

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Любич Ірина Володимирівна

УДК 621.37: 621.396.615

**ПІДВИЩЕННЯ ВИЯВНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЙНОЇ
СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ ЗА РАХУНОК
ВРАХУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОЇ АТМОСФЕРИ
ПРИ ФОРМУВАННІ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Заслужений винахідник України,
доктор технічних наук, професор
Стрелков Олександр Іванович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри основ радіотехніки.

Офіційні опоненти: Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
доктор технічних наук, професор
Козелков Сергій Вікторович,
Державний університет телекомунікацій,
директор навчально-наукового інституту
телекомунікацій та інформатизації, м. Київ;

Заслужений раціоналізатор України,
доктор технічних наук, професор
Казаков Євген Леонідович,
Харківський університет Повітряних Сил
ім. Івана Кожедуба,
провідний науковий співробітник Наукового центру.

Захист відбудеться «__» червня 2014 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «__» травня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Лазерні локаційні системи (ЛЛС) входять до складу системи контролю космічного простору та використовуються для високоточного визначення координат космічних об'єктів (КО), а також дозволяють вирішувати завдання космічної геодезії, геодинаміки та навігації. Принцип лазерних локаційних спостережень полягає у виявленні КО за допомогою його опромінювання когерентним електромагнітним світлом та реєстрації відбитого сигналу з наступним вимірюванням часу його розповсюдження.

Задачею первинної обробки в процесі отримання координатної інформації КО є виявлення відбитого сигналу, в результаті якого приймається рішення про наявність або відсутність об'єкту в виділеній ділянці простору. З метою збільшення кількості локаційних даних використовуються лазерні передавачі з частотою проходження імпульсів 1 кГц та більше. При цьому зменшення імпульсної енергії передавача до одиниць мДж призводить до зменшення умовної ймовірності правильного виявлення та значного скорочення кількості реєстрацій ехо-сигналу, особливо при локації віддалених та малорозмірних КО. Тому для організації локаційних спостережень першорядне значення приділяється характеристикам виявлення ЛЛС.

Високі потенційні можливості наземної локаційної системи в значній мірі обмежуються умовами поширення світлових хвиль в атмосфері та їх взаємодією з поверхнею об'єкта локації. Тому виявна здатність ЛЛС залежить як від технічних можливостей ЛЛС так і від умов спостереження КО.

Підвищення умовної ймовірності правильного виявлення КО може бути досягнуто шляхом покращення характеристик фотоприймального пристрою та підвищенням імпульсної енергії лазерного передавача. Однак підвищення чутливості приймача обмежено квантовою границею через природу електромагнітного випромінювання на рівні однофотонного прийому. Разом з тим, збільшення імпульсної енергії лазерного передавача обмежується променевою стійкістю оптичної системи, а також значно знижує стабільність характеристик передавача і надійність локаційної системи. Крім того, в умовах наземних спостережень підвищення імпульсної енергії передавача не може однозначно гарантувати підвищення виявної здатності системи через розширення та відхилення лазерного променя під час проходження крізь турбулентну атмосферу.

Способом компенсації викривлення хвильового фронту лазерного променя, в турбулентній атмосфері, може бути застосування адаптивної оптичної системи. Однак такі системи значно ускладнюють конструкцію та збільшують вартість лазерної вимірювальної системи. Крім того, швидкодія адаптивної оптичної системи при діаметрі дзеркала 1 м обмежена швидкістю деформації головного дзеркала до 10 Гц, що на кілька порядків менше частоти посилення імпульсів лазерного передавача.

Флуктуації турбулентної атмосфери мають природу вихорів, що зумовлює появу зон кореляції атмосферних неоднорідностей з мінімальним спотворенням хвильового фронту оптичного випромінювання. Просторово-часові параметри та-

ких зон залежать від стану тракту розповсюдження лазерного променя. Тому становить інтерес пошук науково-обґрунтованих технічних рішень, що дозволять реалізувати ефективне перенесення лазерного випромінювання крізь турбулентну атмосферу до об'єкту локації, та підвищити виявну здатність локаційної системи за рахунок формування оптичних імпульсів передавача.

Таким чином, тема дисертаційного дослідження є актуальною та відповідає завданням ЛЛС космічного призначення. Актуальність задачі підвищення виявної здатності ЛЛС зростає з запуском нових супутників та переходом до денного режиму спостережень. Особливу значущість зазначена задача набуває при локації малорозмірних об'єктів космічного сміття на віддалених орбітах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційного дослідження пов'язані з науково-дослідними роботами Державного міжвузівського центру «Оріон» лазерно-локаційних спостережень штучних супутників Землі за наступними темами:

- «Освоєння Алчевського пункту спостережень штучних супутників землі, забезпечення постійної експлуатації лазерної локаційної станції та інтеграція цього пункту у світову систему координат WGS-84» (№ ДР0102U001843, 2004 р.);
- «Дослідження та оптимізація енергетичних характеристик лазерно-локаційної станції спостережень штучних супутників Землі» (№ ДР0105U000936, 2007 р.);
- «Комплексне дослідження впливу внутрішніх і зовнішніх умов лазерної локації супутників на ефективність астрономічних спостережень» (№ ДР0108U001532, 2009 р.).

В указаних темах здобувач був виконавцем.

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є підвищення виявної здатності лазерної локаційної системи контролю космічного простору. Для досягнення поставленої мети була вирішена основна наукова задача: розробка методів формування оптичних сигналів ЛЛС з урахуванням параметрів турбулентної атмосфери. А також вирішено ряд часткових наукових задач:

- проведено аналіз впливу умов спостереження космічних об'єктів на виявну здатність ЛЛС, обґрунтована можливість підвищення виявної здатності наземної ЛЛС;
- розроблено математичну модель процесу поширення когерентних оптичних сигналів в турбулентній атмосфері, що враховує параметри переміщення локаційної цілі;
- проведено оцінку виявної здатності лазерної локаційної системи з урахуванням впливу стану середовища розповсюдження та параметрів об'єкта локації;
- розроблено метод підвищення виявної здатності лазерної локаційної системи за рахунок формування імпульсів лазерного передавача;
- обґрунтовані вимоги до формування когерентних оптичних імпульсів при заданій умовній ймовірності правильного виявлення з урахуванням параметрів тракту розповсюдження локаційних імпульсів;

– розроблено спосіб формування імпульсів лазерного передавача з заданими параметрами, що забезпечує підвищення енергетичного потенціалу локаційної системи за рахунок багатоступінчастого оптичного накачування;

– проведено експериментальні дослідження застосування методу підвищення виявної здатності локаційної системи з використанням лазерного передавача на алюмоітрієвому гранаті з неодимом (АІГ:Nd).

Об'єкт дослідження – процес лазерної локації КО.

Предмет дослідження – процеси формування, обробки та розповсюдження в турбулентній атмосфері когерентних оптичних сигналів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на використанні положень хвильової та корпускулярної теорії світла; дифракційній теорії оптичного поля; статистичній теорії виявлення сигналів. Експериментальні дослідження проводилися з використанням методів фізичного моделювання та статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі набули подальшого розвитку теоретичні питання лазерної локації КО. В результаті отримані наступні наукові результати:

1. Отримала подальший розвиток математична модель процесів формування, розповсюдження та реєстрації оптичних сигналів ЛЛС, яка на відміну від попередніх моделей, спільно враховує вплив параметрів турбулентної атмосфери та орбітального руху КО на енергетичні характеристики локаційних сигналів.

2. Розроблено метод формування когерентних оптичних сигналів, який на відміну від відомих, підвищує енергетичний потенціал ЛЛС за рахунок реалізації багатоступінчастого накачування активного елемента твердотілого лазера.

3. Удосконалено метод виявлення КО, який на відміну від існуючих, підвищує виявну здатність ЛЛС за рахунок врахування параметрів турбулентної атмосфери в процесі формування та реєстрації локаційних сигналів.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність запропонованого методу виявлення оптичних сигналів ЛЛС полягає у формуванні імпульсів лазерного передавача з урахуванням характеристик турбулентної атмосфери та параметрів космічного об'єкта, що дозволяє підвищити умовну ймовірність вірного виявлення з 0,1 до 0,9 при значенні умовної ймовірності помилкової тривоги 10^{-5} (на прикладі локації КО групи LAGEOS). Застосування запропонованої математичної моделі турбулентної атмосфери дозволяє сформулювати вимоги до параметрів зондувальних сигналів в широкому діапазоні умов спостереження космічних об'єктів.

Використання методу формування когерентних оптичних сигналів з багатоступінчастим накачуванням активного елемента твердотілого лазера дозволяє підвищити імпульсну енергію лазерного передавача на 30%, що особливо важливо під час локації високоорбітальних КО.

Результати роботи можуть бути використані при проведенні лазерно-локаційних спостережень супутників в задачах системи контролю космічного простору та при модернізації передавачів лазерно-локаційних станцій. Основні

теоретичні та практичні результати дисертаційних досліджень знайшли застосування при роботі станцій лазерної локації Української мережі оптичних спостережень штучних супутників Землі.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи, які знайшли відображення в пунктах новизни, наукового і практичного значення, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний:

В [1] проведено розрахунок характеристик виявлення ЛЛС із застосуванням моделі турбулентної атмосфери. Показано необхідність урахування умов поширення оптичного випромінювання при формуванні імпульсів лазерного передавача.

В [3] проведено аналіз впливу турбулентної атмосфери на спотворення хвильового фронту лазерного випромінювання. Розроблено математичну модель розповсюдження лазерного випромінювання крізь турбулентну атмосферу.

В [5] сформовано вимоги до параметрів імпульсів передавача ЛЛС космічного призначення. Обґрунтована необхідність використання багатокаскадних твердотільних лазерів з оптичним накачуванням для підвищення енергетичного потенціалу ЛЛС.

В [7] досліджено режими живлення імпульсних ламп накачування та вплив параметрів розрядного імпульсу на спектральні характеристики випромінювання.

Апробація результатів дослідження. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 9 наукових та науково-практичних конференціях: 2-й Міжнародний Радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2005); Міжнародна наукова конференція «Современные проблемы астрономии», Одеса, 2007; 3-й Міжнародний Радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2008); науково-практичні наради «Діяльність української мережі лазерно-локаційних станцій» Кацивелі-2007, Ужгород-2010, Дунаївці-2011, Алчевськ-2012, Миколаїв-2013; Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання», Алчевськ, 2012.

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 16 наукових працях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку МОН, 2 з яких включено в реферативну базу даних Всеросійського інституту наукової і технічної інформації Російської академії наук, окремо 1 статтю включено до наукометричної бази SAO/NASA Astrophysics Data System, отримано 1 патент. Результати роботи опубліковані в матеріалах 9 наукових конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації становить 138 сторінок, список використаних джерел містить 102 найменування на 14 сторінках, містить 39 ілюстрацій, 2 додатки на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, проведено стислий огляд стану задачі, сформульовані основна мета, завдання і методи їх розв'язання. Зазначено зв'язок із темами науково-дослідних робіт, визначені наукова новизна

та практична значущість роботи. Надано інформацію про публікації та апробації результатів дисертаційних досліджень, визначено особистий внесок здобувача в спільних роботах.

У першому розділі розглянуто питання, пов'язані з явищами, які відбуваються в результаті розповсюдження лазерного випромінювання по локаційному тракту та впливають на потенційні можливості наземної оптичної локаційної системи. Аналізується вплив таких явищ на процес реєстрації та виявлення відбитого від супутника оптичного випромінювання.

Розглянуто взаємодію атмосфери з лазерним променем на довжині хвилі $\lambda = 532$ нм як енергетичне послаблення, рефракцію та флуктуації фази хвильового фронту випромінювання. Вплив вказаних явищ оцінювався виходячи з можливості досягнення найбільшої інтенсивності відбитого випромінювання.

Показано, що енергетичне ослаблення, обумовлене поглинанням атмосферними газами і молекулярним розсіюванням, визначається коефіцієнтом ослаблення залежно від прозорості атмосфери. Даний вид втрат лінійно враховується при односторонньому проходженні випромінювання через атмосферний канал. За різних метеорологічних обставин граничні значення коефіцієнту послаблення складають від 0,14 до 0,8. Рефракція променя призводить до подовження оптичного ходу зонduючого та відбитого випромінювання, що може бути враховано моделлю корекції на основі метеоданих. Явище рефракції неістотно впливає на інтенсивність випромінювання на об'єкті та не позначається на характеристиках виявлення локаційної системи.

Детально розглянуто вплив випадкових неоднорідностей показника заломлення турбулентної атмосфери, що призводять до наявності фазових спотворень у фронті світлової хвилі. Проведено лабораторний експеримент з дифракції лазерного променя на фазовому екрані. Показано, що фазові спотворення за рахунок відхилення і розширення лазерного пучка можуть призвести до зменшення інтенсивності випромінювання на об'єкті в набагато більшому ступені, ніж амплітудні за рахунок енергетичного ослаблення. На рис. 1 схематично наведено викривлення фронту оптичної хвилі після проходження фазового екрану. Перемежування зон фокусування та дефокусування обумовлює характерну спекл-структуру в зображенні лазерного випромінювання в далекій зоні (рис. 2).

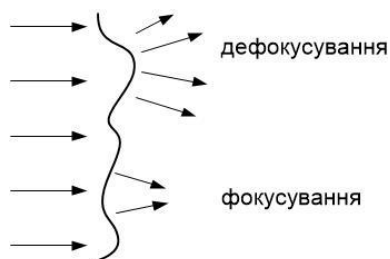


Рис 1. – Схема проходження променя крізь фазовий екран

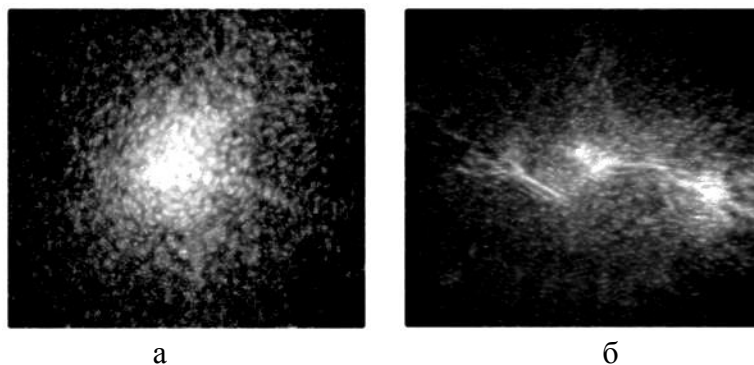


Рис. 2 – Зображення плями лазерного пучка, що пройшов крізь фазовий екран

В ході експерименту з фазовим екраном, серед реалізацій зображень лазерної плями у зоні Фраунгофера спостерігалися такі, що мають зміщений центральний максимум інтенсивності, або кілька зон локалізацій інтенсивності (рис. 2, б), що залежить від спотворення на момент проходження променя. Експеримент показує, що в умовах близького прилягання спотворювального середовища до передавача, що характерно для наземних локаційних систем, фазові флуктуації призводять до відхилення променя від прямолінійного напрямку. Тому підвищення імпульсної енергії передавача не може однозначно гарантувати розповсюдження лазерного випромінювання через турбулентну атмосферу до об'єкту локації та реєстрацію відбитого сигналу.

Під час лабораторного експерименту проводилось пересування фазового екрану впоперек променю, що дозволило спостерігати періодичну появу зображення лазерної плями без значного викривлення та відхилення (рис. 2, а). Це дало змогу припустити існування моментів проходження зондуєчого імпульсу крізь турбулентне середовище з найменшим викривленням фазового фронту.

До умов, що впливають на проведення локаційних спостережень, також відносяться параметри об'єкта локації, як джерела вторинного випромінювання. Аналіз взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею об'єкта локації показав значний вплив відбиваної здатності КО на розподіл інтенсивності випромінювання у точці прийому. Сукупність параметрів об'єкту: ефективна площа розсіювання (ЕПР), індикатриса розсіювання, кількість кутикових відбивачів та особливості їх виготовлення значно впливають на енергію оптичного сигналу, що надходить до приймальної оптичної системи. Проте за відсутністю повної апріорної інформації про відбиваність цілі, ЕПР може використовуватися як гранична відбивна здатність.

Розглянуто особливості виявлення відбитого оптичного сигналу на фоні завад коли апріорні ймовірності наявності сигналу невідомі. В цьому разі використовується критерій Неймана-Пірсона, за яким максимізується значення умовної ймовірності правильного виявлення D при заданому значенні умовної ймовірності помилкової тривоги F . Реєстрація відбитого сигналу здійснюється в режимі прямого детектування коли фотоприймач реагує тільки на енергію прийнятого випромінювання в межах спектральної зони чутливості, а інформація про фазу оптичної несної не виймається. Флуктуації інтенсивності відбитого випромінювання та особливості квантової реєстрації приводять до випадкового розподілу сигналу, що приймається. Умовна ймовірність правильного виявлення визначалась за допомогою моделі випадкового сигналу за розподілом Пуасона.

$$F = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{\bar{n}_0^n}{n!} e^{-\bar{n}_0}, \quad (1)$$

$$D = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{(\bar{n}_c + \bar{n}_n)^n}{n!} e^{-(\bar{n}_c + \bar{n}_n)}. \quad (2)$$

Розрахунок умовної ймовірності вірного виявлення слабких оптичних сигналів показав, що при середній кількості фотоелектронів перешкоди $\bar{n}_n < 10$, максимальне значення умовної ймовірності вірного виявлення може бути досягнуто

за наявності кількох десятків сигнальних фотоелектронів $\bar{n}_c$. Причому фільтрація вхідного сигналу з коефіцієнтом $K_\phi = 10^{-2}$ та подальше підсилення у фотоелектронному помножувачі з коефіцієнтом $K_{\phi EP} = 10^4$ призводить до значного зменшення відношення сигнал/шум:

$$\varphi_\eta = \frac{\bar{n}_c}{\sqrt{\bar{n}_c + \bar{n}_n}} \frac{1}{\sqrt{K_\phi K_{\phi EP}}} . \quad (3)$$

Особливістю виявлення слабкого оптичного випромінювання є залежність як від абсолютного значення сигнальної складової, так і від значення завадової. Квантовомеханічна природа фотодетектування не дозволяє виявлення слабкого сигналу з максимальною ймовірністю навіть за відсутністю завад. Тому підвищення виявної здатності ЛЛС можливо реалізувати через збільшення кількості сигнальних фотонів, що реєструються приймальною системою. Для цього потребується детальне дослідження взаємодії лазерного випромінювання з турбулентною атмосферою, як основної причини зменшення інтенсивності випромінювання на поверхні КО. Виходячи з проведеного аналізу та розглянутих можливостей підвищення виявної здатності наземної ЛЛС, сформульовано основні завдання дослідження.

У другому розділі проведено розробку математичної моделі процесів формування, реєстрації та поширення когерентних оптичних сигналів у турбулентній атмосфері.

За допомогою ідеалізованої математичної моделі процесу переносу оптичного випромінювання показано, що розподіл інтенсивності лазерного випромінювання в дальній зоні визначається дифракційним розходженням та геометрією оптичної системи передавача. Зона Фраунгофера характеризується незалежністю відносних розподілів амплітуди і фази від відстані. Просторовий розподіл поля в площині дифракції визначається розподілом поля в площині випромінювача. Показано, що істотний вплив на інтенсивність випромінювання в дальній зоні має просторовий радіус області кореляції ізотропного випромінювання. Для зменшення розходження випромінювання оптична система передавача розширює лазерний пучок, адже ефективний розмір дифракційної картини обернено пропорційний розміру випромінюючої апертури. Центральний максимум інтенсивності плями Ейрі має кутовий радіус, в межах якого зосереджено 85% енергії загального світлового потоку. Порушення просторової когерентності випромінювання лазера призводить до збільшення кута розходження лазерного пучка. Для наземної локаційної системи розподіл інтенсивності в області передавальної оптичної системи визначається не тільки оптичною системою випромінювача, але й впливом прилеглої атмосфери.

Оскільки фазові спотворення мають найбільший вплив на розподіл інтенсивності в далекій зоні, в модель поширення оптичного випромінювання введено математичне представлення турбулентної атмосфери як фазового екрана. Кореляційні властивості коефіцієнта заломлення атмосфери на відстані $\Delta \vec{r}$ описуються законом Колмогорова-Обухова. Моделювання фазового екрану засноване на використанні структурної функції флуктуації фази:

$$D_{\varphi}(\Delta \vec{r}) = 6,88(\Delta \vec{r} / \rho_0)^{5/3}, \quad (4)$$

де ρ_0 – параметр Фріда, який характеризує спотворення, що вносяться турбулентної атмосферою в оптичне випромінювання. Параметр ρ_0 використовується як просторова характеристика масштабу турбулентності, що залежить від довжини хвилі λ випромінювання, відстані розповсюдження R для траси з зенітним кутом θ , точки розташування оптичної системи h та структурної сталої C_n^2 показника заломлення атмосфери:

$$\rho_0 = \left(\frac{0,06 \lambda^2}{3 \sec \theta C_n^2 (1 - \sqrt[3]{h/R}) h} \right)^{3/5}. \quad (5)$$

Параметр Фріда є просторовим масштабом атмосферних неоднорідностей, що обмежують потенційні можливості оптичної системи. Реальне розходження зонduючого випромінювання в турбулентній атмосфері пропорційне λ/ρ_0 , що виявляється на порядок більше дифракційного $2\lambda/D$. Таким чином, зміна дифракційної картини внаслідок впливу турбулентної атмосфери помітно позначається на розподілі інтенсивності випромінювання в площині об'єкта локації, що відбивається і на енергії реєстрованого ехо-сигналу.

Статистичні характеристики інтенсивності лазерного випромінювання в площині об'єкта локації будуть визначатися характеристиками турбулентної атмосфери. Особливість імпульсного методу лазерної локації з тривалістю зонduючого імпульсу порядку 10^{-10} с дозволяє розглядати турбулентне середовище як миттєву реалізацію фазового екрану, не вдаючись до усереднення розподілу інтенсивності за час стаціонарності атмосфери 10^{-2} с. Тоді структура миттєвого розподілу інтенсивності на об'єкті визначається флуктуаціями фази в момент проходження лазерного променя.

Центр інтенсивності випромінювання буде знаходитися в центральній області об'єкту коли нахил хвильового фронту сигналу буде відсутній. Для кожної миттєвої реалізації фазового екрану флуктуація кута нахилу хвильового фронту призведе до випадкового відхилення зони опромінення на об'єкті, тим самим зменшиться інтенсивність вторинного випромінювання в напрямі наземної приймальної системи. Це явище добре відоме як «блукання» лазерного променя.

Частоту відхилення зони опромінювання було визначено за допомогою чисельного моделювання з використанням спектральної функції флуктуації фази оптичного випромінювання у спотворювальному середовищі. На рис. 3, крива 1 ілюструє залежність частоти флуктуації фази оптичного випромінювання від просторового масштабу кореляції спотворення в турбулентному середовищі. Зменшення радіусу просторової кореляції від 50 до 5 см приводить до підвищення частоти перебудови фазового екрану від 10 до 350 Гц, максимальне значення відповідає денному стану атмосфери в теплу пору року. Частота еволюції турбулентного середовища характеризує появу станів турбулентної атмосфери з найменшим викривленням фазового фронту оптичного випромінювання.

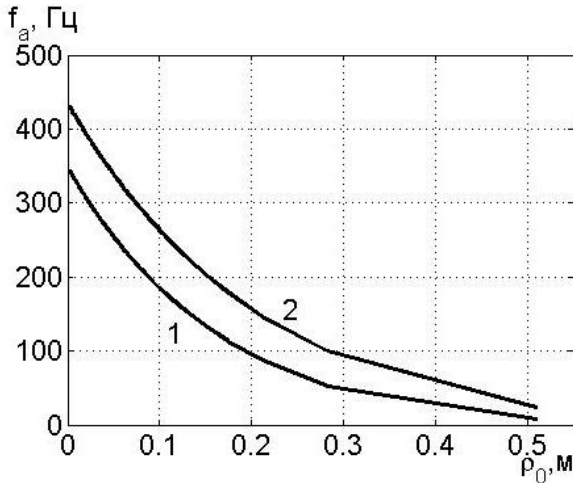


Рис.3 – Залежність частоти флуктуації атмосфери від радіуса кореляції атмосферних спотворень при нерухомому фазовому екрані (1), при переміщенні екрану зі швидкістю 1,035 м/с відносно оптичної системи передавача ЛЛС (2)

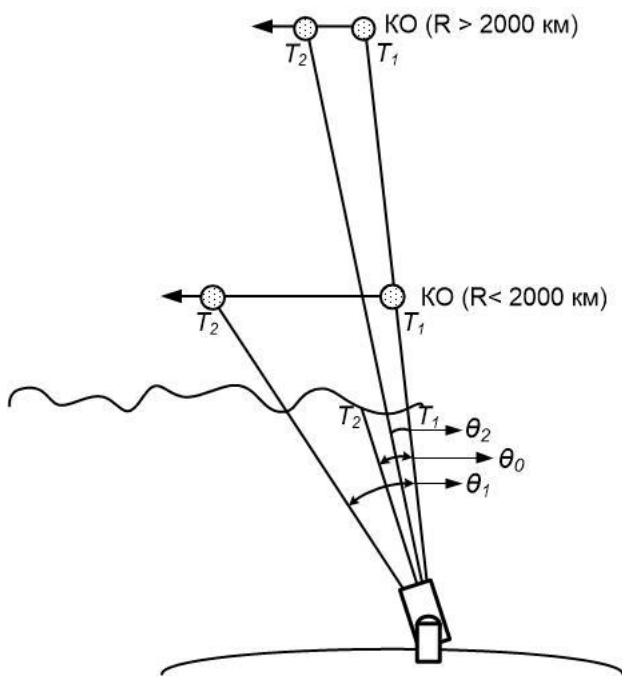


Рис.4 – Переміщення КО відносно кута ізопланатизму турбулентної атмосфери

на рис. 3, крива 2. Показано залежність частоти флуктуації випадкового поля, що переноситься з постійною швидкістю. Еволюція турбулентної атмосфери разом з пересуванням приводить до підвищення частоти флуктуації фази відносно нерухомого середовища. Рух фазового екрану зі швидкістю 1,035 м/с відповідає супроводу КО високоорбітальної групи. За законом Кеплера, залежно від висоти КО, су-

Подання турбулентної атмосфери як стаціонарного спотворювального середовища, дозволяє обмежити фазові спотворення як скорельовані у границях ізопланатичного кута. Для наземної ЛЛС цей кут можна визначити як тілесний кут $\theta_0 = \rho_0 / R_0$, хорда дуги якого на наведеній висоті R_0 турбулентного шару дорівнює ρ_0 . На рис. 4 схематично зображено переміщення низькоорбітального та середньоорбітального супутника відносно кута ізопланатизму за час стаціонарності атмосфери. Для середньоорбітальних об'єктів з віддаленістю більше 2000 км час прольоту всередині кута ізопланатизма істотно більше часу стаціонарності атмосфери, а низькоорбітальний КО переміщується на кутову відстань $\theta_1 \gg \theta_0 \gg \theta_2$.

Супровід об'єкта локації представлено як переміщення променя по фазовому екрану зі швидкістю v_u , що еквівалентно швидкості переміщення фазового екрану відносно нерухомого об'єкта. Часові статистичні характеристики флуктуації фази переведено в просторові, тоді кореляційна функція випадкового поля $u(r, t)$, що рухається: $R(r, t) = \langle u(r_1 + r - v_u t, t) \rangle = R(r - v_u t, 0)$. Моделювання рухомого фазового екрану представлено як послідовність екранів, що зміщуються зі швидкістю v_u . Частотний спектр W рухомого екрану і одновимірний просторовий спектр S пов'язані між собою співвідношенням:

$$W(r) = \frac{1}{v_u} S\left(\frac{r}{v_u}\right) = \frac{1}{v_u} F\left[\exp\left(-3,44 \left(\frac{r/v_u}{\rho_0}\right)^{5/3}\right)\right].$$

Результат моделювання флуктуацій фазового екрану, що рухається, представлено

провід буде проходити через турбулентну атмосферу із різною швидкістю, при зменшенні віддаленості КО спектр флуктуації фазових спотворень зміщується в зону високих частот. Отримані частотні характеристики турбулентної атмосфери накладають певні обмеження на частотний режим посилення зондувальних оптичних імпульсів локаційної системи.

Моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання базується на переході від хвильового подання оптичного поля з розподілом енергії до статистичного опису кількості фотоелектронів n , що приймаються за час T фотоприймачем з ефективністю η :

$$P(n) = \int_0^T P(n_E) P(E) dE = \int_0^T \frac{1}{n!} \left(\frac{\eta E}{h\nu} \right)^n e^{-\frac{\eta E}{h\nu}} P(E) dE.. \quad (6)$$

Середня кількість сигнальних фотоелектронів $\bar{n}_c$ залежить від багатьох факторів, які приводять до зменшення енергії оптичного сигналу, що надходить до приймального каналу:

$$E_{np} \approx E_{nep} k_{\Sigma} \frac{16 S_{\eta}}{\pi^2 R^4 \theta_a \theta_{\eta}}, \quad (7)$$

де E_{nep} – імпульсна енергія лазерного передавача; k_{Σ} – коефіцієнт енергетичного ослаблення в оптичній системі та атмосферному каналі; R – відстань до КО; S_{η} – площа розсіювання поверхні об'єкта локації, θ_a, θ_{η} – розбіжність лазерного пучка після проходження атмосфери та відбивання від локаційної цілі.

Визначення характеристик виявлення ґрунтується на використанні розподілу завади та суми сигналу з завадами. Проведено аналіз впливу зовнішніх параметрів на значення умовної ймовірності правильного виявлення при $F=10^{-5}$ на прикладі двох супутників з віддаленістю 600 км та 6000 км (рис. 5). Збільшення віддаленості об'єкта на порядок вимагає збільшення імпульсної потужності на 4 порядки, що для лазерного передавача є досить широким діапазоном потужності. Зазвичай, при локації низькоорбітальних об'єктів встановлюють нижній поріг допустимої енергії – одиниці мДж. Як видно з рис. 5, а, це значення з запасом забезпечує максимальну умовну ймовірність вірного виявлення. Розбіжність лазерного випромінювання в турбулентній атмосфері враховується параметром θ_a . Вплив атмосферних спотворень на зменшення кількості реєстрованих фотоелектронів при локації низькоорбітального КО компенсується регулюванням енергії передавача в межах 10 мкДж. Для середньоорбітальних КО (рис.5, б) вплив атмосфери призводить до необхідності збільшувати імпульсну енергію до 80 мДж, а це вже становить певні труднощі в роботі підсилювального каскаду лазерного передавача. Таким чином, знаючи робочі характеристики виявлення оптичних сигналів, можна розрахувати мінімальне число фотонів сигналу n_c , при якому прийом оптичного сигналу перевищує пороговий рівень із заданим ступенем надійності, та вірно обрати енергетичний потенціал ЛЛС при певній відстані до цілі та відомій статистичній моделі сигналу і шумів.

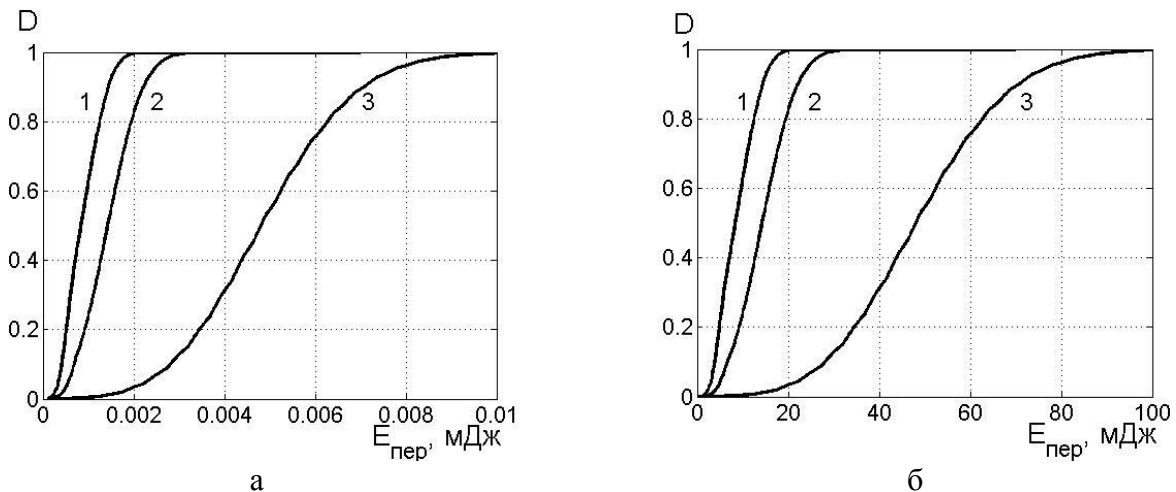


Рис. 5 – Залежність умовної ймовірності правильного виявлення КО при фіксованому значенні умовної ймовірності хибної тривоги $F=10^{-5}$ від енергії зонduючого імпульсу при різних станах турбулентної атмосфери: 1 - $\rho_0 = 29$ см, 2 - $\rho_0 = 17$ см, 3 - $\rho_0 = 5$ см; на відстані: а) 600 км, б) 6000 км

У третьому розділі розроблено методи формування і виявлення оптичних сигналів ЛЛС з урахуванням параметрів турбулентної атмосфери.

Врахування факторів зовнішнього середовища призводить до необхідності розширювати діапазон значень імпульсної енергії передавача для підтримки необхідного значення умовної ймовірності вірного виявлення.

Розроблено метод формування імпульсів лазерного передавача, що забезпечує підвищення імпульсної енергії шляхом зміни режиму накачування лазера. Збільшення енергетичного потенціалу ЛЛС відбувається через використання резервів лазерного передавача в частині перетворювання енергії накачування в когерентне оптичне випромінювання. Моделювання енергетичних процесів, що відбуваються в активному тілі лазера АІГ:Nd показало, що близько 20% енергії, яка могла бути випромінена як когерентне світло, переходить у втрати на люмінесценцію. Ці втрати мають нелінійну залежність від тривалості та енергії імпульсу оптичного накачування. Для певної тривалості імпульсу накачки існують оптимальні значення енергії імпульсу накачування, при яких ефективність перетворювання енергії в активному середовищі досягає максимуму. Причому скорочення тривалості оптичного накачування з 125 мкс до 50 мкс підвищує ефективність перетворення енергії в оптичному квантовому генераторі (ОКГ) майже в два рази. Тому існує можливість підвищення імпульсної енергії лазера шляхом управління втратами на люмінесценцію. Механізм зменшення втрат полягає в скороченні часу перебування активного елемента в інверсному стані.

Проте при скороченні тривалості розрядного імпульсу на лампу накачування зростає швидкість наростання струму в лампі, а це супроводжується підвищенням температури плазми і зміщенням максимуму розподілу спектру випромінювання лампи в ультрафіолетову зону. Частка оптичної енергії в смугах поглинання активного елемента АІГ:Nd скорочується. Завдання пошуку найбільш ефективного режиму оптичного накачування обмежується двома умовами: з одного боку режимом живлення імпульсної лампи, з іншого – ефективністю перетворювання енергії в активному елементі ОКГ.

Рішення знайдено у вигляді використання багатоступінчастих імпульсів, форма яких залежить від величини заданої енергії на виході ОКГ. За результатами наведеного моделювання проведено порівняння ефективності використання трьохступінчастого імпульсу загальної енергією 150 Дж відносно одноступінчастого розрядного імпульсу з тим самим значенням енергії. Трансформація форми імпульсу призводить до збільшення ефективності активного елемента на 40% і зменшення спектральної ефективності імпульсний лампи на 12,5%, що збільшує на 25% загальну ефективність квантрону.

Проведені теоретичні дослідження та результати моделювання були перевірені на експериментальній установці. Вимірюванню піддалися струм через імпульсну лампу і вихідна енергія лазера. Тривалість імпульсів накачування задавалася ємністю накопичувальних конденсаторів зарядного пристрою, енергія накачування визначалася напругою на накопичувачі. ККД квантрону визначався як відношення максимального значення люмінесценції до інтеграла квадрата струму в лампі за час дії імпульсу накачування. Проведені експериментальні дослідження підтвердили наявність значень оптичних імпульсів найбільш ефективних при впливанні на активний елемент твердотільного лазера. Обробка експериментальних вимірювань показала задовільне узгодження отриманих даних з теоретичними залежностями ефективності перетворення енергії в ОКГ. Експериментально було підтверджено дію трансформації форми імпульсу накачування (рис. 6) на ефективність квантрону. Для цього порівнювалися дані одноступінчастої, трьох та п'ятиступінчастої конфігурації імпульсу. При незмінній сумарній енергії накопичувача, змінюванням порядку комутації ємнісних ланок в зарядному пристрої, відбувався перерозподіл швидкості наростання струму в лампі. У результаті вдалося отримати вигаиш по ККД в системі імпульсна лампа – активний елемент на 27%, що дозволило отримати збільшення вихідної енергії на 13 мДж для п'ятиступінчастого імпульсу накачування.

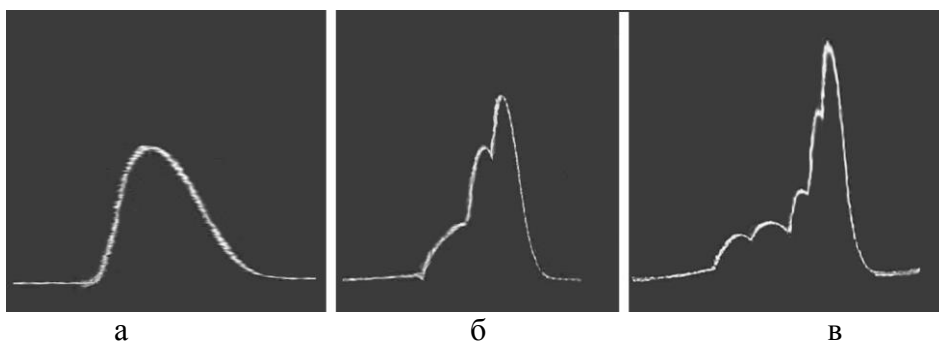


Рис. 6 – Імпульси струму в лампі накачування при енергії разряду 150 Дж. імпульсна енергія лазера склала а) 48 мДж, б) 56 мДж, в) 61 мДж

Розроблено метод підвищення виявної здатності ЛЛС, що реалізується через ефективне транспортування когерентного оптичного випромінювання крізь турбулентну атмосферу до поверхні об'єкта локації шляхом формування оптичних сигналів з урахуванням параметрів зовнішнього середовища. Ефект запропонованого методу розглянуто на прикладі локації супутника LAGEOS при різних станах спотворювального середовища (рис. 7).

Крива 1 відповідає залежності умовної ймовірності правильного виявлення від імпульсної енергії лазера при стані атмосфери з $\rho_0 = 40$ см, що для телескопів з діаметром 0,8 м можна розглядати як граничну виявну здатність. При цьому енергія передавача, достатня для виявлення відбитого сигналу становить 10 мДж. По мірі збільшення ступеня турбулентності атмосфери або з віддаленням об'єкту, відбувається зміщення характеристики виявлення в зону великих енергій. Умовна ймовірність правильного виявлення при такій самій енергії та $\rho_0 = 20$ см зменшується на 0,16 (точка D_2). Такий стан атмосфери може спостерігатися вночі в теплу пору року.

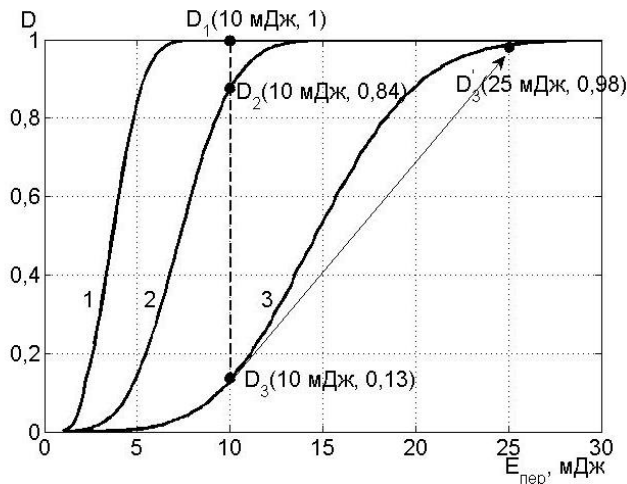


Рис. 7 – Умовна ймовірність правильного виявлення в залежності від імпульсної енергії передавача при локації геодезичного супутника LAGEOS за різних станах турбулентного середовища: 1 – $\rho_0 = 40$ см; 2 – $\rho_0 = 20$ см; 3 – $\rho_0 = 10$ см

Збільшення енергії імпульсу на 5 мДж дозволить перейти до максимальних значень умовної ймовірності правильного виявлення. Перехід до денного режиму локації супроводжується підвищенням ступеня спотворень, що вносяться турбулентним середовищем (рис. 7, крива 3). Як видно, умовна ймовірність правильного виявлення при цьому скорочується до 0,13 (точка D_3). Відповідно до запропонованого методу максимальне значення умовної ймовірності вірного виявлення може бути забезпечено при енергії оптичного імпульсу близько

25 мДж. Дію методу може бути графічно проілюстровано як перехід з точки D_3 в D'_3 на відповідній характеристиці виявлення. Показаний ефект може проявитися тільки в моменти посилки імпульсів, що відповідають моментам стану середовища з мінімальним нахилом хвильового фронту. Згідно з результатами моделювання флуктуації фазового фронту оптичного випромінювання (рис. 8, а), такі стани виникають з частотою 500 Гц для супутника LAGEOS при $\rho_0 = 10$ см.

Серед можливих станів середовища, що флюктує, виникають моменти, коли спотворення хвильового фронту виявляються мінімальними і оптичне випромінювання без відхилень розповсюджується в напрямі об'єкта. Такий стан середовища може забезпечити ефективне транспортування лазерного випромінювання і виявлення відбитого сигналу з максимальною ймовірністю. Причому спільне врахування стану турбулентної атмосфери і параметрів руху цілі призводить до підвищення частоти флуктуації фази спотворювального середовища по мірі збільшення швидкості об'єкта, а значить до збільшення моментів вільного проходження зондуючого променя. Для низькоорбітальних КО на висоті до 2000 км гранична частота проходження імпульсів передавача в основному визначається швидкістю переміщення КО і значно зростає із зменшенням віддаленості КО та

збільшенням швидкості (рис. 8, б). Межі зміни частоти посилок імпульсів для низькоорбітальних КО від 1 кГц до 20 кГц.

Значення енергії, необхідної для забезпечення заданої умовної ймовірності правильного виявлення визначається виходячи з урахування всіх втрат при поширенні лазерного випромінювання по локаційному тракту та відбиванні від локаційної цілі. Для типових об'єктів локації залежність енергії від стану зовнішнього середовища наведено на рис. 9. Як видно, вплив турбулентної атмосфери вимагає підвищення енергетичного потенціалу наземної локаційної системи.

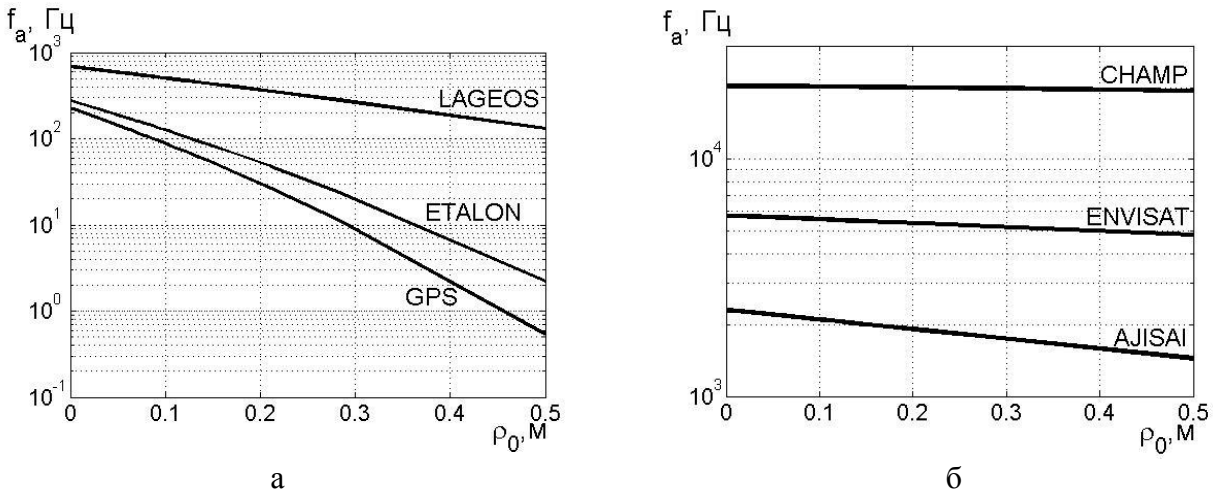


Рис. 8 – Залежності частоти флуктуації неоднорідностей атмосфери від просторового радіуса кореляції атмосферних неоднорідностей для супутників: а) – LAGEOS, ETALON, GPS; б) – CHAMP, ENVISAT, AJISAI

У порівнянні з дифракційним розходженням випромінювання, розходження внаслідок турбулентного розширення може більш ніж на порядок зменшити інтенсивність випромінювання на об'єкті локації. У такому випадку забезпечити задане значення умовної ймовірності правильного виявлення відбитого сигналу можна шляхом підвищення імпульсної енергії передавача в моменти, коли викривлення хвильового фронту в турбулентній атмосфері буде мінімальним. Тільки за таких умов можна очікувати відбивання та реєстрацію корисного оптичного сигналу.

Використання імпульсів передавача з більш високими значеннями енергії і частоти не призведе до збільшення числа відгуків від КО, оскільки частина з них пройде через атмосферні неоднорідності з відхиленням. У такому випадку відношення числа прийнятих реалізацій до кількості посилок буде < 1 , що говорить про зменшення ефективності локаційних спостережень.

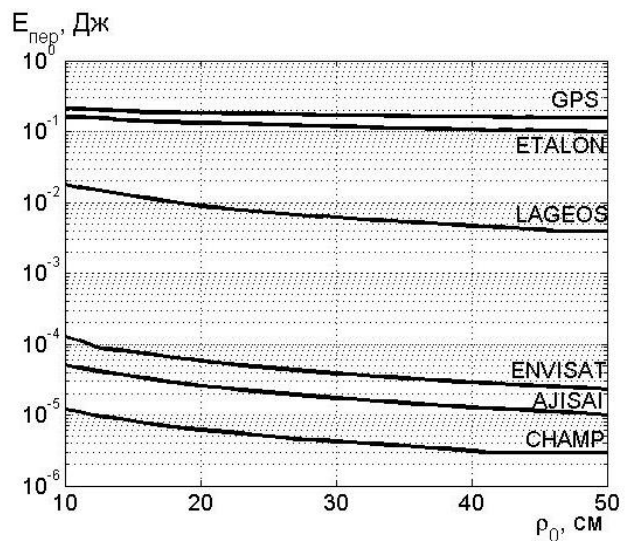


Рис. 9 – Залежність імпульсної енергії лазера при якій забезпечується $D = 0,9$ від радіуса просторової когерентності турбулентної атмосфери для супутників LAGEOS, ETALON, GPS, CHAMP, ENVISAT, AJISAI

Експериментальні дані височастотної локації підтверджують дані теоретичних розрахунків. Отримана на практиці гранична частота реєстрації відбитих імпульсів по порядку значень збігається з частотою появи моментів атмосфери з мінімальним нахилом хвильового фронту, що отримана за допомогою моделювання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі була вирішена науково-практична задача підвищення виявної здатності ЛЛС контролю космічного простору за рахунок врахування характеристик турбулентної атмосфери при формуванні оптичних сигналів. Рішення задачі ґрунтується на результатах математичного моделювання процесів формування, розповсюдження та реєстрації оптичних сигналів ЛЛС, яка враховує вплив параметрів турбулентної атмосфери та орбітального руху КО на енергетичні характеристики локаційних сигналів. Використання отриманих наукових результатів дозволяє підвищити виявну здатність наземної оптичної локаційної системи космічного призначення, на прикладі супутника LAGEOS значення умовної ймовірності правильного виявлення може бути підвищено з 0,1 до 0,9.

В результаті проведення досліджень за темою дисертаційної роботи отримані наступні основні результати.

Проведено аналіз впливу умов спостереження космічних об'єктів на виявну здатність ЛЛС та показано, що випадкове зменшення опромінення об'єкта локації відбувається внаслідок відхилення та розширення лазерного променя на неоднорідностях атмосфери. Однак турбулентний рух атмосферних мас періодично забезпечує такий стан, при якому хвильовий фронт оптичного випромінювання зазнає найменші флуктуації і промінь не відхиляється від прямолінійного напрямку розповсюдження. Можливість проходження випромінювання крізь нелінійне середовище з мінімальним спотворенням підтверджено проведенням лабораторним експериментом.

Теоретичне дослідження процесу поширення когерентних оптичних сигналів в турбулентній атмосфері дозволило провести математичне моделювання переносу зонduючого лазерного випромінювання до поверхні об'єкта локації. Показана визначальна роль фазових спотворень хвильового фронту в інтенсивності опромінення об'єкта. За допомогою представленої моделі досліджено частотні характеристики спотворювального середовища в режимі супроводження об'єкта. Спільне урахування фазових флуктуацій турбулентної атмосфери та руху об'єкту локації показало, що залежно від віддаленості КО та стану середовища змінюється частота флуктуації фази зондувального випромінювання. При зменшенні висоти орбіти КО спектр флуктуації фазових спотворень зміщується до зони високих частот аж до 20 кГц.

Оцінка виявної здатності локаційної системи показала залежність умовної ймовірності виявлення корисного сигналу від впливу середовища розповсюдження та параметрів об'єкта локації. Виявлення низькоорбітальних КО відбувається при значеннях імпульсної енергії передавача в діапазоні від 1 мкДж до 10 мкДж залежно від стану зовнішнього середовища. Для виявлення сигналу, відбитого від

об'єктів на висоті понад 6000 км енергія імпульсу лазерного передавача повинна регулюватися в діапазоні 20 – 200 мДж.

На підставі проведеного теоретичного дослідження розроблено метод підвищення виявної здатності лазерної локаційної системи за рахунок формування імпульсів лазерного передавача. Суть методу полягає в аналізі стану тракту розповсюдження зондуючого випромінювання та виборі параметрів імпульсів передавача: імпульсної енергії та частоти посилення зондувальних імпульсів. Обрані значення забезпечують найбільш ефективний перенос оптичного випромінювання через турбулентну атмосферу до поверхні об'єкта локації та приймальної оптичної системи.

Параметри імпульсів лазерного передавача залежать від значення необхідної умовної ймовірності правильного виявлення, стану турбулентної атмосфери, параметрів цілі: віддаленості та відбивної характеристики. Моделювання показало, що виявлення сигналів, відбитих від низькоорбітальних КО вимагає формування імпульсів лазерного передавача з малою імпульсною енергією (до 10 мкДж) та високою частотою посилення (до 20 кГц). При цьому на значення необхідної енергії істотно впливає відбивна характеристика КО. Локація середньо і високоорбітальних об'єктів при максимальному значенні умовної ймовірності правильного виявлення відбитого імпульсу вимагає використання імпульсів з енергією до 200 мДж, при цьому частота посилення може бути зменшена до 10 Гц. Із підвищенням ступеня викривлення нелінійного середовища та по мірі віддалення об'єкта локації потрібно збільшувати енергію лазерного передавача. Адекватність моделювання підтверджено відповідністю отриманих даних теоретичних розрахунків з даними практичної локації.

Підвищення енергетичного потенціалу локаційної системи можливо із застосуванням запропонованого методу формування лазерних імпульсів, який ґрунтується на скороченні втрат на люмінесценцію в активному елементі твердотілого лазера. Зазначений енергетичний резерв використовується через скорочення перебування активного елемента в інверсному стані за допомогою багатоступінчастого режиму живлення імпульсної лампи накачування. Трансформація форми імпульсу накачування дозволяє збільшити ефективність перетворення енергії в активному елементі лазера і підвищити імпульсну енергію лазерного передавача на 30%.

Проведені експериментальні дослідження застосування методу підвищення виявної здатності локаційної системи з використанням лазерного передавача на АІГ:Nd підтвердили можливість використання резерву енергетичного потенціалу передавача ЛЛС при переході до денного режиму локації, коли ступінь турбулентності атмосфери і рівень фонового засвічення позначаються на виявленні відбитого сигналу. На прикладі супутника LAGEOS показано підвищення умовної ймовірності виявлення відбитого сигналу з 0,1 до 0,9 при підсиленні спотворювальній дії зовнішнього середовища. Підвищення умовної ймовірності правильного виявлення досягнуто за рахунок збільшення імпульсної енергії на 15 мДж та підвищення частоти проходження імпульсів передавача до 500 Гц.

Отримані наукові результати реалізовані в роботі станцій лазерної локації Української мережі оптичних спостережень.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Стрелков А.И. Анализ эффективности обнаружения сигналов лазерных локационных систем контроля космического пространства с использованием модели турбулентной атмосферы / А.И. Стрелков, Е.И. Жилин, И.В. Любич // Системы обработки информации. – Харьков: Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, 2013. – Вып. 06 (113). – С. 137 – 142.

2. Любич І.В. Моделювання розповсюдження лазерного випромінювання крізь турбулентну атмосферу з урахуванням параметрів руху об'єкта локації / І.В. Любич // Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – К.: Компанія ВАІТЕ, 2013. – № 8 – С. 62 – 67.

3. Стрелков А.И. Учет параметров турбулентности атмосферы при формировании зондирующих сигналов лазерных локационных систем контроля космического пространства / А.И. Стрелков, Е.И. Жилин, А.П. Лытюга, И.В. Любич // Системы обработки информации. – Харьков: Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, 2012. – Вып. 09 (107). – С. 92 – 95.

4. Любич И.В. Исследование влияния параметров режима питания импульсной лампы на эффективность лазера Nd^{3+} / И.В. Любич // Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2010. – В. 17, № 942. – С. 76 – 80.

5. Любич І.В. Побудова сучасних твердотільних лазерів і модернізація лазерно-локаційної системи / І.В. Любич, С.М. Мельков, В.В. Мурга // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. Володимира Даля, 2009 – В. 138, № 8, Ч. 2 – С. 100 – 105.

6. Любич И.В. Исследование и оптимизация процессов накачки активных элементов передатчиков лазерных локационных станций / И.В. Любич // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник “Радиотехника” – Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2008. – В. 155, Ч. 1. – С. 268 – 273.

7. Пат. 89728 Україна, МПК H01S 3/09. Пристрій для накачування активних середовищ лазерів / І.В. Любич, Ю.С. Денищик; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет – №а200813764; заявл. 01.12.2008; опубл. 25.02.2010, Бюл. №4.

8. Любич И.В. Моделирование распространения лазерного излучения через турбулентную атмосферу с учетом параметров движения объекта локации / И.В. Любич // Щорічна робоча нарада української мережі лазерної локації та української мережі оптичних станцій. Збірник тез доповідей. – Миколаїв: Атолл, 2013. – С. 6 – 7.

9. Мурга В.В. Звіт про роботу станції лазерної локації «Алчевськ» / В.В. Мурга, С.А. Горельников, І.В. Любич, С.М. Мельков // Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – К.: Компанія ВАІТЕ, 2012. – № 7 – С. 29.

10. Любич И.В. Влияние турбулентной атмосферы на зондирующее излучение при лазерной локации ИСЗ / И.В. Любич // Збірник тез доповідей Всеукраїнської конференції «Відкриті фізичні читання». – Алчевськ: Донбаський державний технічний університет, 2012. – С. 30 – 31.

11. Мурга В.В. Звіт про роботу станції лазерної локації «Алчевськ» / В.В. Мурга, С.А. Горельников, І.В. Любич, С.М. Мельков // Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – К.: Компанія ВАІТЕ, 2011. – № 6. – С. 37.

12. Горельников С.А. Покращення параметрів каналу прийому сигналу від супутника / С.А. Горельников, І.В. Любич, С.М. Мельков // Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – К.: Компанія ВАІТЕ, 2010. – № 5. – С. 9 – 11.

13. Любич И.В. Моделирование процессов в активных элементах передатчиков лазерно-локационных систем при накачке оптическими импульсами с изменяющейся формой / И.В. Любич // Сборник трудов 3-го международного радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” (МРФ-2008), (Харьков, 22 – 24 октября, 2008). – Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2008. – Т. 1. Ч. 2. – С. 262 – 263.

14. Денищик Ю.С. Звіт про роботу станції лазерної локації «Алчевськ» за 2007 р. / Ю.С. Денищик, І.В. Любич, С.М. Мельков, В.В. Мурга // Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – К.: Компанія ВАІТЕ, 2007. – №2. – С.57.

15. Любич И.В. Оптимизация режимов работы активных сред лазеров ЛЛС при наблюдении КО / И.В. Любич // Материалы международной научной конференции «Современные проблемы астрономии» (Одесса, 12 – 18 августа, 2007). – Одесса: Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, 2007. – С. 26.

16. Мурга В.В. Концепция развития научного комплекса Алчевской астрономической обсерватории / В.В. Мурга, И.В. Нагай, В.С. Эссельбах // Труды 2-го Международного радиоэлектронного форума (МРФ-2005) "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". Международная конференция по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), (Харьков, 19 – 23 сентября, 2005). – Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2005. – Т.2. – С. 473 – 475.

АНОТАЦІЯ

Любич І.В. Підвищення виявної здатності лазерної локаційної системи контролю космічного простору за рахунок врахування характеристик турбулентної атмосфери при формуванні оптичних сигналів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

У дисертаційній роботі була вирішена актуальна науково-прикладна задача розробки методу формування оптичних сигналів лазерної локаційної системи з урахуванням параметрів турбулентної атмосфери. Проведено аналіз впливу умов спостереження космічних об'єктів на виявну здатність лазерної локаційної системи, та обґрунтована можливість її підвищення. Розроблено математичну модель процесу розповсюдження когерентних оптичних сигналів в турбулентній атмосфері, що враховує параметри переміщення об'єкту. Застосування запропонованої

математичної моделі турбулентної атмосфери дозволяє сформулювати вимоги до параметрів зондувальних сигналів в широкому діапазоні умов спостереження космічних об'єктів. Розроблено метод формування когерентних оптичних сигналів, який підвищує енергетичний потенціал лазерної локаційної системи за рахунок реалізації багатоступеневого оптичного накачування активного елемента твердотільного лазера. Використання методу дозволяє підвищити імпульсну енергію лазерного передавача на 30%. Розроблено метод підвищення виявної здатності наземної локаційної системи за рахунок врахування параметрів турбулентної атмосфери в процесі формування та реєстрації локаційних сигналів. Запропонований метод дозволяє підвищити умовну імовірність вірного виявлення з 0,1 до 0,9 у денному режимі на прикладі локації супутника групи LAGEOS. Працездатність запропонованих методів підтверджена експериментально.

Ключові слова: лазерна локація, космічний об'єкт, виявна здатність, турбулентна атмосфера, математична модель, оптичне накачування.

АННОТАЦИЯ

Любич И.В. Повышение обнаружительной способности лазерной локационной системы контроля космического пространства за счет учета характеристик турбулентной атмосферы при формировании оптических сигналов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

В диссертационной работе была поставлена и решена актуальная научно-прикладная задача разработки метода формирования оптических сигналов лазерной локационной системы с учетом параметров турбулентной атмосферы.

Проведен анализ влияния условий наблюдения космических объектов на обнаружительную способность наземной оптической локационной системы. Показано, что случайное уменьшение освещенности объекта локации происходит вследствие отклонения и рассеяния лазерного луча на неоднородностях атмосферы. С помощью лабораторного эксперимента обоснована возможность эффективной транспортировки лазерного излучения через искажающую среду. Показана определяющая роль фазовых искажений волнового фронта в интенсивности облучения объекта. Разработана математическая модель процесса распространения когерентных оптических сигналов в турбулентной атмосфере, учитывающая параметры перемещения объекта. С помощью представленной модели исследованы частотные характеристики искажающей среды в режиме сопровождения объекта. Применение предложенной математической модели турбулентной атмосферы позволяет сформировать требования к параметрам зондирующих сигналов в широком диапазоне условий наблюдения космических объектов. Разработан метод формирования когерентных оптических сигналов, который повышает энергетический потенциал лазерной локационной системы за счет реализации многоступенчатого оптической накачки активного элемента твердотельной лазера. Использование метода позволяет повысить импульсную энергию лазерного передатчика на 30%.

Разработан метод повышения обнаружительной способности наземной локационной системы за счет учета параметров турбулентной атмосферы в процессе формирования и регистрации оптических сигналов.

Суть метода заключается в анализе состояния тракта распространения зондирующего излучения и выборе параметров импульсов передатчика: импульсной энергии передатчика и частоты следования зондирующих импульсов. Выбранные значения обеспечивают наиболее эффективный перенос оптического излучения через турбулентную атмосферу к поверхности объекта локации. Параметры импульсов лазерного передатчика определяются значением условной вероятности правильного обнаружения, характеристиками состояния искажающей среды и параметрами цели: удаленностью отражательной характеристикой. Моделирование показало, что обнаружение сигналов, отраженных от низкоорбитальных спутников требует посылки зондирующего излучения малой импульсной энергии (до 10 мкДж) и высокой частоты следования (до 20 кГц). При этом на значение требуемой энергии существенно влияет отражательная характеристика КО. Предложенный метод позволяет повысить условную вероятность правильного обнаружения с 0,1 до 0,9 в дневном режиме на примере локации спутника группы LAGEOS. Работоспособность предложенных методов подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: лазерная локация, космический объект, обнаружительная способность, турбулентная атмосфера, математическая модель, оптическая накачка.

ANNOTATION

Liubych I.V. The space control laser ranging system's detectability improving due to turbulent atmosphere considering on optical signals generation. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 05.12.17 – radio engineering and television systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2014.

The thesis covers solved actual scientific and applied problem develop a method of generation laser ranging system's optical signals within the parameters of the turbulent atmosphere. The analysis of the effects the space objects observation conditions on laser ranging system detectability and the opportunity of its increasing. A mathematical model of the coherent optical signals propagation through the turbulent atmosphere, which takes into account the moving object's parameters. The application of the proposed mathematical model of turbulent atmosphere allows to create requirements for the probing signals parameters in the wide range of space objects observation state. The of coherent optical signals generation method was developed, which increases power budget due to multi-stage optical pumping of solid-state laser active element. The method allows to increase the pulse energy of the laser transmitter by 30% for improving detectability of ground ranging system by taking into account the turbulent atmosphere parameters on ranging signals generation. The proposed method can improve the probability of correct detection from 0.1 to 0.9 in day observation on example of LAGEOS satellite group. The efficiency of the proposed methods confirmed experimentally.

Keywords: laser ranging, space object, detectability, turbulent atmosphere, mathematical model, optical pumping.