

Методы идентификации пространственных распределений интенсивности лазерных пучков

В. М. КАСПАРОВ¹, А. М. РАЙЦИН¹, М. В. УЛАНОВСКИЙ²

¹ Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, e-mail: arcadiyram@rambler.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: ulanovsky@vniiofi.ru

На основе применения логарифмического момента рассмотрены новые методы идентификации распределений интенсивности лазерных пучков, имеющие существенное значение при разработке лазеров и систем. Введены меры, чувствительные к различным формам распределений.

Ключевые слова: лазерный пучок, моменты распределения интенсивности, многоэлементный измерительный преобразователь.

Through the use of the logarithmic moment considered new methods for the identification of intensity distributions of laser beams, which are essential in the development of lasers and systems on their basis. Measures sensitive to different distribution forms.

Key words: laser beam, the moments of the intensity distribution, multielement transducer.

При практическом использовании лазеров часто возникает необходимость идентификации пространственного распределения интенсивности (РИ) излучения в поперечном сечении пучка. Разработчиков лазеров и систем на их основе интересует фокусируемость лазерного пучка и сходство его РИ с распределением Гаусса, что определяется коэффициентом распространения M^2 — стандартизированной характеристикой [1]. В то же время при применении лазера в системе дальнометрии важно, чтобы на его выходе было равномерное РИ. Известно, что из всех возможных излучателей, имеющих одинаковые мощности и площади выходных сечений, наибольшей осевой силой света обладают излучатели с равномерным РИ и плоским фронтом [2].

При калибровке или проверке многоэлементных измерительных преобразователей (МИП), измеряющих пространственное РИ лазерного излучения, используют формирующие равномерного излучения [3]. Степень равномерности таких излучателей существенна при определении погрешности коэффициентов преобразования МИП. Таким образом, разработчиков и пользователей лазеров в качестве характеристик идентификации часто интересует степень сходства формируемых РИ с распределением Гаусса и равномерным.

Оценка степени сходства РИ с распределением Гаусса рассмотрена в [4, 5]. Критерий такой оценки, названный гауссоподобием, основан на использовании логарифмического момента РИ. Из всех возможных РИ, имеющих фиксированные вторые момен-

ты, наибольший логарифмический момент достигается для РИ Гаусса. В таблице представлены результаты идентификации для трёх видов РИ.

Оценивать степень сходства формируемого РИ с равномерным можно с помощью пространственных моментов РИ, связывающих их значения со значениями РИ на границе апертуры измерительного устройства [6]. Однако при этом приходится рассматривать несколько моментов, что приводит к неоднозначности выбора критерия сходства. Если рассматривать только неравномерность РИ, возникающую на границе входной апертуры измерительного устройства, то она, как правило, неодинакова в различных точках. Необходимость получения одной характеристики, характеризующей степень сходства измеренного РИ с равномерным, также приводит к применению логарифмического момента, рассматриваемого в статье. Далее показано, что экстремаль-

Результаты идентификации распределения интенсивности

Вид распределения интенсивности	Формула распределения интенсивности	Результат идентификации Гауссоподобие
Ограниченное Гаусс-эллиптическое	$s(x, y) = e^{-(x^2/a^2 + y^2/b^2)}$ $\frac{x^2}{-a^2 \ln R} + \frac{y^2}{-b^2 \ln R} \leq 1$	$\delta_1^*(R) = 2ab(1 - R) / (a^2 + b^2)$
Квазиравномерное	$s(x, y) = 1 - \Delta(x^2 + y^2) / L^2$ $x^2 + y^2 \leq L^2$	$\delta_2^*(\Delta) = \frac{3(2 - \Delta)((1 - \Delta)^2 \ln(1 - \Delta) - \Delta^2/2 + \Delta)}{6\Delta - 4\Delta^2}$
Ограниченное Коши	$s(x, y) = 1 / (1 + b(x^2 + y^2))$ $x^2 + y^2 \leq L^2$ $b = (1 - R) / (RL^2)$	$\delta_3^*(R) = R \ln^3 R / [2(R - 1 - R \ln R)]$

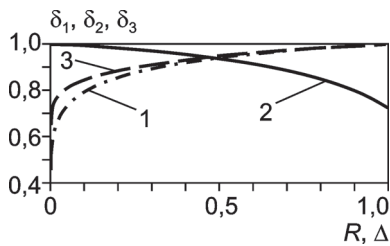


Рис. 1. Степень равномерности распределений интенсивности:

1, 3 — ограниченные Гаусс-эллиптическое $\delta_1(R)$ и Коши $\delta_3(R)$, соответственно; 2 — квазиравномерное $\delta_2(\Delta)$

ное свойство логарифмического момента имеет место и при равномерном РИ.

Рассмотрим РИ в поперечном сечении лазерного излучения

$$I(x, y) = I_{\max} s(x, y), \quad 0 \leq s(x, y) \leq 1$$

в ограниченной двухмерной области G . Тогда мощность (энергию) лазерного пучка в области G определим как

$$\iint_G I(x, y) dx dy = E_0,$$

где $I(x, y) \geq I_{\max} R$, R — нижний уровень измерения относительного РИ, достигаемый на кривой $s(x, y) = R$.

Запишем

$$\iint_G I(x, y) dx dy = I_{\max} \iint_G s(x, y) dx dy = E_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \iint_G s(x, y) dx dy = \frac{E_0}{I_{\max}} = M_{00},$$

где M_{00} — нормированный нулевой момент типа 1_с в классификации [7].

Рассмотрим функционал — логарифмический момент, зависящий от РИ $p = s(x, y)$:

$$H(p) = - \iint_G p \ln |p| dx dy. \quad (1)$$

Выясним, при какой форме РИ $p = s(x, y)$ функционал (1) принимает наибольшее значение при фиксированном нулевом моменте

$$M_{00} = \iint_G s(x, y) dx dy. \quad (2)$$

Равенство (2) выражает ограничение, наложенное на интеграл $H(p)$.

Условие Эйлера—Лагранжа, при котором функционал вида

$$H(p) = \iint_G F(x, y, p(x, y)) dx dy$$

принимает экстремальное значение при заданном ограничении

$$\iint_G \varphi(x, y, p(x, y)) dx dy = K,$$

имеет следующий вид [8]:

$$\partial F(x, y, p(x, y)) / \partial p + \lambda \partial \varphi(x, y, p(x, y)) / \partial p = 0. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае

$$F(x, y, p(x, y)) = -p \ln |p|; \quad \varphi(x, y, p(x, y)) = p; \quad K = M_{00}.$$

Максимизируем функционал (1) при ограничении (2). Условие (3) при этом имеет вид $-\ln p - 1 + \lambda = 0$, откуда следует, что

$$p = s(x, y) = e^{\lambda-1}. \quad (4)$$

Подставив найденное значение (4) в (2), получим

$$M_{00} = \iint_G e^{\lambda-1} dx dy = S e^{\lambda-1} \Rightarrow e^{\lambda-1} = M_{00}/S,$$

где S — площадь области G . Тогда $s(x, y) = M_{00}/S$, где $M_{00}/S \leq 1$.

В результате искомое распределение $s(x, y)$ является равномерным, для которого логарифмический момент $H(p)$ наибольший из всех распределений, имеющих ограничение (2). Из (1) следует, что для равномерного распределения $H(p) = H_p$:

$$H_p = - \iint_G \frac{M_{00}}{S} \ln \left(\frac{M_{00}}{S} \right) dx dy = -M_{00} \ln \left(\frac{M_{00}}{S} \right) = M_{00} \ln \left(\frac{S}{M_{00}} \right). \quad (5)$$

Алгоритм определения степени равномерности реального РИ состоит из следующих шагов.

1. По измеренному распределению интенсивности $I(x, y)$ определим наибольшее значение $I_{\max}$ и перейдем к относительному распределению $s(x, y) = I(x, y)/I_{\max}$.

2. По относительному распределению найдем нулевой момент M_{00} и подставим вычисленное значение в (5).

3. Вычислим по значениям функции, полученным в п. 1, логарифмический момент $\hat{H}$.

4. Рассчитаем степень равномерности измеренного РИ по формуле $\delta = \hat{H}/H_p$.

Вычислим степени равномерности для некоторых двухмерных распределений.

Ограниченное Гаусс-эллиптическое распределение. Рассмотрим Гаусс-эллиптическое РИ

$$s(x, y) = \exp \left(- \left(x^2/a^2 + y^2/b^2 \right) \right),$$

ограниченное нижним уровнем R измерения относительно РИ, достигаемым на эллипсе с полуосями $a\sqrt{-\ln R}$, $b\sqrt{-\ln R}$ (граница области G). Тогда

$$s(x, y) = \exp \left(- \left(x^2/a^2 + y^2/b^2 \right) \right) = R \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G: x^2/(-a^2 \ln R) + y^2/(-b^2 \ln R) = 1.$$

При этом

$$M_{00} = \iint_G \exp \left(- \left(x^2/a^2 + y^2/b^2 \right) \right) dx dy = \pi ab (1 - R).$$

Площадь эллипса $S = -\pi ab \ln R$ и в соответствии с (5) запишем

$$H_p = \pi ab (1 - R) \ln (\ln R / (R - 1)).$$

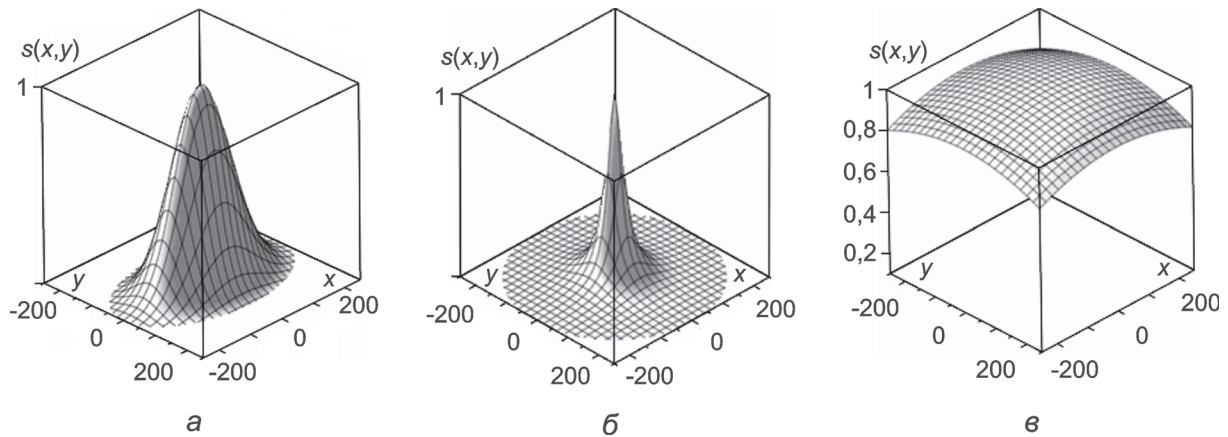


Рис. 2. Результаты идентификации распределения интенсивности:

а — ограниченного Гаусс-эллиптического, $\delta_1^*(R) = 0,9897$, $\delta_1(R) = 0,6202$; б — ограниченного Коши, $\delta_3^*(R) = 0,5174$, $\delta_3(R) = 0,7505$;
в — квазиравномерного $\delta_2^*(\Delta) = 0,0983$, $\delta_2(\Delta) = 0,9909$

Соответствующий логарифмический момент $\hat{H}$ найдём из (1):

$$\hat{H} = \iint_G \left(x^2/a^2 + y^2/b^2 \right) \exp \left(- \left(x^2/a^2 + y^2/b^2 \right) \right) dx dy =$$

$$= \pi ab (R (\ln R - 1) + 1).$$

Найдём степень равномерности Гаусс-эллиптического РИ:

$$\delta_1(R) = [R (\ln R - 1) + 1] / [(1-R) \ln (\ln R / (R-1))].$$

Зависимость $\delta_1(R)$ представлена на рис. 1, с ростом R степень равномерности увеличивается.

Квазиравномерное распределение. Квазиравномерное РИ имеет вид

$$s(x, y) = s(r) = 1 - \Delta (x^2 + y^2) / L^2 = 1 - \Delta r^2 / L^2,$$

где Δ — неравномерность РИ на окружности радиуса L (граница области G), $r^2 = x^2 + y^2$.

Нулевой момент такого РИ:

$$M_{00} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^L r \left(1 - \Delta r^2 / L^2 \right) dr = \pi L^2 (2 - \Delta) / 2.$$

Площадь $S = \pi L^2$, в соответствии с (5) запишем

$$H_p = \pi L^2 (2 - \Delta) \ln (2 / (2 - \Delta)) / 2.$$

Соответствующий функционал $\hat{H}$ получим из (1):

$$\hat{H} = - \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^L r \left(1 - \frac{\Delta r^2}{L^2} \right) \ln \left(1 - \frac{\Delta r^2}{L^2} \right) dr =$$

$$= \pi L^2 \left((1 - \Delta)^2 \ln (1 - \Delta) - \Delta^2 / 2 + \Delta \right) / (2\Delta).$$

Откуда степень равномерности

$$\delta_2(\Delta) = \hat{H} / H_p = \frac{2(1-\Delta)^2 \ln(1-\Delta) - \Delta^2 + 2\Delta}{2\Delta(2-\Delta) \ln(2/(2-\Delta))}.$$

Зависимость $\delta_2(\Delta)$ показана на рис. 1. При этом

$$\lim_{\Delta \rightarrow 1} \delta_2(\Delta) = 1 / (2 \ln 2) \approx 0,721; \quad \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta_2(\Delta) = 1.$$

Таким образом, $\delta_2(\Delta)$ изменяется в интервале 0,721—1,000.

Ограниченное распределение Коши. Рассмотрим РИ Коши, имеющее слабо спадающие «хвосты»:

$$s(r) = 1 / (1 + br^2), \quad 0 \leq r < \infty.$$

Распределение Коши с нижним уровнем R измерения относительного РИ, достигаемым на окружности радиуса L , можно записать в виде

$$s(r) = 1 / (1 + br^2), \quad 0 \leq r < L,$$

где $b = (1 - R) / (RL^2)$.

Нулевой момент распределения Коши:

$$M_{00} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^L r (1 + br^2)^{-1} dr = -\pi L^2 R \ln R / (1 - R).$$

Площадь $S = \pi L^2$, в соответствии с (5) имеем

$$H_p = -\pi L^2 R \ln R \ln [(R-1) / (R \ln R)] / (1 - R).$$

Соответствующий функционал $\hat{H}$ найдём из (1):

$$\hat{H} = - \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^L r (1 + br^2)^{-1} \ln \left((1 + br^2)^{-1} \right) dr =$$

$$= \pi L^2 R \ln^2 R / (2(1 - R)).$$

В результате получим степень равномерности

$$\delta_3(R) = \hat{H} / H_p = -\ln R / \{ 2 \ln [(R-1) / (R \ln R)] \}.$$

Зависимость $\delta_3(R)$ представлена на рис. 1.

На практике определение характеристик идентификации производится с помощью МИП, измеряющих РИ в поперечном сечении пучка с последующим применением численных методов для вычисления пространственных [1] и логарифмического моментов.

Зависимости степени равномерности РИ (см. рис. 1) так же, как и в [5], подтверждают, что для уверенной идентификации *кривых 1, 3* необходимо применять средства измерений РИ с МИП, имеющие нижнюю границу относительного динамического диапазона $R \ll 0,1$.

На рис. 2 представлены результаты идентификации рассмотренных видов РИ для МИП с числом элементов 519×531 , показывающие для $R = 0,01$, $\Delta = 0,1$ гауссоподобие δ_1^* , δ_2^* , δ_3^* и степень равномерности δ_1 , δ_2 , δ_3 и позволяющие утверждать о работоспособности предложенных методов.

Таким образом, на основе применения логарифмического момента, различным РИ лазерных пучков поставлены в соответствие новые меры их количественной идентификации, изменяющиеся от 0 до 1 и чувствительные к различным формам РИ.

Л и т е р а т у р а

1. ГОСТ Р ИСО 11146—2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Ч. 1—3.

2. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблемы расходимости лазерного излучения. М., Наука, 1979.

3. Абдрахманов К. Ш., Райцин А. М. Диффузный формирователь равномерного распределения интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 33—38.

4. Райцин А. М. Новая интегральная характеристика степени отличия пространственного распределения лазерного пучка от распределения Гаусса // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 36—40.

5. Райцин А. М., Улановский М. В. Применение логарифмического момента распределения интенсивности в качестве альтернативы коэффициенту распространения лазерного пучка // Измерительная техника. 2015. № 6. С. 30—32.

6. Улановский М. В. Интегральный метод оценки степени равномерности распределения энергии в поперечном сечении пучка импульсного лазерного излучения // Метрология. 2003. № 9. С. 3—17.

7. Райцин А. М., Улановский М. В. Классификация моментов пространственного распределения интенсивности лазерного пучка // Измерительная техника, 2015. № 6. С. 31—33.

8. Эльсгольц Л. Э. Вариационное исчисление. М.: ЛКИ, 2014.

Дата принятия: 26.02.2016.

535.31:681.7.001

Лазерная рефракционная термометрия прозрачных твёрдых тел при неоднородном нагреве

И. Л. РАСКОВСКАЯ, Б. С. РИНКЕВИЧЮС, А. В. ТОЛКАЧЁВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия, e-mail: rinkevbs@mail.ru

Разработан и реализован метод восстановления распределения температуры с двумерным градиентом в прозрачном твёрдом теле, основанный на рефракционных изображениях структурированного лазерного излучения. Исследованы зависимости характерной толщины неоднородного приповерхностного слоя образца из оргстекла, а также его температуры от времени при нагреве и остывании.

Ключевые слова: лазерная рефракционная термометрия, лазерный пучок, рефракция, лазерная рефрактограмма, структурированное лазерное излучение, оптически неоднородный слой.

A method has been developed and implemented for restoring a two-dimensional distribution of temperature in transparent solids, by refractive laser structured images. Dependence of typical thickness of nonhomogeneous surface layer of a plexiglas sample and dependence of its temperature on the time of heating and cooling are investigated.

Key words: laser refractive thermometry, laser beam, refraction, laser refractogram, structured laser light, optically nonhomogeneous layer.

Лазерная термометрия является в настоящее время активно развивающимся направлением метрологии [1]. Исследование неоднородного нагрева и охлаждения прозрачных жидких и твёрдых тел актуально для ряда приложений теплотехники, энергетики, лазерной физики и др. Однако измерение контактными методами локальных параметров температурных полей жидких и твёрдых тел затруднено из-за невозможности размещения датчика в необходимой области. Поэтому преимущество в данном направлении имеют бесконтактные (активные или пассивные) методы, основан-

ные на регистрации оптического излучения видимого или инфракрасного (ИК) диапазонов [2, 3].

Выбор предпочтительного диапазона определяется оптическими характеристиками исследуемого материала. При изучении протяжённых сред, например воды, сильно поглощающих ИК-излучение, пассивные методы, основанные на регистрации теплового излучения, как правило, неприменимы. В случае активных методов в настоящее время наиболее широко применяют методы лазерной термометрии [4].