

ДОДАТОК А
ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

Методи моніторингу та 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 – Методи моніторингу та виявлення БПЛА

Постановка задачі

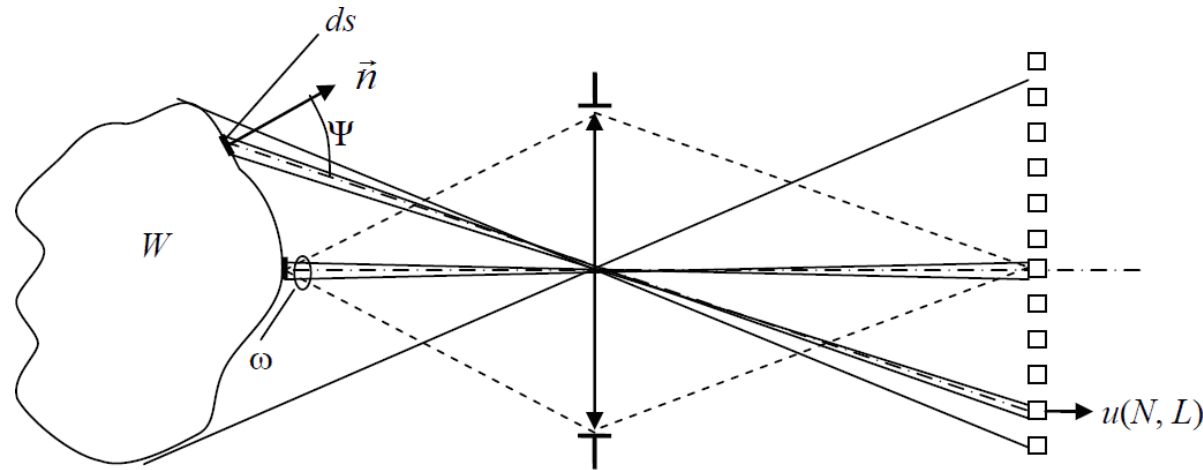
Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки сигналів в тепловізійному каналі для задач виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів.

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів в тепловізійному каналі з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

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

Рисунок А.2 – Постановка задачі

Принцип дії і характеристики тепловізорів



W – світимість теплового випромінювання об'єкта спостереження;
 ω – передній апертурний кут оптичної системи тепловізора;
 ds – елемент поверхні об'єкта спостереження, нормаль \vec{n} складає кут Ψ з напрямком спостереження;

$u(N, L)$ – величина відеосигналу приймача випромінювання;
 N – номер рядка елемента зображення;
 L – номер елемента у рядку тепловізійного кадру.

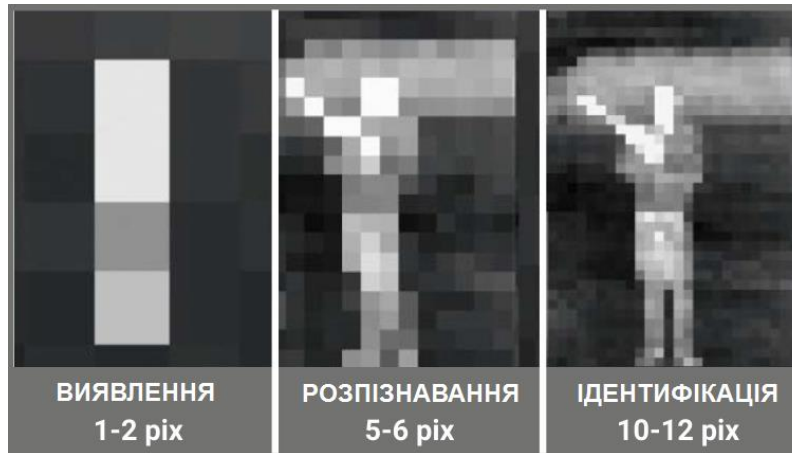
Параметри сучасних тепловізорів прямого бачення (FLIR)

- чутливість - мінімальний температурний контраст (<50 мК),
- просторове розрізнення (до 1920 x 1080 і навіть вище),
- частота кадрів (25 к/с і вище).

Рисунок А.3 – Принцип дії і характеристики тепловізорів

Критерій виявлення

Визначення рівнів розрізнення за Джонсоном



Рівень розрізнення	Опис
Виявлення	Об'єкт присутній.
Орієнтація	Розрізняється симетричність чи асиметричність об'єкта та його орієнтація – вертикальна або горизонтальна.
Розпізнавання	Визначається клас об'єкта – будинок, людина, автомобіль і т.д.
Ідентифікація	Об'єкт може бути описаний у межах знань спостерігача. тип будівлі (будинок, гараж, склад), тип автомобіля (вантажівка, легковий, пікап), що за людина (чоловік/жінка, військовий/цивільний).

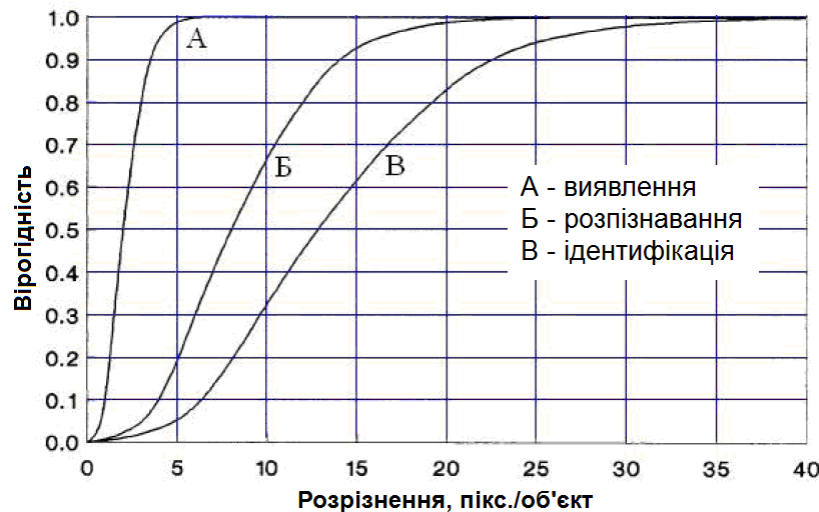
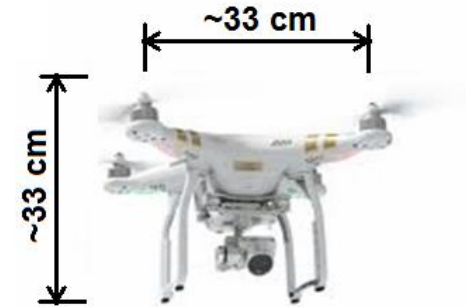
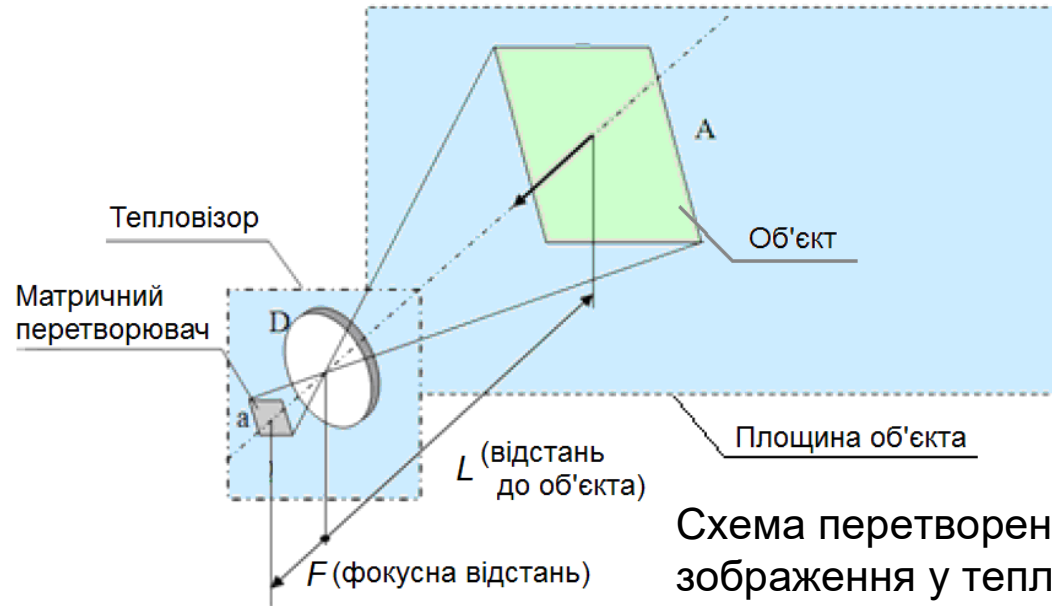


Рисунок А.4 – Критерій виявлення

В нашому випадку достатньо двох ключових рівнів:

- 1 – виявлення об'єкта в зоні спостереження, д
- 2 – розпізнавання класу об'єкту.

Розрахунок дальності дії тепловізора



Дрон DJI Phantom 3

Схема перетворення зображення у тепловізорі

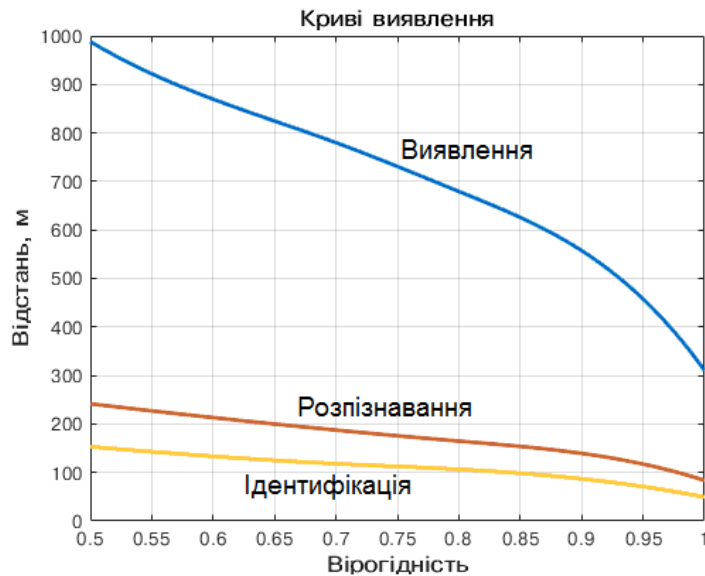
$$L = \frac{FW}{Na}$$

де L – гранична дальність розрізнення,
 F – фокусна відстань об'єктива,
 W – критичний розмір цілі,
 N – значення критерію Джонсона,
 a – розмір одиничного елемента зображення (розмір пікселя сенсора).

Рисунок А.5 – Розрахунок дальності дії тепловізора

Результати розрахунку дальності

№	Параметри системи		Дальність, м		
	F, мм	a, мкм	виявлення	розпізнавання	ідентифікація
1	25	25	168	81	23
2	50	25	337	161	46
3	75	25	505	242	68
4	100	25	673	323	91
5	150	25	1010	484	137
6	25	17	248	119	34
7	50	17	495	237	67
8	75	17	743	356	101
9	100	17	990	475	134
10	150	17	1486	712	201



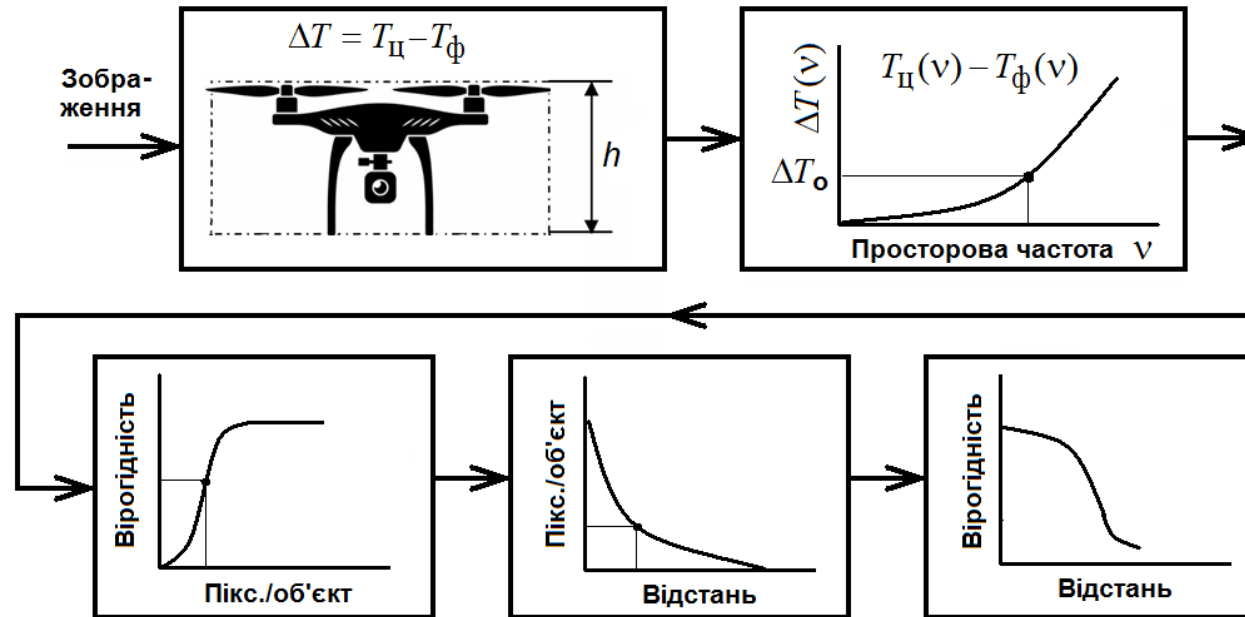
Криві виявлення для інших значень фокусної відстані F і розміру елемента матриці a можна отримати, помноживши отримані графіки на коефіцієнт пропорційності

$$K = \frac{Fa_1}{F_1a},$$

де $F_1 = 100$ мм і $a_1 = 17$ мкм.

Рисунок А.6 – Результати розрахунку дальності

Врахування характеристик об'єкту і фону



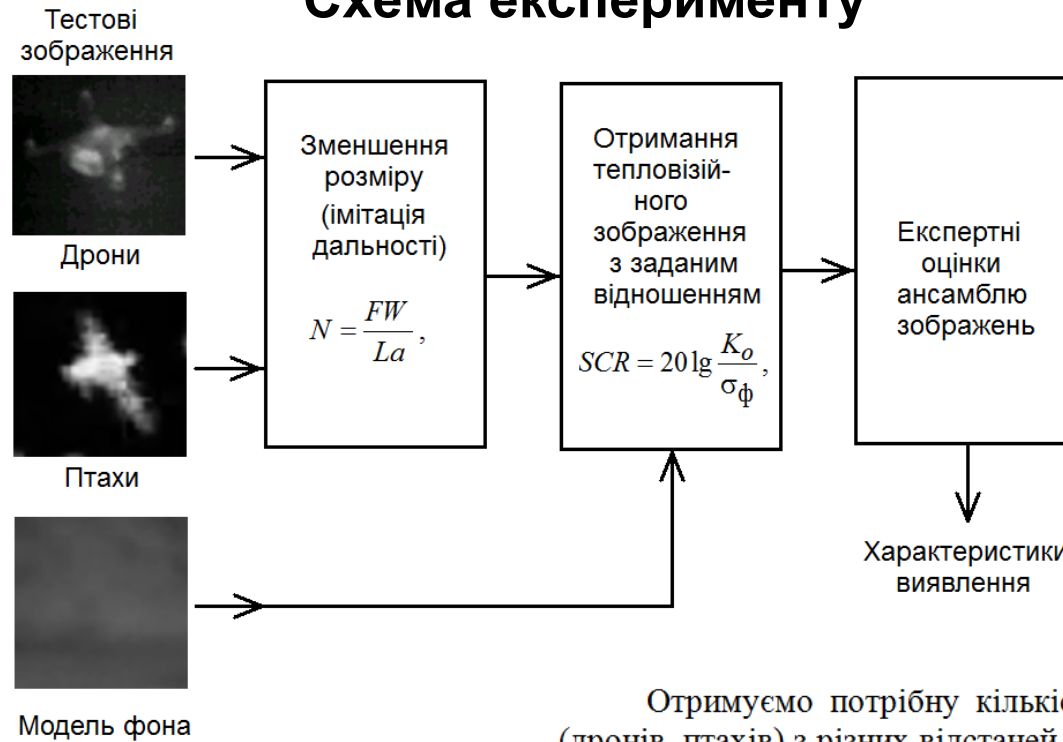
1. Визначається ефективна різниця температур цілі $T_{\text{ц}}$ та фону $T_{\text{ф}}$ та розмір цілі h .
2. Обчислюється мінімальна розрізнявана просторова частота ν системи спостереження, як функція різниці температур об'єкта та фону

$$\Delta T(\nu) = T_{\text{ц}}(\nu) - T_{\text{ф}}(\nu).$$

3. На підставі емпіричної залежності ймовірності розрізнення цілі від роздільної здатності на мінімальний розмір цілі за заданим значенням ймовірності визначається необхідна роздільна здатність.
4. Отримане значення необхідного розрізнення накладається на розрахункову залежність розрізнення від дистанції до цілі, цим визначається гранична дистанція розрізнення цілі.

Рисунок А.7 – Врахування характеристик об'єкту і фону

Схема експерименту



Зменшення розміру зображення (імітація дальності)

$$N = \frac{FW}{La},$$

де L – дальність до об'єкту,
 F – фокусна відстань об'єктива,
 W – фізичний розмір об'єкта,
 N – розмір зображення об'єкта,
 a – фізичний розмір елемента сенсора.

Отримуємо потрібну кількість зображень об'єктів (дронів, птахів) з різних відстаней і з різними значеннями відношення сигнал/нерівномірність фону (SCR – signal to clutter ratio):

$$SCR = 20 \lg \frac{K_o}{\sigma_\phi},$$

де $K_o = L_o / \bar{L}_\phi$ – контраст яскравості об'єкта L_o з середньою яскравістю фону \bar{L}_ϕ ;
 σ_ϕ – СКВ нерівномірності фону.

Рисунок А.8 – Схема експерименту

Отримання тепловізійних зображень

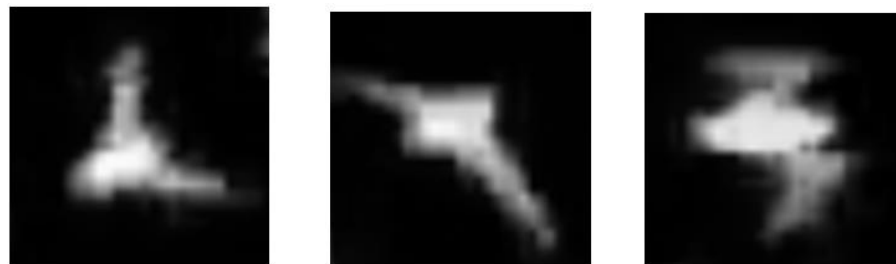


Тепловізор FLIR TG167

Характеристики:
-матриця 80 x 60,
-кут огляду 25° x 19.6°,
-чутливість 150 мК,
-просторова роздільна
здатність 5,6 мрад (0,32°).



Характерні тепловізійні зображення дрону



Характерні тестові тепловізійні зображення птахів

Рисунок А.9 – Отримання тепловізійних зображень

Формування моделі фону

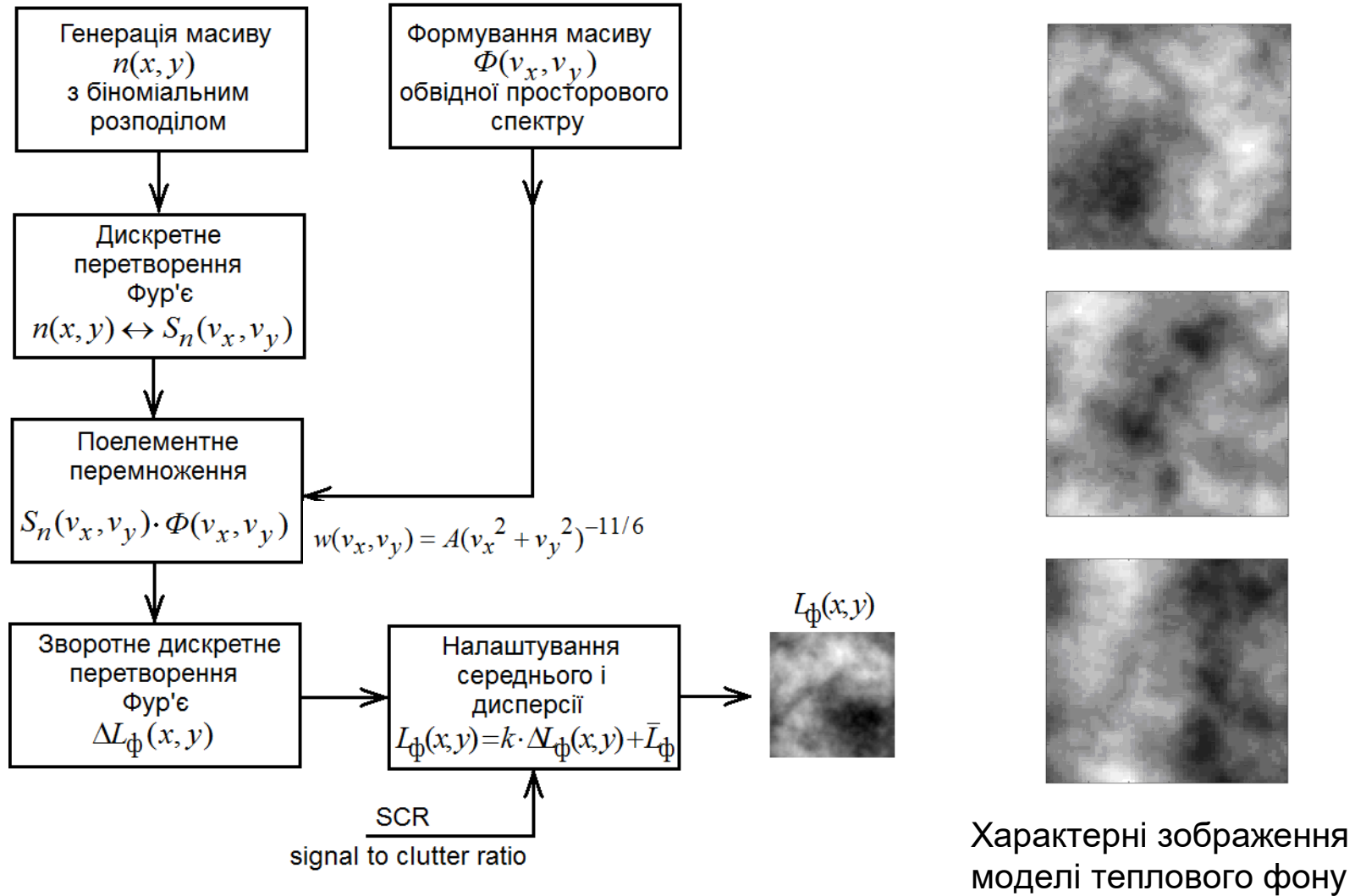


Рисунок А.10 – Формування моделі фону

Експертна оцінка характеристик виявлення

1. Кількість експертів – 10.
2. Кожному демонструвалося 100 тестових зображень для різних відношень сигнал-фон.
3. 50 зображень – дрони, 50 – птахи. Послідовність – випадкова.
4. Для формування узагальненої оцінки використовувалися середні величини.

Збільшення відстані виявлення

Ймовірність виявлення	Нерівномірність		
	низька (SCR=10)	середня (SCR=3)	висока (SCR=1)
1,0	2,992	4,928	-
0,95	1,76	3,344	-
0,9	1,584	2,992	12,32
0,8	1,32	2,288	8,8
0,5	1,08	1,76	4,4

Збільшення відстані розпізнавання

Ймовірність розпізнавання	Нерівномірність		
	низька (SCR=10)	середня (SCR=3)	висока (SCR=1)
1,0	3,791	6,244	-
0,95	2,23	4,237	-
0,9	2,007	3,791	15,61
0,8	1,6725	2,899	11,15
0,5	1,115	2,23	5,575

Дальність з забезпеченням **50%-ної ймовірності виявлення** цілі в залежності від властивостей фону змінюється в 4 рази – від 1,08 до 4,4. Для **90%-ної ймовірності дальність виявлення** змінюється майже у 8 разів. Більш високої ймовірності виявлення цілі в умовах сильно нерівномірного фону досягти взагалі виявилось неможливо.

Дальність з забезпеченням **50%-ної ймовірності розрізнення** цілі в залежності від властивостей фону змінюється в 5 разів – від 1,11 до 5,57. Для **90%-ної ймовірності дальність розрізнення** змінюється майже на порядок.

Рисунок А.11 – Експертна оцінка характеристик виявлення

Висновки

1. В реальних умовах можливість виявлення дронів в тепловізійному каналі суттєво залежить від нерівномірності теплового контрасту фону.

2. Уточнити отримані результати можна з використанням замість моделі теплового фону реальних тепловізійних зображень атмосферних утворень. 3. Також слід провести оцінки з розпізнаванням сигналів нейронною мережею.

4. Для глибокого навчання нейронної мережі потрібно мати декілька тисяч тепловізійних зображень дронів та інших класів об'єктів.

5. Слід зазначити, що головним шляхом для підвищення дальності виявлення дронів в тепловізійному каналі є не підняття чутливості тракту (її і так достатньо), а підвищення просторової роздільної здатності системи за рахунок застосування матричних перетворювачів з меншим розміром елементів і об'єктивів з більшою фокусною відстанню.

Рисунок А.12 – Висновки

