

# РАДІОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.396.96

І.Н. Прудіус, Л.В. Лазько, С.О. Семенов  
Національний університет “Львівська політехніка”

## БАГАТОРІВНЕВЕ КОМПЛЕКСУВАННЯ ГРАФІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

© Прудіус І.Н., Лазько Л.В., Семенов С.О., 2008

**Представлено вдосконалений метод багаторівневого оброблення графічної інформації, отриманої за допомогою дистанційного супутникового зондування. Метод містить три рівні оброблення: на основі даних, ознак та рішень. Показано переваги, які забезпечує кожний із рівнів оброблення, здійснено аналіз шляхів можливого покращання ефективності оброблення інформації на кожному із рівнів та подано результат сумісного їх застосування.**

**In present paper there is presented an enhanced method of multilevel processing of graphical information, obtained with satellite remote sensing. The method contains three stages of processing: data level, feature level and decision level. There are shown an advantages, which are being introduced by each level, made an analysis of possible ways to improve effectiveness of each level and presented the result of their joint application.**

### Вступ

Завдання ефективного оброблення графічної інформації, отриманої за допомогою дистанційного зондування, сьогодні є одним із найактуальніших. Із появою супутникових систем дистанційного зондування [1], що здатні забезпечити безперервний моніторинг земної поверхні, забезпечуючи високу роздільну здатність та адаптивність сенсорів до різних видів наземних покривів, попит на використання інформації таких систем з'явився чи не у кожній галузі народного господарства [2], зокрема у сільському господарстві, лісництві, земельному господарстві, картографії, геології, гідрології тощо.

Оскільки практично усі сучасні системи дистанційного зондування містять багато сенсорів, що працюють в різних спектральних діапазонах [1], завдання оброблення інформації переважно носить характер комплексування даних різних спектральних каналів, з метою підвищення завадозахищеності системи загалом та поєднання переваг кожного із каналів. Більшість існуючих методів комплексування інформації переважно використовують один із таких рівнів комплексування [3]: на основі даних (пікселів), на основі ознак чи на основі рішень. Запропонований багаторівневий метод [4] передбачає сумісне використання всіх трьох рівнів комплексування, маючи на меті поєднання переваг кожного із спектральних каналів та поєднання переваг кожного із рівнів комплексування.

Ефективність багаторівневого оброблення інформації напряму залежить від точності оброблення на кожному із складових рівнів, тому основну увагу у цій роботі було зосереджено саме на цьому.

### Вхідні дані та постановка задачі

Як вхідні зображення для оброблення були використані зображення 1–5 спектральних каналів супутника Landsat 7 ETM+ [5], після застосування першого етапу оброблення [6], який включає корегування геометричних спотворень, калібрування та повторну дискретизацію даних.

Сцена, що відтворюється на зображеннях (рис. 1), являє собою частину Парижа, де протікає ріка Сена, виділення карти якої і є головним завданням, поставленим перед багаторівневим методом у цьому випадку.

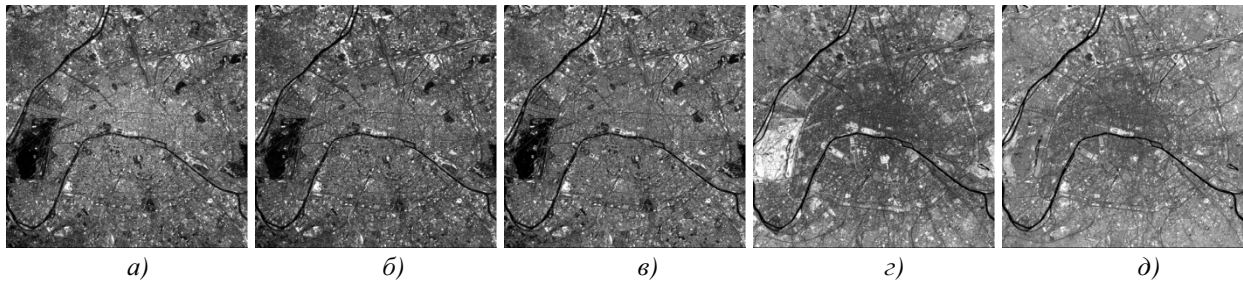


Рис. 1. Landsat 7 ETM+ канали: а – канал 1 (синій); б – канал 2 (зелений); в – канал 3 (червоний); г – канал 4 (ближній ІЧ); д – канал 5 (ІЧ)

### Критерії оцінки якості детектування шуканого об'єкта

Під час оброблення та аналізу зображень завжди необхідно задаватися питанням про їх якість. Якість оцінюється різними способами і залежно від різноманітних задач [7]. Інколи якість розглядається як характеристика самого зображення і визначається його власними властивостями (статистичними, структурними, семантичними). Інший підхід передбачає розгляд якості як міри наближення двох зображень: реального та деякого ідеального, чи вихідного і перетвореного. Такий підхід є конструктивнішим, оскільки дає змогу оцінювати кількісні зміни у зображенні, тому використовується значно частіше. Характерними прикладами критеріїв оцінки показників якості зображень є такі: критерій візуального сприйняття, середньоквадратичний критерій, критерій максимальної помилки (рівномірного наближення), ймовірно-зональний критерій, критерій просторової роздільної здатності тощо.

У нашому випадку, оцінка результатів детекції проводитиметься порівнянням карти розташування шуканого об'єкта з результатами роботи методу, розрахунком ймовірностей пропуску цілі і хибної тривоги [8] як основних критеріїв відповідності отриманого зображення оригіналу.

$$P_{tm} = \bigcup P_{river\_det} / \bigcup P_{river\_real} ;$$

$$P_{fa} = \bigcup P_{non-river\_det} / \bigcup P_{non-river\_real} ,$$

де  $P_{tm}$ ,  $P_{fa}$  – ймовірності пропуску цілі та хибної тривоги відповідно;  $\bigcup P_{river\_det}$  – сукупність пікселів, що належать шуканому об'єкту (річці) у продетектованому зображенні;  $\bigcup P_{river\_real}$  – сукупність пікселів, що належать шуканому об'єкту у реальному зображенні;  $\bigcup P_{non-river\_det}$  – сукупність пікселів, що не належать шуканому об'єкту у продетектованому зображенні;  $\bigcup P_{non-river\_real}$  – сукупність пікселів, що не належать шуканому об'єкту у реальному зображенні.

### Комплексування на рівні даних

Комплексування на рівні даних (пікселів) характеризується найвищими обчислювальними витратами, оскільки використовує дані від усіх сенсорів, що уможливорює забезпечити найкращі результати. Розглядаючи умову відсутності втрат під час приймання, якість комплексування даних на цьому рівні істотно залежить від застосовуваних методів подальшого оброблення.

Піксельне комплексування зображень окремих спектральних каналів здійснюємо так:

$$I(x, y) = \bigcup_i a_i(x, y) \cdot I_i(x, y), \quad (1)$$

де  $I_i(x, y)$  – інтенсивність піксела зображення  $i$ -го каналу залежно від просторових координат;  $a_i(x, y)$  – ваговий коефіцієнт для інтенсивності піксела зображення відповідного каналу;  $I(x, y)$  – результат комплексування.

На цьому етапі виникає проблема вибору оптимальної методики для підбору вагових коефіцієнтів для зображень кожного спектрального каналу, з метою чого здійснюємо дослідження таких способів підбору вагових коефіцієнтів:

1) використання однакових вагових коефіцієнтів для кожного каналу, що виглядає так:

$$I = \bigcup_i a_i I_i, \quad (2)$$

причому

$$a_i = \frac{1}{N}, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість зображень, що комплексуються;

2) визначення вагових коефіцієнтів здійснюємо на основі проведення розрахунку взаємодкореляції пар зображень окремих каналів як критерію їх подібності, формуючи матрицю коефіцієнтів взаємодкореляції із розмірами, що відповідають розмірам окремого зображення, забезпечуючи просторову відповідність отриманих коефіцієнтів окремим пікселам зображень, що комплексуються [9]:

$$R(x', y') = \int_{-\infty-\infty}^{\infty \infty} I_i(x, y) I_j(x + x', y + y') dx' y', \quad (4)$$

де  $I_i, I_j$  – зображення  $i$ -го та  $j$ -го каналів.

Оскільки взаємодкореляцію зображень здійснюватимемо на основі їх локальних особливостей, рухаючись «вікном» сталого розміру ( $w_x, w_y$ ) по кожному із зображень, коефіцієнт кореляції набуває такого вигляду:

$$R(x', y') = \int_{-w_x - w_y}^{w_x w_y} I_i(x, y) I_j(x + x', y + y') dx' y'. \quad (5)$$

Координати центра вікна подаємо величинами  $x_w$  та  $y_w$ . З врахуванням цього залежність коефіцієнта кореляції змінюється в такий спосіб:

$$R(x', y') \Rightarrow R(x', y', x_w, y_w); \quad (6)$$

$$R(x', y', x_w, y_w) = \int_{-w_x - w_y}^{w_x w_y} I_i(x_w, y_w) I_j(x_w + x', y_w + y') dx' y'. \quad (7)$$

Внаслідок цього ваговий коефіцієнт для комплексування пари каналів залежно від просторової координати окремого піксела визначатиметься на основі максимуму коефіцієнта взаємної кореляції пари зображень  $i$ -го та  $j$ -го каналів в межах «вікна» із центром в точці, що відповідає просторовим координатам відповідних комплексованих пікселів зображень окремих каналів. З метою зменшення обчислювальної складності, а відповідно і часу, необхідного для обрахунку взаємодкореляції, здійснюємо інтегрування в межах вікна, приймаючи зміщення стосовно його центра ( $x', y'$ ), що дорівнює нулю, і вважаючи, що максимум коефіцієнта кореляції знаходиться у центрі «вікна»:

$$\max_{x', y'} R(x', y', x_w, y_w) \Big|_{\substack{x'=0 \\ y'=0}} \rightarrow R_{ij}(x_w, y_w) = R_{ij}. \quad (8)$$

Комплексування зображень окремих каналів здійснюємо по одній із таких схем, приймаючи  $i$ -тий канал як базовий:

а) забезпечення максимальної інформативності зображення, який отримують внаслідок комплексування зображень групи каналів:

$$I(x, y) = I_i(x, y) + (1 - R_{ij}(x, y)) \cdot I_j(x, y); \quad (9)$$

б) забезпечення максимальної завадозахищеності зображення, яке отримують внаслідок комплексування зображень групи каналів, на основі зображення базового каналу:

$$I(x, y) = \frac{(N - R_{ij}(x, y)) \cdot I_i(x, y) + R_{ij}(x, y) \cdot I_j(x, y)}{N}. \quad (10)$$

Після проведення процедури комплексування кожне із комплексованих зображень проходить стадію кластеризації (сегментації) (виділення пікселів шуканого об'єкта) [10, 11, 12]:

$$D_i = \text{Cluster}(P_i), \quad (11)$$

де  $P_i$  – множина пікселів в  $i$ -му каналі;  $D_i$  – множина рішень, зроблених на основі  $P_i$ .

У нашому випадку сегментація проводиться бінаризацією напівтонових зображень по порозу інтенсивності, тобто всім пікселам зображення, значення інтенсивностей яких є вищими за певне порогове значення, присвоюється значення інтенсивності, що дорівнює одиниці, а пікселам, значення інтенсивностей яких опинилися нижче від порогового значення, присвоюється значення інтенсивності, що дорівнює нулю. Як результат, отримуємо карту шуканого об'єкта.

Наведемо числові та графічні результати, що були отримані на піксельному рівні комплексування.

Таблиця 1

**Результати детекції шуканого об'єкта на піксельному рівні**

Група каналів (базовий канал у випадку із кореляцією)	Рівні вагові коефіцієнти		Вагові коеф., розраховані на основі локальної кореляції (макс. інформативності)		Вагові коеф., розраховані на основі локальної кореляції (макс. завадозахищеності)	
	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги
$P_1$	0.2037	0.0697	0.2037	0.0697	0.2037	0.0697
$P_2$	0.1276	0.0723	0.1276	0.0723	0.1276	0.0723
$P_3$	0.1233	0.0670	0.1233	0.0670	0.1233	0.0670
$P_4$	0.1319	0.0094	0.1319	0.0094	0.1319	0.0094
$P_5$	0.1084	0.0051	0.1084	0.0051	0.1084	0.0051
$P_{123}(2)$	0.1414	0.0679	0.0919	0.0919	0.1385	0.0681
$P_{124}(4)$	0.1400	0.0092	0.0333	0.0728	0.1442	0.0079
$P_{345}(5)$	0.1233	0.0058	0.0132	0.0126	0.1165	0.0057
$P_{135}(5)$	0.1374	0.0242	0.0254	0.0184	0.1203	0.0063
$P_{1234}(4)$	0.1318	0.0108	0.0177	0.1337	0.1398	0.0076
$P_{2345}(5)$	0.1126	0.0073	0.0122	0.0255	0.1041	0.0065
$P_{12345}(5)$	0.1280	0.0078	0.0149	0.0480	0.1156	0.0064

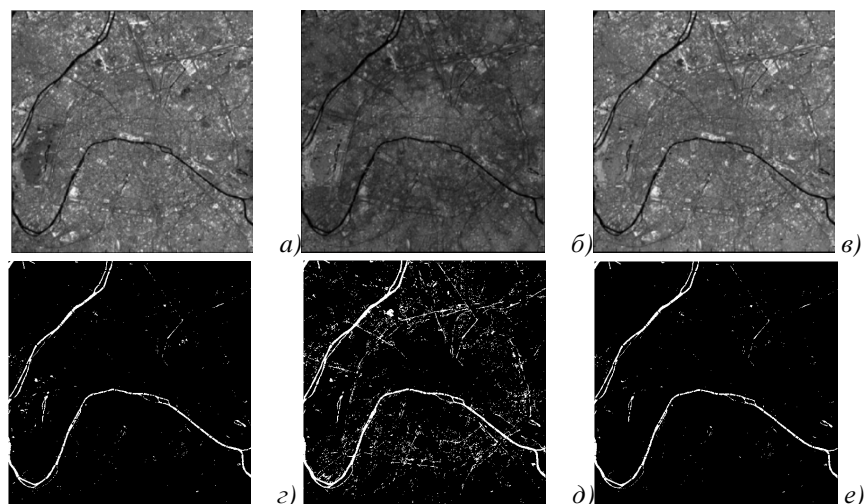


Рис. 2. Результат піксельного комплексування та детекції річки у групі каналів 1,2,3,4,5: а – піксельне комплексування каналів 1,2,3,4,5 із використанням рівних вагових коефіцієнтів; б – піксельне комплексування каналів 1,2,3,4,5 із використанням локальної кореляції за схемою, що забезпечує максимальну інформативність; в – піксельне комплексування каналів 1,2,3,4,5 із використанням локальної кореляції за схемою, що забезпечує максимальну завадозахищеність; г,д,е – відповідні результати детекції

Як бачимо, застосування локальної кореляції для обрахунку вагових коефіцієнтів за схемою максимальної інформативності забезпечує істотне покращання ймовірності пропуску цілі в усіх групах каналів порівняно із некомплексованими каналами та комплексуванням із використанням рівних вагових коефіцієнтів, однак не забезпечує достатнього рівня ймовірності хибної тривоги, створюючи насиченість результуючих зображень великою кількістю хибних елементів (рис. 2). У той самий час схема із забезпеченням максимальної завадозахищеності на основі базового каналу забезпечує значно кращий результат за ймовірністю хибної тривоги.

З метою перевірки впливу піксельного комплексування на завадозахищеність системи та встановлення того, яка схема комплексування є більш ефективною, введемо штучно створену заваду в зображення одного із наявних каналів (рис. 3).

Таблиця 2

**Результати детекції шуканого об'єкта на піксельному рівні із введенням завади у зображення 3-го каналу**

Група каналів (базовий канал у випадку із кореляцією)	Рівні вагові коефіцієнти		Вагові коеф., розраховані на основі локальної кореляції (макс. інформативності)		Вагові коеф., розраховані на основі локальної кореляції (макс. завадозахищеності)	
	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги
P <sub>1</sub>	0.2037	0.0697	0.2037	0.0697	0.2037	0.0697
P <sub>2</sub>	0.1276	0.0723	0.1276	0.0723	0.1276	0.0723
P <sub>3</sub>	0.2579	0.0642	0.2579	0.0642	0.2579	0.0642
P <sub>4</sub>	0.1319	0.0094	0.1319	0.0094	0.1319	0.0094
P <sub>5</sub>	0.1084	0.0051	0.1084	0.0051	0.1084	0.0051
P <sub>123</sub> (2)	0.2671	0.0657	0.2136	0.1256	0.2061	0.0691
P <sub>124</sub> (4)	0.1400	0.0092	0.0333	0.0728	0.1442	0.0079
P <sub>345</sub> (5)	0.2699	0.0056	0.1884	0.0121	0.1543	0.0055
P <sub>135</sub> (5)	0.2688	0.0202	0.1829	0.0172	0.1658	0.0058
P <sub>1234</sub> (4)	0.2654	0.0102	0.1884	0.1368	0.1700	0.0072
P <sub>2345</sub> (5)	0.2548	0.0071	0.1835	0.0214	0.1348	0.0062
P <sub>12345</sub> (5)	0.2633	0.0075	0.1816	0.0374	0.1393	0.0061

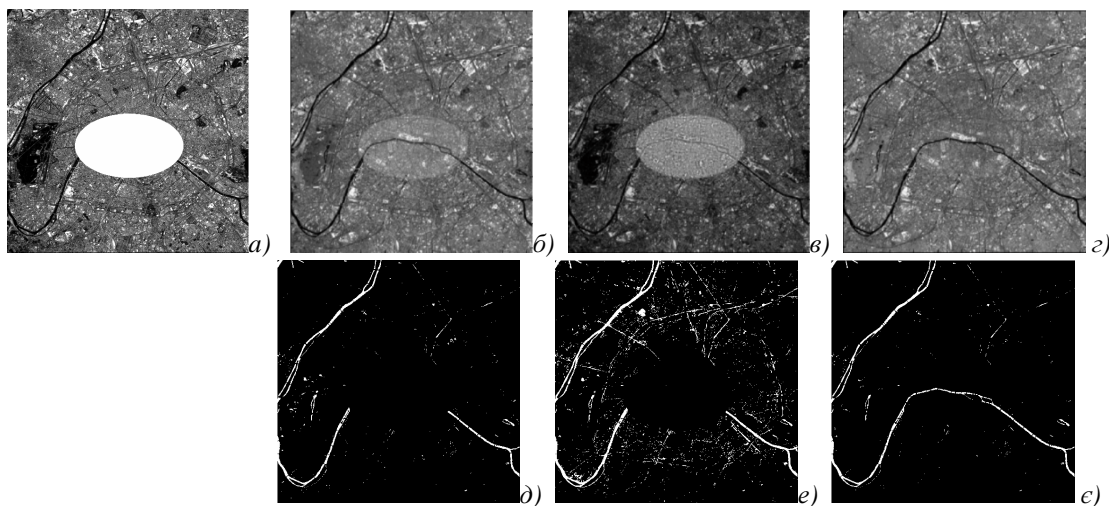


Рис. 4. Результат піксельного комплексування та детекції річки у групі каналів 1,2,3,4,5 із штучно-створеною завадою в зображенні 3-го каналу: а – зображення 3-го каналу із штучно-створеною завадою; б – піксельне комплексування каналів 1,2,3,4,5 із використанням рівних вагових коефіцієнтів; в – піксельне комплексування каналів 1,2,3,4,5 із використанням локальної кореляції для розрахунку вагових коефіцієнтів за схемою, що забезпечує максимальну інформативність; г – піксельне комплексування каналів 1,2,3,4,5 із використанням локальної кореляції для розрахунку вагових коефіцієнтів, за схемою, що забезпечує максимальну завадозахищеність; д, е – відповідні результати детекції

Як бачимо, найефективнішою з точки зору як ймовірності пропуску цілі, так і ймовірності хибної тривоги, є схема комплексування каналів на основі локальної кореляції із забезпеченням максимальної завадозахищеності на основі зображення базового каналу. Отже, саме її приймемо за базову на піксельному рівні комплексування.

### Оброблення зображень на рівні ознак

Завданням оброблення даних на рівні ознак є виділення характерних ознак шуканого об'єкта незалежно у кожному каналі. Слід зазначити, що кожен об'єкт зображення можна охарактеризувати набором ознак, які можна використати для їх аналізу і розпізнавання. Для статистичного оцінювання форми і розміру об'єктів на зображенні чи класифікації об'єктів найчастіше використовують морфометричні ознаки [13]. Площа є однією із основних морфометричних ознак. Вона широко використовується для описання об'єктів і обчислення коефіцієнтів форми. Задачею розрахунку коефіцієнта форми є математичний опис форми об'єкта.

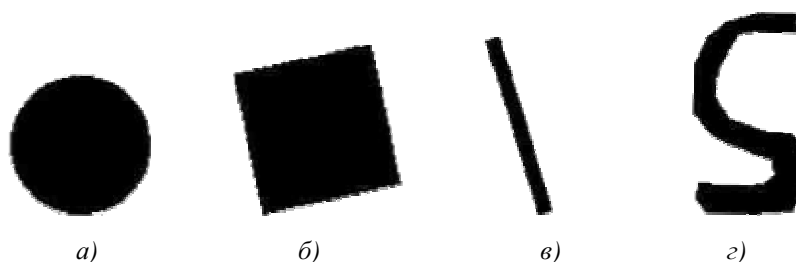


Рис. 4: а – коло; б – квадрат; в – прямокутник; з – S-подібний об'єкт

Таблиця 3

### Значення коефіцієнта випуклості для об'єктів різної форми

Зображення	Коефіцієнт випуклості
а) коло	0.9781
б) квадрат	0.9669
в) прямокутник	0.8816
з) S-подібний об'єкт	0.4595

Таблиця 4

### Результати оброблення зображень, отриманих на піксельному рівні, на рівні ознак

Група каналів	Використання площі як критерію для виділення шуканого об'єкта		Використання коефіцієнта форми як критерію для виділення шуканого об'єкта	
	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги
P <sub>123</sub>	0.1459	0.0501	0.1504	0.0586
P <sub>124</sub>	0.1525	0.0037	0.1771	0.0038
P <sub>345</sub>	0.1286	0.0038	0.1630	0.0028
P <sub>135</sub>	0.1387	0.0040	0.1745	0.0031
P <sub>1234</sub>	0.1519	0.0038	0.1769	0.0038
P <sub>2345</sub>	0.1169	0.0039	0.1472	0.0032
P <sub>12345</sub>	0.1316	0.0038	0.1562	0.0030

Варто зазначити, що у нашому випадку задачею оброблення на рівні ознак є усунення хибних об'єктів, що не належать шуканому в кожному із зображень, що пройшли етап піксельного

комплексуювання і сегментації. Як ключові ознаки для визначення шуканого об'єкта були використані площа об'єкта і коефіцієнт форми у представленні коефіцієнта випуклості, що дорівнює відношенню площі до випуклої площі об'єкта. Наведемо приклади характерних значень коефіцієнта випуклості для об'єктів різної форми (рис. 4).

Як бачимо з табл. 3, значення коефіцієнта випуклості є характерним для S-подібного об'єкта, який, в нашому випадку, є схожим із шуканим і має значення, відмінне від значень для об'єктів іншої форми.

Перейдемо до оброблення зображень, отриманих на піксельному рівні комплексуювання (використання локальної кореляції за схемою максимальної завадозахищеності), з використанням сегментації, та наведемо результати.

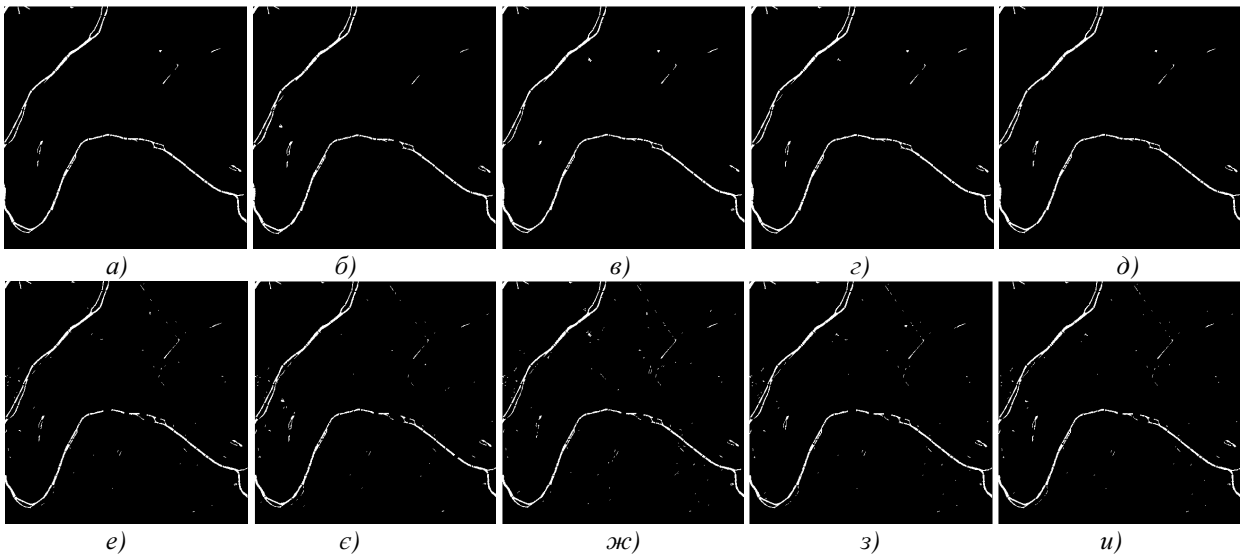


Рис. 5. Результат оброблення зображень на рівні ознак: а, б, в, г, д – використання площі як критерію для виділення шуканого об'єкта відповідно у групах каналів: 3,4,5; 1,3,5; 1,2,3,4; 2,3,4,5; 1,2,3,4,5; е, є, ж, з, и – використання коефіцієнта форми як критерію для виділення шуканого об'єкта відповідно у групах каналів: 3,4,5; 1,3,5; 1,2,3,4; 2,3,4,5; 1,2,3,4,5

Ефективнішим за ймовірністю пропуску цілі під час забезпечення сумірного рівня ймовірності хибної тривоги є схема із використанням площі об'єкта як основного критерію для виділення річки. Порівняно із результатами, отриманими на піксельному рівні, спостерігаємо деяке погіршення ймовірності пропуску цілі. З метою виправлення ситуації переходимо до наступного етапу оброблення.

### Комплексування на рівні рішень

На цьому рівні комплексуювання інформації здійснюватимемо комплексуювання зображень, отриманих на попередньому етапі оброблення, за однією із таких схем:

- 1) використання однакових вагових коефіцієнтів:

$$D_{res} = \frac{D_{123} + D_{124} + D_{345} + D_{135} + D_{1234} + D_{2345} + D_{12345}}{7}, \quad (12)$$

де  $D_{res}$  – результат комплексуювання;  $D_{123} \dots D_{12345}$  – результат детекції шуканого об'єкта у відповідних групах каналів після проведення піксельного комплексуювання та оброблення на рівні ознак;

- 2) використання вагових коефіцієнтів підібраних вручну:

$$D_{res} = 0 \cdot D_{123} + 0 \cdot D_{124} + 0,2 \cdot D_{345} + 0,2 \cdot D_{135} + 0,1 \cdot D_{1234} + 0,3 \cdot D_{2345} + 0,2 \cdot D_{12345}. \quad (13)$$

Отримані результати виглядають так, як це показано у табл. 5.



## Результати багаторівневого комплексування

Багаторівневе комплексування	Використання рівних вагових коефіцієнтів для комплексування рішень		Використання вагових коефіцієнтів підібраних вручну для комплексування рішень	
	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги	ймовірність пропуску цілі	ймовірність хибної тривоги
$D_{res}$	0.0982	0.0047	0.0971	0.0044

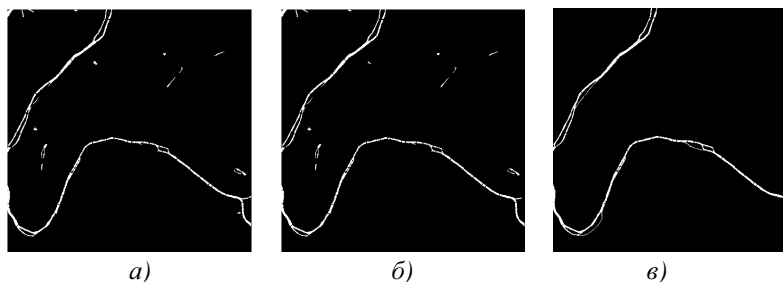


Рис. 7: а – результат комплексування на рівні рішень із використанням рівних вагових коефіцієнтів; б – результат комплексування на рівні рішень із використанням вагових коефіцієнтів, підібраних вручну; в – реальна карта річки

## Висновки

У цій роботі наведено вдосконалений метод багаторівневого оброблення графічної інформації, отриманої за допомогою дистанційного супутникового зондування. Показано переваги, які вносить кожний із рівнів оброблення, здійснено аналіз шляхів можливого покращання ефективності оброблення інформації на кожному із рівнів та наведено результат сумісного їх застосування. Використання локальної кореляції для обчислення вагових коефіцієнтів на піксельному рівні комплексування дає змогу істотно зменшити вплив завад в окремому спектральному каналі на загальний результат комплексування, що є важливо під час моніторингу земної поверхні за різних погодних умов.

1. <http://www.crisp.nus.edu.sg>.
2. <http://www.npagroup.co.uk>.
3. Hall D. (ed) and Llinas J. (ed.). *Handbook of Multisensor Data Fusion*, CRC Press LLC, 2001.
4. Прудіус І.Н., Лазько Л.В., Семенов С.О., Голотяк Т.С. Комплексування інформації в пасивних широкосмугових супутникових системах дистанційного зондування на основі багаторівневого методу // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2006. – №557. – С. 114–119.
5. <http://landsat.gsfc.nasa.gov>.
6. <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov>.
7. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Соифера. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 2000.
9. Прудіус І.Н., Лазько Л.В., Семенов С.О. Піксельне комплексування даних на основі локальної кореляції в системах дистанційного зондування // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2007. – №595. – С. 55–60.
10. A.K. Jain and R.C. Dubes. *Algorithms for Clustering Data*, Prentice Hall, 1988.
11. P. Felzenszwalb, D. Huttenlocher. *Image Segmentation Using Local Variation*, Proc. IEEE, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 98–104, 1998.
12. Семёнов С.А. Помехоустойчивое комплексирование данных на пиксельном уровне с использованием сегментации // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2008»: Материалы 4-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф., 21–25 апреля 2008 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 31.
13. Haralick R.M., Shapiro L.G. *Computer and Robot Vision*. V. I. Addison-Wesley, 1992.