ширини спектрів імпульсів, в межах якої зосереджено 99% потужності сигналів. Для цього обчислити відношення потужності (суми квадратів) гармонік в діапазоні, обмеженому значеннями

$$P_p := \frac{\sum_{k=0}^m (|c_{-p_k}|)^2}{\sum_k (|c_{-p_k}|)^2} \quad P_p = 0.99 \quad P_e := \frac{\sum_{k=0}^n (|c_{-e_k}|)^2}{\sum_k (|c_{-e_k}|)^2} \quad P_e = 0.991$$

$m$  і  $n$ , до повної потужності сигналів (тобто підібрати значення  $m$  і  $n$ , що забезпечують значення відносин  $\sim 0.99$ ):

Відношення ширини спектрів, займаних такими сигналами, визначити як відношення значень  $m$  і  $n$ .

1.5. Особливості застосування БПФ (FFT) для гармонійних сигналів.

На інтервалі моделювання  $T:=1024$   
сформувати кілька (чотири) безперервних гармонійних сигналу у вигляді векторів  $u$  з циклічними частотами:

$$F1:=3*1/T, \quad \text{и} \quad F2:=3.5*1/T$$

$$F3:=100*1/T, \quad \text{и} \quad F4:=100.5*1/T$$

$i$ , виконавши пряме перетворення Фур'є (FFT), побудувати графіки амплітудних спектрів сформованих сигналів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 8

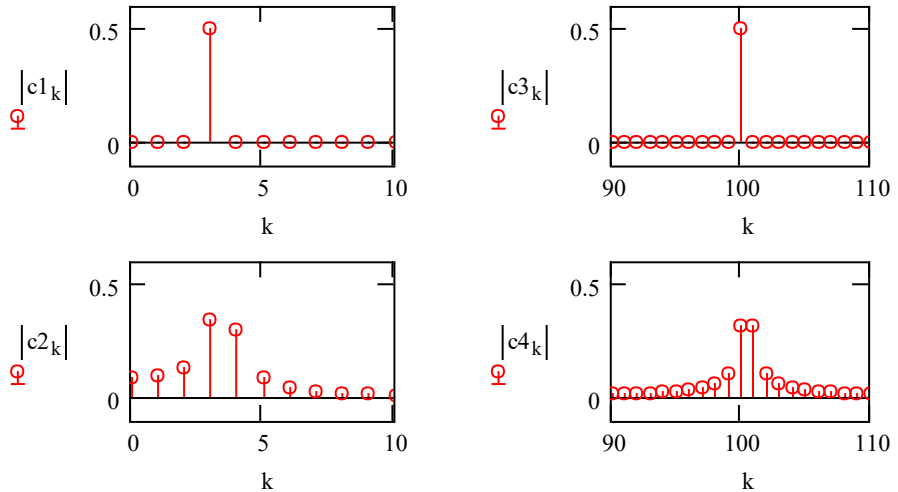


Рис. 1.5 – Спектри гармонічних сигналів в залежності від співвідношення між частотою гармонічного сигналу та інтервалу моделювання

Пояснити відмінності спектрів сигналів з частотою, кратною інтервалу моделювання  $T$  та некратною.

### 1.6. Спектр амплітудно-модульованих сигналів.

Змоделювати амплітудну модуляцію несучої частоти однієї гармонікою низької частоти.

Аналітичний вираз АМ-сигналу:

$$u_{\text{ам}}(t) = Um \cdot (1 + m \cdot U_{\text{mod}}(t)) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

Модулююче коливання (з амплітудою = 1):

$$U_{\text{mod}}(t) = \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t)$$



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 9

$U_m$  – амплітуда несучої частоти коливання (без модуляція) – прийняти = 1;

$m$  – коефіцієнт модуляції;

$f_0$  – несуча частота;

$F$  – частота модуляції.

Побудувати спектр АМ-сигналу за допомогою FFT.

Нагадаємо, що для отримання «правильного» результату розрахунку спектра по FFT як  $f_0$ , так і  $F$  повинні бути кратні  $1/T$  (ціле число періодів на інтервалі моделювання), тобто привласнити частотам значення:

$$f_0 = n/T \quad F = N/T$$

де  $n$  и  $N$  – число періодів коливань частоти  $f_0$  и  $F$  на інтервалі  $T$ .

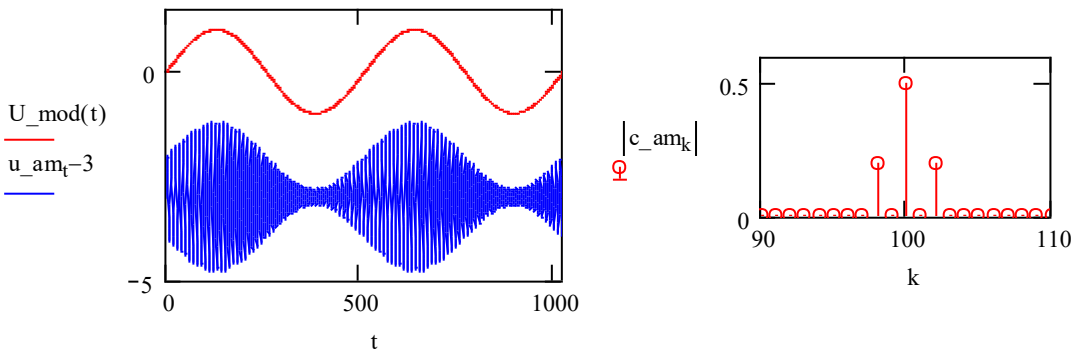


Рис. 1.6 – АМ сигнал та його спектр

Визначити співвідношення між гармонікою несучої і гармоніками бічних частот при різних коефіцієнтах амплітудної модуляції  $m = 1; 0.7; 0.5$ .

Пояснити форму АМ-сигналу при перемодуляції ( $m > 1$ ).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 10

### 1.7. Спектр частотно-модульованого сигналу.

Частотна модуляція аналітично описується виразом:

$$u(t) = Um \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + m \cdot U \text{ mod}(t))$$

де:

$Um$  – амплітуда сигналу (при ЧМ амплітуда постійна);

$f_0$  – несуча частота;

$U \text{ mod}(t)$  – модулюючий сигнал;

$m$  – індекс частотної модуляції.

При ЧМ модуляції однією частотою  $\Omega$  (F):

$$U \text{ mod}(t) = \cos(\Omega \cdot t) = (\cos(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t))$$

індекс модуляції рівний  $m = \Delta f / F$  (или  $\Delta \omega / \Omega$ ); тут амплітуда модулюючого сигналу прийнята рівною 1.

$\Delta f$  ( $\Delta \omega$ ) – девіація частоти - максимальне відхилення несучої частоти під впливом модулюючого сигналу від середньої –  $f_0$ .

Опускаючи тут математичне обґрунтування, відзначимо, що ЧМ сигнал теоретично може бути представлений нескінченним рядом гармонік, що обчислюються через функції Бесселя:

$$u(t) = Um \cdot \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_k(m) \cdot \cos((\omega_0 + k \cdot \Omega) \cdot t)$$

де  $J_k(m)$  – значення функції Бесселя першого роду порядку  $k$  ( $k$  - номер гармоніки ряду Фур'є) при значенні аргументу  $m$  (значенні індексу модуляції).

Використовуючи файл «Частотна модуляція», визначити зміну спектра ЧМ сигналу в залежності від частоти модуляції  $F$  (від  $N$  - числа періодів модулюючого сигналу на інтервалі  $T$ ) і від девіації частоти  $\Delta f$  (в % від несучої частоти).

$N$  змінювати в межах 1...5, девіацію в % - в межах 5...15%

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 11

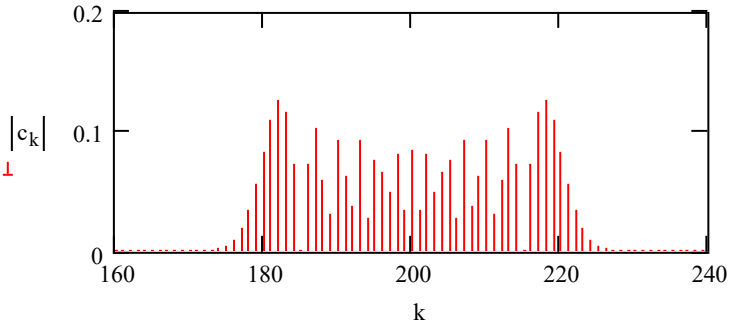


Рис. 1.7 – Спектр ЧМ сигналу

Спектр ЧМ сигналу нескінченний (див. Вище), але в практиці передбачається, що частота сигналу, зайнята ЧМ сигналом, приблизно рівна:

$$\Delta F_{\text{чм}} \sim 2 * (\Delta f + F)$$

(В межах такої смуги зосереджена основна потужність ЧМ сигналу).

Використовуючи зазначений вище файл, визначити зв'язок між девіацій частоти і шириною спектра ЧМ сигналу (тобто переконатися в справедливості практичних припущень про ширину спектра).

У вищевказаному файлі розрахунок гармонік спектра ЧМ сигналу виконаний методом швидкого перетворення Фур'є (FFT).

Не нецікаво порівняти результати розрахунку спектра ЧМ сигналу по FFT з теоретичними значеннями.

У MathCAD є вбудовані функції Бесселя  $J_n(j, x)$ :

- де  $j$  - порядок функції,  $x$  - аргумент функції.

Застосовується до ЧМ сигналу  $x$  - це значення індексу модуляції  $m$ ;

$j$  - номер гармоніки бічний смуги спектра;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 12

(Гармоніка несучої =  $J_n(0, m)$  або  $J_0(m)$ ).

Для порівняння результатів розрахунку спектра по FFT з теоретичними значеннями ивести значення декількох гармонік, розрахованих різними способами і порівняти їх:

$$j := 0..5 \quad c_{n+j} \quad 0.5 \cdot J_n(j, m)$$

Побудувати декілька функцій Бесселя:

$$x := 0, 0.01.. 15$$

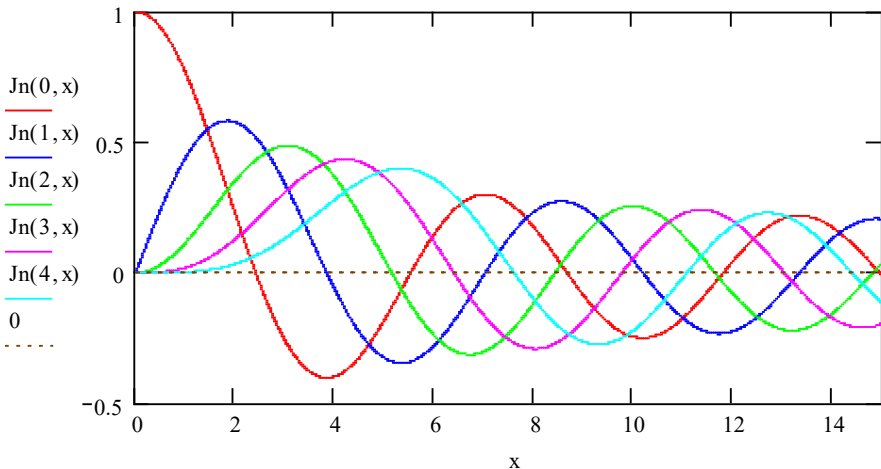


Рис. 1.8 – Функції Бесселя першого роду порядку 0...4

Знайти одне зі значень індексу модуляції  $m$  (порядку 6-й), при якому гармоніка несучої частоти буде дорівнює нулю, тобто буде подавлена ( $J_n(0, x) = 0$ ).

Звичайно, для визначення  $x(m)$ , при якому  $J_n(0, x) = 0$ , тобто для визначення чисельних значень функції і аргументу по побудованим графікам можна скористатися режимом вимірювань MathCAD Trace. Однак при цьому не завжди забезпечується

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 13

необхідна точність отримання результатів, тому що показник для вимірювання встановлюється тільки на розрахункові точки.

У таких випадках (а також і при інших розрахунках) зручно використовувати вбудовану функцію root для обчислення кореня рівняння.

Обчислення кореня рівняння  $f(x)$  в MathCAD реалізовано в двох варіантах:

а) -  $\text{root}(f(x), x)$

$f(x)$  – рівняння,  $x$  – змінна рівняння, відносно якої обчислюється корінь.

Обчислення кореня рівняння виконується чисельним методом Ньютона (методом дотичної), тому перед завданням функції root ( $f(x), x$ ) слід задати початкове значення (перше наближення до кореня)  $x_0$ .

б) -  $\text{root}(f(x), x, x\_l, x\_r)$

Тут замість завдання початкового (першого) наближення до кореня рівняння задається діапазон, в межах якого і слід шукати корінь. (MathCAD перше наближення обчислює як середину заданого в root діапазону).

Застосовується до розглянутої задачі визначення індексу частотної модуляції для придушення несучої частоти  $m_0$  можна скористатися обчисленням:

$m_0 := \text{root}(J_n(0, x), x, x\_min, x\_max)$

По знайденому значенню індексу модуляції задати вираз для обчислення девіації частоти  $\Delta f$  (вже не через %) і виконати моделювання ЧМ сигналу, обчислити і побудувати його спектр (гармоніка на несучої частоті повинна бути = 0).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 14</i>

**Зміст звіту.** Звіт повинен містити:

1. Результати досліджень.
2. Результати розрахунків та відповідні графіки.
3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

**Контрольні питання**

1. Визначте сутність об'єкту моделювання
2. Визначте сутність гіпотези
3. Визначте сутність моделі
4. Визначте мету моделювання
5. Визначте ознаку адекватності моделі
6. Визначте умову проведення моделювання
7. Визначте кінцеву мету етапу аналізу системи при її зовнішньому проектуванні
8. Визначте сутність математичної моделі
9. Визначте сутність фізичної моделі
10. Визначте сутність програмної моделі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 15</i>

## Практична робота №2

### Автокореляційні функції сигналів та моделювання завад

**Тема.** Формування елементарних сигналів та визначення їх спектрів

#### 1. Автокореляційні функції сигналів

Імітація затримки сигналів

Автокореляційна функція (АКФ) прямокутного імпульса

Порівняння спектрів та АКФ прямокутного радіоімпульса

#### 2. Моделювання завад

Моделювання завади типу «білий шум»

Спектр та автокореляційна функція завади типу «білий шум»

Моделювання завади з релеєвським законом розподілу

**Мета.** Навчитись проводити дослідження систем шляхом моделювання

### Хід виконання роботи

#### 1. Автокореляційні функції сигналів

##### 1.1. Імітація затримки сигналів (зсуву по часу).

За файлом MathCAD «Затримка сигналів» ознайомитися зі способами імітації затримки сигналів, представлених у вигляді векторів.

Перевірити імітацію затримки імпульсів, в тому числі і при

$$\tau_z \geq \frac{T}{2}$$

Звернути увагу на циклічний зсув сигналів в межах інтервалу  $T$ .

##### 1.2. Автокореляційна функція (АКФ) прямокутного імпульсу.

У загальному випадку АКФ періодичного сигналу розраховується:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 16

$$K(\tau) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U(t) \cdot U(t - \tau) \cdot dt$$

Сформуванати прямокутний імпульс довільної тривалості і побудувати його автокорреляційну функцію (АКФ):

1.2.1. Методом зрушень і підсумовування в тимчасовій області: Оскільки час обчислення АКФ в тимчасовій області шляхом зрушень і підсумовування двох зразків сигналу досить велике, кількість розраховуються точок на інтервалі  $T$  задати відносно невеликим - близько 128, 256.

$\tau_{z} := 0.. T - 1$  -діапазон задержек сигнала

$$K_{\tau_z} := \frac{1}{T} \cdot \left( \sum_t U_t \cdot U_{\text{mod}(t+\tau_z, T)} \right) \quad \text{- автокорреляційна функція}$$

$$R_{\tau_z} := \frac{K_{\tau_z}}{K_0} \quad \text{- нормована АКФ}$$

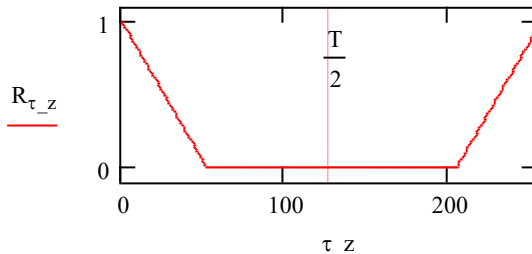


Рис.2.1 – Періодична АКФ послідовності прямокутних імпульсів

Для ілюстрації АКФ, рис. 2.1, одиночного (НЕ періодично повторюваного) сигналу  $\mathbf{R}(\tau)$  можна скористатися наступним штучним прийомом:



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 17

- виконати циклічну перестановку елементів вектора  $R_{\tau_z}$ , (або, іншими словами, виконати затримку АКФ на  $T/2$ ), що і буде імітувати обчислення АКФ в діапазоні затримок  $-T/2 \dots + T/2$  щодо середини, рис. 10.

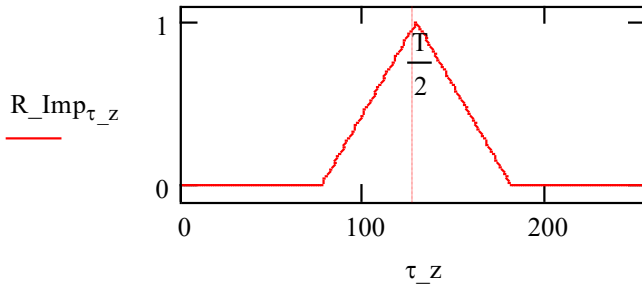


Рис.2.2 – Імітація АКФ одиночного прямокутного імпульсу при  $\tau - T/2 \dots + T/2$

$$R_{\text{Imp}} \bmod \left( \tau_z + \frac{T}{2}, T \right) := R_{\tau_z}$$

1.2.2. Обчислити АКФ прямокутного імпульсу перетворенням в частотній області.

АКФ також може бути обчислена і через спектр сигналу:

$$K(\tau) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) \cdot S^*(j\omega) \cdot d\omega$$

де  $S^*(j\omega)$  – комплексно спряжений спектр.

Очевидно, що для обчислення АКФ в частотній області (через спектр) слід виконати перетворення Фур'є (FFT) і виконати згортку в частотній області:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 18

— - (для введення комплексного сполучення гармонік –  
 $c_{\_akf\_k} := c_k \cdot c_k$  [“] лапки)

Потім для отримання АКФ виконати зворотне перетворення Фур'є (IFFT)

$$K := \text{IFFT}(c_{\_akf\_k})$$

Для імітації АКФ одиночного імпульсу можна відразу при розрахунку гармонік для АКФ можна відразу ж імітувати затримку на  $T/2$ :

$$c_{\_akf\_k} := c_k \cdot c_k \cdot \exp\left(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2}\right)$$

Очевидно, вид АКФ і нормованої АКФ будуть аналогічні рис. 2.1 і 2.2.

1.3. Порівняння спектрів і АКФ прямокутного радіоімпульсу і радіоімпульсу з лінійної частотної модуляцією (ЛЧМ).

За файлу MathCAD «Стиснення сигналів (ЛЧМ)» ознайомитися з формуванням радіосигналу з лінійної частотної модуляцією.

Варіюючи девіацій частоти  $W$  для ЛЧМ, якісно визначити зв'язок між девіацій частоти, шириною спектра сигналу і шириною головної пелюстки АКФ.

## 2. Моделювання завад

За текстового файлу «Формування випадкових сигналів» ознайомитися зі способами формування випадкових сигналів - перешкод.

### 2.1. Моделювання перешкоди типу «білий шум»

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 19

Ознайомитися зі способами формування випадкових процесів (перешкоди типу «білий шум») - файл MathCAD «Перешкода типу білий шум» і побудовою гістограм по реалізаціям випадкового процесу.

***Виконати:***

1. Змінюючи значення кількості відліків  $T$ , якісно *оцінити* вплив числа відліків реалізації перешкоди на вигляд гістограм.

2. Для першого способу формування випадкового процесу на основі підсумовування випадкових величин якісно оцінити вплив числа суммуємих величин на вигляд гістограми.

3. За теоретичної щільності розподілу значень  $p(x)$  *визначити* ймовірність того, що значення перешкоди буде поза межами  $-3\sigma \dots +3\sigma$  *відносно* математичного очікування (шляхом інтегрування).

Порівняти ймовірність, розраховану з теоретичної щільності розподілу, з результатами моделювання однієї з реалізацій перешкоди, отриманої будь-яким способом.

Для обчислення ймовірності перевищення значень сформованої перешкоди заданого рівня, створити додатковий масив (вектор), присвоївши елементам значення 1 при перевищенні зазначеного рівня і 0 в іншому випадку, і підсумувати значення елементів масиву і усереднити. (Тим самим по одній реалізації перешкоди імітуються статистичні випробування для оцінки тієї чи іншої ймовірності).

3.2. Спектр і автокореляційна функція перешкоди типу «білий шум»

Виконати будь-яким способом моделювання перешкоди типу «білий шум» із середнім значенням - математичним очікуванням  $\mu = 0$  і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma = 1$  (нормована щільність розподілу миттєвих значень перешкоди).

За допомогою БПФ (FFT) *розрахувати* спектр широкосмугового перешкоди, рис. 2.3.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 20

Шляхом обмеження спектра широкосмугового перешкоди вікном (фільтром) прямокутної форми зmodellювати низькочастотну і узкополосну перешкоди

Ширину вікна для обмеження спектра перешкоди вибрати в межах 20-и...40-и гармонік.

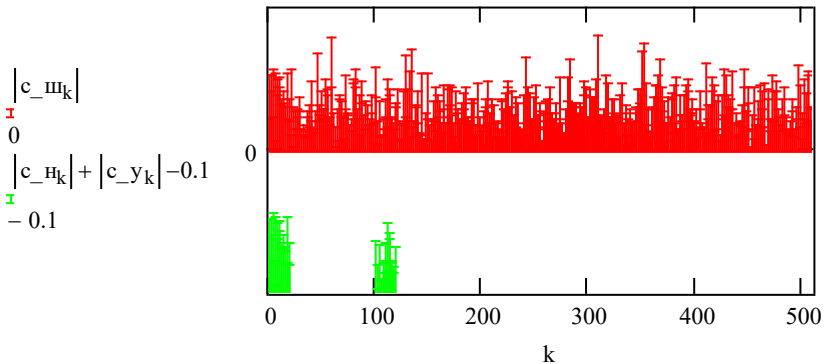


Рис.2.3 – Спектри реалізацій широкосмугового, низькочастотної та узкополосної перешкоди

Побудувати нормовані автокореляційні функції широкосмугового, низькочастотної та вузькосмугової перешкоди (методом згортки в частотній області), рис. 2.4 – 2.5.

Якісно визначити зв'язок між шириною спектра перешкоди і шириною головної пелюстки АКФ.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 21

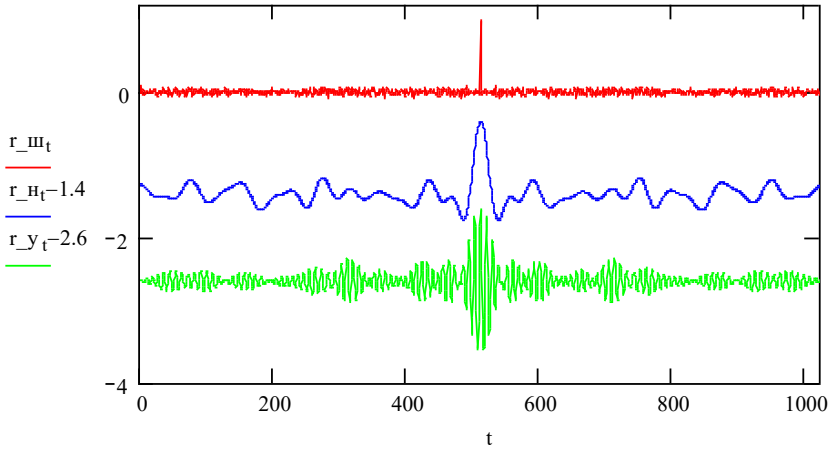


Рис.2.4 – Реалізації широкопasmового, низькочастотної та вузькочастотної перешкод

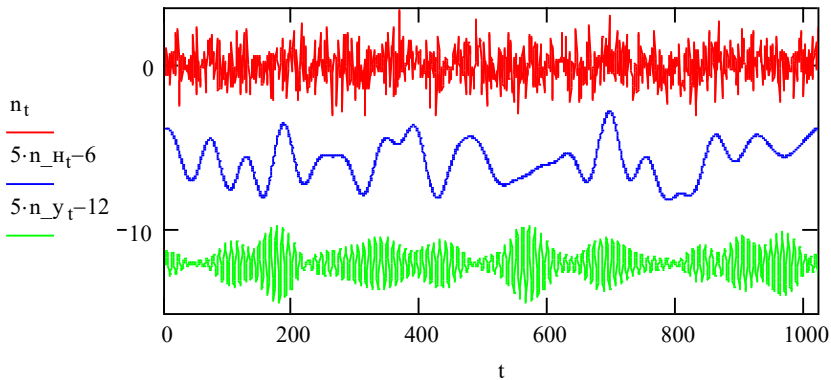


Рис.2.5 – Нормовані АКФ широкопasmового, низькочастотної та вузькочастотної перешкод

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 22

### 3.3 Моделювання перешкоди з релеєвським законом розподілу.

Якщо на вході кореляційного приймача з двома квадратурними каналами діє перешкода типу «білий шум», то сигнал на його виході описується розподілом Релея.

За файлом MathCAD «Перешкода типу релеєвському шум» ознайомитися зі способом формування перешкоди, що підкоряється закону Релея і способом побудови гістограм. Визначити вплив на гістограму кількості випадкових величин в реалізації.

**Зміст звіту.** Звіт повинен містити:

1. Результати досліджень.
2. Результати розрахунків та відповідні графіки.
3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

#### **Контрольні питання**

1. Визначте перевагу моделювання порівняно з натурним випробуванням
2. Визначте основну перевагу програмних моделей
3. Дайте визначення властивості детермінованого сигналу
4. Дайте визначення властивості випадкового сигналу
5. Визначіть основну ознаку часових моделей сигналів
6. Визначіть основну ознаку спектральних моделей
7. Дайте визначення енергетичного спектра неперіодичного детермінованого сигналу із спектральною густиною  $S(jf)$
8. Як зміниться ширина спектра відеоімпульса при зменшенні його тривалості в два рази
9. Визначіть функціонал формування автокореляційної функції сигналу енергії  $S(t)$
10. Визначіть взаємну кореляційну функцію часових моделей сигналів  $S_1(t)$  і  $S_2(t)$
11. Визначіть значення взаємної кореляційної функції двох ортогональних сигналів  $S_1(t)$  і  $S_2(t)$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 23</i>

## Практична робота №3

### Моделювання безпошукових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з 2-елементною АР

**Мета.** Навчитись проводити дослідження характеристик пристроїв пасивної радіолокації шляхом моделювання.

#### Короткі теоретичні відомості

Аналіз джерел літератури показав, що в останні роки все більшого застосування знаходить кореляційно-інтерферометричне радіопеленгування, що проводиться шляхом часової кореляційної інтерферометрії комплексних напруг сигналів для кожної пари антени з подальшим обробленням вимірів та оцінюванням пеленга [6–8]. Функція взаємної кореляції, що характеризує ступінь статистичного взаємозв'язку між прийнятими сигналами, визначається за допомогою корелятора, основними складовими якого є перемножувач миттєвих значень напруг двох сигналів та, підключений до його виходу інтегратор, який усереднює отримане значення напруги.

Сучасні кореляційно-інтерферометричні радіопеленгатори зазвичай використовують нерухомі антени.

Для стаціонарних і мобільних станцій радіомоніторингу найбільшого поширення в даний час набула схема з двома каналами прийому. Структурна схема такого кореляційного інтерферометра представлена на рис. 3.1 [7].

Основними його елементами є: антенна решітка, антенний комутатор, двоканальний когерентний радіоприймач, блок аналого-цифрової обробки, що складається з двох АЦП та блоку цифрового оброблення сигналів (ЦОС). Двоканальний приймач має два входи: перший називатимемо сигнальним, другий – опорним. Антенний комутатор послідовно підключає до входів двоканального приймача пари елементів АР, вибрані згідно алгоритму пеленгування. Для

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 24

забезпечення когерентного прийому сигналів на змішувачі обох каналів прийому подається одна і та ж високочастотна напруга, що формується синтезатором частот.

Інтерферометр з цифровим приймачем, число когерентних каналів якого рівне числу антенних елементів (АЕ), реалізує моноімпульсний метод пеленгування. Такий пеленгатор забезпечує найбільшу швидкість обчислення пеленгів, але складний, дорогий у виготовленні і налаштуванні. Важливим завданням, яке необхідно вирішити в моноімпульсному пеленгаторі, є виконання вимоги ідентичності амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик приймальних каналів. Звичайно це завдання вирішується шляхом періодичного калібрування за допомогою тестового зондуєчого сигналу невеликої потужності, що подається в приймальні канали.

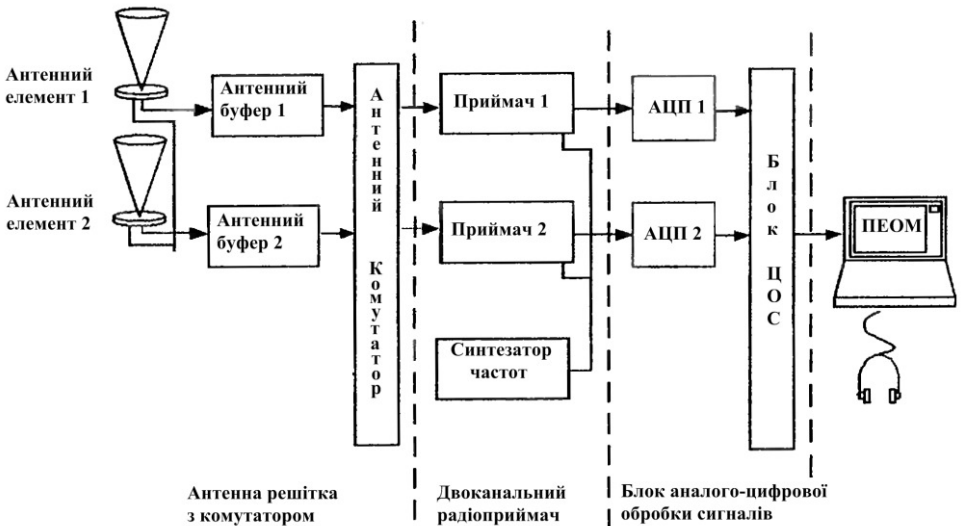


Рис. 3.1 – Структурна схема двоканального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з нерухоною антенною системою



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 25</i>

Основні функції двоканального приймача: перетворення частоти радіосигналу, що приймається, і первинна фільтрація по побічних каналах прийому, тобто функція підготовки прийнятого радіосигналу до перетворення в цифровий вигляд.

У блоці аналого-цифрової обробки виконуються основні обчислювальні операції по алгоритму цифрової обробки. Персональна ЕОМ, що входить до складу інтерферометра, виконує функції керування, обчислення, а також здійснює відображення результатів.

Принцип роботи інтерферометра оснований на порівнянні фаз поля в просторово рознесених точках з метою визначення орієнтації поверхні рівних фаз, однозначно пов'язаної з напрямом поширення від ДРВ. Збільшення кількості просторово рознесених пар точок, що відрізняються між собою відстанню «рознесення» або базою і кутовою орієнтацією в просторі, дозволяє збільшити інформацію про структуру хвилі, що приймається, і відповідно підвищити якість формування кутового просторового спектра радіосигналу. АЕ, що є датчиками поля, розташовуються, як правило, в площині пеленгування (азимутної площини), що пов'язано з можливостями технічної реалізації ідентичних фазових центрів кожного АЕ. Для забезпечення однозначності пеленгування в круговій зоні необхідно мати принаймні три АЕ, розташованих в площині пеленгування. Враховуючи необхідність сканування в межах  $360^\circ$  з однаковою якістю вимірювань, АР повинна бути симетричною щодо її фазового центру. До симетричних плоских АР відносяться еквідистантні одна-та багатокільцеві АР з центральним антенним елементом або без нього [7].

Радіопеленгування проводиться за максимумом взаємної кореляційної функції, що буде коли різниця  $\Delta t$  часу поширення сигналів від ДРВ до обох антен компенсується часом  $\tau_{ЛЗ}$  регульованої лінії затримки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 26</i>

Таким чином, за оціненим числовим значенням часу  $\hat{\tau}_{ЛЗ}$ , яке можна визначити за максимальним рівнем напруги на виході корелятора шляхом регулювання вручну або автоматично часу лінії затримки, можна визначити кут  $\alpha$  між напрямком на ДРВ і напрямком антенної бази  $d$  із виразу:

$$\cos \alpha = \frac{c \cdot \hat{\tau}_{ЛЗ}}{d},$$

де  $c$  – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

$d$  – антенна база;

$\hat{\tau}_{ЛЗ}$  – оцінка значення часу затримки поширення сигналів від джерела до двох антен.

Недоліком кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двоканальним приймачем порівняно з багатоканальним варіантом є більший час обчислення пеленгів (при забезпеченні однакової інструментальної точності і чутливості). Проте час реакції (швидкодія пеленгування) двоканального пеленгатора, як правило, виявляється цілком прийнятною.

Поліпшення основних характеристик кореляційно-інтерферометричного пеленгатора може бути досягнуто шляхом збільшення розмірів АР з відповідним збільшенням числа АЕ. Це не завжди реалізовується по ряду відомих причин, до яких можна віднести необхідність забезпечення високої швидкості огляду простору при круговому скануванні, наявність обмежень на масо-габаритні характеристики радіосистеми і т.д. У зв'язку з цим виникає завдання оптимального розміщення обмеженої кількості АЕ, що дозволяє отримати максимальну інформацію про структуру поля в розкриті антени. Для кореляційного інтерферометра оптимальне розміщення АЕ на площині повинне забезпечувати, по-перше, формування максимального числа пеленгаційних пар з різними

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 27</i>

базами; по-друге, різну кутову орієнтацію пеленгаційних пар з однаковими базами; по-третє, зміна баз пеленгаційних пар з однаковою кутовою орієнтацією.

В ряді випадків виникає необхідність радіопеленгування з більшою точністю об'єктів, радіовипромінювання яких має шумовий характер. До подібних об'єктів відносяться, наприклад, сигнали із стрибкоподібною зміною частоти, шумові завади, сигнали з лінійною частотною модуляцією і широкосмугові псевдовипадкові сигнали. В таких випадках, використовуючи кореляційно-інтерферометричний радіопеленгатор з досить великою антенною базою, можна досягти високої чутливості і точності радіопеленгування. При цьому, завдяки тому, що функція взаємної кореляції для сигналів шумового характеру монотонно зменшується при збільшенні  $\Delta t$ , ДС кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора виявляється однозначною і бічні пелюстки в ній відсутні. Антени А1 та А2 можуть мати як кругову ДС так і гостру. В останньому випадку для забезпечення слідкування за джерелом радіовипромінювання повинно бути передбачено синхронний поворот ДС.

Важливе значення при побудові кореляційно-інтерферометричних засобів радіопеленгування є реалізація необхідної точності, що впливає на їх швидкодію та апаратурні витрати.

Отже в цілому кореляційні інтерферометри на сьогодні є найперспективніші серед радіопеленгаторних систем, що зумовлено їхніми наступними суттєвими перевагами [6,7]:

- якісне радіопеленгування практично будь-яких видів радіосигналів, у тому числі, широкосмугових зі складними видами модуляції;

- можливість оброблення та розрізнення одночасно двох або декількох сигналів в одному частотному каналі, причому як когерентних (у процесі приймання багатопроменевого випромінювання одного й того ж ДРВ), так і некогерентних (у процесі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 28</i>

приймання радіосигналів від декількох ДРВ, спектри яких перекриваються);

- наявність ефективних методів зменшення інструментальних похибок, зумовлених взаємним впливом антенних елементів і місцевих умов, які можуть враховуватися для будь-яких типів антенних решіток;

- відсутність обмежень на конфігурацію АР радіопеленгатора, що дозволяє застосовувати складні решітки з широкою зоною однозначного радіопеленгування і високою розрізнявальною здатністю як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах;

- більша, ніж у фазових радіопеленгаторів, стійкість до впливу когерентних радіозавад і завад у сумісному каналі.

Крім перерахованих переваг, кореляційні інтерферометри допускають поширене застосування методів цифрового оброблення сигналів на всіх стадіях визначення пеленгу.

Основні недоліки кореляційних інтерферометрів:

- складність реалізації, що викликана двоканальним прийманням сигналів, внаслідок чого виникає необхідність конструювання спеціальних широкосмугових двоканальних радіоприймачів або дороблення існуючих;

- необхідність забезпечення в радіоприймальних каналах радіоприймачів якомога більшої ідентичності комплексних коефіцієнтів передачі;

- неповний, порівняно з амплітудними радіопеленгаторами з вузькою ДС, захист від когерентних радіозавад і завад у сумісному каналі;

- висока обчислювальна складність і в результаті низька швидкодія або великі апаратурні витрати, тобто необхідність для точної оцінки затримки в реальному масштабі часу використання багатоканальної кореляційної системи обробки інформації.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 29

### Хід виконання роботи

1. Відкрити MathCad модель безпощукового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двоелементною антенною решіткою.

2. Задати початкові дані дослідження – напрямок (кут) приходу радіосигналу  $\theta$ , величину антенної бази  $b_a$ , рис. 3.2.

Mathcad - [Дисперс 0.75МГц 500М 0.25m - 65536p.mcd]

Файл Правка Вид Вставити Формат Інструменти Символіка Окно Помічь

Normal Arial 10 B I U

**1. Задаємо початкові умови**

Задаємо кут приходу радіосигналу в межах від 0 до 180°

$$\theta_{grad} := 70$$

Переводимо градуси в радіани

$$\theta_{rad} := \frac{\theta_{grad} \cdot \pi}{180} \quad \theta_{rad} = 1.2217$$

Задаємо антенну базу, м:

$$b_a := 0.25$$

Задаємо константу швидкості світла, м/с:

$$c := 299792458$$

Отримуємо значення затримки, що відповідає цим початковим даним, с:

$$\tau := \frac{b_a \cdot \cos(\theta_{rad})}{c} \quad \tau = 2.8521 \times 10^{-10}$$

Рис. 3.2 – Початкові умови пеленгування

3. Задати параметри сигналів 1 та 2 радіоканалів  $S(t)$ , рис. 3.3.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 30

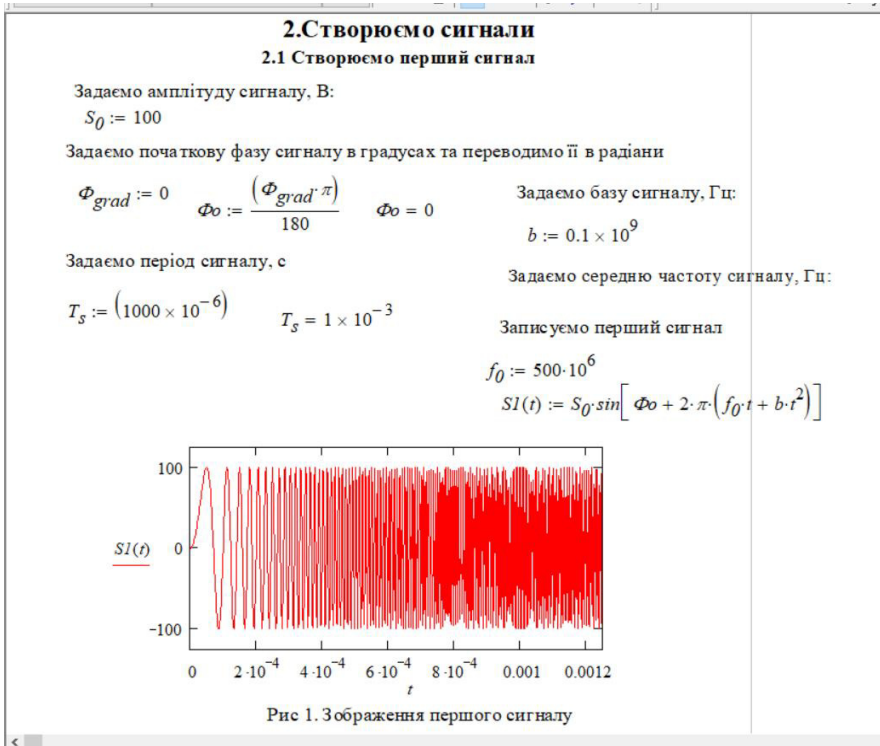


Рис. 3.3 – Параметри сигналів

4. Задати параметри цифрового оброблення (дискретизації) – частоту дискретизації  $Fd$ , кількість набраних відліків  $N$ , віконні функції  $Wk$ , на які множаться масиви відліків прийнятих радіовипромінювань для подальшого спектрального аналізу за допомогою Швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) (FFT) рис. 3.4.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 31

**3. Створюємо вікна**

**3.1. Задаємо параметри дискретизації в ікон**

Задаємо кількість відліків

$$N := 131072 \quad Fd := 32.8 \cdot 10^6$$


---


$$Td := \frac{1}{Fd} \quad Td = 3.0488 \times 10^{-8}$$

Задаємо час аналізу, який рівний періоду імпульса широкосмугового сигналу,с:

$$tMax := N \cdot Td \quad tMax = 3.9961 \times 10^{-3}$$

$$k := 0..N-1 \quad tk := k \cdot Td$$

**3.2. Створюємо вікна**

3.2.2 Вікно Блекмана

$$W_2(k) := 0.42 + \frac{1}{2} \cdot \cos\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot \left(k - \frac{N}{2}\right)}{N}\right] + 0.08 \cdot \cos\left[\frac{4 \cdot \pi \cdot \left(k - \frac{N}{2}\right)}{N}\right]$$

3.2.3 Вікно Ханна

$$W_3(k) := 0.5 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi k}{N}\right)\right)$$

Рис. 3.4 – Параметри сигналів

5. Задати параметри нормального адитивного шуму радіоканалів, рис. 3.5.

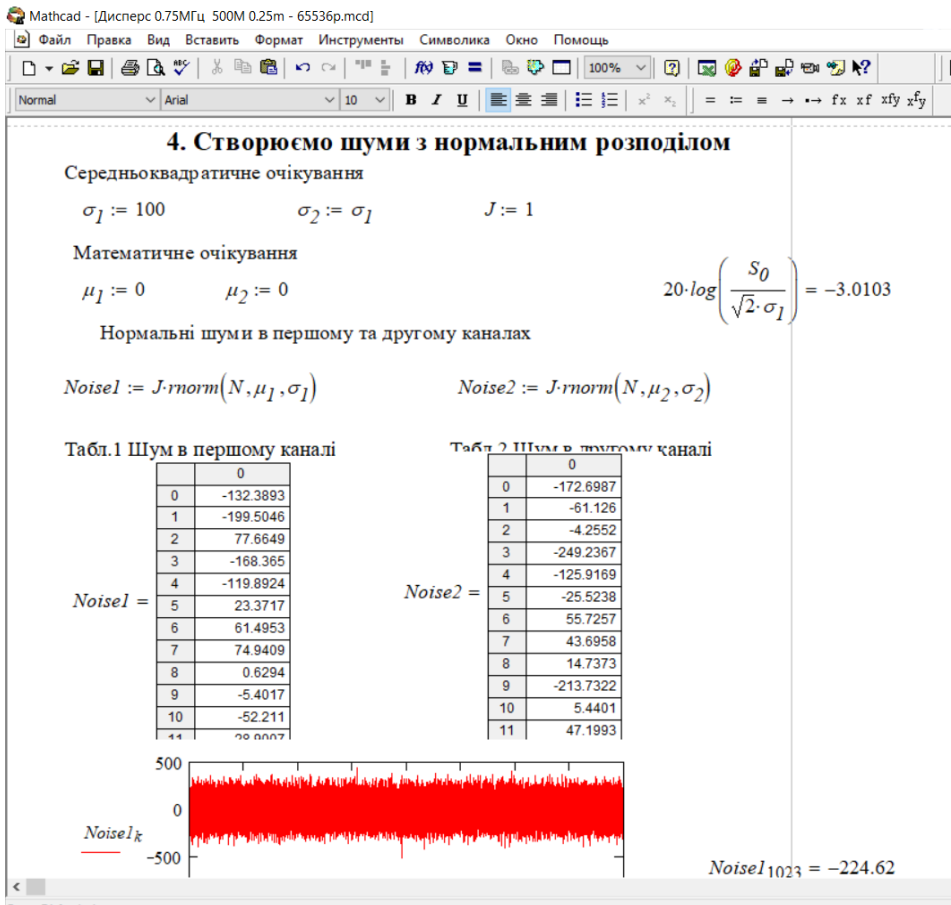


Рис. 3.5 – Параметри шуму

6. Задати параметри ШПФ, рис. 3.6.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 33

## 5. Швидке перетворення Фур'є

### 5.1. Перетворюємо перший сигнал

Дискретизуємо сигнал по  $k$ -им відлікам, додаємо шум, та множимо отриману суміш на вікно

$$yI_k := (SI(t_k) + NoiseI_k) \cdot W_2(k)$$

Здійснюємо швидке дискретне перетворення Фур'є ШПФ

$$ZI := FFT(yI)$$

Оскільки сигнал дійсний, то відкидаємо дзеркальну копію отриманого спектру, яка не містить в собі корисної інформації:

$$m := 0.. \left( \frac{N}{2} - 1 \right)$$

Інформація про параметри ШПФ

$$\Omega := \frac{Fd}{N} \qquad \Omega = 250.2441$$

$N$ -нна частота у спектрі

$$\Omega_m := m \cdot \Omega \qquad \Omega_1 = 250.2441$$

Остання частота у спектрі

$$\Omega_N := \frac{Fd}{2}$$

Рис. 3.6 – Параметри ШПФ

7. Виконати кореляційне оброблення сигналів радіоканалів, рис. 3.7.

**6. Кореляційна обробка**

**6.1. Перше кореляційне оброблення**

Перемножуємо спектр першого сигналу, та інвертований спектр другого сигналу

$$S12_m := Z1_m \cdot (\overline{Z2_m})$$

Отримуємо модулі відліків

$$A12_m := |S12_m|$$


---

Отримуємо фази відліків

$$\Phi12_m := \arg(S12_m)$$

Табл.11 Амплітудні  
відліки різницевого  
спектра

	0
0	0
1	1.2701
2	2.439
3	2.9682
4	1.298
5	1.8479
6	2.3494
7	-1.6342
8	-0.4449
9	-0.2759

Табл.12 Фазові  
відліки різницевого  
спектра

$\Phi12 =$

Рис. 3.7 – Параметри кореляційного оброблення

8. Виконати оцінку пеленга  $\theta_{vimir}$ , та похибки пеленгування як різницю між заданим та отриманим значенням:  $\theta_{grad} - \theta_{vimir}$ , рис. 3.8. Повторити дослід 30 разів за допомогою перерахування аркуша маткад, комбінація клавіш (Ctrl+F9) та визначити СКВ оцінки пеленгу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 35

**7. Визначення наближеного значення пеленгу**

$\Omega_{33967} = 8.5 \times 10^6$

Здійсноємо відновлення частоти

$$Kg := \frac{f_0}{Fd} \quad Kg = 15.2439$$

$$\omega_d := 2 \cdot \pi \cdot \Omega_{33967} + 2 \cdot \pi \cdot Fd \cdot 15 \quad \omega_m := 2 \cdot \pi \cdot \Omega_{33967} + 2 \cdot \pi \cdot Fd \cdot 15$$

$$\omega_d = 3.1435 \times 10^9 \quad \omega_m = 3.1435 \times 10^9$$


---


$$\gamma_m := \frac{\omega_d}{\omega_m} \quad 2\pi \cdot f_0 = 3.1416 \times 10^9$$

$$K := \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{m=33168}^{33967} (A12_m \cdot \cos(\Phi12_m \cdot \gamma_m)) > 0 \\ 1 & \text{if } \sum_{m=33168}^{33967} (A12_m \cdot \cos(\Phi12_m \cdot \gamma_m)) < 0 \wedge \sum_{m=33168}^{33967} (A12_m \cdot \sin(\Phi12_m \cdot \gamma_m)) > 0 \\ (-1) & \text{if } \sum_{m=33168}^{33967} (A12_m \cdot \cos(\Phi12_m \cdot \gamma_m)) < 0 \wedge \sum_{m=33168}^{33967} (A12_m \cdot \sin(\Phi12_m \cdot \gamma_m)) < 0 \end{cases}$$

$K = 0$

$$tl := \left( \frac{1}{\omega_d} \right) \cdot \operatorname{atan} \left[ \frac{\sum_{m=33168}^{33967} (A12_m \cdot \sin(\Phi12_m \cdot \gamma_m))}{\sum_{m=33168}^{33967} (A12_m \cdot \cos(\Phi12_m \cdot \gamma_m))} \right] + K \cdot \pi$$

$32768 \quad 34367$

$$tl = 2.9149 \times 10^{-10} \quad \tau = 2.8521 \times 10^{-10}$$

Знаходимо абсолютну та відносну похибки вимірювання наближеної затримки

Визначаємо кут приходу сигналу

$$\Theta_{vimir} := \operatorname{acos} \left( \frac{tl \cdot c}{b_a} \right) \quad \Theta_{vimir} = 1.2137$$

$$\Theta_{vimirgrad} := \frac{180 \cdot \Theta_{vimir}}{\pi} \quad \Theta_{vimirgrad} = 69.5407$$

Похибка кута пеленгу:

$$\theta_{grad} - \Theta_{vimirgrad} = 0.4593$$

Рис. 3.8 – Кореляційна безпошукова оцінка пеленга

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 36</i>

9. Дослідити залежність СКВ оцінки пеленгу від наступних параметрів:

- 9.1. Напрямку  $\theta$ ;
- 9.2. Частоти сигналу (100-3000МГц з кроком 100);
- 9.3. Вхідного відношення сигнал / шум, дБ;
- 9.4. Величина антенної бази  $b_a$ ;
- 9.5. Ширини спектра сигналу, що пеленгується;
- 9.6. Типу вікна часового спектрального аналізу.

**Зміст звіту.** Звіт повинен містити:

1. Результати досліджень.
2. Результати розрахунків та відповідні графіки, їх аналіз.
3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

#### **Контрольні питання**

1. Завдання пасивної радіолокації і методи її проведення
2. Методи пошуку радіоелектронних засобів по частоті і напрямку
3. Методи вимірювання часових і частотних параметрів випромінювань
4. Принципи побудови моноімпульсних пеленгаторів
5. Цифрові кореляційно-інтерферометричні моноімпульсні пеленгатори це...
6. Цифрові SDR-приймачі і їх застосування апаратури пасивної локації
7. Аналіз точності і швидкодії засобів пасивної локації
8. Як перевести коефіцієнт підсилення з разів в децибели дБ за напругою та потужністю?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 37</i>

## **Лабораторна робота №4**

### **Моделювання безпощукових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з 64-елементною АР**

**Мета.** Навчитись проводити дослідження характеристик пристроїв пасивної радіолокації шляхом моделювання.

#### **Короткі теоретичні відомості**

Сучасні кореляційно-інтерферометричні радіопеленгатори зазвичай використовують нерухомі антени.

Для стаціонарних і мобільних станцій радіомоніторингу найбільшого поширення в даний час набула схема з двома каналами прийому. Структурна схема такого кореляційного інтерферометра представлена на рис. 4.1 [7].

Основними його елементами є: антенна решітка, антенний комутатор, двоканальний когерентний радіоприймач, блок аналого-цифрової обробки, що складається з двох АЦП та блоку цифрового оброблення сигналів (ЦОС). Двоканальний приймач має два входи: перший називатимемо сигнальним, другий – опорним. Антенний комутатор послідовно підключає до входів двоканального приймача пари елементів АР, вибрані згідно алгоритму пеленгування. Для забезпечення когерентного прийому сигналів на змішувачі обох каналів прийому подається одна і та ж високочастотна напруга, що формується синтезатором частот.

Інтерферометр з цифровим приймачем, число когерентних каналів якого рівне числу антенних елементів (АЕ), реалізує моноімпульсний метод пеленгування. Такий пеленгатор забезпечує найбільшу швидкість обчислення пеленгів, але складний, дорогий у виготовленні і налаштуванні. Важливим завданням, яке необхідно вирішити в моноімпульсному пеленгаторі, є виконання вимоги ідентичності амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик приймальних каналів. Звичайно це завдання вирішується шляхом

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 38

періодичного калібрування за допомогою тестового зондуєчого сигналу невеликої потужності, що подається в приймальні канали.

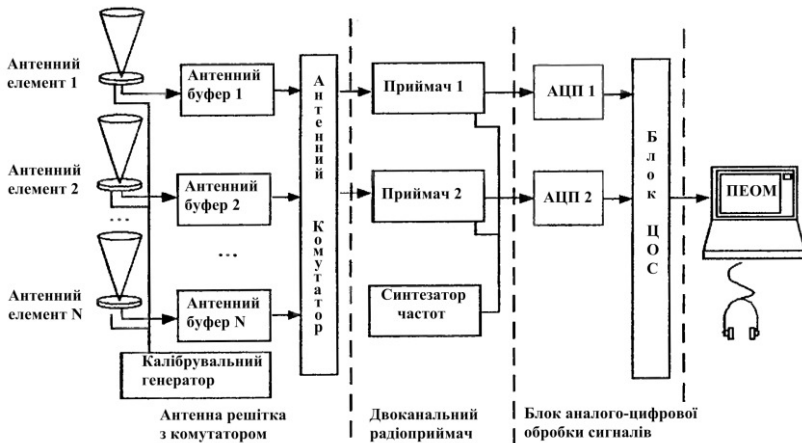


Рис. 4.1 – Структурна схема багатоканального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора

Основні функції двоканального приймача: перетворення частоти радіосигналу, що приймається, і первинна фільтрація по побічних каналах прийому, тобто функція підготовки прийнятого радіосигналу до перетворення в цифровий вигляд.

У блоці аналого-цифрової обробки виконуються основні обчислювальні операції по алгоритму цифрової обробки. Персональна ЕОМ, що входить до складу інтерферометра, виконує функції керування, обчислення, а також здійснює відображення результатів.

Принцип роботи інтерферометра оснований на порівнянні фаз поля в просторово рознесених точках з метою визначення орієнтації поверхні рівних фаз, однозначно пов'язаної з напрямом поширення від ДРВ. Збільшення кількості просторово рознесених пар точок, що відрізняються між собою відстанню «рознесення» або базою і кутовою орієнтацією в просторі, дозволяє збільшити інформацію про

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 39

структуру хвилі, що приймається, і відповідно підвищити якість формування кутового просторового спектра радіосигналу. АЕ, що є датчиками поля, розташовуються, як правило, в площині пеленгування (азимутної площини), що пов'язано з можливостями технічної реалізації ідентичних фазових центрів кожного АЕ. Для забезпечення однозначності пеленгування в круговій зоні необхідно мати принаймні три АЕ, розташованих в площині пеленгування. Враховуючи необхідність сканування в межах  $360^\circ$  з однаковою якістю вимірювань, АР повинна бути симетричною щодо її фазового центру. До симетричних плоских АР відносяться еквідистантні одна-та багатокільцеві АР з центральним антенним елементом або без нього [7].

Радіопеленгування проводиться за максимумом взаємної кореляційної функції, що буде коли різниця  $\Delta t$  часу поширення сигналів від ДРВ до обох антен компенсується часом  $\tau_{ЛЗ}$  регульованої лінії затримки.

За оціненим числовим значенням часу  $\hat{\tau}_{ЛЗ}$ , яке можна визначити за максимальним рівнем напруги на виході корелятора шляхом регулювання вручну або автоматично часу лінії затримки, можна визначити кут  $\alpha$  між напрямком на ДРВ і напрямком антенної бази  $d$  із виразу:

$$\cos \alpha = \frac{c \cdot \hat{\tau}_{ЛЗ}}{d}.$$

В цілому кореляційні інтерферометри на сьогодні є найперспективніші серед радіопеленгаторних систем, що зумовлено їхніми наступними суттєвими перевагами [6–8]:

– якісне радіопеленгування практично будь-яких видів радіосигналів, у тому числі, ширококугових зі складними видами модуляції;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 40</i>

– можливість оброблення та розрізнення одночасно двох або декількох сигналів в одному частотному каналі, причому як когерентних (у процесі приймання багатопроменевого випромінювання одного й того ж ДРВ), так і некогерентних (у процесі приймання радіосигналів від декількох ДРВ, спектри яких перекриваються);

– наявність ефективних методів зменшення інструментальних похибок, зумовлених взаємним впливом антенних елементів і місцевих умов, які можуть враховуватися для будь-яких типів антенних решіток;

– відсутність обмежень на конфігурацію АР радіопеленгатора, що дозволяє застосовувати складні решітки з широкою зоною однозначного радіопеленгування і високою розрізнявальною здатністю як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах;

– більша, ніж у фазових радіопеленгаторів, стійкість до впливу когерентних радіозавад і завад у сумісному каналі.

Крім перерахованих переваг, кореляційні інтерферометри допускають поширене застосування методів цифрового оброблення сигналів на всіх стадіях визначення пеленгу.

Основні недоліки кореляційних інтерферометрів:

– складність реалізації, що викликана двоканальним прийманням сигналів, внаслідок чого виникає необхідність конструювання спеціальних ширококутових двоканальних радіоприймачів або дороблення існуючих;

– необхідність забезпечення в радіоприймальних каналах радіоприймачів якомога більшої ідентичності комплексних коефіцієнтів передачі;

– неповний, порівняно з амплітудними радіопеленгаторами з вузькою ДС, захист від когерентних радіозавад і завад у сумісному каналі;

– висока обчислювальна складність і в результаті низька швидкодія або великі апаратні витрати, тобто необхідність для



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 41

точної оцінки затримки в реальному масштабі часу використання багатоканальної кореляційної системи обробки інформації.

### Хід виконання роботи

1. Відкрити MathCad модель безпошукового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з багатоеlementною лінійною антенною решіткою та двосигнальним прийомом (другий сигнал виступає в ролі завади), рис. 4.2.

**1. Задаємо початкові умови**

Задаємо кут приходу радіосигналу в межах від 0 до 180°

$$\theta_{grad} := 60$$

Переводимо градуси в радіани

$$\theta_{rad} := \frac{\theta_{grad} \cdot \pi}{180} \quad \theta_{rad} = 1.0472$$

Задаємо антенну базу, м:

$$b_a := 0.05$$

Задаємо константу швидкості світла, м/с:

$$c := 299792458$$

Отримуємо значення затримки, що відповідає цим початковим даним, с:

$$t := \frac{b_a \cdot \cos(\theta_{rad})}{c} \quad t = 8.3391 \times 10^{-11}$$

$$t2 := \frac{b_a \cdot \cos(\theta_{2rad})}{c} \quad t2 = 9.8032 \times 10^{-11}$$

Additional calculations shown in the screenshot:

$$\theta_{2grad} := 54$$

$$\theta_{2rad} := \frac{\theta_{2grad} \cdot \pi}{180} \quad \theta_{2rad} = 0.94248$$

Рис. 4.2 – Початкові умови пеленгування пеленгатора з багатоеlementною лінійною антенною

2. Задати початкові дані дослідження – напрямок (кут) приходу радіосигналу  $\theta$ , величину антенної бази  $b_a$ .

3. Задаємо параметри сигналів 1 та 2 радіоканалів  $S(t)$ .

4. Задаємо параметри цифрового оброблення (дискретизації) – частоту дискретизації  $Fd$ , кількість набраних відліків  $N$ , віконні

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 42

функції  $Wk$ , на які множаться масиви відліків прийнятих радіовипромінювань для подальшого спектрального аналізу за допомогою Швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) (FFT).

5. Задаємо параметри нормального адитивного шуму радіоканалів.

6. Задаємо параметри ШПФ.

7. Виконуємо кореляційне оброблення сигналів радіоканалів.

8. Виконуємо оцінку пеленга  $\theta_{vimir}$ , та похибки пеленгування як різницю між заданим та отриманим значенням:  $\theta_{grad} - \theta_{vimir}$ . Повторити дослід 30 разів за допомогою перерахування аркуша маткад, комбінація клавіш (Ctrl+F9) та визначити СКВ оцінки пеленгу, рис 4.3.

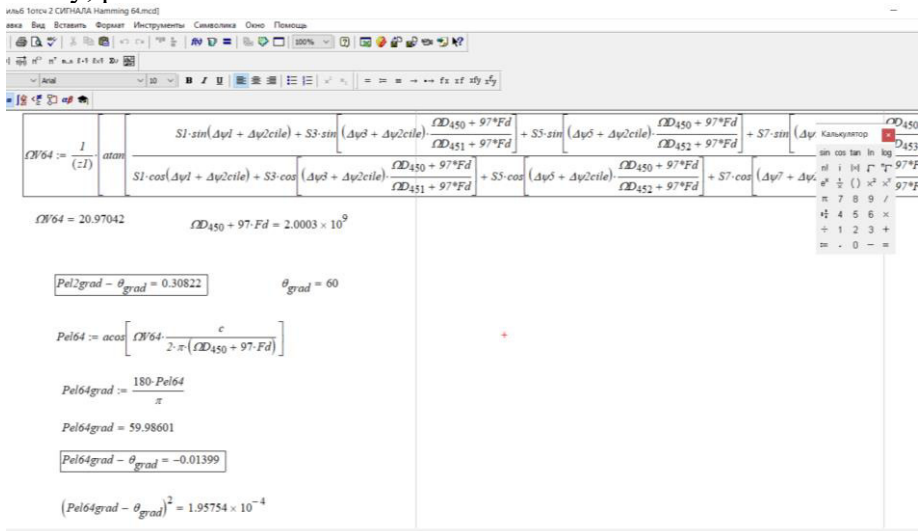


Рис. 4.3 – Кореляційна безошукова оцінка пеленга з використанням 64-елементної лінійної антенної решітки

9. Дослідити залежність СКВ оцінки пеленгу для другої моделі від наступних параметрів:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 43</i>

- 9.1. Напрямку  $\theta$ ;
- 9.2. Частоти сигналу (100-3000МГц з кроком 100);
- 9.3. Вхідного відношення сигнал / шум, дБ;
- 9.4. Просторове рознесення за напрямком між сигналом і завадою;
- 9.5. Тип вікна часового спектрального аналізу;
- 9.6. Тип вікна просторового спектрального аналізу.

**Зміст звіту.** Звіт повинен містити:

1. Результати досліджень.
2. Результати розрахунків та відповідні графіки, їх аналіз.
3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

#### **Контрольні питання**

1. Як перевести коефіцієнт підсилення з децибел дБ в рази за напругою та потужністю?
2. Задачі ведення радіотехнічної розвідки
3. Методи ведення радіотехнічної розвідки.
4. Що таке виявлення радіоелектронних засобів
5. Як роблять пошук за напрямком та частотою
6. Які основні параметри статистичної оцінки
7. Що таке математичне очікування?
8. Що таке СКВ?
9. Як оцінити дисперсію оцінки для масиву випадкових даних?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2023
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 44</i>

### Список літератури

1. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1 : навчальний посібник / Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О. Ю., Шушура О.М.; за заг. ред. Р.Н. Кветного. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 193с.
2. Дубовой В. М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування : навчальний посібник / В. М. Дубовой. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 308 с.
3. Волощук Ю.Т. Сигнали та процеси у радіотехніці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. Том 1–3. – Харків: «Компанія СМІТ». – 2003. – 444с.
4. Стеценко, І.В. Моделювання систем: навч. посіб. [Електронний ресурс, текст] / І.В. Стеценко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
5. Основи математичного моделювання систем і процесів: навч. посіб. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2013. – 201 с.
6. Тютюнник А.І. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного управління. - Житомир, ЖДТУ, 2002. – 547 с. іл.
7. Слободянюк П.В, Благодарний В.Г., Ступак В.С. Довідник з радіомоніторингу / Під заг. ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.: іл.
8. Ципоренко В.В. Алгоритмічно-програмні методи обробки сигналів та відеозображень для мобільного комплексу радіомоніторингу. Монографія / В.В.Ципоренко, Ю.О. Подчашинський, В.Г. Ципоренко, О.О. Лугових. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. – 300 с.