

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЄРЬОМІНА НАТАЛІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 621.396.969.3

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОД ПРИВ'ЯЗКИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З
ВИКОРИСТАННЯМ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМ
НАВІГАЦІЇ В УМОВАХ ПОЯВИ ХИБНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ПОТОЧНОМУ
ЗОБРАЖЕННІ

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Н.С. Єрьоміна

Науковий керівник Таршин Володимир Анатолійович, доктор технічних наук
доцент

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Єрємїна Н.С. Метод прив'язки безпілотних літальних апаратів з використанням кореляційно-екстремальних систем навігації в умовах появи хибних об'єктів на поточному зображенні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2018.

Дисертація присвячена забезпеченню формування унімодальної вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації літальних апаратів в умовах впливу на поточне зображення геометричних спотворень та з використанням поточних зображень поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю. Це дозволяє не менше, ніж на 8% підвищити ймовірність локалізації ОП на ПЗ, та забезпечити унімодальність ВФ у порівнянні з системою навігації з класичним кореляційним алгоритмом порівняння зображень, забезпечити високу перешкодостійкість системи навігації та визначити напрямки подальшого вдосконалення системи.

Проведено аналіз та уточнення вимог до кореляційно-екстремальних систем навігації літального апарату. Одержала подальший розвиток модель процесу функціонування КЕСН. Одержав подальший розвиток метод формування ВФ КЕСН заснований на адаптації еталонних зображень до просторового положення та орієнтації БПЛА. Одержав подальший розвиток метод локалізації ОП КЕСН на поточному зображенні заснований на виявленні та багатопороговій селекції об'єкта прив'язки на поточному зображенні в умовах появи на поточному зображенні хибних об'єктів, обумовлених перспективними спотвореннями поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю. Розроблено алгоритм локалізації ОП шляхом пошуку фрагмента бінарного поточного зображення з максимальним

значенням одиниць, що співпадає з еталонним зображенням. Одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП, який враховує результати визначення ймовірності виявлення та локалізації ОП. Одержав подальший розвиток метод формування унімодальної вирішальної функції, який полягає в підсумовуванні кількості одиниць різних зрізів ВФ та пошуку найбільшого значення, що відповідає повному співпадінню поточного зображення з еталонним. Одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП з урахуванням порогу, за яким здійснено зріз ВФ.

Наведені результати експериментальної оцінки підвищення ймовірності локалізації ОП на ПЗ з високою об'єктовою насиченістю та формування унімодальної ВФ в умовах впливу на поточне зображення геометричних спотворень та при прив'язці КЕСН до ПВ з високою об'єктовою насиченістю. Розроблені рекомендації по підвищенню ймовірності локалізації ОП на ПЗ при наявності хибних об'єктів та в умовах впливу перспективних спотворень.

Проведені у дисертаційній роботі дослідження дозволили сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо забезпечення ймовірності локалізації ОП в умовах впливу геометричних спотворень та наявності на ПВ ХО. Відповідно до яких: з метою урахування кореляційних властивостей ПВ для їх опису використовувати модель узагальненого телеграфного процесу; опис ПЗ об'єктів на ПВ незалежно від ФОС здійснювати через яскравість, контраст та їх сукупність з урахуванням впливу адитивних шумів приймального каналу; формування сукупності ЕЗ здійснювати завчасно для можливих геометричних умов візування; визначення місцеположення БПЛА на ПВ з високою об'єктовою насиченістю здійснювати за допомогою алгоритму локалізації ОП КЕСН на ПЗ з кількома яскравими об'єктами, який заснований на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами; навігацію БПЛА, оснащених ОЕ КЕСН, здійснювати за допомогою алгоритму локалізації ОП

КЕСН на ПЗ з кількома яскравими об'єктами, який заснований на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами; підвищення швидкодії ЕО КЕСН при формуванні часткових ВФ здійснювати за допомогою матричного корелятора.

Результати наукових досліджень реалізовані у науково-дослідній роботі «Похибка», що виконувалася у Метрологічному центрі військових еталонів Збройних Сил України (акт від 5 червня 2017 р.).

Ключові слова: кореляційно-екстремальні системи навігації, вирішальна функція, перспективні спотворення, еталонні зображення, висока об'єктова насиченість, хибні об'єкти.

Список публікацій здобувача:

1. Еремина Н. С., Самсонов Ю. В., Сотников А. М. Анализ условий и требований к получению информации о поверхности визирования при формировании базы данных и подготовке эталонных изображений. *Системы управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2015. № 4 (36). С. 66–69.

2. Еремина Н. С., Самсонов Ю. В., Сотников А. М. Обобщенная модель изображений поверхности визирования для представления в базах данных. *Системы управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2015. № 3 (35). С. 77–79.

3. Єр'оміна Н. С., Сотников О. Н., Таршин В. А. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2016. № 50 (122). С. 68–73.

4. Сотніков О. М., Таршин В. А., Єрєоміна Н. С. Багатопороговий алгоритм локалізації об'єктів прив'язки кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотного літального апарата. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. № 1 (49). С. 158–161.

5. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3. № 9 (87). pp. 68–74.

6. Спосіб забезпечення точності та імовірності місцевизначення літальних апаратів на основі оцінки варіацій інформативних полів поверхні візування : пат. 113789, МПК G01S 1/32 (2006.1) / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра, Г. В. Рибалка, Н. С. Єрєоміна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2016 09178 ; заявл. 01.09.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 8 л.

7. Спосіб забезпечення точності та імовірності місцевизначення літальних апаратів на основі використання сукупності інформативних полів : пат. 113791, МПК G01S 1/32 (2006.1). / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра, Г. В. Рибалка, Н. С. Єрєоміна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2016 09181 ; заявл. 01.09.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 7 л.

8. Спосіб формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції : пат. 122637, МПК G01S 1/32 (2006.1) / О. М. Сотніков, В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. Б. Танцюра, Г. В. Мегельбей, В. І. Грідін, А. І. Резніченко, Н. С. Єрєоміна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2017 04984 ; заявл. 22.05.2017 ; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 3. 7 л.

9. Сотников О. Н., Таршин В. А., Еремина Н. С. Выбор информативных признаков для описания поверхности визирования в

інтересах систем дистанційного зондирования Землі. *Електроніка та інформаційні технології (ЕЛІТ-2016)* : зб. матеріалів доп. VIII-ої Укр.-польськ. конф. (м. Львів, м. Чинадієво, 27-30 серпня 2016 р.). Львів : Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2016. С. 46–48.

10. Сотніков О. М., Таршин В. А., Єр'оміна Н. С. Метод формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації в умовах перспективних спотворень поточних зображень. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : тези доп. XIII-ої наук. конф. Харків. нац. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (м. Харків, 12-13 квітня 2017 р.). Харків : ХНУПС, 2017. С. 414–415.

11. Єр'оміна Н. С. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації на основі корекції еталонних зображень. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : тези доп. 7-ої Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Полтава, 20-21 квітня 2017 р.). Полтава : ПНТУ, 2017. С. 9.

12. Єр'оміна Н. С. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи* : тези доп. III Міжнар. наук.-практ. конф. пам'яті професора Петра Столярчука (м. Львів, 11-12 травня 2017 р.). Львів : НУ «Львівська політехніка», 2017. С. 169.

13. Еремина Н. С. Обобщенная модель изображений поверхности визирования для представления в базах данных. *Удосконалення енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання* : тези доп. XVI Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 10-14 вересня 2017 р.). Електрон. дані. Харків, 2017. 1 ел. опт. диск CD-ROM. Назва з етикетки диска.

ABSTRACT

Yeromina N.S. The method of linking the unmanned aerial vehicles with the help of correlation-extreme navigation systems in conditions of false objects' occurrence in the current image. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for a candidate degree in specialty 05.12.17 - radio engineering and television systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics – Kharkiv, 2018.

The dissertation is focused on developing the formation of the unimodal solving function of correlation-extreme navigation systems of aerial vehicles in conditions of influence of perspective distortions on the current image and using the current image of the visibility surface with large number of available objects. This allows to increase the possibility of localization of binding object (BO) in the current image (CI) by at least 8% and to ensure the unimodality of the solving function (SF) in comparison with the navigation system with the classic correlation algorithm of image comparison, to ensure the high interference immunity of the navigation system and to define the direction for further system improvement.

The analysis and specification of requirements for correlation-extreme navigation systems of the aerial vehicle has been performed. The model of the CESN functioning process has been further developed. The method of formation of the SF of CESN has been further developed based on adaptation of RI to the UAV attitude and its orientation. The method of BO of CESN localization in the current image has been further developed based on the identification and multi-level selection of the binding object in the current image in conditions of false objects' occurrence in the current image caused by perspective distortions of the visibility surface with large number of available objects. The algorithm of BO localization has been developed and is based on seeking the fragment of binary current image with the max quantity of available objects that complies with the reference image.

The analytical expression for assessment of the potential for BO localization was received, which reflects the results of probability definition for detection and localization of BO. The formation of the unimodal solving function method was further developed which is to sum up the quantity of the SF cuts and to identify the max value that corresponds to the full match of the current image to the reference image. The analytical expression for assessment of the potential for BO localization was received taking into account the threshold of solving function cuts.

The results are given on experimental evaluation of the increase of probability of localization of BO in the CI with large number of available objects and on formation of the unimodal solving function in conditions of influence of perspective distortions on the current image and linking CESN to VS with large number of available objects. The recommendations are developed on increase of probability of localization of BO in CI in conditions of false objects' occurrence and under the influence of perspective distortions.

The studies conducted in this thesis paper allowed to formulate the scientifically substantiated recommendations on providing the probability of BO localization in conditions of influence of perspective distortions and availability of FO on VS. Whereby: in order to recognize the correlation characteristics of VS the generalized telegraph system model is applied; the description of CI objects on VS is held through brightness, contrast or their combination considering the influence of additional noises in reception channel regardless of BOC (background-objects composition); the formation of RI complex is to be held beforehand for probable geometric visibility conditions; the UAV localization on the VS with large number of available objects is performed with the help of algorithm of BO of CESN localization on the VS with few bright objects, that is based on the identification and multi-level selection of the BO on the VS with few bright objects; UAV navigation equipped with the OE CESN is to be held with the help of the algorithm of BO of CESN localization on the VS with few bright objects, that is based on the

identification and multi-level selection of the BO on the VS with few bright objects; OE CESN performance optimization during the formation of the partial SF is held with the help of matrix correlator.

The results of scientific research were realized in the research work «Pokhybka», which was carried out at the Metrological Center of the Military Standards of the Armed Forces of Ukraine (Act of June 5, 2017).

Key words: correlation-extreme navigation system, solving function, perspective distortions, reference images, large number of available objects, false objects.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1	
РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ І УТОЧНЕННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ЇХ ЗАДОВОЛЕННЯ.....	21
1.1 Результати аналізу існуючих вимог до систем навігації безпілотних літальних апаратів.....	21
1.2 Результати аналізу методів автономної навігації безпілотних літальних апаратів в умовах високої об’єктової насиченості поверхні візування	31
1.3 Обґрунтування шляхів задоволення вимог до оптико-електронних систем навігації безпілотних літальних апаратів. Формулювання задач дослідження.....	35
1.3.1 Аналіз факторів, що впливають на процес формування вирішальної функції в автономних системах навігації безпілотних літальних апаратів.....	35
1.3.2 Методи та алгоритми суміщення поточного та еталонного зображень.....	38
1.3.3 Інваріантні до геометричних спотворень поточних зображень та спотворень поверхні візування алгоритми кореляційно-екстремальної обробки	40
1.3.4 Формулювання задач досліджень щодо удосконалення методу формування вирішальної функції оптико-електронних кореляційно-екстремальних систем навігації	41
Висновки по розділу 1.....	45

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА. ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	47
2.1 Результати розробки математичної моделі процесу функціонування оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотних літальних апаратів.....	47
2.2 Аналіз та обґрунтування характеристик елементів моделі опису процесу функціонування оптико-електронної системи навігації безпілотного літального апарата.....	56
2.2.1 Опис поверхні візування	56
2.2.2 Оцінка стану атмосфери у районі прив'язки.....	59
2.2.3 Результати аналізу характеристик датчиків оптико-електронної системи навігації безпілотних літальних апаратів.....	65
2.2.4 Результати аналізу алгоритмів суміщення зображень в кореляційно-екстремальних системах навігації	73
2.3 Результати розробки моделі процесу функціонування оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації в умовах високої об'єктової насиченості.....	75
Висновки по розділу 2.....	78

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ ВИРІШАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМУМУ КОЕФІЦІЄНТА ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ..	79
3.1 Дослідження впливу геометричних спотворень поточного зображення на формування вирішальної функції оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації	79
3.2 Розробка методу формування вирішальної функції оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації на основі адаптації еталонного зображення до перспективних спотворень.....	91

3.3 Результати розробки алгоритму формування вирішальної функції за критерієм максимуму коефіцієнта взаємної кореляції та аналізу результатів статистичних досліджень.....	98
Висновки по розділу 3.....	101
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА МЕТОДУ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТА ПРИВ'ЯЗКИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА НА ПОТОЧНОМУ ЗОБРАЖЕННІ ПРИ НАЯВНОСТІ ХИБНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	102
4.1 Постановка задачі локалізації об'єкта прив'язки на поточному зображенні.....	103
4.2 Рішення задачі виявлення та селекції об'єкта прив'язки на поточному зображенні поверхні візування з хибними об'єктами.....	105
4.3 Рішення задачі формування унімодальної вирішальної функції.....	113
4.4 Результати розробки алгоритму локалізації об'єкта прив'язки оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації при наявності на поверхні візування хибних об'єктів.....	114
4.5 Результати оцінки ефективності застосування багатопорогового алгоритму локалізації об'єкта прив'язки поверхні візування з хибними об'єктами	118
4.6 Розробка рекомендацій щодо формування унімодальної вирішальної функції при прив'язці до поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю та наявністю хибних об'єктів	120
Висновки по розділу 4.....	122
ВИСНОВКИ.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127
ДОДАТОК А Акт реалізації дисертаційних досліджень.....	141
ДОДАТОК Б Список наукових праць за темою дисертації	143

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
ВЗ	–	вихідне зображення
ВКФ	–	взаємна кореляційна функція
ВО	–	вторинна обробка
ВФ	–	вирішальна функція
ГМУ	–	гідрометеоутворення
ДОФП	–	датчики однакової фізичної природи
ДРФП	–	датчики різної фізичної природи
ЕЗ	–	еталонне зображення
ЕМХ	–	електромагнітна хвиля
ЕФВ	–	електрофізичні властивості
ІНС	–	інерційна навігаційна система
ІП	–	інформативний параметр
КЕСН	–	кореляційно-екстремальна система навігації
ККА	–	класичний кореляційний алгоритм
КФ	–	кореляційна функція
НС	–	навігаційна система
НАК	–	навігаційна апаратура користувачів
НДР	–	науково-дослідна робота
ОЕ	–	оптико-електронний
ОП	–	об'єкт прив'язки
ПВ	–	поверхня візування
ПЗ	–	поточне зображення
ПО	–	первинна обробка
РНС	–	радіонавігаційна система
РП	–	район прив'язки
СКВ	–	середньоквадратичне відхилення
СКП	–	середньоквадратична помилка
СНС	–	супутникова навігаційна система

- ТВ – телевізійний
- ФОС – фоново-об’єктовий склад
- ХО – хибний об’єкт
- ЦОМ – цифрова обчислювальна машина

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Використання високоточних навігаційних систем є одним з напрямків забезпечення високої ефективності застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) цивільного [1 – 6] та військового призначення [7 – 16]. Сучасні високоточні системи навігації БПЛА базуються на використанні інерційних навігаційних систем (ІНС) [17], які можуть бути доповнені як системами супутникової корекції [18 – 21], так і системами навігації по геофізичних полях Землі [1 – 5, 22 – 24]. Останні системи також називають кореляційно-екстремальними системами навігації (КЕСН) [22 – 24]. Застосування супутникових навігаційних систем для корекції ІНС призводить до низької завадостійкості системи корекції, а також до не автономності функціонування навігаційної системи. Цих недоліків позбавлені кореляційно-екстремальні системи, що є їх великою перевагою. У зв'язку з цим кореляційно-екстремальні системи знайшли широке застосування в системах навігації, серед яких найкращими показниками за точністю характеризуються оптико-електронні (ОЕ) КЕСН [18 – 21, 25 – 27].

Однак при вирішенні завдань навігації на ділянках місцевості з високою об'єктовою насиченістю, коли мають місце поряд з об'єктом прив'язки (ОП) інші яскраві об'єкти, близькі за параметрами з ОП, ефективність роботи таких систем може виявитися недостатньою, що обумовлено неможливістю формування унімодальної вирішальної функції (ВФ). Крім того, зміна умов візування також призводить до спотворень ВФ, що обумовлено невідповідністю поточного зображення (ПЗ) еталонному, сформованому заздалегідь [29 – 31].

В результаті склалося протиріччя, обумовлене з одного боку необхідністю забезпечення високої надійності місцевизначення ОЕ КЕСН на ділянках місцевості з різноманітним об'єктовим складом та в умовах впливу геометрії візування, і з іншого боку недостатньою ефективністю систем вторинної обробки інформації КЕСН, що обумовлено неоднозначністю виявлення і селекції ОП в умовах високої об'єктової насиченості під впливом геометричних спотворень і, як наслідок, неможливістю формування унімодальної вирішальної функції як команди управлін-

ня БПЛА. Вирішення цього протиріччя можливе на основі розробки методу формування унімодальної вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації літальних апаратів в умовах впливу на поточне зображення геометричних спотворень та з використанням ПЗ поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю.

На теперішній час детально досліджені основні досяжні показники КЕСН [22 – 24]. Визначені основні проблеми, які стоять на шляху удосконалення КЕСН [25 – 28]. Проаналізовано вплив різного роду активних перешкод на показники якості функціонування КЕСН [22, 24, 29]. Розроблено методи побудови перешкодозахищених систем первинної обробки інформації КЕСН з використанням різних типів геофізичних полів, розроблені методи та алгоритми формування еталонних зображень (ЕЗ), а також унімодальної ВФ [30 – 33]. У той же час не отримали детального дослідження питання впливу об'єктового складу ПВ на результат формування ВФ. Особливо це стосується випадку, коли на ПЗ разом з об'єктом прив'язки можуть мати місце хибні об'єкти, які можна порівняти з ОП. Також не досліджена можливість адаптації ЕЗ до ПЗ шляхом урахування перспективних спотворень ПЗ. Не розроблені моделі опису ПВ, що враховують кореляційні властивості об'єктів і фонів на ПВ, які можуть бути покладені в основу побудови ЕЗ та опису ПЗ.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі – розробки методу прив'язки БПЛА з використанням КЕСН в умовах появи хибних об'єктів на поточному зображенні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження в дисертації проводилися відповідно до науково-дослідних робіт, що виконуються спільно з Метрологічним центром військових еталонів Збройних Сил України (Звіт про НДР шифр "Похибка" на тему: "Розв'язання проблеми недосконалості методів і засобів передавання розмірів одиниць фізичних величин вихідними еталонами Збройних Сил України" – 2016 р., № ДР 0115U004405). В указаній науково-дослідній роботі здобувач був співвиконавцем [34].

Мета і задачі дослідження: підвищення ймовірності прив'язки безпілотних літальних апаратів в умовах впливу на поточне зображення КЕСН геометричних спотворень поверхонь візування з високою об'єктовою насиченістю.

Для досягнення цієї мети вирішувались наступні часткові задачі досліджень:

1. Уточнення вимог до систем вторинної обробки КЕСН БПЛА при місцевизначенні на ПВ з високою об'єктовою насиченістю та в умовах впливу геометричних спотворень.

2. Розробка математичної моделі процесу функціонування КЕСН БПЛА, аналіз елементів моделі.

3. Визначення інформативних параметрів та розробка моделі опису ПВ.

4. Розробка методу та алгоритму формування ВФ КЕСН, заснованих на адаптації ЕЗ до геометричних спотворень.

5. Розробка методу та алгоритму локалізації об'єкта прив'язки ОЕ КЕСН на ПЗ з декількома яскравими об'єктами.

Об'єктом дослідження є процес навігації БПЛА з використанням кореляційно-екстремальних систем.

Предметом дослідження є методи формування унімодальної вирішальної функції як команди на корекцію траєкторії польоту БПЛА.

Методи дослідження визначаються сукупністю розв'язуваних завдань і включають методи кореляційно-спектрального аналізу випадкових процесів, методи теорії оцінок параметрів сигналів на фоні перешкод, методи теорії ймовірності, які використані при розробці методів локалізації ОП ОЕ КЕСН та формування унімодальної ВФ, а також методи моделювання для оцінки ефективності алгоритмів формування унімодальної ВФ з урахуванням геометричних спотворень.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Одержала подальший розвиток модель процесу функціонування КЕСН, яка, на відміну від відомих, враховує просторове положення та орієнтацію БПЛА, а також кореляційні властивості поверхонь візування, в основу опису яких покладено модель узагальненого телеграфного процесу [34 - 44].

2. Одержав подальший розвиток метод формування вирішальної функції КЕСН, який, на відміну від відомих, заснований на адаптації еталонних зображень до просторового положення та орієнтації БПЛА. При цьому розроблено алгоритм формування вирішальної функції матричною КЕСН [37, 38, 40, 41, 70].

3. Одержав подальший розвиток метод локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на поточному зображенні, який, на відміну від відомих, заснований на виявленні та багатопороговій селекції об'єкта прив'язки на поточному зображенні в умовах появи на поточному зображенні хибних об'єктів, обумовлених перспективними спотвореннями поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю [39, 42 - 44]. При цьому:

– розроблено алгоритм локалізації об'єкта прив'язки шляхом пошуку фрагмента бінарного поточного зображення з максимальним значенням одиниць, що співпадає з еталонним зображенням;

– одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП, який враховує результати визначення ймовірності виявлення та локалізації ОП.

4. Одержав подальший розвиток метод формування унімодальної вирішальної функції, який на відміну від відомих полягає в підсумовуванні кількості одиниць різних зрізів ВФ та пошуку найбільшого значення, що відповідає повному співпадінню поточного зображення з еталонним [34, 44 - 46].

У рамках розробленого методу одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП з урахуванням порогу, за яким здійснено зріз ВФ.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи і математичні моделі є основою для розробки і проектування КЕСН, застосування яких дозволяє підвищити ймовірність місцевизначення КЕСН БПЛА порівняно з системою навігації, в якій при формуванні ВФ не враховано вплив геометричних спотворень ПЗ, а також наявність хибних об'єктів.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані в метрологічному центрі військових еталонів Збройних Сил України (акт від 5.06.2017).

Особистий внесок здобувача.

Нові наукові результати отримані автором особисто.

У наукових статтях, опублікованих в співавторстві, авторові належать наступні нові наукові результати:

- у статті [35] автором запропонована математична модель процесу функціонування КЕСН ЛА з урахуванням впливу геометричних спотворень;

- у статті [36] автором запропоновано модель опису ПВ з використанням кореляційних властивостей;

- у статті [44] автором запропоновано метод локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на поточному зображенні з кількома яскравими об'єктами;

- у статті [38] автором запропоновано метод формування вирішальної функції КЕСН за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції, що дозволяє на етапі вторинної обробки інформації за рахунок адаптації ЕЗ до геометричних умов візування;

- у статті [39] автором представлено результати експериментальної оцінки ефективності функціонування КЕСН при навігації з використанням ділянок місцевості з кількома яскравими об'єктами.

Апробація результатів дисертації.

Матеріали дисертаційного дослідження обговорювалися й схвалені на:

- восьмій українсько-польській конференції «Електроніка та інформаційні технології» (ЕЛІТ-2016) Львівського національного університету імені Івана Франка, м. Львів-Чинадієво, 2016 р. [37];

- тринадцятій науковій конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору» Харківського національного університету повітряних сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, 2017 р. [40];

- сьомій міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» Полтавського Національного технічного університету «ПНТУ», 2017 р. [41];

- третій міжнародній науково-практичній конференції пам'яті професора Петра Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» Національного університету «Львівська політехніка», м.

Львів, 2017 р. [45];

- шістнадцятій міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення енергоустановок методами математичного та фізичного моделювання» Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, 2017 р.[46]

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 13 наукових працях, з них 5 статей у фахових наукових виданнях України, що індексуються наукометричними базами Google Scholar (4) та Scopus (1), та 3 патенти на корисні моделі [42, 43].

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертація містить вступ, 4 розділи, висновки, список використаних джерел та 2 додатка. Повний обсяг дисертації складає 145 сторінок, у тому числі 113 сторінок основного тексту, 6 сторінок рисунків, 14 сторінок списку використаних джерел (122 найменування) та 5 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ І УТОЧНЕННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ЇХ ЗАДОВОЛЕННЯ

У першому розділі проведено аналіз існуючих вимог до сучасних автономних систем навігації ЛА, а також застосування оглядово-порівняльного методу для навігації БПЛА в умовах високої об'єктової насиченості.

За результатами аналізу з урахуванням факторів, що впливають на процес формування вирішальної функції КЕСН БПЛА, в першу чергу, високої об'єктової насиченості ПВ та можливої наявності хибних об'єктів, здійснено уточнення вимог до оптико-електронних КЕСН БПЛА та визначені шляхи їх задоволення. Сформульовані задачі досліджень.

Основні результати досліджень, що викладені у розділі 1, опубліковані в роботах [35 – 37].

1.1 Результати аналізу існуючих вимог до систем навігації безпілотних літальних апаратів

Вимоги, що висуваються до систем навігації, в першу чергу визначаються завданнями, що покладені на об'єкти навігації, умовами їх функціонування та забезпечуються принципами побудови самих навігаційних систем.

Визначення положення БПЛА можливе різними за принципами побудови, складністю, точністю та розповсюдженістю навігаційними системами [25], кожна з яких має свої переваги та недоліки.

Збільшення задач, рішення яких в сучасних умовах не можливе без застосування навігаційних системи, зростання потреб у високоточній навігації в цивільній та військовій сферах обумовлюють подальший розвиток методів та алгоритмів щодо забезпечення необхідної точності місцевизначення ЛА. На даний час важко виділити галузь, в якій не виникає необхідність точного

місцевизначення положення рухомих об'єктів [9, 16]. До найбільш важливих задач відносяться доставка вантажів, медикаментів, засобів першої необхідності у віддалені, недоступні райони, райони, що потерпають від стихійного лиха, виконання задач в умовах, коли можливості екіпажів рухомих засобів (літальних апаратів), операторів безпілотних засобів є обмеженими. Крім того, в умовах бойових дій та терористичної загрози, окрім природних факторів, на точність місцевизначення БПЛА впливають перешкоди, дія яких спрямована на зниження ефективності застосування навігаційних систем.

Серед відомих НС найбільше поширення отримали доступні та зручні для користування супутникові навігаційні системи (СНС), до яких відносяться існуючі NAVSTAR (США), ГЛОНАСС (Росія), BEIDOU (Китай), та перспективні GALILEO (Євросоюз), IRNSS (Індія) [18 – 21].

Для більшості наземних рухомих об'єктів цивільного призначення частіше за все використовуються навігаційні приймачі, які на даний момент є достатньо простими у виробництві і користуванні, компактними та дешевими. Вони забезпечують прийнятну для прийняття рішення людиною-оператором точність місцевизначення об'єктів, а також не вимагають авторизації користувачів. Сучасні мобільні пристрої забезпечують можливість приймання сигналів двох та навіть трьох СНС, найчастіше це NAVSTAR, ГЛОНАСС, BEIDOU [25].

У роботах [20, 21], запропоновані варіанти створення національної радіонавігаційної системи (мережі) на основі існуючих GPS та ГЛОНАСС, які пропонується нарощувати наземними засобами широко зонної диференційної навігації [47 – 49]. Разом з тим, відсутність правової основи, закріпленої міжнародними угодами, щодо безперешкодного доступу до СНС може мати катастрофічні наслідки через обмеження доступу до неї країнами-власниками. Також слід враховувати можливість навмисного або ненавмисного впливу перешкод на роботу навігаційної апаратури користувачів.

Крім того, слід враховувати, що прописаний в роботах по навігації [50 – 52] та наведений на рис. 1.1 перелік задач, що потребують навігаційного забезпечення, недосконалий та не розкриває в повній мірі потреби у

навігаційному забезпеченні цивільних об'єктів, об'єктів військового призначення в позаштатних умовах (терористичних загроз та проведення спеціальних операцій), а також об'єктів навігації, для вирішення задач якими потрібна інформація про поточний стан поверхні візування (ПВ) та зміни її властивостей протягом певного часу. Також не розкриваються варіанти навігаційного забезпечення безпілотних систем, до яких відносяться автомобілі, БПЛА, різні типи роботів, обладнаних датчиками інформації у відповідності з останніми тенденціями розвитку систем технічного зору (СТЗ) [53 – 60].

Відповідно до цього, основними і найбільш вагомими недоліками, які обмежують можливість використання існуючих СНС, є [26]:

- можливість введення обмежень на точність отримання навігаційної інформації [49] та залежність від характеристик супутникового сигналу. Обмеження точності навігаційної інформації можуть виникати у випадках місцевизначення об'єкта навігації на ділянках з розвинутою інфраструктурою. Відомі три прецеденти, коли цивільний сегмент GPS був відключений під час проведення операції «Буря в пустелі», акцій НАТО у Європі, а також під час війни в Іраку. При цьому, у третьому випадку сервіс для приватних користувачів був відключений лише на території театру військових дій [61].

Ефективність постановки перешкод БПЛА, обладнаних навігаційною апаратурою користувачів (НАК), доведена застосуванням постановників перешкод БПЛА ОБСЄ [63 – 66].

Забезпечення вимог до точності, автономності навігації БПЛА та перешкодозахищеності здійснюється застосуванням автономних бортових інерційних навігаційних систем (ІНС) [17] у сукупності з кореляційно-екстремальними системами навігації, які формують вирішальну функцію (ВФ) на основі порівняння інформації, що міститься у еталонному (ЕЗ) та поточному (ПЗ) зображеннях поверхні візування (ПВ) Землі у районах застосування.

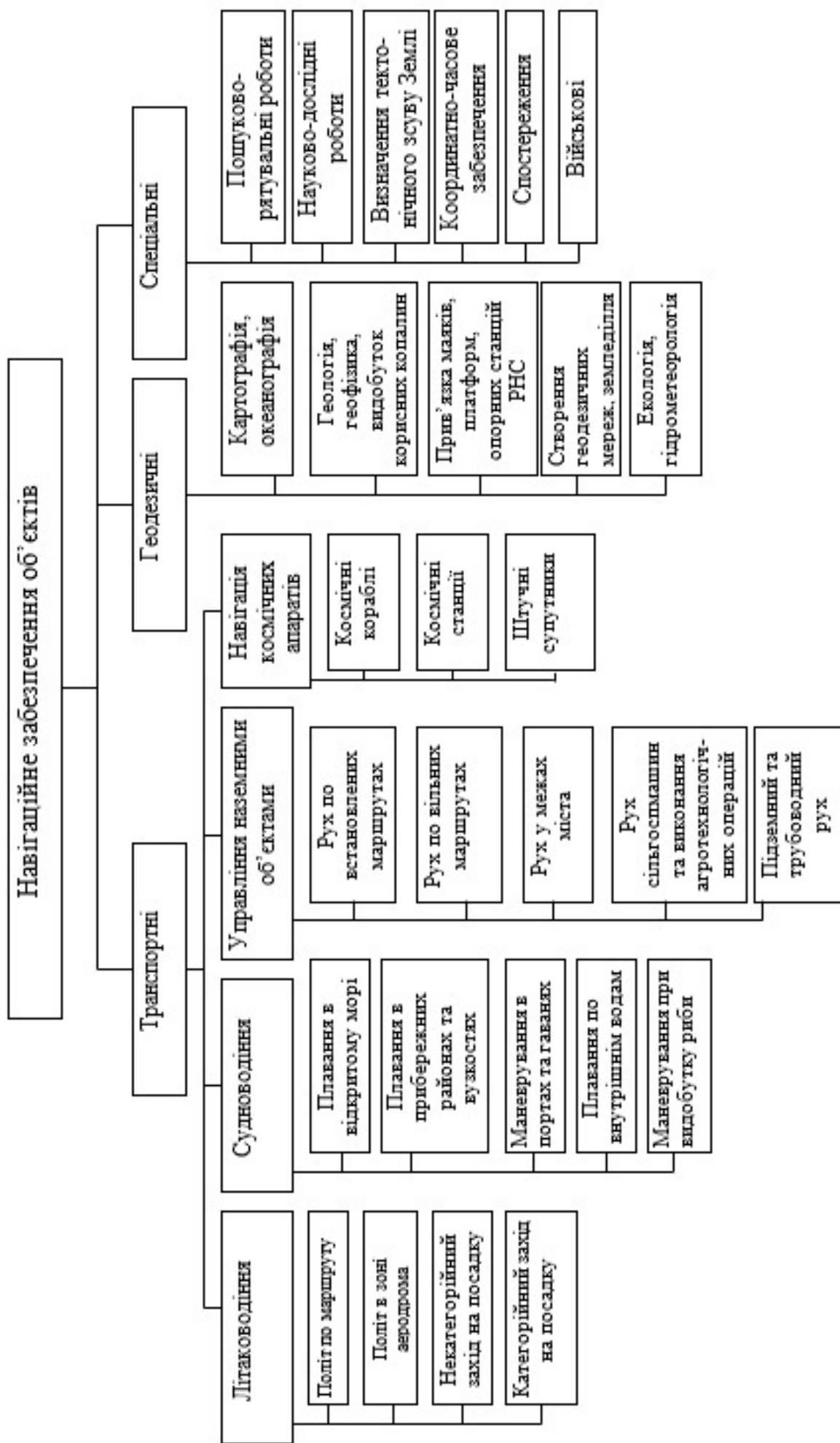


Рисунок 1.1 – Задачі, що вимагають навігаційного забезпечення

Приклад узагальненої структурної схеми КЕСН, що застосовується для визначення просторового положення БПЛА наведений на рис. 1.2.

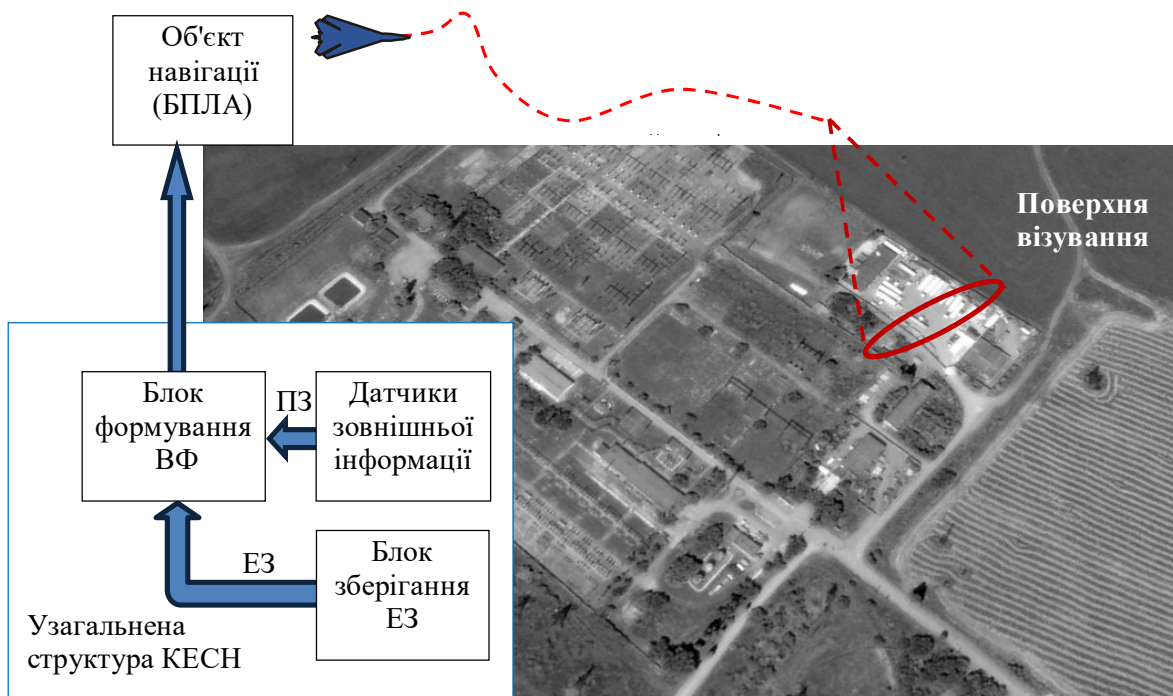


Рисунок 1.2 – Приклад схеми системи навігації з КЕСН та її узагальненої структури

Таким чином, корекція траєкторії польоту БПЛА за допомогою КЕСН дозволяє визначити основні вимоги до СН, до яких відносяться [24, 33, 55]:

- високі точність та ймовірність місцевизначення КЕСН;
- прийнятна швидкодія;
- всепогодність;
- перешкодозахищеність;
- апаратурна надійність;
- мінімальні масо-габаритні характеристики.

В той же час ефективне застосування КЕСН обумовлює необхідність рішення ряду першочергових задач [26 – 28, 33, 55, 67 – 69, 71, 72], до яких відносяться:

- створення високоякісних тривимірних еталонних зображень (ЕЗ);
- рішення задачі розуміння (структурного аналізу) зображень. Оскільки

перелік об'єктів, що знаходяться на поверхні візування, достатньо великий, то система повинна мати можливість навчатися;

- розробка методів і алгоритмів, пристосованих до впливу різного роду перешкод і слабкою мінливості (слабкою контрастністю) поверхні візування;

- створення ефективних алгоритмів вторинної обробки навігаційної інформації в КЕСН.

На відміну від інших навігаційних систем, КЕСН за своєю суттю відповідають системам технічного зору [54 – 60] і потенційно дозволяють здійснювати управління положенням об'єкта за гнучкою, нестандартною програмою, яка враховує особливості ПВ та орієнтації ЛА у просторі.

Враховуючи малі висоту та швидкість БПЛА найбільш доцільним для навігації по ряду технічних характеристик є оптико-електронні КЕСН. Це обумовлено найбільшою інформативністю оптичного каналу отримання зображень ПВ, можливістю використання таких інформативних параметрів як яскравість об'єктів та фонів, контраст, колір, а також можливістю забезпечення потрібних точності та ймовірності місцевизначення КЕСН. Прикладом застосування оптико-електронних КЕСН для місцевизначення ЛА є крилата ракета (КР) «Tomahawk» [13, 14, 15, 73, 74]. Тактико-технічні характеристики, які закладалися на етапі проектування КР, як зразка озброєння, є актуальними і на сьогоднішній день при місцевизначенні БПЛА [33, 53 – 60]. Для порівняння у табл. 1.1 наведені характеристики маршових рельєфометричних КЕСН та систем, що використовуються у різних умовах для наведення на кінцевій ділянці траєкторії. Аналогічні технічні вимоги висуваються до інших типів КЕСН [5 – 7, 54].

Місцевизначення КЕСН здійснюється в умовах впливу різних типів перешкод та спотворень, які можуть мати природний або штучний характер, обумовлені геометрією системи «БПЛА-ПВ», впливом людини на ПВ, середовище розповсюдження радіохвиль та сам об'єкт навігації. Крім того, рішення задачі місцевизначення КЕСН визначається структурою та об'єктовим складом ПВ як первинного джерела інформації [75, 76].

Таблиця 1.1

Тактико-технічні характеристики СН КР «Tomahawk»

ТТХ	Назва системи наведення КР			
	Терком	Терпром	Діджисмек	Діджисмек-2
Датчик	РЛ висотомір	РЛ висотомір	ТВ камера	Скануюча ІЧ ГСН
Діапазон частот	4,3...13 ГГц		Оптичний, ІЧ (0,6...1,3 мкм)	ІЧ (8...14 мкм)
Зона огляду	Залежить від конструкції КР		50 град.	50...70 град.
Розрізнявальна здатність	0,3 м		0,25...0,39 м	
Точність вимірювання	0,9 м \pm 4% висоти		(точність орієнтації) 3 град.	
Вихідні дані	Профіль висот рельєфу місцевості		Зміни оптичного та ІЧ контрасту місцевості	
Кругове ймовірне відхилення, м	35	20	5...10	5...10

Особливо це стосується ПВ з високою об'єктовою насиченістю. Враховуючи, що висота польоту БПЛА складає від 2 до 6 км, при великій розрізнявальній здатності ОЕ СН значний вклад в формування структури ПЗ будуть вносити малорозмірні об'єкти, які в залежності від ракурсу, можуть співпадати на зображенні як за геометричними, так і яскравісними параметрами. Фактично такі об'єкти на ПВ стають хибними об'єктами при прив'язці ОЕ СН. Цей факт є дуже важливим і його не можливо не враховувати при формуванні вимог до ОЕ СН, які до теперішнього часу в відомих роботах не розглядалися.

Відомо, що основними параметрами, що визначають ефективність функціонування КЕСН, є ймовірність місцевизначення та середньоквадратичне відхилення (СКВ) координат БПЛА після виконання k -ого сеансу корекції траєкторії відносно заданих [55]. З урахуванням підходів щодо визначення ефективності місцевизначення КЕСН, викладених у [55], ймовірність привязки БПЛА з використанням КЕСН визначається виразом:

$$P_n = P_{MB_k} \cdot P_{БР} \cdot P_{ПЗ_k} \cdot P_{СУ_k}, \quad (1.1)$$

де $P_{MB_k} \sim f_k(q_{вих}, P_{ПЛ})$ – ймовірність місцевизначення КЕСН при виконанні k -ї корекції у заданому районі прив'язки;

$q_{вих}$ – відношення сигнал-перешкода на виході системи первинної обробки (датчика інформації);

$P_{ПЛ}$ – ймовірність правильної локалізації (ідентифікації) об'єктів на поточному зображенні поверхні візування КЕСН;

$P_{БР}$ – ймовірність безвідмовної роботи КЕСН;

$P_{ПЗ_k} \sim f(P_H)$ – ймовірність виконання прив'язки КЕСН в умовах впливу перешкод, яка характеризується ймовірністю порушення роботи КЕСН при впливі на приймальний тракт КЕСН природних або штучних перешкод;

$P_{СУ_k} \sim f_k(V_{ЛА_k}, H_{ЛА_k}, N_{пр}, T_{ПУ})$ – ймовірність відпрацювання сигналів корекції системою управління (СУ) БПЛА;

$V_{ЛА_k}, H_{ЛА_k}$ – швидкість та висота польоту БПЛА на етапі прив'язки;

$N_{пр}$ – кількість прив'язок КЕСН до об'єкта;

$T_{ПУ}$ – час реакції пристроїв управління бортової системи управління (аеродинамічних або газодинамічних рулів) по відпрацюванню помилок місцевизначення.

Згідно з [22, 24, 77] СКВ БПЛА після виконання k корекцій із застосуванням КЕСН визначається виразом:

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_{MB_k}^2 + \sigma_{П_k}^2 + \sigma_{СУ_k}^2}, \quad (1.2)$$

де $\sigma_{MB_k} = \sigma_{КЕСН}$ – СКВ визначення просторового положення БПЛА, для

навігації якого використовується КЕСН у k -й зоні корекції;

$\sigma_{П_k}$ – СКВ прив'язки ЕЗ для k -ї зони корекції до об'єкта прив'язки;

$\sigma_{СУ_k}$ – СКВ координат місцевизначення після відпрацювання сигналів управління БПЛА при k -ій корекції. Оскільки для останньої зони корекції або декількох останніх зон забезпечується виконання умов $\sigma_{П_k} \ll \sigma_{МВ_k}^2$ та $\sigma_{П_k} \ll \sigma_{СУ_k}^2$, то вираз (1.2) набуває вигляду:

$$\sigma_k < \sqrt{2\sigma_{МВ_k}^2}. \quad (1.3)$$

Для оцінки СКВ місцевизначення КЕСН БПЛА їх зручно представити через характеристики елементів розрізнення оптичних зображень ПВ.

У такому випадку розрізнювальна здатність визначається технічними характеристиками телевізійних (ТВ) датчиків інформації. Так, матричні датчики ТВ діапазону мають розмірність матриці $N_1, N_2 \approx 500 \dots 1480$ елементів (пікселів), де N_1, N_2 – кількість елементів матриці зображення ПВ у картинній площині. При цьому просторове розділення для окремих датчиків може досягати 0,5 метра/піксель при висоті ЛА $H_{ЛА} = 1000$ м, кут огляду ПВ $\varphi = 20 \dots 39^\circ$. Разом з тим, не зважаючи на високе розрізнення, яке забезпечують оптико-електронні датчики інформації, σ_k визначається орієнтацією камери відносно площини польоту БПЛА та впливом випадкових факторів, що діють на сам БПЛА у процесі польоту. Вплив таких факторів потребує проведення додаткових досліджень та розробки відповідних методів усунення цього впливу на результат формування вирішальної функції КЕСН та визначення просторового положення БПЛА у процесі польоту.

При розробці нових та удосконаленні існуючих методів формування ВФ однією з визначальних є вимога забезпечення потрібної швидкодії – час, необхідний на формування ВФ ($T_{ВФ}$). Співвідношення для одного сеансу

прив'язки ПЗ до ЕЗ при застосуванні ТВ датчика інформації при формуванні ВФ має вигляд [55]:

$$T = T_{CI} + T_{KOR}, \quad (1.4)$$

де T_{CI} – час формування ПЗ, який визначається характеристиками датчика, що використовується у КЕСН;

T_{KOR} – час формування часткової ВФ за результатом порівняння ПЗ з ЕЗ, який визначається реалізованим у КЕСН алгоритмом порівняння зображень та їх розмірністю.

У випадку наявності на ПВ хибних об'єктів та геометричних спотворень ПЗ поверхні візування виникає необхідність у виконанні додаткових операцій на етапі вторинної обробки, тому вираз (1.4) може бути представлений у вигляді:

$$T = T_{CI} + T_{KOR} + T_{adapt}, \quad (1.5)$$

де T_{adapt} – час необхідний для оцінки спотворень ПЗ та адаптації до них на етапі вторинної обробки КЕСН у районі застосування БПЛА.

Відповідно до (1.4) формування вирішальної функції потребує більших обчислювальних витрат, що висуває відповідні вимоги по швидкодії до бортового обчислювача.

Аналіз умов застосування ЛА різного призначення, а також особливостей побудови і функціонування систем навігації, дозволяють визначити склад і деякі кількісні значення технічних вимог до сучасних систем навігації БПЛА [1-12, 25-27, 32, 54]:

- забезпечення високої точності прив'язки (порядка одиниць метрів);
- максимально досяжна перешкодозахищеність;
- незалежність результатів роботи СН від зміни метеорологічних, добових і сезонних умов;

здатність функціонувати на будь-яких фонах;
прийнятні, в залежності від типу ЛА, масово-габаритні показники;
автономність функціонування СН;
електромагнітна сумісність з аналогічними системами;
забезпечення реалізації процесу "виявлення-ідентифікації об'єкта"
практично в реальному часі.

Задоволення цим вимогам, пред'явленим до ОЕ СН БПЛА в комплексі, є складним завданням, рішення якого, як показали результати проведеного нами аналізу, на основі застосування існуючих СН, є малоефективним. Тому, в першу чергу необхідно забезпечити реалізацію основних вимог, обмежуючи рівень досягнення інших в межах припустимих значень.

Виходячи з цього можна виділити наступні основні вимоги до ОЕ СН БПЛА:

здатність здійснювати прив'язку БПЛА в умовах наявності на ПВ об'єктів, співпадаючих за інформативними ознаками, на різних фонах в будь-який час;
висока ймовірність прив'язки БПЛА в умовах появи хибних об'єктів;
висока швидкодія;
робота в реальному часі.

1.2 Результати аналізу методів автономної навігації безпілотних літальних апаратів в умовах високої об'єктової насиченості поверхні візування

На даний час достатньо добре розглянуті питання розробки систем первинної обробки зображень в одноканальних, багатоканальних [22, 29, 55] КЕСН та комбінованих СТЗ [27, 78 – 81], методи отримання та обробки зображень [82 – 94]. Розглянуті в [22, 24, 82, 83 та ін] системи кореляційно-екстремальної обробки будуються на основі використання інформації від датчиків однакової фізичної природи (ДОФП) з подальшим звичайним порівнянням ПЗ та ЕЗ, що накладає деякі обмеження на їх безпосереднє використання. А саме робить неможливим урахування змін навколишньої обстановки на ПВ та адаптацію до

впливу різних типів заважаючих факторів.

До факторів, що ускладнюють роботу КЕСН БПЛА, в першу чергу, відносяться [22, 33]:

- шумові ефекти, які мають десятки видів джерел виникнення, до числа яких можна віднести недосконалість сенсорів приймально-передавальної апаратури, апаратури оцифровки зображень, важкі умови зйомки, недолік освітлення і ряд інших;

- складний текстурований фон, на якому має відбуватися виявлення об'єктів;

- ефекти загороджування (закриття) одних об'єктів іншими, як правило, не певної задалегідь форми, наприклад – хмара на космофотознімку і ін.;

- спотворюючі ефекти у вигляді різних розфокусувань і дисторсій, ракурсних спотворень і ін.;

- ефекти різкої зміни освітлення, відблиски, тіні, особливо в динамічно мінливих сценах;

- різноманітність або мінливість самих об'єктів прив'язки на ПВ – змінна структура (як у штрихових кодів), дефекти, часові зміни форми, вегетаційні цикли для рослинності і т. ін.;

- ефекти зміни середовища між сенсорами і об'єктами спостереження – задимлення, атмосферні опади, пил, штучні перешкоди і багато інших;

- несинхронний запис і обробка даних в динамічних задачах виявлення, пов'язана з обмеженнями комп'ютерних засобів зберігання і аналізу зображень, особливо критичними для додатків з необхідними високими часом реакції системи виявлення об'єктів.

Нестабільність інформативних ознак в залежності від погоди і часу доби (характеристик випромінювання або відбиття об'єктів) призводить до часткової або повної втрати інформації в процесі визначення місцезнаходження [22].

Рішення завдання місцевизначення КЕСН в даному випадку можливе завдяки вибору діапазону хвиль, в якому параметри наземних об'єктів є найбільш

стійкими, вибір самих об'єктів з стійкими інформативними ознаками, а також, передбачена заздалегідь, прив'язка до сусідніх об'єктів з стійкими характеристиками випромінювання та / або відбиття. Дані рекомендації викладені в роботах [95 – 100] стосовно оптичних КЕСН, використання яких є пріоритетним для БПЛА, в роботі [22, 95, 96] для зменшення впливу сезонних добових, погодних спотворень ПЗ на результат формування ВФ пропонується використовувати інваріантні КЕСН. Разом з тим, використання інваріантного підходу в умовах наявності хибних об'єктів та геометричних спотворень ПЗ може призводити до формування багатоекстремальної ВФ (неунімодалності), втрати частини інформації про стан ПВ, зменшення точності місцевизначення КЕСН БПЛА.

Ослаблення електромагнітних хвиль (ЕМХ) в несприятливих метеоумовах може бути зменшено завдяки вибору діапазону довжин хвиль. Всепогодність повинна бути оптимізована з іншими характеристиками КЕСН, наприклад, з роздільною здатністю, як по простору, так і інформативному параметру [55]. Разом з тим, наявність локального ослаблення ЕМХ може призводити до погіршення якості локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на фоні хибних об'єктів, особливо це стосується випадків місцевизначення КЕСН в районах прив'язки (РП) з високою об'єктовою насиченістю.

Питанням перешкодозахищеності приймальних пристроїв систем вилучення інформації, до яких відносяться КЕСН, присвячена велика кількість досліджень [29, 33, 101]. Питання забезпечення високої швидкодії КЕСН вирішується завдяки використанню швидкодіючих перешкодостійких алгоритмів обробки зображень, порівняльний аналіз яких наведений у роботах [62, 82, 83].

У процесі функціонування автономної СН багато проблем виникають внаслідок природно низької роздільної здатності об'єктів на оптичному зображенні через різного роду заважаючих чинників (дощ, туман, сніговий покрив і т. д.), або можливої присутності активних видів протидії (маскування, піротехнічні засоби, прожектори і т. і.). Значну роль в зниженні характеристик виявлення грають також шумові компоненти сигналів, які утворюються через

особливості застосовуваних датчиків і неідеальність каналів передачі інформації. Питанням впливу алгоритмічних перешкод, що виникають через спотворення ПВ, присвячені роботи [102, 103].

У роботах [104 – 106] для навігації в умовах високої об'єктової насиченості ПВ пропонується використовувати складні ЕЗ, що дозволяє використовувати в якості додаткової ознаки геометрію розміщення об'єктів на ПВ.

В роботах [22, 78] розглянуті методи формування ВФ в стереоскопічних КЕСН з оптичними датчиками інформації. Разом з тим, з огляду на невелику базу, на яку можуть бути рознесені датчики на БПЛА, і невелику висоту їхнього польоту, використання такого підходу недоцільно.

Формування ВФ в КЕСН БПЛА, крім випадку високої об'єктової насиченості ПВ, має здійснюватися в умовах впливу зовнішніх факторів, що призводять до появи геометричних спотворень. У роботах [55, 82] розглянуто вплив геометричних спотворень зображень ПВ на результат визначення місцезнаходження радіометричної КЕСН при використанні різних алгоритмів кореляційно-екстремальної обробки. Також усуненню впливу спотворень на зображеннях присвячено роботи [83 – 87].

Для створення сучасної СН безпілотних ЛА необхідно у першу чергу вирішити наступні завдання:

- удосконалення моделі процесу функціонування ОЕ КЕСН БПЛА на ПВ з можливою наявністю хибних об'єктів;

- розробка методів та алгоритмів формування ВФ для забезпечення високоточного місцевизначення БПЛА з КЕСН в умовах впливу геометричних спотворень;

- розробка методів та алгоритмів формування ВФ для забезпечення високоточного місцевизначення БПЛА з КЕСН в умовах високої об'єктової насиченості та наявності ХО;

- обґрунтування критерію та оцінка ефективності функціонування ОЕ КЕСН БПЛА.

1.3 Обґрунтування шляхів задоволення вимог до оптико-електронних систем навігації безпілотних літальних апаратів. Формулювання задач дослідження

Проведений у п.п. 1.1, 1.2 аналіз вимог, що висуваються до систем навігації БПЛА, а також існуючих методів навігації в умовах розвинутої інфраструктури, дає можливість здійснити вибір шляхів задоволення цих вимог та визначити напрямки рішення задач дослідження.

В той же час для цього потребують уточнення:

- фактори, що впливають на процес формування вирішальної функції КЕСН безпілотного літального апарата;
- можливості існуючих алгоритмів щодо урахування геометричних спотворень зображень ПВ;
- можливості існуючих методів та алгоритмів щодо забезпечення високоточного місцевизначення БПЛА, оснащених ОЕ КЕСН, в умовах високої об'єктової насиченості та наявності ХО.

1.3.1 Аналіз факторів, що впливають на процес формування вирішальної функції в автономних системах навігації безпілотних літальних апаратів

Найважливішим фактором, який впливає на процес формування ВФ та ефективність функціонування КЕСН БПЛА є сама ПВ з унікальним для кожної ділянки фоново-об'єктовим складом та мінливістю ФОС у часі під впливом різних факторів [33, 55, 75, 76].

Процес функціонування КЕСН, заснований на припущенні про стабільність властивостей ІП ПВ у часі, а також відсутності впливу перешкод. Такий підхід забезпечує певну простоту використовуваних датчиків зовнішньої інформації, реалізованих у КЕСН методів і алгоритмів формування ВФ. У той же час, в процесі функціонування КЕСН виникає ряд обмежень внаслідок

природнього низького розрізнення об'єктів на оптичному зображенні, а також через вплив різного роду заважаючих факторів (дощ, туман, сніговий покрив тощо), або можливої присутності активних видів протидії, що призводять до зміни ФОС, у тому числі і появи хибних об'єктів, створених навмисно для зниження ефективності застосування КЕСН БПЛА. Зміна ФОС призводить до зміни інформативних параметрів ПВ. Визначальними для вибору інформативних полів, що використовуються в КЕСН, є наступні фактори [22]:

- радіус кореляції (τ_k) навігаційного поля, від якого залежить точність прив'язки ПЗ до ЕЗ;
- стабільність характеристик геофізичних полів (ГФП) у часі;
- стабільність характеристик ГФП до впливу перешкод.

Достатньо повна характеристика перешкод, що впливають на радіоелектронні засоби одержання інформації, у тому числі, і КЕСН, а також сучасні підходи щодо усунення цього впливу наведена у роботах [107, 108].

При застосуванні для місцевизначення КЕСН оптичного поля Землі у якості ПІ традиційно використовуються яскравість і контраст оптичного (ТВ) зображення. Оптичне ГФП характеризується високою інформативністю і на ділянках ПВ з малорозмірними об'єктами, відповідно, складає одиниці – десятки метрів [96, 97], що є принциповим при забезпеченні місцевизначення КЕСН БПЛА. В роботі [97] показано, що для оптичного ГФП характерні як стаціонарні, так і нестаціонарні ділянки ПВ.

До нестаціонарних ділянок ПВ можуть бути віднесені наступні типи об'єктів: населені пункти різних типів, рілля з різнорідними ґрунтами, луки з неоднорідними рельєфами і рослинністю та ін. Разом з тим, без детального і досить тривалого вивчення не можна робити однозначне припущення про стаціонарність оптичного ГФП. Крім того, при використанні оптичного ГФП враховують вплив добових, сезонних, кліматичних (погодних) спотворень [109 – 111], що призводить до зміни яскравості та контрасту об'єктів і фонів. Наприклад, при випаданні дощу зволоження об'єктів неживої природи призводить до

зменшення коефіцієнта яскравості до 3 разів, а коефіцієнт яскравості рослинних покривів вважається практично незмінним.

Значною сезонною мінливістю відзначається рослинний покрив. Найбільша швидкість зміни оптичних характеристик ПВ спостерігається в осінній і весняний періоди. Для цих сезонів характерні значні якісні трансформації і різкі кількісні відмінності оптичних характеристик ландшафту, які обумовлені випаданням і таненням снігу, зміною фаз розвитку рослинності, розливами і пересиханнями річок, різкими варіаціями вологості ґрунтів [109 – 111], що призводить до зміни діелектричної (ϵ) та магнітної (μ) проникності об'єктів і фонів.

Аналіз експериментальних даних, наведених в роботах [96, 97] показав, що стабільність контрастів різних елементів ландшафту оптичного ГФП може коливатися від тижнів до місяців і істотно відрізнятися навіть для географічних точок, віддалених один від одного на невеликій відстані.

При використанні оптичного ГФП зміни контрасту зображення, що приймається датчиком після проходження оптичного сигналу через атмосферу відбуваються за рахунок зменшення енергії корисного сигналу і збільшення фонові складові внаслідок зростання коефіцієнта яскравості атмосфери.

Для висот до 1000 м, характерних для польоту БПЛА, вплив атмосфери можна практично не враховувати.

Кореляційні властивості інформативних параметрів, які формуються об'єктами на ПВ в залежності від умов спостереження, впливу різних факторів потребують достатньо тривалого вивчення, яке не може бути реалізоване у процесі польоту БПЛА, який не виконує спеціально такої задачі.

Забезпеченню потенційних можливостей оптичних датчиків інформації у КЕСН приділено достатньо багато уваги у роботах [1 – 3, 22]. Незважаючи на це активно проводяться дослідження щодо удосконалення датчиків інформації у рамках виконання робіт, спрямованих на розробку сучасних систем технічного зору [54, 56 – 60].

Технічні характеристики сучасних ОЕ датчиків наведено в роботі [22], для

більшості з яких характерний діапазон кутів зору порядку $30^0 \dots 50^0$, що дозволяє для заданого діапазону висот визначити допустимі розміри ПЗ. Такі датчики, як CASI-2, CASI-3 і AISA-Eagle з діапазоном кутів зору порядку 39^0 дозволяють проводити зйомку у ТВ і ближньому ІЧ діапазоні, забезпечуючи проекцію зображень ПВ на елемент пристрою з зарядовим зв'язком з лінійними розмірами до $500 \dots 1480$ пікселів. Такі характеристики дозволяють забезпечити роздільну здатність ТВ зображень від 0,5 до 10 м/піксель, а розміри сформованого ПЗ перевищують можливі помилки ІНС в районі корекції.

Аналіз систем первинної обробки (ПО) різних типів КЕСН вказує на те, що вони фактично досягли піку свого розвитку, мають достатньо високу чутливість, роздільну здатність, є малошумлячими і практично не вносять спотворень у сформоване ПЗ. Разом з тим на етапі ПО не можуть бути усунуті геометричні спотворення ПЗ та здійснена локалізація об'єкта прив'язки (ОП) на фоні хибних об'єктів (ХО). Усунення впливу цих факторів можливе на етапі формування ВФ. Для цього необхідно шукати нові підходи до вирішення задачі високоточного місцевизначення КЕСН БПЛА. При рішенні такої задачі, у першу чергу, необхідно проаналізувати можливості існуючих алгоритмів формування ВФ у КЕСН.

1.3.2 Методи та алгоритми суміщення поточного та еталонного зображень

Відомі алгоритми суміщення ЕЗ та ПЗ у своїй більшості не передбачають виконання додаткових операцій над ПЗ та ЕЗ, окрім операцій щодо покращення швидкості отримання ВФ. Аналіз найбільш поширених алгоритмів суміщення ЕЗ та ПЗ наведений у роботах [22 – 24, 33, 77, 78, 82].

Сучасний стан розвитку цифрової техніки дозволяє переглянути методи та алгоритми формування ВФ щодо усунення на етапі вторинної обробки (ВО) різних типів спотворюючих факторів, які засновані на сучасних методах обробки цифрових зображень [84 – 94, 112]. У роботі [88] наведена класифікація методів

обробки зображень, що можуть застосовуватися для виділення об'єктів прив'язки та їх порівняльний аналіз.

Щодо розробки методів ВО інформації найбільш глибоко відпрацьованими є методи формування ВФ у стереоскопічних оптичних КЕСН [22, 33,78], де для покращення ефективності КЕСН застосовуються два однакових датчика інформації, що мають рознесені у картинній площині фазові центри. У більшості робіт, які присвячені системам ВО КЕСН [68, 69, 82], у якості одного з варіантів удосконалення розглядається пошук швидкодіючих алгоритмів формування ВФ, вихідним для яких є класичний кореляційний алгоритм, що реалізує оглядово-порівняльний метод суміщення ПЗ з ЕЗ. З огляду на час розробки таких алгоритмів та стан розвитку обчислювальної техніки, основна увага приділяється саме забезпеченню високої швидкодії. Одним із факторів забезпечення потрібної швидкодії вважається обмежений розмір ПЗ та ЕЗ.

В роботах [103, 104] розглядаються питання синтезу та можливої практичної реалізації алгоритмів формування ВФ КЕСН з гнучкою структурою побудови, однак, при цьому, не враховується необхідність усунення геометричних спотворень та локалізації ОП на фоні ХО Питання фільтрації перешкод розглядаються також на загальнотеоретичному рівні без визначення конкретних кількісних показників.

Питання синтезу методів формування ВФ для високоманеврених БПЛА (безпілотний вертоліт) розглянуті в роботі [33]. Припущення щодо високої маневреності БПЛА передбачає використання спільно з КЕСН СНС для корекції ІНС, за рахунок чого певним чином може бути подолана невизначеність системи наведення в умовах спотворення ПВ. Разом з тим при розробці методів формування ВФ не розглядається необхідність усунення неоднозначності локалізації ОП та усунення перспективних спотворень ПЗ ПВ.

Роботи [69, 82] присвячені дослідженню впливу різновидів геометричних спотворень на формування вирішальної функції КЕСН та результат місцевизначення. Разом з тим за результатами проведеного аналізу та оцінки впливу геометричних спотворень авторами не запропоновано ефективного

рішення щодо усунення негативного впливу даного виду спотворень, принаймні у відкритих джерелах інформації. Наведений у роботах [6, 24] аналіз впливу масштабних та афінних спотворень також носить чисто інформаційний характер вказуючи лише на необхідність оптимізації зображень ПВ за розмірами. У той же час дослідження впливу геометричних спотворень на результат місцевизначення КЕСН здійснено без урахування особливостей геометрії самої системи літальний апарат – ПВ.

Дослідження ефективності місцевизначення КЕСН, що проводилися останніми роками показали необхідність урахування при формуванні вирішальної функції КЕСН особливостей фоново-об'єктового складу ПВ. Розглянуті у роботах [28, 30 – 32] методи формування ЕЗ на ПВ з різною об'єктовою насиченістю, оцінки інформативності вихідних зображень ПВ [71, 72] можуть бути покладені в основу методів та алгоритмів формування ВФ. Разом з тим, розглянуті у роботах [23 – 27] моделі функціонування КЕСН, опису ПВ, методи та алгоритми формування вирішальної функції потребують конкретизації стосовно особливостей застосування оптико-електронних КЕСН БПЛА. Зокрема для випадку достатньо малої висоти польоту БПЛА над ділянками ПВ з високою об'єктовою насиченістю частина об'єктів має достатньо велику ступінь схожості з об'єктом прив'язки, що, в свою чергу, негативно впливає на ймовірність правильної локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на поточних зображеннях ПВ.

1.3.3 Інваріантні до геометричних спотворень поточних зображень та спотворень поверхні візування алгоритми кореляційно-екстремальної обробки

У роботі [22] для зниження впливу спотворень, що обумовлені зміною ПВ, а також властивостей атмосфери на трасі поширення електромагнітних хвиль стосовно оптико-електронної КЕСН пропонується застосовувати інваріантні КЕСН, які нечутливі до змін зображення ПВ, які мають природне походження. Однак застосування інваріантних алгоритмів формування ВФ без урахування особливостей фоново-об'єктового складу ПВ призводить до енергетичних втрат

при формуванні ВФ та точності місцевизначення КЕСН. Відсутність урахування фоновоб'єктового складу ПВ при відсутності її спотворень призводить до втрат у точності місцевизначення КЕСН від 2 до 3 разів, а у випадку застосування інваріантних алгоритмів втрати можуть бути більш суттєвими.

Відповідно до проведеного аналізу факторів, що впливають на процес формування ВФ, стану розвитку методів та алгоритмів формування вирішальної функції можуть бути обґрунтовані шляхи задоволення вимог, що висувуються до КЕСН БПЛА та здійснена загальна постановка задач наукових досліджень щодо удосконалення методу формування ВФ оптико-електронних систем навігації БПЛА.

1.3.4 Формулювання задач досліджень щодо удосконалення методу формування вирішальної функції оптико-електронних кореляційно-екстремальних систем навігації

Незважаючи на значні досягнення у розвитку КЕСН, яким присвячені роботи В.А. Ржевкіна, О.А. Красовського, В.К. Бакліцького, І.М. Белоглазова, С.Ф. Козубовського, М.М. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова, В.П. Тарасенка, Г.П. Чигіна, В.Л. Солуніна, В.В. Щербініна, В.І. Сирямкіна, В.С. Шидловського, О.С. Султанова, В.І. Антюфєєва, О.М. Сотнікова, В.А. Таршина, залишається не вирішеною задача навігації БПЛА з КЕСН на ділянках місцевості з високою об'єктовою насиченістю, при наявності ХО, а також в умовах зміни геометрії візування ПВ під дією випадкових факторів.

Для досягнення мети досліджень необхідно вирішити наступні нові наукові задачі:

1. Уточнити вимоги до систем вторинної обробки кореляційно-екстремальних систем навігації БПЛА при місцевизначенні на ПВ з високою об'єктовою насиченістю та в умовах впливу перспективних спотворень. Новизна вирішуваної задачі пов'язана з впливом на процес формування ВФ кореляційно-екстремальної системи навігації БПЛА двох факторів.

По-перше, у випадку навігації на ПВ з високою об'єктовою насиченістю відбувається збільшення СКП місцевизначення КЕСН, що обумовлено наявністю природних, або створених навмисно хибних об'єктів прив'язки, кількість яких може складати 5...10 і більше. У такому випадку згідно з [75, 76] потребує вирішення задача локалізації об'єкта прив'язки у присутності інших, близьких за характеристиками хибних об'єктів на ПЗ поверхні візування, на відміну від [30 – 32, 71, 72], де задача локалізації ОП вирішується на етапі формування ЕЗ і, при цьому, не розглядається вплив на результат формування ВФ геометричних спотворень. Ефективне рішення задачі місцевизначення КЕСН в умовах перспективних спотворень об'єктово насичених ділянок ПВ обумовлює необхідність уточнення вимог, що висуваються до КЕСН БПЛА при навігації на ПВ з високою об'єктовою насиченістю, а оскільки, як показано в роботах [80, 103], вплив вказаних спотворюючих факторів може бути усунутий на етапі вторинної обробки, то уточнення вимог, що висуваються до КЕСН, перш за все стосуються системи вторинної обробки інформації у КЕСН.

По-друге, вплив зовнішніх факторів на КЕСН БПЛА, що призводять до випадкової зміни його орієнтації у просторі і обумовлює появу масштабних та перспективних спотворень ПЗ поверхні візування. За результатами проведеного вище аналізу можливостей сучасних методів та алгоритмів вторинної обробки у КЕСН встановлено, що жоден з них не дозволяє забезпечити усунення впливу вказаних спотворюючих факторів, що і обумовлює новизну сформульованої задачі. Результати досліджень, проведених у [68, 82] передбачають оцінку впливу геометричних спотворень ПЗ поверхні візування та дозволяють відповідно до критерію мінімуму геометричних спотворень обрати найменш чутливий до них алгоритм кореляційно-екстремальної обробки. У роботах [6, 24] мінімальний вплив геометричних спотворень пов'язують з вибором розмірів зображень. Разом з тим, при розробці методів кореляційно-екстремальної обробки (КЕО) повинен враховуватися фактор спотворення геометрії представлення ПВ на ПЗ у процесі отримання поточної інформації про ПВ. Перш за все це обумовлено особливостями польоту БПЛА, у процесі якого під впливом повітряних мас може відбуватися

випадкова зміна орієнтації БПЛА і змінюватися геометрія візування ПВ. Невелика висота польоту БПЛА та випадкова зміна орієнтації у просторі можуть призводити до значних змін ФОС на ПЗ.

2. За результатами уточнення вимог до системи ВО КЕСН БПЛА необхідно розробити математичну модель процесу функціонування КЕСН БПЛА та здійснити аналіз елементів цієї моделі. Особливістю моделі є урахування факторів, що впливають на функціонування КЕСН БПЛА [35, 36] та результат місцевизначення. Розробка математичної моделі повинна здійснюватися виходячи зі сформульованих [75, 76] принципів опису ПВ, відповідно до яких вона вважаються основною інформативною складовою самої КЕСН. Стан, фоновий-об'єктовий склад ПВ та геометрія системи ПВ – БПЛА визначають математичну модель процесу формування ВФ, ефективність місцевизначення КЕСН та потребують застосування відповідних методів та алгоритмів для задоволення вимог, що висуваються до КЕСН. Вплив вказаних факторів обумовлює необхідність відходу від класичного представлення системи вторинної обробки КЕСН, коли основною є операція кореляційного порівняння ПЗ з ЕЗ [6, 24], та повинна передбачати виконання операцій, спрямованих на зменшення впливу спотворюючих факторів. Такі підходи до формування ВФ запропоновані у роботах [27, 42, 43], разом з тим, запропоновані авторами рішення не дозволяють напряду здійснити усунення негативного впливу на результат формування ВФ геометричних спотворень ПЗ та ХО, схожих на ОП. Також при розробці методів ВО повинні бути враховані наукові досягнення щодо формування ЕЗ [28, 30 – 32], згідно з якими вибір об'єкта (об'єктів) прив'язки здійснюється на основі об'єктивного аналізу інформативних параметрів ПВ, а не на узагальнених рекомендаціях щодо вибору параметрів ЕЗ та суб'єктивного вибору оператора [24, 33]. Визначення напрямків удосконалення методів вторинної обробки у КЕСН БПЛА потребує ретельного аналізу складових математичної моделі процесу функціонування КЕСН, її складових та зв'язків між ними. При цьому основна увага повинна бути приділена математичній моделі опису ПВ.

3. Визначити склад інформативних параметрів, які доцільно використовувати для опису об'єктів і фонів ПВ та розробити модель опису поверхні візування у

районі прив'язки КЕСН.

Вибір інформативних параметрів та опис ПВ повинен здійснюватися з урахуванням того, що:

- інформативні параметри опису ПВ – це параметри, які вимірюються оптико-електронною КЕСН у процесі місцевизначення;

- ПЗ та ЕЗ, що використовуються КЕСН мають однакову фізичну природу;

- інформативні параметри забезпечують виділення відмін ОП та навколишніх фонів з заданою якістю відповідно до обраного методу формування ЕЗ [28, 30 – 32, 105, 106]. Відміни ОП від фонів обумовлені структурою ПВ;

- хибні об'єкти на ПВ можуть бути обумовлені умовами візування, природними явищами та результатом діяльності людини, та описуються такими ж інформативними параметрами, що і ОП. Штучні хибні об'єкти можуть бути елементами інфраструктури ПВ, а також створені навмисно для зниження ефективності функціонування КЕСН;

- опис ПВ повинен забезпечувати формування унімодальної ВФ при наявності ХО та геометричних спотворень ПВ з заданими показниками якості.

Відповідно до цього в основу класифікації ділянок ПВ з урахуванням ФОС може бути покладена класифікація, яка наведена у роботах [75, 76]. Відповідно до цієї класифікації усі ділянки ПВ за ФОС поділяються на ділянки з низькою, нормальною та високою об'єктовою насиченістю за обґрунтовано визначеними класифікаційними ознаками.

Враховуючи те, що ПВ є основною інформаційною складовою КЕСН, то математична модель опису ПВ є основою для розробки методів та алгоритмів формування ВФ КЕСН БПЛА.

4. Розробити метод та алгоритм формування ВФ КЕСН, заснованих на адаптації еталонних зображень до геометричних спотворень ПЗ.

Питання синтезу методів формування ВФ для високоманеврених БПЛА (безпілотний вертоліт) розглянуті в роботі [33]. Припущення щодо високої маневреності БПЛА передбачає використання спільно з КЕСН СНС для корекції ІНС, за рахунок чого певним чином може бути подолана невизначеність системи

наведення в умовах спотворення ПВ. Однак, такий підхід обумовлений можливістю використання СНС, як системи, що знаходиться у власності країни.

Питання впливу на показники якості місцевизначення КЕСН ЛА умов візування розглянуті у роботах [80 – 82].

У роботах [6, 24, 33, 69, 82] висуваються вимоги до алгоритмів формування ВФ. У той же час мова не йде про вимоги, які повинні висуватися в умовах спотворення геометрії ПЗ.

Новизна постановки задачі полягає у тому, що на даний момент не існує відомого методу, який дозволив би забезпечити формування унімодальної ВФ в умовах геометричних спотворень ПЗ поверхні візування, які обумовлені зміною геометрії системи «БПЛА – ПВ», а також забезпечити оцінку характеру та ступеня геометричного спотворення ПЗ. Важливою особливістю розроблюваного метода є те, що він повинен забезпечувати оцінку спотворень та формування ВФ у режимі реального часу.

5. Розробити метод та алгоритм локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на поточному зображенні з кількома яскравими (хибними) об'єктами. У роботах [6, 24, 33, 69, 77, 82] розглянуті практично всі відомі на теперішній час типи алгоритмів ВО, серед яких і алгоритми структурного аналізу [77] зображень, багаторівневі, ієрархічні [69, 82], а також деревоподібні алгоритми та адаптивні [33]. Разом з тим, у відомих роботах не розглядалася задача локалізації ОП на фоні ХО, що характерно варіанту застосування БПЛА з КЕСН у районах ПВ з розвинутою інфраструктурою.

Висновки по розділу 1

1. Здійснено уточнення вимог до СН БПЛА. Показана необхідність урахування, в першу чергу, геометричних спотворень, що виникають в залежності від геометрії візування КЕСН, а також особливостей ПВ, що призводять до виникнення хибних об'єктів.

2. Проведено аналіз принципів побудови та особливостей функціонування

відомих систем навігації (СН) літальних апаратів, обґрунтований підхід до розробки СН сучасних ЛА, заснований на використанні автономних систем керування з додатковими інформаційними каналами. Визначено шляхи забезпечення вимог, що висуваються до КЕСН БПЛА і передбачають розробку нових методів формування ВФ КЕСН.

3. Сформульовані основні задачі досліджень, до яких відносяться:

– розробка математичної моделі процесу функціонування кореляційно-екстремальної системи навігації ЛА, аналіз елементів моделі.

– визначення інформативних параметрів та розробка моделі опису поверхні візування.

– розробка методу та алгоритму формування ВФ КЕСН, заснованих на адаптації еталонних зображень до перспективних спотворень.

– розробка методу та алгоритму локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на поточному зображенні з кількома яскравими об'єктами.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ
КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО
ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА. ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

У другому розділі наведено результати розробки математичної моделі процесу функціонування оптико-електронної КЕСН БПЛА. Удосконалення математичної моделі процесу формування ВФ комбінованої КЕСН здійснено на основі встановленого взаємозв'язку між геометричними спотвореннями, що виникають у процесі візування, а також урахування кореляційних властивостей ПВ, в основу опису якої покладено розроблену автором модель узагальненого телеграфного процесу.

Вихідні передумови для розробки моделі процесу функціонування ОЕ КЕСН БПЛА опубліковані у роботах [34, 35], також обґрунтовані напрями досліджень, які спрямовані на забезпечення високоточного місцевизначення КЕСН БПЛА в умовах високої об'єктової насиченості.

2.1 Результати розробки математичної моделі процесу функціонування оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотних літальних апаратів

Розробку математичної моделі процесу функціонування ОЕ КЕСН БПЛА здійсним з урахуванням, що:

- ПВ розглядається як основна інформаційна складова КЕСН, що має унікальний для кожного етапу прив'язки фоново-об'єктовий склад;
- визначення просторового положення БПЛА із заданою точністю прив'язка ПЗ до ЕЗ здійснюється у процесі польоту БПЛА над ділянками ПВ з різним ФОС;
- ділянки ПВ за ФОС класифікуються за класифікаційними ознаками, визначеними у [33, 72, 75, 76];
- ІНС забезпечує гарантоване виведення БПЛА у заданий район прив'язки з

урахуванням впливу зовнішніх факторів на об'єкт навігації;

- приймачем інформації для місцевизначення КЕСН є оптико-електронний датчик інформації;

- лінійні розміри ПЗ визначаються через розміри елемента розподілення (пікселя) $\Delta x, \Delta y$ зображення і їх кількості M_1, M_2 ;

- спотворення інформації про ПВ оптико-електронним датчиком КЕСН відсутнє;

- об'єктом навігації є малошвидкісний БПЛА з горизонтальною траєкторією польоту.

Необхідно розробити математичну модель процесу формування ВФ КЕСН БПЛА, яка дозволяє враховувати особливості ФОС ПВ, а також вплив спотворюючих факторів на об'єкт навігації.

Відповідно результатів аналізу та уточнення вимог, що висувуються до систем навігації БПЛА, а також можливих шляхів удосконалення КЕСН, спрямованих на усунення впливу спотворюючих факторів та фоновоб'єктового складу ПВ, що відповідає меті досліджень, узагальнену структуру КЕСН БПЛА можна представити у вигляді, наведеному на рис. 2.1.

Відповідно до наведеної на рис. 2.1 узагальненої структурної схеми КЕСН, забезпечення потрібних вимог до КЕСН, які функціонують в умовах високої об'єктової насиченості та впливу зовнішніх факторів, що призводять до геометричних спотворень ПВ, може досягатися:

- прогнозуванням можливих геометричних спотворень ПЗ на підставі аналізу траєкторії польоту БПЛА;

- формуванням заздалегідь на етапі підготовки програми польоту БПЛА сукупності еталонних зображень $S_{RI}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_G)$, відповідно до прогнозованих геометричних умов візування;

- розробкою та застосуванням методів і алгоритмів локалізації об'єктів прив'язки КЕСН в умовах високої об'єктової насиченості та наявності хибних об'єктів, які можуть бути сприйняті системою у якості об'єкта прив'язки.

Відповідно до узагальненої структурної схеми КЕСН для формування ВФ

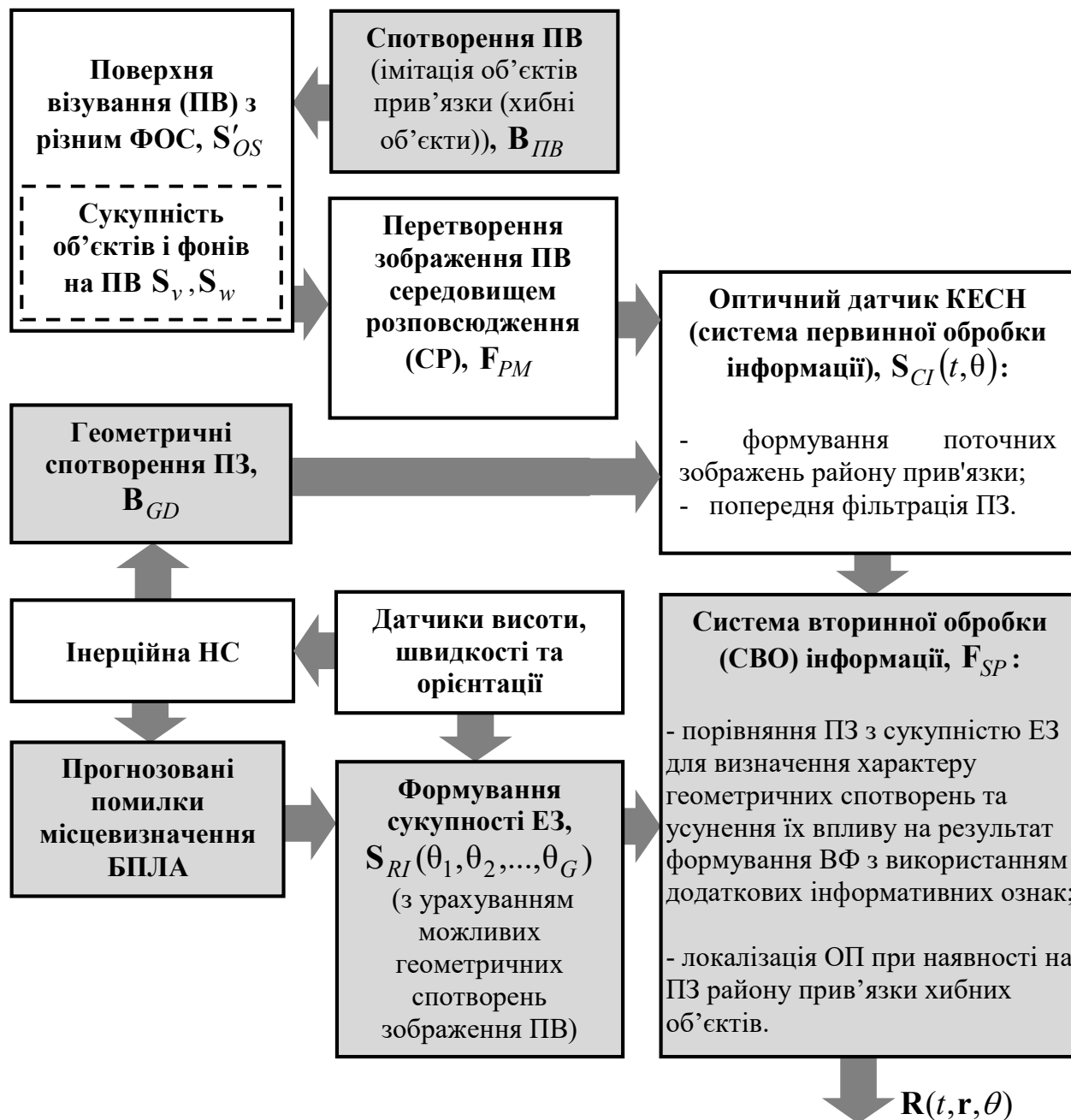


Рисунок 2.1 – Узагальнена структура КЕСН БПЛА

створюється сукупність ЕЗ $S_{RI}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_G)$ для різних варіантів візування об'єкта прив'язки під кутами $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_G)$. Відповідно до цього, для кожного з сформованих ЕЗ системою буде формуватися одна з часткових ВФ $R_i(t, r, \theta, \theta_i)$:

$$R_i(t, r, \theta, \theta_i) = F_{SP}[S_{CI}(t, \theta), S_{RI}(\theta_i)], \quad (2.1)$$

де $\mathbf{S}_{RI}(\theta_i)$ – еталонне зображення ПВ з ОП для θ_i кута візування;

$\mathbf{S}_{CI}(t, \theta)$ – поточне зображення ПВ;

\mathbf{F}_{SP} – оператор порівняння зображень.

З урахуванням впливу середовища розповсюдження, ФОС ПВ, впливу геометрії візування, шумів приймальної системи, а також розробленої моделі зображення ПВ в широкому спектральному діапазоні у вигляді узагальненого телеграфного процесу для будь-якої ділянки ПВ з відповідним конкретному району інтервалом кореляції τ_k , ВФ в операторній формі має вигляд:

$$\mathbf{R}_i(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_i) = \mathbf{F}_{SP} \left[\mathbf{F}_{PM} (\mathbf{F}_{RS} (\mathbf{F}_{OS} (\varepsilon, \mu, t, \theta), \mathbf{n}(t))), \mathbf{S}_{RI}(\theta_i) \right], \quad (2.2)$$

де \mathbf{F}_{PM} – оператор середовища розповсюдження сигналів;

\mathbf{F}_{RS} – оператор первинної обробки інформації в приймальній системі КЕСН;

$\mathbf{F}_{OS}(t, \theta_i)$ – оператор, що описує ПВ;

ε, μ – діелектрична та магнітна проникності об'єктів та фонів ПВ;

$\mathbf{n}(t)$ – адитивний шум приймальної системи.

Така модель ПЗ справедлива в разі, якщо поворот ПЗ щодо ЕЗ відсутній. В іншому випадку модель ПЗ повинна враховувати геометричні спотворення, обумовлені геометрією візування.

При теоретичних дослідженнях КЕСН використовують ЕЗ, які синтезовані заздалегідь та не враховують геометричних умов візування району місцевизначення КЕСН з борта БПЛА. Тобто ЕЗ на етапі вторинної обробки не підлягають перетворенням. Але у процесі функціонування КЕСН може виникати необхідність корекції ЕЗ до конкретних умов візування.

Розглянемо формування ВФ у випадку виникнення геометричних спотворень на типових поверхнях візування, модель яких розроблена та досліджена в роботах [26, 27]. За результатами статистичного моделювання процесу місцевизначення

КЕСН на ПВ з різним ФОС визначено, що яскравість елемента неспотвореного вихідного зображення (ВЗ) $S_{OI}(i, j)$ має описуватися через яскравість об'єктів і фонів ПВ

$$S_{OI} = \left\| \sum_{v=1}^V F_{O_v}(i, j) + \sum_{w=1}^W F_{B_w}(i, j) \right\|, \quad (2.3)$$

де F_{O_v} – яскравість зображення v -го об'єкта;

F_{B_w} – яскравість зображення w -го фону;

V та W – кількість об'єктів та фонів різної яскравості і форми на ВЗ.

Загальна кількість об'єктів і фонів (V і W) на зображенні ПВ може бути довільною. В подальших дослідженнях для урахування ступеня об'єктової насиченості ПВ скористаємось результатами, що наведені в роботах [28, 30, 33, 75, 76].

Згідно з цими роботами зображення ПВ з кількістю об'єктів $V \leq V_{\min} = 3 \dots 5$ віднесені до ПВ з низькою об'єктовою насиченістю та позначені підмножиною Φ_{01} , зображення ПВ з кількістю об'єктів $V_{\min} < V \leq V_{\max} = 10 \dots 15$ віднесені до ПВ з нормальною об'єктовою насиченістю (Φ_{02}), а зображення ПВ з $V > V_{\max}$ – до ПВ з високою об'єктовою насиченістю (Φ_{03}).

При описі геометрії візування покладемо відомими висоту h_0 зйомки ПВ з БПЛА, координати центру ПЗ в системі координат, пов'язаної з ПВ в районі прив'язки (рис. 2.2), а також розподіл яскравостей об'єктів та фонів. Крім того, припустимо, що діаграма спрямованості антени (ДСА) (по потужності) для кожного з парціальних променів багатопроектної антени КЕСН відома, також відомі розміри матриці ЕЗ та крок сітки ЕЗ по кожній з координат.

Відповідно до сітки зображення ПВ (рис.2.3) лінійні розміри на краях відносно центру зображення мають суттєву нелінійну відмінність. Ці обставини обумовлюють необхідність їх врахування для зменшення або повного усунення перспективних спотворень зображень.

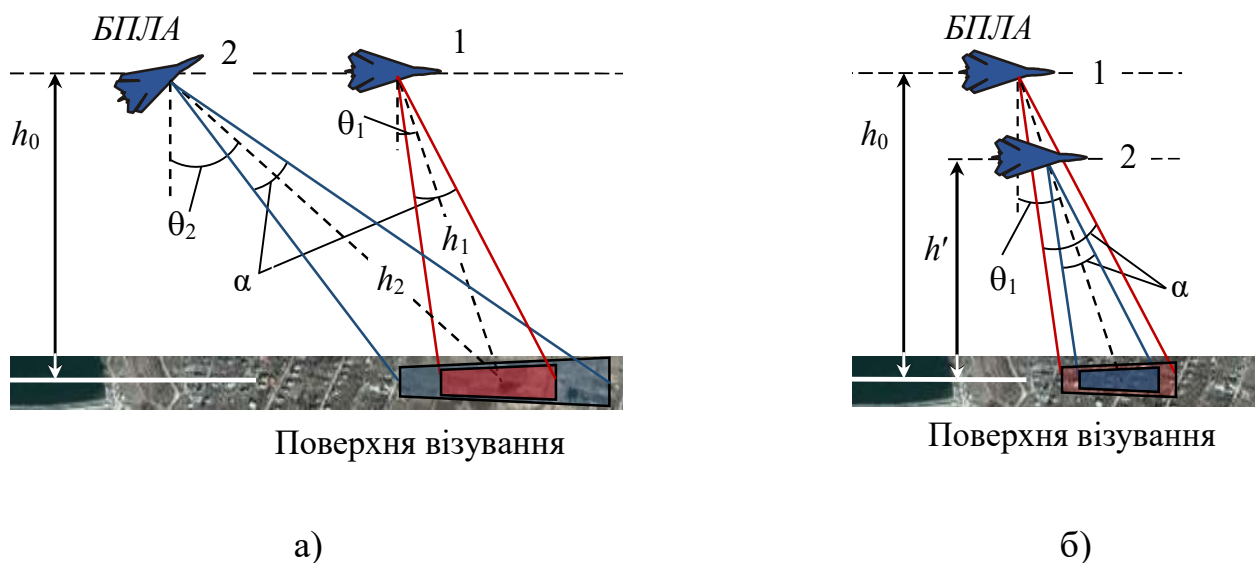


Рисунок 2.2 – Геометрія візування ПВ при наявності: а) перспективних; б) масштабних спотворень

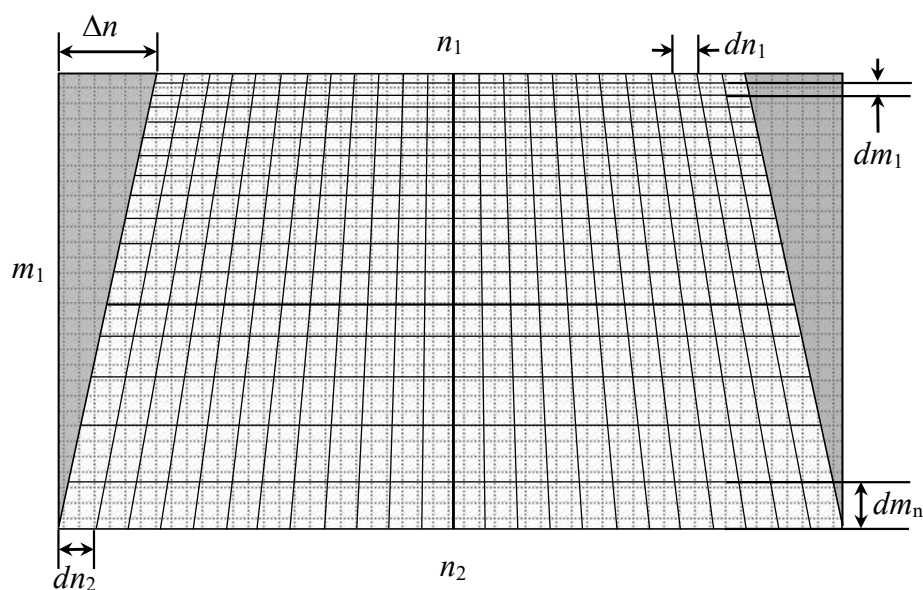


Рисунок 2.3 – Сітка ПЗ при наявності геометричних (перспективних) спотворень

Для представлення зображень ПВ використовуються різні підходи. Результати аналізу відомих типів представлення зображень ПВ у різних спектральних діапазонах показують, що в найбільшій мірі процесу зйомки зображення адекватно зонне представлення [5-6]. Зонна структура зображення формується за рахунок відмінностей електрофізичних властивостей матеріалів і покривів ділянок ПВ, які

в свою чергу призводять до відмінностей у відбивних, випромінювальних характеристиках об'єктів ПВ і в кінцевому підсумку їх яскравісних характеристик.

Зонна модель опису зображення ПВ адекватно характеризує сцену зображення і може бути описана взаємною кореляційною функцією узагальненого телеграфного процесу і повністю враховує можливі варіації яскравості матеріалів та покривів, а також можливість зміни зонної структури ПВ. Згідно [4] зображення ПВ мають не гаусівський закон розподілу і містять зони з постійними у часі електрофізичними характеристиками різних покривів і матеріалів. Найбільш характерні стійкі ознаки зображення, як правило, є межами цих незмінних ділянок ПВ. Тому найбільша кількість інформації про ПВ в кадрі зображення зосереджено на межах зон [2,3]. У той же час, виходячи з випадкового характеру наповнення зображень, що формуються, підхід до їх подання повинен бути статистичний, а метод аналізу – кореляційно-спектральний. Ступінь схожості зображення з детермінованим еталонним зображенням (шаблоном) визначається обчисленням взаємної кореляційної функції (ВКФ) з пошуком екстремуму цієї функції, яка обумовлює ступінь стохастичного зв'язку зображень. Для детермінованих зображень існують оптимальні заходи подібності. У розглянутому випадку, для шаблону та ансамблю зображень оптимальної міри подібності не існує. Тому, враховуючи ту обставину, що при певних припущеннях ОЕ КЕСН можна розглядати як лінійні системи, доцільно застосовувати лінійні міри подібності, зважаючи на їх простоту і оптимальність для гаусового сигналу. Відомо, що будь-яка лінійна міра подібності може бути виражена через кореляційну функцію. Тому, в якості моделі ПЗ може бути обрана взаємна кореляційна функція [7]. Так як щільність ймовірності зображення невідома, то для визначення ВКФ зображення уявімо поверхню візування $S_{CI}(t, \theta)$ як сукупність однорідних зон S_i і покривів A_i , кожен з яких характеризується своїм значенням яскравості T_{Ri} , яка однакова в межах k -ої зони:

$$S_{CI_k}(t, \theta) = S_i T_{Ri} r_i(x, y, t), \quad (2.4)$$

де $r_i(x, y, t)$ – індикаторна функція. $r_i(x, y, t) = 1$, якщо $x, y \in A_i$, $r_i(x, y, t) = 0$,

якщо $x, y \notin A_i$.

Тоді, зображення ПВ у поданні (2.4) в будь-якому можливому з напрямків матиме вигляд, аналогічний узагальненому телеграфному процесу.

Відомо [6], що кореляційна функція такого процесу описується виразом:

$$R(r) = \exp(-\alpha / r) , \quad (2.5)$$

де $\alpha = 1/\tau_k$ – величина зворотна інтервалу кореляції τ_k .

Якщо припустити, що статистичні властивості однорідних зон поверхні однакові, то їх можна вважати ізотропними. В цьому випадку достатньо функцію кореляції (2.5) визначати по одній координаті (x або y).

В загальному випадку функція кореляції зображення для нескінченно великої вибірки в залежності від напрямку та розмірів однорідних зон буде визначатися виразом:

$$R(\vec{r}) = \exp(-\alpha / r). \quad (2.6)$$

Для кінцевої великої вибірки кореляційна функція (2.6) буде асимптотично наближатися до експоненти.

Таким чином, узагальнена модель зображення ПВ в широкому спектральному діапазоні може бути представлена кореляційною функцією узагальненого телеграфного процесу для будь-якої ділянки ПВ з відповідним конкретного району інтервалом кореляції.

Відповідно до (2.6) кінцевий вираз для ВФ з урахуванням кореляційних властивостей ПВ може бути представлений у наступному вигляді:

$$\mathbf{R}_i(t, r, \theta, \theta_i) = \mathbf{F}_{SP} [(\mathbf{F}_{PM} (\mathbf{F}_{RS} (\exp(-\alpha / r), \mathbf{n}(t)), \mathbf{S}_{RI} (\theta_i))] \quad (2.7)$$

Оптичні зображення також можуть бути описані узагальненим телеграфним

процесом, так як в основу формування зображення покладені результати аерофотозйомки, що обумовлюють їх зонну структуру. Таким чином, обґрунтований статистичний підхід до опису зображень ПВ, що дозволяє в основу моделі зображення покласти узагальнений телеграфний процес, що описує ПВ відповідною кореляційною функцією.

При заповненні сцени зображення, отриманої в результаті аерофотозйомки місцевості, значеннями яскравості може бути отримано зображення зі ступенем деталізації, яке визначається роздільною здатністю фотозображення.

Очевидно, що в залежності від сезону (літо, зима, міжсезонних переходів весна – літо, осінь – зима) результат аерофотозйомки місцевості буде різним для районів з регулярним сніговим покривом.

Таким чином, існує однозначно визначена межа розділу між об'єктами на ПВ, а, відповідно, модель зображення може бути описана узагальненим телеграфним процесом.

Для урахування впливу перспективних спотворень доцільно використовувати модель опису ПВ, яка враховує кореляційні властивості зображень ПВ та уявляє собою узагальнений телеграфний процес [35]. Відповідно до цієї моделі ПВ, вибір фрагменту місцевості для побудови ЕЗ доцільно здійснювати кореляційним методом на основі побудови взаємної кореляційної функції (ВКФ) та пошуку її максимального значення. Але, враховуючи нерівномірність спотворень зображення, пошук максимального значення ВКФ потрібно здійснювати шляхом побудови окремих ВКФ для кожного елементу розрізнення та побудови узагальненої ВКФ.

Для формування часткових вирішальних функцій для різних кутів візування КЕСН необхідно мати сукупність G еталонних зображень, $G - 1$ з яких побудовані з урахуванням виникнення перспективних спотворень зображення ПВ відповідно до виразу:

$$\mathbf{S}_{RI} = \|\mathbf{S}_{RI}(\theta_1) \quad \mathbf{S}_{RI}(\theta_2) \quad \dots \quad \mathbf{S}_{RI}(\theta_G)\|, \quad (2.8)$$

де $\mathbf{S}_{RI}(\theta_1)$, $\mathbf{S}_{RI}(\theta_2)$, $\mathbf{S}_{RI}(\theta_g)$ – ЕЗ, сформовані при наявності перспективних спотворень.

В подальшому відповідно до виразу (2.1) доцільно сформувати часткові вирішальні функції, які залежать від параметра θ_g , що характеризує перспективні спотворення ЕЗ ($\mathbf{S}_{RI}(\theta_g)$), так і параметра θ , що характеризує геометрію візування ПВ при формуванні ПЗ ($\mathbf{S}_{CI}(t, \theta)$) у поточний момент часу:

$$\mathbf{R}_g(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_i) = \mathbf{F}_{SP} \left[\mathbf{F}_{PM} (\mathbf{F}_{RS} (\exp(-\alpha / r), \mathbf{n}(t)), \mathbf{S}_{RI}(\theta_g)) \right]. \quad (2.9)$$

Визначення часткових $\mathbf{R}_g(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_i)$ та результуючої ВФ $\mathbf{R}(t, \mathbf{r})$ з урахуванням геометрії візування КЕСН при формуванні ПЗ обумовлює новизну постановки вирішуваної задачі на відміну від відомих, коли у процесі формування ВФ визначався лише результат впливу на неї геометричних спотворень.

2.2 Аналіз та обґрунтування характеристик елементів моделі опису процесу функціонування оптико-електронної системи навігації БПЛА

2.2.1 Опис поверхні візування

У відповідності до розробленої у п 2.1 та представленої на рис. 2.1 узагальненої структури КЕСН БПЛА, опис ПВ та її спотворень повинні ґрунтуватися на наступних принципах:

- інформативні параметри, які використовуються для опису ПВ, є параметрами, вимірюваними датчиками КЕСН;
- незалежно від вимірюваних параметрів інформативні поля опису ПВ повинні забезпечувати єдність представлення поточних зображень району прив'язки;
- інформативні параметри дозволяють виділяти особливості, які обумовлені структурою ПВ;

– заходи, що проводяться противником на ПВ (створення хибних об'єктів) повинні реєструватися оптико-електронним датчиком інформації КЕСН;

– інформативні поля, які використовуються для опису ПВ, з позицій КЕСН, повинні забезпечувати формування ВФ при наявності геометричних спотворень на ділянках ПВ з високою об'єктовою насиченістю, а також при наявності спеціально створених хибних об'єктів прив'язки;

– сукупність інформативних ознак, обраних для опису ПВ, повинна бути основою для розробки методів підвищення точності місцевизначення КЕСН БПЛА;

– інформативні поля, які використовуються для опису ПВ, а також сформовані заздалегідь ЕЗ мають однакову фізичну природу.

В якості інформативного параметра оптичного ГФП традиційно [96 – 99] використовують яскравість, відбиття і контраст елементів зображення. У якості додаткових інформативних параметрів можуть виступати кольорові відмінності об'єктів і фонів. Разом з тим, кольорові властивості об'єктів і фонів є менш стабільними ніж параметри яскравості та контрасту [22].

При формуванні ПЗ визначними є електрофізичні властивості (ЕФВ) матеріалів покривів ПВ, які згідно з [22, 24, 33, 100, 116] мають різну міру впливу на ПЗ, що формуються датчиками у різних діапазонах хвиль. Саме зміна ЕФВ є однією з причин, що обумовлює появу спотворень ПВ природного та штучного характеру. Для кращого урахування впливу ЕФВ на результат формування ПЗ зображення у якості додаткового параметра застосовується колір елементів об'єктів і фонів. У той же час застосування у моделі процесу формування ВФ різних кольорових складових передбачає наявність різних каналів обробки кольорових складових з подальшим їх об'єднанням у процесі формування ВФ.

Враховуючи те, що для місцевизначення оптико-електронної КЕСН БПЛА використовується лише один з наявних на ПЗ ПВ об'єкт прив'язки (ОП), то решта об'єктів буде відноситися до заважаючих. Якщо до визначення об'єкта прив'язки на етапі формування польотного завдання та формування ЕЗ використані наведені у роботах [79, 104 – 106] методи, відповідно до зроблених припущень щодо моде-

лі КЕСН БПЛА, об'єкт прив'язки має найбільшу серед усіх об'єктів яскравість.

Для опису ПВ приймемо модель поточного зображення S_{CI} , у якій неспотворене вихідне зображення S_{OI} описується значеннями яскравості відповідних об'єктів і фонів ПВ в елементах розрізнення:

$$S_{CI} = S_{OI} = \|S(i, j)\|, \quad (2.10)$$

де

$$S(i, j) = \begin{cases} S_v(i, j), & \text{при } S(i, j) \in S_v, \\ S_w(i, j), & \text{при } S(i, j) \in S_w, \end{cases} \quad (2.11)$$

$S_v(i, j)$ – яскравість елемента зображення v -го об'єкта S_v ;

$S_w(i, j)$ – яскравість елемента зображення w -го фону S_w ;

V та W – кількість об'єктів і фонів різної яскравості та форми на ВЗ, відповідно.

У відповідності з (2.10) у моделі ПЗ поверхні візування врахуємо наступні припущення:

- поточне та вихідне зображення мають однаковий розмір $N_1 \times N_2$ пікселів;
- об'єкти ПВ мають значні по відношенню до фону значення яскравості.

Об'єкт прив'язки КЕСН має найбільшу яскравість;

– об'єкт прив'язки та фон у межах елемента розрізнення є однорідними по яскравості;

– кожен i, j -й елемент ПЗ являє собою нормально розподілену величину з дисперсією σ_{ij}^2 і середнім значенням яскравості $S(i, j)$. У випадку відсутності перешкод $S(i, j)$ може приймати одне з двох значень: $S_v(i, j)$ або $S_w(i, j)$. Контраст ОП відносно навколишнього фону визначається як $\Delta S = S_v(i, j) - S_w(i, j)$;

- дисперсія шумів у приймальних каналах КЕСН однакова, тобто

$$\sigma_{ij}^2 = \sigma^2, i \in \overline{1, N_1}, j \in \overline{1, N_2}.$$

Приклад зображення ПВ з високою об'єктовою насиченістю, на якому присутні об'єкт прив'язки та хибні об'єкти наведений на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Зображення району прив'язки КЕСН з високою об'єктовою насиченістю

Таким чином із наявної сукупності об'єктів S_v лише один (припустимо $v=1$) відповідає ОП, $S_1 = S_{OP}$, а решта $S_2, S_3, \dots, S_V \in S_{XO}$.

Відповідно до цього модель неспотвореного зображення ПВ при наявності хибних об'єктів може бути представлена у вигляді:

$$S_{CI} = S_{OP} \cup S_{XO} \cup S_{\Phi},$$

де S_{Φ} – частина поточного зображення, зайнята фоновими складовими.

2.2.2 Оцінка стану атмосфери у районі прив'язки

Питанням поширення оптичного випромінювання в атмосфері, впливу атмосфери на оптичний сигнал, впливу турбулентності атмосфери на оптичний сигнал присвячена велика кількість робіт, зокрема [22, 24, 56 – 60, 117].

Енергетичні втрати оптичного сигналу через аерозольне і молекулярне (релеївське) розсіювання є одним з головних факторів, що визначають спотворення сигналу. Коефіцієнт розсіювання світла в газах визначається виразом [117] :

$$\sigma_p(\lambda) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta},$$

де N – кількість молекул в одиниці об'єму;

n – показник переломлення середовища;

λ – довжина хвилі випромінювання;

δ – фактор деполаризації розсіяного випромінювання.

У табл. 2.1 наведені значення коефіцієнтів $\sigma_p(\lambda)$ вертикального шару атмосфери для різних довжин хвиль при температурі $t = 15^0 C$ та тиску $p = 1,013 \cdot 10^5 Pa$ у приземному шарі.

Як видно з табл. 2.1, енергетичні втрати оптичних сигналів, обумовлені молекулярним розсіюванням, можуть бути визначені з великою точністю, якщо відомо розподіл щільності по висоті. Зазвичай прийнято вважати, що до висот 30 км досить добре виконується умова стандартної моделі атмосфери, тому проблема кількісної оцінки зазначених втрат вважається вирішеною.

Аерозолі, що найчастіше зустрічаються у атмосфері являють собою краплі води в рідкому і твердому станах, що об'єднуються загальним поняттям - гідрометеори (дощ, туман, сніг і т.д.). Ослаблення енергії хвилі видимого і інфрачервоного діапазонів пояснюється тим, що хвиля наводить в краплях струми зміщення. Крім того, струми зміщення є джерелами вторинного і розсіяного випромінювання, що також створює ефект ослаблення в напрямку поширення хвилі, причому у видимому діапазоні основні втрати енергії створюються за рахунок явища розсіювання.

Коефіцієнти аерозольного розсіювання дуже сильно залежать від розмірів, хімічного складу і концентрації частинок аерозолу, які схильні до великої мінли-

вості в часі і просторі.

Незважаючи на те, що розміри, концентрація, хімічний склад частинок атмосферних аерозолів змінюються в досить широких межах, можна виділити деякі характерні типи аерозолів (хмари, тумани, димки, опади, пил).

Таблиця 2.1

Коефіцієнти молекулярного розсіювання $\sigma_p(\lambda)$ оптичної товщі τ_p вертикального шару всієї атмосфери [117]

λ , мкм	$\sigma_p(\lambda)$, км ⁻¹	τ_p	λ , мкм	$\sigma_p(\lambda)$, км ⁻¹	τ_p
1	2	3	4	5	6
0,30	$1,446 \cdot 10^{-1}$	1,2237	0,65	$5,893 \cdot 10^{-3}$	0,0499
0,32	$1,098 \cdot 10^{-1}$	0,9290	0,70	$0,364 \cdot 10^{-3}$	0,0369
0,34	$8,494 \cdot 10^{-2}$	0,7188	0,80	$2,545 \cdot 10^{-3}$	0,0215
0,36	$6,680 \cdot 10^{-2}$	0,5653	0,90	$1,583 \cdot 10^{-3}$	0,0134
0,38	$5,237 \cdot 10^{-2}$	0,4508	1,06	$8,458 \cdot 10^{-4}$	0,0072
0,40	$4,303 \cdot 10^{-2}$	0,3641	1,26	$4,076 \cdot 10^{-4}$	0,0034
0,45	$0,644 \cdot 10^{-2}$	0,2238	1,67	$1,327 \cdot 10^{-4}$	0,0011
0,50	$1,716 \cdot 10^{-2}$	0,1452	2,17	$4,586 \cdot 10^{-5}$	0,0004
0,55	$0,162 \cdot 10^{-2}$	0,0984	3,50	$6,830 \cdot 10^{-6}$	0,0001
0,60	$8,157 \cdot 10^{-3}$	0,0690	4,00	$4,002 \cdot 10^{-6}$	0,0000

З достатньою для інженерних розрахунків точністю можна сказати, що концентрація аерозолу з ростом висоти до 10 км зменшується. Характеристика аерозольного ослаблення взята з робіт [118 – 120].

Атмосфера складається головним чином з азоту, кисню і аргону, процентний вміст яких наведено в табл. 2.2.

Крім того, в табл. 2.2 наводяться дані про інші компоненти атмосфери, за винятком водяної пари [119].

В атмосфері містяться так само сліди багатьох інших газів, які не мають суттєвого впливу на поглинання видимих та інфрачервоних хвиль. В окремих ло-

кальних районах можна зустріти гази, що поглинають видимі та інфрачервоні випромінювання, але не наведені в табл. 2.2. Такі райони потребують додаткового дослідження.

Враховуючи висоту польоту БПЛА найбільш суттєвим є вплив гідрометеорів на трасі поширення оптичного сигналу.

Таблиця 2.2

Склад сухого повітря [118 – 120]

Складові атмосфери	Середня об'ємна концентрація у тропосфері, %	Примітки
1	2	3
N_2	78,084	У верхній іоносфері дисоціює; на більш низьких рівнях перемішаний.
O_2	20,946	Дисоціює вище 95 км; на більш низьких рівнях перемішаний.
Ar	0,934	Перемішаний до висоти 110 км; вище – дифузійне розділення.
CO_2	$3,3 \cdot 10^{-2}$	Відчуває незначні зміни; перемішаний до 100 км; вище – дисоціює
Ne	$1,818 \cdot 10^{-3}$	Перемішаний до 100км; вище – дифузне розділення.
He	$5,24 \cdot 10^{-4}$	Перемішаний до 110 км; вище дифузне розділення.
CH_4	$1,6 \cdot 10^{-4}$	В тропосфері перемішаний; в стратосфері окисляється; в мезосфері дисоціює.
Kr	$1,14 \cdot 10^{-4}$	Перемішаний до 100 км; вище – дифузне розділення.
H_2	$5 \cdot 10^{-5}$	У тропосфері і стратосфері перемішаний, вище дисоціює.
NO_2	$3,5 \cdot 10^{-5}$	У поверхні землі відчуває незначні зміни; поступово дисоціює в стратосфері і мезосфері.
CO	$7 \cdot 10^{-6}$	Продукт окислення, вміст мінливий.
O_3	10^{-6}	Відчуває суттєві зміни, має фотохімічне походження.
NO_2 NO	від 0 до $2 \cdot 10^{-6}$	У тропосфері має промислове походження; в мезосфері та іоносфері фотохімічну природу.

У загальному випадку стан атмосфери у фіксований момент часу t_0 у точці

простору, що визначається вектором координат \mathbf{r} характеризується вектором значень параметрів \mathbf{X} – вектором стану. Множину всіх станів атмосфери \mathbf{B} можна розбити на такі класи співвідношень, кожен з яких буде характеризуватися своїм набором значень вектора стану \mathbf{X}_i . Наприклад, дощовий стан атмосфери \mathbf{B}_1 характеризується хмарністю з певною водністю \mathbf{X}_{11} , інтенсивністю дощу \mathbf{X}_{12} , просторовими характеристиками дощу \mathbf{X}_{13} і т. д. Стан атмосфери при снігопаді \mathbf{B}_2 характеризується водністю \mathbf{X}_{21} , інтенсивністю випадіння снігу \mathbf{X}_{22} і т. д. У свою чергу, кожен з класів можна розбити на підкласи \mathbf{A}_{ki} , кожному з яких відповідає певний діапазон \mathbf{X}_{ki} , зміни вектора \mathbf{X}_i у параметричному просторі, тобто $\mathbf{X}_i \in X_{ki}^1$. Наприклад, сильний дощ $\mathbf{X}_{12} \in X_{13}^1$, помірний дощ $\mathbf{X}_{12} \in X_{13}^2$, слабкий дощ $\mathbf{X}_{12} \in X_{13}^3$.

Виходячи з викладеного вище, ймовірність того чи іншого стану атмосфери може бути представлена у вигляді:

$$P_{t_0}(A, \mathbf{r}) = P_{t_0, \mathbf{r}}(B_i)P(A_{ki}|B_i), \quad (2.12)$$

де $P_{t_0, \mathbf{r}}(B_i)$ – ймовірність того, що у точці простору \mathbf{r} у фіксований момент часу t_0 будуть метеоумови i -го класу (у подальшому різні класи метеоумов будемо називати гідрометеоутвореннями i -го типу (ГМУ i -го типу));

$P(A_{ki}|B_i) = P\{\mathbf{X}_i \in X_{ki}^1\}$ – умовна ймовірність того, що при заданому типі ГМУ параметри атмосфери будуть знаходитися у визначених межах.

В залежності від типу ГМУ одностороннє ослаблення сигналів на трасі довжиною h_1 (рис. 2.1) відбувається за законом [117 – 120]:

$$L_A(h_1) = \exp(-0,32\lambda h_1) - \exp(-0,23h_0\bar{\alpha}\sec(\Theta)), \quad (2.13)$$

де h_0 – висота польоту ЛА;

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{h_0} \sum_{i=1}^n \alpha_i h_{ш_i} - \text{середнє погонне ослаблення в атмосфері для плоскошаро-}$$

вої моделі атмосфери;

α_i – погонне ослаблення в i -му шарі атмосфери;

$h_{ш_i}$ – товщина i -го шару;

Θ – кут візування.

Для оцінки ймовірності відповідного стану атмосфери згідно з (2.10) використані характеристики дощів рівнинної інтенсивності, а також характеристики різних хмар різної форми. Результати представлені у табл. 2.3, 2.4.

Таблиця 2.3

Просторові характеристики дощів рівнинної інтенсивності

I, мм/год	0,25-1	1-4	4-15	16-50
1	2	3	4	5
Середньогодова кількість годин випадіння	302,5	108	7,3	0,03
Повторюваність дощів до загальної кількості дощів %	72	23,5	2,45	0,1
Діаметр зливної зони, км	0	7,7	4,9	3,7
Діаметр фонові частини, км	55	112	70	63

Таблиця 2.4

Характеристики різних форм хмар

Форма хмар	Висота нижньої межі, км	Вертикальна протяжність, км	Горизонтальна протяжність, км	Водність, Г/м ³	Опади
1	2	3	4	5	6
A _C	2-6	0,2-0,7	0,03-3	0,1-0,25	Не випадають
A _S	3-5	0,2-0,6	-	0,03-0,1	Сніг, слабкий дощ
S _C	0,6-1,5	0,2-0,8	-	0,1-0,66	Морось
N _S	0,2-1,5	2-6	До 50	0,2-1,0	Обкладний дощ

1	2	3	4	5	6
S_t	0,1-1,0	0,2-0,8	-	0,15-0,75	Морось
C_u	0,5-1,5	0,2-0,6	1-3	0,1-0,2	Інколи морось
C_b	0,4-1	1,5-3,5	1,5-8 (до 20)	1-8	Злива

Аналіз даних, наведених у табл. 2.3 – 2.4, дозволяє у відповідності з викладеним вище підходом до оцінки стану атмосфери у районі прив'язки КЕСН зробити наступні висновки:

- необхідно помірковано підходити до оцінки стану атмосфери у районі прив'язки оптико-електронної КЕСН, оскільки наявність ГМУ може призводити до посилення неоднозначності локалізації об'єкта прив'язки на фоні ХО;
- найбільш потужна хмарність відповідає дощам порядку 1мм/год;
- різним висотам застосування БПЛА відповідають різні типи хмар і, відповідно по різному впливають на ефективність застосування оптико-електронної КЕСН БПЛА.

2.2.3 Результати аналізу характеристик датчиків оптико-електронної системи навігації безпілотних літальних апаратів

Результати аналізу характеристик оптико-електронних датчиків показали, що рівень розвитку сучасних камер дозволяє отримувати зображення ПВ високої якості. Рівень розвитку сучасних цифрових технологій забезпечив те, що системи камер стали легкими, компактними і більш доступними завдяки споживчій технології, вони дозволяють отримувати все більш якісне зображення. Характеристики встановлюваних на БПЛА камер визначаються розмірами та вантажопідйомністю БПЛА. Для БПЛА з великою вантажопідйомністю можна застосовувати камери з надможливостями [121].

Аналіз характеристик сучасних ОЕ датчиків проведемо на найбільш характерних прикладах, що застосовуються у БПЛА.

ARGUS-IS (Autonomous Real-Time Ground Ubiquitous Surveillance Imaging System - автономна розвідувальна система отримання зображень в реальному часі) від BAE Systems - це сенсор постійного спостереження з розділенням 1,8 гігапікселя, що складається з 92 п'ятимегапіксельних камер; він здатний охопити ціле місто або близько 40 км². Він може розміщуватися на борту БПЛА типу Boeing A-160T.

Компанія CONTROP Precision Technologies Ltd спеціалізується на розробці і виробництві електронно-оптичних систем і систем управління точним рухом. Вироби для БПЛА включають стабілізоване високопродуктивне обладнання візуального контролю для цілодобового спостереження. Бортова апаратура компанії гіростабілізована за двома або трьома осями з використанням 3, 4 або 5 універсальних шарнірів. Апаратура забезпечує зображення високої якості з високою роздільною здатністю (у вузькому полі зору), яка не залежить від маневрів платформи і вібрації. Широкий асортимент апаратури CONTROP включає різні вироби, що розрізняються розмірами, масою та типом ОЕ (ІК) сенсорів, а також їх застосуванням. Апаратура CONTROP має різну масу, починаючи від 0,75 кг для мініатюрного стабілізованого комплекта STAMP і до 46 кг для великого мультисенсорного комплекта.

Комплекти апаратури відрізняються типом установлюваних в них сенсорів, включаючи:

- денні кольорові камери;
- чорно-білий пристрій спостереження з дуже великою фокусною відстанню;
- охолоджувані і неохолоджувані тепловізійні камери (FLIR) з об'єктивами з безперервним збільшенням;
- безпечний для очей лазерний дальномір (LRF);
- лазерний покажчик.

Апаратура CONTROP підходить для установки, кріплення і використання на різних платформах, включаючи:

- повітряні засоби, наприклад міні-БПЛА, аеростати, БПЛА, апарати верти-

кального зльоту / вертольоти, апарати з фіксованим крилом, і т.д.;

- наземні транспортні засоби;
- морські транспортні засоби, кораблі, човни, судна на повітряній подушці і т.д.

Апаратура від CONTROP може використовуватися для вирішення задач повітряного картографування, включаючи спостереження, розвідки, пошуково-рятувальних операцій та ін. Вона включає наступні групи:

- апаратура ближньої дії для ефективних дальностей до 1000 метрів;
- апаратура середньої дальності для ефективних дальностей до 3-5 км;
- апаратура дальньої дії для ефективних дальностей до 7-10 км.

Компанія Elbit Systems Electro-Optics - Elop Ltd, підрозділ Elbit Systems, є визнаним лідером в стабілізованих ОЕ системах. Її системи в даний час працюють на самих різних повітряних, морських і наземних платформах в найнесприятливіших зовнішніх умовах; при цьому вони відповідають вимогам стабілізації / спостереження під час виконання запропонованої задачі. Стабілізована ОЕ апаратура від Elop забезпечує оптимальний огляд, спостереження, стеження і націлювання навіть у складних умовах.

Основними виробами для спостереження і огляду компанії Elop є:

- AMPS (Advanced Multi-Sensor Payload System – просунутий багатосенсорний комплекс), оптимізований для всього спектра завдань зі збору інформації з повітряних суден;
- CoMPASS (Compact Multi Purpose Advanced Stabilized System – компактна універсальна просунута стабілізована система), стабілізована багатосенсорна ОЕ апаратура;
- DCoMPASS, поєднує сучасну цифрову електроніку і мережеві технології з високопродуктивними можливостями існуючого сімейства CoMPASST;
- Micro CoMPASS - денна / нічна система спостереження.

Одним з найбільш захоплюючих досягнень ОЕ технології в останні роки стала поява недорогих матриць неохолоджуваних ІЧ-відеоконвертерах, що мають

в своєму складі дуже невеликі термоелементи або болометри. Комплекс камер KTL-30, розроблений польською компанією Etronika, і вперше представлений на виставці IDET 2011 у чеському місті Брно, надає цілодобово відеозображення з високою роздільною здатністю і тим самим покращує ситуаційну обізнаність.

Основою камери є неохолоджуваний болометричний масив, детектор 680×480, створений для відповідності найжорсткішим вимогам сучасних військових і правоохоронних операцій. Висока розрізнявальна здатність дозволяє надійно розпізнавати об'єкти навіть при невеликій різниці температур між об'єктом і його оточенням. Комплектний пристрій важить менше 100 грам.

Через свою невелику вагу і мале енергоспоживання камера ідеально підходить для установки на міні-БПЛА для виконання розширених завдань навігації, цілевказівки і для отримання великої кількості зображень. При розгортанні для цих специфічних завдань вона також дозволяє наземним військам або спішеним бойовим підрозділам визначати, ідентифікувати і стежити за об'єктами на землі і реагувати ефективно та швидко на зміну тактичної обстановки навіть під час «хаосу бою».

Компанія Etronika розробила систему камер KTL-30 за півроку. Вона являє собою на сьогодні найменшу камеру, що виготовляється в Польщі.

Компанія FLIR Systems є світовим лідером в ОЕ / ІЧ-системах візуалізації. Більш ніж 40 років компанія FLIR виробляє ІЧ-системи всіх типів, включаючи повітряні і морські системи спостереження і цілевказівки, наземні і транспортні бойові сенсори, приціли і ручні системи. Від RQ-11A / B RAVEN до MQ-8B FIRE SCOUT, компанія FLIR поставила тисячі сенсорів і систем для автоматичних додатків. Системи класу Star SAFIRE і BRITE Star мають такі ж характеристики, як і більші системи класу 20 дюймів, але є компактнішими і легшими.

Перевірені в боях і кваліфіковані для найжорсткіших вимог військових стандартів MIL-SPEC, ці системи мають перевірену в експлуатації надійність і гарантоване матеріально-технічне забезпечення по всьому світу. Вони відрізняються новітніми технічними інноваціями, включаючи високу точність, цільову геолокацію на базі інтегрованої системи GPS / IMU (глобальна система навігації та ви-

значення положення і інерційні вимірювання); технологію лазера з діодним накачуванням; та цифрові формувачі зображень Full HD другого покоління. Ці системи надають повний набір стандартних інтерфейсів, вони перевірені на автоматичних (безоператорних) додатках.

Сімейства гіростабілізованих комплектів ОЕ-апаратури від компанії IAI Tamam були спеціально розроблені для задоволення потреб широкого спектру додатків. У той час як всі ОЕ пристрої забезпечують на базі FLIR камер стабілізоване високої якості цілодобове спостереження, деякі з них також можуть забезпечувати високоточну цілевказівку, наведення і стеження. Tamam є світовим лідером в постачанні ОЕ-апаратури для БПЛА і її лінійка виробів включає:

– MOSP (multi-mission optronic stabilised payload – багатозадачна ОЕ стабілізована апаратура) – це ОЕ-станція середньої дальності від компанії Tamam. Маючи дуже хорошу стабілізацію, MOSP може поставлятися з різними комплектами сенсорів, включаючи ПЗС, FLIR (тепловізійна система переднього огляду), лазерний дальномір, лазерний цілевказівник, лазерний покажчик і пристрій супроводу.

– Невелика ОЕ-станція POP від Tamam створена для задоволення потреб в спостереженні на коротких дистанціях. Комплект POP був обраний для різних повітряних суден, БПЛА, вертольотів, систем безпеки і гарматних прицілів. Базова конфігурація POP включає ПЗС і FLIR камери з опційним лазерним покажчиком і відеостеження.

– Комплект стабілізованої ОЕ-апаратури під позначенням MINIPOP – це компактна система цілодобового спостереження для військових, напіввійськових і цивільних завдань.

– Комплект MicroPOP являє собою новітню легку стабілізовану систему цілодобового спостереження для задач спостереження на ближніх дистанціях. Система забезпечує сучасні, поліпшені можливості отримання зображення для міні-БПЛА.

– CoMPASS від компанії Kollsman, Inc. – це стабілізована високопродуктивна ОЕ система спостереження, стеження, і цілевказівки для бойових умов.

Компанія Micro UAV поставляє лінійку камер на універсальному шарнірі BTC (Ball Turret Camera), які створені для надлегких мініатюрних БПЛА новітнього покоління. Наведення може виконуватися вручну або за рахунок спрямування по GPS, сигналам автопілота, що дозволяє наводити камеру з будь-якими визначальними координатами GPS і зберігати це положення при бажанні. Камери обладнані сервісом «plug and play».

RECCELITE від Rafael Advanced Defense Systems Ltd – це автономна, самоохолоджувана багатосенсорна розвідувальна система, що складається з бортового контейнера, широкосмугового цифрового каналу даних і наземної станції управління. Оперативна гнучкість забезпечується за рахунок наступних можливостей:

- одночасний збір зображень з високою роздільною здатністю в ІЧ-діапазоні, в видимому і ближньому ІЧ-спектрі вдень і вночі;
- апаратура на карданному підвісі забезпечує стабілізоване фотографування незалежно від маневрів БПЛА і відхилення від польотного маршруту;
- необмежена площа огляду і різні режими сканування для оптимального фотографування всіх типів місцевості;
- точна зона покриття та зображення високої якості;
- планування завдання, або в автоматичному режимі, або вручну для стеження за випадковими цілями.

Компанія Saab пропонує електронну апаратуру спостереження (ESP), створену в якості самостійної системи радіотехнічної розвідки, яка інтегрується з БПЛА, базується на системі пеленгації джерел випромінювання (ELS) виробництва Saab Avitronics і має підвищену ймовірність перехоплення для пошукових РЛС.

Сенсорні системи виробництва компанії Optical Alchemy призначені для розвідки, спостереження, виявлення цілей, забезпечення ситуативної інформованості та захисту військ. Надлегкі, інерціальні стабілізовані системи цієї компанії дозволяють БПЛА різко збільшити дальності, заощадити паливо, довше залишатися в повітрі при патрулюванні великих районів, заповнити розриви тактичної аерофотозйомки і возити додаткові сенсори і озброєння.

Компанія UAV Collaborative пропонує чотири комплекти апаратури відеозображення для установки на БПЛА. Ці функціонально закінчені комплекти включають сенсори, телеметричну систему, комп'ютер і захисний корпус для поганих погодних умов.

Гіростабілізована платформа USG-212, розроблена компанією Укрспецсістемс, оснащена денною камерою і тепловізором. Рекомендується використовувати для БПЛА і маленьких літаків. Платформа оснащена Full HD камерою, що дозволяє отримувати високоякісне відео. Працює в денний і нічний час з можливістю збільшення в 30 разів, і установки модуля цифрової обробки зображення.

Розробники врахували в конструкції пристрою стійкість до будь-яких погодних умов, а гіростабілізований підвіс забезпечує чіткість зображення, згладжуючи вібрації. Система дає можливість змінювати напрямки камери шляхом її обертання.

На додаток до гіростабілізованої платформи так само встановлений електронний модуль стабілізації зображення з денною камерою, що забезпечує ще більшу чіткість зображення навіть при несприятливих умовах.

Короткі технічні дані:

Висота 266 мм.

Діаметр 160 мм.

Вага 2,4 кг.

Кут обертання 360 градусів.

Застосування:

Більшою мірою USG - 212 і подібні йому пристрої призначені для військової розвідки з повітря, але також відмінно підходять і для мирних цілей, наприклад, проведення рятувальних операцій.

У військових цілях використання таких пристроїв допомагає отримувати розвідувальну інформацію про місцезнаходження противника в області дослідження. Безпілотний літальний апарат, вироблений «Укрспецсістем» може передавати HD зображення в реальному часі на відстань до 5 км. А за допомогою теп-

ловізора визначити наявність і приблизну кількість людського ресурсу противника, як в денний, так і в нічний час.

У рятувальних операціях найважливіше значення має наявність тепловізора і денної камери HD якості з 30 кратним збільшенням. Тепловізор чітко виділить людей в зоні пошуку в будь-який час доби, а камера з можливістю наближення допоможе визначити стан постраждалих і необхідні ресурси для їх порятунку.

На даному етапі, в своїх розробках компанія «Укрспецсистемс» застосовує деталі імпортного виробництва, але при цьому вивчає ринок України і прагне до використання модулів вітчизняного виконання. Це дозволить зробити продукцію більш доступною для українського споживача. Внаслідок того що USG - 212 виробляється в Україні для нього не потрібний експортний дозвіл.

Наведений аналіз далеко не повного переліку ОЕ датчиків інформації вказує на те, що сучасні датчики є багатоспектральними, багатосенсорними, легкими, мають високу роздільну здатність та стабілізацію зображень, дозволяють отримувати потокове відео з борта ЛА та передавати на потрібну відстань. Широке коло виробників ОЕ датчиків свідчить про велику конкуренцію та сприяє розвитку систем отримання інформації.

Разом з тим, результати експериментальних досліджень, що проводилися спільно з Сотніковим О.М., Сотніковим М.О., Таршиним В.А, та отримані приклади зображень ПВ з борта квадрокоптера Dji Mavic Pro.



Рисунок 2.5 – Зображення квадрокоптера Dji Mavic Pro та пульта його керування

Зображення БПЛА та пульту його керування, наведені на (рис. 2.5).

Застосування квадрокоптера Dji Mavic Pro, що обладнаний гіростабілізованою 4К ОЕ камерою, показали, що незважаючи на високу розрізнявальну здатність та гіростабілізацію, зображення об'єктів ПЗ в значній мірі залежать від геометрії системи «БПЛА – ОП». Окрім того, локалізація ОП на ПЗ в значній мірі визначається наявністю хибних об'єктів, кількість яких зростає зі збільшенням об'єктової насиченості ПЗ у районі прив'язки КЕСН.

2.2.4 Результати аналізу алгоритмів суміщення зображень в кореляційно-екстремальних системах навігації

Визначення ступеня відхилення БПЛА від заданої траєкторії польоту відповідно з принципом дії КЕСН ґрунтується на порівнянні ПЗ з отриманим заздалегідь ЕЗ. Розузгодження положення ПЗ та ЕЗ дозволяє сформулювати команду для утримання БПЛА на заданій траєкторії.

Порівняння зображень в КЕСН здійснюється за допомогою функціоналу, причому при збігу положень ПЗ та ЕЗ він приймає екстремальне значення.

Відомо [82], що при деяких обмеженнях таким функціоналом є взаємна кореляційна функція (ВКФ). Однак отримання ВКФ довгий час було пов'язане з технічними труднощами, тому в даний час існують різні спрощені алгоритми наближеного подання цієї функції.

В роботі [82] проведено детальний аналіз алгоритмів, використовуваних в КЕСН. Результати аналізу наведені у табл. 2.5. Також вказується, що більш повне порівняння алгоритмів на відміну від наведеного в табл. 2.5. нашоувхується на певні труднощі. Це обумовлено різноманітністю завдань, для вирішення яких створювалися алгоритми, і як наслідок, цього, широким діапазоном вихідних даних (розміри і співвідношення розмірів зображень, характер спотворень, закони розподілу інтенсивностей елементів зображень і т.п.), що ускладнює уявлення результатів порівняння алгоритмів.

Разом з тим інтенсивного розвитку набувають методи та алгоритми формування ВКФ, які ґрунтуються на останніх досягненнях СТЗ та цифрової обробки сигналів [56 – 60]. Сучасні методи та алгоритми передбачають виконання додаткових операцій над ПЗ та ЕЗ для усунення негативних факторів, які не можуть бути усунуті апаратним шляхом на етапі первинної обробки [101].

Таблиця 2.5

Результати аналізу алгоритмів суміщення зображень

Алгоритм	Сутність	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Класичний Кореляційний (ККА)	Поелементне віднімання кореляційної функції	Висока ефективність при малому відношенні сигнал/шум	Великі обчислювальні витрати
Різницевий	Поелементне віднімання модуля різниці	Скорочення обчислювальних витрат порівняно з ККА.	Погіршення характеристик при малому відношенні сигнал/шум
З кореляцією зображень у спектральній області	Застосування швидкого перетворення Фур'є для обчислення ВКФ	Ефективна реалізація на цифрових обчислювальних машинах (ЦОМ)	Великі обчислювальні витрати
З використанням парних функцій	Обчислення суми елементів, що мають однакову інтенсивність	Ефективна реалізація на ЦОМ	Застосування знакових функцій як різновиду парних можливе лише при обробці сигналів з нормальним розподілом
З фазовою кореляцією	З використання оберненого перетворення Фур'є фазової складової	Гострі кореляційні піки, нечутливість до вузькосмугового шуму	Висока чутливість до високочастотних спотворень
Амплітудного ранжування	Ієрархічний алгоритм з ранжуванням алгоритмів меншого зображення	Точнісні характеристики співпадають з характеристиками ККА	Суттєве скорочення об'єма обчислень тільки при обробці зображень великих розмірів

1	2	3	4
Ієрархічний з виділенням найбільш інформативних ознак	Порівняння відбувається у точках з найбільшою кореляцією	Значне скорочення об'єма обчислень	Складність виділення інформативних ознак
Суміщення лінійних ознак	Суміщуються структурні моделі зображень	Нечутливий до інвертування контраста зображень	Аналітичний опис характеристик ускладнений. Значні обчислювальні витрати на попередню обробку
Алгоритми на основі інваріантних моментів	Використання інтегральних перетворень	Інваріантність до розмасштабування та повороту зображень	Не ефективний при обробці невеликих зображень
Алгоритми з адаптацією до спотворень поверхні візування	Адаптація ЕЗ характеру спотворень ПВ	Забезпечення потрібної точності місцевизначення КЕСН на спотворених ділянках ПВ	Збільшення обчислювальних витрат, пов'язаних з адаптацією до алгоритмічних перешкод

Проведений аналіз методів та алгоритмів суміщення зображень у КЕСН показав, що стосовно випадкової зміни геометрії системи «БПЛА-ПВ» такі методи та алгоритми відсутні, окрім того існуючі методи та алгоритми не можуть бути безпосередньо застосовані для локалізації об'єктів прив'язки на фоні хибних об'єктів, схожих за характеристиками на ОП на ділянках ПВ з розвинутою інфраструктурою.

2.3 Результати розробки моделі процесу функціонування оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації в умовах високої об'єктової насиченості

З урахуванням розробленої узагальненої структури КЕСН БПЛА, що застосовуються в умовах високої об'єктової насиченості та геометричних

спотворень ПВ, проведеного аналізу особливостей ПВ, СР, відомих алгоритмів обробки інформації у КЕСН структура моделі процесу формування ВФ КЕСН як команди на корекцію траєкторії БПЛА має вигляд, представлена на рис. 2.6. У наведеній моделі враховано, що інформативним параметром КЕСН є яскравість елементів об'єктів і фонів зображення ПВ, представленого градаціями сірого, окрім того, місцевизначення КЕСН здійснюється в умовах геометричних спотворень ПЗ ПВ.

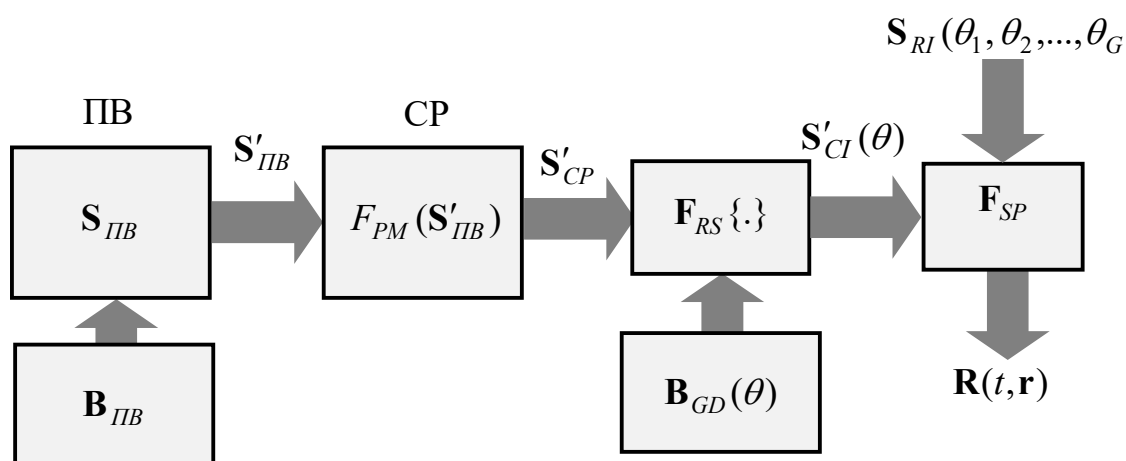


Рисунок 2.6 – Структура моделі процесу формування ВФ оптико-електронною КЕСН

Відповідно до наведеної моделі система вторинної обробки повинна бути багатоканальною за вхідними еталонними зображеннями. Відповідно до цього формуються часткові ВФ, на основі яких за визначеним критерієм визначається результуюча ВФ як команда на корекцію траєкторії польоту БПЛА. Оскільки сучасні датчики інформації дозволяють отримувати кольорові зображення, то для використання додаткової інформації про ПВ, система первинної обробки, що описується оператором $F_{RS}\{.\}$ повинна бути багатоканальною відповідно до основних кольорів поточних зображень $F_{RS_r}\{.\}$ – червоний, $F_{RS_g}\{.\}$ – зелений, $F_{RS_b}\{.\}$ – синій, а також $F_{RS_{gr}}\{.\}$ – окремо канал яскравості, як показано на рис. 2.7. У такому випадку ЕЗ також повинно бути багатоканальним. Колір об'єктів і фонів системою ВО може використовуватися як додаткова ознака,

однак у ряді випадків кореляційно-екстремальна обробка кольорових зображень вимагає великих обчислювальних витрат на борту БПЛА. Відповідно до вирішуваних задач при навігації БПЛА з оптико-електронною КЕСН, у якій інформативним параметром є яскравість об'єктів і фонів, система вторинної обробки може бути описана моделлю, структура якої наведена на рис. 2.8.

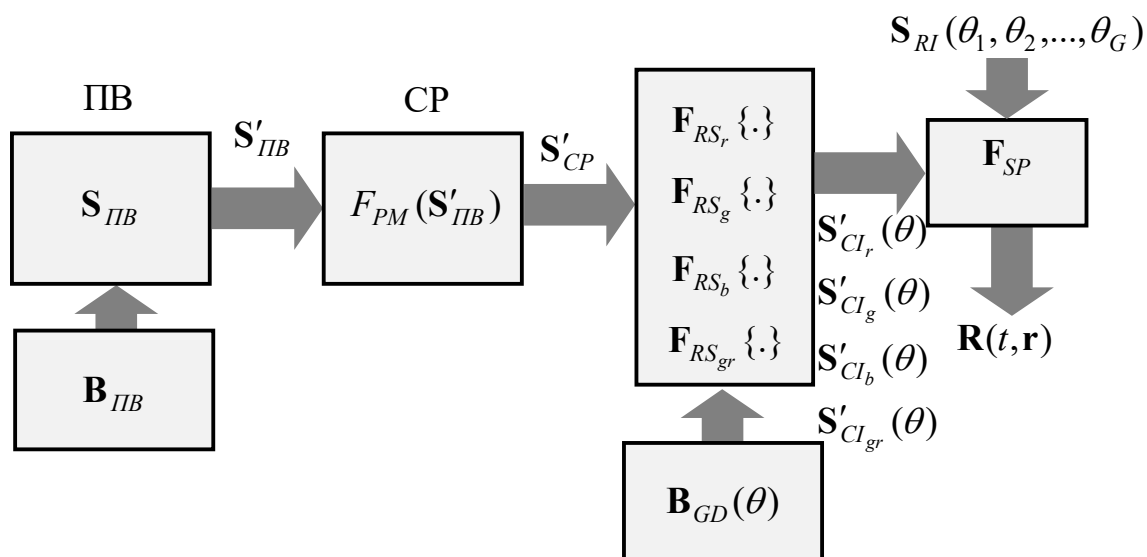


Рисунок 2.7 – Структура моделі процесу формування ВФ оптико-електронною КЕСН з кольоровим датчиком інформації

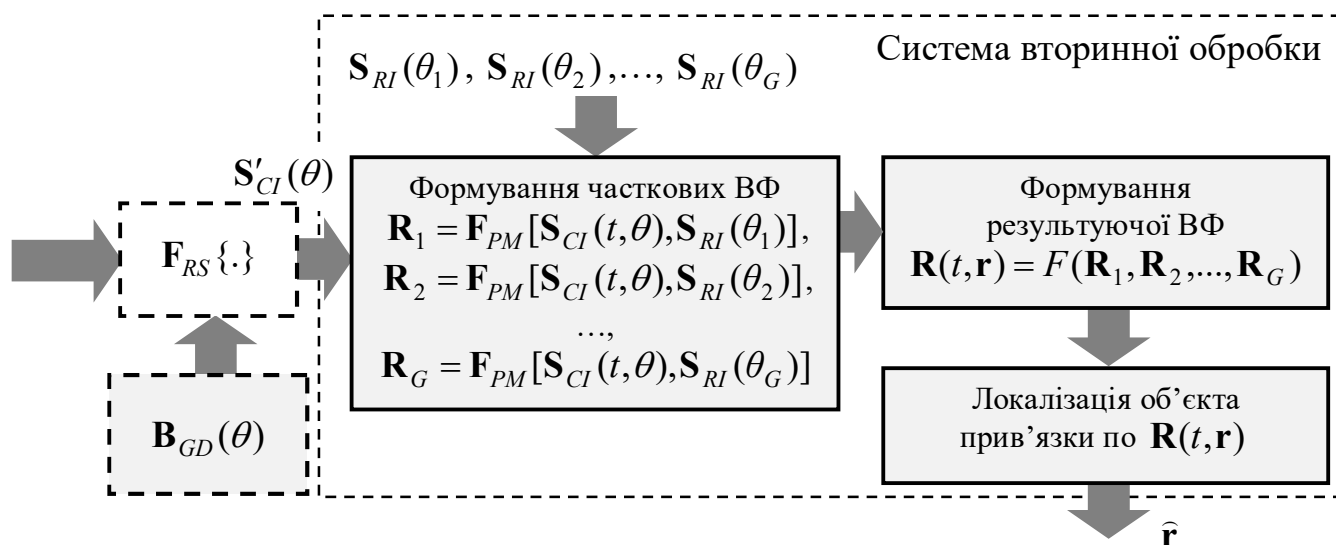


Рисунок 2.8 – Структура моделі системи вторинної обробки оптико-електронної КЕСН

Структура моделі процесу функціонування КЕСН відповідає розробленій узагальненій структурі КЕСН БПЛА, що функціонує в умовах будь-якої ФЦО, у тому числі при високій об'єктовій насиченості району прив'язки, а також при наявності декількох яскравих хибних об'єктів.

Висновки по розділу 2

1. Проведено аналіз моделі процесу функціонування ОЕ КЕСН БПЛА. Встановлено, що вирішальна функція як результат порівняння сформованого КЕСН ПЗ з наявними в пам'яті ЕЗ бортового обчислювача визначається як умовами візування, так і властивостями ПВ, які в кінцевому підсумку будуть визначати ймовірність правильної прив'язки СН. Особливістю моделі, що визначає її новизну, є урахування впливу перспективних спотворень на ПЗ, що формується системою, а також кореляційних властивостей ПВ, в основу опису якої покладено модель узагальненого телеграфного процесу.

2. В якості моделі ПЗ, необхідної для визначення вирішальної функції, обґрунтовано вибір адитивної моделі взаємодії ПЗ з шумами каналів системи, яка справедлива в разі, якщо поворот ЕЗ відносно ПЗ відсутній. В іншому випадку модель ПЗ повинна враховувати можливі геометричні спотворення, обумовлені геометрією візування ОЕ КЕСН БПЛА.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ ВИРІШАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМУМУ КОЕФІЦІЄНТА ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ

Проведено дослідження впливу масштабних та перспективних спотворень на точність та ймовірність правильної прив'язки КЕСН. В основу розроблених методу та алгоритму покладена удосконалена математична модель процесу формування ВФ.

На основі проведених статистичних досліджень алгоритму формування ВФ КЕСН за критерієм максимуму коефіцієнта взаємної кореляції розроблені пропозиції щодо їх практичного застосування для наведення БПЛА.

Результати досліджень щодо розроблених методу та алгоритму формування ВФ опубліковані у роботах [35, 36 – 38, 40, 41].

3.1 Дослідження впливу геометричних спотворень поточного зображення на формування вирішальної функції оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації

Відповідно до узагальненої структури КЕСН та геометрії системи «БПЛА - ПВ» (рис. 2.1, 2.2), а також принципів функціонування КЕСН, які викладені у роботах [1 – 6, 22 – 27, 33], забезпечення вимог по показниках точності (1.6) та ймовірності (1.5) місцевизначення ОЕ КЕСН БПЛА для k -ї зони корекції ґрунтується на забезпеченні відповідності ЕЗ сформованому у процесі польоту БПЛА ПЗ.

В умовах зміни геометрії системи «БПЛА – ПВ» відповідність ПЗ сформованому заздалегідь ЕЗ може бути забезпечена шляхом адаптації ЕЗ до геометричних спотворень. Відповідно виникає необхідність в вирішенні наступних задач:

1. Дослідження впливу геометричних спотворень на формування ВФ КЕСН.
2. Розробка методу формування ВФ КЕСН по критерію максимуму коефіцієнта взаємної кореляції в кожному елементі розрізнення та побудови узагальненої взаємної функції кореляції шляхом адаптації ЕЗ до перспективних спотворень.

Основою виконання комплексних досліджень стало поєднання результатів експериментальних досліджень щодо отримання зображень ПВ з борта БПЛА типу Dji Mavic Pro [123] з гіростабілізованою платформою, а також моделювання процесу формування ВФ в умовах геометричних спотворень на різних типах ПВ; моделювання процесу формування узагальненої ВКФ за критерієм максимуму КВК в кожному елементі розподілення.

При моделюванні процесу формування ПЗ з геометричними спотвореннями будемо розглядати випадки перспективних (рис. 2.2,а) та масштабних спотворень (рис. 2.2,б).

При проведенні досліджень впливу геометричних спотворень на формування ВФ КЕСН розглядалися два варіанти формування ПЗ ПВ:

- з борта БПЛА з різними кутами орієнтації бортової камери;
- шляхом математичного моделювання впливу геометричних спотворень на зображеннях ПВ.

Масштабні спотворення обумовлені невідповідністю висоти польоту БПЛА над районом прив'язки, або зміною масштабу зображення, що отримується оптико-електронним датчиком, перспективні спотворення обумовлені зміною орієнтації БПЛА, або зміною кутів візування камери.

Масштабні спотворення призводять до лінійної (пропорційної) зміни розмірів об'єкта прив'язки ПЗ $m_1 \times n_1$ відносно вихідного розміру $m \times n$, представленого на ЕЗ. Перспективні спотворення відповідно до рис.2.3. призводять до нелінійної зміни розмірів об'єктів візування на ПЗ. При цьому в результаті впливу перспективних спотворень (рис. 2.2,а) прямокутне ПЗ стає трапецієвидним з розмірами $(m_1 \times n_1, m_1 \times n_2)$, як показано на рис. 2.3. В цьому випадку масштабні спотворення об'єктів на ПЗ відносно вихідного зображення

розміру ($m \times n$) будуть описуватися наступними виразами:

$$m_1 = mh_0 \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right), \quad (3.1)$$

$$n_1 = nh_0 \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right), \quad (3.2)$$

де $\Delta h = h_0 - h'$ – зміна висоти БПЛА (масштабу камери КЕСН).

Зміна розмірів об'єкта прив'язки відбувається пропорційно зміні масштабу ПЗ.

Для оцінки впливу масштабних спотворень на формування ВФ було проведено статистичне моделювання.

Оцінка параметрів інформативних полів ПВ ОЕ КЕСН по критерію максимуму КВК ґрунтується на використанні тих самих алгоритмів, що і при формуванні ВФ.

При оцінці параметрів ІП будемо вважати, що ПВ описується моделями, наведеними в роботах [75, 76]. У якості параметра, який характеризує ІП будемо використовувати максимальне значення КВК – $K_{\max}(i, j)$, що є результатом порівняння зображення ПВ $S_{ПВ}$ розміром $M_1 \times M_2$ з його фрагментом (ковзним вікном $S_{КВ} \in S_{ПВ}$), який має розмір $N_1 \times N_2$ та координати верхнього кута (i, j) . Обчислений КВК для усіх $i = 1 \dots M_1 - N_1$ та $j = 1 \dots M_2 - N_2$ утворює розподіл КВК, який будемо називати полем кореляційного аналізу. Сформоване поле кореляційного аналізу характеризує ступінь схожості ІП ділянок зображення ПВ з ІП інших ділянок зображення.

Статистичне моделювання проведене для трьох типових ситуацій ФОС, що дозволяє у подальшому провести порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами, наведеними в [80 – 82].

При моделюванні процес формування ВФ здійснюється за класичним алгоритмом кореляційно-екстремальної обробки [1 – 6, 22 – 24, 33, 82], моделювання масштабних спотворень здійснюється зміною масштабу ПЗ

відповідно до (3.1), (3.2). Можна показати, що в такому випадку алгоритм визначення часткових ВФ для кожного (i, j) по параметру яскравості буде описуватися наступними виразами:

$$R(k, l, \Delta h) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} S_{RI}(m, n) \cdot S_{CI}(m + k - 1, n + l - 1, \Delta h), \quad (3.3)$$

$$\mathbf{R}(\Delta h) = \|R(k, l, \Delta h)\|, \text{ при } k = 1 \dots M_1 - N_1, \quad l = 1 \dots M_2 - N_2. \quad (3.4)$$

Вплив масштабних спотворень буде визначатися величиною КВК $K(\Delta h)$ при заданому масштабному спотворенні Δh , який можна визначити відповідно до виразу:

$$K(\Delta h) = \max_{r, l} \|R(k, l, \Delta h)\|, \text{ при } k = 1 \dots M_1 - N_1, \quad l = 1 \dots M_2 - N_2, \quad (3.5)$$

та величиною СКП $\sigma(\Delta h)$, що визначена відповідно до методу найменших квадратів.

У випадку, коли інформативним параметром КЕСН є контраст, ВКФ буде визначатися співвідношенням:

$$R(k, l, \Delta h) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} [S_{RI}(m, n) - \bar{S}_{RI}] \cdot [S_{CI}(m + k - 1, n + l - 1, \Delta h) - \bar{S}_{CI}(\Delta h)], \quad (3.6)$$

$$\text{де} \quad \bar{S}_{RI} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} S_{RI}(m, n), \quad (3.7)$$

$$\bar{S}_{CI}(\Delta h) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} S_{CI}(m + k - 1, n + l - 1, \Delta h), \quad (3.8)$$

При цьому КВК визначається згідно з (3.5).

Для одержаної згідно з (3.3), (3.6) ВФ (матриці $\mathbf{R}(\Delta h)$) її максимальне значення КВК забезпечується при повному суміщенні \mathbf{S}_{RI} та \mathbf{S}_{CI} при відсутності масштабних спотворень $\mathbf{R}(0)$. Аналогічним чином згідно з класичним кореляційним алгоритмом може бути описана ВФ, що одержана за параметром контрасту. Усереднені результати оцінки впливу масштабних спотворень на результат формування ВФ КЕСН на ПВ з різним ФОС (Φ_{02} , Φ_{03}) при відсутності інших типів спотворень наведені на рис. 3.1, 3.2.

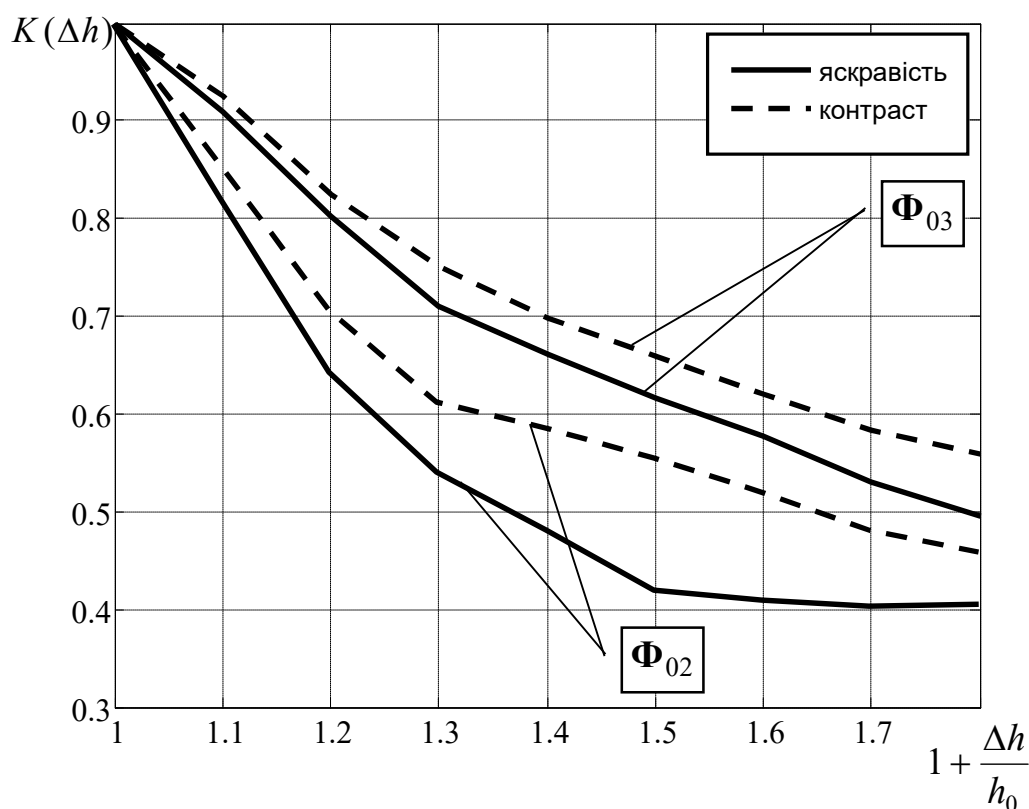


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнта взаємної кореляції ЕЗ та ПЗ від масштабних спотворень ПЗ

При проведенні моделювання розмір ЕЗ обирався 50×50 та 100×100 пікселів, розмір ПЗ відповідає обраному режиму зйомки ПВ з нормальною (Φ_{02}) та високою (Φ_{03}) об'єктовою насиченістю 1280×720 пікселів.

Висота польоту БПЛА типу Dji Mavic Pro складала 500...600 метрів.

При проведенні математичного моделювання припустимий діапазон зміни $\sigma(\Delta h)$ (рис. 3.2) задавався виходячи з вимог до показника точності місцевизначення КЕСН БПЛА, що обґрунтовані у розд. 1.

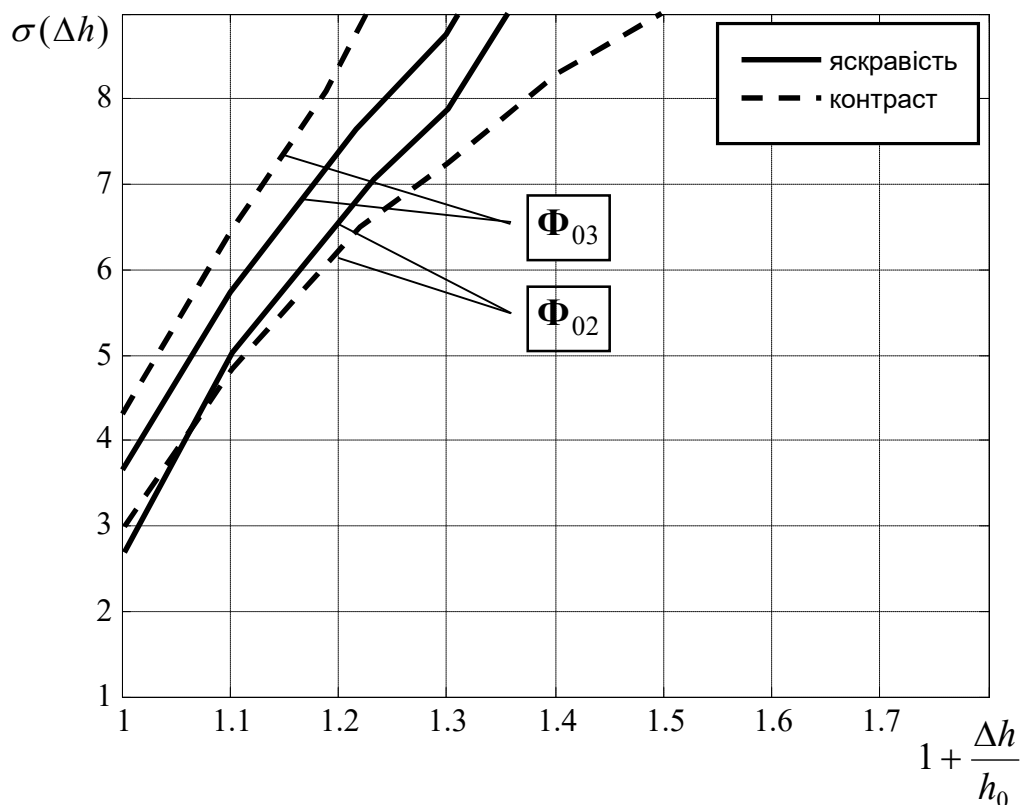


Рисунок 3.2 – Залежність СКП суміщення ПЗ та ЕЗ від масштабних спотворень ПЗ

За результатами математичного моделювання (рис. 3.1, 3.2), відповідно до заданих умов формування ПЗ на ПВ з нормальною об'єктовою насиченістю невідповідність масштабів ПЗ та ЕЗ на 10...15% менше впливає на КВК, однак при цьому відбувається погіршення СКП суміщення ПЗ та ЕЗ у 1,5...2 рази. У випадку високої об'єктової насиченості при відсутності масштабних спотворень СКП порівняно з попереднім випадком є більшою 1,3...1,4 рази, що обумовлено наявністю та близьким розташуванням до ОП хибних яскравих об'єктів. Зі збільшенням Δh відбувається пропорційне збільшення СКП. Зміна КВК та СКП при масштабних спотвореннях у межах 10...15% носить практично лінійний

характер.

Одержані результати оцінки впливу масштабних спотворень ПЗ на результат оцінки СКП суміщення ПЗ та ЕЗ співрозмірні з результатами, отриманими іншими авторами, однак [24, 82], разом з тим авторами не досліджувалися залежності КВК та СКП від типу ФОС ПВ, що важливо при місцевизначенні КЕСН на ПВ з розвинутою інфраструктурою. Разом з тим слід зазначити, що сучасні ІНС, та датчики висоти польоту ЛА, властивості та технічні характеристики яких розглянуті у [17], забезпечують можливість визначення висоти БПЛА з помилкою не більше 10%, що дозволяє забезпечити потрібні значення СКП місцевизначення КЕСН в умовах будь-якого ФОС поверхні візування.

У випадку перспективних спотворень ПЗ об'єкта прив'язки набуває нелінійних змін відповідно до рис. 2.3. Геометрично спотворення, що обумовлені зміною геометрії «БПЛА – ПВ» при відсутності зміни яскравості ФОС, масштабних та будь-яких інших змін на ПВ описуються відповідно до рис. 2.2,а. При цьому, зміну розмірів ПЗ, яка обумовлена перспективними спотвореннями можна визначити відповідно до наступних виразів:

$$m_1 = m \frac{\cos(\theta_1 + \Delta\theta)}{\cos(\theta_1)}, \quad (3.9)$$

$$n_1 = n \frac{\cos(\theta_1 - \alpha/2)}{\cos(\theta_1 + \Delta\theta - \alpha/2)}, \quad (3.10)$$

$$n_2 = n \frac{\cos(\theta_1 + \alpha/2)}{\cos(\theta_1 + \Delta\theta + \alpha/2)}. \quad (3.11)$$

де $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ – зміна кута орієнтації БПЛА (камери БПЛА).

На відміну від (3.3) – (3.8) наявність перспективних спотворень ПЗ призводить не тільки до зміни похилої відстані до ОП, а також до зміни геометрії

самого ОП, яка обумовлена зміною dm та dn у залежності від розташування ОП на ПЗ.

Відповідно до представленої на рис. 2,а геометрії візування КЕСН для різних типових поверхонь району місцевизначення шляхом математичного моделювання одержані усереднені оцінки коефіцієнта взаємної кореляції (КВК) ПЗ та ЕЗ. Результати оцінки КВК та СКП суміщення ПЗ та ЕЗ для умов візування $\alpha = 40^0$ та $h_0 = 1000$ м в умовах впливу перспективних спотворень ПЗ на формування вирішальної функції в умовах нормальної (Φ_{02}) та високої (Φ_{03}) об'єктової насиченості наведені на рис.3.3, 3.4.

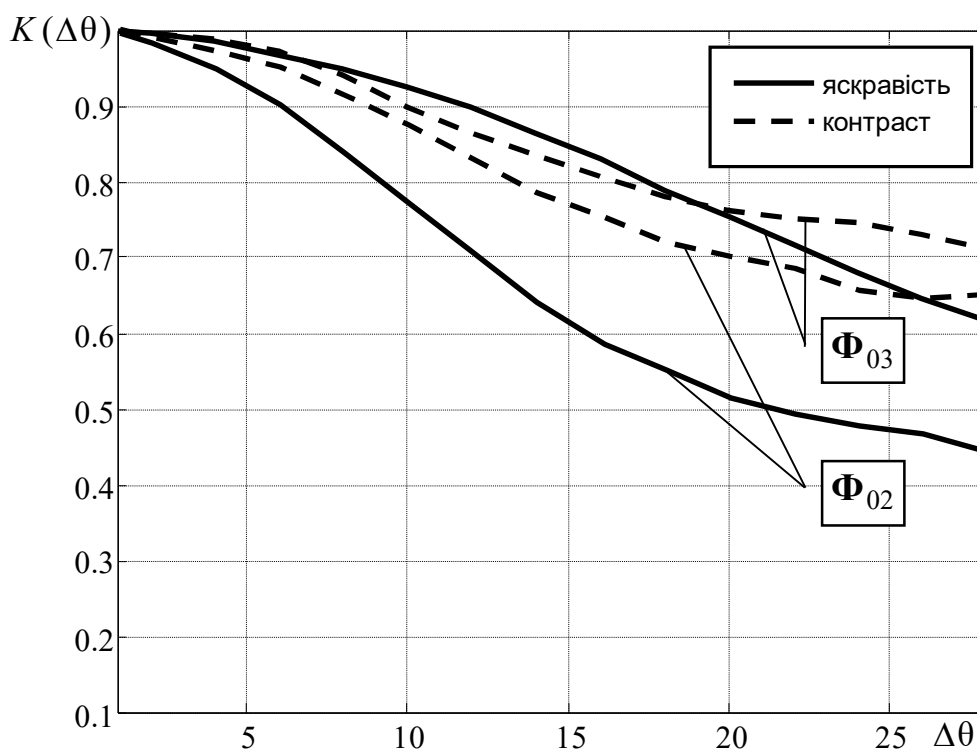


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта взаємної кореляції ЕЗ та ПЗ від перспективних спотворень ПЗ

Відповідно до одержаних результатів статистичного моделювання процесу прив'язки ПЗ до ЕЗ на ПВ з різним типовим ФОС встановлено, що для ділянок ПВ з високою об'єктовою насиченістю характерні більші помилки суміщення ПЗ та ЕЗ (рис. 3.4). Це пов'язано з наявністю на зображенні ПВ яскравих хибних

об'єктів, які за своїми властивостями схожі на ОП.

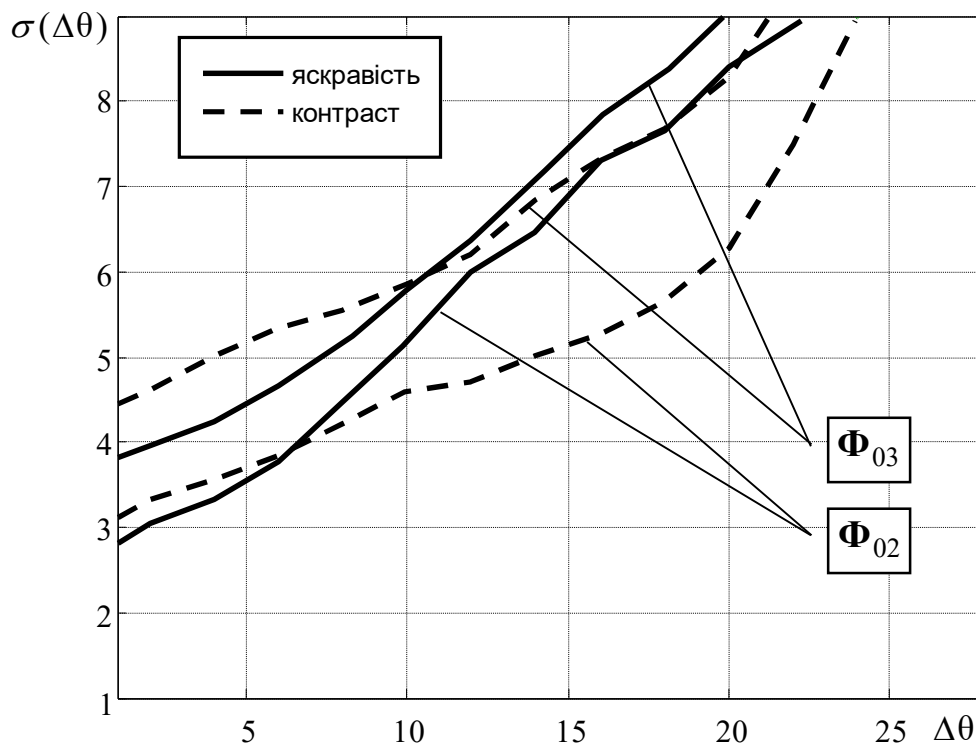


Рисунок 3.4 – Залежність СКП суміщення ПЗ та ЕЗ від перспективних спотворень ПЗ

Приклад ПВ з високою об'єктовою насиченістю наведений на (рис. 3.5)



Рисунок 3.5 – Приклад зображення ПВ з високою об'єктовою насиченістю

Наявність перспективних спотворень на ПЗ призводить до збільшення СКП прив'язки зображень, а також трансформації ФОС, у результаті якої частина ХО за властивостями може наближатися до ОП. На рис. 3.6, 3.7, відповідно до моделі опису ПВ (2.6), наведені поперечний та продольний розподіли яскравості, узяті посередині об'єкта прив'язки для випадків наявності та відсутності геометричних спотворень. Дослідження показали, що спотворення практично відсутні при знаходженні ОП у центрі ПЗ та суттєво впливають на параметри сформованої ВФ, якщо ОП знаходиться на краях (кутах) сформованого на борту БПЛА поточного зображення. На рис. 3.8, 3.9 наведені результати формування ВФ по поперечному та продольному розподілах яскравості ОП, які представлені на рис. 3.6, 3.7, при відсутності (жирна крива) та наявності (тонка крива) перспективних спотворень.

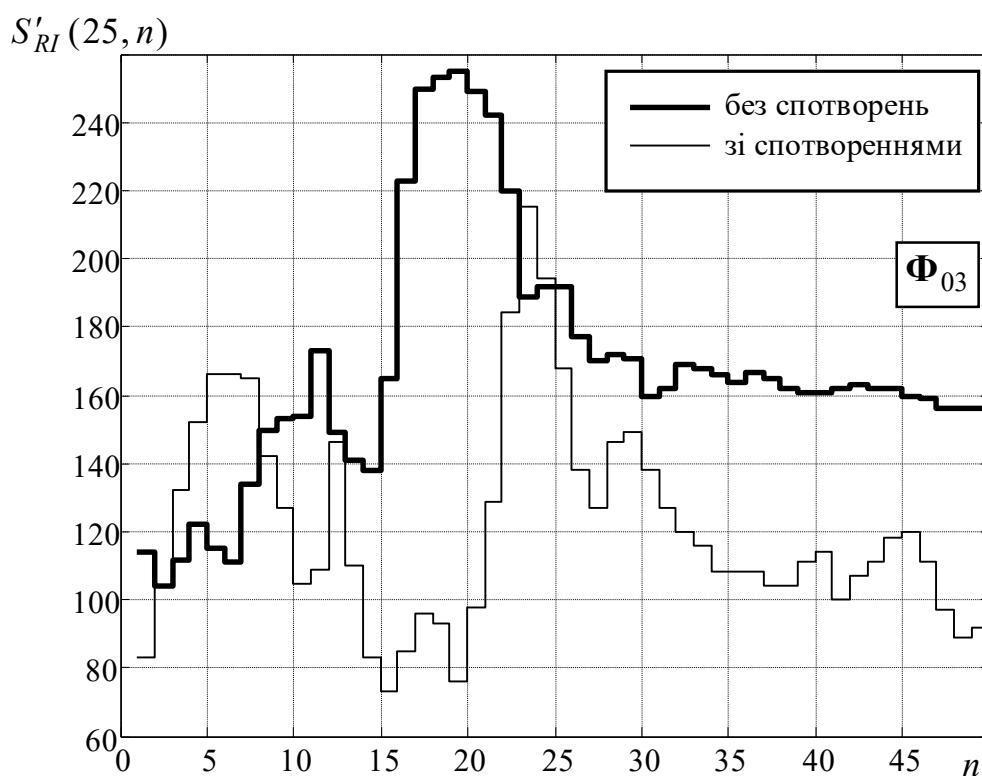


Рисунок 3.6 – Поперечний розподіл яскравості ОП при відсутності та наявності перспективних спотворень

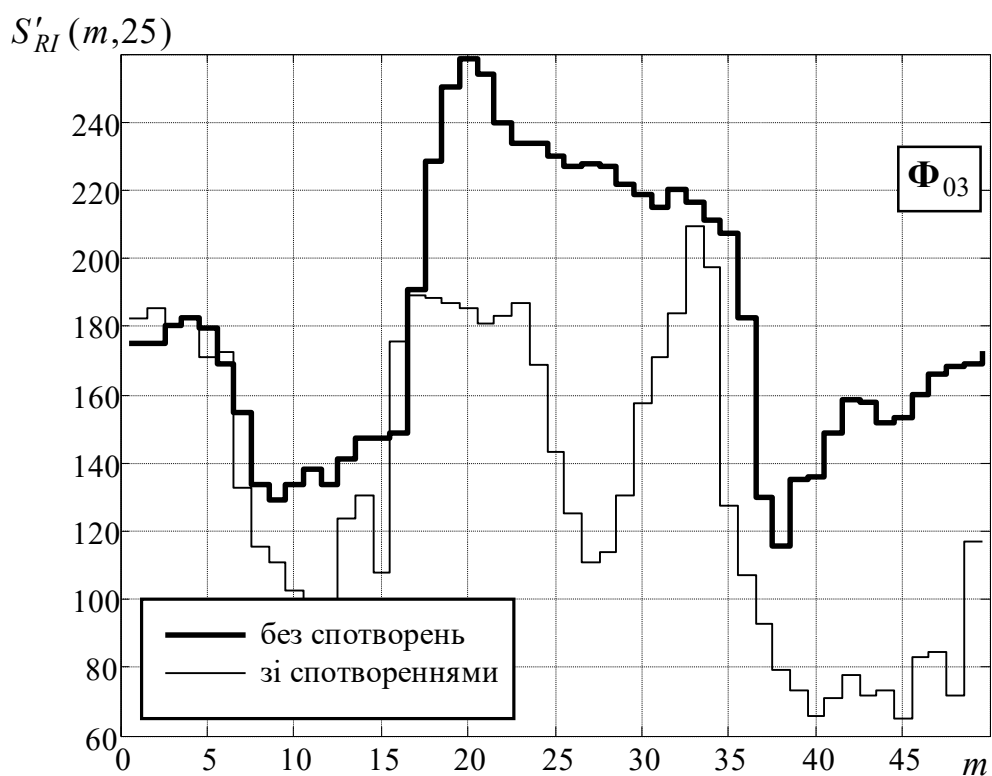


Рисунок 3.7 – Продольний розподіл яскравості ОП при відсутності та наявності перспективних спотворень

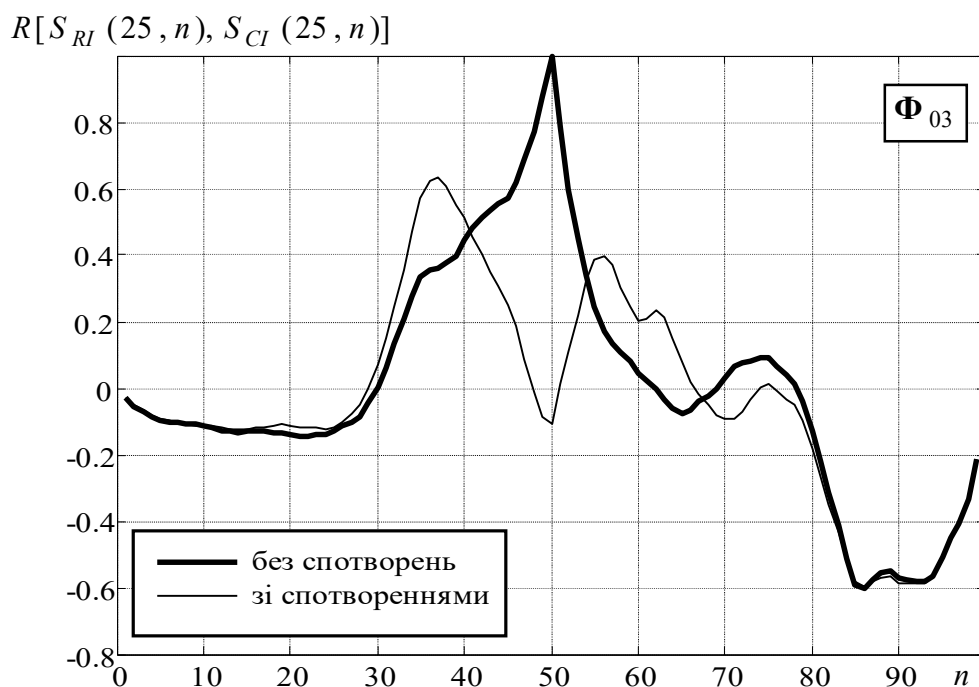


Рисунок 3.8 – ВКФ поперечних перетинів яскравості ОП при відсутності та наявності перспективних спотворень

$$R[S_{RI}(25, m), S_{CI}(25, m)]$$

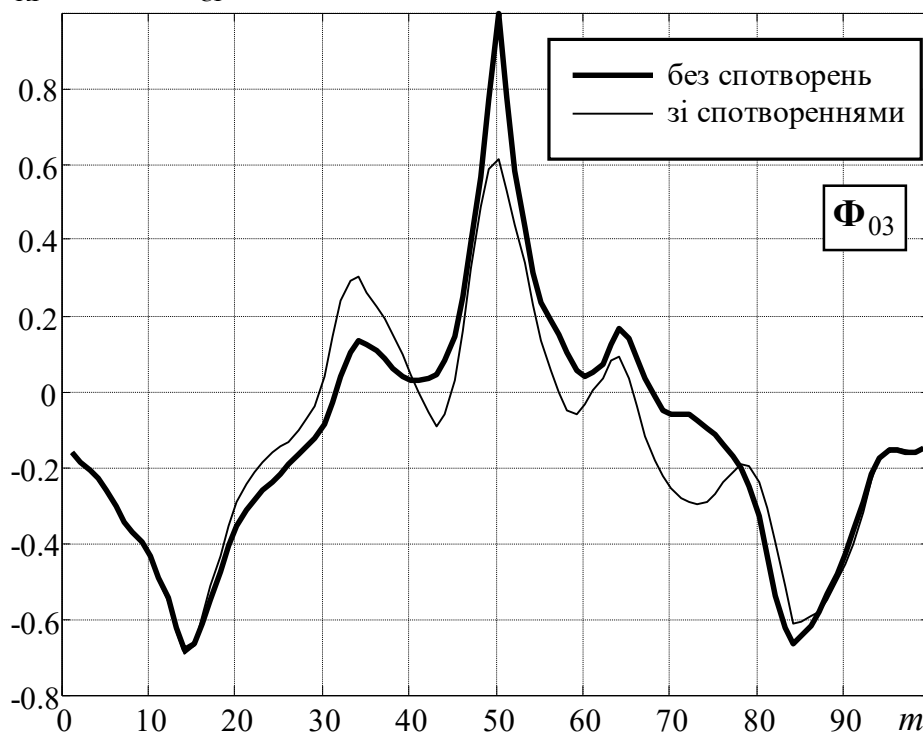


Рисунок 3.9 – ВКФ продольних перетинів яскравості ОП при відсутності та наявності перспективних спотворень

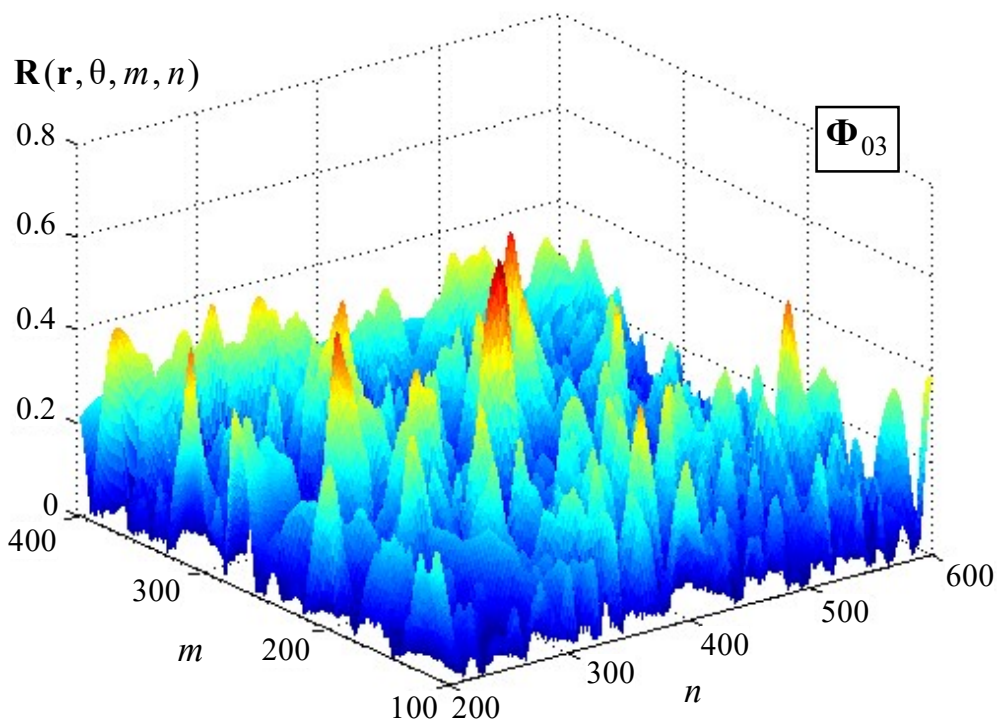


Рисунок 3.10 – Вирішальна функція, сформована при наявності перспективних спотворень ПЗ об'єкта прив'язки

Відповідно до одержаних результатів (рис. 3.8) перспективні спотворення можуть призводити до втрати вирішальною функцією властивості унімодальності внаслідок трансформації розподілу інформативного параметра на ПЗ. Трансформація інформативного параметра залежить від:

- розмірів ПЗ (кутів зору камери);
- кута, під яким спостерігається ПВ;
- розмірів ЕЗ.

Результат формування ВФ КЕСН з використанням ПВ з високою об'єктовою насиченістю наведений на рис. 3.10. Наведений типовий приклад формування ВФ вказує на те, що в умовах наявності перспективних спотворень ПВ з високою об'єктовою насиченістю сформована ВФ є багатопіковою, що не дозволяє здійснити місцевизначення КЕСН з заданою точністю.

3.2 Розробка методу формування вирішальної функції оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації на основі адаптації еталонного зображення до перспективних спотворень

Оскільки положення ОП на ПЗ, а також характер перспективних спотворень заздалегідь невідомі та визначаються сукупністю різних факторів, то для забезпечення можливості формування унімодальної ВФ ОЕ КЕСН відповідно до теорії оцінювання параметрів сигналів [107, 108, 122] в умовах апріорної невизначеності необхідно забезпечити порівняння сигналу з невідомими параметрами (ПЗ) з ЕЗ, який має очікувані перспективні спотворення. Для цього повинна бути сформована завчасно сукупність ЕЗ, що мають заданий (можливий) характер спотворень $\mathbf{S}_{RI}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_G)$ зображення ПВ.

Потрібна кількість ЕЗ з заданим характером перспективних змін

$$\mathbf{S}_{RI} = \|\mathbf{S}_{RI}(\theta_1) \quad \mathbf{S}_{RI}(\theta_2, \dots, \theta_G) \quad \dots \quad \mathbf{S}_{RI}(\theta_G)\| \quad (3.12)$$

визначається наступними факторами:

- точнісні характеристики маршової ІНС;
- параметри ПЗ, що формується на борту БПЛА;
- фактори, що призводять до зміни геометрії системи «БПЛА-ПВ».

Відповідно до (3.12) з урахуванням сукупності ЕЗ може бути сформовано G часткових ВФ.

Сутність запропонованого методу формування унімодальної ВФ в умовах впливу перспективних спотворень поточного зображення ПВ полягає у одночасному формуванні сукупності часткових ВФ (2.7), згідно з відомими положеннями теорії оцінювання параметрів [122]. При цьому максимальне значення часткової ВФ $\mathbf{R}_g(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_g)$ буде забезпечуватися тоді, коли виконується умова:

$$|\theta - \theta_g| \rightarrow \min. \quad (3.13)$$

Виконання цієї умови також забезпечує мінімізацію впливу перспективних спотворень обумовлених невідповідністю ПЗ сформованим заздалегідь ЕЗ на параметри сформованих часткових ВФ, зокрема:

$$\Delta R(\mathbf{r}) = |\mathbf{R}_{g_{\max}}(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_g) - \mathbf{R}_{g_{\max}}(t, \mathbf{r})| \rightarrow \min. \quad (3.14)$$

Визначення зміни параметрів часткових ВФ відносно істинної, яка згідно з [30, 32, 71, 72] може бути одержана у процесі кореляційного аналізу вихідного зображення ПВ у районі прив'язки КЕСН дозволяє оцінити характер перспективних спотворень ПЗ ПВ при обмеженому впливі решти спотворюючих факторів:

$$\hat{\theta}_g = \arg \max(\mathbf{R}_{g_{\max}}(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_g) - \mathbf{R}_{g_{\max}}(t, \mathbf{r})). \quad (3.15)$$

Приклад формування часткової ВФ $\mathbf{R}_g(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_g)$ по поточному зображенню, що наведене на рис. 3.5, при виконанні умови (3.15), для відповідного $\mathbf{S}_{RI}(\theta_g)$ наведений на рис. 3.11.

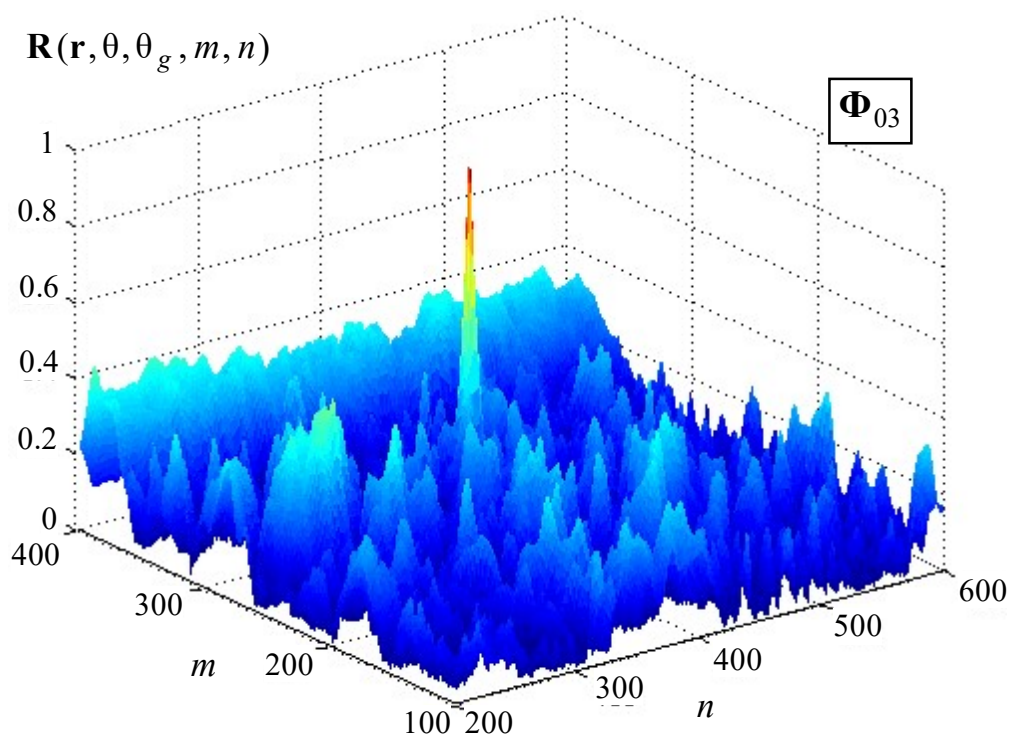


Рисунок 3.11 – Часткова ВФ, сформована для $\mathbf{S}(\theta_g)$ ЕЗ ОП

На відміну від випадку формування ВФ КЕСН в умовах перспективних спотворень без корекції ЕЗ (рис. 3.10), наведена на рис. 3.11 часткова ВФ є унімодальною та забезпечує однозначне визначення екстремуму ВКФ.

Наявність G каналів матричного корелятора (рис. 3.12), відповідно до сформованої сукупності ЕЗ (3.12) забезпечує можливість одержання максимумів часткових ВФ у декількох сусідніх каналах.

Приклад формування часткових ВФ у матричному кореляторі КЕСН, відповідно до виразу (3.13), для трьох кутів візування ($G=3$) КЕСН при здійсненні місцевизначення на ПВ з нормальною об'єктовою насиченістю (Φ_{02}) наведений на рис. 3.13.

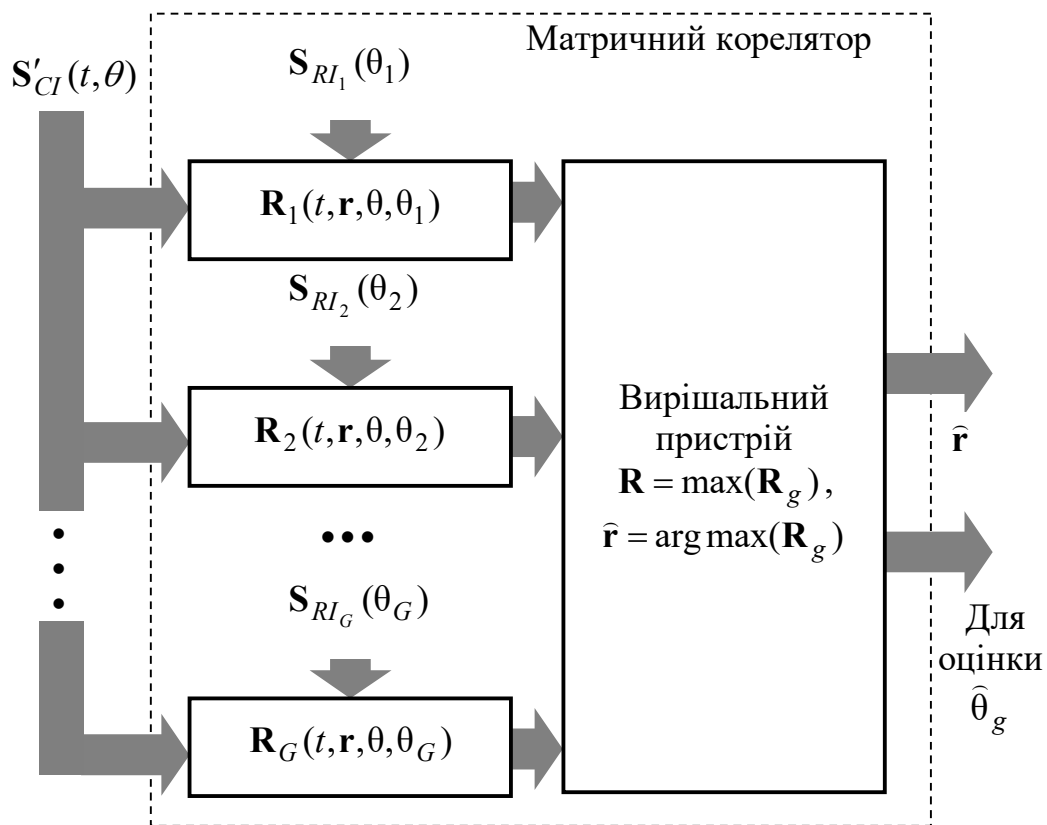


Рисунок 3.12 – Структурна схема матричного корелятора
ОЕ КЕСН БПЛА

Часткові ВФ $\mathbf{R}_1(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_1)$, $\mathbf{R}_2(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_2)$, $\mathbf{R}_3(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_3)$ на вході вирішального пристрою характеризуються трьома піками, що представлені на рис. 3.13. Відповідно до теорії оцінювання параметрів сигналів [107, 108, 122] при відсутності апіорних даних оптимальна оцінка зміщення $\hat{\mathbf{r}}$ ПЗ відносно ЕЗ може бути одержана відповідно до моделі процесу функціонування КЕСН шляхом порівняння поточного $\mathbf{S}_{CI}(t, \theta)$ та з сукупністю S еталонних $\mathbf{S}_{RI}(\theta_s)$ зображень за вирішальним правилом:

$$\hat{\mathbf{r}} = \arg \max \begin{cases} \mathbf{F}[\mathbf{S}_{CI}(t, \theta), \mathbf{S}_{RI}(\theta_1)], \\ \mathbf{F}[\mathbf{S}_{CI}(t, \theta), \mathbf{S}_{RI}(\theta_2)], \\ \dots \\ \mathbf{F}[\mathbf{S}_{CI}(t, \theta), \mathbf{S}_{RI}(\theta_G)]. \end{cases} \quad (3.16)$$

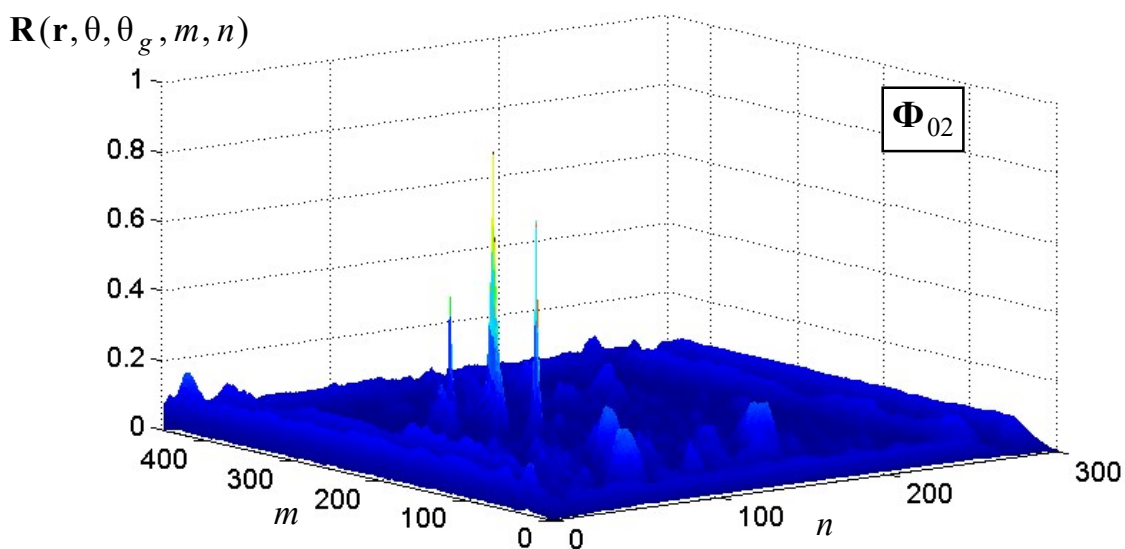


Рисунок 3.13 – Часткові ВФ, сформовані для ЕЗ $S(\theta_g)$ при $G=3$

Відповідно до одержаного результату уточнення положення максимуму результуючої ВФ ($\hat{\mathbf{r}}$) може бути здійснене шляхом апроксимації максимумів часткових ВФ параболоїдом. Проекція параболі, якою апроксимуються максимуми часткових ВФ (рис. 3.13) за координатою m наведена на рис. 3.14. Також слід зазначити, що реалізація розробленого методу формування ВФ оптико-електронної КЕСН в умовах перспективних спотворень окрім оцінки зміщення ПЗ відносно ЕЗ забезпечує можливість оцінки самих перспективних спотворень ОП на поточному зображенні ПВ.

Таким чином, одержав подальший розвиток метод формування вирішальної функції КЕСН, який, на відміну від відомих, заснований на адаптації еталонних зображень до просторового положення та орієнтації БПЛА. При цьому розроблено алгоритм формування вирішальної функції матричною КЕСН.

Узагальнена структурна схема КЕСН, що реалізує розроблений метод формування ВФ в умовах перспективних спотворень наведена на рис. 3.15.

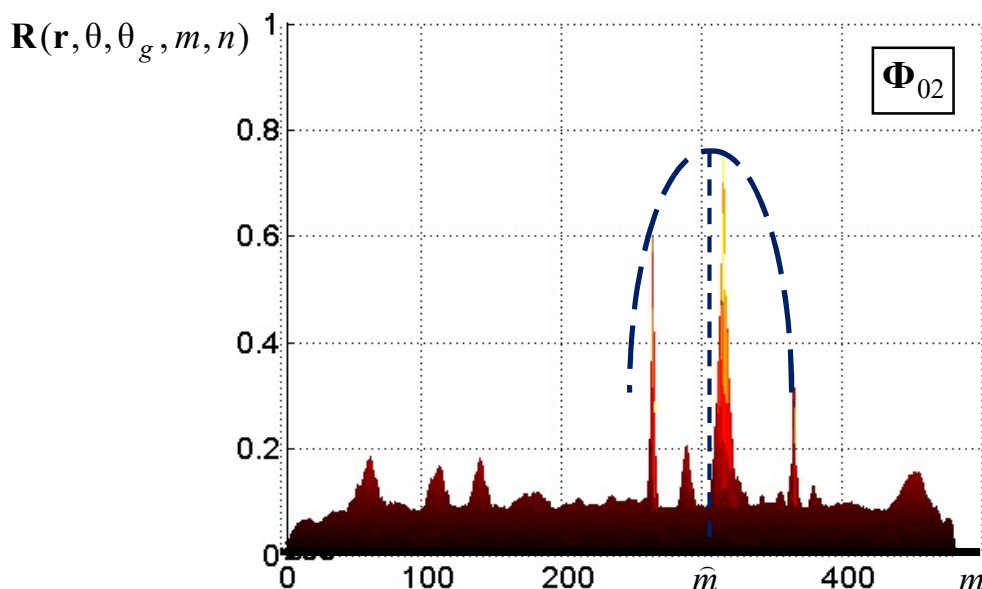


Рисунок 3.14 – Результат параболічної апроксимації максимумів часткових ВФ на виході матричного корелятора

Формування унімодальної неспотвореної ВФ потребує урахування геометричних спотворень, що виникають в залежності від геометрії візування КЕСН. Одержані шляхом моделювання чисельні оцінки КВК та середньоквадратичної помилки суміщення ПЗ та ЕЗ з різною об'єктовою насиченістю показали, що зменшення помилки місцевизначення КЕСН потребує використання для прив'язки ділянок ПВ з нормальною та низькою об'єктовою насиченістю, оскільки на ділянках ПВ з високою об'єктовою насиченістю точність прив'язки буде гіршою.

Уточнення місцевизначення КЕСН в умовах перспективних спотворень ПВ доцільно здійснювати шляхом формування матриці часткових ВФ.

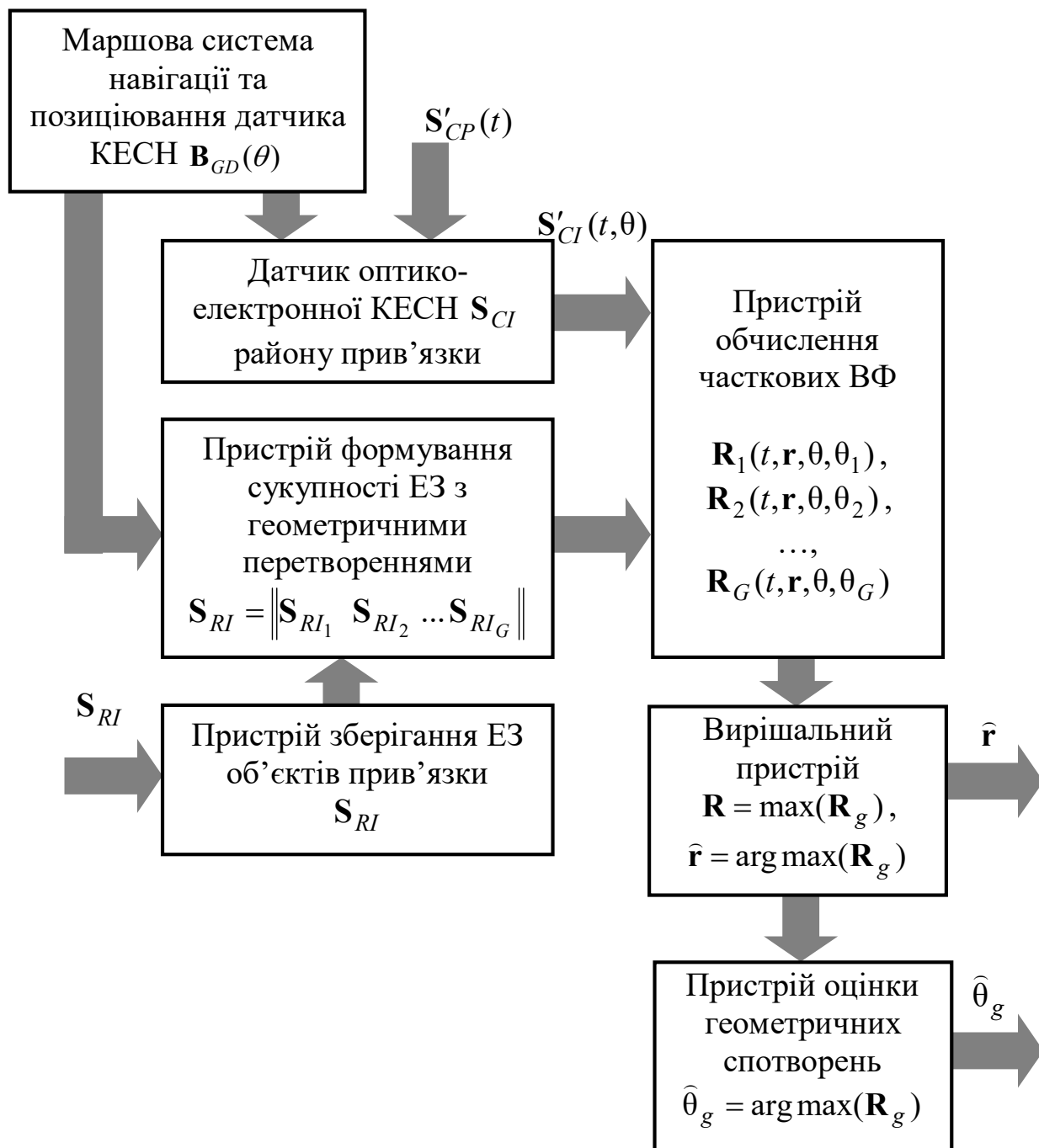


Рисунок 3.15 – Структурна схема у формування ВФ матричним корелятором на основі адаптації ЕЗ до перспективних спотворень

3.3 Результати розробки алгоритму формування вирішальної функції за критерієм максимуму коефіцієнта взаємної кореляції та аналізу результатів статистичних досліджень

Реалізація розробленого методу наведена у вигляді структурної схеми алгоритму формування ВФ на рис. 3.16.

Алгоритм формування ВФ за критерієм максимуму узагальненого КВК ґрунтується на локалізації об'єктів прив'язки шляхом поелементного кореляційного аналізу поточного та еталонного зображень ПВ. Відповідно до структурної схеми алгоритму формування ВФ при проведенні досліджень основна увага приділялася:

- визначенню оптимальної кількості каналів матричного корелятора;
- забезпеченню потрібної точності суміщення ПЗ та ЕЗ на ПВ з різним типовим ФОС;
- порівняльній оцінці результатів місцевизначення КЕСН при наявності та відсутності корекції перспективних спотворень зображення ОП на ПЗ.

При проведенні статистичного моделювання вважалося, що єдиним фактором, що впливає на КЕСН, є перспективні спотворення ОП, які обумовлені помилками орієнтації камери вздовж напрямку руху БПЛА.

За результатами статистичного моделювання встановлено, що усунення впливу перспективних спотворень на результат формування ВФ шляхом адаптації ЕЗ до умов спостереження ПВ потребує, щоб інтервал адаптації ЕЗ до можливих спотворень ПВ $\theta_{g+1} - \theta_g$ був однаковим для всього діапазону можливої зміни кутів орієнтації камери КЕСН БПЛА.

Для умов моделювання, що наведені на рис. 3.3, рис. 3.11, цей інтервал повинен складати порядку 5^0 . При цьому у досліджуваному діапазоні зміни параметра $\Delta\theta = 0^0 \dots 25^0$ у порівнянні з випадком, коли $\Delta\theta = 0^0$ (перспективні спотворення відсутні, рис. 3.4), забезпечується погіршення СКП $\sigma(\Delta\theta) = \sigma(0) = 12 \dots 20\%$ для ПВ з низькою та нормальною об'єктовою

насиченістю.

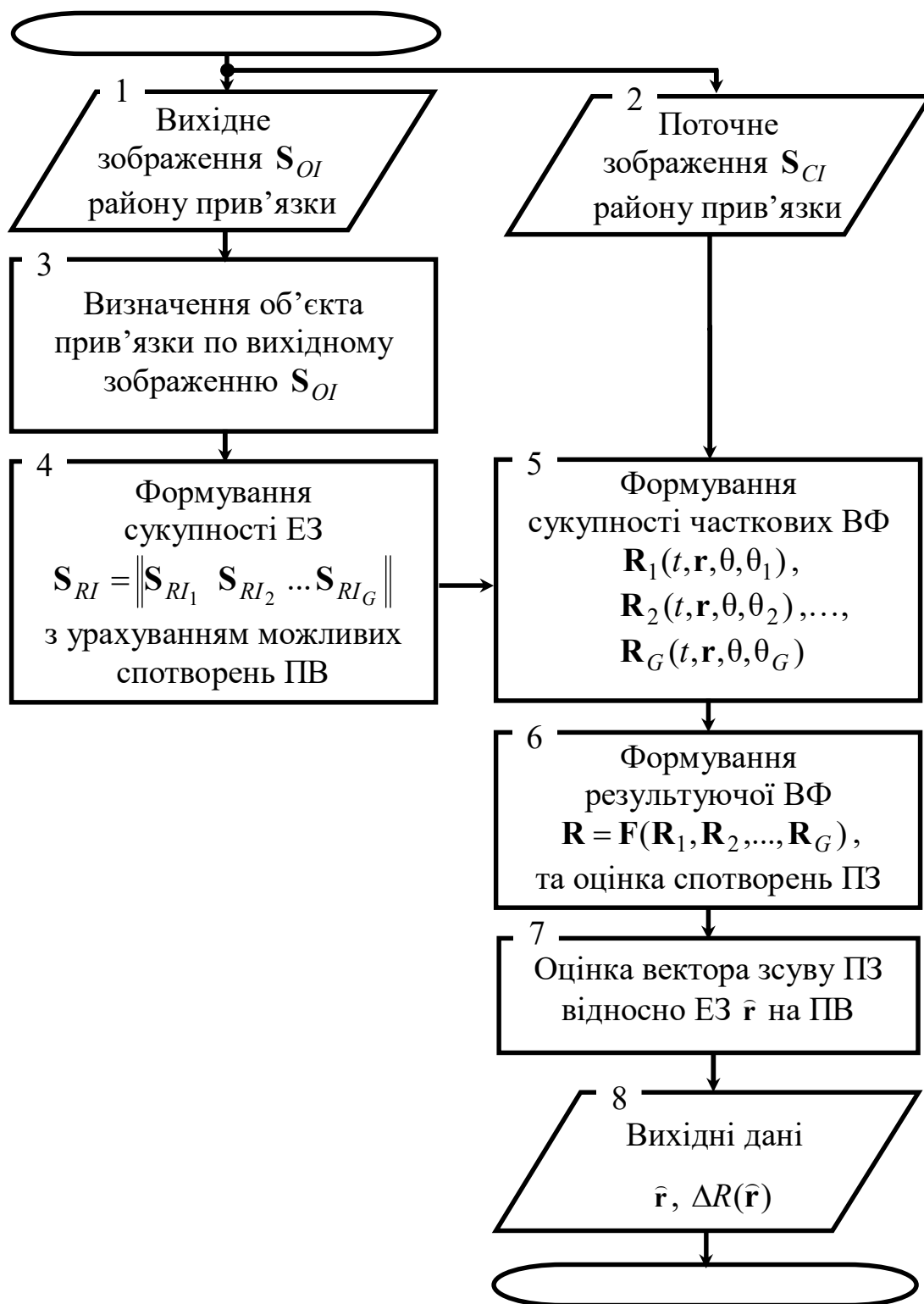


Рисунок 3.16 – Структурна схема алгоритму формування ВФ матричним корелятором

За результатами статистичного моделювання процесу місцевизначення КЕСН в умовах геометричних спотворень ПЗ при відсутності корекції ЕЗ та з застосуванням розробленого методу встановлено, що одержувана точність місцевизначення КЕСН БПЛА згідно з алгоритмом, що наведений на рис. 3.16 є кращою у 1,2 до 3,5 разів порівняно з результатами, наведеними на рис. 3.2, 3.4 стосовно зображень з нормальною об'єктовою насиченістю. Можливе збільшення СКП при застосуванні розроблених методу та алгоритму порівняно випадком відсутності геометричних спотворень ПВ обумовлене, в основному, дискретністю настройки каналів матричного корелятора КЕСН. При цьому вплив дискретності настройки каналів матричного корелятора може бути послаблений за рахунок параболічної апроксимації максимумів часткових ВФ (рис. 3.14). Формування унімодальної ВФ з використанням удосконаленого методу формування вирішальної функції оптико-електронних систем навігації дозволяє забезпечити потрібне значення ймовірності правильного місцевизначення в умовах геометричних спотворень ПВ, відповідно до п. 1.1, на рівні 0,8...0,99.

Для забезпечення прийнятної швидкодії розробленого алгоритму необхідно забезпечити паралельну обробку інформації у каналах матричного корелятора. Для прийнятих умов моделювання, коли кількість каналів матричного корелятора дорівнювала 11, послідовне визначення часткових ВФ потребує значних обчислювальних витрат.

При місцевизначенні КЕСН на ПВ з високою об'єктовою насиченістю в умовах перспективних спотворень забезпечуваний виграш є меншим, порівняно з випадком місцевизначення на ПВ з нормальною об'єктовою насиченістю та складає до 2 разів.

Разом з тим, для типової ситуації, яка описується множиною Φ_{03} дуже часто виникає ситуація, коли можлива неоднозначність місцевизначення БПЛА, яка обумовлена присутністю на зображеннях ПВ хибних об'єктів. Виходячи з цього, необхідно вирішувати задачу місцевизначення КЕСН в умовах високої апріорної невизначеності відносно ЕЗ, що обумовлена наявністю хибних об'єктів.

Висновки по розділу 3

1. Розроблено метод формування вирішальної функції КЕСН за критерієм максимуму узагальненого КВК, який дозволяє на етапі вторинної обробки інформації зменшити вплив перспективних спотворень за рахунок адаптації ЕЗ до геометричних умов візування. Такий підхід суттєво спрощує алгоритми формування ВФ, в яких усунення впливу геометричних спотворень здійснюється за рахунок геометричних перетворень ПЗ.

2. Чисельні оцінки визначення координат максимуму результуючої ВФ підтверджують обґрунтованість розробленого методу та показують можливість забезпечення значень помилки місцевизначення КЕСН незалежно від типу ПВ та кутів візування, близьких до випадку місцевизначення КЕСН при відсутності геометричних спотворень. Це забезпечується застосуванням розроблених методу та алгоритму формування ВФ ОЕ КЕСН, який заснований на адаптації ЕЗ до геометричних спотворень шляхом застосування матричного корелятора для формування часткових ВФ та параболічної апроксимації їх максимумів при формуванні результуючої ВФ.

3. Для забезпечення потрібного СКВ координат при місцевизначенні КЕСН на ПВ з високою об'єктовою насиченістю за наявності декількох яскравих об'єктів, близьких за властивостями з об'єктом прив'язки, потрібно забезпечити рішення задачі локалізації ОП КЕСН на поточному зображенні ПВ. Це обумовлює необхідність розробки методу та алгоритму селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТА ПРИВ'ЯЗКИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА НА ПОТОЧНОМУ ЗОБРАЖЕННІ ПРИ НАЯВНОСТІ ХИБНИХ ОБ'ЄКТІВ

У четвертому розділі наведені результати розробки методу локалізації об'єкта прив'язки при наявності на ПЗ хибних об'єктів. На відміну від відомих, метод ґрунтується на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими хибними об'єктами. Розроблено алгоритм локалізації ОП на ПЗ шляхом пошуку фрагмента бінарного зображення з максимальним значенням одиниць, що співпадає з ЕЗ. Одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП, який враховує результати визначення ймовірності виявлення та локалізації ОП.

Одержав подальший розвиток метод формування унімодальної вирішальної функції, який на відміну від відомих полягає в підсумовуванні числа одиниць різних зрізів ВФ та пошуку найбільшого значення, що відповідає повному співпадінню поточного зображення з еталонним.

Одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП з урахуванням порогу, за яким здійснено зріз ВФ.

Розроблені рекомендації щодо формування унімодальної ВФ при прив'язці КЕСН до ПВ з високою об'єктовою насиченістю та при наявності ХО.

Результати досліджень щодо розробки методу та алгоритму локалізації ОП на зображеннях ПВ з декількома яскравими об'єктами опубліковані у роботах [35, 36, 39, 42 – 44, 46].

4.1 Постановка задачі локалізації об'єкта прив'язки на поточному зображенні

Постановку задачі локалізації об'єкта прив'язки на поточному зображенні здійсним відповідно до моделі ПЗ, наведеної у розділі 2, а також з урахуванням припущення, що відповідно до елементів фону, що відносяться до множини S_w , а також об'єктів, що відносяться до множини S_v , справедливе співвідношення $V \ll W$.

З урахуванням зробленого припущення щільності розподілу яскравості S елементів фону та об'єкта визначаються виразами:

$$w_w(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-(S - S_w)^2 / 2\sigma^2\right], \quad (4.1)$$

$$w_v(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-(S - S_v)^2 / 2\sigma^2\right]. \quad (4.2)$$

Відносно сигналів інших об'єктів S_ρ , що близькі по яскравості з об'єктом прив'язки (хибні об'єкти), зробимо наступне припущення:

– еквівалентні діаметри S_ρ розподілені за експоненційним законом.

Це припущення дозволяє при постановці задачі враховувати тільки один параметр розподілу – середній діаметр $S_\rho D_0$, а також враховувати, що при відомому середньому значенні максимальна ентропія має експоненційний розподіл:

$$w(D) = \begin{cases} \frac{1}{D_0} \exp(-D/D_0), & D \leq D_e; \\ 0, & D > D_e. \end{cases} \quad (4.3)$$

Сигнал від S_ρ з еквівалентним діаметром D_e з урахуванням коефіцієнта заповнення елемента розрізнення має значення яскравості, що визначається співвідношенням:

$$S(i, j) = S_\rho \frac{D}{D_e} + S_w(i, j) \left(1 - \frac{D}{D_e} \right) = S_w(i, j) - \frac{D}{D_e} (S_w(i, j) - S_\rho), \quad (4.4)$$

де S_ρ – середня яскравість ХО.

Щільність розподілу ймовірності сигналу від ХО з урахуванням розподілу (4.1) має вигляд:

$$w_\rho(S) = \begin{cases} \lambda e^{\lambda(S_w - S_\rho)}, & S \leq S_\rho; \\ 0, & S > S_\rho, \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{D_e}{D_0(S_w - S_\rho)}. \quad (4.6)$$

Вважатимемо, що сигнали від ХО у області кадра ПЗ розташовані випадковим чином і являють собою пуасонівський потік, якому властиві стаціонарність, ординарність без післядії.

Внаслідок нестійкості як абсолютних значень яскравості окремих елементів ПВ, так і контрасту об'єктів та фонів будемо вважати, що ЕЗ задане знаком контрасту та геометричною формою об'єкта. Тобто ЕЗ представимо у вигляді бінарного зображення. Елементом об'єкта відповідають значення 1, а елементам фону – 0.

Для розглянутої моделі ПЗ з декількома об'єктами, близькими за яскравістю та геометричною формою з ОП, необхідно вирішити задачу локалізації об'єкта прив'язки.

Позначимо через F_ρ кількість елементів у кадрі ПЗ з сигналами від ХО, причому:

$$F_\rho + F_v + F_w = F_0, \quad (4.7)$$

де F_0 – загальна кількість елементів кадра, що попали у поле зору

камери;

F_v, F_w – кількість елементів кадра, які зайняті ОП та фоном.

Використання припущень $\sigma \ll \Delta S, F_v/F_0 > 0.5$ дозволяє розбити рішення задачі локалізації ОП на ПЗ на декілька етапів. Перший етап полягає у виявленні об'єкта, другий – у його попередній селекції на фоні ХО. Третій етап передбачає пошук максимального значення ВФ R_j із сукупності $R_j = \sum_{\zeta=1}^L R_i(i, j)$, яке визначається шляхом пошарового аналізу кількості перетинів ВФ ζ та пошуку її єдиного значення, що відповідає максимальному.

На етапі виявлення необхідно оцінити середнє значення фону без урахування просторових співвідношень між елементами зображення. Далі, встановивши поріг квантування відносно знайденої на попередньому етапі оцінки середнього значення фону, необхідно перевести ПЗ у бінарне зображення. Після цього, використовуючи апріорну інформацію про геометричні характеристики об'єкта прив'язки, вирішити задачу селекції ОП на бінарному зображенні. При цьому необхідно врахувати, що частина сигналів від яскравих ХО класифікується як сигнал ОП. Тому на третьому етапі здійснюється формування унімодальної ВФ шляхом пошуку її найбільшого значення, що характеризується повним співпадінням ПЗ з ЕЗ.

4.2 Рішення задачі виявлення та селекції об'єкта прив'язки на поточному зображенні поверхні візування з хибними об'єктами

Поточне зображення при построчному розкладанні відповідно до (4.7) являє собою вектор розмірності F_0 . У результаті маємо вибірку об'єму F_0 , яка утворює три класи ω_i , що не перетинаються між собою та відповідають сигналам від фону – ω_w , хибного об'єкта – ω_p та об'єкта прив'язки – ω_v , а щільність розподілу вибірки визначається виразом:

$$w(S) = \sum_{i=1}^3 p_i w_i(S), \quad (4.8)$$

де $p_i = \frac{F_i}{F_0}, i=1, 2, 3$ – априорні ймовірності класів;

$w_i(S) = w(S|\omega_i)$ – умовні щільності ймовірності випадкової величини S за умови, що S належить до класу ω_i , які визначаються виразами (4.1), (4.2), (4.3).

Щоб виділити сигнали ОП від сигналів фону розіб'ємо вибірку, що складається з елементів трьох класів, на два класи стосовно уточнюваного далі показника якості вважатимемо відомим поріг квантування l вибірки на два класи, у відповідності до якого до одного з класів віднесемо сигнали ОП, до другого – решту сигналів від ХО. У такому випадку ймовірності помилок першого (другого) роду (коли сигнал, що належить до першого (другого) класу), відносяться до другого (першого) класу та визначаються виразами:

$$\alpha = \int_{S_w-l}^{\infty} w_v(S) dS, \quad (4.9)$$

$$\beta = \frac{1}{1+K} \int_{-\infty}^{S_w-l} [w_\rho(S) + Kw_w(S)] dS, \quad (4.10)$$

де $K = \frac{F_\rho}{F_w}$.

По ймовірностям α та β на другому етапі можна визначити ймовірність правильної локалізації ОП, яка відповідно до (4.9), (4.10), може розглядатися функцією порогу l і бути мінімізована вибором відповідного порогу $l=l_{opt}$. Оскільки параметри розподілу суміші (4.9) невідомі, на першому етапі ставиться задача оцінки невідомих параметрів, до яких відносяться $\Delta S, S_w, p_w$.

Параметр λ визначається однозначно виразом (4.8). Кількість елементів ОП F_v відома, відповідно, відома ймовірність:

$$p_v = \frac{F_v}{F_0},$$

а

$$p_{\rho} = 1 - p_w - p_v.$$

Застосувавши до вихідної вибірки нелінійне перетворення, яке найкращим чином підкреслює «центр» розподілу фону $w_w(S)$, можна побудувати гістограми розподілу перетвореної випадкової величини та визначити оцінки середнього значення фону \hat{S}_w шляхом порівняння центральної частини гістограми з теоретичною щільністю ймовірності.

Для цього застосуємо до вибірки $\{S_i\}_{i=1}^{F_0}$ з розподілу (4.9) нелінійне перетворення $y=f(S)$. Тоді щільність ймовірності y буде визначатися відповідно до виразу:

$$w(y) = \sum_{i=1}^3 p_i w_i(f^{-1}(y)) \frac{df^{-1}(y)}{dy},$$

де f^{-1} – зворотня до f функція.

Оскільки більша частина вибірки належить розподілу w_w , вимагатимемо, щоб обране перетворення найкращим чином підкреслювало «центр» розподілу w_w , а елементи вибірки з розподілів w_v, w_{ρ} переводило в «хвости» розподілу $w(y)$. Нехтуючи на час розподілами з $w(y)$ знайдемо, що центр розподілу в найкращій мірі підкреслюється «спрямлюючим» перетворенням, що задовольняє умові, $w_w(S) / \frac{df_0(S)}{dS} = 1$, звідки $\frac{df_0(S)}{dS} = w_w(S)$, а

$$f_0(S) = F_1(S) = \Phi((S - S_w)/\sigma),$$

де $F_1(S)$ – інтегральна функція розподілу ймовірності гаусівської випадкової величини;

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt - \text{інтеграл ймовірностей.}$$

Таким чином, після перетворення f_0 випадкова величина

$y=f_0(S)$ розподілена по рівномірному закону на інтервалі $[0,1]$. При цьому інтервал $[-\sigma, \sigma]$ змінної S переходить в інтервал $[0,16(6), 0,83(3)] \subset [0,1]$, а хвостові частини розподілу S – в інтервали $[0; 0,16(6)]$, $[0,83(3); 1]$. В ці інтервали також попадає більша частина елементів вибірки з розподілів w_ν, w_ρ . Таким чином, шляхом формування гістограмми центральної частини розподілу y , можна оцінювати середнє значення S_w .

У ході перетворень динамічний діапазон ΔS був розбитий на інтервали довжиною σ і центр інтервалу, у який попадала найбільша кількість виборочних значень, був прийнятий за грубу оцінку середнього значення S_w .

Виконавши відповідні перетворення, підставивши у вирази (4.9), (4.10) оцінки параметрів, одержимо оцінки ймовірностей помилок $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$:

$$\hat{\alpha} = \int_{\hat{S}_w - l}^{\infty} w_\nu(S|\hat{S}_w) dS, \quad (4.11)$$

$$\hat{\beta} = \frac{1}{1 + \hat{K}} \int_{-\infty}^{\hat{S}_w - l} (w_w(S|\hat{S}_w) + \hat{K} w_\rho(S|\hat{S}_w)) dS, \quad (4.12)$$

де $\hat{K} = \hat{p}_\rho / \hat{p}_w$, $\hat{p}_\nu = 1 - \hat{p}_w - p_\rho$.

Для заданого порогу l перетворимо вихідне ПЗ S_{Cl} у бінарне зображення \mathbf{H} відповідно до правила:

$$H_i = \begin{cases} 1, & S_i \leq S_\rho - l; \quad S_i > S_{\max}; \\ 0, & S_{\max} > S_i > S_\rho - l; \end{cases} \quad i \in \overline{1, F_0}.$$

Поріг квантування визначає величини ймовірності появи помилок першого α та другого β роду. У свою чергу величини α та β визначають мінімальне значення параметра сигнал/шум $q=q_{\min}$, при якому досягається потрібна величина ймовірності правильної локалізації ОП:

$$q_{\min} = \Phi^{-1}(1 - \alpha) + \Phi^{-1}(1 - \beta).$$

Тепер необхідно вирішити задачу селекції об'єкта на бінарному ПЗ на фоні ХО, використовуючи апіорну інформацію у вигляді бінарного ЕЗ.

Алгоритм обробки бінарного ПЗ з метою рішення задачі селекції ОП полягає у наступному. Для кожного фрагмента ПЗ $\mathbf{H}^i \subset \mathbf{H}$, що має певні конфігурацію та розміри об'єкта, здійснюється порівняння з ЕЗ, яке повністю складається з одиниць. Операція порівняння бінарних зображень полягає у додаванні «по модулю два» елементів зображень та формуванні ВФ відповідно до формули:

$$R_i = \sum_{k=1}^{F_\rho} \left(S_{RI_m} \oplus_{\text{mod } 2} H_m^i \right), \quad (4.13)$$

де H_m^i – m -й елемент i -го фрагмента ПЗ;

S_{RI_m} – m -й елемент еталонного зображення \mathbf{S}_{RI} .

Вирішальне правило полягає у тому, що фрагмент $\mathbf{H}^i \subset \mathbf{H}$, для якого:

$$R_j = \inf_i R_i, \quad (4.14)$$

оголошується співпадаючим з ЕЗ. Індекс i приймає стільки значень M , скільки існує можливих зсунутих один відносно одного фрагментів з заданою конфігурацією у кадрі \mathbf{H} . Якщо властивістю (4.14) володіють декілька фрагментів, то рішення про локалізацію ОП не приймається.

Для порівняння фрагментів \mathbf{H}^i з ЕЗ, що складається з одиниць, зручніше оперувати з числами:

$$z_i = F_\rho - s_i, \quad i \in \overline{0, M},$$

кожне з яких являє собою кількість одиниць у фрагменті \mathbf{H}^i . Тоді вирішальне

правило полягає у тому, що фрагмент $\mathbf{H}' \subset \mathbf{H}$, для якого:

$$z_j = \sup_{i \in \overline{0, M}} z_i, \quad (4.15)$$

оголошується співпадаючим з ЕЗ.

Щоб оцінити ймовірність правильної локалізації об'єкта діятимемо наступним чином. Нехай розміри об'єкта складають $T_1 \times T_2$ елементів розділення. Розіб'ємо матрицю ПЗ на прямокутні підматриці розміру $T_1 \times T_2$. При необхідності дещо збільшимо розміри кадра, щоб у нього вмістилася ціла кількість підматриць, яку позначимо $M+1$. У цьому випадку оцінки ймовірності правильної локалізації ОП будемо отримувати заниженими за рахунок збільшення кадра. Припустимо, що істинне положення об'єкта попадає у одну з підматриць, та позначимо через $\mathbf{H}^0 \subset \mathbf{H}$ фрагмент ПЗ, що відповідає ЕЗ, а через \mathbf{H}^i , $i \in \overline{1, M}$ – фрагменти, розміщені у інших підматрицях.

Нехай ймовірність появи одиниці у \mathbf{H}^i дорівнює r_i . Тоді числа z_i розподілені по біноміальному закону:

$$P(z_i) = C_{F_v}^{z_i} r_i^{z_i} (1 - r_i)^{F_v - z_i}, \quad z_i \in \overline{0, F_v}. \quad (4.16)$$

Ймовірність правильної локалізації ОП при використанні вирішального правила (4.15) дорівнює ймовірності того, що число одиниць z_0 , що відповідає співпадінню ЕЗ та об'єкта, перевищить решту чисел z_i , $i \in \overline{1, M}$.

Позначимо через A_0^j подію, що полягає у появі $z_0 = j \in \overline{1, F_v}$ одиниць у \mathbf{H}^0 , а через A_i^j , $i \in \overline{1, M}$ – подію, яка полягає у тому, що кількість одиниць z_i не перевищить $j-1$. Події A_i^j , $i \in \overline{1, M}$ є незалежними у сукупності, оскільки $\mathbf{H}^i \cap \mathbf{H}^m = \emptyset \forall i, m \in \overline{0, M}$. У відповідності до виразу (4.16), ймовірності подій A_i^j визначаються співвідношеннями:

$$P(A_i^j) = \begin{cases} C_{F_v}^j r_0^j (1-r_0)^{F_v-j}, & i = 0; \\ \sum_{m=1}^{j-1} C_{F_v}^m r_i^m (1-r_i)^{F_v-m}, & i \in \overline{1, M}. \end{cases} \quad (4.17)$$

Тоді відповідно до теореми множення ймовірностей ймовірність події $L_j = \bigcap_{i=0}^M A_i^j$ дорівнює:

$$P(L_j) = \prod_{i=0}^M P(A_i^j), \quad j \in \overline{1, F_v}.$$

Оскільки події $L_j, j \in \overline{1, F_v}$ у сукупності несумісні, ймовірність того, що кількість одиниць у \mathbf{H}^0 перевищить кількість одиниць у решті фрагментів \mathbf{H}^i , визначається виразом для ймовірності правильної локалізації:

$$P_{cl} = \sum_{j=1}^{F_v} P(L_j) = \sum_{j=1}^{F_v} \prod_{i=0}^M P(A_i^j), \quad (4.18)$$

де ймовірності $P(A_i^j)$ визначаються формулами (4.17).

Враховуючи, що:

$$r_i = \begin{cases} 1 - \alpha, & i = 0; \\ \beta, & i \in \overline{1, M}, \end{cases}$$

(ймовірності α, β задані співвідношеннями (4.9), (4.10)), для ймовірності правильної локалізації об'єкта отримаємо кінцевий вираз:

$$P_{cl} = \sum_{j=1}^{F_v} C_{F_v}^j (1-\alpha)^j \alpha^{F_v-j} \left[\sum_{m=0}^{j-1} C_{F_v}^m \beta^m (1-\beta)^{F_v-m} \right]^M. \quad (4.19)$$

З метою забезпечення однозначності прийнятих рішень необхідно розробити алгоритм, який здійснює ітераційний процес обробки зі змінним порогом до одержання єдиного рішення.

Один з можливих варіантів такого алгоритму полягає у наступному. Після обчислення оцінки середнього значення \hat{S}_w задається початкове значення порогу $l^0 = \alpha\sigma$ (дослідження розробленого алгоритму показали, що доцільно обирати $\alpha \in 1.8 \dots 2.2$), відносно якого ПЗ $S_{CI} = \|S(i, j)\|$ перетворюється у бінарне зображення, яке позначимо через \mathbf{M}^0 . Шляхом порівняння цього зображення з ЕЗ у відповідності з критерієм (4.15) обчислюється матриця вирішальної функції $\|z_{ij}^0\|$ та знаходиться множина:

$$M^0 = \left\{ (k, l) \in \overline{1, N_1} \times \overline{1, N_2} \mid z_{kl} = \max_{i, j} z_{ij} \right\},$$

причому максимум ВФ z_{\max}^0 не обов'язково дорівнює F_v , а можливо $z_{\max}^0 < F_v$.

Якщо множина \mathbf{M}^0 складається з одного елемента, тобто $\mathbf{M}^0 = \{1(m, l)\}$, то приймається рішення про те, що координати опорного елемента об'єкта стосовно ПЗ дорівнюють m, l . У протилежному випадку організується ітераційний процес, що включає три етапи. Перший етап пов'язаний зі зміною початкового значення порогу l^0 на l^1 . На другому етапі здійснюється формування нового бінарного зображення \mathbf{H}^1 стосовно порогу l^1 . Третій етап пов'язаний з обчисленням матриці вирішальної функції $\|z_{ij}^1\|$ для зображення \mathbf{H}^1 та обчисленням множини \mathbf{M}^1 . Для організації ітераційного процесу необхідно визначити величину кроку ітерації та її знак. У розробленому алгоритмі у режимі адаптації порогу пропонується рішення приймати за умови, що на деякому i -му кроці ітерації множина \mathbf{M}^i складається з одного елемента, причому $z_{\max}^i = F_v$. Відповідно, якщо максимум вирішальної функції не є єдиним і дорівнює F_v , необхідно обирати $\Delta l_1 = l^1 - l^0 > 0$. В протилежному випадку ітерація повинна мати знак «мінус».

Вибір кроку кожної з ітерацій повинен здійснюватися таким чином, щоб при наступній i -й ітерації бінарне зображення \mathbf{H}^i несуттєво відрізнялося від \mathbf{H}^{i-1} .

4.3 Рішення задачі формування унімодальної вирішальної функції

Вираз (4.19) для ймовірності правильної локалізації об'єкта придатний для оцінки ефективності застосування КЕСН на ділянках ПВ з об'єктом прив'язки, що однозначно визначається системою. У цьому випадку система формує унімодальну ВФ. У випадку прив'язки до ПВ з декількома яскравими об'єктами, що мають параметри близькі до ОП, виникає необхідність уточнення результату прив'язки. Для цього на третьому етапі здійснюється пошук найбільшого значення ВФ, що відповідає повному співпадінню ПЗ з ЕЗ.

Суть методу полягає у формуванні сукупності ВФ G_i з наступним визначенням найбільшої кількості одиниць у сумарному представленні ВФ $\sum_{i=1}^U G_i$.

Вирішальне правило полягає у тому, що фрагмент $G_j \subset G$, для якого:

$$G_j = \sup_{i \in 0, U} G_i, \quad (4.20)$$

оголошується співпадаючим з ЕЗ.

Індекс i приймає стільки значень, скільки існує перетинів U фрагментів $G_j \subset G$ до моменту визначення перетину з найбільшою кількістю одиниць.

У якості критерію локалізації ОП оберемо інтегральний показник відносної яскравості, значення якої формується у вигляді незалежних відліків Q в елементах матриць ВФ G_i . Усі одержані матриці G_i поелементно додаються між собою. Результуюча матриця G_i містить в елементах $G_i(i, j)$ величини незалежних відліків у вигляді інтегральних показників яскравості. Матриця G_i , у якій записана найбільша кількість одиниць ($\sum_{i=1}^U G_i = \max$) приймається за результат локалізації об'єкта прив'язки.

Елемент $G_i(i, j)$, який містить максимальну кількість одиниць, дозволяє визначити номер покрокового порівняння по рядкам та стовбцям матриці, при

якому локалізований ОП. Таким чином, визначаються координати одного з обраних кутів матриці ВФ у межах ПЗ, що дозволяє знайти координати ОП у полі матриці ПЗ. У результаті виконання трьох етапів приймається рішення про локалізацію ОП у кадрі ПЗ з декількома об'єктами, які мають параметри, схожі з параметрами ОП. При цьому ймовірність правильної локалізації ОП у відповідності до розробленого алгоритму визначається виразом:

$$P_{cl} = 1 - \left(1 - \sum_{j=1}^{F_v} C_{F_v}^j (1 - \alpha)^j \alpha^{F_v - j} \left[\sum_{m=0}^{j-1} C_{F_v}^m \beta^m (1 - \beta)^{F_v - m} \right]^Q \right)^U. \quad (4.21)$$

Вираз (4.21) встановлює зв'язок та дає можливість у відповідності до виразів (4.9, 4.10) здійснювати оцінки ймовірності правильної локалізації ОП в залежності від величини порога при різних значеннях параметра перешкодової обстановки $K = \frac{F\rho}{F_w}$ і фіксованому значенні відношення сигнал-шум.

Таким чином, одержав подальший розвиток метод формування унімодальної вирішальної функції, який на відміну від відомих полягає в підсумовуванні числа одиниць різних зрізів ВФ та пошуку найбільшого значення, що відповідає повному співпадінню поточного зображення з еталонним. Одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП з урахуванням порогу, за яким здійснено зріз ВФ.

4.4 Результати розробки алгоритму локалізації об'єкта прив'язки оптико-електронної кореляційно-екстремальної системи навігації при наявності на поверхні візування хибних об'єктів

Задачу розробки алгоритму локалізації об'єктів прив'язки КЕСН будемо розглядати стосовно класичного кореляційного алгоритму, формування ВФ відповідно до якого наведено в [1–5, 22 – 24, 33, 82].

Результатом локалізації ОП на ПЗ з хибними об'єктами є визначення оцінки вектора зміщення ПЗ відносно ЕЗ $\hat{\mathbf{r}} = \|\hat{m} \quad \hat{n}\|$. Відповідно до [122] оцінка вектора зміщення визначається як:

$$\hat{\mathbf{r}} = \arg \max_{\mathbf{r}} (\mathbf{R}(\mathbf{r})). \quad (4.22)$$

При наявності на ПЗ хибних об'єктів ВФ, що сформована відповідно до виразу (4.22), є багатопіковою. Відповідно до такої ВФ результат локалізації ОП є неоднозначним та може мати n значень $\hat{\mathbf{r}}_1, \hat{\mathbf{r}}_2, \dots, \hat{\mathbf{r}}_n$. Кількість цих значень визначається властивостями ПЗ та кількістю ХО.

Відповідно до розробленого методу локалізації ОП на ПЗ поверхня візування перетворюється у бінарне зображення, елементи якого визначаються співвідношенням:

$$\mathbf{S}_{CI} = \left\| \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ при } S(i, j) \geq l^0 \\ 0, \text{ при } S(i, j) < l^0 \end{array} \right. \right\|. \quad (4.23)$$

Аналогічним чином формується ЕЗ:

$$\mathbf{S}_{RI} = \left\| \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ при } S_{RI}(i, j) \geq l^0 \\ 0, \text{ при } S_{RI}(i, j) < l^0 \end{array} \right. \right\|. \quad (4.24)$$

Шляхом порівняння $\bar{\mathbf{S}}_{CI}$ з $\bar{\mathbf{S}}_{RI}$ відповідно до (4.13) формується матриця ВФ. Задача локалізації ОП на ПЗ вважається вирішеною тоді, коли ВФ має один максимум. Якщо ВФ при зсуві ПЗ відносно ЕЗ складається з одного ненульового елемента:

$$\mathbf{R}(\mathbf{r}) = \left\| \left\{ \begin{array}{l} R_{\max}, \text{ при } \mathbf{r} = \hat{\mathbf{r}} \\ 0, \text{ при } \mathbf{r} \neq \hat{\mathbf{r}} \end{array} \right. \right\|, \quad (4.25)$$

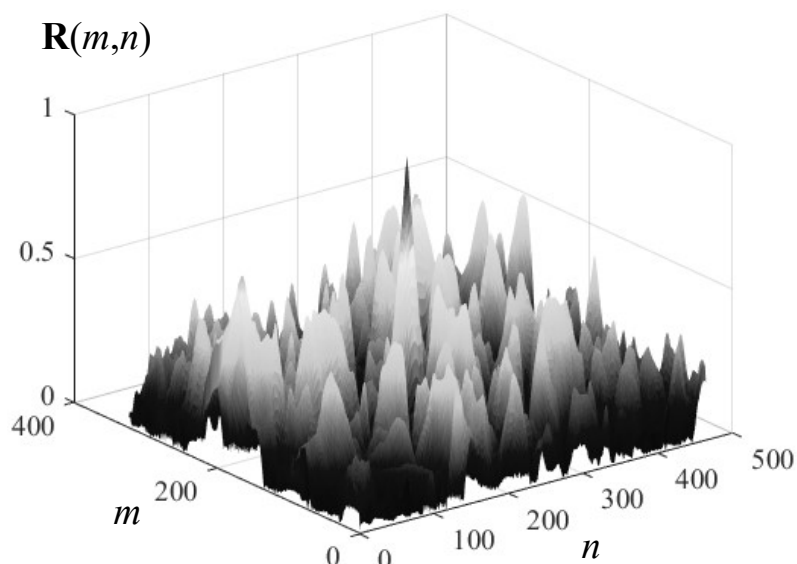


Рисунок 4.1 – Результат обчислення ВФ при наявності хибних об'єктів

то ухвалюється рішення про правильну локалізацію ОП та визначаються його координати на ПЗ $\hat{\mathbf{r}} = \|\hat{m} \quad \hat{n}\|$. У протилежному випадку організується ітераційний процес, що складається з трьох описаних вище етапів.

Для організації ітераційного процесу необхідно визначити крок та знак зміни порогового рівня.

Структурна схема багатопорогового алгоритма локалізації ОП наведена на рис. 4.2.

Оцінимо ефективність застосування розробленого алгоритму локалізації ОП. Ефективність застосування багатопорогового алгоритма локалізації ОП на зображеннях ПВ з високою об'єктовою насиченістю та при наявності ХО оцінювалася за результатами формування ВФ, а також шляхом оцінки ймовірності правильної локалізації ОП згідно з виразом (4.21).

Результати локалізації ОП для зображення ПВ (рис. 2.4) згідно з розробленим алгоритмом наведені на рис. 4.3

На рис. 4.3 зображена ВФ, отримана за результатами моделювання роботи багатопорогового алгоритма локалізації ОП на зображенні ПВ з ХО. Результати моделювання процесу формування ВФ підтвердили можливість правильної локалізації ОП на ПВ з ХО.

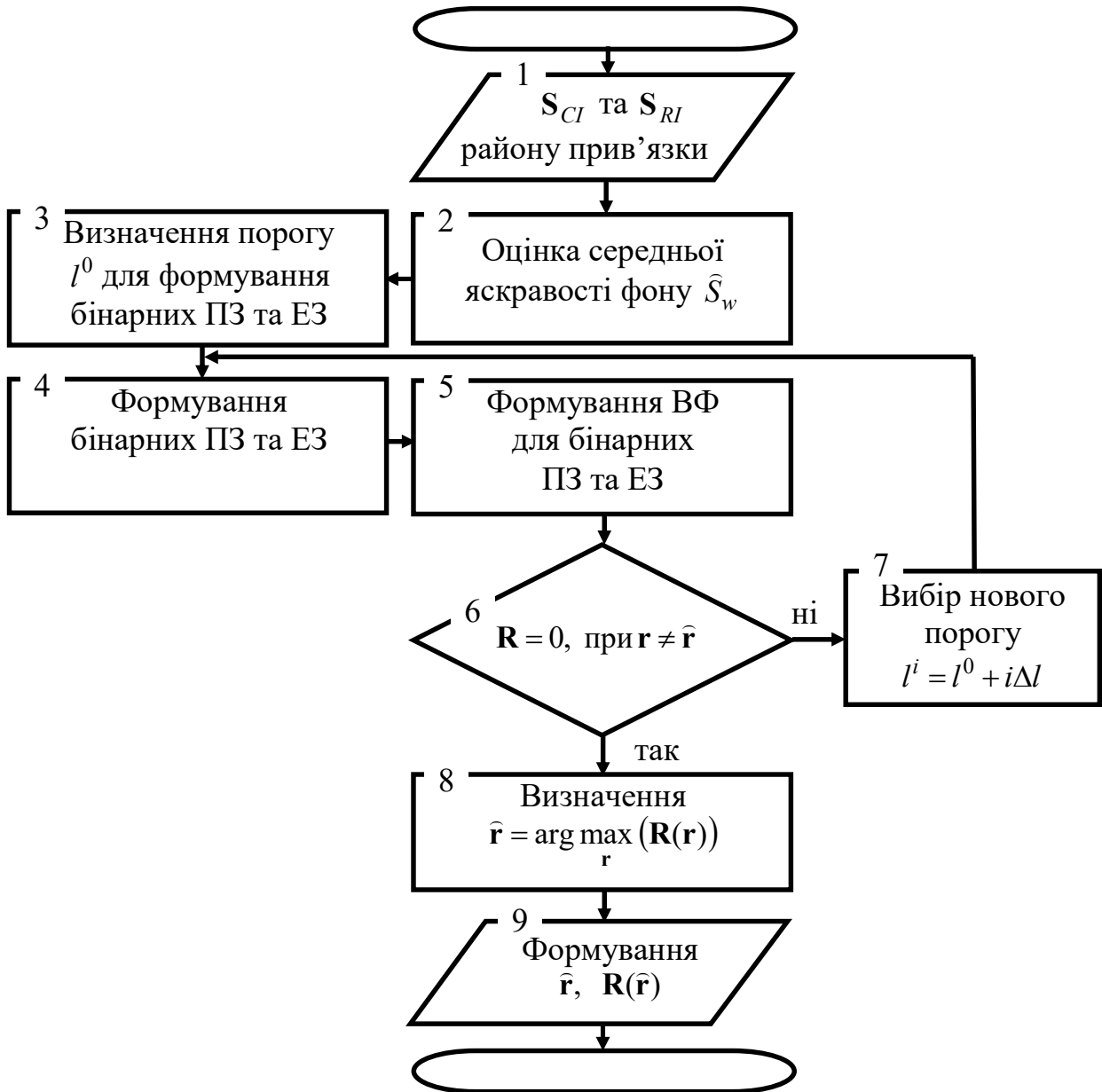


Рисунок 4.2 – Структурна схема багатопорогового алгоритму локалізації об'єкта прив'язки на ПЗ

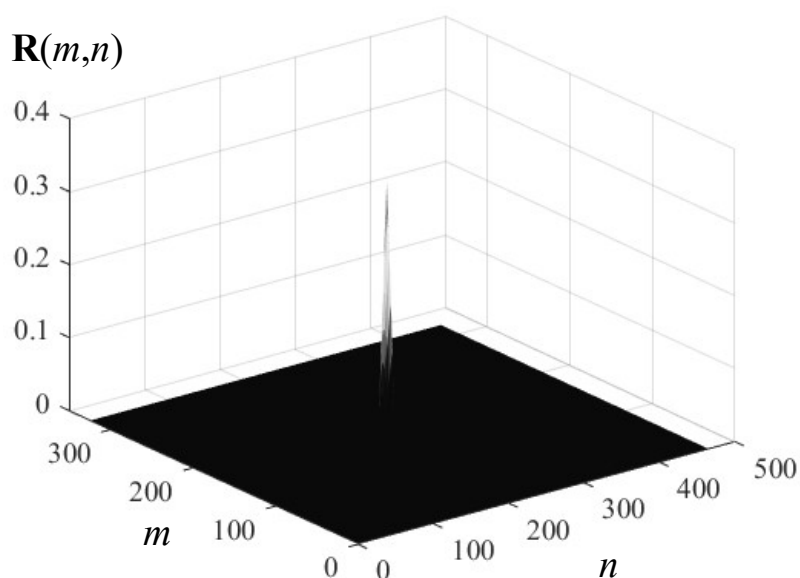


Рисунок 4.3 – Результат локалізації об’єкта прив’язки

4.5 Результати оцінки ефективності застосування багатопорогового алгоритма локалізації об’єкта прив’язки поверхні візування з хибними об’єктами

Результати оцінки ймовірності правильної локалізації ОП та формування ВФ для двох значень відношення сигнал/шум приймального тракту КЕСН наведені на рис. 4.4 – 4.7.

Аналіз результатів оцінки ймовірності правильної локалізації ОП (рис. 4.4, 4.6) та формування ВФ (рис. 4.5, 4.7) з використанням ПВ з ХО показав, що застосування процедури виявлення та багатопорогової селекції ОП на зображенні дозволяють забезпечити ймовірність правильної локалізації ОП близьку до одиниці. При цьому наявність на зображенні ПВ ХО, що близькі за параметрами до ОП, не впливає на формування унімодальної ВФ.

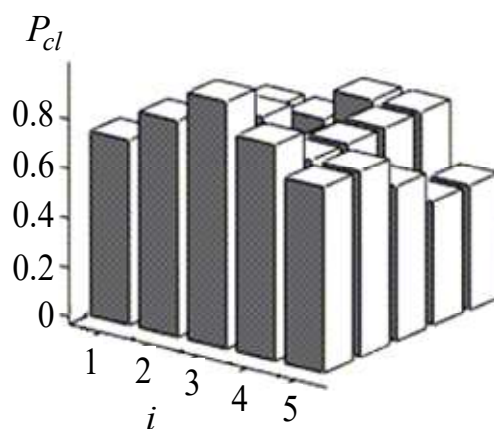


Рисунок 4.4 – Результат оцінки ймовірності локалізації ОП на ПЗ при відношенні сигнал/шум $q \approx 10$

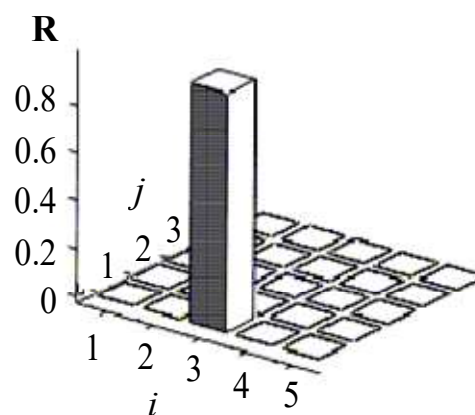


Рисунок 4.5 – Результат формування ВФ при відношенні сигнал/шум $q \approx 10$

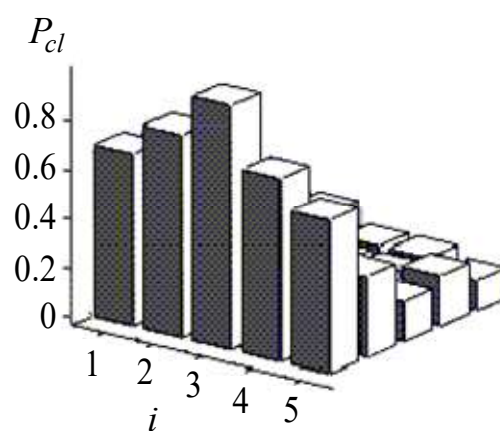


Рисунок 4.6 – Результат оцінки ймовірності локалізації ОП на ПЗ при відношенні сигнал/шум $q \approx 20$

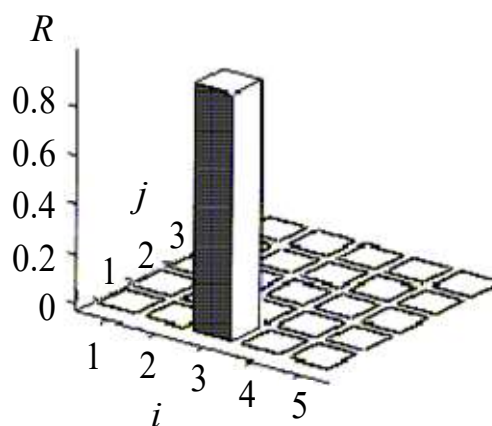


Рисунок 4.7 – Результат формування ВФ при відношенні сигнал/шум $q \approx 20$

Таким чином, алгоритм реалізації розробленого методу є перешкодостійким та може бути використаний у КЕСН для забезпечення ефективного функціонування в умовах високої об'єктової насиченості та наявності хибних об'єктів.

4.6 Розробка рекомендацій щодо формування унімодальної вирішальної функції при прив'язці до поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю та наявністю хибних об'єктів

Моделювання процесу формування ВФ показало високу ефективність розробленого методу при прив'язці КЕСН до ділянок місцевостей, на яких можуть бути об'єкти, параметри яких співрозмірні з параметрами ОП. Результати досліджень дозволили сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо забезпечення ймовірності локалізації ОП в умовах впливу геометричних спотворень та наявності на ПВ ХО, відповідно до яких:

а) з метою урахування кореляційних властивостей ПВ для їх опису використовувати модель узагальненого телеграфного процесу;

б) опис ПЗ об'єктів на ПВ незалежно від ФОС здійснювати через яскравість, контраст та їх сукупність з урахуванням впливу адитивних шумів приймального каналу;

в) формування сукупності ЕЗ здійснювати завчасно для можливих геометричних умов візування;

г) визначення місцеположення БПЛА на ПВ з високою об'єктовою насиченістю здійснювати за допомогою алгоритму локалізації ОП КЕСН на ПЗ з кількома яскравими об'єктами, який заснований на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами;

д) навігацію БПЛА, оснащених ОЕ КЕСН, здійснювати за допомогою алгоритму локалізації ОП КЕСН на ПЗ з кількома яскравими об'єктами, який заснований на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами;

е) підвищення швидкодії ЕО КЕСН при формуванні часткових ВФ здійснювати за допомогою матричного корелятора.

Метод формування унімодальної ВФ при прив'язці до ПВ з високою об'єктовою насиченістю та наявністю хибних об'єктів доцільно використовувати при удосконаленні існуючих та розробці нових систем автономної навігації ЛА цивільного та військового призначення, що застосовуються на малих висотах, для визначення місцеположення яких доцільно використовувати оптико-електронні засоби одержання інформації про поточний стан ФОС ПВ.

У той же час розроблений метод може виявитися обмежено придатним для навігації високошвидкісних ЛА при обмеженнях на час формування ВФ через ускладнення процедури формування команди на корекцію траєкторії польоту. Особливо це стосується високошвидкісних високоманеврених ЛА, траєкторія польоту яких може швидко змінюватися у процесі польоту.

Також одержані наукові результати можуть бути покладені в основу розробки програмного комплексу формування унімодальної ВФ у різних умовах застосування КЕСН БПЛА.

Висновки по розділу 4

1. Розроблено метод виявлення та багатопорогової селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими ХО. Рішення задачі виявлення ОП здійснено шляхом оцінки середнього значення фону та встановлення відносно нього порогу квантування. Рішення задачі багатопорогової локалізації ОП здійснено шляхом вибору порогу квантування та віднесення об'єктів та фонів ПВ до двох класів: ОП та фон.

2. Розроблено алгоритм локалізації ОП поточного зображення ПВ шляхом пошуку фрагмента бінарного зображення з максимальним значенням одиниць, що співпадає з еталонним зображенням. Встановлено зв'язок між значеннями відношення сигнал/шум зображення та оптимальним значенням порогу перетворення його в бінарне.

З метою підвищення ефективності алгоритму запропонована процедура адаптації порогу перетворення з урахуванням властивостей зображення району прив'язки КЕСН.

3. Розроблено метод формування унімодальної ВФ при прив'язці КЕСН до ПВ з хибними об'єктами, параметри та форма яких близькі до параметрів та форми ОП.

Одержано аналітичне співвідношення для оцінки ймовірності локалізації ОП з урахуванням значення порогу, по якому здійснюється зріз ВФ.

Шляхом моделювання процесу формування ВФ одержані чисельні оцінки ймовірності локалізації ОП, які підтверджують високу ефективність розробленого методу формування унімодальної ВФ при прив'язці КЕСН до ПВ з декількома яскравими ХО, що характерно для ПВ з щільною інфраструктурою.

ВИСНОВКИ

В дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове рішення актуальної науково-прикладної задачі розробки методу прив'язки БПЛА з використанням КЕСН в умовах появи хибних об'єктів на поточному зображенні.

1. При вирішенні науково-прикладної задачі одержані наступні найбільш важливі наукові результати:

1.1 Одержала подальший розвиток модель процесу функціонування КЕСН, яка, на відміну від відомих, враховує просторове положення та орієнтацію БПЛА, а також кореляційні властивості поверхонь візування, в основу опису яких покладено модель узагальненого телеграфного процесу.

1.2 Одержав подальший розвиток метод формування вирішальної функції КЕСН, який, на відміну від відомих, заснований на адаптації еталонних зображень до просторового положення та орієнтації БПЛА. При цьому розроблено алгоритм формування вирішальної функції матричною КЕСН.

1.3 Одержав подальший розвиток метод локалізації об'єкта прив'язки КЕСН на поточному зображенні, який, на відміну від відомих, заснований на виявленні та багатопороговій селекції об'єкта прив'язки на поточному зображенні в умовах появи на поточному зображенні хибних об'єктів, обумовлених перспективними спотвореннями поверхні візування з високою об'єктовою насиченістю. При цьому:

– розроблено алгоритм локалізації об'єкта прив'язки (ОП) шляхом пошуку фрагмента бінарного поточного зображення з максимальним значенням одиниць, що співпадає з еталонним зображенням;

– одержано аналітичний вираз для оцінки імовірності локалізації ОП, який враховує результати визначення імовірності виявлення та локалізації ОП.

1.4 Одержав подальший розвиток метод формування унімодальної вирішальної функції (ВФ), який на відміну від відомих полягає в підсумовуванні кількості одиниць різних зрізів ВФ та пошуку найбільшого значення, що відповідає повному співпадінню поточного зображення з еталонним.

У рамках розробленого методу одержано аналітичний вираз для оцінки ймовірності локалізації ОП з урахуванням порогу, за яким здійснено зріз ВФ.

2. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи і математичні моделі є основою для розробки і проектування КЕСН, застосування яких дозволяє підвищити ймовірність місцевизначення КЕСН БПЛА порівняно з системою навігації, в якій при формуванні ВФ не враховано вплив геометричних спотворень ПЗ, а також наявність хибних об'єктів.

2.1. Застосування методу та алгоритму формування ВФ КЕСН, заснованого на адаптації еталонних зображень до перспективних спотворень, дозволяє формувати унімодальну ВФ в умовах використання ПВ з нормальною об'єктовою насиченістю при невідповідності масштабів ПЗ та ЕЗ на 10...15%, однак при цьому відбувається погіршення СКП суміщення ПЗ та ЕЗ у 1,5...2 рази. У випадку високої об'єктової насиченості при відсутності масштабних спотворень СКП порівняно з нормальною об'єктовою насиченістю є більшою в 1,3...1,4 рази, що обумовлено наявністю та близьким розташуванням до ОП хибних яскравих об'єктів.

2.2. Застосування методу локалізації ОП КЕСН на ПЗ з кількома яскравими об'єктами забезпечує підвищення ймовірності локалізації ОП в умовах наявності ХО близьку до одиниці, що порівняно з класичним кореляційним алгоритмом забезпечує підвищення ймовірності локалізації ОП на поточному зображенні не менше 8%.

2.3. Розвиток моделі процесу функціонування КЕСН дозволяє визначити напрямок подальшого удосконалення системи навігації.

3. Проведені у дисертаційній роботі дослідження дозволили сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо забезпечення ймовірності локалізації ОП в умовах впливу геометричних спотворень та наявності на ПВ ХО. Відповідно до яких:

а) з метою урахування кореляційних властивостей ПВ для їх опису використовувати модель узагальненого телеграфного процесу;

б) опис ПЗ об'єктів на ПВ незалежно від ФОС здійснювати через яскравість, контраст та їх сукупність з урахуванням впливу адитивних шумів приймального каналу;

в) формування сукупності ЕЗ здійснювати завчасно для можливих геометричних умов візування;

г) визначення місцеположення БПЛА на ПВ з високою об'єктовою насиченістю здійснювати за допомогою алгоритму локалізації ОП КЕСН на ПЗ з кількома яскравими об'єктами, який заснований на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами;

д) навігацію БПЛА, оснащених ОЕ КЕСН, здійснювати за допомогою алгоритму локалізації ОП КЕСН на ПЗ з кількома яскравими об'єктами, який заснований на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами;

е) підвищення швидкодії ЕО КЕСН при формуванні часткових ВФ здійснювати за допомогою матричного корелятора.

Метод формування унімодальної ВФ при прив'язці до ПВ з високою об'єктовою насиченістю та наявністю хибних об'єктів доцільно використовувати при удосконаленні існуючих та розробці нових систем автономної навігації ЛА цивільного та військового призначення, що застосовуються на малих висотах, для визначення місцеположення яких доцільно використовувати оптико-електронні засоби одержання інформації про поточний стан ФОС ПВ.

У той же час розроблений метод може виявитися обмежено придатним для навігації високошвидкісних ЛА при обмеженнях на час формування ВФ через ускладнення процедури формування команди на корекцію траєкторії польоту. Особливо це стосується високошвидкісних високоманеврених ЛА, траєкторія польоту яких може швидко змінюватися у процесі польоту.

Також одержані наукові результати можуть бути покладені в основу розробки програмного комплексу формування унімодальної ВФ у різних умовах застосування КЕСН БПЛА.

4. Результати дисертаційних досліджень реалізовані в метрологічному

центрі військових еталонів Збройних Сил України (акт від 5.06.2017).

5. Результати дисертаційної роботи можуть бути корисні:

– при проектуванні та модернізації КЕСН, а також на етапі обґрунтування та уточнення вимог до них;

– для оцінки можливості використання таких систем для навігації БПЛА з використанням ПВ з високою об’єктовою насиченістю, де можуть мати місце однотипні об’єкти;

– в навчальному процесі при вивченні методів навігації ЛА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белоглазов И. Н., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. М. : Наука. 1985. 328 с.
2. Белоглазов И. Н. Системы навигации и наведения по геофизическим полям. М. : Дрофа, 2005. 734 с.
3. Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Августов Л. И. Автономная навигация с комплексным использованием геофизических данных. *Вопросы оборонной техники. Серия 9: Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы*. 2010. № 1-2. С. 26–32.
4. Красовский А. А., Белоглазов И. Н., Чигин Г. П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М. : Наука, 1979. 448 с.
5. Корреляционно-экстремальные системы / под ред. В. П. Тарасенко. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1986. Вып. 8. 134 с.
6. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М. : Сов. радио, 1986. 216 с.
7. Особенности боевого применения высокоточных средств поражения и способы повышения эффективности борьбы с ними : информ. сб. / И. П. Кибалко ; под общ. ред. Ю. Н. Черного. Минск : 1034 ЦВИиИ, 2008. 102 с.
8. Савенков А. Разработка высокоточных всепогодных систем наведения малоразмерных средств поражения объектов ВВТ. *Оборонная техника*. 1990. № 9. С. 18–19.
9. Спосіб формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції : пат. 122637, МПК G01S 1/32 (2006.1) / О. М. Сотніков, В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. Б. Танцюра, Г. В. Мегельбей, В. І. Грідін, А. І. Резніченко, Н. С. Єрємїна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2017 04984 ; заявл. 22.05.2017 ; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 3. 7 л.

10. Системы SMAC и DSMAC для самонаведения на конечном участке полета. *Военная авиация, ракетная и космическая техника*. 1981. № 51. С. 5–7.
11. Небабин В. Г., Кузнецов И. Б. Особенности технической реализации систем самонаведения ракет. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1991. № 12. С. 71–80.
12. Button K. J., Wiltse J. C. *Infrared and Millimeter Waves*. Vol.4: Millimeter systems. N.Y. : Academic Press, 1981. 384 p.
13. Белов А., Валентинов А. Совершенствование крылатой ракеты "Томахок". *Зарубежное военное обозрение*. 1996. № 11. С. 44–49.
14. Дмитриев В. Новая управляемая ракета «УОСП» класса «воздух-земля». *Зарубежное военное обозрение*. 1984. № 6. С. 53–55.
15. Гурский Б., Свободин А. Системы наведения ракет класса «земля-земля» – основа дальнего огневого поражения наземных целей. *Военный парад*. 2003. № 1 (55). С. 24–26.
16. Zweibaum F. Radiometry and military. *Photonics Spectra*. 1986. Vol. 20.– № 8. pp. 113–116.
17. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М. : Машиностроение, 1982. 225 с.
18. Панькив В. Galileo: когда же она завертится? *Сети и бизнес*. 2009. № 2. С. 102. URL: http://www.sib.com.ua/arhiv_2009/2009_2/statia_2_4_2009/2_4_2009.htm.
19. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования : справ. изд. / [Р. В. Бакитько и др.] ; под ред. А. И. Петрова, В. Н. Харисова. изд. 4-е перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
20. Чеберко И. Россия даст гарантии поддержания ГЛОНАСС мировому сообществу. *Известия*. 2012. 9 ноября. URL: <http://izvestia.ru/news/539270>.
21. Навигационные спутниковые системы мира. *Военное обозрение*. 2012. 3 октября. URL: <http://topwar.ru/19529-navigacionnyye-sputnikovyie-sistemy-mira.html>.

22. Щербинин В. В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 230 с.

23. Антюфеев В. И., Биков В. М., Грiчанюк А. М. Принципи побудови високоточної системи управління високошвидкісних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2006. № 1. С. 7–12.

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

25. Сотников А. М., Таршин В. А. Проблемы и перспективы развития навигационного обеспечения летательных аппаратов. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба*. Харків, 2013. Вип. 3 (36). С. 57–63.

26. Сотніков О. М., Таршин В. А., Опенько П. В. Проблеми та напрямки розвитку кореляційно-екстремальних систем наведення керованих літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2013. № 3(18). С. 93–96.

27. Сотников А. М., Таршин В. А. Обоснование принципов построения и разработка модели корреляционно-экстремальной системы наведения комбинированного типа. *Системи управління навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Центр. наук.-дослід. ін-т навігації і управління. Київ, 2012. Вип. 4 (24). С. 7–11.

28. Таршин В. А., Сотников А. М. Обоснование применения методов фрактального анализа для оперативной подготовки эталонных изображений. *Системи обробки інформації*. 2014. № 1. С. 62–66.

29. Сидоренко Р. Г. Метод підвищення завадостійкості радіометричних систем землегляду на основі придушення зосереджених завад у радіометрі при підвищенні чутливості за рахунок накопичення та декореляції шумів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.17. Харків, 2007. 21 с.

30. Таршин В. А., Сотников А. М. Метод оперативной подготовки эталонов на основе фрактальной обработки изображений с высокой объектовой

насыщенностью. *Техническое зрение*. М., 2014. Вып. 1(5). С. 2–8. URL: <http://magazine.technicalvision.ru/archive/issue-1-5>.

31. Таршин В. А., Сотников А. М., Сидоренко Р. Г. Принципы формирования сложных эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации. *Системы обработки інформації*. 2014. № 6. С. 86–89.

32. Подготовка эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации на основе формирования поля фрактальных размерностей / В. А. Таршин, А. М. Сотников, Р. Г. Сидоренко, В. В. Мегельбей. *Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 2. С. 142–144.

33. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных летательных аппаратов / К. К. Веремеенко, С. Ю. Желтов, Н. В. Ким [и др.] / под. ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Серебрякова. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.

34. Розв'язання проблеми недосконалості методів і засобів передавання розмірів одиниць фізичних величин вихідними еталонами Збройних Сил України : звіт про НДР (заключн.) / Метрологічний центр військових еталонів ЗС України ; кер. теми О. М. Удніков ; викон. Н. С. Єрьоміна [та ін.]. Харків, 2016. 399 с.

35. Еремина Н. С., Самсонов Ю. В., Сотников А. М. Анализ условий и требований к получению информации о поверхности визирования при формировании базы данных и подготовке эталонных изображений. *Системи управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2015. № 4 (36). С. 66–69.

36. Еремина Н. С., Самсонов Ю. В., Сотников А. М. Обобщенная модель изображений поверхности визирования для представления в базах данных. *Системи управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2015. № 3 (35). С. 77–79.

37. Сотников О. Н., Таршин В. А., Еремина Н. С. Выбор информативных признаков для описания поверхности визирования в интересах систем дистанционного зондирования Земли. *Електроніка та інформаційні технології*

(ЕЛІТ-2016) : зб. матеріалів доп. VIII-ої Укр.-польськ. конф. (м. Львів, м. Чинадієво, 27-30 серпня 2016 р.). Львів : Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2016. С. 46–48.

38. Єр'оміна Н. С., Сотников О. Н., Таршин В. А. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2016. № 50 (122). С. 68–73.

39. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3. № 9 (87). pp. 68–74.

40. Сотников О. М., Таршин В. А., Єр'оміна Н. С. Метод формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації в умовах перспективних спотворень поточних зображень. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : тези доп. XIII-ої наук. конф. Харків. нац. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (м. Харків, 12-13 квітня 2017 р.). Харків : ХНУПС, 2017. С. 414–415.

41. Єр'оміна Н. С. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації на основі корекції еталонних зображень. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : тези доп. 7-ої Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Полтава, 20-21 квітня 2017 р.). Полтава : ПНТУ, 2017. С. 9.

42. Спосіб забезпечення точності та імовірності місцевизначення літальних апаратів на основі оцінки варіацій інформативних полів поверхні візування : пат. 113789, МПК G01S 1/32 (2006.1) / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. М. Сотников, О. Б. Танцюра, Г. В. Рибалка, Н. С. Єр'оміна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2016 09178 ; заявл. 01.09.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 8 л.

43. Спосіб забезпечення точності та імовірності місцевизначення літальних

апаратів на основі використання сукупності інформативних полів : пат. 113791, МПК G01S 1/32 (2006.1). / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра, Г. В. Рибалка, Н. С. Єр'оміна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2016 09181 ; заявл. 01.09.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 7 л.

44. Сотніков О. М., Таршин В. А., Єр'оміна Н. С. Багатопороговий алгоритм локалізації об'єктів прив'язки кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотного літального апарата. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. № 1 (49). С. 158–161.

45. Єр'оміна Н. С. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи* : тези доп. III Міжнар. наук.-практ. конф. пам'яті професора Петра Столярчука (м. Львів, 11-12 травня 2017 р.). Львів : НУ «Львівська політехніка», 2017. С. 169.

46. Еремина Н. С. Обобщенная модель изображений поверхности визирования для представления в базах данных. *Удосконалення енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання* : тези доп. XVI Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 10-14 вересня 2017 р.). Електрон. дані. Харків, 2017. 1 ел. опт. диск CD-ROM. Назва з етикетки диска.

47. Концепція створення єдиної системи навігаційно-часового забезпечення України / В. Б. Толубко, С. В. Козелков, С. М. Кучерук, Б. О. Костенко. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2010. № 1(13). С. 2–6.

48. Концепція создания системы навигационного обеспечения Украины / А. П. Верещак, В. В. Пискорж, А. А. Жалило, В. А. Литвинов, К. Ф. Волох. *Космічна наука і технологія*. 1998. Т. 4. № 5/6. С. 46–55.

49. Навигационная аппаратура авиационного назначения. *ГП Оризон-навігація* : сайт. URL: <http://orizon-navigation.com/index.php?page=406&lang=1> (дата звернення: 31.03.2015).

50. Радионавигационный план Российской Федерации. URL:

<http://www.internavigation.ru/documents/RNP2011.doc>

51. Об утверждении Концепции создания Единой системы навигационно-временного обеспечения Республики Беларусь : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 04.07.2011 г. N 902.

52. Козелкова Е. С. Развитие навигации в Украине (состояние и перспективы). *Системи обробки інформації*. 2007. № 1(59). С. 56–59.

53. Системы технического зрения : справочник / В. И. Сырямкин [и др]. Томск : РАСКО, 1992. 367 с.

54. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010 : труды Науч.-техн. конф.-семинара. Вып. 4 / под ред. Р. Р. Назирова. М. : КДУ, 2011. 328 с.

55. Радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов / В. И. Антюфеев, В. Н. Быков, А. М. Гричанюк, В. А. Краюшкин. Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 356 с.

56. Техническое зрение в системах управления-2011 : сб. тр. Науч.-техн. конф. (г. Москва, 15-17 марта 2011 г.). / под ред. Р.Р. Назирова. М. : Механика, управление и информатика, 2012. 236 с. URL: <http://tvcs2011.technicalvision.ru/docs/Abstracts2011.pdf>

57. Техническое зрение в системах управления-2013 : сб. тр. Науч.-техн. конф. (г. Москва, 12-14 марта 2013 г.). М., 2013. 162 с. URL: http://tvcs2013.technicalvision.ru/docs/2013_v4.pdf

58. Техническое зрение в системах управления-2014 : сб. тр. Науч.-техн. конф. (г. Москва, 18-20 марта 2014 г.). М., 2014. 164 с. URL: http://tvcs2014.technicalvision.ru/docs/сборник_тезисов_ТЗСУ_2014.pdf.

59. Техническое зрение в системах управления-2015 : сб. тр. Науч.-техн. конф. (г. Москва, 17-19 марта 2015 г.). М., 2015. 132 с. URL: http://tvcs2015.technicalvision.ru/docs/Сборник_тезисов_ТЗСУ_2015.pdf

60. Техническое зрение в системах управления-2016 : сб. тр. Науч.-техн. конф. (г. Москва, 15-17 марта 2016 г.). М., 2016. 84 с. URL : <http://tvcs2016.technicalvision.ru/file/tezis.pdf>

61. Война в Ираке убьет «GPS»? *Cnews*.2003. 11 марта. URL: http://www.cnews.ru/news/top/vojna_v_irake_ubet_gps_.

62. "Отключение" GPS над Украиной. *Livejournal*. 2014. 29 апр. URL: <https://twower.livejournal.com/1280952.html>.

63. В работе спутниковой системы ГЛОНАСС произошел сбой. *РБК-Украина* : портал. URL: <https://www.rbc.ua/rus/lnews/rabote-sputnikovoy-sistemy-glonass-proizoshel-1468513098.html>. (дата обращения: 22.04.2015).

64. Експериментальна оцінка заводо захищеності приймача супутникової радіонавігаційної системи GPS від активних завод / В. Р. Хачатуров, С. Т. Багдасарян, А. В. Кобзєв, О. С. Петренко. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2010. № 1 (13). С. 37–39.

65. Боевики добились своего – прекращена работа беспилотников ОБСЕ. *Minval az* : сайт. URL: <https://inforesist.org/boeviki-dobilis-svoego-prekrashhena-rabota-bespilotnikov-obse>. (дата обращения: 10.02.2015).

66. Российская станция помех Р-330Ж "Житель" на Донбассе : фоторепортаж. *Цензор.НЕТ* : сайт. URL: https://sensor.net.ua/photo_news/384955/rossiyiskaya_stantsiya_pomeh_r330j_jitel_na_donbasse_fotoreportaj. (дата обращения: 07.04.2015).

67. Продукция: Радиолокационные узлы и блоки: «Анклав». *ВАТ «Холдінгова компанія «УКРСПЕЦТЕХНІКА»* : сайт. URL: <http://usts.kiev.ua/product/anklav.htm>. (дата обращения: 20.08.2015).

68. Метод коррекции перспективных искажений текущих изображений в радиометрических системах навигации / В. И. Антюфеев, В. Н. Быков, А. М. Гричанюк, Я. Н. Кожушко. *Системи обробки інформації*. 2005. № 4. С. 7–15.

69. Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов : монография / В. И. Антюфеев, В. Н. Быков, А. М. Гричанюк [и др.]. Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014. 372 с.

70. Россия ударила по Сирии крылатыми ракетами *Bigmir)net* : информационно-развлекательный сайт Украины. URL:

<http://news.bigmir.net/world/1079680-Rossija-udarila-po-Sirii-krylatymi-raketami--video-zapuska>. (датаобращения: 20.08.2015).

71. Методика выделения информативных участков изображений на основе теории фрактального анализа / А. В. Мезенцев, С. В. Миронюк, А. М. Сотников, В. А. Таршин. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2015. Т. 17. № 2. С. 29–38.

72. Методика оценки информативности исходных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации / В. А. Таршин, А. М. Сотников, Р. Г. Сидоренко, А. В. Мезенцев. *Системи обробки інформації*. 2015. № 10. С. 60–63.

73. Краснов А. Применение крылатых ракет воздушного базирования. *Зарубежное военное обозрение*. 2001. № 2. С. 14–23.

74. Пауков В. Работы в США по совершенствованию ракетной системы АТАСМС. *Зарубежное военное обозрение*. 2000. № 3. С. 25–28.

75. Таршин В. А. Принципы описания фоновой-объектовой обстановки для корреляционно-экстремальных систем навигации. *Техническое зрение в системах управления-2015* : сб. тр. Науч.-техн. конф. (г. Москва, 17-19 марта 2015 г.). М., 2015. С. 75–76.

76. Сотников О.М., Таршин В.А. Методологія опису поверхні візування для КЕСН літальних апаратів. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : тези доп. Одинадцятої Наук. конф. Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (м. Харків, 8-9 квіт. 2015 р.). Харків, 2015. С. 311.

77. Гурский Б. Г., Лющанов М. А., Спиринов Э. П. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 328 с.

78. Белоглазов И. И., Казарин С. Н. Стереоскопическая навигационная система. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 1997. № 6. С. 9–32.

79. Таршин В. А., Сотников О. М. Синтез эталонных изображений для комбинированных корреляционно-экстремальных систем наведения керованих засобів ураження. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України* : тези доп. Науч.-техн. конф. ЦНДІ озброєння та військової

техніки ЗСУ (м. Київ, 16-20 груд. 2013 р.). Київ, 2013. С. 352–353.

80. Сотніков О. М., Таршин И. А., Сидоренко Р. Г. Принципи побудови та методи обробки інформації в комбінованих кореляційно-екстремальних системах наведення літальних апаратів. *Застосування інформаційних технологій у військовій сфері* : тези доп. Наук.-практ. семінару. Київ, 2013. С. 35–36.

81. Методика оцінки ефективності комбінованих кореляційно-екстремальних систем наведення / В. А. Таршин, О. М. Сотніков, Р. Г. Сидоренко, Г. М. Сафарова. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: тези доп. Одинадцятої Наук. конф. Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (м. Харків, 8-9 квіт. 2015 р.). Харків, 2015. С. 335.

82. Кожушко Я. Н. Алгоритмы совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов. *Системы обробки інформації*. 2008. № 1. С. 25–28.

83. Гричанюк А. М., Кожушко Я. Н. Влияние условий освещенности района геодезической привязки на работу оптических корреляционно-экстремальных систем навигации летательных аппаратов. *Системы обробки інформації*. 2013. № 6. С. 61–65.

84. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2007. 584 с.

85. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М. : Техносфера, 2006. 616 с.

86. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. М. : Сов. радио, 1979. 311 с.

87. Прэйт У. К. Цифровая обработка изображений : в 2-х кн. М. : Мир, 1982. Кн. 1. 312 с. ; Кн. 2. 480 с.

88. Рубан И. В., Шитова О. В. Классификация методов обработки статических изображений для локализации объектов (областей «интереса») на них в системах технического зрения. *Системы управління навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Центр. наук.-дослід. ін-т навігації і управління. Київ, 2009. № 3 (11). С. 139–143.

89. Новейшие методы обработки изображений : монография /

А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитович [и др.]. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 400 с.

90. Пытьев Ю. П. Задачи морфологического анализа изображений *Математические методы исследования природных ресурсов Земли из космоса*. М. : Наука, 1984. С. 41–83.

91. Пытьев Ю. П., Чуличков А. И. Морфологические методы анализа изображений. М. : Физматлит, 2010. 336 с.

92. Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Orlando, Florida : Academic Press, 1982. 610 p.

93. Serra J. Introduction to mathematical morphology. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 1986. Vol. 35. № 3. pp. 283–305.

94. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения : Курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко [и др.]. М. : Физматкнига, 2010. 672 с.

95. Мещеряков Ю. А. Рельеф СССР: морфоструктура и морфоскульптура. М. : Мысль, 1972. 518 с.

96. Толчельников Ю. С. Оптические свойства ландшафта. Л. : Наука, 1972. 518 с.

97. Сергеев Г. А., Янутш Д. А. Статистические методы исследования природных ресурсов. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 300 с.

98. Свейна Ф. Дистанционное зондирование: количественный подход / [Ш. М. Дейвис, Д. А. Ландгребе и др.] ; под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейфис ; пер. с англ. М. : Недра, 1983. 396 с.

99. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии ; пер. с нем. М. : Мир, 1988. 343 с.

100. Богородский В. В., Козлов А. И., Тучков Л. Т. Радиотепловое излучение земных покровов. Л. : Гидрометеиздат, 1977. 223 с.

101. Жила С. С. Оптимізація обробки сигналів у НВЧ радіометрах з нестабільним коефіцієнтом підсилення : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.17. Харків, 2015. 20 с.

102. Сотніков О.М., Таршин В. А. Проблеми та перспективи застосування безпілотних літальних апаратів з автономними системами навігації в інтересах захисту та оборони держави. *Спільні дії військових формувань держави: проблеми та перспективи* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. Військової академії (м. Одеса, 10-11 верес. 2014 р.). Одеса, 2014. С. 140–141.

103. Таршин В. А., Сотніков О. М., Сидоренко Р. Г. Методи місцевизначення комбінованих кореляційно-екстремальних систем наведення в умовах спотворення поверхні візування. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : тези доп. Одинадцятої наук. конф. Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (м. Харків, 13-14 квіт. 2016 р.). Харків, 2016. С. 334.

104. Сотніков О.М., Таршин В.А., Сидоренко Р.Г. Методи обробки інформації у кореляційно-екстремальних системах навігації з складними еталонними зображеннями. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій* : тези доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф. Запорізького нац. техн. ун-ту (м. Запоріжжя, 17-19 верес. 2014 р.). Запоріжжя, 2014. С.230–231.

105. Спосіб формування багатоелементного розподіленого еталонного зображення для високоточних кореляційно-екстремальних систем навігації : пат. 100559, МПК G01S 1/32 (2006.1) / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О.М. Сотніков, Г. В. Певцов, А. В. Мегельбей, В. А. Лупандін, А. М. Булай. ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2015 02304 ; заявл. 16.03.2015 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. с.-л.

106. Спосіб формування зосередженого складного еталонного зображення для високоточних кореляційно-екстремальних систем навігації : пат. 100561, МПК G01S 1/32 (2006.1) / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О.М. Сотніков, Г. В. Певцов, А. В. Мегельбей, В. А. Лупандін, Рибалка Г В. ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2015 02313 ; заявл. 16.03.2015 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. с.-л.

107. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория : справочник /

- под ред. Я. Д. Ширмана. изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2007. 512 с.
108. Радіоелектронні системи : навч. посіб. Ю. М. Седишев, В. І. Карпенко, Д. В. Атаманський [та ін.] ; за заг. ред. Ю. М. Седишева. Харків : ХУПС, 2010. 360 с.
109. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 216 с.
110. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / К. Я. Кондратьев, В. И. Биненко, Л. Н. Дьяченко [и др.] ; под ред. К. Я. Кондратьева. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 232 с.
111. Федченко П. П., Кондратьев К. Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 230 с.
112. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов : кол. моногр. / под ред. Р. Э. Пащенко. Харьков : ХООО «НЭО «Экоперспектива», 2006. 348 с.
113. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот : деклараційний пат. на корисну модель. МКВ Н04К3/00/ О. М. Сотніков, В. І. Карпенко, В. Ф. Клепиков, В. Є. Новіков, О. Г. Судаков. – №7486 ; заявл. 27.12.2004 ; опубл. 15.06.2005. Бюл. № 6. 8 с.
114. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття радіохвиль : деклараційний пат. на корисну модель. МКВ Н01Р1/62, Н01Q17/00/ В. І. Карпенко, О. М. Сотніков, В. Є. Новіков, О. Г. Судаков. – № 3496 ; заявл. 22.03.2004 ; опубл. 15.11.2004. Бюл. № 11. 6 с.
115. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття радіохвиль : деклараційний пат. на корисну модель. МКВ Н01Р1/62, Н01Q17/00/ О. М. Сотніков, О. Г. Судаков. – № 3485 ; заявл. 12.03.2004 ; опубл. 15.11.2004. Бюл. № 11. 4 с.
116. Вукс М. Рассеяние света в газах, жидкостях и рас творах. Л. : Изд-во Ленинград. ун-та, 1977. 435 с.
117. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере в условиях помех. М. : Сов. радио, 1977. 368 с.
118. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу :

ученик / Р. А. Казарян, А. В. Оганесян, К. П. Погосян, Е. Р. Милютин. М. : Радио и связь, 1985. 208 с.

119. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М. : Сов. радио, 1970. 495 с.

120. Справочник по инфракрасной технике : в 4-х т. Т. 1: Физика ИК-излучения / У. Вульф, Б. Герман, Э. Ла Рокка [и др.] ; пер. с англ. М. : Мир, 1995. 606 с.

121. Бортовая аппаратура для беспилотных авиационных комплексов. *Военное обозрение* : сайт. URL: <https://topwar.ru/62603-bortovaya-apparatura-dlya-bespilotnyh-aviacionnyh-kompleksov.html> (дата обращения: 26.03.2015).

122. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М. : Сов. радио, 1978. 296 с.

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Метрологічного центру
військових еталонів Збройних Сил України

05.06.2017

О.В. ДЗИСЮК

АКТ

про реалізацію результатів наукових досліджень
Єрьоміної Наталії Сергійовни

Комісія у складі голови начальника науково-дослідного відділу військових еталонів – заступника начальника Центру БОЙКО В.М.; членів комісії: старшого наукового співробітника науково-дослідного відділу військових еталонів к.т.н., с.н.с. ГАВРИЛОВА А.Б., старшого наукового співробітника науково-дослідного відділу військових еталонів к.т.н., с.н.с. Рондіна Ю.П., встановила, що наукові положення, розроблені особисто Єрьоміною Н.С., реалізовані у НДР "Розв'язання проблеми недосконалості методів і засобів передавання розмірів одиниць фізичних величин вихідними еталонами Збройних Сил України":

метод формування унімодальної вирішальної функції, який полягає в підсумовуванні числа одиниць різних зрізів вирішальної функції та пошуку найбільшого значення, що відповідає повному співпадінню поточного зображення з еталонним;

метод локалізації об'єкту прив'язки (ОП) КЕСН на поточному зображенні з кількома яскравими об'єктами, який заснований на виявленні та багатопороговій селекції ОП на ПЗ з декількома яскравими об'єктами. Розроблено алгоритм локалізації ОП на зображенні шляхом пошуку фрагмента бінарного зображення з максимальним значенням одиниць, що співпадає з еталонним зображенням.

Голова комісії

В.М. БОЙКО

Члени комісії:

А.Б. ГАВРИЛОВ

Ю.П. РОНДІН

ДОДАТОК Б

Список наукових праць за темою дисертації

1. Еремина Н. С., Самсонов Ю. В., Сотников А. М. Анализ условий и требований к получению информации о поверхности визирования при формировании базы данных и подготовке эталонных изображений. *Системы управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2015. № 4 (36). С. 66–69.

2. Еремина Н. С., Самсонов Ю. В., Сотников А. М. Обобщенная модель изображений поверхности визирования для представления в базах данных. *Системы управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2015. № 3 (35). С. 77–79.

3. Єр'оміна Н. С., Сотников О. Н., Таршин В. А. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси* : зб. наук. пр. Харків, 2016. № 50 (122). С. 68–73.

4. Сотников О. М., Таршин В. А., Єр'оміна Н. С. Багатопороговий алгоритм локалізації об'єктів прив'язки кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотного літального апарата. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. № 1 (49). С. 158–161.

5. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3. № 9 (87). pp. 68–74.

6. Спосіб забезпечення точності та імовірності місцевизначення літальних апаратів на основі оцінки варіацій інформативних полів поверхні візування : пат. 113789, МПК G01S 1/32 (2006.1) / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. М. Сотников, О. Б. Танцюра, Г. В. Рибалка, Н. С. Єр'оміна ;

Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2016 09178 ; заявл. 01.09.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 8 л.

7. Спосіб забезпечення точності та імовірності місцевизначення літальних апаратів на основі використання сукупності інформативних полів : пат. 113791, МПК G01S 1/32 (2006.1). / В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра, Г. В. Рибалка, Н. С. Єрьоміна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2016 09181 ; заявл. 01.09.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 7 л.

8. Спосіб формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції : пат. 122637, МПК G01S 1/32 (2006.1) / О. М. Сотніков, В. А. Таршин, Р. Г. Сидоренко, О. Б. Танцюра, Г. В. Мегельбей, В. І. Грідін, А. І. Резніченко, Н. С. Єрьоміна ; Харків. ун-т Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № у 2017 04984 ; заявл. 22.05.2017 ; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 3. 7 л.

9. Сотников О. Н., Таршин В. А., Еремина Н. С. Выбор информативных признаков для описания поверхности визирования в интересах систем дистанционного зондирования Земли. *Електроніка та інформаційні технології (ЕлІТ-2016)* : зб. матеріалів доп. VIII-ої Укр.-польськ. конф. (м. Львів, м. Чинадієво, 27-30 серпня 2016 р.). Львів : Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2016. С. 46–48.

10. Сотніков О. М., Таршин В. А., Єрьоміна Н. С. Метод формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації в умовах перспективних спотворень поточних зображень. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : тези доп. XIII-ої наук. конф. Харків. нац. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (м. Харків, 12-13 квітня 2017 р.). Харків : ХНУПС, 2017. С. 414–415.

11. Єрьоміна Н. С. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації на основі корекції еталонних зображень. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та*

засобів управління : тези доп. 7-ої Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Полтава, 20-21 квітня 2017 р.). Полтава : ПНТУ, 2017. С. 9.

12. Єршоміна Н. С. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи* : тези доп. III Міжнар. наук.-практ. конф. пам'яті професора Петра Столярчука (м. Львів, 11-12 травня 2017 р.). Львів : НУ «Львівська політехніка», 2017. С. 169.

13. Еремина Н. С. Обобщенная модель изображений поверхности визирования для представления в базах данных. *Удосконалення енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання* : тези доп. XVI Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 10-14 вересня 2017 р.). Електрон. дані. Харків, 2017. 1 ел. опт. диск CD-ROM. Назва з етикетки диска.