

# УМОВА ОПТИМАЛЬНОГО ФОКУСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НА ВЕЛИКІЙ ВІДСТАНІ

О. К. Могозюк<sup>1, a</sup>, Л. А. Держипольська<sup>2</sup>, Л. М. Кохтич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Фізико-технічний інститут

<sup>2</sup>Інститут фізики Національної академії наук України

## Анотація

У роботі представлений теоретичний опис оптимального фокусування лазерного пучка на великій відстані. Показано, що умова утворення мінімального діаметру пучка не співпадає з умовою формування перетяжки. Знайдено оптимальний стан фокусування лазерного пучка на дальній дистанції.

*Ключові слова:* фокусування на великій відстані, перетяжка лазерного пучка,

## Вступ

Лазерні технології дуже важливі в сучасному світі, так як вони використовуються в багатьох областях людської діяльності. Унікальні властивості лазерних випромінювачів дозволяють використовувати їх у різних галузях науки та техніки: промисловості, медицині, енергетиці тощо.

Можливість фокусування пучка із заданими параметрами в реальних умовах на далекій дистанції дозволяє застосовувати лазери при дослідженні атмосфери, в космічній та військовій галузі. В сучасних дослідженнях лазерні системи використовують при аналізі атмосфери та процесів, що протікають у ній [1]. Для прикладу, проводяться дослідження процесів, які важливі при кліматоутворенні, контролюється забрудненням атмосфери продуктами природного та індустріального походження, також є можливість, за короткий час, визначити склад повітря і отримати найрізноманітніші відомості про властивості атмосфери на різних висотах (детальне дослідження хмар, шарів атмосфери і т. д.). Тож використанням лазерних систем моніторингу в таких експериментах дозволяє збільшити діапазон даних досліджуваних величини, в порівнянні з даними, які давали радіолокаційні системи.

Окремий напрямок дослідження, який наразі є актуальним в області, де застосовуються лазерні випромінювачі, спрямований на побудову багатофункціональних лазерних систем, які використовуються у військовій галузі. Це зумовлено тим, що лазерна зброя має ряд переваг у порівнянні зі звичайними системами зброї [2]: по-перше, висока швидкодія, зумовлена швидкістю поширення світла, що дозволяє вражати далекі цілі дуже швидко після виявлення; по-друге, цілісність системи, тобто можливість використовувати лазер як для виявлення цілі так і для

її враження; по – третє, це невеликі розміри, адже, розвиток сучасної лазерної галузі дозволяє сконструювати малогабаритні лазерні системи, які можуть забезпечувати високу ефективність роботи.

Проте варто відмітити, що до сих пір для багатьох прикладних задач залишається актуальною саме проблема формування пучка із заданими параметрами по його розбіжності та потужності випромінювання в реальній атмосфері на далеких дистанціях, тож цій задачі і була присвячена наша робота.

## 1. Базові властивості Гаусового пучка

Оскільки в роботі всі розрахунки проводяться для гаусового пучка тож розглянемо його детальніше. Гаусовий пучок – це пучок монохроматичного електромагнітного випромінювання, амплітуда огинаючої якого в поперечній площині описується розподілом Гауса [3]; відповідно інтенсивність такого пучка має гаусів профіль і запишеться як:

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega(z)^2}\right) = \frac{2P}{\pi\omega(z)^2} \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega(z)^2}\right) \quad (1)$$

де  $I_0$  – максимальна інтенсивність в центрі пучка,  $r$  – радіальна відстань від осі,  $\omega(z)$  – радіус пучка по рівню інтенсивності  $\frac{1}{e^2}$  від  $I_0$ ,  $z$  – осьова відстань від перетяжки (мінімального діаметру пучка),  $P$  – повна потужність випромінювання.

Так як профіль інтенсивності не є постійним при поширенні пучка в просторі (рис. 1), існує залежність  $\omega(z)$  від траєкторії поширення  $z$ . По мірі розповсюдження, пучок збігається та розбігається однаково по обидві сторони перетяжки (рис. 2).

<sup>a</sup>alexm10062000@gmail.com

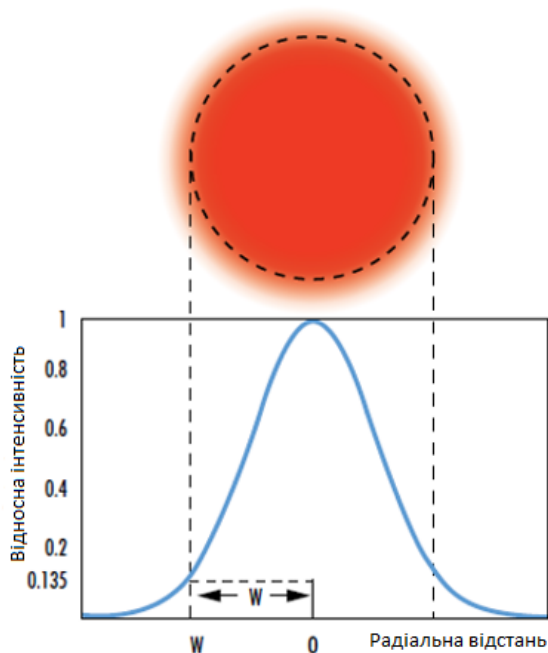


Рис. 1. Вигляд плями сфокусованого пучка [4]

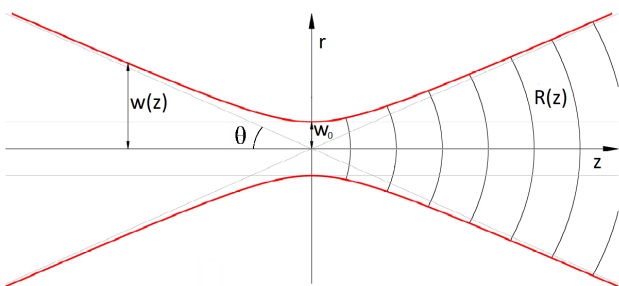


Рис. 2. Повздовжня структура гаусового пучка:  $w(z)$  – перетяжка,  $R(z)$  – радіус кривизни хвильового фронту

Відмітимо, що Гаусовий пучок є збіжним до перетяжки  $\omega_0$  і розбігається після неї, тобто він описується гіперболою, асимптота якої нахилена до осі під кутом:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання.

Як видно з рівняння (2), чим більший діаметр перетяжки пучка, тим менший кут розбіжності  $\theta$ . Тому для зменшення розбіжності пучка застосовують розширювачі лазерного променя.

Зміна діаметру пучка та радіуса кривизни визначається наступним чином:

$$\omega^2 = \omega_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{M^2 \lambda z_1}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$R = z_1 \left[ 1 + \left( \frac{\pi \omega_0^2}{M^2 \lambda z_1} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Якість пучка – важливий параметр для оцінки роботи лазерної системи. Параметр  $M^2$ , який одночасно описує характеристики лазерного пучка в бли-

жньому і дальньому полі описується виразом (5). Даний параметр порівнює добуток радіусу перетяжки і кута розбіжності пучка з основним гаусовим пучком при одній ті ж самій довжині хвилі  $\lambda$  [5]:

$$M^2 = \frac{\pi \omega_0 \theta}{\lambda} \quad (5)$$

## 2. Аналіз поширення Гаусового пучка на далекі дистанції

Для аналізу можливості фокусування лазерного пучка на заданій відстані розглянемо оптичну систему, що забезпечує на виході пучок розміром  $\omega$  та радіусом кривизни хвильового фронту  $R$ , що може змінюватись за рахунок зміни параметрів фокусування системи. Очевидно, що для фокусування пучок має бути збіжним. Відповідно на певній відстані  $z_1$  має утворитися перетяжка розміром  $\omega_0$  (рис. 3).

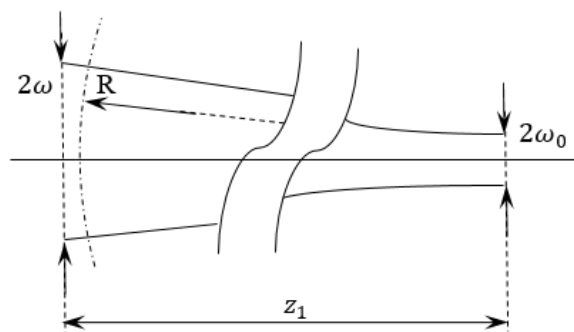


Рис. 3. Фокусування квазі-гаусового пучка на віддаленій мішені

В нашій роботі для розрахунків розглядалися наступні значення:  $\omega = 120$  мм,  $M^2 = 5$ ,  $\lambda = 1,064$ мкм. Вибір чисельних значень даних параметрів обумовлювався реальною оптичною системою, яка далі розглядатиметься в дослідженнях.

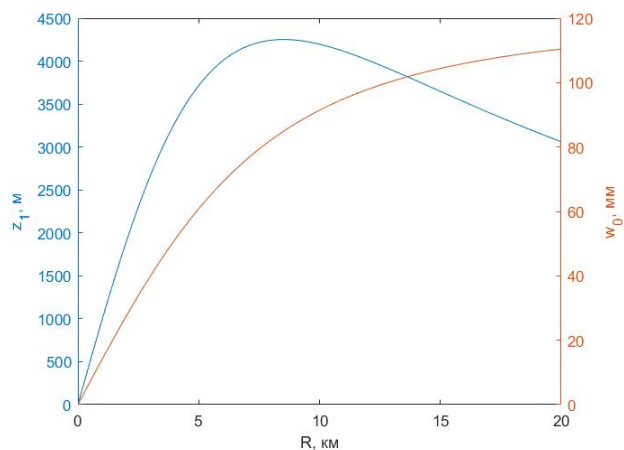
Із співвідношень для параметрів пучка (3), (4) після нескладних перетворень отримаємо співвідношення параметричної залежності, що визначають розмір і відстань утворення перетяжки в залежності від радіуса кривизни хвильового фронту  $R$ :

$$\omega_0^2 = \frac{\omega^2}{1 + \left( \frac{\pi \omega^2}{M^2 \lambda R} \right)^2}, \quad z_1 = \frac{R}{1 + \left( \frac{M^2 \lambda R}{\pi \omega^2} \right)^2} \quad (6)$$

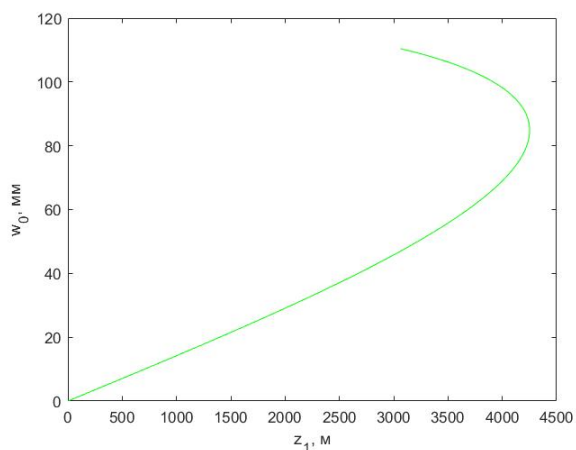
На рис. 4 наведено графіки  $\omega_0(R)$ ,  $z_1(R)$ , а також зведений графік  $\omega_0(z_1)$ . Як видно, залежність  $z_1(R)$  має максимум. Тобто, із збільшенням початкового радіуса кривизни хвильового фронту  $R$  відстань до перетяжки  $z_1$  збільшується до певного максимального значення  $z_{1 \max}$ , а потім знову скорочується. Дослідивши залежність  $z_1(R)$  на екстремум отримаємо максимальне значення відстані до перетяжки, величину перетяжки та відповідне значення  $R$ :

$$z_{1 \max} = \frac{\pi \omega^2}{2M^2 \lambda}, \quad R_{z_{1 \max}} = \frac{\pi \omega^2}{M^2 \lambda}, \quad \omega_0^2 = \frac{\omega^2}{2} \quad (7)$$

Для заданих параметрів отримаємо наступні числові значення:  $z_{1 \max} = 4252$  м,  $R = 8504$  м,  $\omega_0 = 85$  мм



(а) Залежність  $z_1(R)$  та  $w_0(R)$



(б) Параметрична залежність  $w_0(z_1)$

Рис. 4. Утворення віддаленої перетяжки лазерного пучка

На перший погляд здається, що умовою найкращого є відстань, на якій утворюється перетяжки лазерного пучка. Проте, це твердження є помилковим. Розглянемо поведінку сфокусованого пучка після перетяжки, на відстані  $z_2 > z_1$ . Промінь буде розбіжним і за формулами дифракції лазерного променя матиме розмір:

$$\omega_2^2 = \omega_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{M^2 \lambda (z_2 - z_1)}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (8)$$

де  $z_1$  та  $\omega_0$  визначаються за формулами (6). Підставляючи формули (6) в (8) отримаємо наступний вираз для  $\omega_2(R)$ :

$$\omega_2^2 = \omega^2 + \left( \frac{\lambda M^2 z_2}{\pi \omega} \right)^2 - \frac{2\omega^2 z_2}{R} + \left( \frac{\omega z_2}{R} \right)^2 \quad (9)$$

Графік такої функції для  $z_2 = 4252$  м зображено на рис. 5.

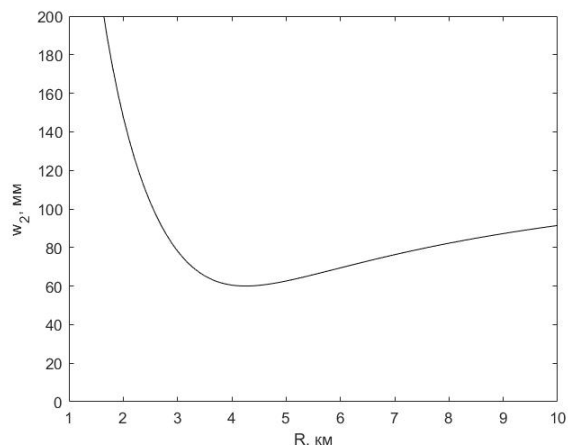


Рис. 5. Залежність  $w_2(R)$  на відстані фокусування 4252 м

Знайдемо мінімум дослідивши залежність  $w_2(R)$  на екстремум. Виявляється, що мінімальне значення  $w_2$  досягається при  $R = z_2$ . При цьому вираз для  $w_2$  запишеться наступним чином:

$$w_{2 \min} |_{R=z_2} = \frac{\lambda M^2 z_2}{\pi \omega} \quad (10)$$

Отримаємо значення мінімального діаметру на відстані  $z_2 = 4252$  м:  $w_{2 \min} = 60$  мм. Після перетяжки промінь, очевидно, є розбіжним. Тим не менше, не зважаючи на розбіжність променя в зоні фокусування, розмір плями є мінімальним і, відповідно, меншим за розмір перетяжки, утвореної на цій же відстані (навіть для зони  $z_1, z_2 < z_{1 \max}$ , де ще можливе утворення перетяжки).

## Висновки

У даній роботі було розглянуто фокусування лазерного пучка на далекій дистанції. Знайдено максимально можливу відстані на якій формується перетяжка при заданих параметрах пучка. Дослідивши поширення пучка на даній відстані, було показано, що мінімальний діаметр фокусування не відповідає значенню перетяжки, але задовільняє умову найкращого фокусування.

## Перелік використаних джерел

1. Костко О. К. Лазер исследует атмосферу // Наука и жизнь. — 2002. — № 12.
2. Jack Slater. A beam quality metric for high energy lasers // The high energy laser joint technology office. — 2016.
3. Короленко П. В. Оптика когерентного излучения. — МГУ им. М. В. Ломоносова, 1997.
4. Gaussian Beam Propagation. — Access mode: <http://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>.
5. Meng L., Huang Z., Han Z. Simulation and experiment studies of aberration effects on the measurement of laser beam quality factor ( $M^2$ ) // Optics and Lasers in Engineering. — 2018. — P. 226–233.