

**В. В. Юзефович, О. В. Мезенцев,  
О. М. Буточнов, Є. О. Цибульська**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## **Використання селективних еталонних зображень в оптичному діапазоні для систем навігації керованих об'єктів**

*Продемонстровано можливість і доцільність використання селективних або бінарних селективних зображень як еталонних зображень оптичного діапазону для вирішення задач кореляційно-екстремальної навігації літальних апаратів (ЛА). Проаналізовано кореляційні характеристики оптичних зображень без спеціальної обробки, селективних у градаціях сірого та бінарних селективних зображень. Показано, що бінарні селективні зображення мають найкращі кореляційні характеристики, однак для їхнього використання необхідна наявність швидких методів формування селективних поточних зображень на борту ЛА.*

**Ключові слова:** еталонне зображення, кореляційно-екстремальна система навігації, кореляційна функція, селективне зображення, бінарне зображення.

### **Вступ**

Формування еталонних зображень (ЕЗ) для кореляційно-екстремальних систем навігації (наведення) керованих літальних апаратів (ЛА) є однією із важливих задач корегування їхнього польоту шляхом порівняння ЕЗ з поточними зображеннями (ПЗ), що надходять від датчиків зовнішньої інформації ЛА [1, 2]. Разом із тим, шляхи вирішення задачі формування ЕЗ у відомих роботах розглядаються досить рідко [3–7].

Методи спільної обробки ЕЗ і ПЗ для отримання значення їхнього відносно-го зсуву з метою вироблення сигналу корекції польоту ЛА розглянуто, наприклад, в [3, 4]. У даних роботах як ЕЗ використовуються оптичні зображення поверхні землі в районі точки корекції, що отримані заздалегідь. При цьому додаткової обробки цих зображень не передбачається. Тобто як ЕЗ розглядаються звичайні зображення, що попередньо отримані засобами зйомки поверхні землі в районі точки корекції. Разом із тим, автори цих робіт зазначають, що за інтервал часу від попередньої зйомки району корекції до застосування її результатів для навігації ЛА

зображення даного району може зазнати змін. Відмінності у зображеннях, що отримані під час попередньої зйомки району прив'язки та в процесі польоту ЛА, у ряді випадків можуть призводити до випадкового результату корекції (грубої помилки визначення місця знаходження ЛА відносно точки корегування), про що зазначається в [3]. Однак у цілому автори констатують високу якість вирішення задачі корегування польоту ЛА запропонованим ними методом.

Разом із тим, велика кількість методів навігації рухомих об'єктів базується не на використанні зображень «у цілому», а на виділенні на них певних сталих орієнтирів у просторі руху об'єкта [7, 8]. Тобто для вирішення задачі навігації використовуються лише певні «корисні» ознаки зображень. Приклад ефективного вирішення задачі навігації ЛА на основі використання бінарних ЕЗ місцевості (рис. 1), які містять лише «важливі риси» зображення, наведено в [7]. Як причини формування бінарних селективних ЕЗ у [7] вказуються оптимізація обчислювальних витрат і зменшення впливу умов ведення зйомки. Отже виникає питання актуальності здійснення спеціальних перетворень результатів попередньої зйомки районів корекції для отримання ЕЗ та аналізу переваг і недоліків обох зазначених підходів до їхнього формування.

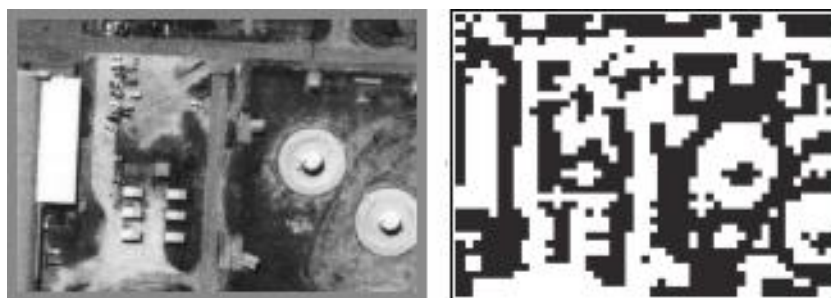


Рис. 1. Зображення місцевості від оптичного сенсору керованого ЛА (зліва) та бінарне еталонне зображення місцевості (справа). Рисунок запозичений із [7].

## Мета роботи

Метою роботи є аналіз переваг і недоліків використання селективних зображень оптичного діапазону як еталонних і підходів до їхнього формування шляхом виділення на вхідних зображеннях певних інформативних ознак.

## Використання селективних еталонних зображень

Очевидною перевагою використання оптичних зображень земної поверхні як ЕЗ є відсутність їхніх додаткових перетворень, що вимагають обчислювальних ресурсів і часу. При цьому, якщо перетворення, застосовані для формування ЕЗ, необхідно здійснювати і над ПЗ від бортових датчиків ЛА, то виникають додаткові навантаження на бортовий обчислювач, який має обмежені обчислювальні ресурси. Разом із тим, перетворені зображення (наприклад, як показано рис. 1), потребують значно менших обсягів пам'яті та розрядності даних, що спрощує подальші математичні дії над ними, зменшує вимоги до бортового обчислювача. Отже виникає можливість компенсації витрат на здійснення бортової обробки таких зоб-

ражень. Крім того, обробка вхідних зображень (ВЗ) з метою отримання ЕЗ здійснюється заздалегідь «наземними» обчислювальними засобами, що не складає проблем.

З іншого боку, враховуючи важливість (у багатьох випадках) забезпечення автономності дій ЛА, невеликі розміри ЕЗ (рис. 1) дозволяють спростити задачу їхнього зберігання, накопичення та передачі на борт ЛА (або на пункти керування ЛА безпосередньо перед їхнім застосуванням) каналами радіозв'язку.

Крім того, як відомо, для визначення зсуву між ПЗ та ЕЗ у кореляційно-екстремальних системах навігації (наведення) розраховується деяка розв'язувальна функція (РФ), яка відображає кореляційну залежність двох зображень [1, 2, 8]. Очевидно, що зміна вигляду об'єктів у районі зйомки в результаті впливу погодних факторів, добових змін, пори року або в результаті діяльності людини, з великою ймовірністю призведе до погіршення кореляційної залежності між ЕЗ та ПЗ і, як наслідок, до погіршення характеристик РФ. При цьому застосування методів отримання селективних зображень також передбачає зміни ВЗ із очевидними втратами кореляції.

Нормовані двовимірні автокореляційні функції (АКФ) зображень місцевості різного масштабу та взаємокореляційні функції (ВКФ) тих самих зображень з отриманими на їхній основі селективними (у відтінках сірого кольору) зображеннями (СЗ) з використанням одного із методів виділення контрастних фрагментів показано на рис. 2. Числові значення якості кореляційних функцій, наведені на рисунках, визначаються відношенням їхнього максимального значення до середнього рівня навколишнього «фону». Необхідно також зазначити, що чим вужчою є головна пелюстка кореляційної функції, тим меншою є ймовірність неточного накладання зображень при розрахунку корегуального сигналу, оскільки при наявності зміщення між зображеннями значення коефіцієнта кореляції швидко зменшується.

Як видно з рис. 2, нормовані ВКФ (рис. 2,е та 2,з) зображень мають співставні характеристики із АКФ (рис. 2,д і 2,ж) вхідних зображень і в деяких випадках (як для ВЗ 1, показного на рис. 2,а) можуть мати навіть кращі характеристики. При цьому, можна однозначно стверджувати, що селективні зображення в цілому зберігають кореляційні властивості із вхідними зображеннями.

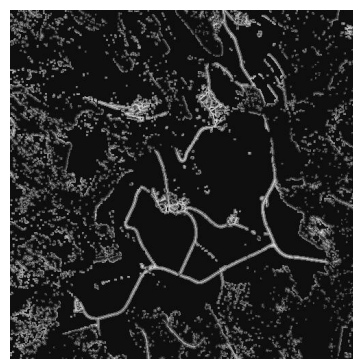
На рис. 3 показано результати розрахунку РФ для ВЗ 1 (рис. 2,а), а також для ВЗ 1 та СЗ 1 (рис. 2,б) (отриманої на основі перетворення Фур'є зображень із нормуванням результату за їхніми енергетичними спектрами, яка використовується в роботах [3, 4]). Представлені результати також підтверджують висновок щодо збереження кореляційних властивостей, викладений вище.

Для подальшого аналізу порівнюємо АКФ вхідних зображень (рис. 2,а та 2,в) та АКФ селективних зображень (рис. 2,б та 2,г), показаних на рис. 4.

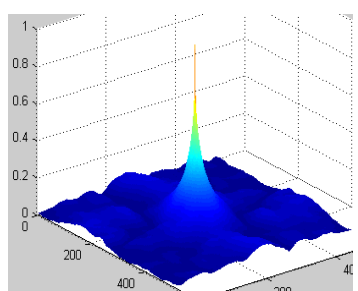
Як видно, АКФ селективних зображень (рис. 4,а та 4,б) характеризуються кращими характеристиками, ніж АКФ вхідних зображень (рис. 2,а та 2,в) як за рівнем головної пелюстки по відношенню до фону, так і за шириною головної пелюстки. Разом із тим, для застосування такого підходу необхідно здійснювати процедуру перетворення ПЗ на СЗ на борту ЛА. Зауважимо, що зазвичай методи отримання селективних зображень є досить затратними з точки зору обчислювальних ресурсів.



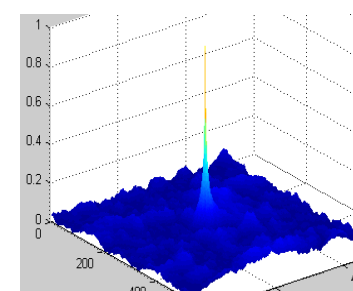
а) вхідне зображення 1



б) селективне зображення 1



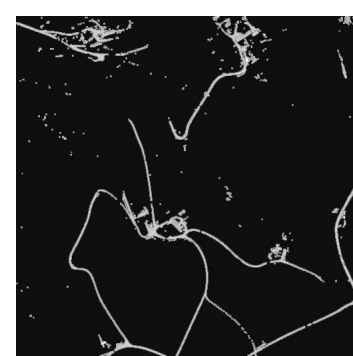
в) АКФ ВЗ 1 (якість — 23)



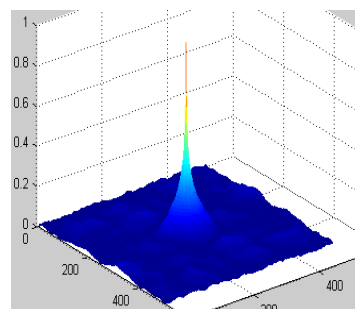
г) ВКФ ВЗ 1 і СЗ 1 (якість — 32)



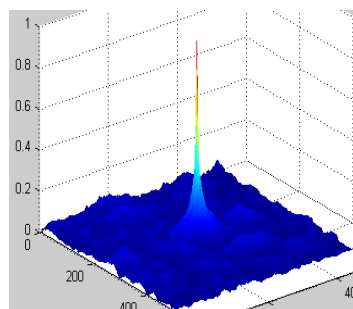
д) вхідне зображення 2



е) селективне зображення 2

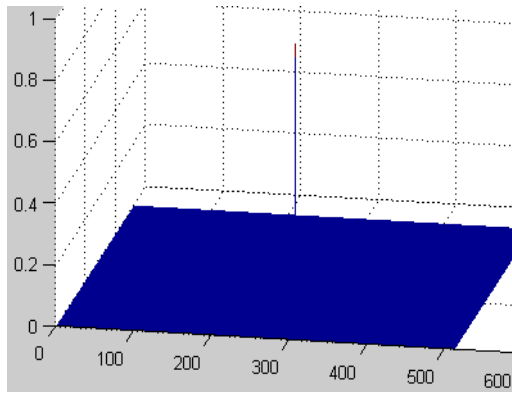


ж) АКФ ВЗ 2 (якість — 53)

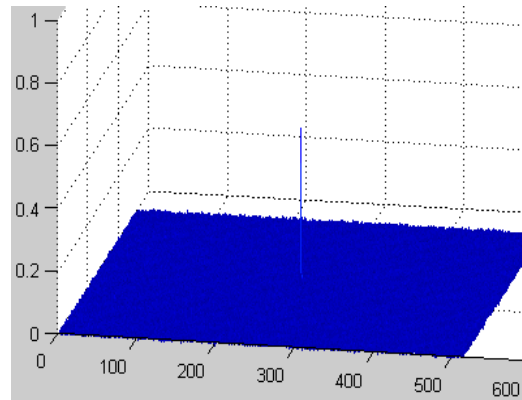


з) ВКФ ВЗ2 і СЗ 2 (якість — 39)

Рис. 2. АКФ і ВКФ вхідного зображення та селективних зображень у відтінках сірого кольору

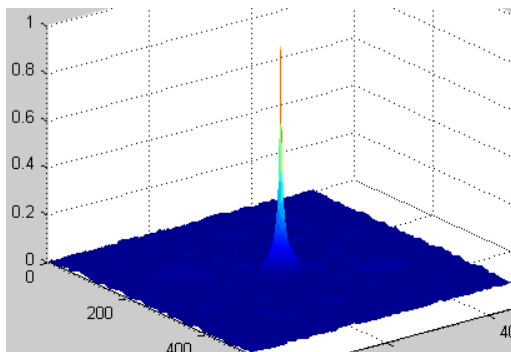


а) вигляд РФ з [3, 4] для ВЗ 1  
(висота піку = 1)

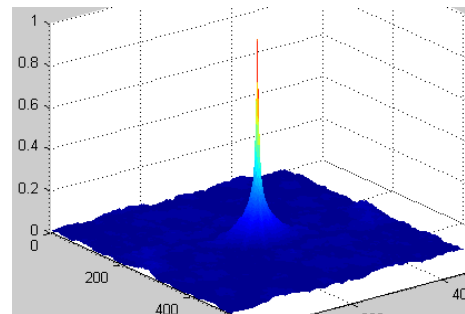


б) вигляд РФ з [3, 4] для ВЗ 1  
та СЗ 1 (висота піку = 0,51)

Рис. 3. Результати розрахунку РФ на основі перетворення Фур'є зображень із нормуванням за енергетичним спектром



а) АКФ селективного зображення 1  
(якість — 130)



б) АКФ селективного зображення 2  
(якість — 68)

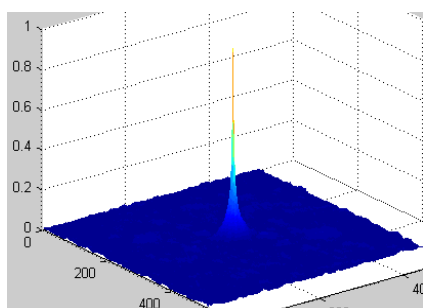
Рис. 4. АКФ селективних зображень у відтінках сірого з рис. 2

## Використання бінарних селективних еталонних зображень

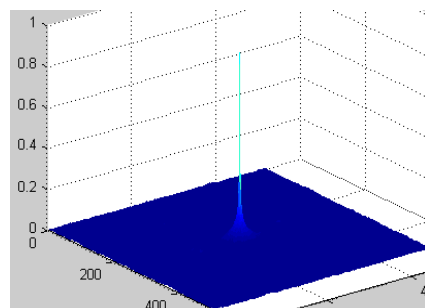
Розглянемо можливість застосування бінарних ЕЗ. На рис. 5 показано ВКФ селективних зображень у відтінках сірого і бінарних зображень, отриманих на їхній основі та АКФ бінарних зображень (БЗ). Як видно із рис. 5, використання селективних ПЗ разом із бінарними ЕЗ фактично дозволяє отримати результати, аналогічні використанню селективних ЕЗ. Бінаризація селективних ПЗ на борту ЛА (при використанні бінарних ЕЗ) дозволяє додатково покращити вигляд кореляційних функцій, а отже потенційно підвищує можливість якісного вирішення задачі корекції польоту ЛА. При цьому процедура бінаризації є малозатратною в обчислювальному сенсі, особливо якщо задача стосується селективних зображень.

Тобто, якщо припустити, що методи отримання селективних зображень дозволяють виділяти стійкі у часі фрагменти вхідних зображень і видаляти інші

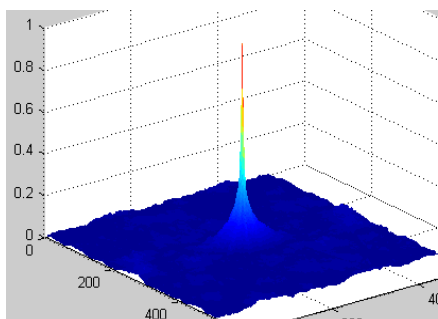
(змінні) частини зображень, їхнє використання може покращувати вигляд розв'язувальної функції, особливо у випадку використання процедури отримання селективних зображень і на борту ЛА. Бінаризація ПЗ (після отримання селективних зображень) разом із використанням бінарних селективних ЕЗ дозволить додатково покращити вигляд кореляційних функцій. Використання лише стійких у часі інформаційних ознак зображень також дозволяє збільшити допустимі інтервали часу між отриманням ВЗ для формування ЕЗ і застосуванням ЛА.



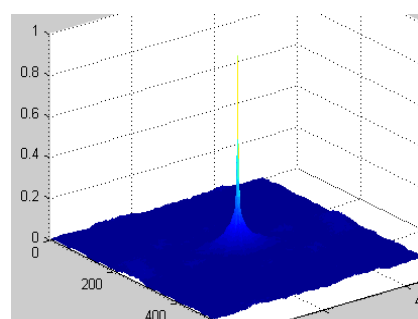
ВКФ СЗ 1 та отриманого на його  
основі БЗ 1 (якість — 116)



АКФ БЗ 1 (якість — 273)



ВКФ СЗ 2 та отриманого на його  
основі БЗ 2 (якість — 68)



АКФ БЗ 2 (якість — 118)

Рис. 5. ВКФ селективних і бінарних зображень та АКФ бінарних зображень

## Висновки

Як еталонні зображення, що необхідні для функціонування кореляційно-екстремальних систем навігації (наведення) в оптичному діапазоні, доцільно використовувати селективні зображення місцевості в районі корекції. При цьому селективне зображення має містити найбільш інформативні та стійкі у часі ознаки обраної місцевості. Очевидною перевагою використання селективних еталонних зображень є невеликі обсяги пам'яті, що необхідні для їхнього збереження, та більш низькі вимоги до пропускну здатності каналів зв'язку для їхнього передавання. Крім того, селективні зображення з достатньою кількістю інформативних ознак характеризуються більш «якісними» автокореляційними функціями (з меншим рівнем «фону» та більш гострою головною пелюсткою) у випадку застосування методів формування селективних зображень на борту ЛА. Це потенційно

збільшує якість вирішення задач навігації (наведення) літальних апаратів на основі таких зображень.

Використання бінарних селективних поточних зображень разом із бінарними селективними еталонними зображеннями є найбільш прийнятним варіантом вирішення задачі корегування польоту ЛА з використанням методів кореляційно-екстремальної навігації.

Для ефективного застосування обох указаних вище підходів необхідно використовувати швидкі методи формування селективних зображень (для отримання селективного ПЗ) і застосовувати методи вилучення тимчасових об'єктів на входних зображеннях (наприклад, на основі спільного аналізу декількох зображень місцевості, отриманих у різний час) для отримання еталонних зображень зі стійкими інформаційними ознаками.

1. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь: ГО «Книжный клуб», 2009. 360 с.

2. Мезенцев А.В., Буточнов А.Н., Миронюк, С.В. Юзефович В.В. Модель процесса функционирования корреляционно-экстремальной системы навигации летательных аппаратов с учетом факторов, влияющих на точность и оперативность обработки изображений. *Регистрация, зберігання і оброб. даних*. 2016. Т. 18. № 2. С. 61–66.

3. Дзюба Д.О., Різник А.М., Новицький Д.В., Чернодуб А.М., Кармазін О.Д. Система візуальної навігації БПЛА на основі метода фазової кореляції зображень: зб. матеріалів конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». 2015. № 10. С. 399–403. URL: <http://conference.gyro.kpi.ua/proc/article/view/65631>

4. Новицький Д.В., Резник А.М., Чернодуб А.Н. Фазовый корреляционный алгоритм на основе преобразования Фурье в задачах визуальной навигации летательных аппаратов. Геоінформаційні системи та інформаційні технології у військових і спеціальних задачах: зб. матеріалів науково-технічного семінару 28 січня 2014 р. Львів, 2014. С. 194–200.

5. Мезенцев А.В., Юзефович В.В., Буточнов А.Н., Миронюк С.В. Фрактальный метод формирования эталонных изображений в системах технического зрения. *Регистрация, зберігання і оброб. даних*. 2015. Т. 17. № 1. С. 28–35.

6. Jia Z., Balasuriya A., Challa S. Autonomous Vehicles Navigation with Visual Target Tracking: Technical Approaches. *Algorithms*. 2008. Vol. 1. P. 153–182.

7. Riedel F., Hall S., et al. Guidance and Navigation in the Global Engagement Department. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 2010. Vol. 29. No 2. P. 118–132.

8. Мезенцев А.В., Буточнов А.Н., Юзефович В.В. Анализ способов повышения быстродействия алгоритмов совмещения изображений в комбинированных корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов. *Регистрация, зберігання і оброб. даних*. 2017. Т. 19. № 1. С. 64–71.

Надійшла до редакції 03.06.2019