

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ
НАЦІОНАЛЬНОГО АВІАЦІЙНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ГОЛОВЕНСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 358.4 : 656.7

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ
ТА НАВІГАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН
У СКЛАДНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВАХ**

05.22.13 – Навігація та управління рухом

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Льотній академії Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Неділько Віталій Миколайович,
Льотна академія Національного авіаційного університету
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри інформаційних технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тимочко Олександр Іванович,
Харківський Національний університет
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
Міністерства оборони України,
професор кафедри повітряної навігації
та бойового управління авіацією

доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Центральноукраїнський національний технічний
університет Міністерства освіти та науки України,
завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів

Захист відбудеться “29” березня 2019 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 23.144.01 при Льотній академії Національного авіаційного університету за адресою:

25005, м. Кропивницький, вул. Добровольського, 1а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Льотної академії Національного авіаційного університету за адресою:

25005, м. Кропивницький, вул. Добровольського, 1а.

Автореферат розісланий “___” лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 23.144.01

Ю.Г. Ковальов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Цивільна авіація є однією з основних складових міжнародного та вітчизняного пасажирського транспорту. Для підвищення ефективності та якості її роботи необхідно розробляти системи, що забезпечують зниження посадкових мінімумів для посадки ПС та умови підвищення безпеки польотів, приймаючи до уваги те, що аналіз авіаційних пригод та інцидентів у світовій авіаційній практиці показує, що вірогідність виникнення авіаційних пригод відбувається при заході на посадку та найчастіше – при посадці повітряного судна.

Завершення етапу зниження повітряного судна (ПС), вихід на посадкову пряму та завершення посадки екіпаж ПС виконує при наявності візуального контакту зі злітно-посадковою смугою (ЗПС). Існуючі пристрої навігації забезпечують високу точність визначення координат ПС, але принципово не можуть здійснити візуальний контакт екіпажу із ЗПС. З високою якістю це може забезпечити бортова оптична система, що працює в кількох діапазонах інфрачервоних (ІЧ) електромагнітних хвиль (ЕМХ) з наступним виводом інформації на єдиний монітор візуалізації позакабінної обстановки. В умовах обмеженої видимості комплексування робочих каналів ІЧ-діапазону є важливою складовою електронного візуального польоту з наступним переходом на дійсно візуальний. В умовах великих швидкостей виявлення за допомогою оптико-електронних пристроїв світлових та променевих орієнтирів ЗПС значно раніше висоти прийняття рішення дає більше часу екіпажу для адекватної оцінки обстановки, підвищує надійність та безпеку польоту.

Згідно з теорією оцінки ефективності радіо-світлотехнічного обладнання аеродрому, у подальшому розвинуеною у роботах Зиряннова Ю.Т., Дмитрієва В.М., Бугакова В.В., Басова Ю.Г., Раквіашвілі А.Г., Сисуна В.В., ефективність прийняття рішення на успішну посадку ПС, багато у чому залежить від візуального позначення аеродрому та підходів до нього. Це завдання виконує світлосигнальна система у поєднанні з різними радіотехнічними системами навігації та посадки.

Серйозні результати, досягнуті у розвитку засобів ІЧ-випромінювання і LED-технологій, покладені в існуючі математичні моделі, що досліджують вплив домінуючих факторів на видимість світлосигнальної картини аеродрому. Крім того, значні зусилля дослідників були сконцентровані на проблемах підвищення енергоефективності світлосигнальних систем. Але вказані роботи не в повному обсязі описують процеси функціонування світлотехнічного обладнання аеродромів, особливо в несприятливих метеорологічних умовах.

Таким чином, забезпечення ефективного функціонування світлотехнічного обладнання аеродромів в несприятливих метеорологічних умовах при виконанні посадки літальними апаратами на сьогодні повністю не досягнуто. Тому розробка методу підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах шляхом обробки світлових та інфрачервоних сигналів і побудови променевосигнальної системи є актуальним науковим завданням щодо забезпечення безпеки польотів цивільної авіації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрямок досліджень тісно пов'язаний із Стратегічним планом розвитку авіаційного транспорту до 2020 року, затвердженим наказом Міністерства інфраструктури України №546 від 21.12.2015 р. Наукові дослідження виконувались відповідно до

планів наукової та науково-технічної діяльності Льотної академії Національного авіаційного університету, зокрема, в межах науково-дослідної роботи “Оптимізація та експлуатація засобів авіаційного транспорту на основі застосування методів математичного моделювання” (№ ДР 0117U000792).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення таких завдань дослідження:

1. Виконати аналіз процесів забезпечення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах.

2. Дослідити умови видимості світлових сигналів у видимому та інфрачервоному діапазонах довжин хвиль.

3. Розробити метод сумісної обробки сигналів видимого та ІЧ-діапазонів при взаємодії з атмосферою в широкому діапазоні характеристик повітряного водно-дисперсного середовища.

4. Розробити метод спостереження світлових сигналів під час супроводу повітряних суден при посадці у складних метеорологічних умовах.

5. Оцінити ефективність розроблених методів.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування світлотехнічного обладнання для навігації повітряних суден.

Предметом дослідження є методи обробки світлових та інфрачервоних сигналів і побудови променевосигнальної системи для навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах.

Методи дослідження. У ході виконання дисертаційної роботи використано методи теорії системного аналізу і надійності із застосуванням математичних моделей та методів дискретної математики; метод математичного моделювання взаємодії електромагнітного випромінювання видимого та ІЧ-діапазонів з розсіюючими частинками при проходженні через атмосферне водно-аерозольне середовище; аналітичні методи (аналогові та числові) пошуку оптимальних співвідношень між характеристиками випромінювачів, взаємодії електромагнітного випромінювання при проходженні крізь замутнену атмосферу та електронно-оптичними пристроями спостереження і реєстрації на екрані монітору в кабіні пілота; методи імітаційного моделювання взаємодії випромінювання зі штучно замутненою атмосферою.

Наукова новизна одержаних результатів дисертації полягає в такому:

1. Удосконалений метод постійного спостереження сигналів світлотехнічного обладнання злітно-посадкових смуг, яка, на відміну від відомих, базується на обробці аеродромних променевих сигналів ІЧ-діапазону додатково до незалежного оптичного каналу інформації між повітряним судном та посадковою смугою.

2. Одержав подальшого розвитку метод сумісної обробки сигналів видимого та ІЧ-діапазонів при взаємодії з атмосферою в широкому діапазоні характеристик повітряного водно-дисперсного середовища, в якому, на відміну від відомих, використовується модель “м'яких” прозорих аерозольних частинок сферичної форми.

3. Одержав подальшого розвитку метод спостереження світлових сигналів світлотехнічного обладнання злітно-посадкових смуг під час супроводу повітряних

суден при посадці у складних метеорологічних умовах, який, на відміну від відомих, базується на узгодженні спектральних характеристик джерел випромінювання з оптичними характеристиками закабінного середовища повітряного судна.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується коректною постановкою наукового завдання дослідження, відсутністю протиріч між отриманими результатами та відомими положеннями теорії системного аналізу, надійності, дискретної математики; математичного моделювання, коректним використанням відомих методів, а також задовільним збігом результатів, одержаних в дисертації, з відомими частковими результатами, експериментальними даними та результатами моделювання.

Практичне значення одержаних результатів. Реалізація запропонованого в дисертаційній роботі результатів дозволяє:

- підвищити рівень безпеки польотів та навігації літальних апаратів, передусім на етапах посадки, у складних метеорологічних умовах;
- парировати нештатну ситуацію у пілотажно-навігаційному комплексі літального апарата в складних метеорологічних умовах та збурюючих впливів внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів (у т.ч. психофізіологічне перевантаження членів екіпажу при посадці повітряного судна);
- створити умови для побудови та подальшої безпечної експлуатації променевосигнальних систем нових поколінь;
- проектувати та експлуатувати функціональні променевосигнальні системи для умов зовнішніх дестабілізуючих впливів, зокрема, складних метеорологічних умов;
- здійснювати порівняльний аналіз різних варіантів побудови комплексів світлосигнального обладнання та на основі результатів аналізу надавати обґрунтовані рекомендації щодо вибору найкращого варіанта;
- підвищувати показники надійності систем і комплексів світлосигнального обладнання до заданого рівня в умовах впливу дестабілізуючих факторів для оперативного парирования нештатної ситуації та формування відновлюючого управління.

Результати дисертаційного дослідження були реалізовані:

у методі спостереження світлових сигналів під час супроводу повітряних суден при посадці в складних метеорологічних умовах (у Кременчуцькому льотному коледжі НАУ (акт впровадження від 14.01.2019 р.);

при розробці світлодіодного прожектора з регульованою індикатрисою випромінювання (акт впровадження від 19.06.2018 р. Міністерство оборони України Військова академія (м. Одеса));

при виконанні науково-дослідної роботи “Науково-методичне обґрунтування технічної реалізації використання інфрачервоного діапазону довжин хвиль для авіаційних навігаційних систем у складних метеорологічних умовах” у Кременчуцькому льотному коледжі Національного авіаційного університету (наказ про затвердження тем науково-дослідних робіт від 25.10.2018 р. № 269).

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, що становлять основний зміст дисертаційної роботи й опубліковані у роботах [4, 5, 10, 12], одержані автором самостійно і є одноосібними. У працях, що опубліковано у співавторстві, здобувачу належить: [1] – показано перспективу подальшого поліпшення люмінесцентних

показників напівпровідникових випромінювачів; [2] – показано можливість використання хвиль ІЧ-діапазону для авіаційних навігаційних систем у складних метеорологічних умовах; [3] – показано можливість використання світлодіодних випромінювачів у світлосигнальних пристроях; [6] – здійснено оцінку ефективності ламп розжарювання і напівпровідникових діодів як джерел селективного ІЧ-випромінювання; [7] – визначені особливості виявлення світлових та ІЧ-сигналів аеродромних прожекторів; [8] – проаналізовані сучасні підсилювачі світла, камери нічного спостереження та тепловізійні системи в авіації; [9] – вивчені світлодіодні і лазерні випромінювачі та особливості їх використання у техніці; [10] – досліджені особливості спостереження інфрачервоних сигнальних вогнів посадкової смуги в умовах поганої видимості; [11] – розроблено метод використання “вікон прозорості” атмосфери для спостережень сигнальних вогнів аеродромів; [12] – проведено аналіз перспектив використання ІЧ-діапазону довжин хвиль для авіаційної навігаційної системи; [13] – розроблений світлодіодний прожектор з регульованою індикатрисою випромінювання; [14] – розроблений метод спостереження променевих сигналів під час супроводу повітряних суден при посадці в складних метеорологічних умовах;.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: VII Всеукраїнській науково-практичній конференції “Авіація та космонавтика”, Кривий Ріг, 2017 р. [13]; науково-практичній конференції Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних сил України, Київ, 30.11.2017 р. [14]; XXXVIII Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та курсантів “Авіація та космонавтика: стан, досягнення та перспективи”, Кропивницький, 12.04.2018 р. [15]; IX Всеукраїнській науково-практичній конференції “Авіація та космонавтика”, Кривий Ріг, 17.04.2018 р. [16]; I Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів “Авіація, промисловість, суспільство”, Кременчук, 27.04.2018 р. [17].

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковані в 6 статтях у виданнях, наведених у переліку ДАК України, в яких дозволяється публікувати результати щодо присудження наукових ступенів; з них: 2 статті без співавторів; 1 стаття у закордонному виданню; 2 патенти на корисну модель; 5 матеріалів науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Робота містить 183 сторінок (з них 23 сторінки додатків), 141 сторінка основного тексту, 19 рисунків, 3 таблиці, 145 найменувань використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, викладено основні практичні результати та відомості про їх впровадження, апробацію та публікації, надано інформацію про структуру роботи.

У розділі 1 доведено, що посадка є найвідповідальнішим етапом польоту, особливо у несприятливих погодних умовах. Тому існують деякі характеристики мінімуму допустимої погоди, при яких можливо посадити літак. Проведено аналіз технічних засобів навігації та посадки літальних апаратів у складних

метеорологічних умовах; комплексу засобів навігації, посадки та управління повітряним рухом для малої авіації; радіотехнічних систем ближньої навігації; радіотехнічних систем посадки; курсоглядачної лазерної системи посадки “Глісада”.

На етапах виходу ПС до району аеродрому та передпосадкового маневрування, заходу на посадку, посадки, категорійного заходу на посадку, зльоту та набору висоти зафіксовано більше третини авіаційних подій. З точки зору ефективності функціонування світлосигнальних систем ці етапи є найвідповідальнішими. Проведені дослідження існуючих підходів до проектування та побудови світлосигнальних систем показали, що вони не повною мірою забезпечують виконання сучасних вимог до безпеки польотів.

Проведений аналіз засобів світлотехнічного забезпечення на аеродромі показав, що існує протиріччя між обмеженими можливостями елементів світлотехнічного обладнання аеродромів щодо забезпечення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеоумовах, з одного боку, та вимогою своєчасності і точності надання візуальної інформації екіпажам для побудови траєкторій руху повітряних суден на етапі посадки з обмеженням на вартість комплексу для оперативного паркування нештатної ситуації в складних метеорологічних умовах, з іншого.

Розв’язання вказаного протиріччя можливе шляхом обробки світлових та інфрачервоних сигналів і побудови променевосигнальної системи для підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах.

Таким чином, розробка методу підвищення безпеки польотів та навігації ПС у складних метеорологічних умовах шляхом обробки світлових та ІЧ-сигналів і побудови променевосигнальної системи є актуальним науковим завданням.

У розділі 2 досліджені умови видимості світлових сигналів у видимому та інфрачервоному діапазонах довжин хвиль. На завершальному етапі польоту пілота необхідно швидко і правильно визначити розташування ПС в просторі відносно ЗПС. Це досягається візуальним спостереженням світлосигнальних знаків, посадкової смуги і підходів до неї, що особливо складно в умовах поганої видимості. Використання більш потужних посадкових вогнів, наприклад, при метеорологічній дальності видимості (МДВ) $S_m = 350$ м збільшення сили світла вогню з 15 000 до 30 000 кд (у 2 рази) дає збільшення дальності його видимості з 400 до 440 м (на 10%). Тобто, при поганих метеоумовах дальність видимості вогнів більшої потужності суттєво не зростає. Це пояснюється тим, що більшість світлової енергії поглинається атмосферою через її неоднорідність для проходження світла з різними довжинами хвиль.

За інших рівних умов при прозорій атмосфері або при серпанку чи тумані ІЧ-хвилі проходять через атмосферу значно краще видимого, даючи значний вииграш у дальності проникнення. Це пояснюється тим, що при малому розмірі частинок, що замутовують атмосферу, розсіювання зменшується при збільшенні довжини хвилі падаючого випромінювання. Тому, в деяких випадках можна одержати майже 20-ти кратне збільшення дальності дії порівняно з видимим світлом у певних умовах.

Збільшення дальності спостереження досягається за рахунок використання тих довжин хвиль, які найменше поглинаються атмосферою. Очевидно, що перевагу в розробці матимуть світлосигнальні пристрої і прилади спостереження, які використовують довжини хвиль, що співпадають з “вікнами прозорості” атмосфери. Для ІЧ-випромінювання “вікна прозорості” розподіляються так: 0,95 – 1,05 мкм;

1,2 – 1,3 мкм; 1,5 – 1,8 мкм; 2,1 – 2,4 мкм; 3,3 – 4,2 мкм; 4,5 – 5,1 мкм; 8 – 13 мкм.

Для максимального використання “вікон прозорості” атмосфери світлодіоди з майже монохроматичним випромінюванням матимуть вузький спектр випромінювання, який повністю співпадає з відповідним “вікном прозорості” атмосфери.

Найбільш широкими та прозорими є два “вікна прозорості” атмосфери: 0,95–1,05 мкм і 8–13 мкм. Максимальний ефект досягається при узгодженні випромінювачів і матриць приладів спостереження за цими довжинами хвиль. Так, для “вікна прозорості” 0,95–1,05 мкм найбільш придатні для виготовлення випромінювачів ІЧ-світлодіоди, що забезпечують випромінювання з довжиною хвиль 980 нм. Для інших “вікон прозорості” необхідні світлодіоди з більшою довжиною хвиль. ІЧ-діапазон спектра випромінювання 0,740 ... 18 мкм називають тепловим. Тому спектральні характеристики приладів спостереження (тепловізорів) у цьому діапазоні довжин хвиль також треба налаштовувати на “вікна прозорості” атмосфери.

Проведений аналіз електролюмінесцентних характеристик світлодіодів у видимому та ІЧ-діапазонах випромінювання для застосування у променево-сигнальних системах та підсилювачів світла, систем нічного бачення та тепловізорів для застосування у системах навігації та посадки у складних метеоумовах.

У розділі 3 розроблено модель оцінки ефективності оптоелектронного каналу зв'язку сигнальної системи. У загальному вигляді надходження оптичного сигналу до регістратора можна відобразити спрощеною схемою, наведеною на рис. 1. Аналогічно будується ІЧ-канал зв'язку променево-сигнальної системи.

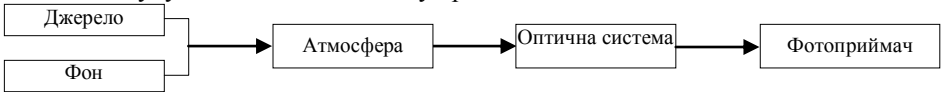


Рис. 1 – Спрощена схема надходження ЕМС до приймача

Параметрами енергетичної ефективності джерел променевої енергії є:

– енергетичний коефіцієнт корисної дії випромінювання в заданій ділянці спектра – відношення променевого потоку вказаної спектральної ділянки $[\lambda_1, \lambda_2]$ до всього променевого потоку, що випромінюється джерелом:

$$\eta_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

де $\Phi(\lambda)$ – спектральна щільність потоку випромінювання;

– енергетична ефективність джерела η – відношення потужності загального потоку випромінювання до загальної споживчої потужності $P_{ен.}$:

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda}{P_{ен.}} \quad (2)$$

Показником ефективності передачі електромагнітного сигналу через атмосферу є коефіцієнт прозорості атмосфери τ .

$$\tau(\lambda) = 10^{-\delta(\lambda) \cdot x} = e^{-\alpha(\lambda) \cdot x}, \quad (3)$$

де $\delta(\lambda)$ – спектральний десятковий показник ослаблення;

$\alpha(\lambda)$ – спектральний натуральний показник ослаблення.

Крім чутливості фотоприймача, на загальну ефективність комплексу впливає ступінь узгодженості спектрів випромінювання джерела і фоточутливості приймача, що виражається коефіцієнтом використання випромінювання k :

$$k = \frac{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) Z(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} y(\lambda) Z(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} y(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

$Z(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda_{\max})}$ – відносна спектральна чутливість фотоприймача;

$y(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda_{\max})}$ – відносна спектральна щільність потоку випромінювання;

$S(\lambda), S(\lambda_{\max})$ – спектральний розподіл чутливості фотоприймача, в максимумі спектру фоточутливості відповідно;

$\Phi(\lambda_{\max})$ – спектральна щільність потоку випромінювання в максимумі спектру.

При візуальному спостереженні $Z(\lambda)$ є нормалізованою кривою видимості. Після проходження всього каналу зв'язку оператор отримує зображення на екрані дисплею.

Запропонована модель аеродромної променевосигнальної системи ІЧ-діапазону ЕМХ поєднує якісні переваги пасивних приймальних систем, таких як тепловізійні камери з перевагами активних довгохвильових випромінювачів. Видиме світло та монохроматичне ІЧ-випромінювання мають однакову електромагнітну природу. Основні характеристики ЕМХ – інтенсивність, довжина хвилі, поляризація та фаза коливань. Результат взаємодії електромагнітного випромінювання із середовищем поширення залежить від співвідношення вказаних параметрів з характеристиками середовища.

У видимому діапазоні ЕМХ поглинанням на водяних краплях можна знехтувати. Тому показник ослаблення \bar{a} визначається лише величиною розсіювання. Одновимірний розподіл радіусу сферичних аерозольних частинок r модельно найпростіше виразити розподілом $f(r) = \delta(r - r_0)$ ($\delta(r)$ – символічна дельта-функція Дірака). Згідно теорії аномальної дифракції Ван де Хюлста, для “м'яких” частинок, якими є водяні краплі, фактор ефективності розсіювання $K_p(\lambda, r)$ дорівнює:

$$K_p(\lambda, r) = 2 - \lambda \cdot \frac{4 \cdot \sin \frac{ar}{\lambda}}{ar} + \frac{\lambda^2 \cdot 4 \left(1 - \cos \frac{ar}{\lambda} \right)}{(ar)^2}, \quad (5)$$

де $a = 4\pi(n - 1)$;

n – дійсна частина комплексного показника заломлення.

Тоді усереднений по видимому діапазону ЕМХ $[\lambda_1, \lambda_2]$ об'ємний коефіцієнт розсіювання має вид:

$$\bar{\alpha}(r_0) = \frac{N\pi}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^{\infty} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r^2 K_p(\lambda, r) \cdot \delta(r - r_0) d\lambda dr = N\pi r_0^2 \bar{K}_p(r_0), \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} \overline{K}_p(r_0) = & 2 + \frac{C}{(a \cdot r_0)^2} \cdot \left[\lambda_2^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_2} \right) - \lambda_1^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_1} \right) \right] - C \cdot \left[\frac{1}{ar_0} \left(\lambda_2^2 \cdot \sin \frac{ar_0}{\lambda_2} - \lambda_1^2 \cdot \sin \frac{ar_0}{\lambda_1} \right) + \right. \\ & \left. + ar_0 \left(\operatorname{si} \frac{ar_0}{\lambda_2} - \operatorname{si} \frac{ar_0}{\lambda_1} \right) + \lambda_2 \cdot \cos \frac{ar_0}{\lambda_2} - \lambda_1 \cos \frac{ar_0}{\lambda_1} \right]; \quad (7) \\ C = & \frac{4}{3 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}; \quad \operatorname{si}(x) = \int_{\infty}^x \frac{\sin t}{t} dt. \end{aligned}$$

Якщо $\frac{a \cdot r_0}{\lambda} \gg 1$, що відповідає $r_0 \gg 0,183$ мкм та враховувати асимптотику інтегрального синуса в першому наближенні: $\operatorname{si}(x) \approx -\frac{\cos x}{x}$, одержимо:

$$\overline{K}_{\text{роз}}(r_0) \approx 2 + C \cdot (ar_0)^{-2} \cdot \left[ar_0 \left(\lambda_1^2 \sin \frac{ar_0}{\lambda_2} - \lambda_2^2 \cdot \sin \frac{ar_0}{\lambda_2} \right) + \lambda_2^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_2} \right) - \lambda_1^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_1} \right) \right]. \quad (8)$$

Поширення фотонів у середовищі з показником ослаблення α характеризують середньою довжиною вільного пробігу фотона l до моменту його розсіювання:

$$l = \alpha \int_0^{\infty} x e^{-\alpha x} dx = \alpha^{-1}. \quad (9)$$

Тоді маємо: $l_\lambda = 1/\alpha(\lambda)$ ($l_0 = 1/\alpha$) – довжина вільного пробігу монохроматичного фотона з довжиною хвилі λ та “середнього” фотона видимого діапазону ЕМХ. Відношення l_λ/l_0 показує ефективність пропускання атмосферою монохроматичного випромінювання в порівнянні з пропусканням ЕМХ видимого діапазону (рис. 2):

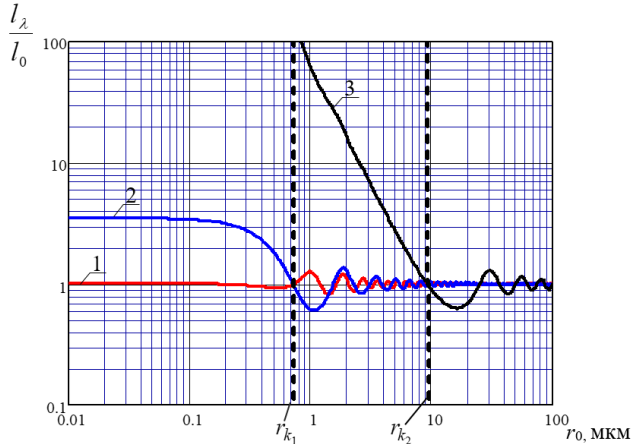


Рис. 2 – Залежність відношення середньої довжини вільного пробігу фотона з $\lambda = 0,554$ мкм (крива 1), $\lambda = 1$ мкм (крива 2), $\lambda = 10$ мкм (крива 3) до середньої довжини вільного пробігу “світлового” фотона від радіуса водної частинки аерозоліо

$$\frac{l_\lambda}{l_0} = \frac{\overline{\alpha}(r_0)}{\alpha_\lambda(r_0)} = \frac{\overline{K}_p(r_0)}{K_\lambda(r_0)} \quad (10)$$

Таким чином, ступінь переваги за дальністю поширення більш довгих хвиль у порівнянні зі світловими залежить від мікроструктури середовища. Важливо дослідити механізми, що нівелюють таку перевагу.

Розглянуто модель монодисперсного аерозолі водних сферичних частинок з радіусом r і поширення в ньому монохроматичних ЕМХ з довжинами λ : 0,554 мкм; 1 мкм; 4 мкм; 10 мкм при зміні параметру дифракції (параметр Мі) $d = \frac{2\pi r}{\lambda}$ в широкому діапазоні: від $d \ll 1$ до $d \gg 1$. Поглинанням при $\lambda = 0,554$ мкм, $\lambda = 1$ мкм, $\lambda = 4$ мкм і, з дещо більшою похибкою, при $\lambda = 10$ мкм можна знехтувати. При великих розмірах частинок з ростом r відносний вклад поглинання в загальний показник ослаблення зменшується, що підвищує точність результату при вказаних наближеннях. Тобто, для майже прозорих частинок, фактор ослаблення $K_{осл}$ визначається фактором розсіювання $K_{роз}$ ($K_{осл} \approx K_{роз}$). У вказаних умовах розгляду величину перерізу розсіювання $\sigma_\lambda(r)$ ЕМХ довжиною λ в наближенні аномальної дифракції можна представити:

$$\sigma_\lambda(r) \equiv \pi r^2 K_{роз}(a_\lambda r) = 2\pi \left[r^2 - \frac{2}{a_\lambda} \cdot r \cdot \sin(a_\lambda r) + \frac{2}{a_\lambda^2} (1 - \cos(a_\lambda r)) \right], \quad (11)$$

$$\text{де } a_\lambda = \frac{4\pi(n_\lambda - 1)}{\lambda},$$

n_λ – дійсна частина комплексного показника заломлення води на довжині хвилі λ .

Зі зростанням r переріз розсіювання, коливаючись майже періодично навколо квадратичної залежності від r , прямує до сталого значення $\sigma_\lambda(r) = 2\pi r^2$, яке досягається в нулях функції:

$$f(a_\lambda r) = -(a_\lambda r) \sin(a_\lambda r) + 1 - \cos(a_\lambda r). \quad (12)$$

Розв'язки рівняння $f(a_\lambda r) = 0$ відносно r (крім $r = 0$) представляють значення радіусів, при яких переріз розсіювання дорівнює величині $2\pi r^2$ і не залежить від довжини хвилі λ :

$$r_k = \frac{\pi(2k-1) - 2\varepsilon_k}{a_\lambda}; \quad \varepsilon_k = \frac{3\pi(2k-1) - \sqrt{9\pi^2(2k-1)^2 - 60}}{10}; \quad r_l = \frac{2\pi l}{a_\lambda}; \quad (13)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots; \quad l = 1, 2, 3, \dots,$$

де ε_k визначено з точністю до квадратичного члену ряду в розкладі $\text{ctg}(a_\lambda r)$.

Збільшуючи кількість членів степеневого ряду в розкладі $\text{ctg}(a_\lambda r)$, одержимо уточнені розв'язання (13):

$$\begin{aligned} r(k=1) &= \frac{2,331122}{a_\lambda}; & r(l=1) &= \frac{2\pi}{a_\lambda}; & r(k=2) &= \frac{9,208434}{a_\lambda}; \\ r(l=2) &= \frac{4\pi}{a_\lambda}; & r(k=3) &= \frac{15,579768}{a_\lambda} \dots \end{aligned} \quad (14)$$

Характерним є те, що значення r_l мають чіткий період $\frac{2\pi}{a_\lambda}$, а r_k повторюються зі змінним інтервалом, зменшуючись до $\frac{2\pi}{a_\lambda}$ при $k \rightarrow \infty$.

При однаковій чутливості приймачів дальності виявлення променів різної довжини хвилі λ_1 і λ_2 в одному й тому ж середовищі з незмінною за координатою концентрацією частинок N зрівнюється за умови:

$$\sigma(r, \lambda_1) = \sigma(r, \lambda_2). \quad (15)$$

Тобто концентрація частинок аерозолію не впливає на переваги по дальності виявлення сигналів. Критичним є радіус частинок r_k , величину якого аналітично можна оцінити за умови $\lambda_2 \gg \lambda_1$. Тоді переріз розсіювання $\sigma(r, \lambda_1)$ виходить на параболічну залежність від r при значно менших розмірах часток ніж $\sigma(r, \lambda_2)$, і умова (15) реалізується в першому нулі ($k = 1$) функції (12) для хвилі з λ_2 :

$$r_k \cong \frac{2,331122 \cdot \lambda_2}{4\pi [n(\lambda_2) - 1]}. \quad (16)$$

Так, перевага за дальністю виявлення сигналів з $\lambda_2 = 10$ мкм у водно-аерозольному середовищі ($n(\lambda_2) = 1,2$) по відношенню до випромінювання в максимумі спектру чутливості ока ($\lambda_1 = 0,554$ мкм) буде до розмірів крапель з $r_k \cong 9,3$ мкм. При $r \geq r_k$ дальності виявлення ЕМХ з λ_1 і λ_2 зрівнюються.

Для підвищення точності (11) використовуємо поправочний множник $Q_\lambda(r)$:

$$\sigma_\lambda(r) = 2\pi \left[r^2 + \frac{2}{a_\lambda^2} \cdot f(\alpha_\lambda \cdot r) \right] Q_\lambda(r), \quad (17)$$

$$\text{де } Q_\lambda(r) = \begin{cases} \frac{(n_\lambda - 1)^2}{0,816 n_\lambda} + \frac{0,8\pi r}{\lambda}; & r \leq \frac{5\lambda}{4\pi}; \\ \frac{\pi(n_\lambda - 1)^2 r}{1,02 n_\lambda \lambda} + 1; & \frac{5\lambda}{4\pi} \leq r \leq \frac{1,02\lambda}{\pi(n_\lambda - 1)}; \\ \frac{1,02\lambda}{\pi n_\lambda r} + 1; & r > \frac{1,02\lambda}{\pi(n_\lambda - 1)}. \end{cases}$$

На рис. 3 наведені залежності перерізу розсіювання від радіуса частинок водного аерозолію для двох довжин хвиль. На збільшеному відрізку графіка чітко видну точку перетину, в якій $\sigma_{\lambda_1}(r) = \sigma_{\lambda_2}(r) = 2\pi r^2$.

Оскільки реальні аерозолі немонодисперсні, фіксувати концентрацію частинок в кожному окремому випадку неможливо. У цих випадках використовують об'ємну або вагову концентрацію q (водність), яка є інтегральним параметром системи розсіювальних частинок. Тоді натуральний показник розсіювання матиме вигляд:

$$\alpha(r, \lambda) = \frac{3q}{4\pi\rho r^3} \cdot \sigma_\lambda(r), \quad (18)$$

де ρ – густина частинки.

При встановленні на ЗПС аеродрому сигнальних ліхтарів з робочою частотою в довгохвильовому ІЧ-діапазоні більшість видів туманів та серпанків, непрозорих візуально, не будуть перешкодою для видимості з ПС і в денний, і в нічний час.

Досліджено вплив величини метеорологічної дальності видимості S_M на вибір робочої довжини хвилі ІЧ-каналу зв'язку.

Існує критичний радіус частинок r_k , що ділить всі результати по виявленню сигналу на дві частини: $r < r_k$ та $r > r_k$. На першій ділянці при заданій S_M всі співвідношення між концентрацією частинок N і r такі, при яких $l_\lambda > l_0$. Якщо

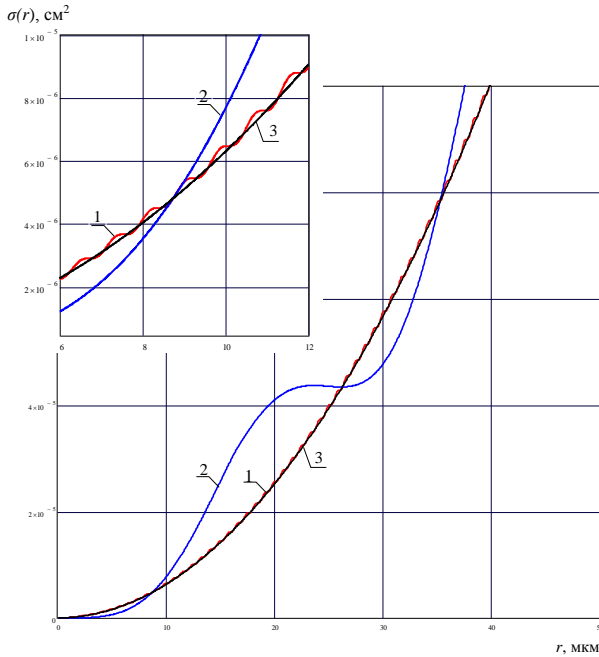


Рис. 3 – Залежність перерізу розсіяння випромінювання від радіуса краплі води для:
 1 – $\lambda = 0,554$ мкм ($n_\lambda = 1,33$); 2 – $\lambda = 10$ мкм ($n_\lambda = 1,2$); 3 – відповідає $\sigma_\lambda(r) = 2\pi r^2$

$S_M = 100$ м та візуально не видно світла прожекторів, які знаходяться на відстані більшій за 100 м, то при характеристиках аерозолу з області $r < r$ більш довгі хвилі будуть досягати приймача. На другій ділянці дальність дії монохроматичного сигналу та світлового, практично однакова, тобто ні світловий, ні довгохвильовий сигнали не досягнуть приймача.

В табл. 1 наведені можливі мікроструктурні параметри водного аерозолу при фіксованих значеннях метеорологічної дальності видимості. Для порівняння дальності дії світла та довгохвильового випромінювання вказані середні довжини вільного пробігу монохроматичних фотонів l_λ та “усередненого” світлового фотона l_0 . Так, наприклад, при $S_M = 3 \cdot 10^3$ м в області $r < 9,3$ мкм дальність поширення ЕМХ з $\lambda = 10$ мкм переважає дальність дії світлових променів і змінюється від $1,2 \cdot 10^3$ м до $602 \cdot 10^3$ м. При $r > r_{k_2} = 9,3$ мкм така перевага зникає (рис. 4).

При незмінній величині S_M реалізується двоякий результат “бачення”:

1) на певній відстані від теплового джерела світла спостерігач візуально його не бачить, але за допомогою тепловізора (або іншого приймача ІЧ-сигналу) довгохвильовий сигнал від джерела є “видимим”. Це в області параметрів аерозолу $r < r_k$;

2) як візуально, так і за допомогою ІЧ-приймача, теплове джерело світла невидиме. Це область $r > r_k$.

З рис. 5 видно, що середній за світловим діапазоном ефективний переріз розсіювання, починаючи з $r \sim 1$ мкм, виходить на величину $2\pi r^2$ і не залежить від λ , в той час, коли для довгих хвиль такі показники з’являються при значно більших

радіусах.

Таблиця 1 – Кількісна інтерпретація Міжнародної 10-бальної класифікації метеорологічної дальності

Умови видимості	S_M , (м)	Характеристика умов видимості	Бал	Можливі параметри аерозолі								
				r , МКМ	2,0	3,0	5,0	7,0	9,0	10,0	15,0	20,0
Дуже густий туман	40	дуже погана	0	N , см^{-3}	$3,327 \cdot 10^3$	$1,64 \cdot 10^3$	639,1	324,3	188,3	151,9	69,7	39,3
				$l_0=10,23\text{М}$ $l(\lambda=10\text{МКМ})$	191,9	78,2	27,5	15,4	10,8	9,5	6,5	7,1
Сильний туман	200	погана	1	N , см^{-3}	663,12	327,8	127,8	64,9	37,7	30,4	13,9	7,9
				$l_0=51,2\text{М}$ $l(\lambda=10\text{МКМ})$	960,5	391,1	137,3	77,0	51,1	47,4	32,7	35,2
Сильний туман, серпанок	700	погана	3	N , см^{-3}	189,5	93,6	36,5	18,5	10,8	8,7	4	2,2
				$l_0=179,03\text{М}$ $l(\lambda=10\text{МКМ})$	$3,4 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	480,7	270,3	189	165,6	113,6	126,3
Сильний серпанок, дощ	3000	середня	5	N , см^{-3}	44,21	21,85	8,5	4,3	2,5	2	0,929	0,52
				$l_0=767,3\text{М}$ $\lambda=10\text{МКМ}$	$14,4 \cdot 10^3$	$58,7 \cdot 10^2$	$20,6 \cdot 10^2$	$11,6 \cdot 10^2$	816,3	720,5	489,3	534,2
Слабкий дощ або серпанок	15000	хороша	7	N , см^{-3}	8,8	4,4	1,7	0,87	0,5	0,4	0,19	0,1
				$l_0=3836,3\text{М}$ $l(\lambda=10\text{МКМ})$	$7,2 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$	$1,03 \cdot 10^4$	$5,7 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$

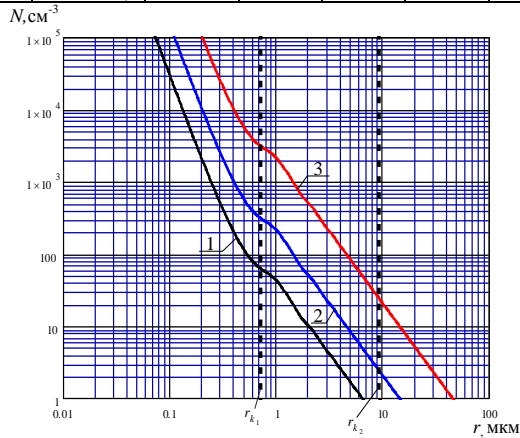


Рис. 4 – Можливі співвідношення між концентрацією аерозольних водних частинок та їх радіусом при заданій метеорологічній дальності видимості S_M :

1 – $S_M = 300$ м; 2 – $S_M = 3 \cdot 10^3$ м; 3 – $S_M = 15 \cdot 10^3$ м; r_{k1} , r_{k2} – критичні радіуси частинок

для $\lambda_1 = 1$ мкм та $\lambda_2 = 10$ мкм відповідно

У розділі 4 наведені основні результати щодо розробки окремих елементів променевосигнальної системи для роботи в ІЧ-діапазоні довжин хвиль та оцінки ефективності розроблених методів. Наведені основні принципи побудови і структура методу спостереження променевих сигналів під час супроводу повітряних суден при посадці у складних метеорологічних умовах.

Для посадки ПС у складних метеорологічних умовах створюється додатковий незалежний оптичний канал інформації між ПС та посадковою смугою, в якому реалізується метод спостереження ІЧ-променевих сигналів додаткових активних випромінювачів аеродромного базування. Метод базується на таких принципах:

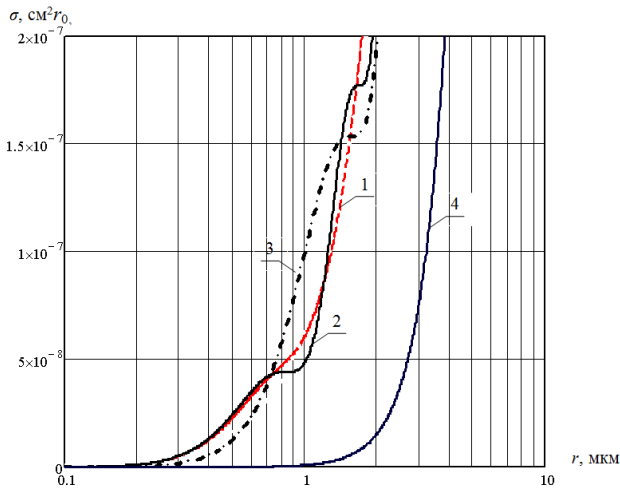


Рис. 5 – Залежність перерізу розсіювання водних частинок аерозоллю від їх радіуса для різних ЕМХ:
1 – світло; 2 – $\lambda = 0,554$ мкм; 3 – $\lambda = 1$ мкм; 4 – $\lambda = 10$ мкм

1) для позначення ЗПС, вогнів наближення та горизонту, крім прожекторів видимого діапазону, використовуються прожектори ІЧ-діапазону випромінювання;

2) для досягнення максимальної дальності проникнення ІЧ-випромінювання у складних метеоумовах узгоджується довжина хвиль ІЧ-прожекторів з відповідними “вікнами прозорості” атмосфери. Такими джерелами є прожектори на основі ІЧ-напівпровідникових діодів з майже монохроматичним випромінюванням в діапазонах 0,95–1,05 мкм, 3,3–4,2 мкм і 8–13 мкм;

3) повітряне судно обладнується оптико-електронними приладами реєстрації ІЧ-випромінювання, інформація з яких відображається на екрані монітору розташованого в кабіні ПС. Чутливі матриці для сприйняття ІЧ-випромінювання також треба налаштувати на відповідні “вікна прозорості” атмосфери та узгоджувати зі спектром випромінювання прожекторів.

Дані принципи дозволили розробити концепцію методу спостереження ІЧ-сигналів під час супроводу повітряних суден при посадці у складних метеоумовах (рис. 6).

Для реалізації методу розроблені світлодіодні прожектори з регульованою індикатрисою випромінювання, які в одній конструкції функціонально реалізують прожектори дальньої дії, заливаючого світла і для передачі інформації на відстані.

У них випромінювальний вузол виконаний у вигляді мембрани, а джерелами світла є світлодіоди різного кольору випромінювання, розміщені на поверхні мембрани. Причому світлодіоди червоного, зеленого і синього кольорів, згруповані в тріади, рівномірно розподілені на поверхні мембрани. Світлодіоди одного кольору випромінювання сполучені в послідовно-паралельні ланцюги і приєднані до регульованих джерел живлення. Це дозволяє змінювати колір світлового потоку, включаючи по черзі червоний, зелений, синій, або одночасно всі кольори для отримання світлового потоку білого кольору. Мембрана виконана з діелектричного матеріалу і з'єднана з механізмом управління, який може змінювати увігнутість або опуклість мембрани. Формування світлового потоку здійснюється зміною кривизни мембрани, залежно від чого змінюється положення оптичної осі випромінювання

кожного з діодів, внаслідок цього світловий потік розширюється, перетворюючись на віяло, або звужується, збираючись у пучок (рис. 7).



Рис. 6 – Структура методу спостереження світлових та ІЧ-сигналів під час супроводу повітряних суден при посадці у складних метеорологічних умовах

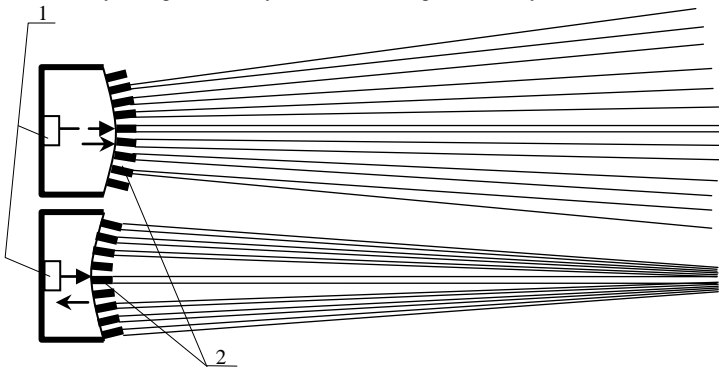


Рис. 7 – Формування світлового потоку:
1 – механізм управління; 2 – світлодіоди

Основним недоліком управління світловим потоком за допомогою мембрани є те, що при деформації вона повинна набувати форми частини сфери. Даний недолік усувається конструкцією вузла випромінювання прожектора у якому світлодіоди розміщуються, замість мембрани, на сегментах – ламелях (рис. 8). У центральній частині вузла випромінювання ламелі з'єднуються з механізмом управління. Ламелі розташовуються у декілька ярусів. Під дією механізму управління ламелі змінюють свою кривизну, стають увігнутими або опуклими, в результаті світловий потік розширюється, перетворюючись у віяло, або звужується, збираючись у пучок.

Оптичний пристрій прожектора складається з декількох сотень світлодіодів. Вихід з ладу декількох десятків світлодіодів майже не впливає на інтенсивність світлового потоку. Відсутність нитки розжарювання обумовлює термін служби до

100 000 год (лампа розжарювання – 1000 год). Відсутність скляної колби визначає високу механічну міцність і надійність системи.

Отже, така конструкція дозволяє при однаковій споживній потужності у 100 Вт збільшити загальний випромінювальний світловий потік майже у 12,5 разів у порівнянні з прожектором, що використовує параболічний відбивач і лампу розжарювання.

Оцінена дальність виявлення аеродромних променевих сигналів й енергетичного коефіцієнта корисної дії ІЧ-діода та ламп розжарювання різної потужності.

У достатньо прозорій атмосфері на відстанях, менших $1/\alpha_\lambda$, дальність виявлення сигналу визначається опроміненістю $E_{\lambda, \min}$ та потужністю джерела випромінювання I_λ . При значному ослабленні випромінювання найсуттєвіша швидкість зміни x_m визначається параметром α_λ . Зменшення α_λ “просвітлює” атмосферу, збільшуючи дальність x_m . Збільшуючи робочу довжину хвилі відносно r – радіусу розсіюючих та поглинаючих аерозольних частинок, загальний показник ослаблення α_λ зменшується згідно із законами хвильової оптики. Чим сильніша нерівність $\frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1$, тим більша прозорість мутного середовища при фіксованих розмірах r і концентрації частинок (рис. 9 (а – прозора атмосфера; б – туман)).



Рис. 8 – Конструкція випромінюючого вузла світлодіодного прожектора

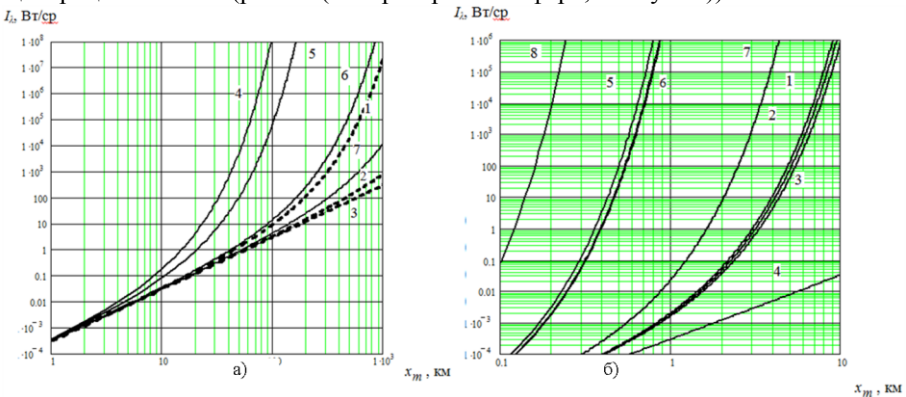


Рис. 9 – Залежність між силою випромінювання точкового джерела I_λ і максимальною дальністю x_m виявлення його сигналу

- а) Прозора атмосфера: Криві: 1 – $\lambda = 0,554$ мкм; 2 – $\lambda = 1$ мкм; 3 – $\lambda = 4$ мкм, $\lambda = 10$ мкм; Серпанок ($r = 0,05$ мкм; $N_r = 10^2 \text{ см}^{-3}$), Криві: 4 – $\lambda = 0,554$ мкм; 5 – $\lambda = 1$ мкм; 6 – $\lambda = 4$ мкм; 7 – $\lambda = 10$ мкм;
- б). Туман I ($r = 1,8$ мкм, $N_r = 10^2 \text{ см}^{-3}$), Криві: 1 – $\lambda = 0,554$ мкм; 2 – $\lambda = 1$ мкм; 3 – $\lambda = 4$ мкм; 4 – $\lambda = 10$ мкм; Туман II ($r = 6,5$ мкм, $N_r = 10^2 \text{ см}^{-3}$), Криві: 5 – $\lambda = 0,554$ мкм; 6 – $\lambda = 1$ мкм; 7 – $\lambda = 4$ мкм; 8 – $\lambda = 10$ мкм; Туман III ($r = 18$ мкм, $N_r = 10 \text{ см}^{-3}$), Крива 8 – $\lambda = 0,554$ мкм, $\lambda = 1$ мкм, $\lambda = 4$ мкм, $\lambda = 10$ мкм.

На рис. 10 наведені відносні спектральні розподіли характеристик складових ІЧ-каналу.

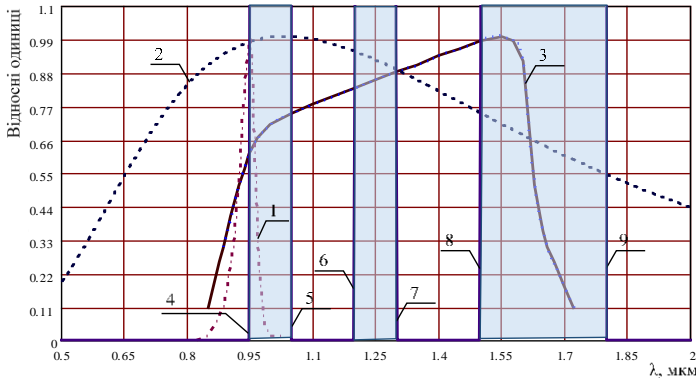


Рис. 10 – Відносні спектральні розподіли:

- 1 – інтенсивності випромінювання напівпровідникового ІЧ-діода OSRAM SFH4545;
- 2 – інтенсивності випромінювання ідеальної вольфрамової нитки при $P_{em} = 100$ Вт;
- 3 – фоточутливості тепловізійної камери SU320-1,7RT;
- 4, 5, 6, 7, 8, 9 – обмежуючі прямі “вікон прозорості” атмосфери

Одержані результати свідчать, що навіть неоптимальна узгодженість спектрів випромінювання ІЧ-діода і фоточутливості ТВ-камери, використання напівпровідникових діодів в якості джерел ІЧ-сигналу, завдяки високому енергетичному коефіцієнту корисної дії діодів, є більш ефективними у порівнянні з лампами розжарювання.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційних досліджень вирішене актуальне наукове завдання методу підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах шляхом обробки світлових та інфрачервоних сигналів і побудови променево-сигнальної системи.

У процесі виконання дисертаційної роботи отримані такі основні результати:

1. Аналіз питання підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеоумовах показав обмеженість сучасних навігаційних систем. Спосіб функціонування запропонованої променевосигнальної системи має особливості у порівнянні з досліджуваними раніше технічними засобами, що потребує визначення якісно нових підходів щодо розробки концепцій робототехнічного зору.

2. Визначені основні причини виникнення помилок світлосигнального обладнання ЗПС при виконанні посадок повітряних суден у складних метеоумовах. Впровадження концепції ICAO CNS/ATM для покращення точності і надійності позиціонування повітряних суден цивільної авіації потребує підвищення якості світлотехнічного забезпечення за допомогою комплексного застосування сигналів видимого та ІЧ-діапазонів у складі світлосигнального обладнання

3. Обґрунтована концепція сумісної обробки сигналів різного частотного діапазону для питання підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах на етапах посадки та зльоту. Удосконалений метод постійного спостереження сигналів світлотехнічного обладнання злітно-посадкових смуг, який, на відміну від відомих, базується на обробці аеродромних променевих сигналів ІЧ-діапазону додатково до незалежного оптичного каналу інформації між повітряним судном та посадковою смугою.

4. Одержав подальшого розвитку метод сумісної обробки сигналів видимого та ІЧ-діапазонів при взаємодії з атмосферою в широкому діапазоні характеристик повітряного водно-дисперсного середовища, в якому, на відміну від відомих, використовується модель “м’яких” аерозольних частинок сферичної форми. Збільшення концентрації аерозольних частинок і водності аерозолі не змінюють співвідношення дальностей виявлення сигналу на різних довжинах хвиль. Переваги по дальності виявлення сигналу в мутних середовищах (серпанку, туману, хмар) залежать від розміру розсіювальних часток, а не їх концентрації або водності.

5. Для видимого та ІЧ-монохроматичного випромінювання існує критичний радіус водяних частинок, що визначається робочою довжиною хвилі, при якому дальність їх поширення стає приблизно однаковою. Мінімальний радіус сферичних водно-аерозольних частинок, при якому показник розсіювання світла визначається лише їх площею геометричного перерізу і не залежить від співвідношення довжини ЕМХ та розміру частинки, становить ~ 1 мкм.

6. Одержав подальшого розвитку метод спостереження світлових сигналів світлотехнічного обладнання злітно-посадкових смуг під час супроводу повітряних суден при посадці у складних метеорологічних умовах, який, на відміну від відомих, базується на узгодженні спектральних характеристик джерел випромінювання з оптичними характеристиками закабінного середовища повітряного судна.

7. ІЧ-сигнальна система з напівпровідниковим джерелом випромінювання, виготовленим на основі ІЧ-діодів серійного виробництва, до 14 разів енергоефективніша за систему з ідеалізованим джерелом теплового випромінювання.

8. У перспективних системах виявлення променевих сигналів для супроводу ПС при посадці у складних метеоумовах матимуть реалізовані такі основні принципи:

- одночасне використання прожекторів видимого та ІЧ-діапазону для позначення злітно-посадкової смуги, вогнів наближення та горизонту;

- узгодження довжини хвиль ІЧ-прожекторів з відповідними “вікнами прозорості” атмосфери для досягнення максимальної дальності проникнення ІЧ-випромінювання у складних метеорологічних умовах. Це досягається використанням джерел світла з вузьким спектром випромінювання (ІЧ-діоди з майже монохроматичним випромінюванням), який повністю співпадає з відповідним “вікном прозорості” атмосфери;

- обладнання повітряного судна приладами реєстрації ІЧ-випромінювання, матриці яких налаштовані на відповідні “вікна прозорості” атмосфери і спектри випромінювання джерела. Поєднання тепловізійних приймачів випромінювання з ІЧ-напівпровідниковими прожекторами, які є активними джерелами по відношенню до ПС, збільшує дальність технічного бачення і всепогодність роботи променево-сигнальної системи.

9. Для практичних цілей важливим є наявність ефекту збільшення дальності з ростом λ в сильно мутному середовищі. З порівняння графічних залежностей легко бачити, що при однаковій силі випромінювання джерела дальність виявлення сигналу завжди більша в ІЧ-діапазоні, а ніж видимому (при $\lambda = 0,554$ мкм). Проте, із зменшенням прозорості атмосфери за рахунок збільшення розмірів аерозольних частинок, ефект нівелюється і при значній мутності “просвітлення” зникає. Це означає, що багато видів серпанків і туманів в розглядуваних інфрачервоних

діапазонах будуть прозорими. Також, легко бачити, що при однаковій метеорологічній дальності видимості використання інфрачервоної системи джерело-приймач є вигідним.

10. Мега дисертаційної роботи, яка полягає у підвищенні безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах, досягнута та усі поставлені завдання вирішені повністю.

11. Основні результати досліджень можуть бути використані при розробці нових інтегрованих світлотехнічних комплексів, в яких для досягнення максимальної дальності проникнення ІЧ-випромінювання у складних метеорологічних умовах використовуватимуться ІЧ-прожектори та приладами реєстрації ІЧ-випромінювання, які працюють у діапазонах 0,95-1,05 мкм, 3,4-4,2 мкм та 8-13 мкм довжин хвиль. Інформація від матриць відобразатиметься на екрані монітора, що знаходиться в кабіні пілотів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Golovenskiy V.**, Lisoenko D. The LED flood light with adjustable indicatrix of radiation. *Transactions of the Universities of Kosice*. Kosice, 2016, vol. 2. pp. 44-47.

2. **Головенський В.В.**, Лісовенко В.Д. Використання хвиль інфрачервоного діапазону для авіаційних навігаційних систем у складних метеорологічних умовах. *Збірник наукових праць Військової академії*. Одеса, 2017. № 1(7). С. 31 – 34.

3. **Головенський В.В.**, Лісовенко Д.В. Ретроспектива, сучасний стан та перспективи використання світлодіодних випромінювачів у світлосигнальних пристроях. *Збірник наукових праць Військової академії*. Одеса, 2017. № 2(8). С. 30 – 35.

4. **Golovenskiy V.** Extending the detection range of aerodrome beam signals in adverse meteorological conditions, *Proceedings of the National Aviation University*, Kyiv, 2018. vol. 74(1). С. 45-52.

5. **Головенський В.В.** Встановлення границь суттєвої переваги по дальності виявлення електромагнітних сигналів інфрачервоного діапазону в порівнянні з видимим. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2017. № 59. С. 12 – 21.

6. **Головенський В.В.**, Неділько С.М., Сілюков О.В. Оцінка ефективності ламп розжарювання і напівпровідникових діодів як джерел селективного інфрачервоного випромінювання. *Сучасна спеціальна техніка*. Київ, 2018. № 2(53). С. 16-22.

7. **Головенський В.В.**, Базик О.І., Лісовенко В.Д. Особливості виявлення світлових та інфрачервоних сигналів аеродромних прожекторів. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2018. № 4(61). С. 5 – 13.

Опубліковані праці апробаційного характеру

8. **Головенський В.В.**, Андруевич А.О., Лісовенко В.Д. Підсилювачі світла, камери нічного спостереження та тепловізійні системи в авіації. *Авіація та космонавтика: матеріали VII Всеукраїнської наук.-практ. конф. (м. Кривий Ріг. 19 квіт., 2017 р.)*. м. Кривий Ріг: КК НАУ, 2017. С 96.

9. **Головенський В.В.**, Лісовенко Д.В. Світлодіодні і лазерні випромінювачі та особливості їх використання у техніці. *Удосконалення та модернізація озброєння*

військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель: матеріали наук.-практ. конф. (Київ, 30 листопада 2017 р.) Київ: Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних сил України, 2017. С. 25

10. **Головенський В.В.** Спостереження інфрачервоних сигнальних вогнів посадкової смуги в умовах поганої видимості. *Авіація та космонавтика: стан, досягнення і перспективи*: матеріали XXXVIII Всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих учених та курсантів, яка присвячена Всесвітньому Дню авіації і космонавтики (м. Кропивницький, 12 квіт. 2018 р.). Кропивницький: ЛА НАУ, 2018, С. 28

11. **Головенський В.В.**, Лісовенко В.Д. Використання “вікон прозорості” атмосфери для спостережень сигнальних вогнів аеродромів: матеріали ІХ Всеукраїнської наук.-практ. конф. (м. Кривий Ріг, 17 квіт. 2018 р.). м. Кривий Ріг: ДВНЗ “Криворізький нац. ун-т”, 2018. С 14.

12. **Головенський В.В.** Перспективи використання інфрачервоного діапазону довжин хвиль для авіаційної навігаційної системи. *Авіація, промисловість, суспільство*: зб. тез доповідей І Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів (м. Кременчук, 27 квіт. 2018 р.) м. Кременчук: Кременчуцький льотний коледж НАУ, 2018. С 13-16.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

13. Світлодіодний прожектор з регульованою індикатрисою випромінювання: пат 121.853 Україна №. а 201708256; заявл. 09.08.2017., опубл. 26.12. 2017, Бюл. № 24. 4 с.

14. Спосіб спостереження світлових сигналів під час супроводу повітряних суден у складних метеорологічних умовах: пат. 129019 Україна. № а 201708804; заявл. 01.09.2017; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 2 с.

АНОТАЦІЯ

Головенський В.В. Метод підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – Навігація та управління рухом. – Льотна академія Національного авіаційного університету. Кропивницький, 2019.

У результаті виконання дисертаційних досліджень вирішене актуальне наукове завдання розробки методу підвищення безпеки польотів та навігації повітряних суден у складних метеорологічних умовах шляхом обробки світлових та інфрачервоних сигналів і побудови променевосигнальної системи.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що: удосконалений метод постійного спостереження сигналів світлотехнічного обладнання злітно-посадкових смуг; одержав подальшого розвитку метод сумісної обробки сигналів видимого та ІЧ-діапазонів при взаємодії з атмосферою в широкому діапазоні характеристик повітряного водно-дисперсного середовища; одержав подальшого розвитку метод спостереження світлових сигналів світлотехнічного обладнання злітно-посадкових смуг під час супроводу повітряних суден при посадці у складних метеорологічних умовах.

Ключові слова: світлотехнічне обладнання, навігація, інфрачервоний сигнал,

складні метеорологічні умови, світловий сигнал, світлодіод.

ANNOTATION

Holovenskyi V.V. Method of increase of safety of flights and navigation of air ships in difficult meteorological terms. – Manuscript.

The Thesis submitted for the scientific degree of Doctor of Philosophy (engineering) (Candidate of Technical Sciences) on specialty 05.22.13 – Navigation and Traffic Control. – Flight Academy of National Aviation University. Kropyvnytskiy, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem related to the development of method of increase of safety of flights and navigation of air ships in difficult meteorological terms by treatment of light and infra-red signals and construction ray-alarm systems.

The scientific novelty of the obtained results is that: improved method of permanent supervision of signals of equipment of lightning technology flight-landings bars, which, unlike known, is based on treatment of commuter radial signals of IR-range additionally to the independent optical channel of information between an air ship and landing bar; got subsequent development method of compatible treatment of signals visible and IR-ranges at cooperating with an atmosphere in the wide range of descriptions air water-dispersible environment in which, unlike known, the model of “soft” transparent aerosol particles of spherical form is used; got subsequent development method of supervision of light signals of equipment of lightning technology flight-landings bars during accompaniment of air ships at landing in difficult meteorological terms, which, unlike known, is based on the concordance of spectral descriptions of sources with optical descriptions out-of-cabin environment of air ship.

Keywords: light-technical equipment, navigation, infra-red signal, difficult meteorological terms, light signal, light-emitting diode.

АННОТАЦИЯ

Головенский В.В. Метод повышения безопасности полетов и навигации воздушных судов в сложных метеорологических условиях. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.13 – Навигация и управление движением. – Летная академия Национального авиационного университета. Кропивницкий, 2018.

В результате выполнения диссертационных исследований решена актуальная научная задача разработки метода повышения безопасности полетов и навигации воздушных судов в сложных метеорологических условиях путем обработки световых и инфракрасных сигналов и построения луче-сигнальной системы.

Научная новизна исследований заключается в том, что: усовершенствован метод постоянного наблюдения сигналов светотехнического оборудования взлетно-посадочных полос; получил дальнейшее развитие метод совместной обработки сигналов видимого и ИК-диапазонов при взаимодействии с атмосферой в широком диапазоне характеристик воздушной водно-дисперсионной среды; получил дальнейшее развитие метод наблюдения световых сигналов светотехнического оборудования взлетно-посадочных полос во время сопровождения воздушных судов при посадке в сложных метеорологических условиях.

Ключевые слова: светотехническое оборудование, навигация, инфракрасный сигнал, сложные метеорологические условия, световой сигнал, светодиод.

Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк.0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 0789

Підписано до друку 26.02.2019 р.
Свідоцтво держ. реєстру ДК №977 від 05.07.2002р.

Видавництво Льотна академія НАУ
м. Кропивницький,
вул. Добровольського,1,
тел. 39-44-37.