

Рисунок 4 – Пространственное распределение интенсивности в лазерном пучке

Литература

1. Out of blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers / C. Kraenkel [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 548–564.

2. High-power red, orange, and green Pr³⁺:YLiF₄ lasers / P. W. Metz [et al.] // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – P. 3193–3196.

3. Power scaling of blue-diode-pumped Pr:YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9 nm / S. Luo [et al.] // *Opt. Commun.* – 2016. – Vol. 380. – P. 357–360.

4. Tanaka, H. High-power visibly emitting Pr³⁺:YLF laser end pumped by single-emitter or fiber-coupled GaN blue laser diodes / H. Tanaka, S. Fujita, F. Kannari // *App. Opt.* – 2018. – Vol. 57, № 21. – P. 5923–5928.

5. Energy-Transfer Upconversion and Thermal Lensing in High-Power End-Pumped Nd:YLF Laser Crystals / P. J. Hardman [et al.] // *IEEE J. Quantum. Electron.* – 1999. – Vol. 35, № 4. – P. 647–652.

УДК 53.082.53

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЕННОГО ОТ ЛАМБЕРТОВА КРУГЛОГО ОТРАЖАТЕЛЯ Дерменжи И.А.¹, Барышникова С.Ю.¹, Кочурова Д.Н.², Калугин А.И.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Представлена теоретическая модель для расчета мощности лазерного излучения, принятой после отражения гауссова пучка от круглого ламбертова отражателя. Экспериментально получены мощности лазерного излучения, отраженного от пластиковых (поливинилхлорид) дисков различного радиуса, в зависимости от дистанции от фотоприемника до объекта. Установлено соответствие теоретической модели экспериментальным зависимостям.

Ключевые слова: гауссов пучок, лазерное излучение, ламбертов отражатель, лазерный дальномер, ЭПО.

MEASURING OF LASER RADIATION POWER REFLECTED FROM LAMBERT CIRCULAR REFLECTOR Dermenzhi I.¹, Baryshnikova S.¹, Kochurova D.², Kalugin A.²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Izhevsk, Russia

Abstract. A theoretical model for calculating the power of laser radiation received after reflection of a Gaussian beam from a circular Lambert reflector is presented. The power of laser radiation reflected from plastic (polyvinyl chloride) disks of various radii, depending on the distance from the photodetector to the object, was experimentally obtained. The correspondence of the theoretical model to the experimental dependences has been established.

Key words: Gaussian beam, laser radiation, Lambert reflector, laser rangefinder, LRCS.

e-mail: ackad1976@yandex.ru

В лидарных и дальнометрических системах важной задачей является определение величины мощности лазерного излучения, принятой после отражения или рассеяния от исследуемого объекта [1, 2]. Принятый фотоприемником лазерный сигнал зависит от многих параметров: характеристик объекта, конструктивных параметров зондирующей установки. В общем случае регистрируемый фотоприемником сигнал определяется пространственным и временным распределением плотности мощности излучаемого лазерного импульса, геометрической формой зондируемого объекта, его отражательными свойствами и характеристиками среды распространения излучения [3]. В условиях однопозиционной локации и нормального падения лазерного излучения на круглый объект радиусом

r_t , расположенного на расстоянии l от входного окна фотоприемника, и который отражает согласно закону Ламберта, легко получить следующее выражение для принятой мощности P :

$$P = P_l \cdot \frac{\sigma_d \eta \rho_t}{2\pi l^2} \left(1 - \exp\left(-\frac{r_t^2}{w^2}\right) \right), \quad (1)$$

где P_l – мощность испускаемого лазером излучения, σ_d – площадь входного зрачка приемной оптической системы, η – эффективность преобразования фотоприемником оптической энергии в электрический сигнал, ρ_t – коэффициент отражения материала объекта, w – ширина лазерного пучка в плоскости объекта. Ширина испускаемого гауссова пучка изменяется с расстоянием по закону:

$$w^2 = w_0^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda(z+l)}{\pi w_0^2} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где w_0 – ширина пучка в перетяжке, λ – длина волны лазерного излучения, z – расстояние от перетяжки лазерного пучка до входного окна фотоприемника (в случае моностатической системы положение фотоприемника и излучателя совпадают).

Из выражения (1) эффективная площадь отражения (ЭПО) круглого ламбертова отражателя равна:

$$\sigma = \rho_t \cdot \pi w^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{r_t^2}{w^2}\right) \right), \quad (3)$$

что согласуется с результатами [4, 5]. Из (2) и (3) следует, что ЭПО зависит от расстояния до объекта l и от соотношения радиуса диска и ширины пучка. При $r_t \gg w$ ЭПО определяется шириной пучка и равна $\sigma_w = \rho_t \cdot \pi w^2$. При этом ЭПО растет с увеличением дистанции l , тогда как измеряемая фотоприемником мощность P уменьшается пропорционально l^{-2} . В случае большой ширины пучка при $r_t \ll w$ ЭПО стремится к постоянному значению, равному $\sigma_r = \rho_t \cdot \pi r_t^2$, а мощность P уменьшается как l^{-4} .

С целью подтверждения теоретической зависимости (1) были выполнены экспериментальные измерения мощности отраженного лазерного излучения. Эксперимент проведен с использованием макета измерительного стенда, представленного в работе [6]. В качестве источника излучения использовался DPSS лазерный модуль CPS532 производства Thorlabs, Inc. Длина волны излучения модуля равна $\lambda = 532$ нм, а его мощность $P_l = 4,1$ мВт. Передающий объектив формирует пучок с углом расходимости 26 мрад и шириной перетяжки $w_0 = 6,3$ мкм. В качестве фотоприемного устройства был применен кремниевый фотодиодный детектор PH100-SI-NA-OD1-D0 производства GENTEC-EO, Inc. Его площадь $\sigma_d = 0,9$ см², а чувствительность 0,31 А/Вт.

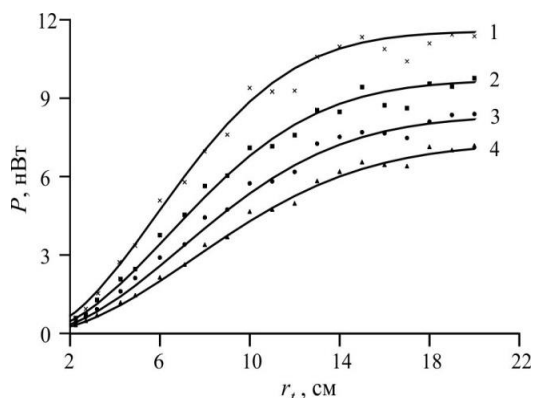


Рисунок 1 – Мощность P , отраженная от ПВХ дисков радиусом r_t , для расстояний $l = 325$ (1), 355 (2), 383 (3) и 410 см (4)

В качестве объектов зондирования были выбраны диски различного радиуса от 1,5 до 20 см, изготовленные из поливинилхлорида (ПВХ) с коэффициентом отражения $\rho_t = 0,67$ для длины волны излучения лазера. Измерения коэффициента отражения при разных углах падения излучения показало, что поверхности дисков можно считать ламбертовыми.

На рис. 1 представлены результаты измерений мощности, принятой после отражения от ПВХ дисков, в зависимости от их радиусов, при различном расстоянии до фотоприемного устройства. Сплошными линиями представлены теоретические зависимости (1), маркерами – экспериментальные данные. Ширина пучка в плоскости диска менялась согласно выражению (2) от 8,3 см при дистанции 325 см до 10,6 см при 410 см. Экспериментальные результаты хорошо аппроксимируются теоретическими кривыми. При этом из графика видно, что при увеличении расстояния до объекта мощность излучения, зафиксированная фотоприемником, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния при больших радиусах дисков. При этом с увеличением радиуса диска отраженная мощность возрастает и стремится к постоянной величине, пропорциональной $P \sim \frac{P_l}{l^2}$.

Таким образом, полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с приведенной теоретической моделью, что говорит о пригодности использования данной модели для расчета мощности, пришедшей на приемник после отражения от исследуемого объекта.

Литература

1. Основы импульсной лазерной локации: учеб. пособие для вузов / В. И. Козинцев [и др.] ; под ред. В. Н. Рождествина. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 512 с.
2. Steinvall, O. Effects of Target Shape and Reflection on Laser Radar Cross Sections / O. Steinvall // Applied optics. – 2000. – Vol. 39. – P. 4381–4391.
3. Кочурова, Д. Н. Моделирование временной формы лазерного импульса при лазерной локации / Д.Н. Кочурова // 14 международная конференция «Прикладная оптика-2020». – Санкт-Петербург. – 2020. – С. 114–118.
4. novel method for laser radar cross section calculation of complex laser targets with partial and gaussian beam irradiation / Q. Wang [et al.] // Laser Physics – 2018. – Vol. 28. – P. 126207–126219.
5. Laser radar cross-section estimation from high-resolution image data / G. R. Osche [et al.] // Applied Optics. Optical Society of America. – 1992. – Vol. 31, № 14. – P. 2452–2460.
6. Макет измерительного стенда для определения эффективной площади отражения объектов сложной формы / С. Ю. Барышникова [и др.] // 13 Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2020». – Минск, 2020. – С. 17–18.