

ДОДАТОК А  
ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

## Методи виявлення БПЛА

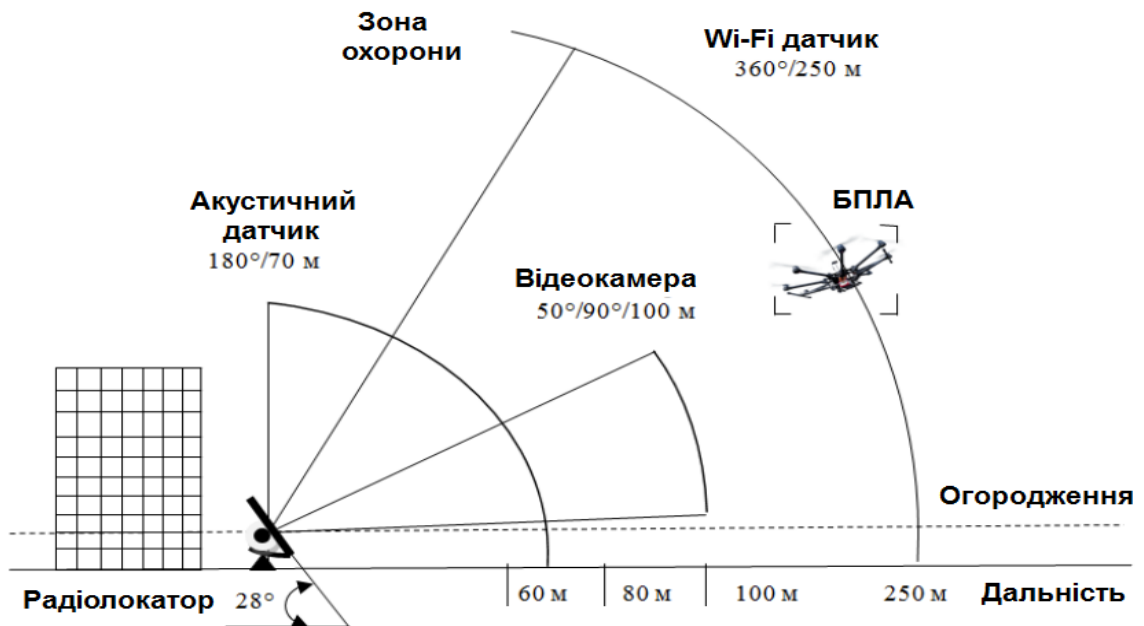


Рисунок А.1 – Слайд «Методи виявлення БПЛА»

## Постановка задачі

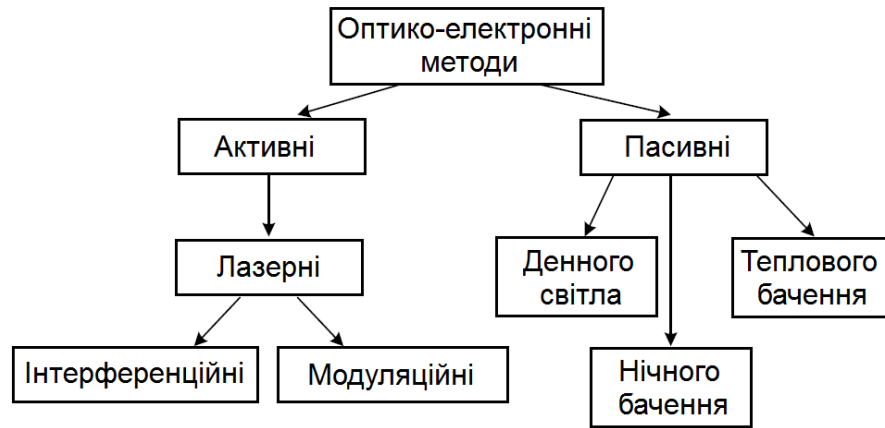
*Об'єкт дослідження* – Процеси приймання і обробки сигналів оптичного діапазону для задачі визначення дальності до безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

*Мета дослідження* – Отримання теоретичних і експериментальних числових оцінок похибок похибок вимірювання координат малих БПЛА в оптичному каналі системи виявлення при різних варіантах його реалізації.

*Методи дослідження* – Теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, обробка персональних даних.

Рисунок А.2 – Слайд «Постановка задачі»

## Класифікація оптичних методів вимірювання дальності



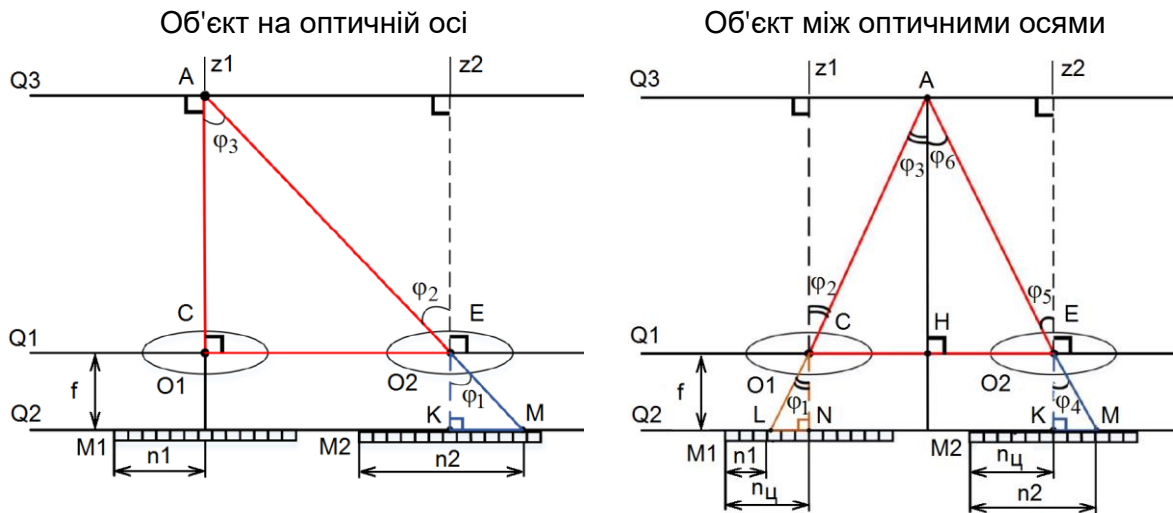
Для вирішуваної задачі найкраще підходять **пасивні двокамерні методи**.

*Активні методи* потребують застосування потужних лазерів (дорого, не скрито, небезпечно).

*Однокамерні пасивні методи* повинні оперувати серією кадрів, зроблених в різних положеннях камери (не підходить для рухомих об'єктів).

Рисунок А.3 – Слайд «Класифікація оптичних методів вимірювання дальності»

## Стереоскопічний метод вимірювання дальності



Відстань до об'єкта, яку потрібно виміряти

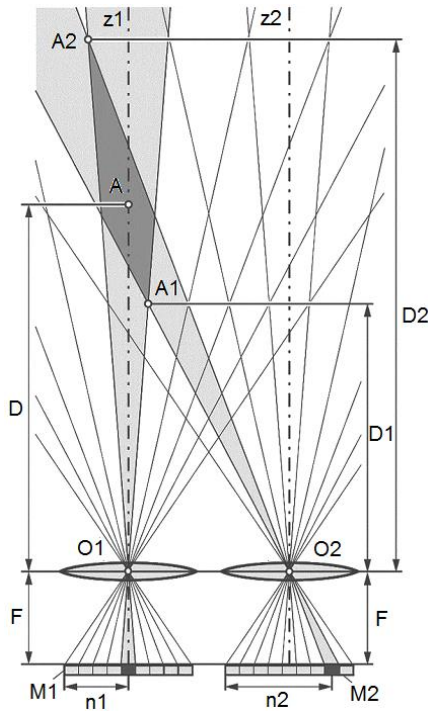
$$D = \frac{B \cdot F}{l_p \cdot (n_2 - n_1)}$$

$B$  – стереобаза, відстань між оптичними осями,  
 $F$  – фокусна відстань камери,  
 $l_p$  – крок пікселів світлочутливої матриці.

Рисунок А.4 – Слайд «Стереоскопічний метод вимірювання дальності»

## Теоретичні оцінки потенційних похибок вимірювання

Модель системи СВС



$$D_1 = \frac{BF}{(l_p \cdot n_1 - 0,5 \cdot l_p) - (l_p \cdot n_2 + 0,5 \cdot l_p)}$$

$$D_2 = \frac{BF}{(l_p \cdot n_1 + 0,5 \cdot l_p) - (l_p \cdot n_2 - 0,5 \cdot l_p)}$$

$$\Delta D = \pm 0,5(D_2 - D_1)$$

$$\Delta D = \pm \frac{FB l_p D^2}{B^2 F^2 - l_p D^2}$$

Величина помилки  $\Delta D$  визначення дальності буде зростати зі збільшенням дальності  $D$  і розміру пікселів  $l_p$  світлочутливої матриці і зменшуватися зі збільшенням стереобазиса  $B$  і фокусної відстані  $F$ .

Рисунок А.5 – Слайд «Теоретичні оцінки потенційних похибок вимірювання»

## Результати оцінки потенційних похибок вимірювання

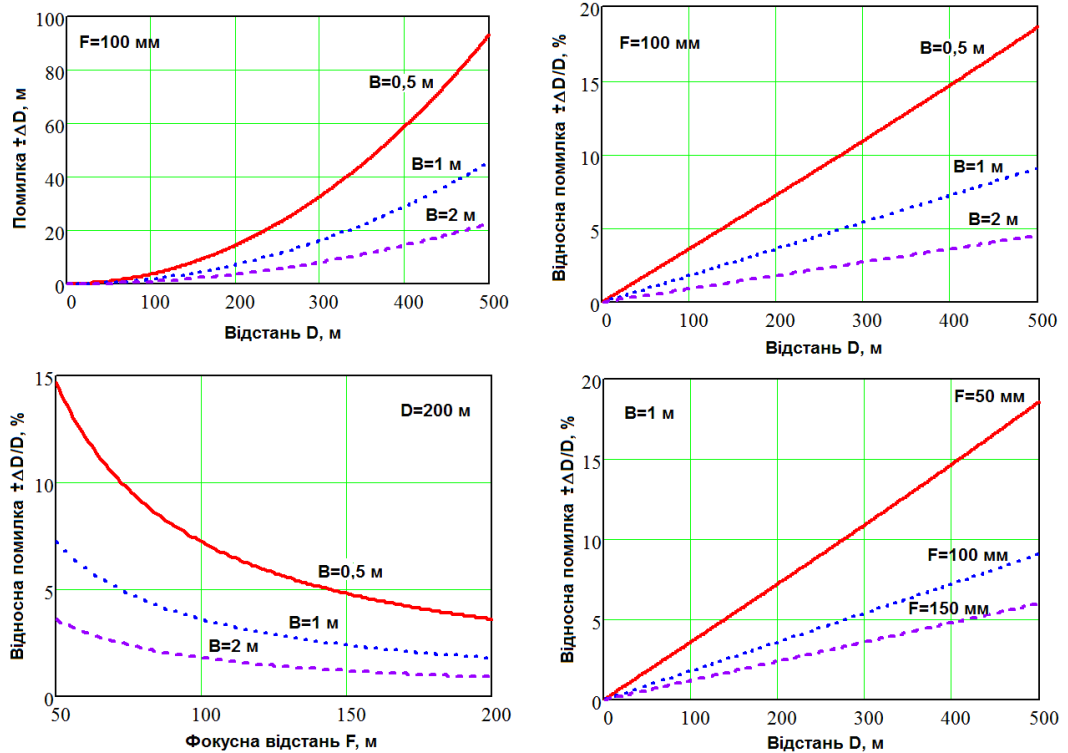
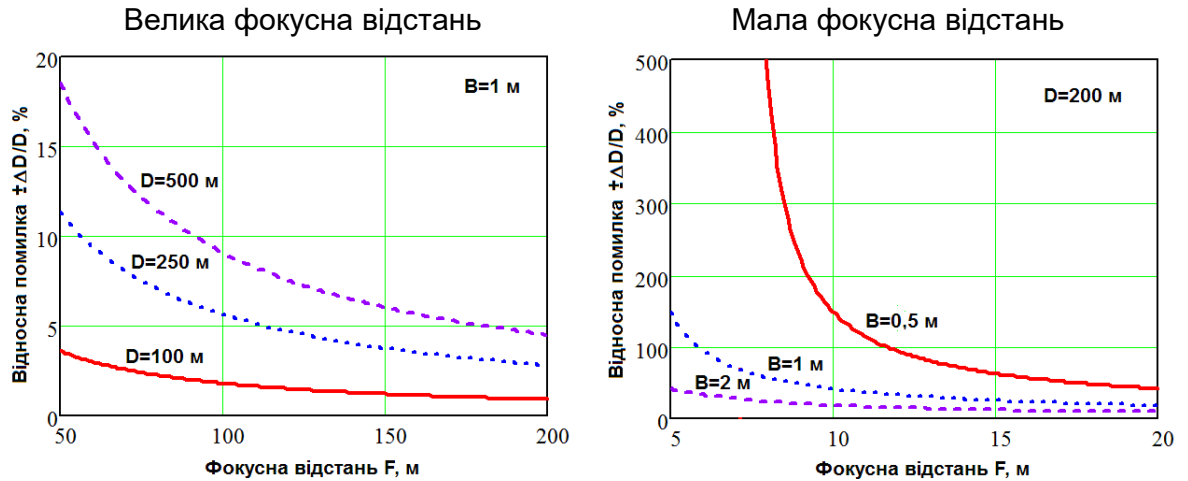


Рисунок А.6 – Слайд «Результати оцінки потенційних похибок вимірювання»

## Неправильний вибір параметрів системи

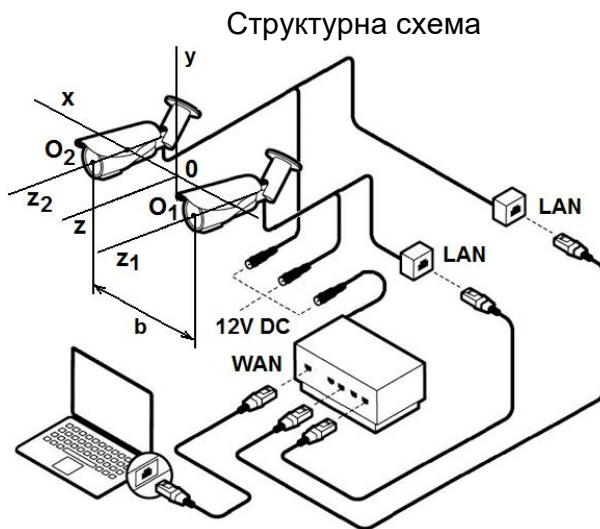


При намаганні отримати широкий кут огляду системи шляхом зменшення фокусної відстані об'єктивів при незмінній роздільній здатності матриць можна спостерігати різке зростання помилки вимірювання при  $F < 10$  мм.

Це слід враховувати при проектуванні систем виявлення БПЛА.

Рисунок А.7 – Слайд «Неправильний вибір параметрів системи»

## Експериментальна установка стереовідеоспостереження



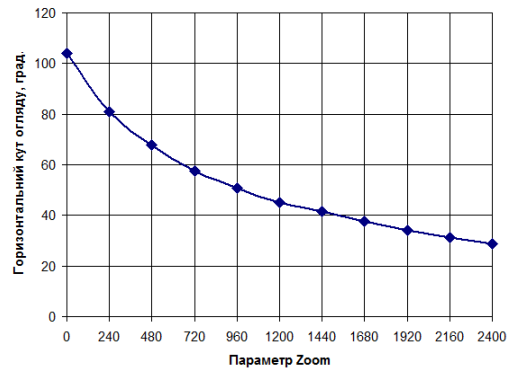
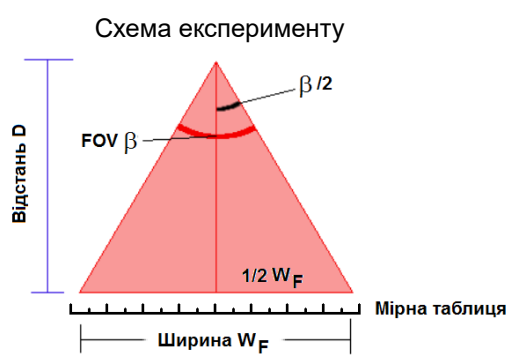
2 IP камери Dahua DH-IPC-HFW2431RP-ZAS-IRE6

- Роздільна здатність 2688 x 1520
- Діагональ матриці (1/3")
- Фокусна відстань 2,7...13,5 мм

Стереобаза B=1 м

Рисунок А.8 – Слайд «Експериментальна установка стереовідеоспостереження»

## Калібрівка фокусної відстані



Горизонтальний кут огляду (FOV)

$$\beta = 2 \arctan\left(\frac{D}{2W_F}\right)$$

Фокусна відстань

$$F = D \frac{W_F}{W}$$

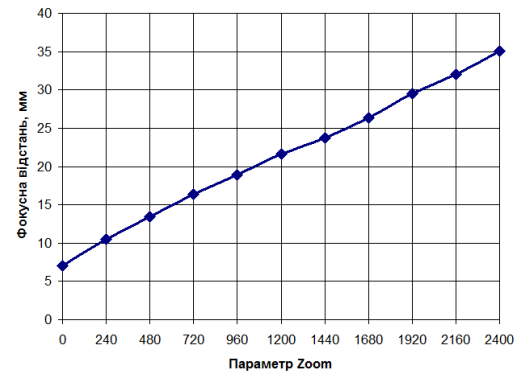


Рисунок А.9 – Слайд «Калібрівка фокусної відстані»

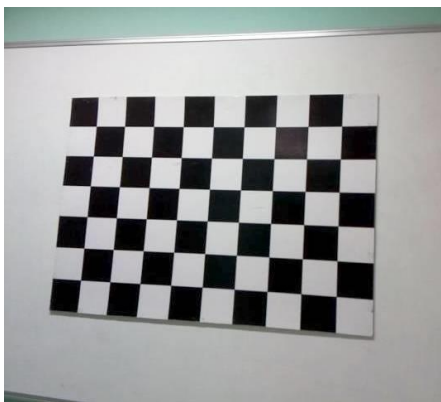
## Калібрівка стереоскопічної системи

Внутрішні параметри:

$$C = \begin{bmatrix} F/w_x & 0 & u_0 \\ 0 & F/w_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де  $w_x$  і  $w_y$  – крок пікселів уздовж осей  $x$  і  $y$ ;  
 $u_0$  і  $v_0$  – координати головної точки.

Калібрувальна таблиця



Зовнішні параметри:

$$R = R_\alpha \cdot R_\beta \cdot R_\gamma, \quad t = (t_x, t_y, t_z)^T,$$

де  $R_\alpha, R_\beta, R_\gamma$  – матриці повороту навколо осей  $x, y, z$   
на кути  $\alpha, \beta, \gamma$ ;

$t_x, t_y, t_z$  – значення перенесення вздовж осей  $x, y, z$ ;

$T$  – знак транспонування.

Розмір таблиці 1 м х 0,7 м  
дозволяє робити калібрувальні знімки  
на відстані 1 м і більше.  
При цьому таблиця повністю потрапляє  
в кадр при горизонтальному куті поля  
зору 60 град. і знаходиться далі, ніж  
ближня межа зони різкості.

Рисунок А.10 – Слайд «Калібрівка стереоскопічної системи»

## Результати калібровки стереопари

Знайдені калібрувальні точки



Візуалізація процесу калібрування

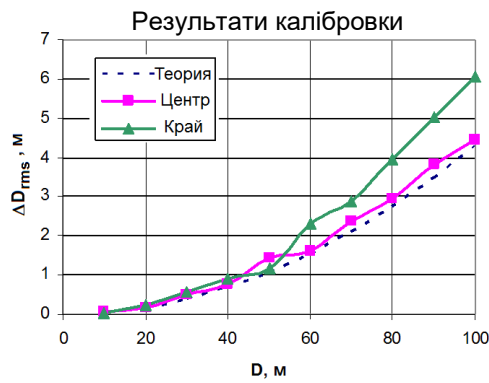
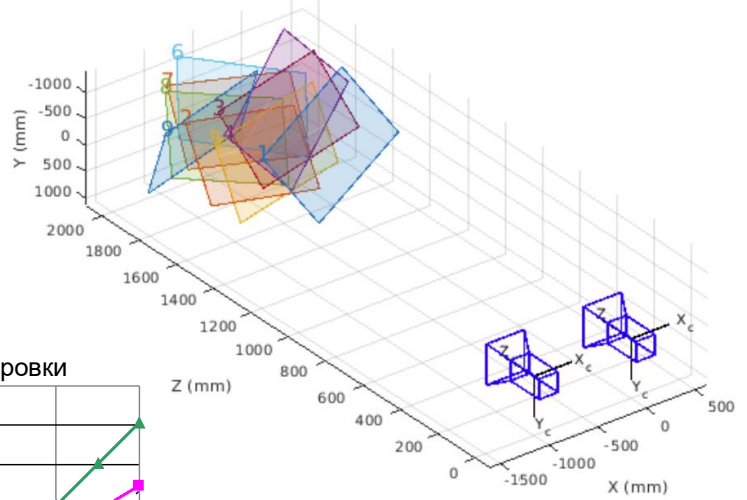
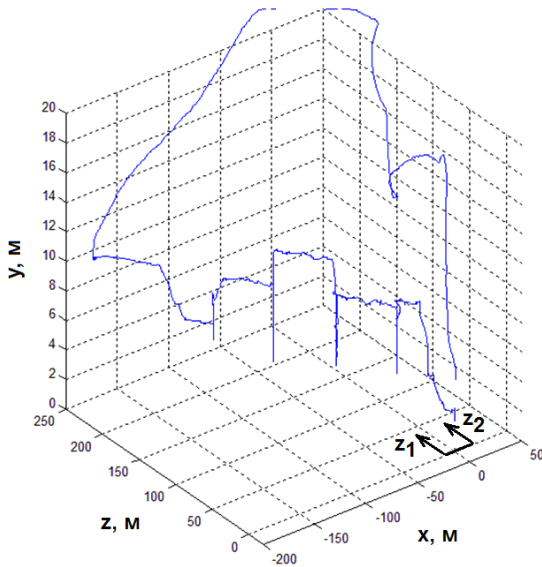


Рисунок А.11 – Слайд «Результати калібровки стереопари»

## Логи GPS польота БПЛА

Трек 1



Трек 2

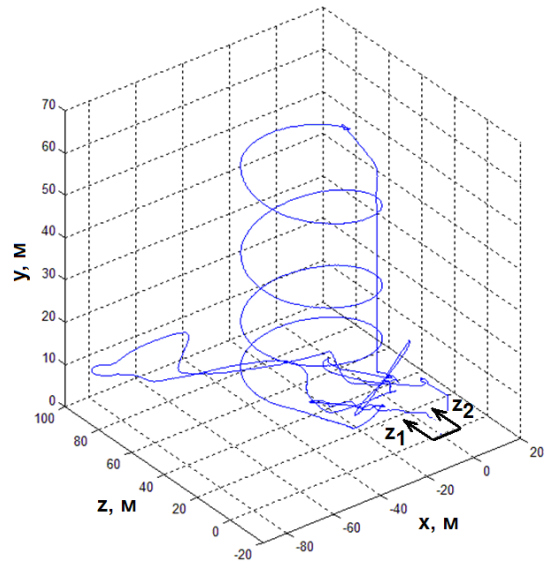
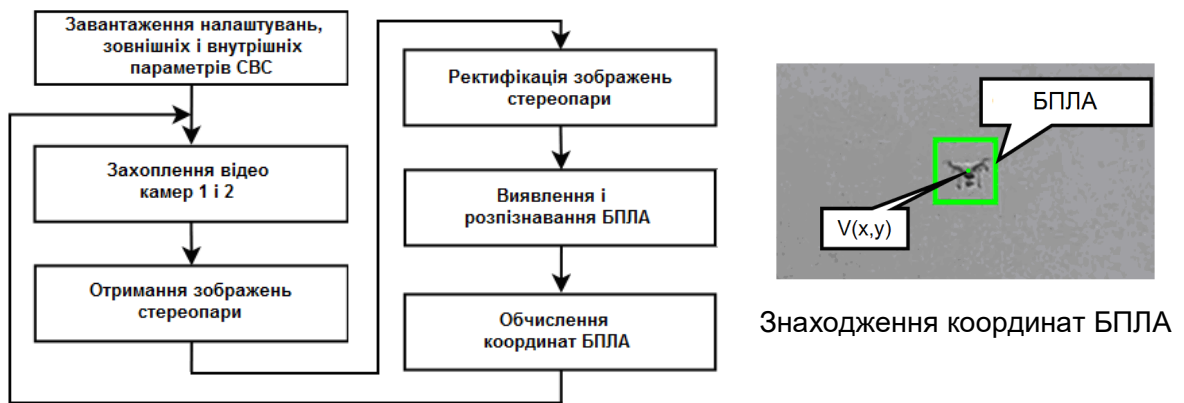


Рисунок А.12 – Слайд «Логи GPS польота БПЛА»

## Алгоритм обробки зображень



Азимут і кут місця БПЛА обчислювалися як

$$\varphi_{az} = \frac{\beta \cdot x}{N_x}, \quad \varphi_{el} = \frac{\beta \cdot y}{k \cdot N_y},$$

де  $N_x$ ,  $N_y$  – роздільні здатності камери по горизонталі і вертикалі,  
 $k$  – формат кадру (16/9).

Рисунок А.13 – Слайд «Алгоритм обробки зображень»

## Результати вимірювання координат БПЛА

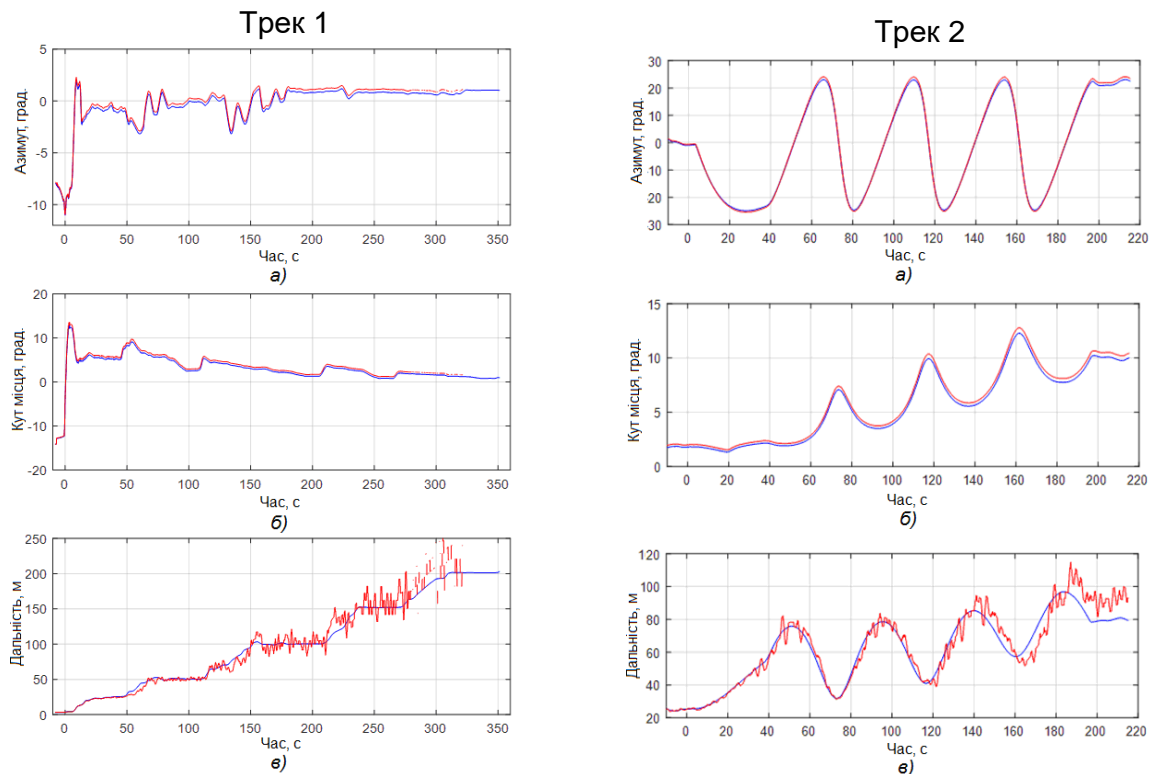


Рисунок А.14 – Слайд «Результати вимірювання координат БПЛА»

## Висновки

1. Основний внесок в похибку визначення координат БПЛА належить вимірюванням дальності. Вимірювання азимута і кута місця досить точні при високій роздільній здатності камер і ретельній компенсації їх спотворень.
2. Ефективним шляхом для збільшення точності вимірювання дальності, а також збільшення дальності виявлення об'єкта, є збільшення роздільної здатності камер. Однак збільшення чіткості зображення в 2 рази призводить до збільшення обчислювальної складності в 4 рази.
3. Зменшення куту огляду камер при інших рівних умовах збільшує роздільну здатність по азимуту куту місця і дальності. Зменшення поля зору системи при цьому необхідно компенсувати введенням просторового механіко-електричного сканування.
4. Визначення сполучених точок як координат центрів областей, виділених на етапі виявлення і розпізнавання БПЛА, дає недостатньо хороший результат на малих відстанях від об'єкту. Вбачається доцільним уточнювати місце розташування сполучених точок кореляційним методом.
5. Точність калібрування істотно впливає на результат вимірювання дальності. Потрібно використовувати таблиці з якомога найбільшим числом калібрувальних точок, в процесі калібрування різні положення таблиці повинні заповнювати якомога більшу частину робочої області стереозору, а її зображення – якомога більшу площу кадру.
6. З метою зменшення максимальних помилок доцільно проводити усереднення в часі результатів вимірювань дальності з урахуванням радіальної швидкості переміщення БПЛА.

Рисунок А.15 – Слайд «Висновки»



