

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ПІНЧУК БОГДАН ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.384.3

**ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ
БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ ТА КОСМІЧНИХ ПРИЛАДІВ**

Спеціальність 05.11.07 – Оптичні прилади та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України і в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» Державного космічного агентства України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор,

Колобродов Валентин Георгійович,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,

Гордієнко Валентин Іванович,

Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти і науки України, професор кафедри технології та обладнання машинобудівних виробництв;

кандидат технічних наук,

Синявський Іван Іванович,

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, завідувач відділу атмосферної оптики та приладобудування.

Захист дисертації відбудеться «28» грудня 2021 року о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. №1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «25» листопада 2021 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н. І. Бурау

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тепловізійні системи спостереження (ТСС), які встановлені на літальних апаратах (ЛА), стрімко розвиваються і все активніше використовуються при вирішенні комплексу різних завдань, пов'язаних із отриманням інформації про об'єкти на земній поверхні (ЗП) при зйомці в складних погодних умовах або в повній темряві. Тепловізійна зйомка представляє собою продукт найсучасніших технологій, область застосування якої постійно розширюється і використовується не тільки урядовими та військовими, а й громадськими та науковими структурами.

Серед різного роду завдань, в яких застосовують тепловізори на ЛА, можна виділити такі як: оперативний моніторинг ЗП із космосу, тобто дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), безпека і охорона кордонів, інфраструктурних об'єктів, екологічний і енергетичний контроль, картографування місцевості та виявлення теплових аномалій на земній та водній поверхнях, виявлення сировинних і енергетичних ресурсів, спостереження за погодою і кліматом, контроль сільського господарства, допомога службам з надзвичайних ситуацій та поліції.

Сучасні ТСС, які встановлені на ЛА, мають можливість змінювати кути спостереження (тангажу, крену і рискання) для отримання необхідної просторової інформації на відповідній ділянці ЗП, що безпосередньо впливає як на якість зображення, так і на його просторове розділення. Просторове розділення залежить не лише від розмірів і постійної часу пікселів матричного приймача випромінювання (МПВ), але й від льотних характеристик носія ТСС.

При відхиленні осі візування ТСС від надиру, форма проекції пікселів МПВ може значно деформуватися, що, в свою чергу, впливає на контраст, швидкість і напрямок зміщення зображення. Тому підвищення якості тепловізійного зображення за рахунок узгодження частоти формування рядка із швидкістю і напрямком переміщення зображення, зміни фокусної відстані об'єктива в залежності від кутів візування або додаткового кутового довороту за кутами візування є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими темами. Дисертаційна робота виконувалася на Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» та в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і пов'язана з науково-дослідною роботою «Аванпроект зі створення сканера надвисокої роздільної здатності. Складова частина: розробка матеріалів у частині когерентного цифрового оптико-електронного процесора (ЦОЕП) для обробки космічних знімків». Контракт №5/6/29-17 НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» з КП СПБ «Арсенал», від 17.03.2017 №479.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості зображення та ефективності безпілотних, авіаційних та космічних ТСС шляхом узгодження параметрів і характеристик системи, зміни фокусної відстані об'єктива та додатковим доворотом за кутами візування.

Мета досягається вирішенням таких задач:

1. Обґрунтувати вимоги до ТСС та дослідити вплив на якість зображення умов зйомки, виду ЛА, типу і принципу дії приймача випромінювання та вибраної схеми конструкції приладу.

2. Удосконалити фізико-математичну модель (ФММ) оптико-електронного тракту ТСС, яка описує процес перетворення інфрачервоного (ІЧ) випромінювання від ЗП до тепловізора (оператора) в залежності від виду ЛА, типу і принципу дії МПВ та інших параметрів.

3. Розробити і дослідити метод підвищення просторового розрізнення за рахунок зміни фокусної відстані об'єктива.

4. Перевірити теоретично отримані ФММ шляхом моделювання у відомих програмних продуктах та практично за допомогою цифрової камери.

5. Впровадити отримані результати дослідження.

Об'єктом дослідження є процес формування тепловізійного зображення в безпілотних, авіаційних та космічних ТСС від об'єкта на ЗП до оператора.

Предметом дослідження є методи підвищення якості зображення шляхом додаткового довороту за кутами візування, зміни фокусної відстані об'єктива та узгодження параметрів і характеристик ТСС.

Методи дослідження. З метою розв'язання поставлених задач в роботі використовується математичне моделювання процесів перетворення ІЧ випромінювання від об'єктів на ЗП до МПВ, математичні основи теорії оптико-електронних приладів, комп'ютерне моделювання оптико-електронних приладів, експериментальна перевірка ФММ за допомогою комп'ютерного моделювання та цифрової камери.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблено метод оцінки просторового розділення тепловізійної системи спостереження, який полягає у врахуванні впливу відхилення візирної осі від надиру на деформацію проекції пікселів та дозволяє більш достовірно розрахувати лінійне розділення на місцевості.

2. Удосконалено фізико-математичну модель, яка описує процес перетворення інфрачервоного випромінювання від земної поверхні до тепловізійної системи спостереження на ЛА, шляхом врахування впливу динаміки руху при відхиленні візирної осі від надиру, що краще і точніше характеризує спотворення отриманого тепловізійного зображення.

3. Запропоновано та науково обґрунтовано нові методи підвищення просторового і енергетичного розділення, які базуються на додатковому довороті тепловізійної системи спостереження за кутами візування та зміні фокусної відстані об'єктива в залежності від кутів візування, що дозволило зменшити розмиття зображення.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розроблена методика розрахунку переміщення проекції точки спостереження матричного приймача випромінювання на земній поверхні, яка дозволяє розрахувати форму проекції кожного пікселя та кути нахилу проекцій

колонок і рядків при довільних кутах візування, а також може бути використана для розрахунку геодезичної прив'язки та визначення положення в просторі тепловізійної системи спостереження.

2. Отримані аналітичні вирази для розрахунку швидкості переміщення зображення у фокальній площині об'єктива, які дозволяють врахувати вплив динаміки руху на модуляційну передавальну функцію.

3. Запропоновано критерій визначення мінімального просторового розділення, який враховує характеристики літального апарату, та на його основі отримані формули для розрахунку параметрів компонентів системи.

4. Отримано формулу для визначення ефективної довжини шляху нахиленої траси, які враховують розрідження атмосфери і використовуються для розрахунку коефіцієнта пропускання, та встановлені аналітичні залежності відношення сигнал/шум на виході МПВ від кутів візування ТСС.

5. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизації процесу розрахунку і аналізу телевізійних та тепловізійних систем.

Отримані результати мають практичне впровадження на КП СПБ «Арсенал», що підтверджується відповідним актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Здобувач приймав безпосередню участь у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, в аналізі одержаних результатів та формулюванні висновків. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист належать автору.

В опублікованих у співавторстві наукових працях внесок автора наступний: досліджено критерії узгодження модуляційної передавальної функції об'єктива і матричного приймача випромінювання [1]; запропоновано метод отримання оптимального нормованого кружка розсіювання цифрового тепловізора для узгодження системи [2, 11]; отримано аналітичний вираз, який показує взаємозв'язок між функціями розсіювання точки абераційного і дифракційного об'єктивів [3]; розроблено методику і алгоритм, за допомогою яких розраховується просторове розділення на ЗП при відхиленні тепловізійної системи спостереження за кутами візування [4]; розроблено модель, яка при розрахунку просторового розділення враховує кривизну Землі і розраховує кути нахилу колонок і рядків зображення МПВ відносно напрямку польоту [5, 18]; розроблено формули, які дозволяють врахувати швидкість підспутникової точки, частоту формування рядка та деформацію проекції пікселів при розрахунку результуючої модуляційної передавальної функції системи і лінійного розділення на місцевості та отримано аналітичні вирази, які дозволяють розрахувати необхідні кутові швидкості доворотів для підвищення якості тепловізійного зображення [6, 19]; теоретично досліджена ФММ інфрачервоного випромінювання фоно-цільової обстановки різного ступеня поляризації в ТСС [7]; розроблено формули, які дозволяють врахувати динаміку руху космічного апарату для розрахунку модуляційної передавальної функції системи і радіометричного розділення з врахуванням пропускання атмосфери при відхиленні візирної осі від надиру за кутами візування [8]; аналіз переваг і

недоліків сучасних тепловізійних прицілів [9]; аналіз впливу радіуса кружка розсіювання об'єктива і періоду матричного приймача випромінювання на модуляційну передавальну функцію тепловізора [10]; теоретичне дослідження узгодження розмірів кружків розсіювання дифракційно обмеженого об'єктива і об'єктива обмеженого абераціями з матричним приймачем випромінювання [11, 12]; теоретично досліджено залежність максимальної дальності розпізнавання від ймовірності розпізнавання, розміру тест-об'єкта та кутового розміру кружка розсіювання об'єктива з абераціями [13]; теоретично досліджено вплив відхилення осі візування ТСС на просторову і енергетичну роздільну здатність [15 – 17]; теоретично досліджена ФММ когерентного оптичного аналізатора [20]; теоретично досліджено вплив відхилення осі візування ТСС на радіометричне розділення [21].

Результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових семінарах кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження обговорювались на 11 науково-технічних конференціях:

- VI, VII, VIII, IX науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», 2013 - 2016 рр., м. Київ;
- 8, 10-а Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Новые направления развития приборостроения», 2015, 2017 рр., м. Мінськ;
- 2, 3-тя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи», 2016, 2018 рр., м. Київ;
- XVI, XVII, XX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 2017, 2018, 2021 рр., м. Київ;
- The 18th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science «SPO 2017», 2017, Kyiv;
- 18th Conference on Optical Fibers and Their Applications «SPIE», 2018, м. Naleczow, Poland.

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи викладені в 21 науковій праці, серед яких 8 статей у фахових наукових виданнях (2 із яких опубліковані у виданні України категорії «А», які включено до міжнародної наукометричної бази даних Web of Science і 6 статей у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних) та 13 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та 5 додатків. Повний обсяг дисертації сягає 241 сторінку, з обсягом основного тексту 210 сторінок. Дисертація містить 93 рисунка, 7 таблиць, список використаної літератури із 105 найменувань на 10 сторінках та 5 додатків на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведені дані про публікації та апробацію результатів досліджень, показано зв'язок роботи з науковими темами.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу сучасного стану ТСС для ЛА виявлено, що область їх застосування охоплює велику кількість різних газулей, в яких використовується інформація від тепловізійних зображень, що говорить про актуальність і перспективи розвитку таких систем. Згідно вимог сьогодення, які формулюють замовники що до функціональності і можливостей ТСС для ЛА, була обґрунтована необхідність створення високоефективних ТСС із можливістю зйомки при різних кутах візування. Однак, аналіз доступної наукової літератури в області проектування, оцінки та покращення методів просторової і енергетичної роздільної здатності ТСС з урахуванням зйомки при відхиленні від надіру, показав відсутність і водночас потребу досліджень по даній тематиці.

Аналіз застосування сучасних ТСС для ЛА, які виділені в три великі групи: безпілотних, авіаційних та космічних приладів, дає змогу сформулювати окремі основні вимоги до кожної із цих груп приладів на стадії проектування, та коректно врахувати фактори впливу для побудови ФММ і обрати відповідні методики розрахунку. Розглянуті переваги і недоліки ТСС кожної із груп ЛА, які дозволяють визначити, який із приладів є найбільш ефективним (ціна – якість) для виконання поставленого завдання.

Порівняльний аналіз основних критеріїв якості ТСС показав, що ймовірність сприйняття тепловізійного зображення залежить від просторової і енергетичної роздільної здатності, і вони є взаємозалежні, тобто, покращення в системі однієї із характеристик призводить до погіршення іншої. Оскільки, ТСС для ЛА застосовуються для отримання відеозйомки або супроводу цілі, тобто, спостереження в реальному часі за рухомими об'єктами, то однією із важливих задач, яку необхідно вирішити в даній роботі, є врахування лінійного розділення на місцевості (ЛРМ) і часового розділення, тобто динамічного режиму зйомки. Врахування динамічного режиму зйомки є критичним і важливим в першу чергу для військових, від яких залежить охорона кордонів і безпека населення.

Розглянуто переваги і недоліки методів підвищення якості тепловізійних зображень для класичних ТСС, які знімають в надирі, щоб оцінити можливість їх адаптації і застосування в системах, які проводять зйомку при різних кутах візування.

Таким чином, проведений аналіз дозволив сформулювати мету і задачі дисертації та обрати відповідні напрямки досліджень.

Другий розділ присвячено розробці і дослідженню процесу формування зображення рухомою ТСС, тобто врахування руху ЛА, на якому встановлена ТСС, та кутового руху при відхиленні візирної осі ТСС від надіру, що дозволить оцінити величину розмиття і деформацію форми проекції МПВ.

Зйомка в русі з ЛА призводить до переміщення зображення у фокальній площині, а зміщення зображення визначає величину його розмиття, тобто чим більше зміщення за час експозиції тим більше розмиття і гірша якість зображення. Відповідно, була сформульована і вирішена задача забезпечення узгодження між часом інтегрування і швидкістю переміщення зображення для мінімізації розмиття отриманого зображення.

Швидкість переміщення зображення визначається із швидкості і напрямку руху точки спостереження на ЗП та кутів відхилення від надиру. Дослідження показали, що при кутах візування відмінних від нуля, швидкість точки спостереження дорівнює швидкості руху точки в надирі, але при збільшенні кутів візування збільшується і проекція пікселів, що призводить до зменшення швидкості переміщення зображення. Відповідно, швидкість точки спостереження для безпілотних і авіаційних ТСС визначається швидкістю самого ЛА, а космічних ТСС – за рахунок сили тяжіння (перша космічна швидкість) по відповідній траєкторії орбіти і кутовою швидкістю обертання Землі навколо осі $\omega_3 = 15''/c$.

Швидкість точки спостереження визначається за формулою:

$$v_{n.m.}(\gamma) = R_t(\gamma) \sqrt{\frac{\mu}{R_0^3} + \omega_3^2 \cos^2(\gamma) + 2\omega_3 \cos(\gamma) \frac{\sqrt{\mu}}{k_3} R_0^2 R_3^{-\frac{7}{2}}}, \quad (1)$$

$$R_t(\gamma) = \sqrt{R_{min}^2 \sin^2(\gamma) + R_{max}^2 \cos^2(\gamma)},$$

де $\mu = 398602 \text{ км}^3/c^2$ – гравітаційний параметр Землі; $R_{min} = 6356,777 \text{ км}$ і $R_{max} = 6378,160 \text{ км}$ – радіуси Землі біля полюсів і екватору відповідно; γ – географічна широта Землі, на якій знаходиться ЛА.

Коли ТСС на ЛА відхиляється за кутами візування, то форма проекції пікселя перетворюється в нахилений несиметричний дельтоїд (рис. 1), а як відомо, величина зміщення зображення залежить від форми проекції пікселя і напрямку руху. Отже, для точного розрахунку переміщення зображення необхідно враховувати напрямок вектора руху точки спостереження (рис. 1):

$$\text{tg}(\varphi_{зоб}) = \frac{R_0^{1.5} \omega_3 \cos(\gamma) \sin(i)}{\sqrt{\mu} - R_0^{1.5} \omega_3 \cos(\gamma) \cos(i)}. \quad (2)$$

Формули (1) і (2) визначають швидкість руху точки спостереження лише в площині предметів, а для визначення модуляційної передавальної функції (МПФ) ТСС необхідно знати швидкість переміщення зображення в площині зображень, яка залежить від висоти ЛА H , фокусної відстані оптичної системи (ОС) $f'_{об}$ та кутових координат розташування пікселя $W_{x,y}$, на якому визначатиметься швидкість переміщення зображення.

Швидкість переміщення зображення для безпілотних та авіаційних ТСС по відповідним координатам визначається як:

$$\begin{cases} v_{зоб,x} = v_{n.m.} \frac{f'_{об}}{H} \cos(\varphi_{зоб} - \varphi_c) (\cos(\theta) + \text{tg}(W_x) \sin(\theta))^2, \\ v_{зоб,y} = v_{n.m.} \frac{f'_{об}}{H} \cos(\varphi_{зоб} - \varphi_r) (\cos(\phi) + \text{tg}(W_y) \sin(\phi))^2. \end{cases} \quad (3)$$

де θ , ϕ – кути відхилення по тангажу і крену відповідно; $\varphi_{зоб}$ – кут зміщення зображення відносно напрямку польоту ЛА, тобто напрямку руху зображення; φ_r , φ_c – кути нахилу проєкцій рядків і колонок пікселів МПВ відносно напрямку польоту ЛА (вздовж осі Ox рис. 1); H – висота ЛА.

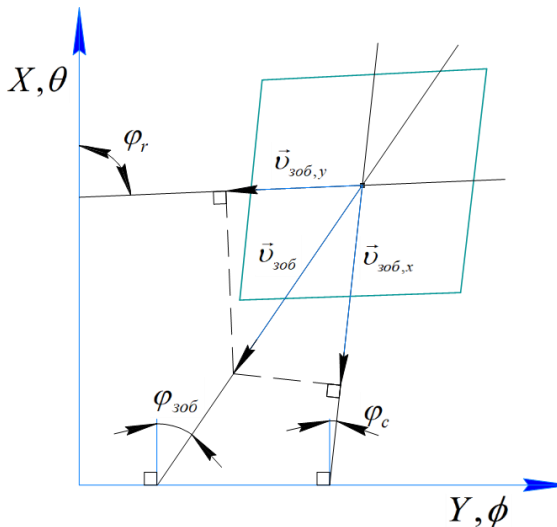


Рис. 1. Деформована проєкція пікселя на ЗП, кути векторів руху зображення та кути відхилення за кутами візування

маємо $\alpha = 44,719^\circ$ і кут додаткового відхилення становить $\gamma' = 6,3^\circ$, що, в свою чергу, суттєво впливає на розміри та форму проєкції пікселів, коректне визначення просторового розділення і швидкість переміщення зображення. Графік на рис. 3 відображає залежність лінійної швидкості переміщення точки спостереження або зображення від кута візування, при її сталій кутовій швидкості переміщення, тобто, якщо необхідно супроводжувати ціль так щоб вона залишалася в центрі екрану, то кутову швидкість довороту при $\theta = \pm 35^\circ$ необхідно зменшити в $\approx 1,5$ рази по відношенню до швидкості в надирі, що, в свою чергу, суттєво впливає розмиття зображення.

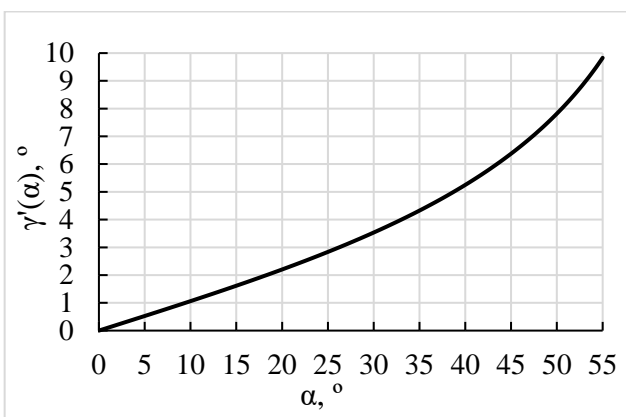


Рис. 2. Додаткове відхилення для космічного ЛА, яке враховує його висоту і кривизну Землі, яка залежить від координат розташування ЛА

Аналізуючи співвідношення між розміром Землі і приблизною величиною необхідного просторового розрізнення ТСС, маємо, що вплив зміни кривизни Землі в полі огляну настільки незначний і він практично не впливає на результат. Також, згідно із сучасними вимогами, максимальний нахил космічного ЛА за кутами візування для тангажа і крена становлять до $\pm 45^\circ$ (зазвичай $\pm 35^\circ$) і поле зору невелике, то запропоновано в точці спостереження ПЗ апроксимувати нахиленою площиною відносно площини в надирі з перерахунком кутів візування і висоти.

Аналіз рис. 2, при $H = 668$ км, $R_k = R_z$ і кутах візування тангажа і крена по $\pm 35^\circ$,

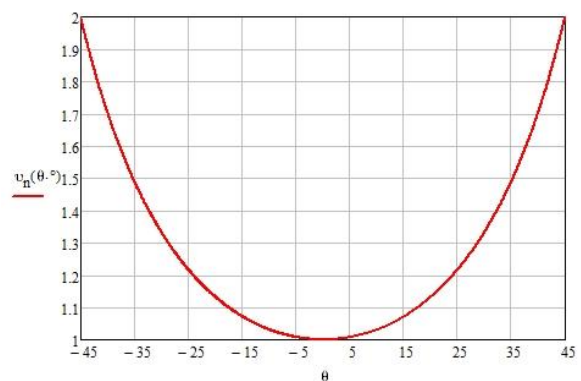


Рис. 3. Нормована лінійна швидкість точки спостереження при сталій кутовій швидкості повороту ТСС залежно від кута візування θ [$^\circ$] ($\phi = 0^\circ$)

Кожен тип МПВ для ТСС, при практично однакових періодах пікселів, має свою постійну часу, причому, в теплових вона на декілька порядків більша ніж в фотонних, тому отримані формули відіграють важливу роль, як в узгодженні частоти зчитування з швидкістю переміщення зображення і визначення величини кутового довороту, для зменшення розмиття зображення, так і в оцінці якості ТСС за запропонованою ФММ.

Серед МПВ важливо окремо виділити матриці КРТ з технологією зчитування TDI, для яких в силу специфіки їх роботи важливим параметром, який впливає на якість зображення є кут нахилу проекції колонок φ_c . Кути нахилу проекцій рядків і колонок залежно від конструкції (порядку відхилення) розраховуються як (в даному випадку при послідовності відхилення «крен-тангаж») (рис. 1 і рис. 4):

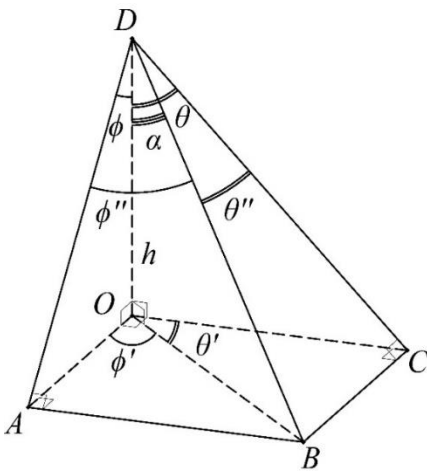


Рис. 4. Схема візування ТСС (точка D) поверхні Землі OABC з висоти OD

$$\begin{cases} \operatorname{tg}\left(\varphi_r - \frac{\pi}{2}\right) = \operatorname{tg}(W_x + \phi'') \sin(\phi), \\ \operatorname{tg}(\varphi_c) = \frac{\sin(\phi'') \operatorname{tg}(W_y)}{\cos(\phi) - \sin(\phi) \cos(\phi'') \operatorname{tg}(W_y)}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(\theta'') = \operatorname{tg}(\phi) \cos(\theta), \\ \operatorname{tg}(\phi'') = \operatorname{tg}(\theta) \cos(\phi). \end{cases}$$

де θ'' , ϕ'' – допоміжні кути (рис. 4).

Значення φ_c визначає величину поперечного розмиття зображення при паралельному перенесенні зарядів по рядках. Результати досліджень показали, що при розробці ТСС на матрицях КРТ з TDI, необхідно враховувати баланс між величиною вихідного сигналу і величиною розмиття, тобто, якщо збільшувати кількість регістрів зчитування в колонці МПВ, то збільшується відношення сигнал/шум (SNR), але при цьому збільшується і розмиття, що призводить до зменшення контрасту, а значення розмиття збільшується при збільшенні кута відхилення від надіру і збільшенні швидкості переміщення зображення.

Отримані аналітичні вирази в (4) дозволяють не лише визначити значення векторів швидкості переміщення зображення та кількісно оцінити розмиття зображення, але й застосувати їх для визначення положення транспортного засобу, в тому числі ЛА, відносно дорожньої розмітки в формі сітки.

Приведені аналітичні вирази (3) дозволяють оцінити лише швидкість переміщення зображення у відповідній точці фокальної площини, але їх недостатньо для обчислення швидкості переміщення уже сприйнятого сигналу в цифровій системі піксельної розмірності. Тобто, коли довжина вимірюється не в метрах а в пікселях (наприклад, є велика кількість моніторів з різними періодами пікселів) то для одного і того ж цифрового відео, кожен монітор відобразить різну лінійну швидкість переміщення (припускаємо, що масштабування не відбувається), а в системі піксельної розмірності швидкість залишається

однаковою. Отже, особливість, яка вносить погіршення в якість зображення, полягає в тому, що при відхиленні від надиру проекції пікселів МПВ деформуються так, що форми і розміри між крайніми пікселями відрізняються. Припустивши, що відмінність між швидкостями руху точок спостереження кожного пікселя настільки мала, що нею можна знехтувати, то в силу того, що проекції пікселів мають різні розміри, то в результаті отримаємо різну швидкість переміщення сигналу в піксельній розмірності. Для вирішення задачі правильного опису переміщення цифрового сигналу та опису фізики деформації проекції пікселів, розроблено «методику кутового руху» і алгоритм розрахунку проекції пікселів на ЗП та просторового розрізнення в основу яких покладені наступні формули:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(\phi_2) = \operatorname{tg}\left(\phi + \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}(W_y)\cos(W_x)}{\cos(W_x + \phi'')}\right)\right), \\ \operatorname{tg}(\theta_2) = \operatorname{tg}(W_x + \phi'')\frac{\cos(\phi_2 - \phi)}{\cos(\phi_2)}, \end{cases} \quad (5)$$

де θ_2, ϕ_2 – кінцеві кутові координати положення точки спостереження в площині предметів, яка задана в кутових координатах $W_{x,y}$ в площині МПВ, після відхилення ТСС по тангажу і крену.

Аналітичні вирази (5) дозволяють з достатньою точністю розрахувати результат форми деформації проекції пікселів (лінійні розміри), та знаючи швидкість переміщення точки спостереження (1) в заданому напрямку (2) дають можливість визначити швидкість переміщення зображення по поверхні пікселів до моменту його поглинання чутливою площадкою. Беручи до уваги МПВ КРТ з TDI, які мають різні частоти зчитування для різних МПВ, маємо, що результат відмінності між швидкістю переміщення сигналу по поверхні пікселів і швидкістю послідовного перенесення сигналу по регістрах з його інтегруванням/накопиченням визначає величину розмиття, тобто погіршення зображення за рахунок неспівпадання попередньо сканованої області ЗП при скануванні її наступним пікселем/регістром. На основі описаної проблеми і була сформульована та вирішена задача узгодження частоти приймача із швидкістю руху точки спостереження. Окрім цього, формули (5) використовуються для розрахунку просторового розрізнення, та можуть використовуватися для виконання завдання геодезичної та координатної прив'язки, що вимагається для 1-го рівня цифрової обробки матеріалів зйомки.

Переваги формул (5) над можливими іншими рішеннями за допомогою афінних перетворень, кватерніонів і методиці фотограмметричної обробки знімків в тому, що у (5) немає розрідженості даних, не потрібно використовувати розв'язок диференціальних рівнянь, матриці, комплексні числа, 4-й простір, перехід між системами координат, обертання простору тощо.

Третій розділ присвячено удосконаленню і доповненню ФММ системи «об'єкт – ТСС – оператор», яка описує процес перетворення ІЧ випромінювання від ЗП до тепловізора (оператора) при різних умовах спостереження.

Дослідження попереднього розділу, в загальному, присвячені визначенню абсолютної/відносної величини відхилення параметрів системи чи зміщення зображення. Отримані результати покладені в основу ФММ, за допомогою якої визначають ефективність ТСС, залежності між параметрами і характеристиками та величину їх впливу на результуючу якість зображення.

В більшості наукової літератури, МПФ системи визначається лише двома складовими: МПФ об'єктива і МПВ, що не є достатнім для ТСС на ЛА, так як суттєвий вплив на якість зображення вносять додаткові фактори (наприклад, динаміку руху, вібрації, відхилення від надиру, нестабільність висоти, обертання Землі тощо), які необхідно враховувати на етапі проектування приладу.

Кожна складова ТСС описується окремою МПФ, обумовленою умовами експлуатації приладу, та вносить свій вклад в результуючу МПФ всього тракту. Відповідно, враховуючи вище приведені результати, було удосконалено ФММ ТСС, тобто адаптовано під умови зйомки для ЛА при відхиленні від надиру.

Результуюча МПФ ТСС для безпілотних і авіаційних ЛА дорівнює:

- в напрямку польоту:

$$MTF_{\Sigma x}(v_x) = MTF_{atm}(v_x) MTF_{ob}(v_x) MTF_D(v_x) \times \\ \times MTF_{ph}(v_x) MTF_{vib}(v_x) MTF_{zm}(v_x) MTF_h(v_x)$$

- поперек польоту:

$$MTF_{\Sigma y}(v_y) = MTF_{atm}(v_y) MTF_{ob}(v_y) MTF_D(v_y) \times \\ \times MTF_{ph}(v_y) MTF_{vib}(v_y) MTF_{zm}(v_y)$$

Результуюча МПФ ТСС для космічних ЛА дорівнює:

- в напрямку польоту:

$$MTF_{\Sigma x}(v_x) = MTF_{atm}(v_x) MTF_{ob}(v_x) MTF_D(v_x) MTF_{ph}(v_x) \times \\ \times MTF_{vib}(v_x) MTF_{zm}(v_x) MTF_{\omega}(v_x) MTF_h(v_x)$$

- поперек польоту:

$$MTF_{\Sigma y}(v_y) = MTF_{atm}(v_y) MTF_{ob}(v_y) MTF_D(v_y) \times \\ \times MTF_{ph}(v_y) MTF_{vib}(v_y) MTF_{\omega}(v_y) MTF_E(v_y)$$

де $v_{x,y}$ – просторова частота по відповідній осі декартових координат; MTF_{atm} – МПФ атмосфери; MTF_{ob} – МПФ об'єктива; MTF_D – МПФ МПВ (детектора); MTF_{ph} – МПФ за рахунок фазового розташування зображення об'єкта на МПВ; MTF_{vib} – МПФ за рахунок вібрацій ЛА; MTF_{zm} – МПФ за рахунок зміщення зображення за час експозиції МПВ; MTF_{ω} – МПФ за рахунок нестабільності положення осі космічного ЛА; MTF_h – МПФ за рахунок нестабільності висоти ЛА; MTF_E – МПФ за рахунок обертання Землі.

ЛА під час польоту має практично постійну швидкість $v_{n.m.}$, тому за час інтегрування відбувається зміщення зображення в фокальній площині. Відповідно МПФ за рахунок зміщення зображення за час експозиції МПВ розраховується як:

$$MTF_{zm}(v_x) = |\text{sinc}(v_x \cdot \Delta X_{zm})|.$$

Зміщення зображення для приймачів КРТ з TDI в площині МПВ:

$$\Delta X_{zm} = V_D k_{es} t_{str} v_{n.m.} \frac{(N_{TDI} - 1)}{L_{TDI}} \cos(\varphi_{зоб}),$$

де t_{str} – час формування рядка; k_{es} – коефіцієнт відношення часу експозиції t_E до часу t_{str} (зазвичай $0,9 \dots 1$); L_{TDI} – проекція відстані на напрямок польоту між центрами першого і останнього регістра TDI відповідної колонки; N_{TDI} – кількість регістрів TDI в колонці.

Зміщення зображення для звичайних МПВ:

$$\Delta X_{zm} = t_D v_{зоб,x}.$$

де t_D – час інтегрування.

На основі аналізу впливу зміни висоти ЛА за рахунок специфіки ЗП, запропоновано варіант того, щоб розглядати космічний ЛА на заданій широті γ , із заданою траєкторією польоту, тобто розташування космічного ЛА в деякій точці, а ΔH інтерпретувати як можливу зміну висоти за рахунок ландшафту, при цьому буде враховуватися квазігеоїдність форми Землі. Відповідно МПФ за рахунок нестабільності висоти ЛА розраховується як:

$$MTF_h(v_x) = \left| \cos(2\pi v_x \cdot \Delta S_{зоб,x}^{\parallel}) \right|.$$

Середнє зміщення зображення в площині МПВ відносно центра пікселя для матриць КРТ з TDI:

$$\Delta S_{зоб}^{\parallel} = 0,5 \cdot t_{str} N_{TDI} \cdot \Delta v_{зоб}.$$

Зміщення зображення в площині МПВ відносно центра пікселя для фокальних матриць:

$$\Delta S_{зоб}^{\parallel} = t_D \cdot \Delta v_{зоб}.$$

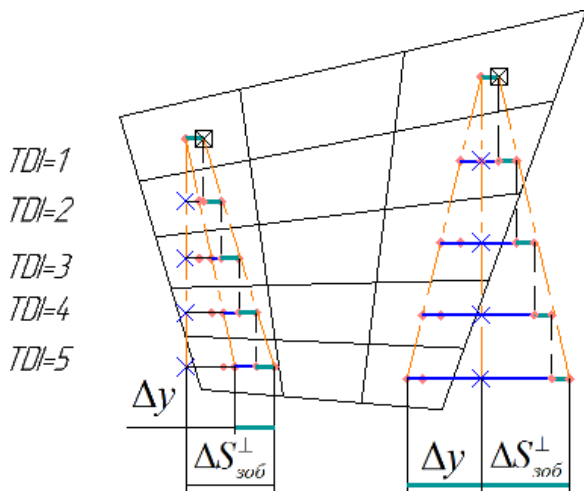


Рис. 5. Зміщення зображення за рахунок обертання Землі і польоту космічного ЛА по висхідній траєкторії орбіти

Земля обертається із круговою швидкістю ω_3 , що в свою чергу призводить до зміщення зображення поперек напрямку польоту, що необхідно враховувати лише для космічних ТСС. Для матриць КРТ з TDI, додатково необхідно врахувати і відхилення колонок, що може як компенсувати зміщення, так і збільшувати його для кожної колонки по різному в залежності від того на скільки великий кут нахилу космічного ЛА від надиру (рис. 5).

Відповідно МПФ за рахунок нестабільності висоти космічного ЛА розраховується як:

$$MTF_E(v_y) = \left| \text{sinc}(v_y (\Delta y - \Delta S_{зоб}^{\perp})) \right|.$$

Різниця координат між центрами першого і останнього TDI при проєціюванні на напрямок перпендикулярний польоту:

$$\Delta y = L_{TDI} \text{tg}(\varphi_c).$$

Зміщення зображення за рахунок обертання Землі для КРТ з TDI :

$$\Delta S_{зоб}^{\perp} = t_{str} (N_{TDI} - 1) v_{зоб} \cdot \sin(\varphi_{зоб}).$$

Зміщення зображення відносно центра пікселя для фокальних матриць:

$$\Delta S_{зоб}^{\perp} = t_D v_{зоб,y}.$$

Величина впливу на МПФ за рахунок зйомки із змінними кутами, яка враховується в формулах MTF_{zm} або MTF_E , визначається зміщенням зображення за рахунок примусового довороту по крену для КРТ з TDI дорівнює:

$$\Delta Y_{\phi} = f'_{ob} \left(\operatorname{tg}(W_y + t_{str} \omega_{\phi} N_{TDI}) - \operatorname{tg}(W_y) \right).$$

Зміщення за рахунок примусового довороту по крену для фокальних МПВ:

$$\Delta Y_{\phi} = f'_{ob} \left(\operatorname{tg}(W_y + t_D \omega_{\phi}) - \operatorname{tg}(W_y) \right),$$

де ω_{ϕ} – кутова швидкість довороту по крену.

ЛРМ характеризує здатність ТСС виявляти і розпізнавати об'єкти певних розмірів, які знаходяться на ЗП, і розраховується як:

$$LRM_x = \frac{v_N}{v_{nop,x}} L_{\theta}, \quad v_{nop,x} = MTF_{\Sigma x}^{-1} \left(\frac{C_{nop}}{C_o} \right),$$

де v_N – просторова частота Найквіста; $MTF^{-1}(x)$ – обернена функція сумарної МПФ; C_o – контраст об'єкта відносно фону; C_{nop} – пороговий контраст.

Розроблений алгоритм розрахунку просторового розділення $L_{\theta,\phi}$ на базується на формулах (5) та враховує аналітичний вираз визначення проекції миттєвого поля зору відповідного пікселя на одну із координатних осей:

$$\operatorname{ctg}(\omega_x) = \frac{f'_{ob}}{v_D \cdot \cos^2(W_x)} - \frac{v_D}{4f'_o}.$$

Використовуючи $W_{x,y}$ і аналітичні вирази (5), можна розрахувати лише розташування проекції точки центра пікселя на ЗП, а для визначення крайніх проекцій точок пікселя необхідно додавати/віднімати частину миттєвого поля зору, яке утворюється відповідним пікселем. Оскільки, частини миттєвого поля зору, умовно поділені центром пікселя і мають різні значення, то кутова різниця між цими частинами розраховується за:

$$\Delta \omega_x = \operatorname{sign}(W_x) \arccos \left(\frac{v_D}{2f'_{ob}} \cos^2(W_x) \sin(\omega_x) + \cos(\omega_x) \right),$$

де $\operatorname{sign}(x)$ – функція визначення знака числа, яка приймає значення -1 , 0 і $+1$ при $x < 0$, $x = 0$ і $x > 0$ відповідно.

На основі отриманих результатів було визначено можливі шляхи покращення технічних характеристик основних блоків системи, які беруть участь в формуванні і перетворенні інформації, покращення ЛРМ та підвищення ефективності ТСС.

Четвертий розділ присвячено розробці нових та вдосконаленню існуючих методів підвищення просторового і енергетичного розділення зображення за рахунок узгодження компонентів і параметрів ТСС та аналізу їх ефективності

при різних умовах зйомки використовуючи отримані фізико-математичні моделі в попередніх розділах.

Аналіз існуючих методів підвищення просторового розділення (обернена лінійна величина) показує, що якість зображення в значній мірі залежить від схеми розташування МПВ/пікселів. Узагальнивши ці методи, можна зробити висновок, що збільшуючи просторове розділення або частоту зйомки зменшується енергетичний потік, тобто зменшується контраст зображення. Відповідно постає задача в розробці таких методів підвищення якості зображення, при яких покращення однієї характеристики мало мінімальний вплив на погіршення іншої.

На відміну від звичайних наземних тепловізорів, які працюють в практично статичному режимі, суттєвий вплив на якість ТСС вносить розмиття зображення, спричинене динамікою руху ЛА. Відповідно, було запропоновано метод узгодження швидкості переміщення зображення в фокальній площині із частотою зйомки МПВ.

Розмиття зображення, в першу чергу, залежить від робочої висоти, швидкості ЛА і періоду пікселів, тобто льотних характеристик ЛА, що можуть обмежувати МПФ і максимальну просторову частоту, яка задається МПВ. В результаті, було запропоновано критерій визначення мінімального просторового розділення, який враховує динаміку руху. Дослідження показали, що найбільша швидкість переміщення зображення при зйомці без додаткових кутових доворотів фіксується в надирі, а отже має місце максимальне розмиття і на основі цього сформульований критерій:

$$L_0 \geq t_D v_{n.m.} \cos(\varphi_{зоб}). \quad (6)$$

Формула (6) говорить про те, що в силу того, що система є динамічною, досягти кращого просторового розділення неможливо навіть при високоякісних об'єктиву і МПВ, що досягається для статичних систем, розділення яких визначається за формулою:

$$L_0 = V_D \frac{H}{f'_{об}}. \quad (7)$$

На основі (6) була отримана формула для проектування системи, яка визначає максимально допустиму фокусну відстань об'єктива:

$$f'_{об} \leq \frac{V_D H}{t_D v_{n.m.} \cos(\varphi_{зоб})}. \quad (8)$$

Аналізуючи формули (7) і (8) можна помітити, що за рахунок кращої швидкої фотонних МПВ отримується суттєво краще просторове розрізнення при практично таких же періодах пікселів, але щоб забезпечити таке розрізнення необхідні дуже великі фокусні відстані об'єктивів. Порівнюючи фотонні і теплові МПВ можна зробити висновок, що фотонні МПВ обмежуються лише параметрами ОС (наприклад, фокусною відстанню) (7), які технологічно нереально досягти, а теплові МПВ (наприклад, мікроболометричні матриці) за рахунок гіршої швидкодії більше ніж на порядок в порівнянні із фотонними – обмежуються критерієм (6).

Дослідження зміни швидкості переміщення зображення залежно від величини кутів відхилення від надиру із врахуванням критерію (6), показали, що при відхиленні ця нерівність не порушується, а зміщення (розмиття) зменшується призводячи до покращення контрасту зображення збільшуючи ЛРМ, але вслід за цим, при відхиленні від надиру збільшується просторове розрізнення L_θ і зменшується коефіцієнт пропускання атмосфери, що призводить до погіршення ЛРМ.

Окрім того, що на погіршення якості зображення впливає: розмиття спричинене рухом ЛА; технічні обмеження в можливостях виготовлення компонентів дуже високої якості; недостатній діапазон і крок зміни частот приймача для узгодження його зі швидкістю переміщення зображення, тобто коли наявний «технологічний бар'єр», було запропоновано інший підхід до покращення роздільної здатності, який реалізується за допомогою постійного додаткового кутового довороту за кутами візування. Основна ідея такого підходу в тому, щоб постійно відхиляти ТСС за кутами візування так щоб точка спостереження на ЗП залишалася незмінною протягом часу t_D для звичайних МПВ або постійний доворот по тангажу для матриць КРТ з TDI, так щоб центр проекції одного пікселя на ЗП співпадав з наступним регістром в колонці після того, як відбулося по-рядкове зміщення накопиченої інформації.

Аналіз представленого підходу показує, що лінійне розділення на місцевості за рахунок зменшення розмиття і підвищення сигнал/шум покращується, але має і декілька основних недоліків пов'язаних з тим, що в ТСС повинні бути реалізовані механічні рухомі частини і для їх руху необхідна додаткова енергія.

Наступний підхід базується на попередньому за винятком того, що він дозволяє зберігати практично сталим просторове розділення у всьому полі огляду за рахунок зміни фокусної відстані об'єктива залежно від кутів нахилу. Основна ідея даного підходу полягає в тому, що при збільшенні фокусної відстані об'єктива збільшується швидкість переміщення зображення і зменшується просторове розділення, а при відхиленні із додатковим кутовим доворотом швидкість переміщення зображення зменшується, тобто застосовуючи ці дві особливості швидкість переміщення зображення компенсується, тобто залишається в допустимих межах і одночасно зменшується просторове розрізнення покращуючи якість зображення. Звертається увага також і на частоту зйомки де при збільшенні частоти збільшується максимальна допустима фокусна відстань але зменшується енергія накопиченого сигналу.

Була отримана формула для розрахунку необхідної f'_{ob} :

$$f'_{ob}(\theta) = \frac{V_D}{t_D \nu_{n.m.} \cos(\varphi_{зоб} - \varphi_c)} \frac{H^2 + 2R_k (H + R_k)(1 - \cos(\gamma'_x))}{H + (H + R_k)(1 - \cos(\gamma'_x))}.$$

На рис. 6, зображенні криві, які показують як змінюється просторове розділення в напрямку польоту на ЗП при відхиленні від надиру лише по тангажу і частоті зйомки в $f_f = 60$ Гц. Пунктирна крива показує зміну просторового розділення L_θ без зміни фокусної відстані, а суцільна – зі зміною фокусної відстані. З результатів видно, що використовуючи зміну f'_{ob} вдається досягти

покращення просторового розділення в $\approx 1,5$ рази при максимальному відхиленні від надиру. Змінюючи f'_{ob} вдається покращувати просторове розділення, але на відміну від очікуваного ідеального результату відбувається незначні погіршення через вплив деформації проекції пікселя і кривизни Землі.

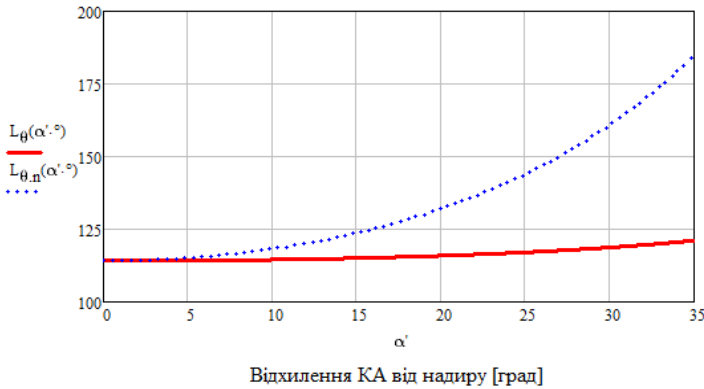


Рис. 6. Просторове розрізнення [м] в напрямку польоту при відхиленні від надиру α [°] зі зміною f'_{ob} (суцільна крива) і без зміни (пунктирна крива)

візування описується формулою:

$$SNR(\alpha) = \Delta\mu \frac{\tau_{ob}\tau_{atm}(\alpha)k_{eff}^2 \left(\frac{D_{ob}}{f'_{ob}}\right)^2 \left(\frac{M_\lambda}{\Delta M}\right) U_s}{NETD},$$

$$\cos(\alpha) = \cos(\theta'')\cos(\theta) = \cos(\phi'')\cos(\phi),$$

де α – кут відхилення візирної осі від надиру; M_λ – інтегральна світимість в заданому спектральному діапазоні; ΔM – диференціальна енергетична світність; $NETD$ – еквівалентна шуму різниця температур; τ_{ob} – коефіцієнт пропускання об'єктива ТСС; τ_{atm} – коефіцієнт пропускання атмосфери; k_{eff} – ефективне діафрагмове число; U_s – відносний сумарний сигнал, який сприйме піксель за час інтегрування t_D з врахуванням руху зображення.

Частіше, енергетику динамічних систем описують не освітленістю а експозицією, так як ця енергетична величина характеризує не лише падаюче випромінювання, а сам приймач випромінювання визначаючи кількість сприйнятої енергії. Радіометричне розділення динамічної ОС, яке є частково оберненим до SNR, можна представити як залежність від кутів візування і записати як:

$$\Delta\mu(\alpha) = \frac{4H_\lambda}{\tau_{ob}\tau_{atm}(\alpha)M_\lambda t_D U_s} \left(\frac{f'_{ob}}{D_{ob}}\right)^2, \quad (9)$$

де H_λ – інтегральна експозиція випромінювання.

Аналіз залежності радіометричного розділення (9) від кута відхилення візирної осі від надиру, для космічного ЛА, показує, що суттєвої різниці в радіометричному розділенні для різних висот немає для порівняння ОС з однаковими МПВ, а невелика різниця проявляється у використанні різних типів приймачів, де результати показують, що використання фотонного МПВ дає в

Основну характеристику, яку виокремлюють у фізичних моделях формування зображення для тепловізійних і телевізійних систем спостереження є контраст випромінювання $\Delta\epsilon$ і відбиття $\Delta\rho$ відповідно. Оскільки, в обох випадках на вхід ОС потрапляє зображення з контрастом між об'єктом і фоном, то запропоновано це узагальнити і описати однією характеристикою – контрастом сірого тіла $\Delta\mu$.

Залежність SNR від кутів

~1.4 рази краще розділення в надирі на відміну від використання теплового МПВ за рахунок кращої швидкодії і практично дають однакові результати при максимальних кутах відхилення. Аналіз радіометричного розділення за кутами візування для кожного типу МПВ показує, що для фотонних МПВ радіометричне розділення знижується в ~1.3 рази відносно надиру, а для теплових МПВ залишається практично сталим і навіть в діапазоні кутів $25^\circ - 45^\circ$ покращується за рахунок зменшення швидкості переміщення зображення при відхиленні від надиру.

У п'ятому розділі наведені результати експериментальної перевірки отриманих ФММ шляхом комп'ютерного моделювання у відомих програмних продуктах та за допомогою цифрової камери.

Ефект паралельної лінії, який описаний в даному розділі, було виявлено і підтверджено під час дослідження, що виникає при деформації проекції пікселів на ЗП (рис. 8) при відхиленні за кутами візування. За його допомогою можна визначити послідовність відхилення ТСС і підтвердити методику кутового руху системи без додаткових розрахунків нахилу кутів. Головна особливість ефекту в тому, що після відхилення за кутами візування центральна колонка або рядок, що проходить через візирну вісь, не змінює свій напрям/кут в обраній системі координат, тобто залишається паралельною одній із осей координат (рис. 7 і рис. 8). Згідно вище описаного, цей ефект можна використати для визначення положення в просторі ТСС або самого ЛА.

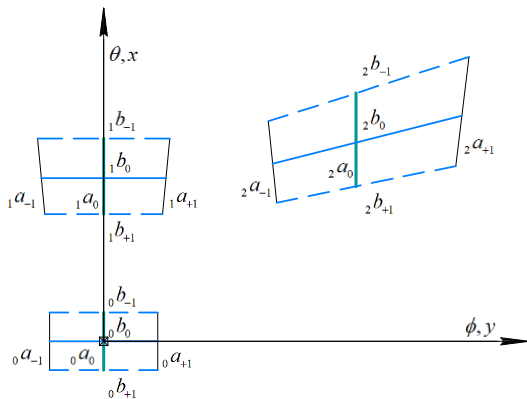


Рис. 7. Схематичне відхилення за кутами візування для колонок і рядків

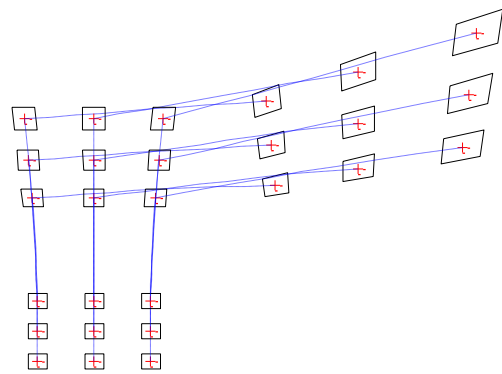


Рис. 8. Фізика деформації проекції пікселів МПВ при відхиленні за кутами візування

Підтвердження і пояснення фізики даного ефекту (рис. 8), було приведено за допомогою аналітичних виразів (4), що, в свою чергу, підтверджує правильність базових формул (5). Для розрахунку просторового розділення і лінійно розділення на місцевості, оцінки деформації і відносного порівняння проекцій крайніх пікселів між собою тощо, дисертантом власноруч був розширений і покращений програмний продукт «Scanner», який використовується на КП СПБ «Арсенал», результат одного з розрахунків в діалоговому вікні продемонстрований на рис. 9. Результат моделювання деформації (рис. 9) на основі (5) – підтверджує наявність даного ефекту.

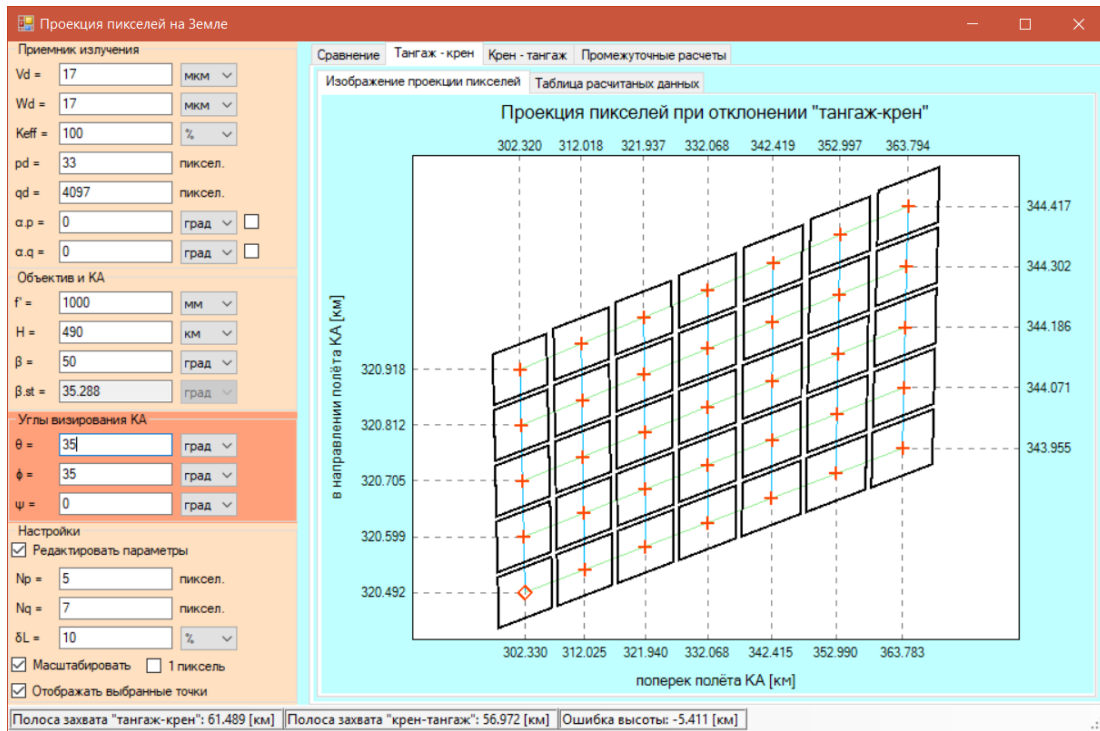


Рис. 9. Деформовані обрані з певною періодичністю пікселі МПВ на ЗП

Вихідними параметрами для рис. 9 є: ТСС встановлена на борту космічного ЛА, який знаходиться на орбіті висотою в $h = 668$ км, об'єктив має фокусну відстань $f_o = 1000$ мм; приймач випромінювання є матрицею КРТ з TDI в якій $q_D = 4097$ пікселів і $p_D = TDI = 33$ регістра, період пікселів становить $V_D \times W_D = 17 \times 17$ мкм, коефіцієнт заповнення пікселя 100%, Земна широта розташування космічного ЛА $\gamma = 50^\circ$.

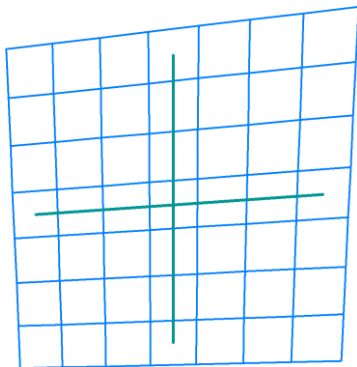


Рис. 10. Моделювання по зрізу за допомогою програми «Компас 3D»

На рис. 10 і рис. 11, відображено підтвердження теоретично отриманих результатів за допомогою моделювання в програмах «Компас 3D» і «Zemax». Дослідження точності визначення розмірів проекції пікселів, показало, що при «грубих» (умовних) значеннях (миттєвого поля зору для кожного «пікселя» $\sim 10^\circ$, фокусної відстані і висоти в 10 сантиметрів), точність формул (5) доволі висока, а максимальне відхилення для крайніх пікселів становить до $\sim 3\%$. Інші результати моделювання показали, що при збільшенні фокусної відстані, зменшенні періоду пікселів і розташуванні ближче до оптичної осі (задаючи реальні параметри), відхилення суттєво зменшується, так що його можна не враховувати.

На рис. 12 наведено фотографію, що отримана цифровою камерою, червоними стрілками і синіми прямокутниками відображено нахил «крайніх ліній» та паралельність осі «центральної лінії» за допомогою чорного прямокутника, що підтверджує отримані теоретичні результати.

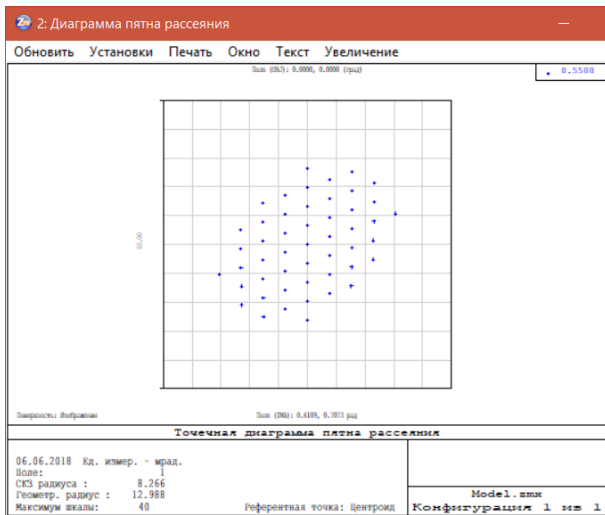


Рис. 11. Моделювання при послідовному відхиленні променів за допомогою програми «Zemax 13»

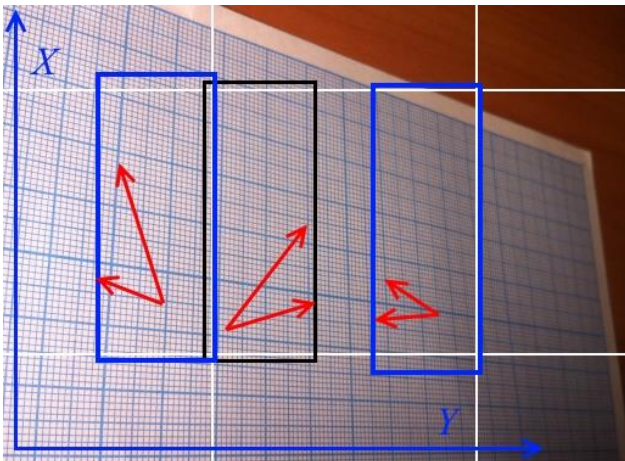


Рис. 12. Зйомка цифровою камерою міліметровки після відхилення за кутами візування

Аналіз рис. 13 показав, що за час експозиції довжина сліду точкових джерел буде пропорційною швидкості переміщення зображення, а при однаковій швидкості розмір сліду зменшується при збільшенні кута відхилення від надиру. Даний ефект вдало демонструється на вантажівці, яка має велику довжину і багато габаритних вогнів, які рухаються з однаковою швидкістю, але відносно спостерігача мають різне кутове положення.

На рис. 13, зображене діалогове вікно власноруч розробленої програми «Difdisofil», за допомогою якої проводився аналіз отриманих цифровою камерою зображень. Перевірка достовірності теоретично отриманих результатів відбувалася за умов зйомки цифровою камерою (при різних експозиційних витримках) руху потоку автомобілів над трасою в темну пору доби, де фари автомобілів є умовно точковими джерелами світла, які залишають сліди необхідні для аналізу.

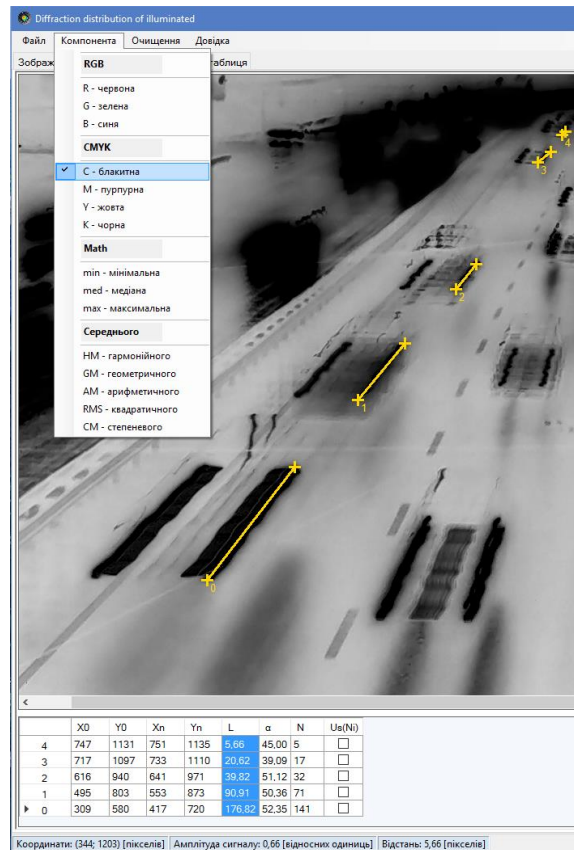


Рис. 13. Аналіз розмірів зображення (експозиція 0,5 с) слідов точкових джерел випромінювання за допомогою програми «Difdisofil»

У **додатках** приведені: уточнюючі математичні викладки; список публікацій здобувача за темою дисертації; акт впровадження результатів досліджень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена наукова задача підвищення якості зображення та ефективності безпілотних, авіаційних та космічних тепловізійних систем спостереження шляхом узгодження частоти формування рядка із швидкістю переміщення зображення, додатковим доворотом за кутами візування, зміною фокусної відстані об'єктива і узгодженням радіуса кружка розсіювання об'єктива із розмірами пікселів матричного приймача випромінювання.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані нові такі наукові результати:

1. Обґрунтовано основні вимоги до тепловізійних систем спостереження та досліджено, що якість зображення і ефективність залежать від умов зйомки, виду літального апарату, типу і принципу дії приймача випромінювання та вибраної схеми конструкції приладу, які необхідно враховувати при проектуванні.

2. Запропоновано вдосконалену фізико-математичну модель оптико-електронного тракту тепловізійної системи спостереження, яка враховує:

- вид літального апарату (безпілотний, авіаційний і космічний) і їхні льотні характеристики (висота, швидкість, напрямок, нахил);
- тип (тепловий і фотонний) і принцип дії приймача випромінювання (звичайна зйомка і зйомка в режимі TDI);
- додаткові параметри, які не враховувалися раніше: траєкторія польоту, кривизна земної поверхні в залежності від розташування космічного апарату, кути візування, напрямок польоту літального апарату, конструкція системи, яка задає послідовність відхилення за кутами візування, пікселі, які не знаходяться на оптичній осі об'єктива тощо.

Розроблено математичні моделі, які дозволять розрахувати швидкість переміщення зображення і деформацію форми проекції пікселів МПВ на земній поверхні в залежності від кутів спостереження, аналіз яких показав, що при відхиленні від надиру:

- швидкість переміщення зображення зменшується, що зменшує розміття і підвищує результуючу модуляційну передавальну функцію системи та покращує лінійне розділення на місцевості;
- просторове розділення збільшується, що в свою чергу зменшує просторову роздільну здатність і погіршує лінійне розділення на місцевості;
- збільшується відстань до області спостереження на земній поверхні, що зменшує коефіцієнт пропускання атмосфери на шляху, який проходить потік випромінювання;
- результуюче лінійне розділення на місцевості погіршується.

Запропоновано критерій, за яким оцінюється мінімально можливе просторове розділення в залежності від параметрів приймача та льотних характеристик літального апарату. Аналіз критерію показує, що:

- просторове розділення ТСС з фотонними приймачами обмежуються якістю об'єктива;

- просторове розділення ТСС з тепловими приймачами обмежуються швидкодією приймача.

Розроблені математичні моделі, для визначення додаткового куткового довороту за кутами візування, дозволяють зменшити зміщення і підвищити якість зображення для тепловізійних систем, як альтернатива для метода узгодження частоти формування рядка із швидкістю переміщення зображення;

3. Запропоновано метод підвищення просторового розрізнення, який базується на зміні фокусної відстані об'єктива в залежності від кутів візування і швидкості переміщення точки візування. Результати дослідження показали, що даний метод покращує роздільну здатність при максимальному відхиленні від надиру в 1,5 рази і дозволяє зберегти просторове розділення практично сталим у всьому полі зору.

4. Результати експериментальних досліджень отриманих за допомогою цифрової камери і моделювання у програмних продуктах, підтверджують розроблену фізико-математичну модель деформації форми проєкції пікселів матричного приймача випромінювання на земній поверхні та отриманий вираз, який враховує динаміку руху зображення у фокальній площині об'єктива.

5. Отримані результати було впроваджено на КП СПБ «Арсенал» при розробці програми «Scanner», яка використовується для проектування та оцінки якості і ефективності космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пінчук Б. Ю. Методи визначення просторової роздільної здатності медичного тепловізора / А. М. Аль-Мзіраві, М. С. Колобродов, Б. Ю. Пінчук. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2014. – №47. – С. 149–156.

Здобувачем досліджено два критерії узгодження модуляційної передавальної функції об'єктива і матричного приймача випромінювання медичного тепловізора та їх вплив на якість отриманого зображення.

2. Пінчук Б. Ю. Визначення оптимального нормованого радіуса розсіювання об'єктива тепловізора / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук. // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Приладобудування. – 2015. – №49(1). – С. 101–108.

Здобувачем розглянуто отримання оптимального нормованого радіуса кружка розсіювання для узгодження тепловізійної системи.

3. Пінчук Б. Ю. Взаємозв'язок функцій розсіювання точки абераційного і дифракційно обмеженого об'єктивів матричних тепловізорів / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – №5(109). – С. 92–98, doi: 10.20535/1810-0546.2016.5.72034.

Здобувачем отримано аналітичний вираз, який узагальнює відомі апроксимації функції розсіювання точки та встановлено взаємозв'язок між радіусами кружків розсіювання дифракційно обмеженого об'єктива і об'єктива обмеженого абераціями.

4. Пінчук Б. Ю. Просторове розділення системи дистанційного зондування при зміні кута візування / В. Г. Колобродов, В.М. Тягур, Б. Ю. Пінчук, // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2018. – №1. – С. 54–64, doi: 10.20535/1810-0546.2018.1.111880.

Здобувачем розроблена методика і отримано аналітичні вирази для розрахунку деформації проєкції пікселів при відхиленні від надиру.

5. Пінчук Б. Ю. Вплив кутів візування та кривизни поверхні Землі на просторове розділення космічної оптико-електронної системи спостереження / В. Г. Колобродов, В.М. Тягур, Б. Ю. Пінчук, // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2018. – №5. – С. 63-75, doi: 10.20535/1810-0546.2018.5.140106.

Здобувачем розроблена фізико-математична модель, яка дозволяє врахувати і оцінити вплив кривизни Землі на лінійне розділення на місцевості та отримані аналітичні вирази визначення кутів нахилу колонок і рядків відносно напрямку польоту залежно від кутів візування.

6. Пінчук Б. Ю. Модуляційна передавальна функція системи дистанційного зондування при відхиленні осі візування від надиру / В. Г. Колобродов, В.М. Тягур, Б. Ю. Пінчук, // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2018. – №6. – С. 66-80, doi: 10.20535/1810-0546.2018.6.149681.

Здобувачем вдосконалена і розширена фізико-математична модель розрахунку модуляційної передавальної функції системи дистанційного зондування Землі при відхиленні від надиру.

7. Пінчук Б. Ю. Комп'ютерно-інтегрований метод виявлення об'єктів поляризаційним тепловізором / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, В. М. Тягур, Б. Ю. Пінчук, Б. В. Сокол // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2021. – 27, №85.– С. 21-26, doi: 10.20535/RADAR.2021.85.21-26. **(Видання індексується в наукометричних базах Web of Science).**

Здобувачем досліджена спрощена фізико-математична модель перетворення і аналізу інфрачервоного випромінювання фоно-цільової обстановки різного ступеня поляризації в тепловізійних системах спостереження.

8. Пінчук Б. Ю. Спотворення зображення в системах дистанційного зондування Землі при довільних кутах візування / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт, В. М. Тягур, Б. Ю. Пінчук, М.М. Луцюк, // Космічна наука і технологія. – 2021. – 27, №3. (130) – С. 51-65, doi: 10.15407/knit2021.03.051. **(Видання індексується в наукометричних базах Web of Science).**

Здобувачем вдосконалена фізико-математична модель розрахунку модуляційної передавальної функції системи при відхиленні від надиру та досліджена залежність радіометричного розділення від кутів візування із врахуванням пропускання атмосфери.

9. Пінчук Б. Ю. Тепловізійний приціл / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // VI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (23-24 квітня 2013 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 48.

Здобувачем проведено аналіз сучасного стану і перспектив розвитку тепловізійних прицілів, вказано переваги і недоліки, які необхідно враховувати при проектуванні.

10. Пінчук Б. Ю. Узгодження МПФ компонентів медичного тепловізора / А. М. Аль-Мзіраві, М. С. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // VII науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (23-24 квітня 2014 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2014. – С. 50.

Здобувачем проведено аналіз впливу радіуса кружка розсіювання об'єктива і періоду матричного приймача випромінювання на модуляційну передавальну функцію медичного тепловізора.

11. Пінчук Б. Ю. Визначення нормованого радіуса кружка розсіювання об'єктива тепловізора / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // VIII науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (22-24 квітня 2015 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 50.

Здобувачем проведено порівняльний аналіз узгодження розмірів кружків розсіювання дифракційно обмеженого об'єктива і об'єктива обмеженого абераціями з матричним приймачем випромінювання.

12. Пинчук Б. Ю. Нормированный радиус кружка рассеивания объектива тепловизора / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пинчук // Новые направления развития приборостроения. Материалы 8-й Международной студенческой научно-технической конференции. Сборник тезисов докладов / БНТУ, Приборостроительный факультет. – Минск, 2015. – С.217.

Здобувачем досліджено узгодження розмірів кружків розсіювання дифракційно обмеженого об'єктива і об'єктива обмеженого абераціями з матричним приймачем випромінювання.

13. Пінчук Б. Ю. Визначення МДР тепловізора з абераційним об'єктивом / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // IX науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (17-18 квітня 2016 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2016. – С. 42.

Здобувачем досліджено залежність максимальної дальності розпізнавання від ймовірності розпізнавання, розміру тест-об'єкта та кутового розміру кружка розсіювання об'єктива з абераціями.

14. Пінчук Б. Ю. Визначення нормованого радіуса кружка розсіювання тепловізора за допомогою програмного моделювання / В. Г. Колобродов, В. М. Тягур, Б. Ю. Пінчук // 2-га Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи»: (6-7 грудня 2016 р.). Збірник тез доповідей / КП СІБ «Арсенал». – Київ, 2016. – С.81.

Здобувачем запропоновано отримання оптимального нормованого кружка розсіювання цифрового тепловізора для узгодження системи використовуючи програмне моделювання процесу формування сигналу.

15. Пінчук Б. Ю. Зависимость характеристик тепловизионных систем наблюдения летательных аппаратов от угла визирования / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // Новые направления развития приборостроения. Материалы 10-й Международной студенческой научно-технической конференции. Сборник тезисов докладов / БНТУ, Приборостроительный факультет. – Минск, 2017. – С.55.

Здобувачем обґрунтовано розробку фізико-математичної моделі тепловізійної системи спостереження, яка враховує умови зйомки земної поверхні при відхиленні від надиру.

16. Пінчук Б. Ю. Вплив кутів візування тепловізійних систем спостереження літальних апаратів на якість отриманого зображення / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (16-17 травня 2017 р.). Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2017. – С. 40.

Здобувачем проаналізовано вплив відхилення тепловізійної системи спостереження на просторову і енергетичну роздільну здатність.

17. Pinchuk B. Y. Physical and mathematical model to determine the spatial resolution at different angles of sighting by thermal infrared systems for Earth remote sensing / V. G. Kolobrodov, B. Y. Pinchuk // 18th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science «SPO 2017» (26-29 October, 2017). Scientific Works / DP-14. – Kyiv, 2017. – 226-228 pp.

Здобувачем досліджено процес деформації форми проекції пікселів матричного приймача випромінювання на земній поверхні та зроблені порівняння просторового розділення в надирі і при відхиленні від надиру.

18. Пінчук Б. Ю. Вплив кутів візування тепловізійних та телевізійних космічних систем спостереження на лінійне розділення на місцевості / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (15-16 травня 2018 р.). Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2018. – С. 54.

Здобувачем проаналізовано вплив кутів візування тепловізійних і телевізійних космічних систем спостереження на лінійне розділення на місцевості.

19. Пінчук Б. Ю. Оцінка ефективності тепловізійних та телевізійних космічних систем спостереження / В. Г. Колобродов, В. М. Тягур, Б. Ю. Пінчук // 3-тя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи»: (4-5 грудня 2018 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». – Київ, 2016. – С.75.

Здобувачем проведено аналіз розробленої фізико-математичної моделі для визначення ефективності космічних тепловізійних і телевізійних систем

спостереження та запропоновано використовувати додатковий доворот за ризиком для зменшення розмиття для приймачів із технологією TDI.

20. Pinchuk B. Y. Influence of the aberrations of Fourier-lens on the resolution of the digital optical processor/ V. G. Kolobrodov, H. S. Tymchyk, M. S. Kolobrodov, B. Y. Pinchuk, et al., // Proc. SPIE Vol. 11045, Optical Fibers and Their Applications. – 2018. – pp. 110450U-1 – 110450U-5, doi: 10.1117/12.2522310.

Здобувачем досліджена фізико-математична модель цифрового когерентного оптичного аналізатора.

21. Пінчук Б. Ю. Вплив кутів візування тепловізійних та телевізійних космічних систем спостереження на радіометричне розділення / В. Г. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // XX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (18-19 травня 2021 р.). Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2021. – С. 32.

Здобувачем проаналізовано вплив кутів візування тепловізійних і телевізійних космічних систем спостереження на радіометричне розділення з врахуванням пропускання атмосфери.

АНОТАЦІЯ

Пінчук Б. Ю. Тепловізійні системи спостереження безпілотних авіаційних та космічних приладів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.07 «Оптичні прилади та системи». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової задачі підвищення якості зображення та ефективності безпілотних, авіаційних та космічних тепловізійних систем спостереження шляхом узгодження параметрів і характеристик системи, зміни фокусної відстані об'єктива та додатковим доворотом за кутами візування.

Розроблено метод розрахунку просторового розрізнення тепловізійної системи спостереження, який полягає у врахуванні впливу відхилення візирної осі від надиру на деформацію проекції пікселів та дозволяє більш достовірно розрахувати лінійне розділення на місцевості. Удосконалено фізико-математичну модель, яка описує процес перетворення інфрачервоного випромінювання від земної поверхні до тепловізійної системи спостереження на літальному апараті, шляхом врахування впливу динаміки руху при відхиленні візирної осі від надиру, що краще і точніше характеризує якість отриманого тепловізійного зображення. Запропоновано та науково обґрунтовано нові методи підвищення просторового і енергетичного розділення, які базуються на додатковому довороті тепловізійної системи спостереження за кутами візування та зміні фокусної відстані об'єктива в залежності від кутів візування, що дозволило зменшити розмиття зображення.

Ключові слова: тепловізійна система спостереження, дистанційне зондування Землі, модуляційна передавальна функція, просторове розділення, лінійне розділення на місцевості, відхилення за кутами візування, швидкість переміщення зображення.

ABSTRACT

Pinchuk B. Yu. Thermal imaging viewing systems of unmanned aerial and space devices. – Qualification scientific work is manuscript copyright.

Thesis for a degree of the Doctor of Philosophy of technical sciences in specialty 05.11.07 “Optical devices and systems”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, MES, Kyiv, 2021.

The dissertation work is devoted to solving the scientific problem of improving the image quality and efficiency of unmanned, aviation and space thermal imaging viewing systems by matching the parameters and characteristics of the system, changing the focal length of the objective and additional rotation angles of sighting.

The first section reflects the relevance of this topic based on an overview of the areas of application and purpose of thermal imaging viewing systems (TIVS), that is analysis of the current state and prospects. The conditions in which aircraft TIVS work are considered and the modern requirements necessary to formulate the purpose and tasks of research are defined.

The directions of research of ways of improvement of technical characteristics of TIVS which are based on the analysis of dependence of quality of the thermal imaging image on arbitrary angles of sighting and accounted of dynamic of movement are substantiated.

In *the second section* processes are formalized that form the image of the moving TIVS when the deviation of the TIVS at the angles of sighting from the nadir that which will estimate the amount of blur and deformation of the projection points of the focal plane array (FPA).

A model for determining the velocity of the observation point is proposed, which allows to calculate the velocity of the image movement in the focal plane, depending on the trajectory of the orbit, coordinates and inclination of the spacecraft. A model for determining the angular velocity of the TIVS additional rotation to solve the problem of effective observation of an object over a long period of time is described. The technique of angular motion is described, which describes the physics of deformation of the projection points of the FPA on the Earth's surface (ES) during the deviation of the TIVS at the angles of sighting.

The third section is devoted to the development and improvement of a physical and mathematical model (PMM) for the study of the conversion of infrared radiation from ES to a thermal imager (operator) under different conditions of observation. In this section the basic analytical expressions and dependences are received, techniques are developed and algorithms of calculations which will be used for the analysis of quality and efficiency of TIVS are described.

PMM information transformations for TIVS aircraft are developed, which takes into account the characteristics of observation conditions, backgrounds, objects,

motion dynamics, optical system and FPA. An algorithm is presented that allows to calculate the spatial resolution and to simulate the deformation of the projection of the FPA's pixels on the plane taking into account the curvature of the Earth.

Possible ways to improve the technical characteristics of the main blocks of the system involved in the formation and transformation of information, and to improve the linear resolution on Earth's surface (LRES) are identified.

The fourth section is devoted to the development of new methods to increase the spatial resolution of the TIVS, the coordination of components and parameters of the TIVS and analysis of their effectiveness.

The dependence of the modulation transfer function (MTF) on the presented TIVS constructions is analyzed and shown. The difference between ground and aircraft TIVS, and the need to take into account the flight characteristics of the carriers during the design. The criterion which allows to estimate efficiency of TIVS taking into account flight characteristics of their carrier is offered. The proposed solution is related to the problem of shifting the mercury cadmium telluride matrices with the TDI. The need for additional rotation of the TIVS at the angle of yaw is substantiated. A model is developed for determining the required angular coordinates and angular velocities for additional rotation of the viewing angles at the appropriate time. An approach has been proposed that keeps the spatial resolution almost constant throughout the field of view by changing the focal length of the objective when it deviates from nadir. The necessity to coordinate the Airy disk radius of the with the FPA's pixel size and to coordinate the velocity of the observation point with the frequency of the FPA is substantiated. The formula is obtained for determining the effective path length for sloped routes, which takes into account the refraction of the atmosphere and is necessary to calculate the transmittance of the atmosphere. An expression is proposed that reflects the dependence of the signal-to-noise ratio (SNR) on the angles of sighting, taking into account the influence of the atmosphere.

On the basis of the developed PMM the software which allows to estimate quality of the developed thermal imaging and television systems of supervision and to synthesize new systems is created.

The fifth section focuses on the experimental verification and confirmation of the obtained PMM by computer simulation in famous software products and using a digital camera.

The effect of a parallel line, which occurs when the deformation of the projection of pixels on the ES due to the deviation of the viewing angles, and the physical principle of forming projections of conditional lines of rows and columns, which explains the manifestation of this effect. Theoretically is obtained results were confirmed by modeling in the programs "Compass 3D" and "Zemax", as well as by the results obtained on a digital camera.

Software for analysis of images obtained from a digital camera has been created.

Keywords: thermal imaging viewing system, remote sensing of the Earth, modulation transfer function, spatial resolution, linear resolution on the Earth's surface, deviations in the angles of sighting, image displacement velocity.