

ДОДАТОК А
ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

Методи виявлення БПЛА

Активна і пасивна
радіолокація



Оптико-електронне
та теплове виявлення



Акустичне
спостереження



Всі методи мають досить серйозні обмеження. Тому для надійного виявлення необхідно найбільш повно використовувати всі демаскуючі ознаки БПЛА шляхом побудови комплексних систем.

Рисунок А.1 – Слайд "Методи виявлення БПЛА"

Постановка задачі

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки акустичних сигналів БПЛА в мікрофонною решіткою.

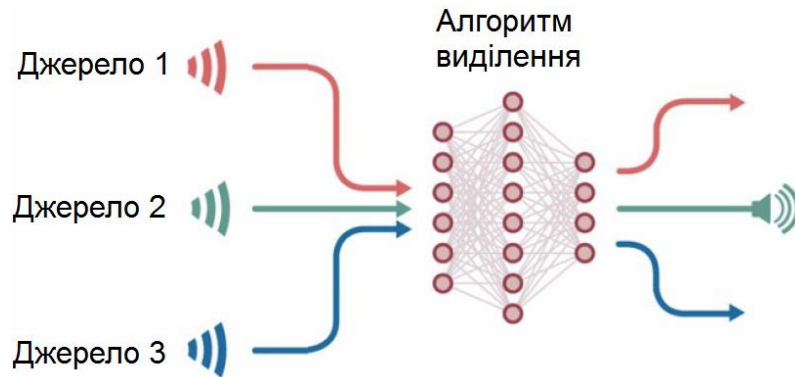
Мета роботи полягає в реалізації і дослідженні можливостей алгоритму обробки акустичного сигналу мікрофонними решітками у часовій області для виділення звуку БПЛА з будь-якої точки зони спостереження на фоні джерел перешкод.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, статистична обробка даних.

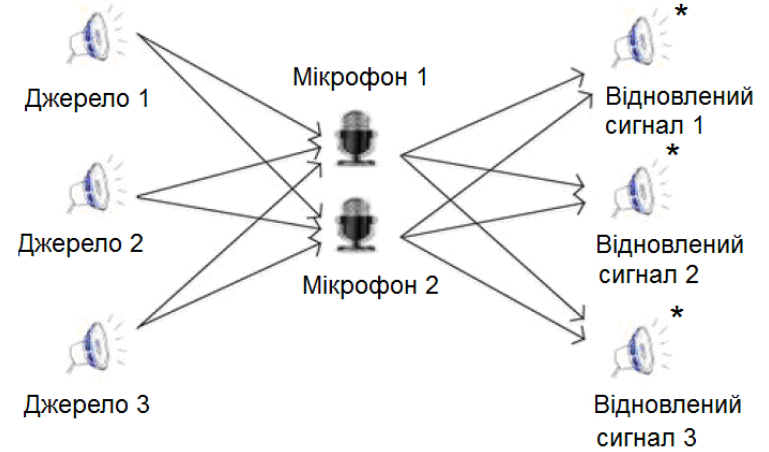
Рисунок А.2 – Слайд "Постановка задачі"

Алгоритми виділення джерел звуку

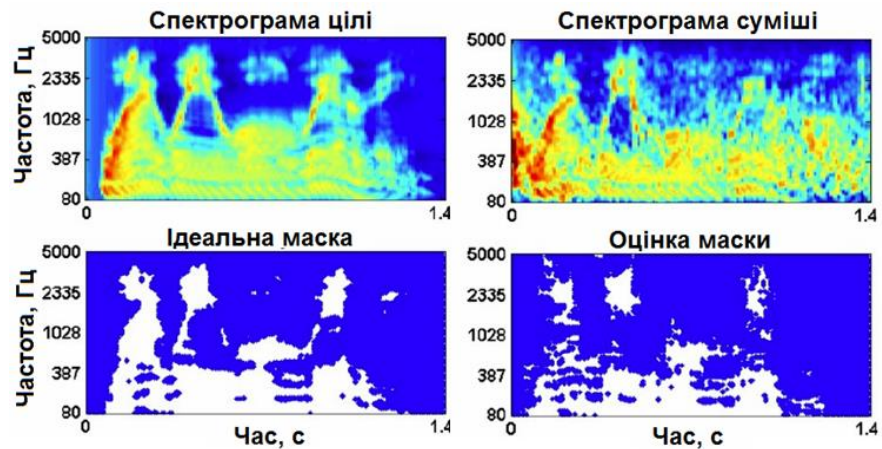
1. Використання нейронних мереж



2. Аналіз незалежних компонентів (ICA)



3. Частотно-часове маскування (T-F masking)



4. Обробка мікрофонними решітками

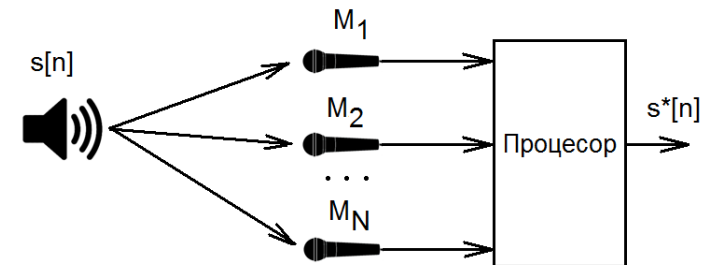


Рисунок А.3 – Слайд "Алгоритми виділення джерел звуку"

Просторова обробка у часовій області

1. Для виділення корисного сигналу у кожен реєстрований i -м мікрофоном сигнал вводяться часові затримки, що залежать від просторових координат.

$$\tau_{ij} = \tau_{opt} - \frac{r_{ij}}{V_s}$$

r_{ij} – відстань від довільно вибраної точки зони огляду до i -ого мікрофона;

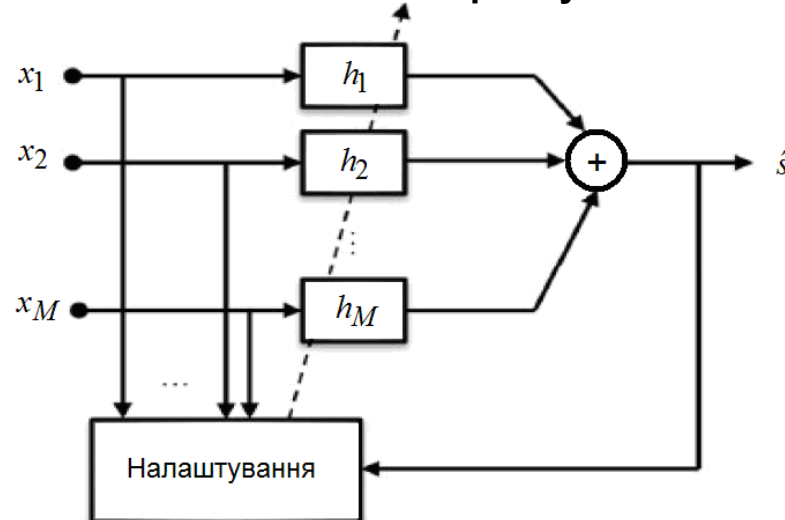
V_s – швидкість звуку.

2. Матриця часових затримок для кожної точки зони огляду:

$$T = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{21} & \dots & \tau_{p1} \\ \tau_{12} & \tau_{22} & \dots & \tau_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tau_{1N} & \tau_{2N} & \dots & \tau_{pN} \end{pmatrix}$$

3. Розрахунок просторової кореляційної функції дозволяє визначити координати джерел акустичних сигналів.

Схема базового алгоритму



4. Подальше збільшення відношення сигнал/перешкода можливе після розрахунку оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонів.

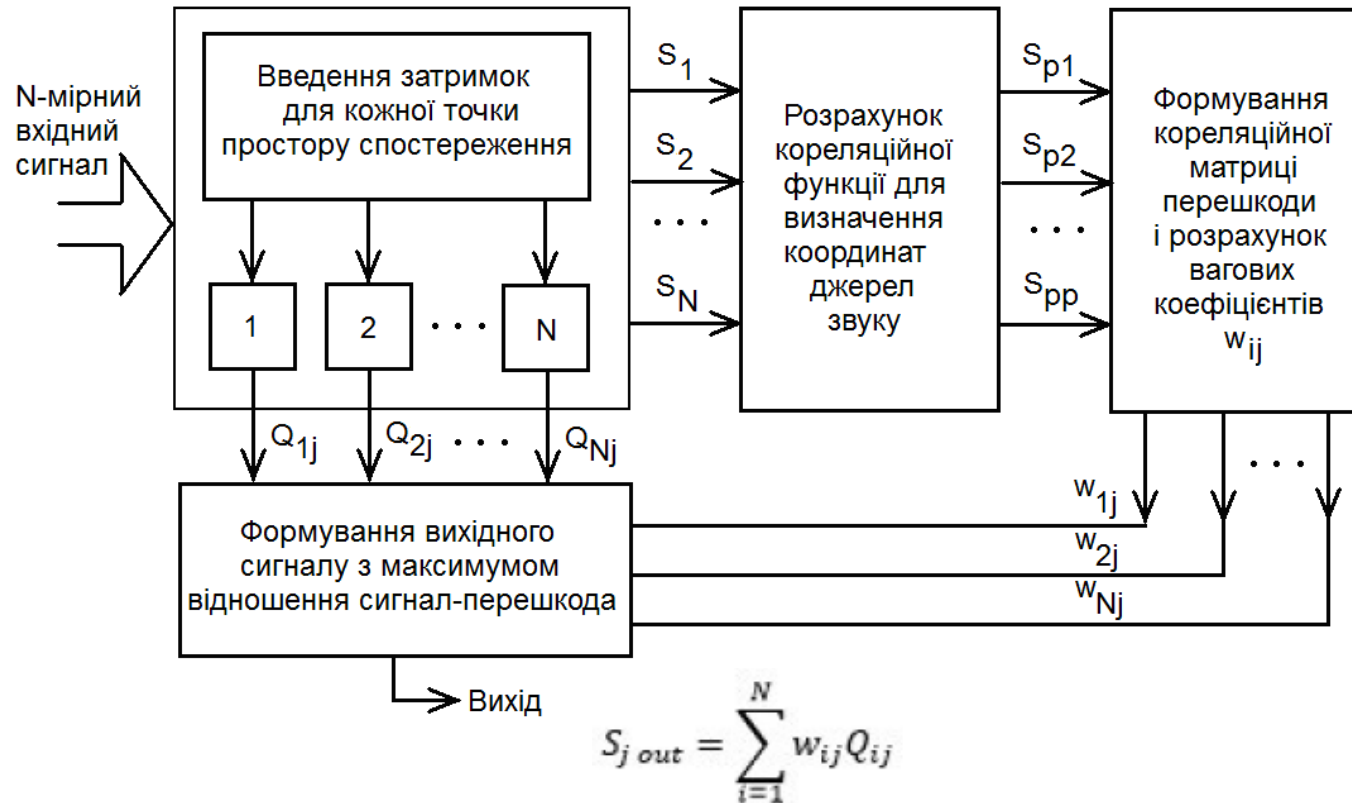
$$\mathbf{W} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{S}$$

\mathbf{M}^{-1} - зворотна до кореляційної матриця перешкоди,

\mathbf{S} - вектор корисного сигналу.

Рисунок А.4 – Слайд "Просторова обробка у часовій області"

Алгоритм обробки



У блоці формування кореляційної матриці перешкоди один з сигналів P призначається корисним і подальша обробка спрямована на підвищення відношення сигнал/перешкода вибраного джерела.

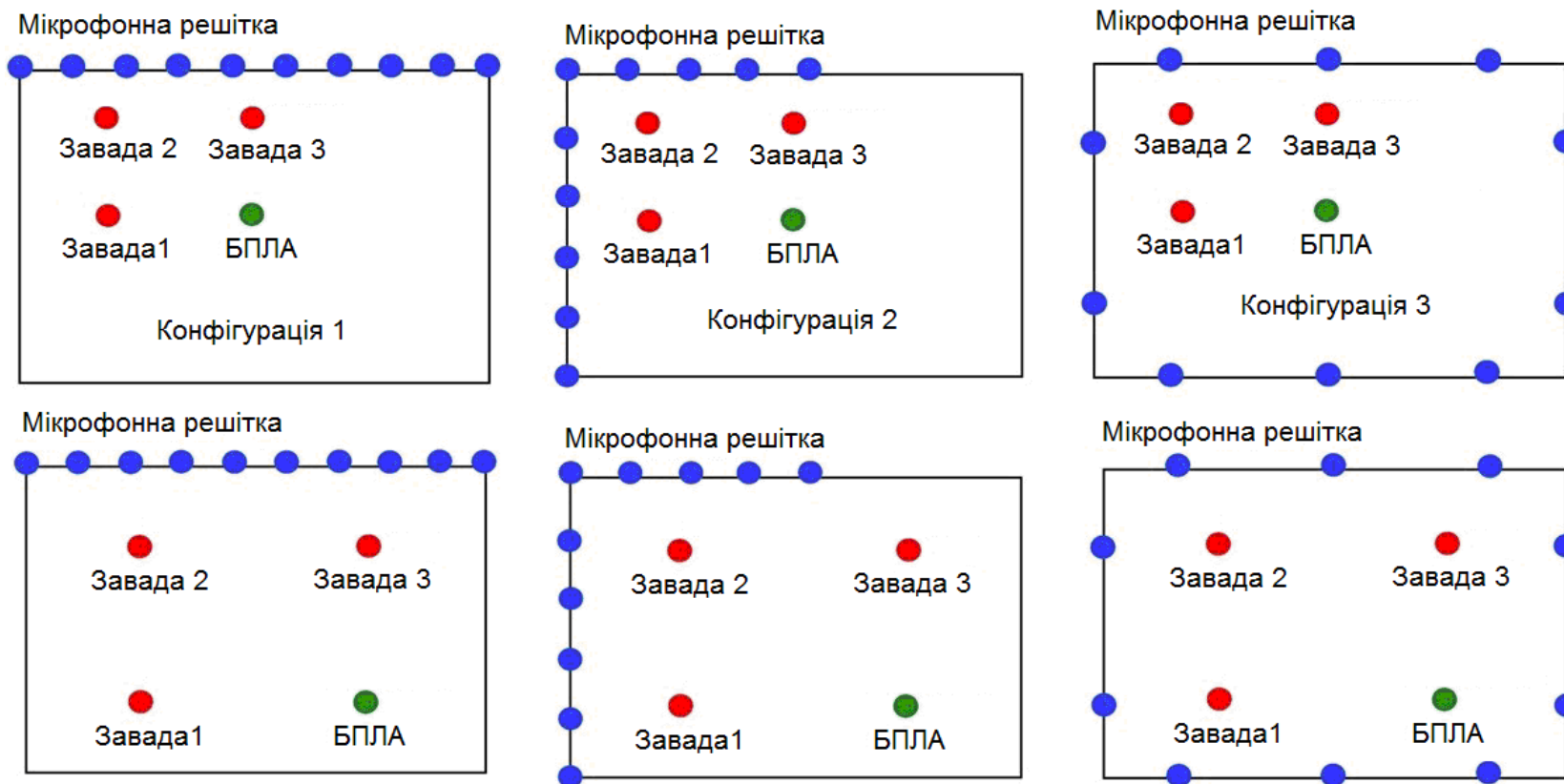
Рисунок А.5 – Слайд "Алгоритм обробки"

Умови модельного експерименту

1. Умовно обрана прямокутна зона спостереження 120 x 80 м.
2. Ненаправлені мікрофони розміщені в тій же площині, що і всі джерела.
3. Джерела акустичного сигналу БПЛА і перешкод вважаються точковими, всеспрямованими, звуковий тиск зменшується обернено пропорційно відстані.
4. В якості корисного сигналу використовується аудіозапис квадрокоптера DJI Phantom 3 в режимі зависання.
5. В якості джерел шуму використані аудіозаписи двигуна вантажівки, голосу людини, спів птаха. Частота дискретизації 44,1 кГц.
6. Тривалість кожної реалізації 5 с.
7. Відбиття від перешкод і землі не враховується.
8. Енергія кожного аудіофрагмента однакова, що досягається шляхом нормування.
9. Джерела сигналу стаціонарні у просторі. Під час обробки переміщень немає.

Рисунок А.6 – Слайд "Умови модельного експерименту"

Конфігурація мікрофонних решіток



Розглядалися три варіанти розміщення – лінійний, кутовий і по периметру зони огляду;
і два варіанти розміщення цілі – в центрі і поза центром.

Рисунок А.7 – Слайд "Конфігурація мікрофонних решіток"

Вибір кращої конфігурації

Критерій вибору

Відношення сигнал/перешкода

$$SNR = \frac{\sum_{t=1}^T S_0^2(t)}{\sum_{t=1}^T (S(t) - S_0(t))^2}$$

де S – відновлений сигнал БПЛА ;

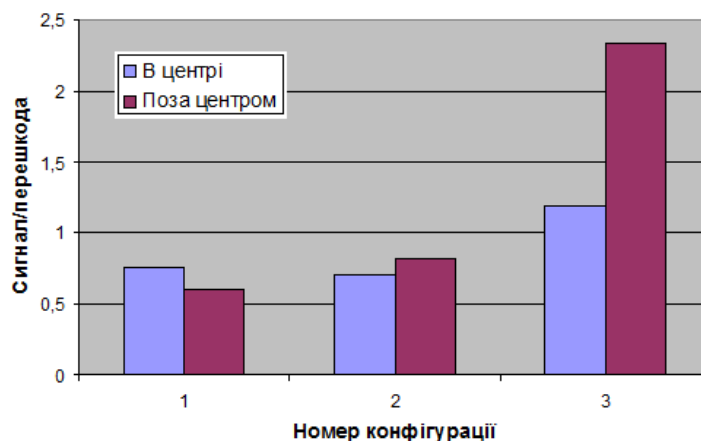
S_0 – первинний сигнал БПЛА;

t – номер відліку сигналу;

T – тривалість реалізації.

Відношення сигнал/перешкода для різних конфігурацій

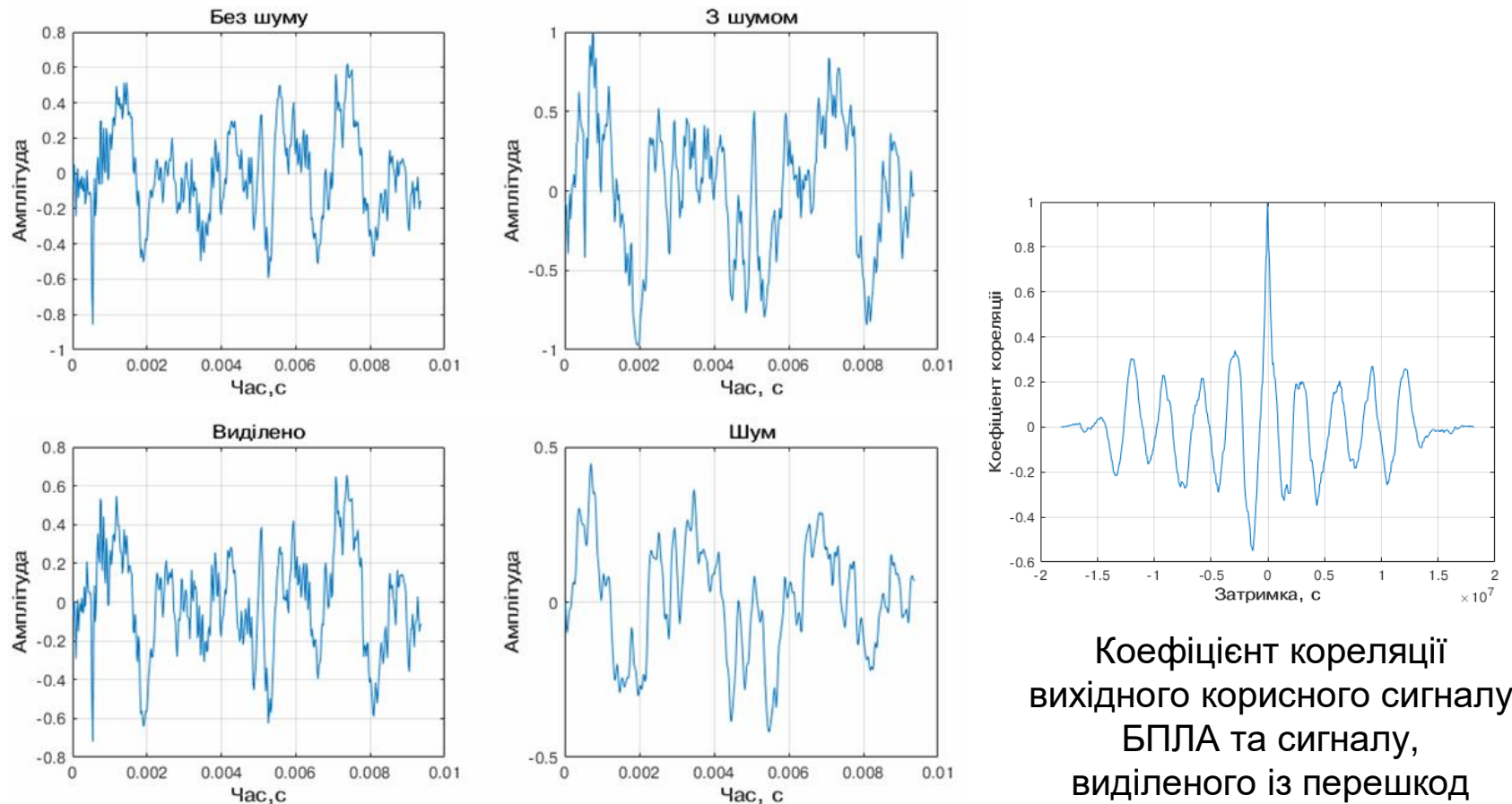
№	Конфігурація багатопозиційної системи	Відношення сигнал/перешкода виділеного сигналу БПЛА, λ , відн. од.	
		БПЛА в центрі	БПЛА поза центром
1	Лінійна	0,76	0,60
2	Кутова	0,71	0,82
3	По периметру	1,19	2,34



Порівняльна діаграма отриманих відношень сигнал/перешкода

Рисунок А.8 – Слайд "Вибір кращої конфігурації"

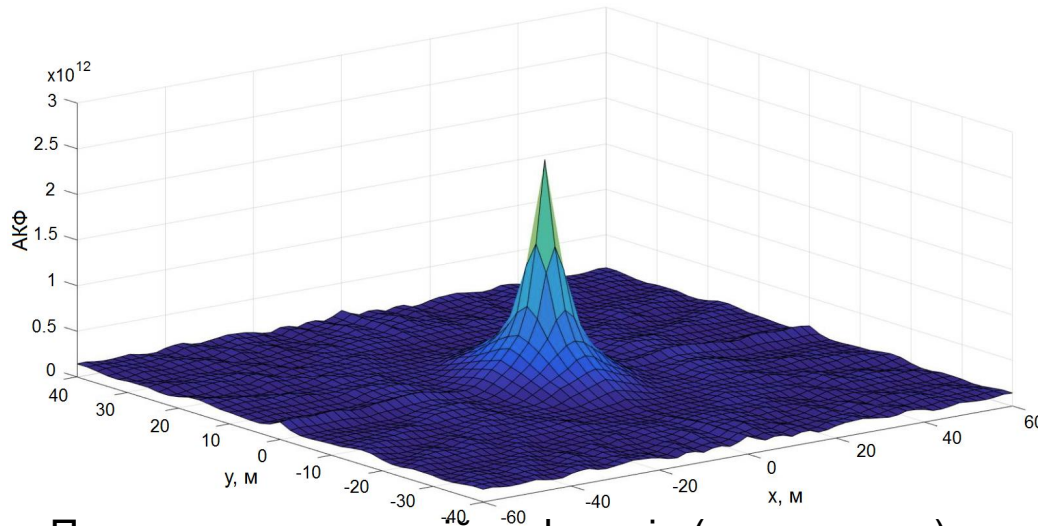
Сигнали в системі обробки



Реалізації сигналу БПЛА без шуму,
виділеного сигналу і шуму

Рисунок А.9 – Слайд "Сигнали в системі обробки"

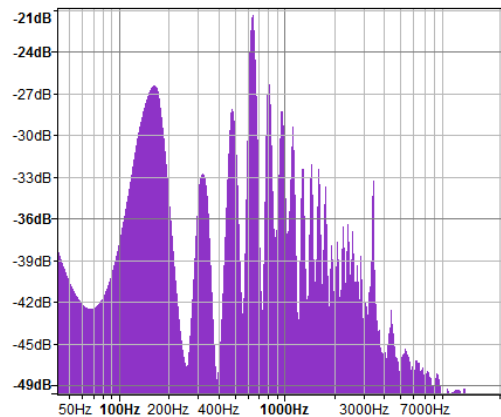
Оцінка просторової роздільної здатності



Просторова кореляційна функція (повна смуга)

Для визначення роздільної здатності системи було отримано переріз кореляційної функції за рівнем 0,707.

Роздільна здатність 5,6 м



Спектр сигналу БПЛА

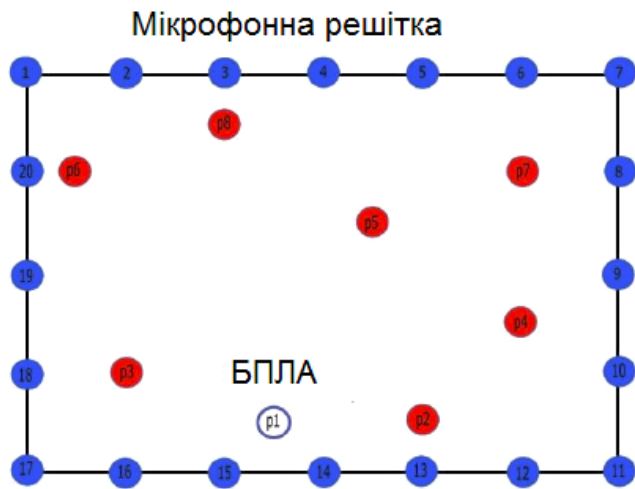
При обмеженні смуги частот системи до 4 кГц просторова роздільна здатність системи покращується.

В нашому експерименті вона склала 4,8 м.

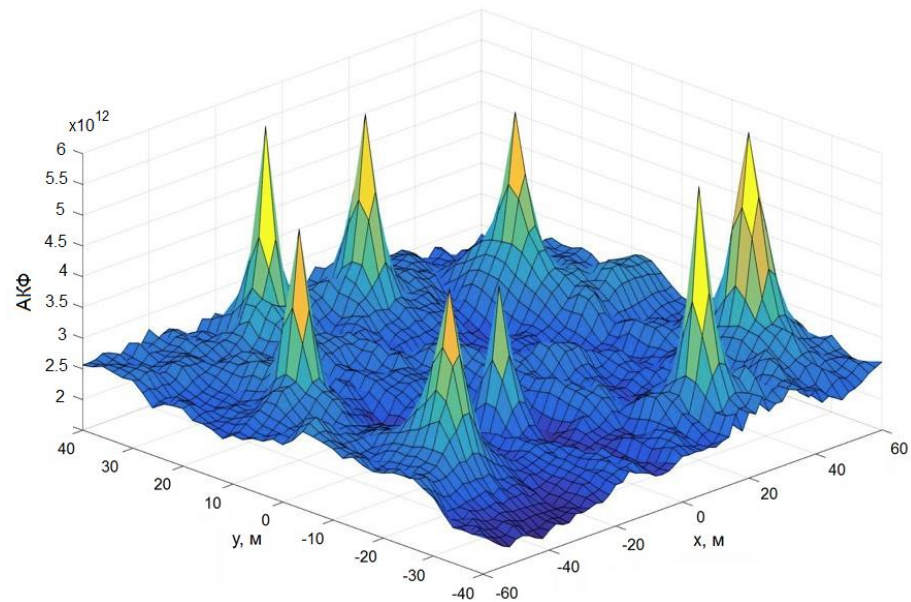
Можна очікувати, що таке обмеження смуги також позитивно скажеться на відношенні сигнал-перешкода.

Рисунок А.10 – Слайд "Оцінка просторової роздільної здатності"

Визначення координат джерел



Взаємне розташування 8 акустичних джерел і решітки з 20 мікрофонів



Просторова кореляційна функція

Координати восьми акустичних джерел

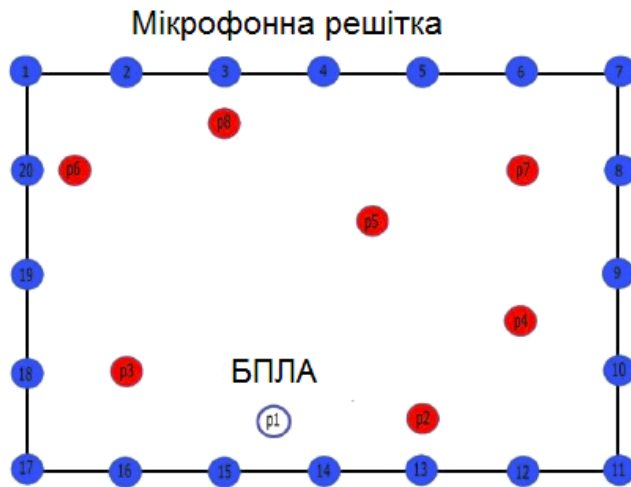
Номер джерела							
1	2	3	4	5	6	7	8
x1 = -10	x2 = 20	x3 = -40	x4 = 40	x5 = 10	x6 = -50	x7 = 40	x8 = -20
y1 = -30	y2 = -30	y3 = -20	y4 = -10	y5 = 10	y6 = 20	y7 = 20	y8 = 30

Рисунок А.11 – Слайд "Визначення координат джерел"

Розрахунок оптимальних вагових коефіцієнтів

Результати розрахунку вагових коефіцієнтів для 20 мікрофонів

$w1$	0,04761	$w6$	0,03294	$w11$	0,00664	$w16$	0,15032
$w2$	0,00004	$w7$	0,12427	$w12$	0,17115	$w17$	0,06687
$w3$	0,11972	$w8$	0,03599	$w13$	0,20674	$w18$	0,20680
$w4$	0,12166	$w9$	0,04965	$w14$	0,48802	$w19$	0,17697
$w5$	0,22382	$w10$	0,12916	$w15$	0,68042	$w20$	0,08472



Взаємне розташування 8 акустичних джерел і решітки з 20 мікрофонів

Відношення сигнал/перешкода

Назва алгоритму	Відношення сигнал/перешкода, рази
Один мікрофон	0,15
Просторова фільтрація з введенням часових затримок	1,98
Введення вагових коефіцієнтів	6,64

Рисунок А.12 – Слайд "Розрахунок оптимальних вагових коефіцієнтів"

Висновки

1. Виграш на етапі введення затримок в канали для дослідженого випадку склав 11,2 дБ по відношенню до запису акустичної обстановки одним мікрофоном.
2. Подальше застосування вагових коефіцієнтів збільшує виграш до 16,5 дБ.
3. Ефективність дослідженого в роботі алгоритму залежить від кількості мікрофонів у решітці, кількості одночасно працюючих джерел завад та їх взаємного розташування у просторі.
4. Проведені дослідження свідчать про можливе досягнення виграшу у відношенні сигнал/перешкода приблизно в N разів, де N – число мікрофонів в решітці.

Рисунок А.13 – Слайд "Висновки"

