

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 /ОК6-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 23</i>

Практична робота №3

Моделювання безпошукових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з 2-елементною АР

Мета. Навчнтнсь 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 /ОК6-2021
	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.

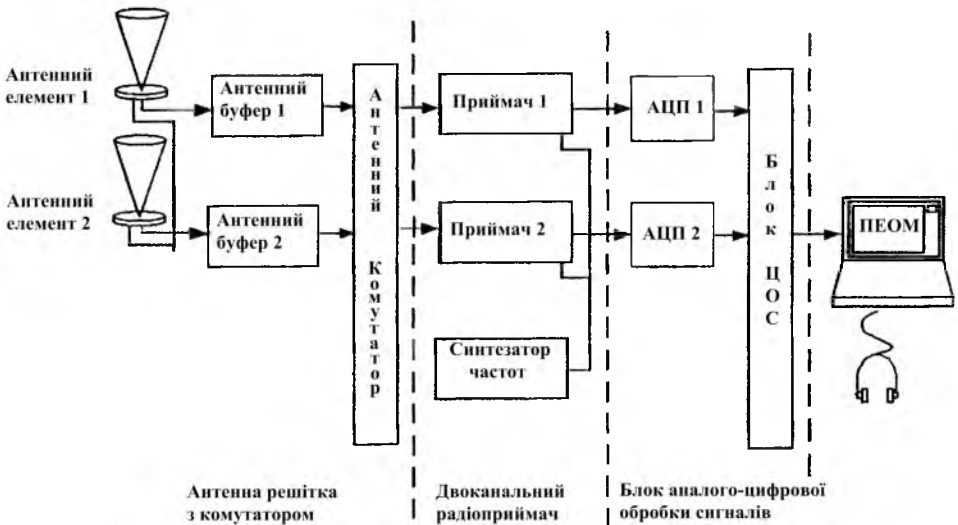


Рис. 3.1 – Структурна схема двоканального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з нерухоною антенною системою

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 /ОК6-2021
	<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° 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 Δt 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 /ОК6-2021
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 26

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 α 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 реалізується по ряду відомих причин, до яких можна віднести необхідність забезпечення високої швидкості огляду простору при круговому скануванні, наявність обмежень на масо-габаритні характеристики радіосистем і т.д. У зв'язку з цим виникає завдання оптимального розміщення обмеженої кількості АЕ, що дозволяє отримати максимальну інформацію про структуру поля в розкриві антен. 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 /ОК6-2021
	<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 Δt , 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 /ОК6-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 28</i>

приймання радіосигналів від декількох ДРВ, спектри яких перекриваються);

- наявність ефективних методів зменшення інструментальних помилок, 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 амплітудним радіопеленгатором 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 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 /ОК6-2021
	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 θ , величину антенної бази b_a , рис. 3.2.

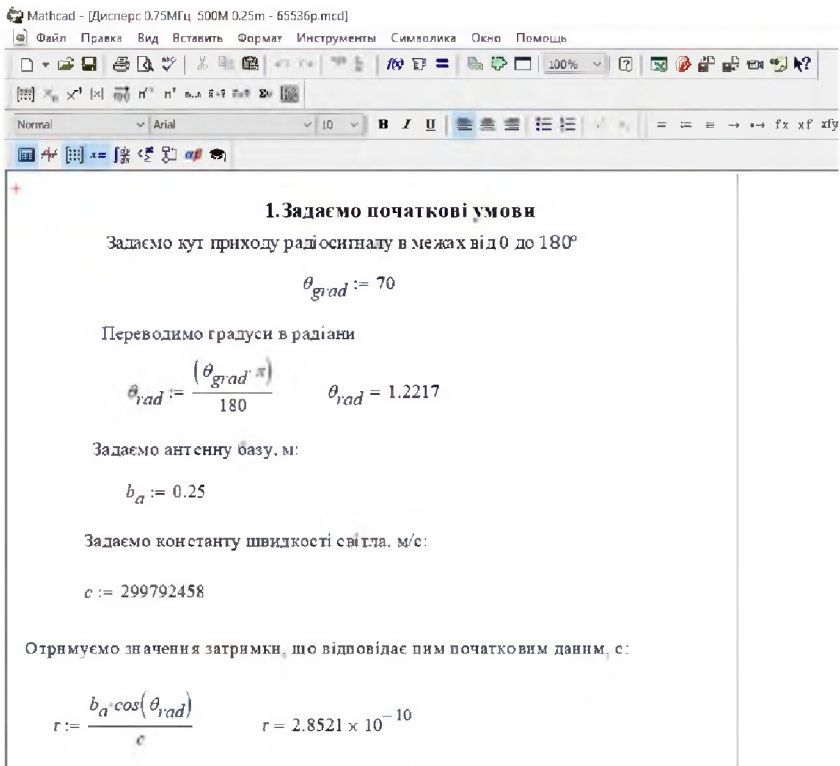


Рис. 3.2 – Початкові умови пеленгування

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 /ОК6-2021
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 30

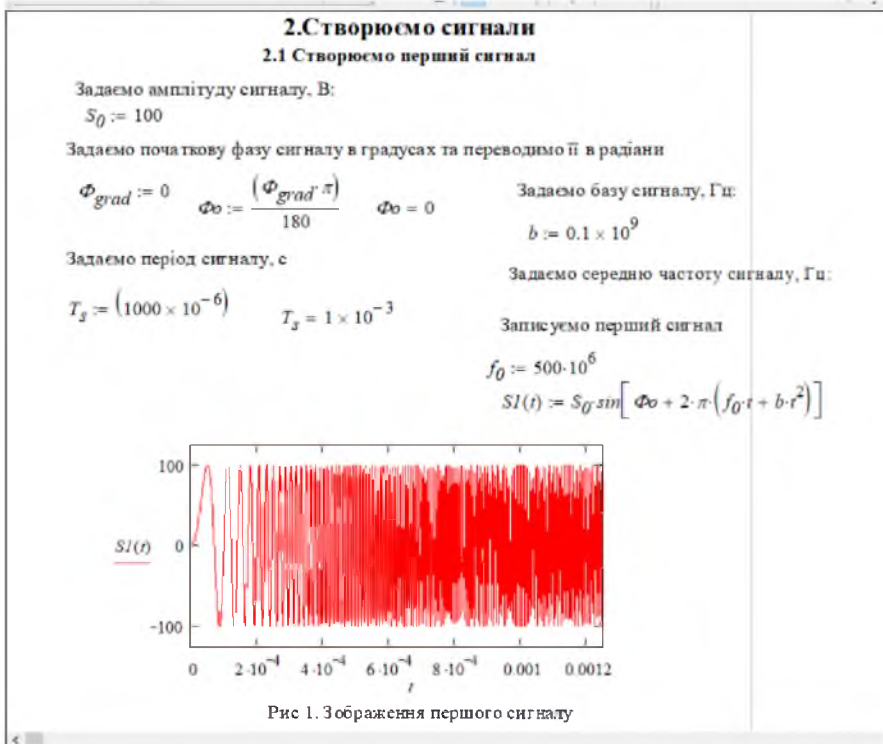


Рис. 3.3 – Параметри сигналів

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 /ОК6-2021
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 31

3. Створюємо вікна

3.1. Задаємо параметри дискретизації вікон

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.

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 /ОК6-2021
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 32

Mathcad - [Дисперс 0.75МГц, 500М 0.25м - 65536р.mcd]

Файл Правка Вид Вставити Формат Інструменти Символіка Окно Помічник

Normal Arial 10 B I U

4. Створюємо шуми з нормальним розподілом

Середньоквадратичне очікування

$$\sigma_1 := 100 \quad \sigma_2 := \sigma_1 \quad J := 1$$

Математичне очікування

$$\mu_1 := 0 \quad \mu_2 := 0$$

$$20 \cdot \log \left(\frac{S_0}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right) = -3.0103$$

Нормальні шуми в першому та другому каналах

$$\text{Noise1} := J \cdot \text{norm}(N, \mu_1, \sigma_1) \quad \text{Noise2} := J \cdot \text{norm}(N, \mu_2, \sigma_2)$$

Табл. 1 Шум в першому каналі

	0
0	-132.3893
1	-199.5046
2	77.6649
3	-168.365
4	-119.8924
5	23.3717
6	61.4953
7	74.9409
8	0.6294
9	-5.4017
10	-52.211
11	20.0007

Табл. 2 Шум в другому каналі

	0
0	-172.6987
1	-61.126
2	-4.2552
3	-249.2367
4	-125.9169
5	-25.5238
6	55.7257
7	43.6958
8	14.7373
9	-213.7322
10	5.4401
11	47.1993

Noise1 =

Noise2 =

Noise1₁₀₃ = -224.62

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 /ОК6-2021
	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

$$y1_k := (S1(r_k) + Noise1_k) \cdot W_2(k)$$

Здійсноємо швидке дискретне перетворення Фур'є ШПФ

$$Z1 := FFT(y1)$$

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

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

Відносні частоти в радіадах

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

N -ва частота у спектрі

$$\Omega_m := m \cdot \Omega \qquad \Omega_{11} = 250.2441$$

Остання частота у спектрі

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

Рис. 3.6 – Параметри ШПФ

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

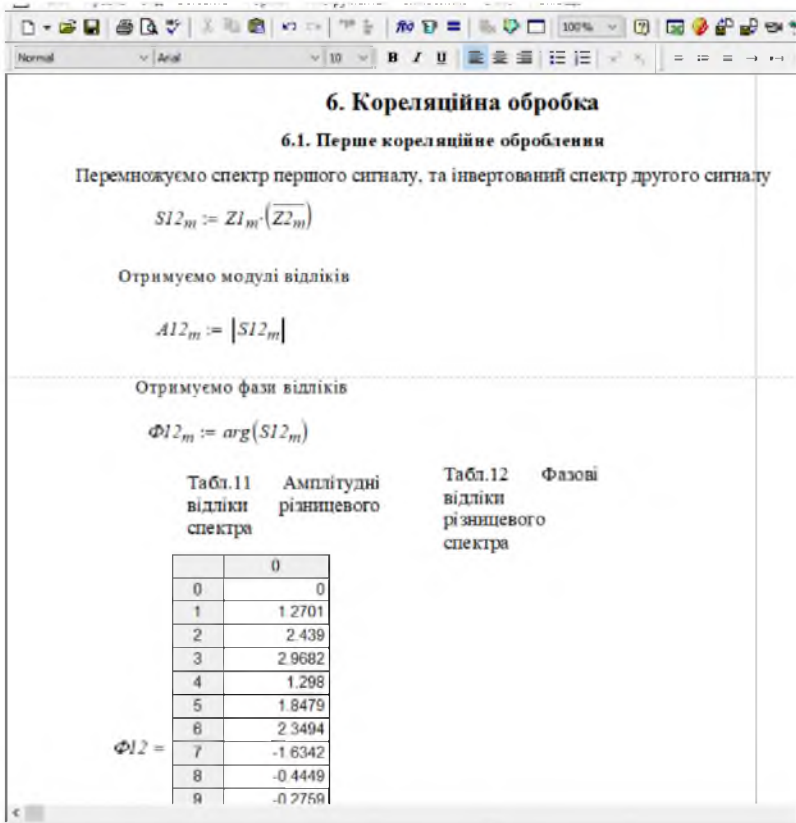


Рис. 3.7 – Параметри кореляційного оброблення

8. Виконати оцінку пеленга θ_{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 ДЕРЖАВИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ОК6-2021
	Екземпляр № 1	Арк 44 / 35

7. Визначення наближеного значення пеленгу $\Omega_{33967} = 8.5 \times 10^6$

Здійснюємо відновлення частоти

$$K_g = \frac{f_0}{F_d} \quad K_g = 15.2439$$

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

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

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

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

$K = 0$

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

$32768 \quad 34367$

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

Знаходимо абсолютну та відносну похибки вимірювання наближеної затримки

Визначимо кут приходу сигналу

$$\Theta_{vimir} = \arccos \left(\frac{el \cdot c}{b_a} \right) \quad \Theta_{vimir} = 1.2137$$

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

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 /ОК6-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 44 / 36</i>

9. Дослідити залежність СКВ оцінки пеленгу від наступних параметрів:

- 9.1. Напрямку θ ;
- 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?