

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

СТРІЛКОВА ТЕТЯНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 681.78: 681.7.01: 621.391.8: 519.21

**РОЗВИТОК СТОХАСТИКО-ДЕТЕРМІНОВАНОЇ ТЕОРІЇ ПРИЙОМУ ТА
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ**

05.11.07 – оптичні прилади та системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук, професор

Должиков Володимир Васильович

Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри основ радіотехніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент

Боровицький Володимир Миколайович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри оптичних та оптико-електронних приладів;

доктор технічних наук, професор

Прокопенко Ігор Григорович

Національний авіаційний університет, професор кафедри авіаційних радіоелектронних комплексів;

Заслужений машинобудівник України, доктор технічних наук

Черняк Сергій Іванович

Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Державне космічне агентство України, головний конструктор напрямку.

Захист відбудеться „ _____ ” _____ 2017 року о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. № 1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано „ _____ ” _____ 2017 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18
доктор технічних наук, професор



Н.І. Бура

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Динамічний розвиток техніки та технологій протягом останніх десятиріч призвів до технічної реалізації потенційно високих можливостей оптико-електронних систем. Основними перевагами оптико-електронних систем є: висока точність виявлення спостережуваних координат об'єктів; висока роздільна здатність за дальністю; кутова роздільна здатність, тобто здатність розрізняти сусідні рівновіддалені об'єкти. Усе вище перелічене дає можливість широкого застосування оптико-електронних систем у багатьох областях науки та техніки, наприклад в астрономії, системах технічного зору, біології та медицині, у складі систем радіочастотного моніторингу. Розвиток сучасних оптико-електронних систем створює умови для отримання поглибленого знання про навколишній світ та дозволяє робити відкриття у різноманітних областях природничих наук.

Основні тенденції удосконалення оптико-електронних систем спрямовані на збільшення проникної здатності. На основі літературного аналізу можна відокремити наступні напрямки розвитку систем: збільшення часового та енергетичного розрізнення оптико-електронних систем; удосконалення методів обробки сигналів та зображень; розширення кола задач, які вирішуються однією оптико-електронною системою.

Удосконалення систем вимагає покращених теоретичних знань про фізичні процеси поширення, приймання й оброблення оптичного випромінювання. Створення таких систем ґрунтується на глибокому розумінні фізичних процесів виникнення, поширення оптичного випромінювання, а також теорії приймання та оброблення оптичних сигналів з урахуванням особливостей їхньої просторово-часової структури, хвильових і корпускулярних властивостей. Урахування додаткових властивостей оптичного випромінювання зумовлює необхідність розроблення більш повних математичних моделей, нової елементної бази оптико-електронних систем, оптимізації алгоритмів приймання та оброблення оптичних сигналів.

Загальній теорії побудови оптико-електронних систем присвячені роботи А. А. Курикіші, М. М. Мірошнікова, Г. М. Мосягіна, В. М. Нікітіна, О. І. Стрелкова, В. М. Фоміна, О. Г. Шереметьєва, Ю. Г. Якушенкова та багатьох інших.

Існують кілька теоретичних аспектів опису оптичних приймальних сигналів, на основі яких будуються алгоритми приймання, оброблення й передавання сигналів у системах. Праці Г. М. Долі, В. І. Коленькова, В. Г. Колобродова, Л. Ф. Купченко, В. Є. Саваневича, В. В. Сауткіна, Ю. Є. Федосєєва та ін. присвячені проблемам створення методів і алгоритмів оброблення сигналів в оптико-електронних системах.

Нині має місце протиріччя між перспективами розвитку оптико-електронних систем (сучасними можливостями існуючих засобів) та апріорною інформацією про характеристики об'єктів при їх спостереженні. Для ефективного вирішення прикладних задач вимагається збільшувати проникну здатність та динамічний діапазон систем як у бік надслабких, так і потужних сигналів. Крім того, проблемними питаннями є реєстрація, виявлення та обчислення параметрів малорозмірних і малоконтрастних об'єктів, які мають важливе значення при розробленні та вдосконаленні оптико-електронних систем. Сигнали від таких об'єктів характеризуються значеннями енергії майже завжди нижчими за значення порога чутливості системи. Виявлення

оптико-електронними системами та визначення параметрів таких об'єктів (при величині відношення сигнал/шум менше 5) зараз не проводяться, однак є доцільним та необхідним при виявленні потужних сигналів на фоні потужних завад в астрономічних спостереженнях (наприклад, денному спостереженні космічних об'єктів) та радіомоніторингу середовища; розрізненню близько розташованих об'єктів; виявленні надслабких сигналів в астрономічних спостереженнях, у біологічних та медичних дослідженнях при вивченні біохемілюмінесценції, лізису клітин.

Існують шляхи збільшення динамічного діапазону та проникної здатності оптико-електронних систем:

- використання фотоприймальних пристроїв, що мають велику енергетичну чутливість та збільшену кількість елементів розрізнення, однак це потребує розробки нових технологій фотоприймальних пристроїв;

- зниження порогів чутливості у пристроях первинної обробки інформації, однак це призводить до високої трудомісткості існуючих методів обробки та складність їх практичної реалізації;

- застосування спектральних та нейтральних фільтрів при реєстрації оптичних сигналів для погодження динамічного діапазону оптико-електронної системи, однак це призводить до змін статистичних характеристик вихідних сигналів, що ускладнює подальшу їх обробку та потребує удосконалення математичних моделей сигналів.

При збільшенні динамічного діапазону оптико-електронних систем будь-яким з зазначених методів виникає необхідність виявляти та розраховувати характеристики сигналів, що сумірні з рівнем завад, тобто знаходяться на межі динамічного діапазону систем. Для опису явищ, які відбуваються на межах динамічного діапазону, використовують різноманітні теоретичні фізико-математичні моделі. Основними **недоліками** існуючих теоретичних моделей, що являють собою основу принципів приймання, обробки та передавання сигналів в оптико-електронних системах на сучасному етапі, є неоднозначний опис як вхідних, так і вихідних сигналів з використанням різних фізико-математичних підходів, та взаємозв'язок основних показників ефективності з критеріями, що визначають ефективність системи, а саме: роздільна здатність; імовірнісні характеристики виявлення; величина відношення сигнал/шум.

Тому тема дисертаційних досліджень є актуальною, спрямованою на вирішення **науково-технічної проблеми**, а саме: підвищення ефективності оптико-електронних систем завдяки розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання та оброблення сигналів, в основі яких – сумісне використання корпускулярного, хвильового і статистичного описів оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

Застосування сумісного використання хвильових та корпускулярних властивостей з урахуванням статистичних характеристик оптичного випромінювання **дозволить** більш адекватно описувати процеси взаємодії світла з об'єктами спостереження, елементами оптико-механічного тракту, а також перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами. Використання розроблених методів стохастико-детермінованого приймання та обробки оптичних сигналів, що базуються на запропонованих математичних моделях, **дозволить**: поширити динамічний діапазон систем в галузі приймання сильних сигналів в умовах складної заводової обстановки; знизити порогову чутливість у області приймання слабких сигналів; розробити алгоритми та методи, які підвищать проникну здатність системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки. Тематика роботи відповідає Закону України від 09.09.2010 № 2519-VI «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» та Закону України від 08.09.2011 № 3715-VI «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні». Дослідження пов'язані із планом науково-дослідних робіт університету, спрямованих на розробку систем локації в різних середовищах та оптоелектронних систем подвійного призначення, які виконувались в період 2001-2010 років при участі автора:

НДР «Розробка принципів побудови пристрою виявлення пачок коротких оптичних сигналів блоку Ч-1» (№ ДР 0104U0902072, 2001 - 2005 р.р.), (виконавець);

- НДР «Розробка методів підвищення роздільної здатності, збільшення динамічного діапазону акустооптичного аналізатора спектра» (№ ДР 0105U007073, 2005-2008 р.р.), (виконавець);

- НДР «Методи підвищення динамічного діапазону блоку Ч1 та розробка пропозицій з їх реалізації» (№ ДР 0109U008535, 2009-2010 р.р.), (виконавець).

Мета роботи. Розширення динамічного діапазону і покращення характеристик виявлення оптико-електронних систем на основі розроблення і розвитку стохастико-детермінованих методів приймання та оброблення сигналів.

Основні **завдання дисертаційної роботи**, виконання яких зумовлюється окресленою метою:

1. Проведення аналізу існуючих моделей вхідних та вихідних сигналів, методів приймання та оброблення сигналів, спрямованих на підвищення ефективності оптико-електронних систем за прийнятими критеріями при спостереженні малорозмірних та малоконтрастних об'єктів на межі динамічного діапазону.

2. Дослідження впливу оптичних систем та процесу послаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою на ефективність оптико-електронних систем з обмеженими динамічним діапазоном.

3. Дослідження впливу середовища розповсюдження та фотоприймачів на ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном.

4. Розроблення й обґрунтування адекватних математичних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання з усіма (елементами) трактами проходження сигналів, які враховують стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і перешкод.

5. Дослідження додаткових статистичних властивостей приймальних сигналів в оптико-електронних системах із використанням розроблених математичних моделей оптичних сигналів та урахування їх при оптимізації характеристик виявлення складних оптичних сигналів, яким притаманні різні просторові і часові характеристики в оптико-електронних системах.

6. Розроблення й оптимізація методів оброблення сигналів на основі запропонованих математичних моделей, спрямованих на розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем, як у бік реєстрації надслабких, так і в бік сильних сигналів на фоні перешкод. Вивчення можливості розроблених методів під час їхнього практичного використання.

7. Розроблення методів і рекомендацій щодо проектування нових і вдосконалення наявних оптико-електронних систем, що забезпечують підвищення ефективності оптико-електронних систем, вимірювання просторових і часових характеристик реєстрованих сигналів із покращеними ймовірнісними характеристиками виявлення.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії оптичного випромінювання з об'єктами спостереження, елементами оптико-механічного тракту в оптико-електронних системах.

Предмет дослідження – моделі і методи приймання оптичних сигналів та алгоритми їх обробки в оптико-електронних системах.

Методи дослідження. У дисертації застосовано теоретичні й експериментальні методи досліджень, а саме: при опису процедур перетворення сигналів в оптико-електронних системах та вивченні статистичних характеристик вихідних сигналів використано основні положення хвильової та корпускулярної теорії світла, теорії ймовірностей, статистичної теорії потоків, теорії побудови оптико-електронних систем; при розробці методів підвищення ефективності систем та виявлення вихідних сигналів застосовано методи статистичного синтезу і основні положення теорії прийняття рішень; для підтвердження адекватності результатів теоретичних досліджень та перевірки працездатності розроблених методів проведено експериментальні дослідження з застосуванням методів оптимального планування експерименту і математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що теорія стохастико-детермінованого оброблення сигналів в оптико-електронних системах набула подальшого розвитку:

1. Для опису перетворення стохастичних сигналів оптичною системою розроблена нова математична модель вихідного сигналу в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном при формуванні просторово-часового розподілу оптичного випромінювання в площині фотоприймача на основі корпускулярної теорії світла і статистичної теорії потоків. Відмінністю є те, що модель враховує залежність граничних законів розподілу флуктуацій вихідного сигналу від коефіцієнта послаблення нейтрального фільтра, включеного до складу оптичної ланки системи.

2. Для опису перетворення сигналів приймачем випромінювання розроблена нова математична модель вихідного сигналу в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання. Відмінним є те, що модель враховує природу виникнення парнокорельованих сигналів і дозволяє розробити і дослідити метод реєстрації та аналізу надслабкого випромінювання, що визначає ступінь узгодження просторових і енергетичних характеристик випромінювання об'єктів із виявленими властивостями оптико-електронної системи.

3. Опис процесу виявлення сигналів уможливив удосконалення методу виявлення на основі критерію узгодження просторових і енергетичних характеристик об'єктів із виявительними властивостями оптико-електронної системи. Критерій враховує розмір і контраст об'єктів і відображає взаємозв'язок цих характеристик зображення з частотно-контрастною чутливістю системи. Обчислені характеристики виявлення малорозмірних і малоконтрастних об'єктів на спеціалізованих зображеннях.

4. Набула подальшого розвитку математична модель взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, що включено до складу акустооптичних аналізаторів спектру, яка враховує стохастико-детермінований характер оптичних сигналів і завод різноманітних просторово-частотних та енергетичних параметрів.

5. Удосконалений метод збільшення ефективності оптико-електронних систем, який відрізняється від відомих тим, що вибір параметрів внутрішньокадрового і міжкадрового накопичення враховує ефекти взаємодії оптичного випромінювання з елементами системи.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному.

1. Систематизація теоретичних методів аналізу вхідних оптичних сигналів в оптико-електронних системах дозволяє описувати роботу систем більш адекватно у різноманітних умовах сигналів та завад, а також залежно від умов експлуатації систем.

2. Застосування корпускулярних властивостей та врахування статистичних характеристик вхідного оптичного випромінювання дозволяє підвищити ефективність систем за рахунок врахування процесів взаємодії світла з об'єктом спостереження, елементами оптико-механічного тракту, перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами, а також при розрахунках та обиранні критеріїв ефективності системи.

3. Використання граничних розподілів при описі вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном дозволяє визначати характеристики виявлення сигналів, які знаходяться на межі динамічного діапазону системи.

4. Встановлення меж застосування основних граничних теорем при статистичному аналізі вихідних сигналів оптико-електронних систем дозволить уникнути суттєвих помилок при виявленні сигналів, які характеризуються низькою величиною відношення сигнал/шум.

5. Використання запропонованих методів обробки сигналів дозволяє розширити діапазон систем в області приймання сильних сигналів в умовах складної заводської обстановки та знизити порогову чутливість системи при реєстрації слабких сигналів.

6. Розроблений метод виявлення сигналів на основі критерію узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів із властивостями виявлення оптико-електронних систем дозволив підвищити ефективність систем за критеріями величини відношення сигнал/шум та імовірнісних характеристик виявлення в десятки разів. При прийнятті гауссової моделі вихідних сигналів за критерієм величини відношення сигнал/шум у 20 разів, за критерієм умовної імовірності хибної тривоги в 10^2 разів. При прийнятті моделі вихідного сигналу на основі α -стійких законів ефективність системи за критерієм умовної імовірності хибної тривоги не змінюється, при загальному покращенні якості зображення у вислідному зображенні і збільшенні амплітуди сигнальної складової в рази.

7. Запропоновані методи та алгоритми оброблення сигналів в оптико-електронних системах дозволили істотно розширити діапазон значень енергій вхідних сигналів. На прикладі оптико-електронної системи, яка входить до складу радіотехнічної системи моніторингу радіопростору показано, що спектральний діапазон систем збільшився на 30 %; динамічний діапазон систем – на 40 %.

8. Запропонований метод збільшення ефективності оптико-електронних систем, заснований на внутрішньокадровому та міжкадровому накопиченні та синтезовані алгоритми, які сумісно застосовують поетапне міжкадрове і внутрішньокадрове оброблення та методи ослаблення дозволили підвищити ефективність виявлення сигналів за критерієм величини сигнал/шум у 5–10 разів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у Відкритому акціонерному товаристві “Спеціальне конструкторське бюро радіотехнічних приладів” – дочірньому підприємстві Державної акціонерної холдингової компанії „Топаз” Міністерства промислової політики, м. Донецьк при розробці перспективних акустооптичних засобів аналізу радіочастотного аналізатора спектра радіосигналів. Під час виконання науково-дослідних та конструкторських робіт результати впроваджено у вигляді розробле-

них математичних моделей взаємодії оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи, яка входить до складу акустооптичних аналізаторів спектру радіосигналів. Враховано стохастико-детермінований характер оптичних сигналів та завад різноманітних просторово-часових й енергетичних параметрів при прийманні складних оптичних сигналів, а також при розробці методів та алгоритмів фільтрації заводових складових вихідних сигналів. Одержані результати дозволили: збільшити спектральний діапазон систем на 30 %; збільшити динамічний діапазон систем на 40 %; виявляти радіосигнали зі складною внутрішньоімпульсною структурою.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки, м. Харків при викладанні курсів «Цифрова обробка сигналів та зображень», «Комп'ютерна електроніка» для підготовки магістрів, спеціалістів зі спеціальностей «Професійна освіта. Електроніка» й «Професійна освіта. Телекомунікації та зв'язок» у вигляді: методу статистичної обробки сигналів з детермінованими та стохастичними параметрами; методики дослідження енергетичних й просторово-часових параметрів сигналів за допомогою математичної статистики; методики знаходження оптимальних та квазіоптимальних алгоритмів обробки сигналів і зображень; методики розрахунку та узгодження динамічного діапазону фоточутливих елементів системи з параметрами сигналів.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що складають суть дисертаційної роботи та знайшли відображення в пунктах новизни, наукового і практичного значення, отримані автором самостійно. У спільних роботах, які наведені у списку опублікованих праць за темою дисертації, автору належать ідеї та розроблення, а саме: [1] розглянуто методи виявлення оптичних сигналів; запропонував методи виявлення оптичних сигналів з урахуванням корпускулярних і статистичних властивостей оптичного випромінювання; проаналізував методики розрахунків ефективності оптико-електронних систем за різними критеріями; [2] запропоновано алгоритми оброблення зображень на основі пуассонівської і субпуассонівської статистики. Алгоритми ґрунтуються на методах покадрового та міжкадрового оброблення; [3] здійснено розрахунки ефективності оптико-електронних систем за критерієм максимуму логарифми відношення правдоподібності, проаналізував густину імовірності вихідних сигналів при реєстрації надслабкого випромінювання; [4] запропоновано структурну схему квазіоптимального виявника парнокорельованого потоку; [5] – [6], [8] – [11] на основі систематизації теоретичних методів опису та аналізу оптичних сигналів запропоновано методики виявлення сигналів з фіксованими характеристиками виявлення, які забезпечують визначення сигналів у збільшеному частотному та динамічному діапазонах; [7] запропоновано опис потік носіїв зарядів фотоприймача на основі пуассонівської статистики, розрахував оптимальну оцінку параметрів просторового положення сигналу в площині фотоприймача); [12] – [16], [18] – [22] запропоновано застосування методу узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів з властивостями виявлення оптико-електронної системи; [17] розроблено алгоритм розрізнення близько розташованих малорозмірних об'єктів, яким притаманні різні енергетичні характеристики; [23] застосовано ідею проведення порівняльного аналізу розрахунку ефективності оптико-електронних систем за критерієм сигнал/шум при використанні різних теоретичних аспектів опису принципів формування вихідних сигналів в оптико-електронних системах; [24] запропоновано провести теоретичний аналіз вихідних сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном на основі методики розрі-

дження пуассонових потоків; [25] запропоновано ідею вивчення стохастичної поведінки вихідних сигналів в оптико-електронних системах з метою визначення статистичних характеристик сигналів та завад; [26] використано ідею опису вихідних сигналів на основі математичної моделі сигналів, що враховує стійкі закони розподілення випадкових величин; [27] запропоновано опис вихідних сигналів за допомогою математичної моделі, що враховує стійкі закони розподілення випадкових величин.

Апробація результатів дисертаційних досліджень. Основні результати дослідження були представлені як доповіді на II Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2005), VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Людина і космос. Ракетно-космічна техніка» (Дніпропетровськ, 2006), Міжнародній конференції «Розширення співпраці в наземних астрономічних дослідженнях держав південно-східної Європи. Вивчення об'єктів навколоземного простору та малих тіл сонячної системи» (Миколаїв, 2006), Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми астрономії» (Одеса, 2007), VII Українській конференції з космічних досліджень НЦУВКС (Євпаторія, 2007), III Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2008), VI International Conference on Optoelectronic Information Technologies «Photonics-ODS 2008» (Vinnytsia, 2008), VIII Міжнародній міждисциплінарній науково-практичній конференції «Українська Асоціація „Жінки в науці та освіті”» (Алушта, 2009), II Міжнародній науково-практичній конференції «Якість технологій – якість життя» (Судак, 2010), International Congress Helsinki, Finland «Photodiagnosis and Photodynamic therapy» (Helsinki, 2012), Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» (Москва, 2013), Науково-практичній конференції «Технологии обработки оптических элементов и нанесения вакуумных покрытий» (Мінськ, 2013), Міжнародному історико-науковому симпозиумі «История оптики и современность» (Санкт-Петербург, 2013).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені у 45 наукових працях, серед яких 2 монографії, 29 статей в провідних фахових виданнях, з них 24 роботи опубліковані у виданнях, що цитуються у міжнародних наукометричних базах: Україніка Наукова, SCOPUS, Academic OneFile, AGRICOLA, EMBiology, Gale, Google Scholar, INIS Atomindex, Inspec, OCLC, Index Copernicus, Directory Indexing of International Research Journals, РИНЦ; 5 статей в інших виданнях; 14 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 343 сторінок, із них дисертації без додатків – 332 сторінки, 89 рисунків, список використаних джерел включає 249 найменувань і займає 27 сторінок, а також 3 додатки на 11 сторінках.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику проблемного питання, обґрунтування необхідності проведення досліджень за темою дисертації та їх актуальність. Вказано на зв'язок теми роботи з науковими програмами, планами, темами. У вступі сформульовано мету, наукову проблему, окремі науково-технічні задачі, об'єкт і предмет дисертаційних досліджень, визначено новизну, наукову й практичну цінність нових отриманих результатів. Висвітлено особистий внесок автора в опублікованих працях, результати апробації та науково-прикладних досліджень.

Перший розділ присвячено розгляду стану проблеми підвищення ефективності оптико-електронних систем. Метою розділу є визначення напрямів удосконалення і розвитку оптико-електронних систем. Для досягнення окресленої мети проаналізовані методи, спрямовані на підвищення ефективності оптико-електронних систем, і визначені чинники, що стримують розвиток і вдосконалення систем.

Основні тенденції вдосконалення оптико-електронних систем спрямовані на збільшення їх ефективності. Базуючись на розгляді літературних джерел, можна класифікувати так: підвищення часового та енергетичного розрізнення систем; удосконалення методів обробки сигналів і зображень; розширення кола задач, що вирішуються однією оптико-електронною системою; зменшення габаритів, маси та енергоспоживання; зниження вартості системи. До чинників стримування розвитку систем належать фізичні процеси, що впливають на формування вихідних сигналів систем; статистична нестабільність сигналів, які приймають системи, і неоднозначність методів їх опису (наприклад, наявність угруповань, кореляцій фотонів); невизначений стан вхідного оптичного випромінювання; технічні обмеження елементів оптико-електронних систем.

Розрахунки потенційних можливостей оптико-електронних систем починаються з визначення джерел завад та енергетичних характеристик сигналів, що приймаються.

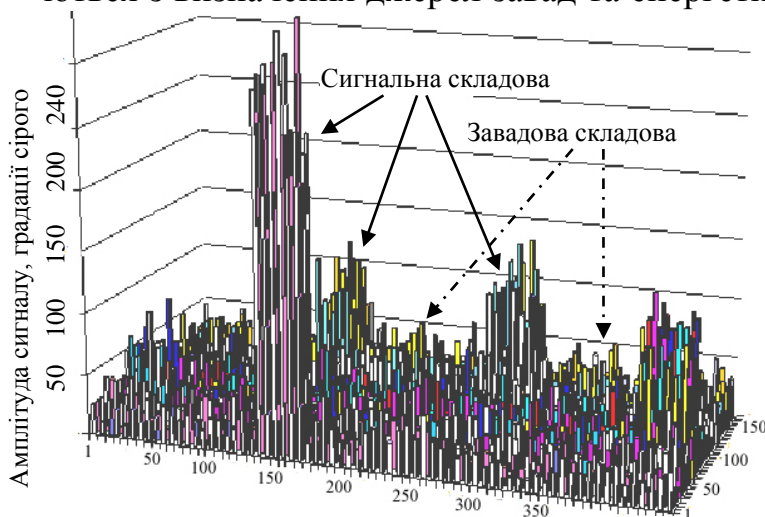


Рис. 1. Зображення, сформоване оптико-електронною системою

Основними джерелами завад в оптико-електронних системах є зовнішній фон, зумовлений випромінюванням дискретних джерел, квантовою природою оптичних сигналів та власними шумами фотоприймачів (рис.1). Оптико-електронні системи реєструють оптичне випромінювання, яке характеризується різноманітними енергетичними параметрами, наприклад, від 1 фотона за секунду до 20 000 фотонів за секунду на 1 см^2 . Аналізуючи адитивну суміш сигнальної та завадової складових про-

водять виявлення, розпізнавання та вимірювання параметрів досліджуваних об'єктів. При проведенні розрахунків систем та їх проникної здатності необхідним є визначення ефективності системи при аналізі сигналів, що приймаються (рис. 2).



Рис. 2. Ефективність оптико-електронних систем

Параметри та критерії ефективності залежать від призначення оптико-електронних систем. Наприклад, для систем виявлення критерієм ефективності можуть висуватися умовні ймовірності правильного виявлення та хибної тривоги.

Порогову чутливість приймального пристрою розуміємо як мінімальну енергію (потужність) сигналу на вході фотоприймача, при якій забезпечується його виявлення із заданими характеристиками (ймовірністю правильного виявлення та ймовірністю хибної тривоги). У загальному вигляді порогова чутливість або проникна здатність $m_{пз}$, що застосовується при спостереженні астрономічних об'єктів подана функцією:

$$m_{пз} = f(m_{дв}, L_{ф}, D_{вхзр}, f'_{ос}, k_{аб}, \tau_{омт}, d_{ел}, S_{\lambda}, \xi_{кв}, T_{к}, \lambda, F, D), \quad (1)$$

де $m_{дв}$ - граничний блиск джерела випромінювання;

$L_{ф}$ - яскравість фонового випромінювання;

$D_{вхзр}$ - діаметр вхідного отвору оптичної системи;

$f'_{ос}$ - фокусна відстань оптичної системи;

$k_{аб}$ - загальний коефіцієнт аберацій оптичної системи;

$\tau_{омт}$ - коефіцієнт пропускання світлового потоку оптико-механічного тракту;

$d_{ел}$ - розмір елемента розрізнення фотоприймача;

S_{λ} - спектральна чутливість (коефіцієнт квантової ефективності);

$\xi_{кв}$ - коефіцієнт використання випромінювання;

$T_{к}$ - час кадру, або час накопичення;

λ - довжина хвилі оптичного випромінювання;

F - значення умовної ймовірності хибної тривоги;

D - значення умовної ймовірності правильного виявлення.

Особливістю побудови оптико-електронних систем є: велике різноманіття умов роботи, наприклад рівень завад та сигналів; суттєві відмінності методів опису оптичних сигналів; складність досягнення адекватних моделей вихідних сигналів при практичному використанні. Як виходить з виразу (1) та рис. 2 розрахунки граничної проникної здатності та ефективності оптико-електронних систем залежать як від параметрів сигналів, що приймаються, умов роботи системи, так і від характеристик оптичної ланки системи, параметрів фотоприймача й обраних критеріїв визначення ефективності оптико-електронної системи.

Труднощі підвищення ефективності та фактори, що стримують розвиток систем можна пояснити деякими факторами: умовністю критерію якості й ефективності системи; неточністю математичних моделей сигналів оптико-електронних систем; цілеспрямованим спрощенням моделей сигналів у системах.

Отже розвиток теорії стохастико-детермінованої обробки сигналів у напрямку, спрямованому на розробку моделей опису інформації, що приймається та перетворюється оптико-електронними системами, удосконалення методів аналізу статистичних властивостей як вхідних, так й вихідних сигналів, є актуальним і дозволить розробити нові методи й алгоритми обробки сигналів та підвищити ефективність систем у цілому.

У *другому розділі* аналізуються теоретичні методи опису вхідних й вихідних сигналів оптико-електронних систем. Мета розділу: систематизувати теоретичні методи, на яких ґрунтується опис вхідних і вихідних сигналів оптико-електронних систем. Для досягнення поставленої мети здійснений аналіз теоретичних методів опису вхідних сигналів з урахуванням корпускулярних та хвильових властивостей й методів опису вихідних сигналів з урахуванням статистичних властивостей.

Процес формування зображення в оптико-електронних системах наведено на рис. 3. Вхідний оптичний сигнал у вигляді суміші сигнальної та завадової компонент спотворюється середовищем розповсюдження, дифракційними й інтерференційними ефектами, з урахуванням законів геометричної оптики формується оптичною системою, реєструється елементами розрізнення фотоприймача та формує зображення (див. рис. 1).

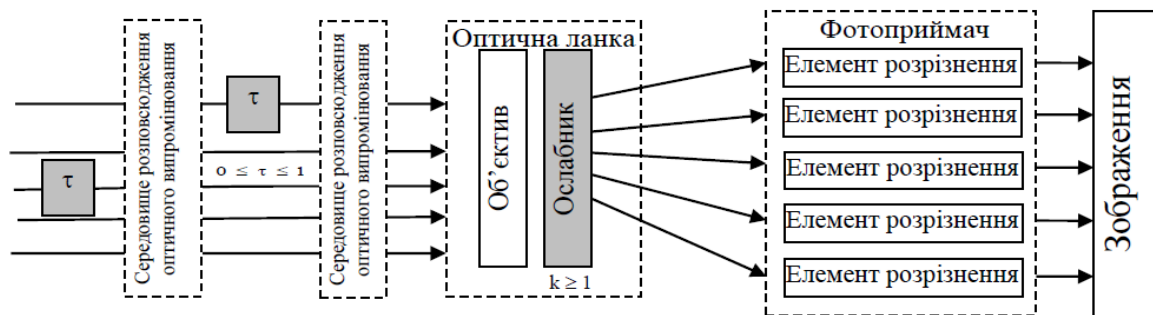


Рис. 3. Формування зображення в оптико-електронних системах

Опис вхідних оптичних сигналів можна проводити з позиції корпускулярної теорії І. Ньютона; електромагнітної теорії світла; квантової теорії; геометричної оптики; спеціальної теорії відносності А. Ейнштейна; балістичної теорії В. Ритца. Усі теорії враховують складний характер розповсюдження електромагнітного випромінювання, яке має стохастичний характер просторових та часових змін. Тобто, вхідні оптичні сигнали можна уявляти як хвилі та врахувати процеси інтерференції і дифракції, вивчати процеси взаємодії поля з речовиною. Вхідні сигнали оптичного діапазону мають значну енергію кванту, тобто опис процесів поглинання у нейтральних фільтрах та середовищі можна проводити з урахуванням квантового характеру випромінювання. Квантовий характер вхідного випромінювання, покладено в основу опису виникнення флуктуацій сигнальної і фонові складових.

Для опису сигналів і завад як на вході системи, так й при формуванні вихідних сигналів (на виході фотоприймача) використовується теорія випадкових потоків подій. За допомогою моделей на основі статистичного опису сигналів подаються характеристики сигналів та здійснюється подальша їх обробка. При статистичному опису використовуються безперервні потоки, при хвильовому уявленні вхідних оптичних сигналів та уявленні вхідного потоку корпускулами – дискретні потоки. При аналізі вихідних сигналів найбільш поширений їх опис на основі дискретних потоків. Статистичні властивості вихідних сигналів вивчаються з використанням законів Пуассона, Бернуллі, Бозе-Ейнштейна. Флуктуації фонові і сигнальних компонент схарактеризовані законами із кінцевою дисперсією, і, відповідно до теорії помилок об'єднані центральною граничною теоремою.

При оптимізації процесів виявлення сигналів опис оптичних полів до фотоприймача й після нього характеризуються окремо. Стохастичний характер електро-

магнітного випромінювання впливає просторово-часовими змінами. При цьому принцип формування сигналів в оптико-електронних системах враховує умови лінійності, інваріантності, фізичної здійсненності і стійкості. Зв'язок між вхідним потоком і вихідним визначається як детермінованою (при хвильовому описі), так і стохастичною (при корпускулярному описі) залежністю. При цьому якість стохастичних моделей залежить від того, як повно враховані фактори, що характеризують умови спостереження, та їх вплив на параметри сигналів.

Таким чином, труднощі створення єдиної стохастичної моделі як вхідних, так і вихідних сигналів, котра б дозволила вирішувати задачі опису сигналів у різноманітних умовах застосування, пояснюється великою кількістю можливих ситуацій, в яких може працювати оптико-електронна система, та факторів, на які необхідно звертати увагу при розробці алгоритмів роботи системи. Найбільш поширені стохастичні моделі вихідних сигналів призначені для вирішення часткових задач, що значною мірою обмежує можливості використання при вирішенні нових задач, які виникають у практичному застосуванні.

Третій розділ присвячено розробці стохастичної моделі взаємодії електромагнітного випромінювання з оптичною ланкою для оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном. Метою розділу є проведення теоретичних й експериментальних досліджень статистичних властивостей вихідних сигналів оптико-електронних систем, що враховують стохастичний характер взаємодії вхідного випромінювання з оптичною ланкою в умовах обмеженого динамічного діапазону. Для досягнення поставленої мети проведено аналіз процесу послаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою, проаналізовано статистичні характеристики вихідних сигналів та проаналізовано працездатність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критеріями ефективності.

Аналіз процесу послаблення вхідного потоку оптичною ланкою проведено на основі опису оптичного випромінювання з позиції хвильового та корпускулярного уявлення. Проаналізовано ефективність оптико-електронної системи, у складі якої використовуються послаблювачі, за критерієм відношення сигнал/шум. Показано, що при описі процесу взаємодії випромінювання з середовищем оптичної ланки на основі хвильової теорії відношення сигнал/шум на вході дорівнює відношенню сигнал/шум на виході системи, тобто показники ефективності системи не змінюються при використанні нейтральних та спектральних фільтрів у складі оптичної ланки. Використання корпускулярного опису взаємодії, тобто здійснення ймовірнісного ослаблення корпускулярного потоку призводить до зменшення величини сигнал/шум на виході пропорційно величині \sqrt{k} :

$$\varphi = (1/\sqrt{k})(\bar{n}_{C+П} - \bar{n}_{П}) / \sqrt{\sigma_{n_{C+П}}^2 + \sigma_{n_{П}}^2}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт послаблення;

$\bar{n}_{C+П}$ – середнє значення адитивної суміші сигналу і перешкоди;

$\bar{n}_{П}$ – середнє значення складової, яка перешкоджає;

$\sigma_{n_{C+П}}$ і $\sigma_{n_{П}}$ – середньоквадратичне відхилення адитивної суміші сигналу

та перешкод і складової, яка перешкоджає, відповідно.

Опис оптичної ланки, як основного елементу систем, враховує умови лінійності, інваріантності, фізичної здійсненності та стійкості. Результати отримані на основі пуассонової моделі вхідних і вихідних сигналів, яка набула найбільш широкого розповсюдження. Однак стохастичний характер електромагнітного випромінювання на виході оптичної ланки систем з обмеженим динамічним діапазоном мав інші просторові й часові зміни. Оптичне випромінювання, яке пройшло оптичну ланку (до складу якої було включено нейтральні фільтри), викликало в окремих елементах розрізнення фотоприймача флуктуації амплітуди, котрі мали великі значення імовірності появи великої події. Флуктуації, що реєструвалися за рівнем інтенсивності, могли перевищувати або бути порівняні з рівнем вхідного випромінювання (рис. 4). Частота появи таких подій (флуктуацій) перевищувала значення імовірності появи великої події, що передбачено прийнятими статистичними моделями схарактеризованими законами із кінцевою дисперсією, і об'єднані центральною граничною теоремою.

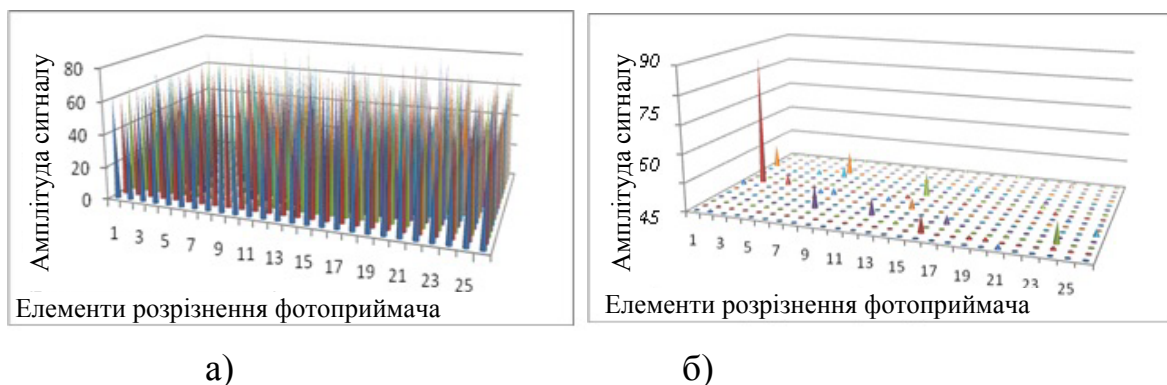


Рис. 4. Вихідний сигнал в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном:

а) стохастичний сигнал без послаблення; б) коефіцієнт послаблення $k = 4$

Подальші експериментальні дослідження показали, що при застосуванні послаблювачів спостерігаються відхилення

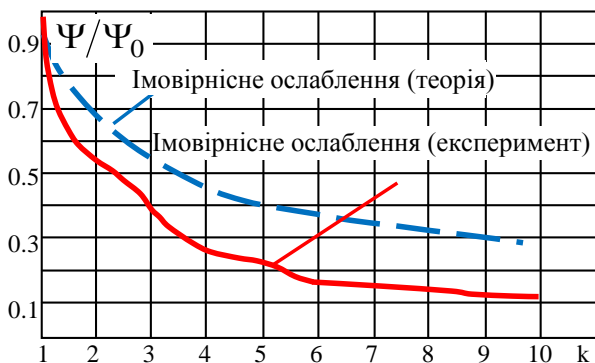


Рис. 5. Залежність величини сигнал/шум Ψ від коефіцієнта послаблення оптичної ланки

спостерігаються відхилення статистичної залежності вихідних сигналів від теоретичної пуассонової моделі при збільшенні коефіцієнта послаблення (рис. 5). Такі зміни відбуваються зі збільшенням середньоквадратичного відхилення потоку, що реєструється порівняно з середнім значенням, тобто з'являються додаткові флуктуації.

При описі процесу взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою, оптичне скло розглядається з точки зору макроскопічної теорії упорядкованості та симетрії. Однак, при описі взаємодії квантів світла з матеріалом оптичного скла необхідно врахувати, що може виникати просторова розупорядкованість, викликана наявністю хаотично розташованих дефектів, внаслідок процесів атмосферного впливу і старіння, а також стохастично розташованих центрів забарвлення в оптично щільних матеріалах, наприклад нейтральних фільтрах. У таких статистично неоднорідних середовищах положення та орієнтацію окремих

дефектів можна вважати невідомими. Ці матеріали на мікроскопічному рівні принципово неоднорідні та можуть відрізнятися за структурою. У різних ділянках макроскопічно однорідного скла процеси трансформації енергії фотонів можуть додавати додаткові флуктуації. Оптичне випромінювання, тобто фотони, входять до матеріалу оптичної ланки, розсіюються, відбиваються, поглинаються, активують коливальні процеси (фотон-фононні взаємодії) та, порушуючи принцип лінійної суперпозиції, реєструються фотоприймачем (рис. 6). Отже відхилення експериментальних даних від прийнятих статистичних моделей можна пов'язати з розсіювальними властивостями, дефектами та забрудненням оптичних елементів, обмеженням як динамічного діапазону фотоприймача, так і часу реєстрації.

У розділі розроблені статистичні моделі взаємодії оптичного сигналу з оптичною ланкою в оптико-електронних системах на основі законів розподілу, яким властива скінченна і нескінченна дисперсії. Модель на основі центральної граничної теореми репрезентована як процес проріджування стохастичного потоку, при якому окремі точки зникають незалежно від інших точок. Експериментальні результати показали, що ця модель застосована при апроксимації густини імовірності вихідних сигналів оптико-електронних систем, які не використовують послаблювачі. Модель на основі сім'ї стійких законів подана як стохастичний процес, що характеризується наявністю імовірності великої, але рідкісної події, якою не можна знехтувати, і робить суттєвий внесок в опис отримуваних результатів. Експериментально визначені області притягання граничних розподілів вихідних сигналів оптико-електронних систем. Отримано щільності розподілення імовірності вихідних сигналів для різноманітних оптичних ланок (рис. 7). Запропоновано модель взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою як випадкове блукання часток – фотонів, котрі формують просторово-часовий розподіл випромінювання у площині фотоприймача, порушуючи принцип лінійної суперпозиції. Такий процес рандомізовано не тільки за рівнем інтенсивності і частотним складом потоку, а й за траєкторіями проходження крізь оптичну ланку.

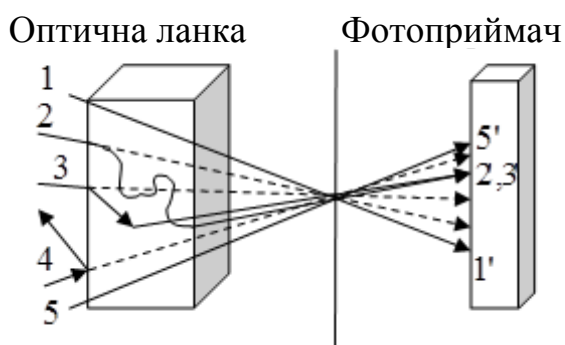


Рис. 6. Формування просторового розподілу оптичного випромінювання у площині фотоприймача

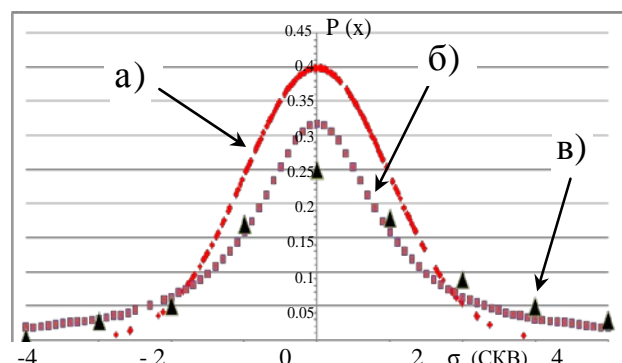


Рис. 7. Щільності розподілу імовірності: а) нормальний закон розподілу; б) розподіл Коши; в) стохастичний сигнал системи з використанням нейтрального фільтра (експеримент)

Аналіз суми незалежних випадкових величин, що характеризують вихідний сигнал оптико-електронних систем, та дослідження асимптотичної поведінки хвостів розподілу вихідних сигналів показали можливість використання стійких

законів розподілу для опису вихідних сигналів та дозволили встановити залежність характеристичного показника $0 < \alpha < 2$ та коефіцієнта послаблення оптичної ланки k (рис. 8). Закон розподілу $P(x)$ належить до області тяжіння стійкого закону з характеристичним показником $0 < \alpha < 2$, тобто,

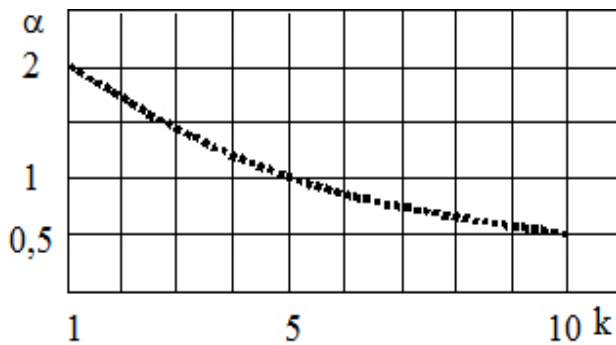


Рис 8. Експериментальна залежність характеристичного показника $0 < \alpha < 2$ та коефіцієнта ослаблення оптичної ланки k

$$\frac{P(-x)}{1-P(x)} \rightarrow \frac{c_1}{c_2} \quad \text{при } x \rightarrow \infty;$$

$$\frac{1-P(x)+P(-x)}{1-P(hx)+P(-hx)} \rightarrow h^\alpha \quad \text{при } x \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Встановлено межі застосування різноманітних статистичних моделей вихідних сигналів оптико-електронних систем (рис. 9). При цьому основну роль відіграє інтенсивність сигналів, що приймаються у порівнянні з інтенсивністю заводової складової. В інтервалі від 2 до 4 СКВ (середній квадратичний відхил) статистичні характеристики випромінювання на виході оптичної системи добре апроксимуються пуассоновою та гауссовою статистиками. При використанні ослаблювачів асимптотична поведінка «хвостів» щільності розподілу експериментальних результатів в інтервалі 2-5 СКВ вказує на неможливість апроксимації гауссовою статистикою.

Таким чином, вислідну дисперсію перешкод $\sigma_{\Pi\Sigma}^2$ подано як суму дисперсій, зумовлених впливом параметрів випромінювання $\sigma_{\Pi\text{вр}}^2$ та темнових шумів фотоприймача $\sigma_{\Pi\text{пр}}^2$ і дисперсії, зумовленої впливом оптичної ланки $\sigma_{\text{ол}}^2$:

$$\sigma_{\Pi\Sigma}^2 = \sigma_{\Pi\text{вр}}^2 + \sigma_{\Pi\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{ол}}^2. \quad (4)$$

Характеристики оптичних ланок систем, такі, як коефіцієнти поглинання, відбиття, пропускання та їх стохастичний характер впливають на просторово-часовий розподіл флукуаційної складової шуму. Дисперсію, зумовлену впливом стохастичних характеристик оптичних ланок $\sigma_{\text{ол}}^2$ подано як:

$$\sigma_{\text{ол}}^2 = \sigma_{\text{проп ол}}^2 + \sigma_{\text{пог ол}}^2 + \sigma_{\text{отр ол}}^2, \quad (5)$$

де $\sigma_{\text{проп ол}}^2$ – дисперсія, зумовлена коефіцієнтом пропускання оптичної ланки;

$\sigma_{\text{пог ол}}^2$ – дисперсія, зумовлена коефіцієнтом поглинання оптичної ланки;

$\sigma_{\text{отр ол}}^2$ – дисперсія, зумовлена коефіцієнтом відбиття оптичної ланки

З урахуванням отриманої вислідної дисперсії шуму (4) та (5), формулу для обчислення величини відношення сигнал/шум подано:

$$\varphi = \frac{16}{\sqrt{\frac{\bar{n}_{C+\Pi} - \bar{n}_{\Pi}}{\sigma_{C+\Pi}^2 + \sigma_{\Pi_{\text{фот}}}^2 + \sigma_{\Pi_{\text{тем}}}^2 + \sigma_{\Pi_{\text{пр}}}^2 + \sigma_{\text{ол}}^2}}}}, \quad (6)$$

де $\bar{n}_{C+\Pi}$ – середнє значення адитивної суміші сигналу і перешкоди;

\bar{n}_{Π} – середнє значення складової перешкод;

$\sigma_{C+\Pi}^2$; $\sigma_{\Pi_{\text{вр}}}^2$; $\sigma_{\Pi_{\text{пр}}}^2$; $\sigma_{\text{ол}}^2$ – дисперсії адитивної суміші сигналу і перешкоди,

а також складові вислідної шумової складової відповідно.

Ефективність оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном обмежується складом і якістю *оптичної ланки*, та визначається $\sigma_{\text{ол}}^2$.

Для оцінювання якості алгоритмів виявлення стохастичних сигналів на тлі стохастичних завад використовуються граничні розподіли, наприклад центральна гранична теорема, що характеризують вихідний сигнал як гауссів. При реалізації порогових методів виявлення в оптико-електронних системах необхідно забезпечити рівень імовірності хибної тривоги порядку $< 10^{-3}$. Умовні імовірності правильного виявлення та хибної тривоги оптимізуються на основі обирання порогового значення. Працюючи на межах динамічного діапазону систем, тобто на «хвостах» щільності розподілу вихідних сигналів, необхідно враховувати, що вклад великих флуктуацій буде суттєвим при оцінці ефективності системи за різноманітними критеріями та вибором порогових значень на основі гауссової статистики може призвести до суттєвих помилок при розрахунках параметрів оптико-електронних систем. Зміни статистичних властивостей вихідних сигналів і, як наслідок, вибір статистичної моделі суттєво впливають на точність визначення параметрів сигналів.

На сучасному етапі розвитку стохастико-детермінованої теорії прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах визначення узагальнених граничних теорем для статистичного аналізу вихідних сигналів є основною задачею при оцінці потенційних можливостей систем.

Четвертий розділ присвячено розробці стохастичних моделей вихідних сигналів, які враховують взаємодію електромагнітного випромінювання з елементами оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном. Метою розділу є описати статистичні властивості вихідних сигналів оптико-електронних систем, що враховує стохастичний характер взаємодії вхідного випромінювання з елементами оптико-електронного тракту на межі динамічного діапазону.

Для досягнення поставленої мети вивчені процеси формування вихідних сигналів на основі умовно пуассонівських потоків зі зміненою дисперсією, яким притаманні властивості групованих потоків; розроблена статистична модель сигналів при реєстрації надслабкого випромінювання на прикладі фотометричних систем; створена статистична модель сигналів при реєстрації випромінювання великих інтенсивностей оптико-електронною системою, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра.

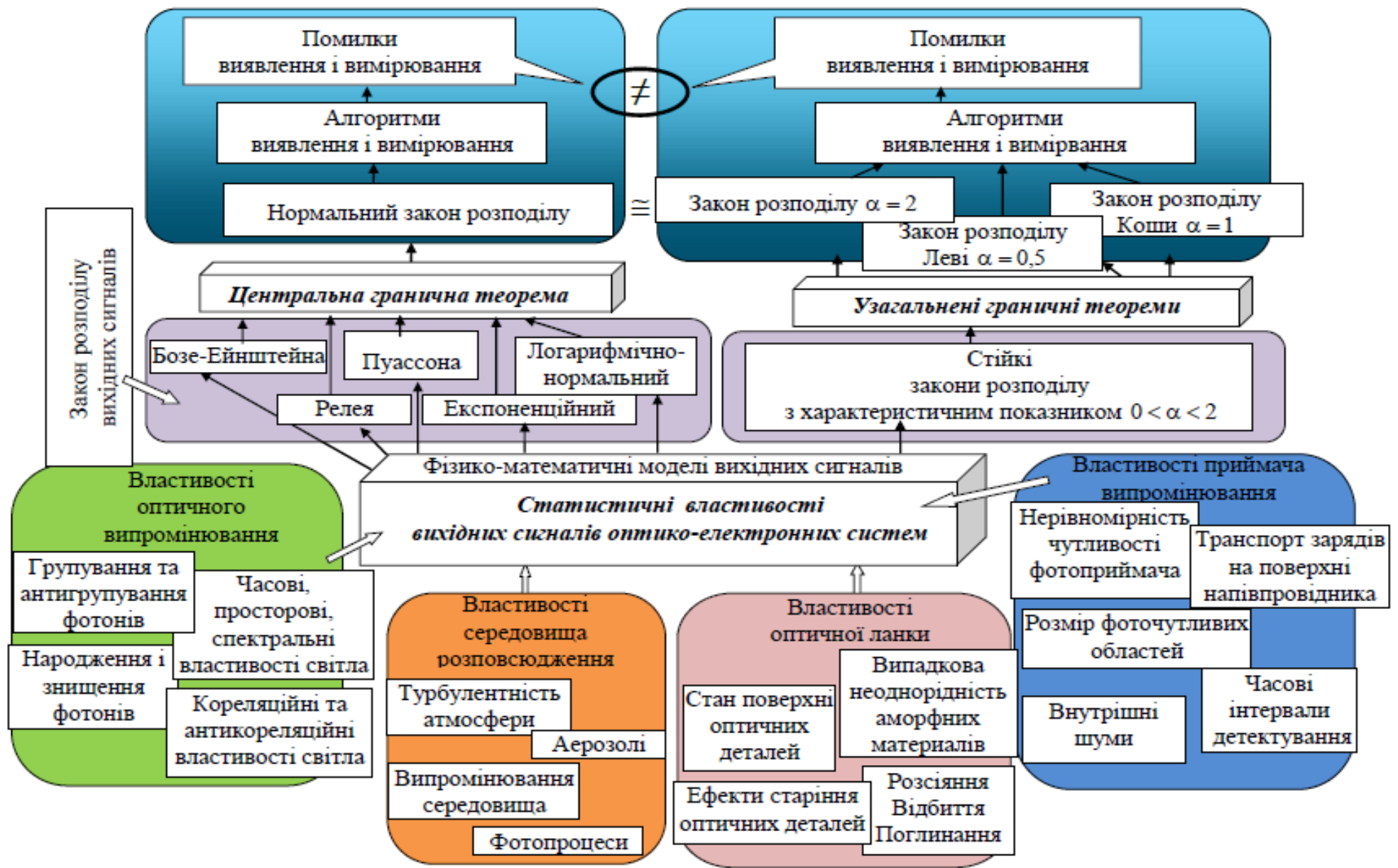


Рис. 9. Дерево проблем приймання й оброблення оптичних сигналів в оптико-електронних системах. Межі застосування статистичних моделей вихідних сигналів

В основі статистичного опису вихідних сигналів оптико-електронних систем лежить пуассонівський закон розподілу дискретних подій, якому притаманні властивості, однією з яких є відсутність кореляцій між подіями. Однак при формуванні вихідних сигналів спостерігалися нелінійні ефекти, пов'язані з наглядом подій групами. У розділі проаналізовано можливості використання математичного апарату, що дозволяє описати процес формування групованих сигналів. З'ясовано причини, які проявляються зі зміною інтенсивності сигналу, і враховані додаткові чинники в статистичних моделях сигналів і алгоритмах оброблення сигналів.

Процес формування вихідного сигналу оптико-електронних систем схарактеризований як нестационарний потік подій, який не має властивостей пуассонівського потоку і описаний пуассонівськими потоками зі зміненою дисперсією. Наявність зв'язку між просторово-часовими властивостями появи відклику фотоприймача пояснює те, що властивості пуассонівського потоку фізично не зберігаються. Процес взаємодії оптичного випромінювання з середовищем поширення та взаємодії з приймачем випромінювання описаний за допомогою умовно пуассонівських потоків, як потоків однорідних подій спостережуваних групами. Властивості потоку з умовно пуассоновими характеристиками мають відмінні від нуля кореляції усіх порядків, тобто не відповідають пуассоновому потоку. Фізично незбереження властивостей пуассонового потоку пояснюється наявністю зв'язку між місцями появи подій. Прикладом двох груп, пов'язаних внутрішньо груповим параметром, є потік з парними кореляціями, при якому поява події в одній групі підвищує ймовірність появи події у другій. При реєстрації надслабкого сигналу фотометричною системою прийнято, що одну групу очолюють події, зумовлені появою сигналу, а іншу групу – події, які обумовлені появою шуму фотоприймача. Тобто, при реєстрації енергії сигналу додаткового формується та реєструється завада.

У розділі запропоновано модель вихідних сигналів фотометричних систем, яку засновано на описі випадкових парнокорельованих потоків при аналізі надслабкого випромінювання та використаний апарат твірних функціоналів і твірних функцій. Потік подій, який полягає в тому, що в деякій області Ω в випадкові моменти часу $\tau_1 \dots \tau_k$ з'являється (також випадкове число) k подій ($k = 0, 1, 2 \dots$). Імовірності появи на Ω k точок безвідносно до моментів їх появи знаходять як:

$$P_k(\Omega) = \frac{1}{k!} \int_{\Omega} d\tau_1 \dots \int_{\Omega} d\tau_k \pi_k(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega), \quad (7)$$

Повний імовірнісний опис потоку в області Ω здійснюється за допомогою твірної функції:

$$L[u; \Omega] = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \int_{\Omega} d\tau_1 \dots \int_{\Omega} d\tau_k \pi_k(\tau_1 \dots \tau_k; \Omega) [1 + u(\tau_1)] \dots [1 + u(\tau_k)], \quad (8)$$

де $u(\tau)$ – довільна функція в області Ω , зазвичай являє собою часовий інтервал $(0, T)$ або, в більш загальному випадку, об'єднання кількох підобластей.

Твірний функціонал для парнокорельованого потоку шумових сигналів подано:

$$L^{\Psi}[u; T] = \exp \left[\int_T d\tau g_1^{\Psi}(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_T d\tau_1 \int_T d\tau_2 g_2^{\Psi}(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right]. \quad (9)$$

Для статистично незалежних сигнального і шумового потоків твірний функціонал їхньої суми розраховується множенням парціальних твірних функціоналів:

$$L^{C+\Psi}[u; T] = L^C[u; T] \cdot L^\Psi[u; T],$$

або

$$L^{C+\Psi}[u; T] = \exp \left[\int_T dt g_1^{C+\Psi}(\tau) u(\tau) + \frac{1}{2} \int_T d\tau_1 \int_T d\tau_2 g_2^{C+\Psi}(\tau_1, \tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) \right]; \quad (10)$$

$$g_1^{C+\Psi}(\tau) = g_1^C(\tau) + g_1^\Psi(\tau); \quad (11)$$

$$g_2^{C+\Psi}(\tau_1, \tau_2) = g_2^C(\tau_1, \tau_2) + g_2^\Psi(\tau_1, \tau_2),$$

де $u(\tau)$ – довільна функція на інтервалі $(0, T)$;

$g_1^C(\tau)$, $g_2^C(\tau_1, \tau_2)$ і $g_1^\Psi(\tau)$, $g_2^\Psi(\tau_1, \tau_2)$ – функції являють собою першу і другу кореляції сигнального і шумового парнокорельованих потоків.

Виявлення оптичного випромінювання з субпуассонівською статистикою фотонів дозволило підвищити точність оптичних вимірювань. Для групового виявлення враховано не лише кількість подій, а й координати цих подій. Розроблена статистична модель дозволила врахувати зміни дисперсії реєстрованого потоку, зумовленою тим, що час і місце реєстрації фотонів не є статистично незалежними при збереженні інтенсивності реєстрованого потоку. Це дало можливість синтезувати оптимальний за критерієм Неймана-Пірсона виявляч парнокорельованих подій при реєстрації надслабкого випромінювання.

При дослідженні процесів реєстрації оптичного випромінювання в оптико-електронних системах, що входять до складу акустооптичних аналізаторів спектру, також спостерігались сплески інтенсивності, котрі не відповідали існуючим статистичним моделям. При зростанні амплітуди вхідного сигналу непропорційно зростає амплітуда дифракційного максимуму. Експериментальні дослідження показали, що при досить великих амплітудах вхідного сигналу з'являлись додаткові максимуми дифракції. Запропоновано модель урахування нелінійних коливань атомів у звуковій хвилі великої амплітуди на основі фотонно-фононних процесів. Тобто розпад або злиття вхідних фононів, що може призводити до появи додаткових максимумів дифракції під іншими дифракційними кутами та формуванню додаткових відгуків фотоелементів.

Інтенсивність фононних процесів визначалась оператором Гамільтона фотон-фононної взаємодії та представлена:

$$\hat{H} = \sum_{\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2} \frac{W(\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2)}{\sqrt{\omega \omega_1 \omega_2}} \left(\hat{a}^-(\vec{k}) \hat{a}^+(\vec{k}_1) \hat{a}^+(\vec{k}_2) + \hat{a}^+(\vec{k}) \hat{a}^-(\vec{k}_1) \hat{a}^-(\vec{k}_2) \right), \quad (12)$$

де, $W(\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2)$ – коефіцієнти фотон-фононної взаємодії;

$\hat{a}^\pm(\vec{k})$ – оператори народження та знищення фонона з хвильовим вектором \vec{k} .

Оператор $\hat{a}^-(\vec{k}) \hat{a}^+(\vec{k}_1) \hat{a}^+(\vec{k}_2)$ описує процес розпаду фонона $\vec{k} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$, оператор $\hat{a}^+(\vec{k}) \hat{a}^-(\vec{k}_1) \hat{a}^-(\vec{k}_2)$ – злиття фононів.

Характеристики виявлення для цього процесу визначаються так:

$$F = P \left[\left(g_i + \sum_f s_{i,f} \right) > n_0 \right]; \quad (13)$$

$$D = P \left[\left(g_i + s_i + \sum_f s_{i,f} \right) > n_0 \right]. \quad (14)$$

В результаті розробленої моделі вихідний сигнал характеризується, як адитивна суміш стохастичних процесів, зумовлених внутрішніми шумами фотоприймача g_i , впливом світлового потоку s_i і впливом додаткового процесу, що виник у результаті фононних процесів $s_{i,f}$.

П'ятий розділ присвячено оптимізації параметрів виявлення сигналів в оптико-електронних системах з урахуванням розвитку стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів та проведенню експериментальних досліджень. Мета розділу: здійснити теоретичні й експериментальні дослідження із забезпеченням високої точності визначення просторово-часових характеристик сигналів із підвищеними ймовірнісними характеристиками виявлення з урахуванням узгодження просторово-енергетичних властивостей сигналів і параметрів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном. Для досягнення окресленої мети проведено розрахунки виявної здатності на основі створених статистичних моделей; вивчені методи просторово-часового накопичення з метою збільшення параметрів виявлення стаціонарних малорозмірних, малоконтрастних об'єктів; розроблений квазіоптимальний виявник з урахуванням особливостей просторово-часових характеристик статистичних потоків.

Традиційні методи виявлення сигналів в оптико-електронних системах базуються на пороговій обробці сигналів, тобто на порівнянні величини відліку фоточутливих елементів на вплив адитивної суміші сигнальної та фонові складових з встановленим значенням порогу, величина якого зумовлена обраним критерієм ефективності систем (див. рис. 2). В розділі проведено розрахунки ефективності системи з обмеженим динамічним діапазоном (тобто при використанні у складі оптичної ланки послабників, розглянутих у розділі 3) за критерієм максимуму відношення правдоподібності та порівняно його із значенням порогу. Вираз для відношення правдоподібності при розбитті інтервалу спостереження на статистично незалежні підінтервали має вигляд:

$$\Lambda = \prod_{i=1}^m P_{n_i}^{(сп)} / P_{n_i}^{(п)}. \quad (15)$$

Щільність ймовірності сигнальної $P_{n_i}^{(сп)}$ і фонові компонент $P_{n_i}^{(п)}$, використовуючи загальноприйняту пуассонівську статистику, можна визначити відповідно:

$$P_{n_i}^{(сп)} = \frac{(\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}/k)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-(\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}/k)}; \quad (16)$$

$$P_{n_i}^{(п)} = \frac{(\bar{n}_{pi}/k)^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-(\bar{n}_{pi}/k)}, \quad (17)$$

де k – коефіцієнт ослаблення нейтрального фільтра; \bar{n}_{ci} , \bar{n}_{pi} – середні значення сигнальної та завадової складових на i -му інтервалі спостереження. Тобто логарифм відношення правдоподібності:

$$\ln \Lambda = \ln \prod_i \frac{P_{n_i}^{(сп)}(t_i)}{P_{n_i}^{(п)}(t_i)} = - \sum_{i=1}^m \bar{n}_{ci} k^{-1} + \sum_{i=1}^m \ln \left(\frac{((\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}) k^{-1})^{n_i} / n_i!}{(\bar{n}_{pi} k^{-1})^{n_i} / n_i!} \right). \quad (18)$$

Проведено розрахунки ефективності системи з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм ймовірнісних характеристик виявлення, таких як умовні ймовірності правильного виявлення D та хибної тривоги F , з використанням центральної граничної теореми:

$$D = 1 - \Phi_0 \left(\left(n_0 - \sum_{i=1}^m (\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}) \right) k^{-1} / \sqrt{(\bar{n}_{ci} + \bar{n}_{pi}) m k^{-1}} \right); \quad (19)$$

$$F = 1 - \Phi_0 \left(\left(n_0 - \sum_{i=1}^m \bar{n}_{pi} \right) k^{-1} / \sqrt{\bar{n}_{pi} m k^{-1}} \right), \quad (20)$$

де n_0 – поріг виявлення; $\Phi_0(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$

Приймаючи до уваги можливість використання різноманітних граничних теорем вихідних сигналів, проаналізовано похибки виявлення в оптико-електронних системах. Залежність граничного закону розподілу вихідних сигналів обрано згідно з рис. 8, тобто від коефіцієнта ослаблення оптичної ланки k :

$$P_{n_i}^{(п)} = 1/2\sqrt{\pi} \exp\left(- (n_{pi})^2 / 4\right) \quad \text{при } k \approx 1; \quad (21)$$

$$P_{n_i}^{(п)} = \left| \pi \left(1 + (n_{pi})^2 \right) \right|^{-1} \quad \text{при } k \approx 5; \quad (22)$$

$$P_{n_i}^{(п)} = 1/2\sqrt{\pi} (n_{pi})^{-3/2} \exp(-1/4 n_{pi}) \quad \text{при } k \approx 10. \quad (23)$$

Вивчення стохастичної поведінки сигналів при використанні загальних граничних теорем показує, що з обиранням порогу виявлення n_0 на рівні, наприклад 3σ , де

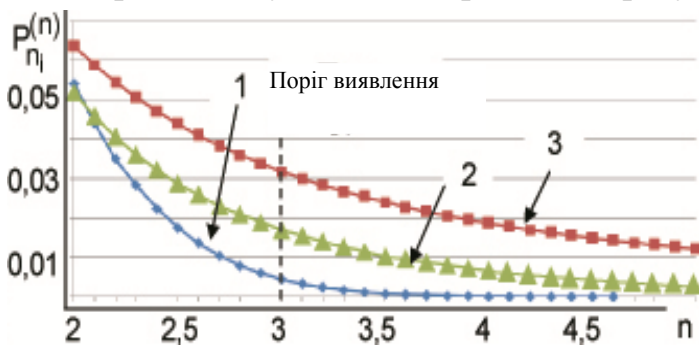


Рис. 10. Вибір порогу виявлення сигналів в оптико-електронних системах

σ – середньоквадратичне відхилення для гауссової статистики, ймовірність прийняття помилкового рішення буде суттєво відрізнятися від рішення для статистики стійких законів. На рис. 10 зображено вибір порогу виявлення для 1 – нормального закону розподілу; 2 – стійкого закону розподілу $\alpha = 0,5$; 3 – стійкого закону розподілу $\alpha = 1$.

Проведено розрахунки умовної ймовірності хибної тривоги F з використанням граничних теорем (21) – (23) для різних порогів виявлення $n_0 = \sigma$, де $\sigma = 2, \dots, 7$ для гауссової статистики, представлено на рис. 11.

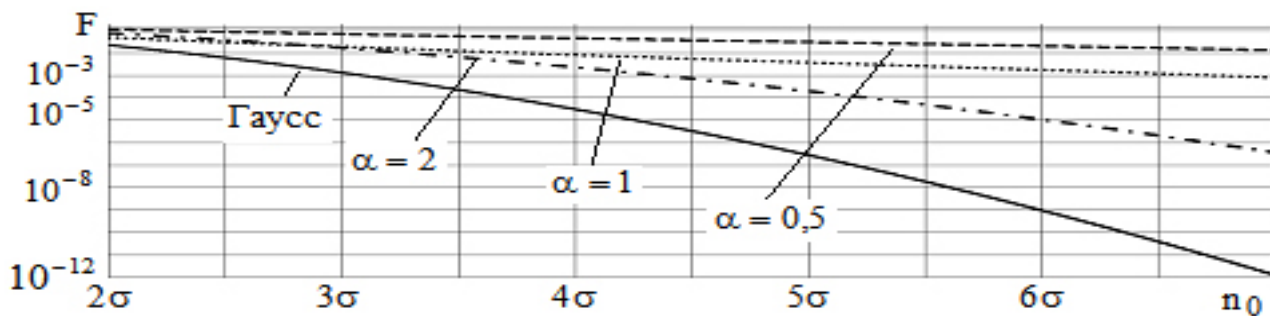
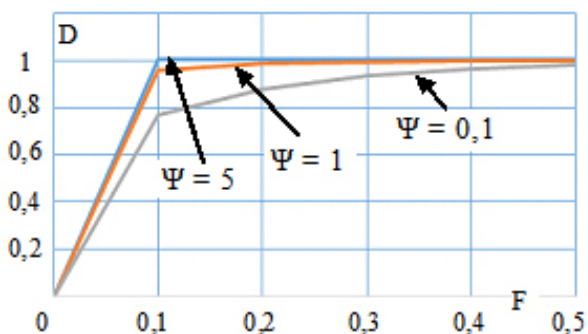
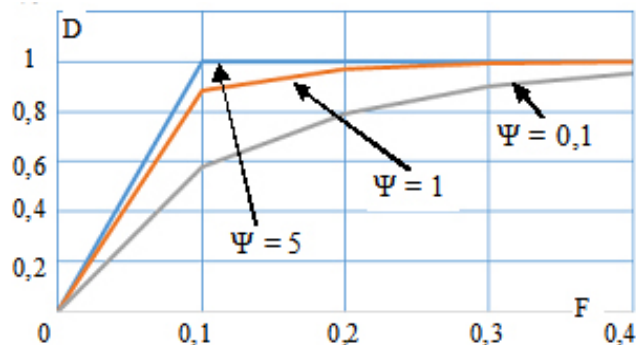


Рис. 11. Умовна імовірність хибної тривоги для різних порогів виявлення $n_0 = \sigma$

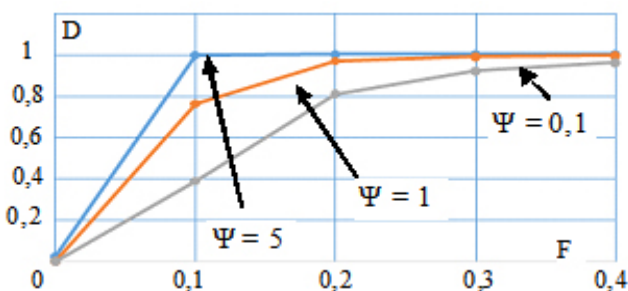
Проведено порівняльний аналіз робочих характеристик оптико-електронних систем із різними характеристиками оптичних ланок, ураховуючи статистичні характеристики вихідних сигналів (рис. 12). Розрахунки характеристик оптико-електронних систем показали, що при незначних коефіцієнтах послаблення оптичної ланки числові значення імовірностей хибної тривоги для різних граничних теорем збігаються. Зі збільшенням коефіцієнтів ослаблення оптичних ланок істотно збільшується умовна ймовірність хибної тривоги.



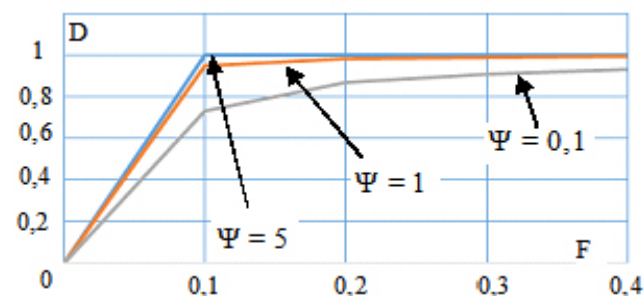
а) Робочі характеристики оптико-електронної системи виявлення. Стохастичну поведінку завадової складової прийнято на основі центральної граничної теореми



б) Робочі характеристики оптико-електронної системи виявлення. Стохастичну поведінку завадової складової прийнято на основі граничної теореми з $\alpha = 2$



в) Робочі характеристики оптико-електронної системи виявлення. Стохастичну поведінку завадової складової прийнято на основі граничної теореми з $\alpha = 1$



г) Робочі характеристики оптико-електронної системи виявлення. Стохастичну поведінку завадової складової прийнято на основі граничної теореми з $\alpha = 0,5$

Рис. 12. Робочі характеристики оптико-електронних систем виявлення, які працюють на основі критерію Неймана-Пірсона

З метою покращення характеристик виявлення потужних сигналів на тлі потужних завад та виявлення слабких сигналів на тлі внутрішніх завад фотоприймача розглянуто методи міжкадрового та внутрікадрового накопичення. Для виявлення оптичних сигналів, енергії яких недостатньо для перевищення обраного значення порогу при поодинокому виявленні, застосовано аналіз послідовності телевізійних кадрів, тобто міжкадрове накопичення послідовності кадрів. Статистичні характеристики інтенсивності сигнальної та завадових складових залежать від часу накопичення, протягом якого відбувалась реєстрація зображення. Вплив збільшення часу накопичення на структуру зображення зумовлений змінами амплітудних та просторових флуктуацій, сигналу, що приймається. При малих експозиціях усереднення флуктуацій стохастичної завадової складової не відбувається. При достатньо тривалій експозиції, протягом якої виявляються реалізації стохастичних функцій, відбувається їх просторово-часове усереднення та має місце середній розподіл інтенсивності.

Оцінено енергетичний вигравш при використанні різноманітних процедур обробки послідовності кадрів M . Розраховано залежність енергії сигналу від кількості часу накопичення. Характеристики виявлення визначено в такий спосіб:

$$F = \sum_{n_0}^{\infty} \frac{M(\bar{n}_{п1})^n}{n!} e^{-M\bar{n}_{п1}}; \quad (24)$$

$$D = \sum_{n_0}^{\infty} \frac{M(\bar{n}_{с1} + \bar{n}_{п1})^n}{n!} \cdot e^{-M(\bar{n}_{с1} + \bar{n}_{п1})}, \quad (25)$$

де $\bar{n}_{с1}$ та $\bar{n}_{п1}$ - кількість фотовідгуків, сформованих сигналом та перешкодою за час одного кадру.

Розраховано характеристики виявлення оптико-електронної системи за критерієм величини відношення сигнал/шум. На рис. 13 наведено залежності величини сигнал/шум від кількості кадрів, що накопичуються при фіксованих характеристиках умовної імовірності правильного виявлення та хибної тривоги для сигналів з детермінованою та стохастичною амплітудою.

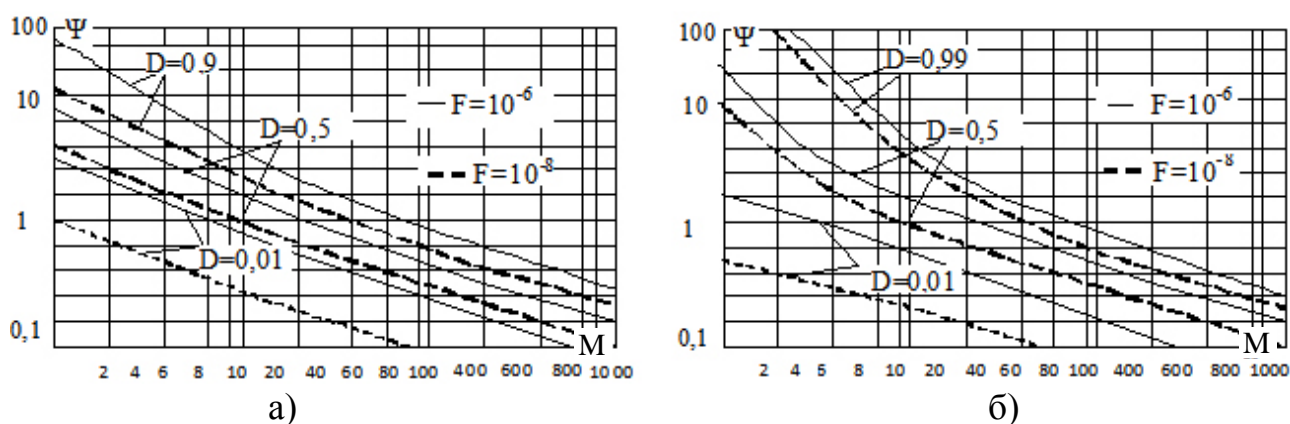


Рис. 13. Залежність величини сигнал/шум Ψ від кількості кадрів M .

- а) розрахунки для сигналу, що має детерміновану амплітуду;
б) розрахунки для сигналу, що має стохастичну амплітуду.

Проведено розрахунки методу виявлення сигнальної складової у послідовності

М телевізійних кадрів за правилами одноразового та L разового перевищення порогу виявлення у послідовності кадрів. Імовірності виявлення розраховані при обробці М кадрів, а саме:

$$D = 1 - (1 - D_1)^M; \quad (26)$$

$$F = 1 - (1 - F_1)^M \approx MF_1. \quad (27)$$

Імовірності виявлення для правила L разів перевищення порогу виявлення у послідовності М кадрів розраховано так:

$$D = \sum_{v=1}^M c_M^v (1 - D_1)^{M-v} D_1^v; \quad (28)$$

$$F = \sum_{v=1}^M c_M^v (1 - F_1)^{M-v} F_1^v, \quad (29)$$

де c_M^v - кількість збігів з М за v.

Зроблено висновок, що енергія детермінованого сигналу не залежить від кількості телевізійних кадрів, що накопичуються. Накопичення детермінованого сигналу призводить до енергетичної поразки, яка пояснюється зростанням порогу виявлення при накопиченні стохастичної завади. Стохастичний сигнал, що має пуассонову статистику, енергетично вигідніше виявляти за правилом одноразового перевищення порогу виявлення у послідовності кадрів.

Для систем з обмеженим динамічним діапазоном проведено розрахунки методу виявлення сигнальної складової у послідовності М телевізійних кадрів, представлені на рис. 14.

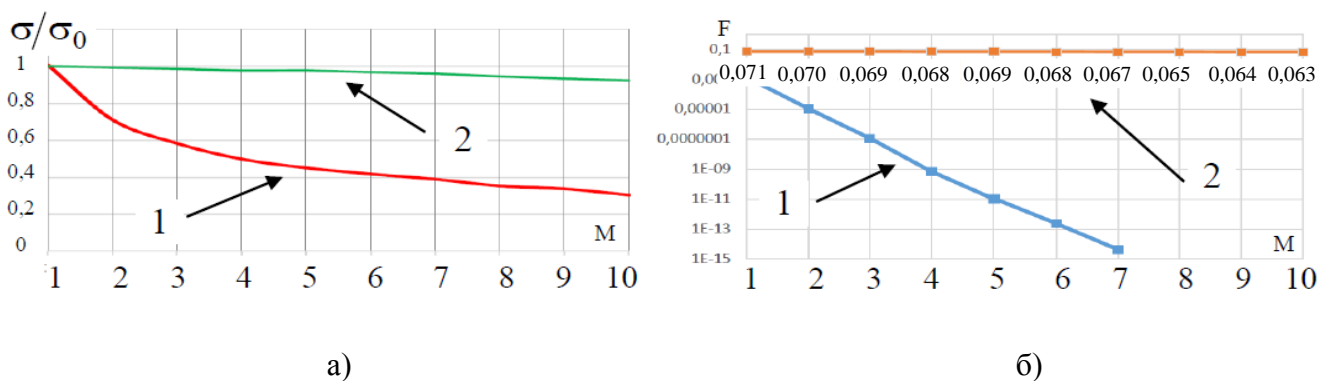


Рис. 14. Залежність а) зміни СКВ від кількості накопичених кадрів;
 б) умовної імовірності хибної тривоги від кількості накопичених кадрів;
 1 - стохастичну поведінку завадової складової прийнято на основі центральної граничної теореми; 2 - стохастичну поведінку завадової складової прийнято на основі узагальненої граничної теореми

Враховуючи статистичну поведінку завадової складової та граничні розподіли для систем з обмеженим динамічним діапазоном, зроблено висновок, що при використанні різного часу експозиції імовірність хибної тривоги зберігається. Це пояснюється тим, при накопиченні стохастичного сигналу який має статистику α - стійких законів не відбувається просторого-часового усереднення флуктуаційної складової.

У розділі розроблено й експериментально перевірено алгоритми виявлення малорозмірних та малокоонтрастних об'єктів, котрі базуються на запропонованих математичних моделях (рис. 15).

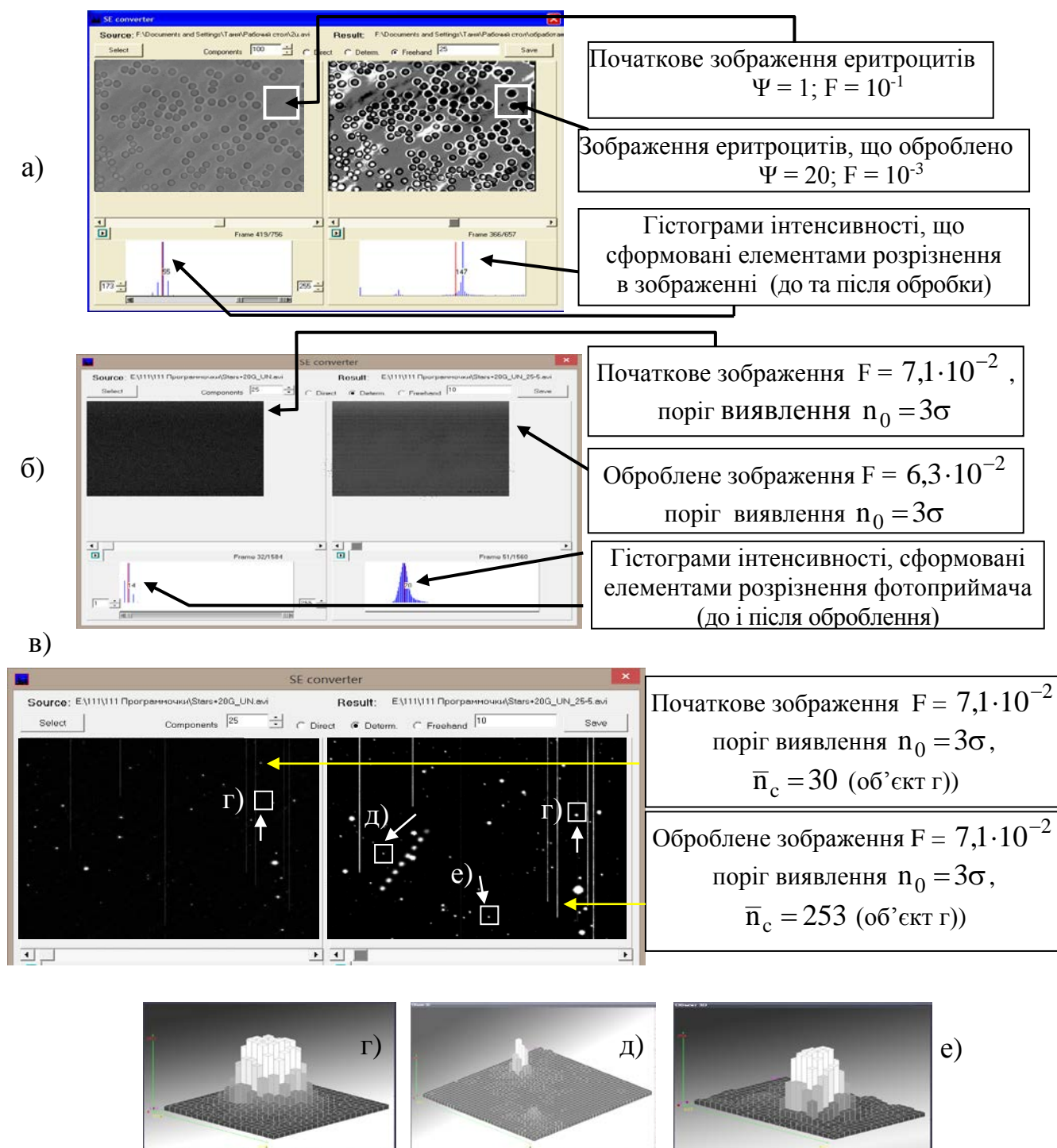


Рис. 15. Обробка малокоонтрастних об'єктів. а) експериментальні результати оброблення малокоонтрастних зображень б) експериментальні результати дослідження поведінки флуктуаційної складової фону оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном; експериментальні результати оброблення фрагмента зоряного неба: в) результат міжкадрового накопичення; г) гістограма амплітуди спостережуваного сигналу; д) гістограма амплітуди шумової складової; е) гістограма амплітуди шумової флуктуації великої інтенсивності

Розділ шостий присвячений створенню методів обробки сигналів в оптико-електронних системах на основі розвитку методів стохастико-детермінованого оброблення сигналів та проведенню експериментальних досліджень. Мета розділу – збільшити ефективність оптико-електронних систем завдяки створенню методів і алгоритмів оброблення сигналів, що враховують ефекти взаємодії прийнятого оптичного випромінювання з елементами оптико-електронної системи.

Для досягнення визначеної мети на основі комплексного підходу, який включає спільне використання хвильового і корпускулярного опису сигналів, розроблені методи просторово-часового міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення сигналів, які покращують якість зображень рухомих і близько розташованих малорозмірних, малоконтрастних об'єктів; вивчений вплив методів компресії на мікроструктуру і статистичні характеристики зображень.

Розроблено метод виявлення рухомих об'єктів, що поєднує кореляційний, різницевий, пороговий методи, а також оптимізовано міжкадрове оброблення послідовності аналізованих кадрів. За допомогою цього методу оцінено статистичні характеристики фонові компоненти, обчислено ймовірності виявлення і кореляційний інтеграл, а також оцінено динамічні зміни, викликані рухом малоконтрастних об'єктів. Розроблений метод дозволив знизити вплив шумової компоненти при використанні міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення сигналів і збільшив енергетичні характеристики сигнальної компоненти пропорційно кількості аналізованих елементів розрізнення.

Проведено експериментальні дослідження методу виявлення рухомих об'єктів, що ґрунтуються на аналізі енергетичних і просторово-часових характеристик модельних і натурних об'єктів із використанням оптико-електронної системи виявлення «Карат», засвідчили, що оптимальне використання енергії просторового розподілу сигнальної складової і часу реєстрації дозволяє збільшити ефективність оптико-електронної системи за критерієм величини відношення сигнал/шум у 5–10 разів залежно від умов спостереження (рис. 16).

Розроблено метод розрізнення близько розташованих об'єктів, центри дифракційних зображень яких розміщені на відстані меншій, ніж релеєвська межа, і мають

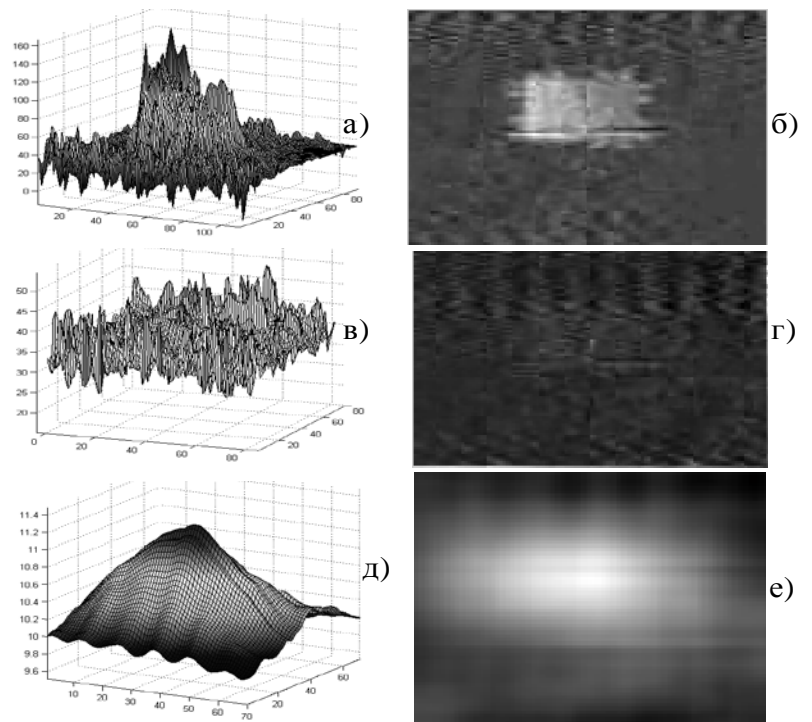


Рис. 16 – Метод виявлення рухомих об'єктів: а) гістограма значень освітленості фотоприймача в умовах освітленості, яка характеризується величиною відношення сигнал/шум 20; б), г), е) зображення об'єкта спостереження на моніторі оптико-електронної системи «Карат»; в) гістограма значень освітленості фотоприймача в умовах освітленості, яка характеризується величиною відношення сигнал/шум 1,6; д) вислідне зображення

різні інтенсивності. Основу методу становить аналіз просторово-часового та просторово-амплітудного розподілу сигналів із використанням різницевих методів.

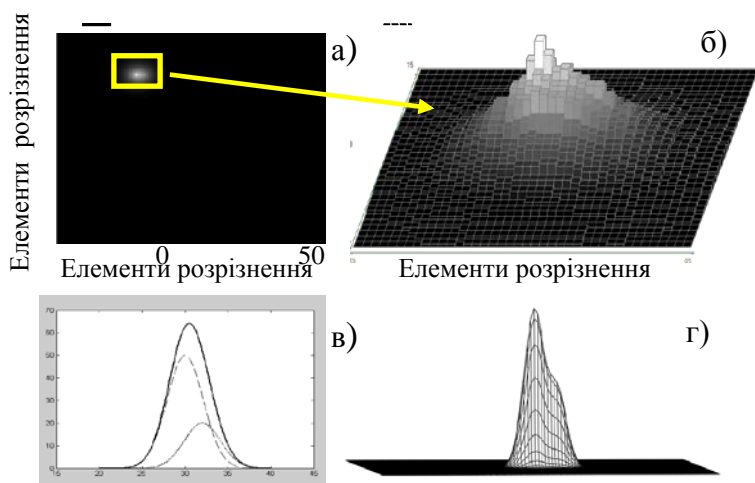


Рис. 17 – Зображення об'єкта - суми двох сигналів: а) зображення об'єкта, б) просторовий розподіл освітленості об'єкта (комплексний корпускулярний і хвильовий опис); в) г) просторовий розподіл освітленості від точкового об'єкта (хвильовий опис)

Проведено експериментальні дослідження методу розрізнення близько розташованих об'єктів, створеного на основі запропонованих стохастико-детермінованих методів оброблення сигналів, здійснені на модельних і натурних об'єктах із використанням оптико-електронної системи, що входить до складу акустооптичних аналізаторів спектра, показали збільшення спектрального розрізнення систем (на 30%) (рис. 17).

Проведено експериментальні дослідження впливу методів компресії даних на мікроструктуру зображень засвідчили, що в процесі засто-

сування розглянутих алгоритмів стиснення спостерігається просторовий перерозподіл високочастотної складової (рис. 18). При виборі алгоритму кодування необхідно врахувати основні характеристики вихідного некомпресованого потоку. При кодуванні потоків зі складною мікроструктурою, що характеризуються величиною відношення сигнал/шум менше за 5, необхідно попередньо застосовувати метод попиксельного міжкадрового накопичення. Компенсація некорельованої високочастотної складової у вихідному потоці дозволить підвищити ефективність використання форматів стиснення за рахунок скорочення надлишкової інформації без зміни мікроструктури вихідних зображень.

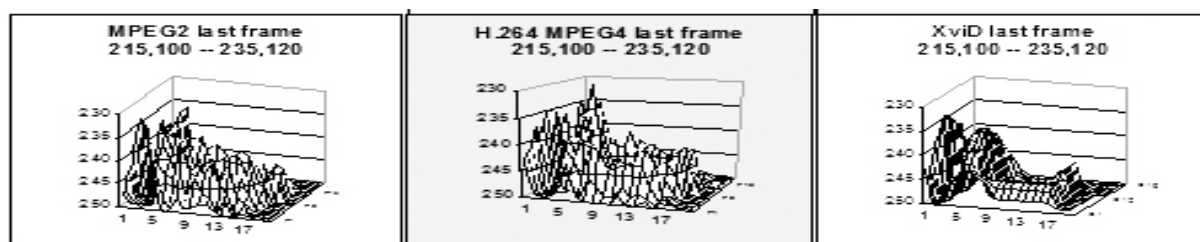


Рис. 18. Зображення мікроструктури об'єктів при використанні методів компресії

У **висновках** наведено найбільш важливі наукові і практичні результати, отримані при виконанні роботи.

У **додатках** наводять акти впровадження результатів дисертаційної роботи у Відкритому акціонерному товаристві «Спеціальне конструкторське бюро радіотехнічних приладів» - дочірньому підприємстві Державної акціонерної холдингової компанії «Гопаз» Міністерства промислової політики, м. Донецьк; у навчальному процесі Української інженерної-педагогічної академії Міністерства освіти і науки, м. Харків та список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ З РОБОТИ

Головним результатом дисертаційної роботи є розв'язання науково-технічної проблеми, яке полягає в підвищенні ефективності оптико-електронних систем під час реєстрації сигналів різних енергетичних і просторово-часових властивостей завдяки розвиткові математичних моделей й стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів, що ґрунтуються на сумісному використанні корпускулярного, хвильового і статистичного опису сигналів в оптико-електронних системах. Ефект від використання запропонованих нових моделей і теоретичних підходів до опису вхідних й оброблення вихідних сигналів полягає у посиленні проникної здатності систем в десятки разів, забезпеченні розширення динамічного діапазону систем, а також можливості забезпечення збільшення ефективності оптико-електронних систем за критеріями: роздільна здатність, імовірнісні характеристики виявлення, величина відношення сигнал/шум.

Результати експериментальних і теоретичних досліджень дозволили сформулювати такі наукові і практичні висновки:

1. Необхідність розвитку стохастико-детермінованої теорії оброблення сигналів в оптико-електронних системах зумовлена наявним неоднозначним описом як вхідних, так і вихідних сигналів. Проблемні питання пов'язані зі спостереженням, реєстрацією й обчисленням параметрів малорозмірних і малоконтрастних об'єктів, сигнали від яких характеризуються значеннями енергії нижчими за поріг чутливості і реєструються на межі динамічного діапазону систем. Урахування різних фізико-математичних і статистичних особливостей сигналів при їхній взаємодії з елементами системи дозволить удосконалити оптико-електронні системи телевізійного типу, а також виявити тенденції розвитку й окреслити можливі шляхи підвищення ефективності та проникної здатності цих систем.

2. Удосконалені математичні моделі взаємодії оптичного випромінювання з основними елементами оптико-електронної системи: оптичною ланкою і фотоприймачем, а також із середовищем поширення. Особливістю моделей є подання оптичного випромінювання як потоку фотонів, який характеризується умовно пуассонівською статистикою зі зміненою дисперсією. Застосування розроблених моделей дозволяє підвищити імовірнісні показники якості оптико-електронних систем за рахунок повного використання інформації про зміни стохастичних характеристик сигналів при проходженні оптико-електронного тракту й усунути існування суперечностей між теоретично передбаченим статистичним поведінням сигнальної і фонові складових з експериментальними результатами під час реєстрації сигналів, що характеризуються величиною відношення сигнал/шум $\varphi \leq 5$.

3. Розроблений підхід до оцінювання ефективності оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном за критерієм величини відношення сигнал/шум. Підхід урахує вплив послаблення оптичного випромінювання елементами оптичної ланки як детермінований параметр. Застосування розробленого підходу уможливило визначення залежності зміни величини відношення сигнал/шум від коефіцієнта поглинання оптичної ланки як $1/\sqrt{k}$ (k – коефіцієнт послаблення).

4. Створена математична модель взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном при

формуванні просторово-часового розподілення оптичного випромінювання в площині фотоприймача. Модель ураховує стохастичний характер основних характеристик оптичних ланок, таких, як коефіцієнти поглинання, відбиття і заломлення, і ґрунтується на корпускулярному описі вхідних потоків, а також використанні стійких законів розподілу з характеристичним показником $0 < \alpha < 2$. Ця модель, зокрема, пояснює ефекти появи помилкових відкликів у площині фотоприймача оптико-електронних систем.

5. Експериментально отримані розподіли вихідних сигналів оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном при використанні різних коефіцієнтів ослаблення оптичної ланки. Вивчене асимптотичне поведіння хвостів розподілів експериментальних даних (амплітуд вихідних сигналів) і визначена їхня належність областям притягання стійких законів розподілу з характеристичним показником $0 < \alpha < 2$. Це дозволило встановити залежність між коефіцієнтом ослаблення оптичної ланки і граничним розподілом вихідних сигналів.

6. Уперше отримані вирази для розрахунку імовірнісних характеристик виявлення з урахуванням енергетичних характеристик сигналів і перешкод, а також коефіцієнтів ослаблення оптичної ланки для систем, які мають обмежений динамічний діапазон. Для обчислення ефективності систем за критерієм умовних імовірностей виявлення враховані узагальнені граничні теореми з характеристичним показником $0 < \alpha < 2$ для кожної оптичної ланки й використовуюваного коефіцієнта ослаблення. Це дало змогу оптимізувати алгоритми виявлення малорозмірних, малоконтрастних об'єктів.

7. На основі результатів обчислення характеристик виявлення встановлено, що при малих коефіцієнтах ослаблення оптичної ланки значення імовірності хибної тривоги при виборі порогового значення до $n_0 = 3\sigma$ для різних граничних законів розподілу збігаються. При виборі порога $n_0 = 3\sigma$ умовна імовірність хибної тривоги при прийнятті гауссової моделі вихідного сигналу досягає $F=10^{-3}$, при прийнятті моделі вихідного сигналу на основі α -стійких законів умовна імовірність хибної тривоги при $\alpha=2$; $F=10^{-1}$ при $\alpha=1$; $F=10^{-1}$ при $\alpha=0,5$. При збільшенні коефіцієнта ослаблення асимптотичне поведіння «хвоста» щільності імовірності змінюється, що приводить до істотного збільшення значення імовірності хибної тривоги. При виборі порога $n_0 = 5\sigma$ умовна імовірність хибної тривоги при прийнятті гауссової моделі вихідного сигналу досягає $F=10^{-7}$, при прийнятті моделі вихідного сигналу на основі α -стійких законів умовна імовірність хибної тривоги $F=10^{-3}$ при $\alpha=2$; $F=10^{-2}$ при $\alpha=1$; $F=10^{-1}$ при $\alpha=0,5$.

8. Розроблена модель вихідного сигналу оптико-електронних систем при реєстрації надслабких сигналів, що використовує корпускулярний опис і статистичну теорію потоків й ураховує природу виникнення парнокорельованих сигналів. Модель дозволила синтезувати виявник сигналів, енергетичні характеристики яких порівнянні з внутрішнім шумом приймача.

9. Удосконалений метод виявлення сигналів на основі критерію узгодження просторових та енергетичних характеристик об'єктів із властивостями виявлення оптико-електронних систем. Критерій ураховує розмір і контраст об'єктів, а також визначає взаємодію цих характеристик зображень із частотно-контрастною чутливістю систем. Метод дозволив підвищити ефективність систем за критеріями величини відношення сигнал/шум та імовірнісних характеристик виявлення в десятки разів. Експериментально встановлено можливість підвищення ефективності системи за критерієм величини від-

ношення сигнал/шум у 20 разів, за критерієм умовної імовірності хибної тривоги в 10^2 разів при прийнятті гауссової моделі вихідних сигналів. При прийнятті моделі вихідного сигналу на основі α -стійких законів ефективність системи за критерієм умовної імовірності хибної тривоги не змінюється, при загальному покращенні якості зображення у вислідному зображенні і збільшенні амплітуди сигнальної складової в рази.

10. На основі створених статистичних моделей вихідних сигналів оптимізовані параметри внутрішньокадрового і міжкадрового просторово-часового накопичення детермінованих і стохастичних сигналів при обробленні зображень. Ураховані статистична модель вихідних сигналів, енергія вхідних сигналів, оптимальний вибір часу накопичення сигналів у поодинокому кадрі і при їхньому подальшому накопиченні. Встановлено, що при прийнятті гауссової моделі вихідних сигналів ефективність оптико-електронних систем телевізійного типу за критерієм величини сигнал/шум збільшується в \sqrt{M} (M – кількість кадрів).

11. Розроблені алгоритми виявлення малокоонтрастних об'єктів з урахуванням комбінованого використання корпускулярного, хвильового і статистичного описів сигналів в оптико-електронних системах. Алгоритми синтезовані на основі поетапного міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення й урахування енергетичних і просторово-часових властивостей сигналів, а також методів ослаблення. Застосування алгоритмів дозволяє підвищити ефективність виявлення сигналів за критерієм величини сигнал/шум у 5–10 разів.

12. Результати експериментальних досліджень доводять, що реалізація запропонованих методів та алгоритмів оброблення сигналів в оптико-електронних системах дозволить істотно розширити діапазон значень енергій вхідних сигналів. Запровадження результатів уможливило збільшення проникної здатності системи. На прикладі оптико-електронної системи, яка входить до складу радіотехнічної системи моніторингу радіопростору показано, що спектральний діапазон систем збільшився на 30 %; динамічний діапазон систем – на 40 %.

Таким чином, у дисертаційній роботі набула розвитку стохастико-детермінована теорія прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах, яка полягає в урахуванні додаткових статистичних властивостей сигналів при взаємодії оптичного випромінювання з оптичною ланкою, фотоприймачем і середовищем поширення. Стохастико-детерміновані властивості сигналів, такі, як енергетичні, просторово-часові, стохастичні, парнокорельовані, детерміновані, груповані, що підпорядковуються узагальненим граничним теоремам, істотно впливають на виявні властивості й ефективність оптико-електронних систем у цілому.

Перспективні напрямки подальших досліджень: теоретичні і практичні результати роботи можуть бути рекомендовані для використання на підприємствах, які розробляють і використовують оптичну й оптико-електронну техніку. Перспективними для подальших досліджень є напрями, пов'язані із розробленням алгоритмів виявлення сигналів у широкому діапазоні енергій з урахуванням статистичних особливостей вихідних сигналів. Це дозволить комплексно і системно розв'язати проблему підвищення ефективності оптико-електронних систем і збільшення їхнього динамічного діапазону.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] А. И. Стрелков, С. В. Москвитин, А. П. Лытюга, и Т.А. Стрелкова, *Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов*. Харьков, Украина: Апостроф, 2010.

Дисертант розглянув методи виявлення оптичних сигналів; запропонував методи виявлення оптичних сигналів з урахуванням корпускулярних і статистичних властивостей оптичного випромінювання; проаналізував методики розрахунків ефективності оптико-електронних систем за різними критеріями.

- [2] T. Strelkova, V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. Strelkov, Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems, in *Developing and Applying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, 2016, pp. 181-206. <http://www.igi-global.com/book/developing-applying-optoelectronics-machine-vision/147652>.

Здобувач запропонував алгоритми оброблення зображень на основі пуассонівської і субпуассонівської статистики. Алгоритми ґрунтуються на методах покращеного та міжкадрового оброблення. (Входить до SCOPUS).

- [3] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Исследование возможности применения метода детерминированного ослабления сигнала в астрономических оптико-электронных системах», *Системы обработки информации : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*. Харків, № 3(13), с. 160–163, 2001. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Здобувач здійснив розрахунки ефективності оптико-електронних систем за критерієм максимуму логарифми відношення правдоподібності, проаналізував густину імовірності вихідних сигналів при реєстрації надслабкого випромінювання.

- [4] С. И. Калмыков, А. И. Стрелков, А. М. Стадник, и Т. А. Стрелкова, «Оценка интенсивности сверхслабого излучения при хемилюминесцентном анализе», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб. Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 125, с. 66–72, 2002.

Здобувач запропонував структурну схему квазіоптимального виявника парнокорельованого потоку.

- [5] Т. А. Стрелкова, А. М. Стадник, и С. И. Калмыков, «Квазиоптимальное обнаружение парнокоррелированных сигналов в сильных пуассоновских шумах», *Системы обработки информации : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*, № 3 (19), с. 184–192, 2002. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Дисертант запропонував схему виявлення парнокорельованих імпульсів й оцінив інтенсивність сигнальних фотовідліків для випадку пуассонівського і парнокорельованого потоків).

- [6] Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и С. И. Калмыков, «Применение простейшего фильтра парнокоррелированного потока импульсов фотоотсчетов для повышения точности измерения концентрации специальных биологических примесей», *Системы обработки информации : зб. наук. пр. НАНУ, ПАНМ, Харківський військовий університет*, № 6(22), с. 351–356, 2002. (Входить до **Index Copernicus, UIF,**

Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib).

Здобувач розрахував ефективність оптико-електронної систем при виявленні парнокорельованого потоку.

- [7] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и В. В. Марченко, «Пространственное разрешение оптических сигналов акустооптического преобразователя при анализе спектров радиосигналов на близких частотах», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, № 5 (45), с. 144–151, 2005. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Автор дисертаційної роботи описав потік носіїв зарядів фотоприймача на основі пуассонівської статистики, розрахував оптимальну оцінку параметрів просторового положення сигналу в площині фотоприймача).

- [8] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 132, с. 7–13, 2003.

Здобувач запропонував методіку виявлення слабких сигналів на основі систематизації теоретичних методів аналізу оптичних сигналів.

- [9] В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и А. С. Калмыков, «Анализ электромагнитной обстановки на техногенных объектах сложной пространственной структуры», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, № 8 (57), с. 93–95, 2006. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Здобувач створив методіку виявлення сигналів у збільшеному частотному діапазоні, урахував особливості просторової структури сигналів в оптико-електронних системах у складі акустооптичних аналізаторів спектра.

- [10] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Угловое разрешение близкорасположенных изображений космических объектов в астрономических оптико-электронных систем», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 143, с. 58 – 64, 2005.

Дисертант запропонував метод розрізнення близькорозташованих космічних об'єктів, який ґрунтується на комплексному використанні хвильових і корпускулярних властивостей оптичного випромінювання.

- [11] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, С. Е. Кальной, и В. В. Карнаух, «О работе акустооптического датчика при больших амплитудах звука», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, Вып.2 (51), с.173 – 179, 2006. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Автор запропонував ідею врахування ангармонічного характеру коливань в середовищі при дослідженні впливу різноманітної інтенсивності звуку на дифракцію. Запропоновано використовувати статистичні методи оцінки параметрів сигналів в умовах групованих вибірок.

- [12] О. І. Стрелков, В. І. Барсов, Т. О. Стрелкова, Є. І. Жилін, та В. В. Марченко, «Підвищення частотної точності акустооптичних засобів спектрального і ра-

діочастотного аналізу (експериментальні дослідження)», *Системи озброєння і військова техніка*, № 4 (8), с. 20 – 25, 2006. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib, Open Academic Journals Index**).

Здобувач запропонував використовувати стохастико-детерміновані методи оброблення сигналів в оптико-електронних системах, що входять до складу акустооптичних аналізаторів спектра, наголосив на врахуванні квантової природи взаємодії електромагнітного випромінювання з фотоприймачем.

[13] А. И. Стрелков, В. И. Барсов, Т. А. Стрелкова, и Е. Н. Кац, «Оценка эффективности метода накопления серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных кадров», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил : зб. наук. пр., Вип. 1(13)*, с. 44 – 47, 2007. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Здобувач запропонував комплексне використання корпускулярних і хвильових властивостей сигналів в описі відліку оптико-електронної системи для реєстрації рухомих об'єктів, розробив метод виявлення рухомих об'єктів за допомогою поєднання кореляційного методу та методу міжкадрового оброблення сигналів.

[14] О. І. Стрелков, Т. О. Стрелкова, та С. О. Лісовенко, «Експериментальне дослідження можливості підвищення якості виявлення сигналів в оптико-електронних системах при обробці слабоконтрастних ТВ-кадрів», *Системи озброєння і військова техніка*, № 2(10), с. 8 – 10, 2007. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib, Open Academic Journals Index**).

Дисертант розробив метод просторово-частотної фільтрації для виявлення малоконтрастних об'єктів, який ґрунтується на внутрішньокадровому та міжкадровому обробленні телевізійних кадрів.

[15] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и С. А. Лисовенко, «Анализ возможности обнаружительной способности оптико-электронных систем», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр., Вип. 3 (15)*, с. 48 – 52, 2007. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Здобувач запропонував методіку розрахунку величини сигнал/шум для оптико-електронних систем. Методика враховує умови виявлення корисних сигналів, розмір об'єктів і шумової складової.

[16] А. И. Стрелков, Е. Н. Кац, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование алгоритма обнаружения изображения, быстродвигающихся объектов известной формы в ТВ кадрах в условиях слабой освещенности», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 6 (73), с. 110 – 113, 2008. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytiFactor, ResearchBib**).

Здобувач запропонував алгоритм виявлення рухомих об'єктів в умовах низької освітленості.

[17] А. И. Стрелков, Д. П. Панасенко, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование метода разрешения изображений близкорасположенных объектов не равноценных по яркости», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківсь-*

кий університет Повітряних Сил, вип. 6(73), с. 114 – 118, 2008. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, Cytifactor, ResearchBib**).

Дисертант розробив алгоритм розрізнення близько розташованих малорозмірних об'єктів, яким притаманні різні енергетичні характеристики.

[18] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, и Д. П. Панасенко, «Анализ метода разрешения изображений близко расположенных объектов, не равноценных по яркости, при наличии помех», *Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, вип. 4(8), с. 27 – 31, 2008. (Входить до **Україніка Наукова**).

Здобувач запропонував ідею вивчення впливу завад на статистичні характеристики визначення параметрів близькорозташованих об'єктів.

[19] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Т. А. Стрелкова, и Е. А. Соломко, «Влияние алгоритма сжатия wavelet на эффективность метода накопления кадров слабоконтрастных крупноразмерных изображений», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1 (19), с. 119 – 122, 2009. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, Cytifactor, ResearchBib**).

Дисертантом використано метод міжкадрового накопичення з метою узгодження енергетичних характеристик об'єктів з виявлявальною здатністю оптико-електронних систем при застосуванні алгоритмів стиску зображень.

[20] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, и В. В. Карнаух, «Анализ влияния времени накопления оптических сигналов на динамический диапазон акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системи обробки інформації : зб. наук. пр., Харківський університет Повітряних Сил*, вип. 4 (78), с. 2 – 5, 2009. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, Cytifactor, ResearchBib**).

Автором запропоновано ідею врахування впливу адитивних та мультиплікативних завад на приймальний пристрій. Розглянуто методи погодження енергетичних параметрів сигналів, що мають мультиплікативний характер з параметрами оптико-електронних систем.

[21] А. И. Стрелков, С. Е. Кальной, Е. И. Жилин, Т. А. Стрелкова, и В. В. Карнаух, «Применение метода дискретного накопления сигналов для повышения динамического диапазона акустооптического анализатора спектра радиосигналов», *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, Вип. 2 (14), с. 58 – 66, 2010. (Входить до **Україніка Наукова**).

Здобувач запропонував для опису вихідних сигналів акустооптичних аналізаторів спектра використовувати математичний опис на основі дискретних потоків.

[22] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Энергетическое обнаружение оптических сигналов в телевизионных системах», *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба : зб. наук. пр.*, вип. 1(23), с. 68 – 71, 2010. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, Cytifactor, ResearchBib**).

Здобувач запропонував використовувати метод узгодження енергетичних характеристик спостережуваних об'єктів із властивостями виявлення оптико-

електронних систем).

- [23] А. И. Стрелков, Т. А. Стрелкова, Е. И. Жилин, и Т. В. Бутрым, «Анализ временных ограничения по непрерывному накоплению оптических сигналов в телевизионных оптико-электронных системах», *Системи озброєння і військова техніка*, № 3(27), с. 8 – 10, 2011. (Входить до **Index Copernicus, UIF, Україніка Наукова, Scientific Indexing Service, CytFactor, ResearchBib, Open Academic Journals Index**).

Здобувачем запропоновано ідею врахування мультиплікативного характеру впливу завад великої інтенсивності при виявленні сигналів в оптико-електронних системах.

- [24] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин Т. А., Стрелкова, А. П. Лытюга, и Т. В. Бутрым, «Особенности математического описания процессов ослабления оптического излучения», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 168, с. 97 – 102, 2012.

Автор дисертаційної роботи втілює ідею здійснення порівняльного аналізу розрахунку ефективності оптико-електронних систем за критерієм сигнал/шум при використанні різних теоретичних аспектів опису принципів формування вихідних сигналів в оптико-електронних системах.

- [25] А. И. Стрелков, Е. И. Жилин, А. П. Лытюга, Т. А. Стрелкова, и Т. В. Бутрым, «Обнаружение ослабленных оптических сигналов с учетом корпускулярного характера их взаимодействия с веществом», *Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр., Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління*, Вип. 3(23), с. 108 – 111, 2012. (Входить до **Україніка Наукова**).

Здобувач запропонував здійснити теоретичний аналіз вихідних сигналів в оптико-електронних системах з обмеженим динамічним діапазоном на основі методики розрідження пуассонівських потоків.

- [26] Т. А. Стрелкова, Ю. И. Созонов, и Ю. А. Яновский, «Исследование статистики пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах», *Радиотехника : Всеукр. Межвед. наук.-техн. сб., Харьковский национальный университет радиоэлектроники*, Вып. 170, с. 185 – 188, 2012.

Дисертант втілює ідею вивчення стохастичної поведінки вихідних сигналів в оптико-електронних системах із метою визначення статистичних характеристик сигналів і перешкод.

- [27] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Стохастико-детерминированный подход к обработке оптических сигналов в оптико-электронных системах», *Научно-технический журнал "Контенант"*, Том 12, № 1, с. 83 – 88, 2013. (Входить до **РИНЦ**).

Здобувач описав вихідні сигнали за допомогою математичної моделі сигналів, що враховує стійкі закони розподілення випадкових величин.

- [28] Т. Strelkova, «Influence of Video Stream Compression on Image Microstructure in Medical Systems», *Biomedical Engineering*, vol. 47, pp. 307 – 311, 2014. (Входить до **SCOPUS, Springer, РИНЦ**)

- [29] Т. А. Стрелкова, «Статистические свойства выходных сигналов оптико-телевизионных систем с ограниченным динамическим диапазоном», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (68), с. 38 – 44, 2014. (Входить до **SCOPUS, Україніка Наукова, Index Copernicus, OpenAIRE, WorldCat, Library.ru, ResearchBib, Directory of Open Access Journals**,

EBSCO Publishing, CiteFactor).

- [30] Т. А. Strelkova, «Studies on the Optical Fluxes Attenuation Process in Optical-electronic Systems», *Semiconductor physics, quantum electronics & optoelectronics (SPQEO)*, no. 4. pp. 421 – 424, 2014. (Входит до **Україніка Наукова, Academic OneFile, AGRICOLA, CSA/Proquest, EMBiology, EMCare, Gale, Google Scholar**)
- [31] Т. А. Стрелкова, «Использование устойчивых законов распределения при оценке эффективности обработки сигналов в оптико-электронных системах», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (74), с. 4 – 9, 2015. (Входит до **SCOPUS, Україніка Наукова, Index Copernicus, OpenAIRE, WorldCat, Library.ru, ResearchBib, Directory of Open Access Journals, EBSCO Publishing, CiteFactor**)
- [32] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Состояние и перспективы развития оптико-электронных приборов специального назначения», на *2-м Международном Радиоэлектронном Форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2005)*, Харьков, 9-23 сент. 2005, Том 2, с. 469 – 470.
- [33] С. А. Лисовенко, А. И. Стрелков, А. С. Калмыков, и Т. А. Стрелкова, «Сравнительный анализ методов ослабления аддитивных шумов в оптико-электронных системах», на *VIII Міжнар. наук.-практ. конф. "Людина і космос". Ракетно-космічна техніка*, Дніпропетровськ, 13-14 квіт. 2006, с.135.
- [34] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Корреляционная обработка сигналов в астрономических телевизионных оптико-электронных системах», на *Международной конф., "Расширение сотрудничества в наземных астрономических исследованиях государств юго-восточной Европы. Изучение объектов околоземного пространства и малых тел солнечной системы"*, Николаев, 2006, с. 100 – 102.
- [35] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Особенности обнаружения оптических сигналов от космических объектов в астрономических телевизионных системах в сумеречное и дневное время», на *Міжнар. наук. конф., „Сучасні проблеми астрономії”*, Одеса, 12-18 серп., 2007, с. 34.
- [36] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Имитационное моделирование обнаружения низкоорбитальных космических объектов в сумеречных и дневных условиях астрономическими телевизионными системами», на *Седьмой Украинской конференции по космическим исследованиям НЦУИКС*, Евпатория, 3-8 сент., 2007, с. 203.
- [37] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, и Т. А. Стрелкова, «Обнаружение оптических сигналов от низкоорбитальных космических объектов астрономическими телевизионными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех», на *3-м Международном радиоэлектронном форуме. «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008*, Том I. «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации», Харьков, 22-24 окт., 2008. с. 160 – 161.
- [38] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Е. И. Жилин, и Т. А. Стрелкова, «Возможности обнаружения объектов оптико-электронными системами в условиях сильных аддитивных и мультипликативных помех», in *VI International Conference on*

Optoelectronic Information Technologies "Photonics-ODS 2008", Vinnytsia, VNTU, 30 Sept. – 2 Oct., 2008, pp. 22.

- [39] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга, Ю. А. Яновский, и Т. А. Стрелкова, «Исследование качества изображений при передаче в телемедицинских информационных сетях», на *8-ї Міжнар. міждисциплінарної наук.-практ. конф. Сучасні проблеми науки та освіти, Українська Асоціація „Жінки в науці та освіти”*, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Алушта 30 квіт. -10 трав., 2009, с. 97 – 98.
- [40] Т. А. Стрелкова, и И. А. Пащенко, «Стандарты для передачи радиологических изображений в телемедицинских сетях», на *II-ой Междунар. науч.-практ. конф., «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 99 – 100.
- [41] Т. А. Стрелкова, и А. С. Калмыков, «Оптико-электронная система для изучения собственного оптического излучения живых систем», на *II-ой Междунар. науч.-практ. конф. «Качество технологий – качество жизни»*, Судак 15-19 сент. 2010, с. 113.
- [42] T. A. Strelkova, V. A. Timanyuk, E. A. Romodanova, and A. P. Lytyuga, «Effects of coherent and incoherent optical radiation on pathologically functioning spermatozoa», in *International Congress "Photodiagnosis and Photodynamic therapy" Official Journal of the European Platform for Photodynamic Medicine*, Helsinki, Finland, 24 – 29 Aug. 2012, № 17, P. S 6.
- [43] А. И. Стрелков, А. П. Лытюга., и Т. А. Стрелкова, «Перспективы развития оптико-электронных систем специального назначения с использованием методов стохастико-детерминированной обработки оптических сигналов», на *Междунар. науч.-практ. конф., «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем»*, Москва, 28-30 март., 2013, с. 50 – 53.
- [44] Т. А. Стрелкова, и В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла», на *науч.-практ. конф. «Технологии обработки оптических элементов и нанесения вакуумных покрытий»*, Минск, 26-27 сент., 2013. с. 85 – 86.
- [45] Т. А. Стрелкова, и В. А. Сауткин, «Стохастический подход к оценке качества оптического стекла. Проблемные вопросы», на *Междунар. историко-научном симпозиуме «История оптики и современность»*, Санкт-Петербург, 28-30 окт., 2013, с. 58 – 59.

АНОТАЦІЯ

Стрелкова Т.О. Розвиток стохастико-детермінованої теорії прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.07 «Оптичні прилади та системи». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2017.

Основні тенденції удосконалення оптико-електронних систем спрямовані на збільшення проникної здатності. Однак при розрахунках ефективності та встановленні граничних можливостей систем виникають протиріччя при використанні різноманітних підходів до опису, як вхідних так і вихідних сигналів. Протиріччя, що виникають можна пояснити: умовністю критерію ефективності, що приймається; неточністю математичних моделей сигналів; цілеспрямованістю спрощення моделей сигналів в системах. З метою подолання протирічч в дисертаційній роботі вирішена

актуальна науково-технічна проблема підвищення ефективності оптико-електронних систем за рахунок розвитку математичних моделей та стохастико-детермінованих методів прийому та обробки сигналів, що засновані на сумісному використанні корпускулярного, хвильового та статистичного опису сигналів в оптико-електронних системах.

Для вирішення вказаної проблеми було проведено аналіз теоретичних методів опису вхідних оптичних сигналів з урахуванням корпускулярних властивостей та методів опису вихідних сигналів з урахуванням статистичних особливостей. Проведено аналіз процесу ослаблення оптичного випромінювання оптичною ланкою, проаналізовано статистичні характеристики вихідних сигналів та ефективність оптико-електронної системи з обмеженим динамічним діапазоном. Проаналізовано граничні розподілення вихідних сигналів на належність областям тяжіння нормального та стійких законів з характеристичним показником α . Розроблено методи реєстрації випромінювання надслабкої та великої інтенсивності.

Ключові слова: оптико-електронні системи; ослаблення оптичних сигналів; фотодетектор; флуктуації сигналу; Пуассонова модель сигналів; гаусові та негауссові статистики; загальні граничні теореми; виявлення сигналів; методи обробки зображень.

АННОТАЦІЯ

Стрелкова Т.А. Развитие стохастико-детерминированной теории приема и обработки сигналов в оптико-электронных системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 «Оптические приборы и системы». Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2017.

Основные тенденции усовершенствования оптико-электронных систем направлены на увеличение проникающей способности. На основе литературного анализа выделены следующие направления развития систем: увеличение временного и энергетического разрешения оптико-электронных систем; усовершенствование методов обработки сигналов и изображений; расширение круга задач, которые решаются одной оптико-электронной системой. В основе развития этих направлений лежит глубокое понимание физических процессов возникновения, распространения оптического излучения, а также теория приема и обработки оптических сигналов с учетом особенностей их пространственно-временной структуры, волновых и корпускулярных свойств.

Однако при расчетах эффективности и установлении предельных возможностей систем возникают противоречия при использовании различных подходов к описанию, как входных, так и выходных сигналов систем. Возникающие противоречия и трудности можно объяснить: условностью принимаемого критерия эффективности системы; неточностью математических моделей сигналов в оптико-электронных системах; целенаправленным упрощением моделей сигналов в системах. Учет дополнительных свойств оптического излучения позволит устранить противоречия и определить направления разработки более полных математических моделей, новой элементной базы оптико-электронных систем, а также оптимизации алгоритмов приема и обработки сигналов.

С целью преодоления рассмотренных противоречий в диссертационной работе решена актуальная научно-техническая проблема повышения эффективности опти-

ко-электронных систем за счет развития математических моделей и стохастико-детерминированных методов приема и обработки сигналов, основанных на совместном использовании корпускулярного, волнового и статистического описания оптических сигналов в оптико-электронных системах.

Для решения указанной проблемы был проведен анализ теоретических методов описания входных оптических сигналов с учетом корпускулярных и волновых свойств и методов описания выходных сигналов с учетом статистических особенностей. Проведен анализ процесса ослабления оптического излучения оптическим звеном, проанализированы статистические характеристики выходных сигналов и эффективность оптико-электронных систем с ограниченным динамическим диапазоном. Для статистического описания сигналов использована модель α -устойчивых процессов. Проанализированы предельные распределения выходных сигналов на принадлежность областям притяжения нормального и устойчивых законов с характеристическим показателем α . Экспериментально проверено асимптотическое поведение функции распределения выходных сигналов оптико-электронных систем, обоснована применимость обобщенных предельных теорем.

Основываясь на представлении выходных сигналов в оптико-электронных системах, как стохастического процесса формирования случайной величины, рассмотрены процессы регистрации излучения сверхслабой и большой интенсивности, на примере фотометрических систем и оптико-электронных систем, которые входят в состав акустооптических анализаторов спектра.

Экспериментальные исследования и результаты математического моделирования методов и алгоритмов фильтрации шумовых составляющих сигналов на основе предложенных моделей свидетельствуют о работоспособности

Применение разработанных стохастико-детерминированных методов приема и обработки сигналов, которые составлены на основе разработанных моделей позволило расширить динамический диапазон систем в области приема сильных сигналов в условиях сложной помеховой обстановки, снизить пороговую чувствительность в области приема слабых сигналов, разработать алгоритмы и методы, повышающие проникающую способность оптико-электронных систем.

Ключевые слова: оптико-электронные системы; ослабление оптических сигналов; фотодетектор; флуктуации сигнала; Пуассоновская модель сигналов; гауссовы и негауссовы статистики; обобщенные предельные теоремы; обнаружение сигналов; методы обработки изображений.

ABSTRACT

Srilkova T.O. The development of a stochastic-deterministic theory of signal reception and processing in optoelectronic systems. – Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in speciality 05.11.07 “Optical instruments and systems”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2017

The main tendencies for improvement of optical and electronic systems are aimed at increasing the penetrating ability. But when evaluating efficiency and establishing the maximum capabilities of the systems contradictions arise when applying different approaches to description both of the input and of the output signals. The arisen contradictions can be explained by: the accepted conventional criterion of efficiency; the inaccuracy of mathematical models of signals; a purposeful simplification of models of signals in the systems. To overcome contradictions the urgent scientific and technical problem of improving the efficiency of optoelectronic systems through development of mathematical models and stochastic-deterministic methods and signal processing based on the joint use of the corpuscular, wave and statistical descriptions of signals in optoelectronic systems was solved in the thesis.

Theoretical methods for description of the input optical signal with respect to the corpuscular properties of input streams and the statistical features of the source signals were analyzed to solve this problem. The analysis of the process of the optical radiation attenuation by an optical link was carried out. The statistical characteristics of the output signals and the efficiency of optoelectronic systems with limited dynamic range were analyzed. The output signals border distribution in belonging to the domains of attraction of the normal and stable laws with characteristic exponent α was analyzed. Methods for the detection of radiation of ultra-low and high intensity were developed.

Keywords: optical-electronic systems; the attenuation of optical signals; a photo detector; signal fluctuations; Poisson model of signals; Gaussian and non-Gaussian statistics; the general border theorems; signals detection; image processing techniques.