

УДК 504.064(06) :623.618.2

М.П. Буданов, Б.О. Демідов

Харківський університет Повітряних Сил ім. Кожедуба, Харків

МОДЕЛЬ ОБЛІКУ ВПЛИВУ ТУРБУЛЕНТНОСТІ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛІДАРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЮ БОЙОВИХ І СИЛЬНОДІЮЧИХ ОТРУЙНИХ РЕЧОВИН

Розглянуті основні чинники, що впливають на проходження лазерного пучка, відбитий від неоднорідного середовища – об'єкту зондування, є в загальному випадку випадковим випромінюванням, залежним від багатьох чинників: розмірів, властивостей поверхні і орієнтації об'єкту зондування по відношенню до напрямку на джерело і приймач лідарної системи; довжини хвилі, тимчасової і просторової когерентності лазерного випромінювання. Показано, що для оцінки працездатності лідарних систем необхідно мати в своєму розпорядженні статистичні дані про середні профілі відповідних параметрів, їх повторюваність і довільні інтервали. Отримана модель обліку впливу турбулентності на параметри оптичної хвилі при розповсюдженні лазерного пучка в приземному шарі атмосфери, яка визначається значенням структурною характеристикою показника заломлення повітря і довгої траси.

Ключеві слова: турбулентність, лазерне випромінювання, лідарні системи, об'єкт зондування.

Вступ

Постановка проблеми. На початок 80-х років ХХ ст. лазерна локація сформувалася в самостійний науково-технічний напрям. Значні досягнення квантової електроніки дозволили створити унікальні по своїх характеристиках лазерні локаційні (лідарні) системи, які сьогодні ефективно використовуються у військовій області для: спостереження за літальними апаратами (літаками, крилатими і стратегічними ракетами, штучними супутниками-розвідниками); дальнометрії (визначення відстані до мети в артилерії і авіації); дослідження стану приземної атмосфери на наявність радіоактивних і хімічних речовин та ін. При розробці лазерних лідарних систем дуже важливо мати попередню оцінку їх тактико-технічних характеристик – дальності дії, кутового дозволу та ін. Ця оцінка дозволить наперед визначити виконання поставлених задач, які можна вирішувати за допомогою лідара, а це, у свою чергу робить вплив на його конструктивну і схемну побудову.

Аналіз досліджень та публікацій. Аналіз показує [1–4], що попередню оцінку тактико-технічних параметрів лідара можна отримати тільки на підставі розрахунку характеристик лазерних сигналів, що реєструються приймачем лідара. Такий розрахунок може служити основою для знаходження діапазону значень характеристик і їх середніх значень, а також для ряду додаткових даних про тимчасові і просторові характеристики сигналу, що приймається [2, 4]. Отже, розрахунок характеристик лазерних сигналів, що приймаються, з урахуванням впливу на них зовнішніх чинників (метеорологічні і кліматичні умови; горизонтальна і вертикальна швидкість вітру; тиск, температура, вологість, турбулентність атмосфери та ін.), є однією з важливих проблем в проектуванні нових і удосконаленні лідарних систем [1, 4].

Метою статті є розробка моделі обліку впливу турбулентності атмосфери на оптичні властивості і характеристики лазерного променя при проходженні його через неоднорідні середовища, які можуть містити отруйливі (ОР), бойові (БОР), сильнодіючі отруйні речовини (СДОР) і радіоактивні ізотопи: йод - ^{131}I , рутеній - ^{106}Ru , радій - ^{226}Ra , цезій - ^{137}Cs , стронцій - ^{90}Sr , плутоній - ^{238}Pu , америцій - ^{241}Am , полоній - ^{210}Po , ітрій - ^{90}Y .

Основний матеріал

Лазерний сигнал, відбитий від неоднорідного середовища – об'єкту зондування, є в загальному випадку випадковим випромінюванням, залежним від багатьох факторів: розмірів, властивостей поверхні і орієнтації об'єкту зондування по відношенню до напрямку на джерело і приймач лідарної системи; довжини хвилі, тимчасової і просторової когерентності лазерного випромінювання. Тому, для оцінки працездатності лідарних систем необхідно мати в своєму розпорядженні статистичні характеристики лазерного сигналу і перешкод, що поступають на вхід фотоприймального пристрою (ФПП). У зв'язку з цим, автором пропонується, як вихідні дані для розрахунку середніх енергетичних і статистичних характеристик відбитого лазерного сигналу, використовувати характеристики об'єкту зондування, тобто якісні і кількісні параметри стану атмосфери неоднорідних середовищ.

У лідарних системах прийом сигналу завжди здійснюється на фоні зовнішнього і внутрішнього шуму, який в основному обумовлений впливом перешкоди, викликані зворотним розсіянням лазерного випромінювання в приземних шарах атмосфери і фоновими перешкодами. Перешкода зворотного розсіяння виникає у результаті зворотного об'ємного

розсіяння лазерного пучка підсвітла в товщі неоднорідного середовища з ОР, СДЯР і радіоактивними ізотопами. Найбільші утруднення в лазерних вимірюваннях викликають нелінійні ефекти, викликані турбулентністю атмосфери, які вносять випадкові і систематичні помилки, складним чином залежні від довжини хвилі випромінювання, параметрів лазерного джерела і приймача, схеми лідара, довжини траси розповсюдження випромінювання, метеорологічних умов та ін.

Турбулентне спотворення лазерних пучків в атмосфері обумовлене наступним. Турбулентні неоднорідності повітря створюють випадкову просторово-часову структуру поля показника заломлення атмосфери. Така структура поля показника заломлення атмосфери є причиною випадкових змін амплітуди і фази лазерного випромінювання, що розповсюджується в приземній атмосфері. Випадкова амплітудно – фазова модуляція лазерного випромінювання, викликана турбулентністю атмосфери, приводить до втрати когерентності випромінювання, що розповсюджується, випадкових зсувів лазерного променя, флуктуацій потужності локаційного сигналу і інших флуктуаційних ефектів.

Вимоги до розробки моделі атмосфери. Кількісні дані про прозорість атмосфери для випромінювань лазерних імпульсів разом із знанням оптичних характеристик вимагають також знання даних про розподіл фізичних параметрів атмосфери: концентрації поглинаючих газів, загального тиску, температури, концентрації, хімічного складу, спектрів розмірів і форма частинок аерозолів.

Варіації значень вказаних характеристик обумовлюють відповідні варіації компонентів коефіцієнтів ослаблення і прозорості атмосфери для заданих довжин хвиль. У зв'язку з цим важливо мати статистично забезпечені моделі атмосфери, тобто дані про середні профілі відповідних параметрів, їх повторюваність і довірчі інтервали.

Автором пропонується модель обліку впливу турбулентності в неоднорідних середовищах. Імпульси лазерного випромінювання, розповсюджуючись в атмосфері, випробовують енергетичні втрати не тільки за рахунок явищ розсіювання і поглинання, але також під впливом атмосферної турбулентності [3]. Турбулентні флуктуації показника заломлення приводять до спотворення початкових параметрів лазерного пучка (що мають важливе значення для інтерпретації результатів лазерного зондування атмосфери), а також є причиною флуктуацій сигналу, які обмежують чутливість методу поглинання на довгих трасах. Так, наприклад, відлуння-сигнал лазерного імпульсу залежить від когерентності просторово – тимчасових флуктуацій інтенсивності і розподілу фази усередині лазерного пучка, що розповсюджується, його розмірів і випадкових переміщень в просторі.

При розповсюдженні променя лазера по довгій трасі турбулентність може викликати його розщеп-

лювання і зміну напрямку розповсюдження, зумовивши тим самим часткову або повну втрату сигналу на відбивачі або на приймальній оптиці.

Зниження когерентності лазерного променя виявляється дуже важливим у разі дистанційних вимірювань швидкості вітру доплеровськими методами. Ступінь фокусування випромінювання визначає мінімальні розміри зондуемого об'єму, а випадкові зрушення в положенні лазерного променя обмежують стабільність цього об'єму. Обидва ці параметра є функціями турбулентності.

Розгляд впливу атмосферної турбулентності на параметри нескінченних і просторово обмежених оптичних хвиль викладений в роботах [1, 2]. Тому тут приведемо лише основні результати, важливі для методів лазерного контролю.

Флуктуація інтенсивності лазерного променя, що розповсюджується через атмосферу, характеризується дисперсією логарифма інтенсивності. У разі слабких флуктуацій це може бути виражено наступної формулою, отриманою з теорії обурень:

$$\delta_{\text{nl}}^2 = 1,23q_n C_n^2 K^{7/6} L^{11/6}, \quad (1)$$

де коефіцієнт q_n залежить від дифракційного розміру випромінюючої апертури (змінюється не більше ніж в чотири рази); C_n^2 – структурна характеристика флуктуацій біля середнього значення показника заломлення; $K = 2\pi/\lambda$ – амплітуда хвилевого вектора випромінювання і L – довжина траси зондування.

Рівняння правильно описує експериментальні результати у випадках, коли $\delta_{\text{nl}}^2 \leq 0,6$. Для $\delta_{\text{nl}}^2 \geq 0,6$ зміряні значення дисперсії не підкоряються виразу (1), бо в деякій крапці вона досягає насичення (область сильних флуктуацій). В цьому випадку для відносної дисперсії флуктуацій інтенсивності у френелевской зоні дифракції колімированного пучка отриманий наступний наближений вираз:

$$\delta_{\text{I}}^2 = 1 + 0,87(C_n^2 K^{7/6} L^{11/6})^{-2/5}. \quad (2)$$

Приведене тільки що рівняння у вказаних межах його застосовності описує експериментальні результати з помилкою не більше 10...30% [2, 3].

У разі сфокусованого пучка величину можна оцінювати з рівняння

$$\delta_{\text{I}}^2 = 1 + 4[0,87(D_s(2a_0))]^{-4/5}, \quad (3)$$

яке знаходяться в задовільній згоді з експериментом, де $D_s(2a_0)$ – дисперсія різниці фаз по діаметру передавальної апертури.

Розподіл інтенсивності лазерного пучка в плоскості перпендикулярній напрямку розповсюдження, визначає розмір пучка і може бути представлено у вигляді

$$I(\rho, z) = I(z, 0) \exp(-\rho^2/a^2), \quad (4)$$

де z і ρ – подовжня і поперечна координати; a – ефек-

тивний радіус лазерного проміння

$$a = a_0 \left\{ \left(1 - z/R_p \right)^2 + Q_A^2 \left[1 + 0,47 D_s^{6/5} (2a_0) \right] \right\}^{1/2},$$

де a_0 – початковий радіус проміння; R_p – радіус кривизни фазового фронту; $Q_A = Ka^2/z$ – хвильовий параметр апертури.

З того рівняння видно, що лазерний промінь можна сфокусувати (тобто $z/R_p = 1$), тільки тоді $Q_A [1 + 0,47 D_s^{6/5} (2a_0)]^{1/2} < 1$. Це вимога, очевидно, не виконується при дуже великих дисперсіях фази по діаметру передавальної апертури [де $D_s (2a_0) \gg 1$], коли розмір проміння у фокусі не залежить від діаметру передавальної апертури.

Дисперсію швидких змішень положення лазерного променя унаслідок випадкових флуктуацій рефракції атмосфери можна оцінити з наступного рівняння:

$$\delta_d^2 = 1,7 C_n^2 z^2 (2a_0)^{-1/3}, \quad (5)$$

Це рівняння справедливе поблизу зони дифракції світла ($Q_A \ll 1$) при малих значеннях параметра $D_s (2a_0)$. У разі довільних значень Q_A і $D_s (2a_0)$ виразів (6) повинно бути виправлено.

Дефокусування проміння ($z/R_p \rightarrow \infty$) і збільшення дифракційної расходимості приводять до змен-

шення дисперсії випадкових зрушень. Якщо початковий діаметр пучка порівняний із зовнішнім масштабом турбулентності (зазвичай це має місце для випромінюючих апертур з радіусом 50 см і більш), δ_d^2 зменшується у декілька разів в порівнянні з визначуваною з (5) величиною.

Таким чином, в широкому інтервалі просторових частот єдиним параметром, що характеризує інтенсивність турбулентних пульсацій показника заломлення в атмосфері, є структурна характеристика C_n^2 . У атмосфері значення C_n змінюється від $10^6 \text{ м}^{-1/3}$ (сильна турбулентність) до $10^8 \text{ м}^{-1/3}$ (слабка турбулентність).

За результатами отриманих даних [1–3], значення C_n сильно залежить від часу доби (рис. 1). На рис. 1 видно, що значення структурної характеристики мале вночі та у ранці до тих пір, поки не утворюються конвекції від нагріву Сонцем земної поверхні.

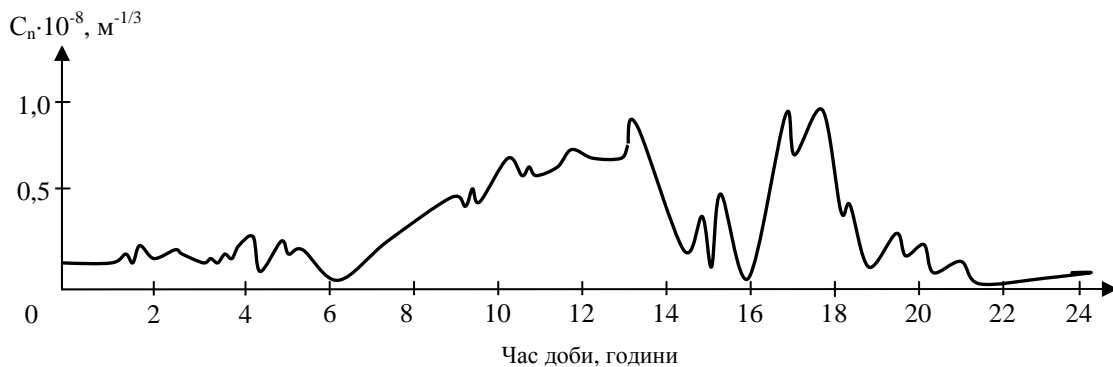


Рис. 1. Зміна структурної характеристики показника заломлення протягом доби

Перемішуванням висхідних теплових об'ємів повітря з низхідними холодними приводить до появи неоднорідності температури і збільшення значення C_n . Цей процес продовжується до тих пір, поки потік сонячного випромінювання пополудні не зменшиться, внаслідок чого почне убавати C_n .

Глибокі завмирання значень C_n між 14 і 16 ч обумовлено мінливою хмарністю (коли хмари тимчасово закривають Сонце, поверхня землі швидко охолоджується, температура прилеглого шару повітря вирівнюється і значення C_n зменшується).

Із збільшенням висоти над поверхнею Землі значення C_n^2 убаває в приземному шарі по закону $C_n^2 \approx H^{-\alpha}$, показник ступеня α набуває значень 4/3 або 2/3 залежно від типу термічної стратифікації, що реалізується в атмосфері.

На відміну від добре вивченого приземного

шару ($H < 10 \text{ м}$), відомості про турбулентність у вільній атмосфері (до висоти близько 20 км) в даний час порівняно небагаточисельні. Вони показують сильну випадкову мінливість значень C_n^2 при зміні висоти (рис. 2).

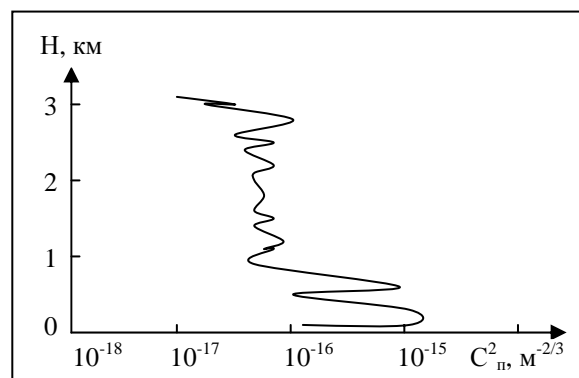
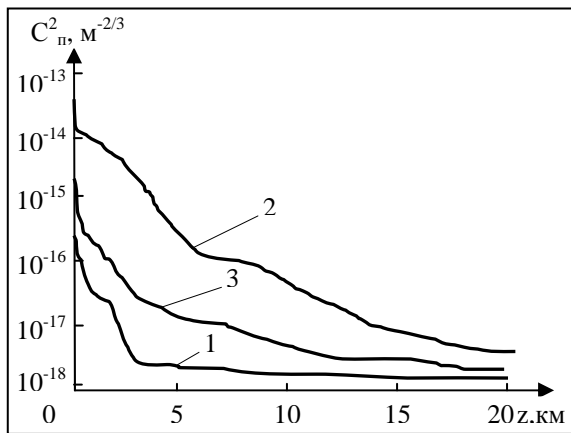


Рис. 2. Залежність C_n^2 від висоти H

На рис. 2 показу залежність значень від висоти $H \leq 3,2$ км. Приведена крива є результатом усереднювання даних за три послідовно узяті дні; одиничні висотні профілі були отримані в денні години. Три профілі були усереднені, а потім до отриманої кривої застосовувалося ковзаюче середнє з інтервалом 100. Навіть після усереднювання хід кривої указує на сильну мінливість значень.

Якби була відсутня загальна тенденція зменшення значень із збільшенням висоти, та поведінка кривої мала б абсолютно випадковий характер.

Авторами пропонується використовувати просту модель залежності структурної характеристики показника заломлення повітря від висоти в нижньому шарі атмосфери, яка дозволить оцінювати значення енергетичних характеристик лідара (рис. 3).

Рис. 3. Висотні профілі C_n^2 при $z=0,01 \dots 20,0$ км

На рис. 3. приведені висотні профілі C_n^2 (1-3) для висоти $z = 0,01 \dots 20,0$ км. за відомими експериментальними даними для довжини хвилі випромінювання 0,5 мкм: крива 1 – по найменших із спостережуваних значень C_n^2 (як найкращі умови розповсюдження лазерного випромінювання); крива 2 – по максимальних із спостережуваних значень C_n^2 (як найгірші умови розповсюдження лазерного

випромінювання; крива 3 – середнє арифметичне значень C_n^2 . Необхідно також відзначити, що профіль структурної характеристики показника заломлення повітря $C_n^2(z)$ також залежить і від довжини хвилі випромінювання:

$$C_n^2(z, \lambda) = \alpha(\lambda) \cdot C_n^2(z, \lambda = 0,5 \text{ мкм}).$$

де $C_n^2(z, \lambda = 0,5 \text{ мкм})$ – профіль структурної характеристики показника заломлення повітря для довжини хвилі 0,5 мкм.

Висновки

1. Запропонована модель обліку впливу турбулентності на розповсюдження лазерного випромінювання.

2. Визначені турбулентні умови розповсюдження випромінювання.

Список літератури

1. Зуев В.Е. Оптика турбулентной атмосферы / В.Е. Зуев, В.А. Банах, В.В. Покасов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 270 с.
2. Гурвич А.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А.С. Гурвич, А.И. Кон. – М.: Наука, 1976. – 277 с.
3. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере / В.Л. Миронов. – Новосибир.: Наука, 1981. – 242 с.
4. Буданов П.Ф., Лідари. Основні властивості і перспективи застосування в зразках озброєння і військової техніці / М.П. Буданов, Б.О. Демидов // Система озброєння і військова техніка. – 2008. – Вип. 1(13). – С. 30-37.

Надійшла до редколегії 11.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МОДЕЛЬ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИДАРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ БОЕВЫХ И СИЛЬНОДЕЙСТВУЮЩИХ ЯДОВИТЫХ ВЕЩЕСТВ

М.П. Буданов, Б.А. Демидов

Рассмотрены основные факторы, которые влияют на прохождение лазерного пучка, отраженные от неоднородной среды – объекта зондирования, являются в общем случае случайным излучением, зависящим от многих факторов: размеров, свойств поверхности и ориентации объекта зондирования по отношению к направлению на источник и приемник лидарной системы; длины волны, временной и пространственной когерентности лазерного излучения. Показано, что для оценки работоспособности лидарных систем необходимо располагать статистическими данными о средних профилях соответствующих параметров, их повторяемости и доверительных интервалах. Получена модель учета влияния турбулентности на параметры оптической волны при распространении лазерного пучка в приземном слое атмосферы, которая определяется значением структурной характеристики показателя преломления воздуха и длиной трассы.

Ключевые слова: турбулентность, лазерное излучение, лидарные системы, объект зондирования.

MODEL OF ACCOUNT OF INFLUENCE OF TURBULENCE ON OPTICAL PROPERTIES OF LASER RADIATION OF LIDARNIKHS OF SYSTEMS FOR CONTROL OF BATTLE AND DRASTIC POISONOUS MATTERS

M.P. Budanov, B.A. Demidov

Basic factors which influence on passing of laser bunch are considered, reflected from a not uniform environment – sounding object, are in general case a casual radiation, dependency upon many factors: sizes, properties of surface and orientation of sounding object in relation to sending to the source and receiver of the lidar system; wave-length, temporal and spatial coherentness of laser radiation. It is rotined that for the estimation of capacity of the lidar systems it is necessary to dispose statistical information about the middle types of the proper parameters, their repetition and confidence intervals. The model of account of influence of turbulence is got on the parameters of optical wave at distribution of laser bunch in the ground layer of atmosphere which is determined the value of structural description of index of refraction of air and long route.

Keywords: turbulence, laser radiation, lidar systems, sounding object.