

Многокритериальная оценка равномерности распределения плотности энергии лазерных пучков

К. Ш. АБДРАХМАНОВ¹, А. М. РАЙЦИН², М. В. УЛАНОВСКИЙ¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: ulanovsky@vniiofi.ru

² Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, e-mail: arcadiyram@rambler.ru

Предложена многокритериальная оценка степени равномерности распределения плотности энергии лазерных пучков, основанная на применении трёх критериев. Показано, что такая оценка имеет более высокую чувствительность к неравномерности распределения плотности энергии.

Ключевые слова: лазерный пучок, равномерное распределение интенсивности, плоскостность вершины, однородность распределения, многоэлементный измерительный преобразователь, логарифмический момент.

Multi-criteria evaluation of the degree of uniformity of density distribution of laser beam energy, based on the application of the three criteria. It is shown that such an evaluation has a higher sensitivity to the unevenness distribution.

Key words: laser bunch, uniform distribution of intensity, planeness of top, uniformity of distribution, multielement measuring converter, logarithmic moment.

Для калибровки и поверки средств измерений (СИ) пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения в пределах входной апертуры многоэлементного измерительного преобразователя, входящего в состав СИ, необходимо обеспечить равномерное распределение плотности энергии (РПЭ). Такое РПЭ позволяет определять зна-

чение и линейность коэффициентов преобразования элементов преобразователя. В настоящее время равномерное РПЭ можно создать с помощью Государственного первичного специального эталона единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения ГЭТ 187—2010 [1]. В состав эталона входит комплекс СИ для воспроизведения и передачи единицы РПЭ импульсного лазерного излучения. Упрощённая схема комплекса представлена на рис. 1.

Для воспроизведения рассматриваемой единицы в поперечном сечении пучка импульсного лазерного излучения формируется однородное двухмерное РПЭ с применением фотометрического устройства 4 [2]. Затем определяются значения плотности энергии этого распределения по координатам x , y с использованием эталонного первичного измерительного преобразователя энергии калориметрического типа 6 с калиброванной диафрагмой 5 на входе. Передача единицы РПЭ и установление коэффициентов преобразования осуществляются в процессе измерения электрических сигналов на выходе калибруемого (поверяемого) многоэлементного измерительного преобразователя при известной входной энергии. Равномерность распределения, формируемого на выходе фотометрического устройства, предварительно подтверждается СИ средней мощности 8 со сканирующим устройством в перпендикулярных направлениях поперечного сечения на непрерывном лазерном излучении. Применение источников лазерного излучения, эталонного первичного измерительного преобразователя калориметрического типа с калиброванной диафрагмой на входе, фотометрического устройства с подтверждаемыми метрологическими характеристиками РПЭ в пределах апертуры многоэлементного измерительного преобразователя гарантирует работу комплекса в динамическом диапазоне $1 \cdot 10^{-4} — 1 \cdot 10^{-2}$ Дж/см².

В процессе воспроизведения и передачи единицы РПЭ возникает задача оценки его степени равномерности. Дан-

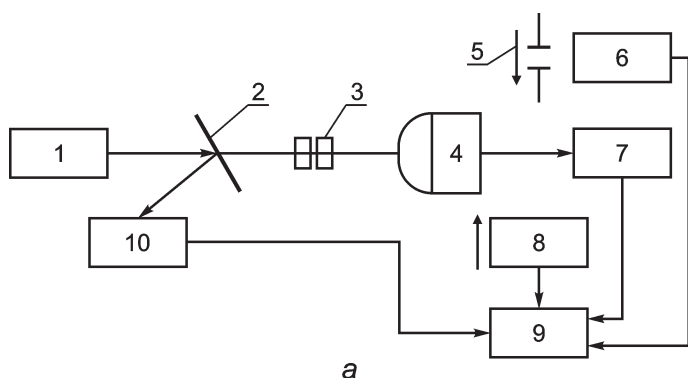


Рис. 1. Схемы комплекса СИ для воспроизведения и передачи единицы распределения плотности энергии импульсного лазерного излучения (а) и центрального элемента преобразователя — выходной апертуры фотометрического устройства 4 и входной апертуры преобразователя 7:

1 — лазер; 2 — делительная пластина; 3 — оптические ослабители; 4 — фотометрическое устройство; 5 — калиброванная диафрагма; 6 — эталонный первичный измерительный преобразователь энергии калориметрического типа; 7 — поверяемый многоэлементный измерительный преобразователь; 8 — СИ средней мощности со сканирующим устройством; 9 — компьютер для управления, обработки и хранения измерительной информации; 10 — датчик относительного уровня энергии

ная оценка является функционалом, представляющим численное значение (или набор значений) некоторого критерия оценки. Любое такое значение, как правило, не может в полной степени характеризовать степень равномерности, так как отсутствует взаимно-однозначное соответствие между формой РПЭ и выбранным критерием. Покажем, что для повышения достоверности и чувствительности оценки степени равномерности РПЭ следует использовать набор критериев.

Воспроизводимое эталоном РПЭ может быть приближенно описано квазиравномерным распределением в ограниченной двухмерной области круга Ω :

$$I(x, y) = I_{\max} \left(1 - (x^2 + y^2) \Delta / L^2 \right) = I_{\max} \left(1 - r^2 \Delta / L^2 \right), \quad (1)$$

где $I_{\max}$ — максимальное значение РПЭ; Δ — неравномерность РПЭ, $0 \leq \Delta \leq 1$ на окружности радиуса L (граница области Ω — выходной апертуры фотометрического устройства); $r^2 = x^2 + y^2$.

На практике измерение РПЭ выполняется по прямоугольной области G — центральной части двухмерной области круга Ω ($G \subseteq \Omega$), где степень равномерности более высокая. Не ограничивая общности полученных выводов, принимаем, что область входной апертуры G , в которой расположен калибруемый или поверяемый многоэлементный измерительный преобразователь, ограничена квадратом размером $T \times T$. Считаем, что центральный элемент преобразователя расположен в начале декартовой системы координат, а стороны квадрата ориентированы параллельно соответствующим координатным осям (см. рис. 1, б) и возможно, что сторона T меньше линейного размера преобразователя. Рассмотрим три критерия оценки равномерности РПЭ.

Критерий, основанный на показателе плоскостности вершины РПЭ. Для оценки степени равномерности может служить характеристика, называемая показателем плоскостности вершины [3]. Характеристика имеет вид безразмерного нулевого момента:

$$M_{00}^6 = \int \int_G I(x, y) dx dy / (S I_{\max}) = \int \int_G s(x, y) dx dy / S, \quad (2)$$

где $I(x, y)$ — измеренное РПЭ лазерного пучка; S — эффективная площадь облучения, определяемая областью G ; $s(x, y) = I(x, y) / I_{\max}$.

Для равномерного РПЭ $M_{00}^6 = 1$, для остальных справедливо $0 \leq M_{00}^6 < 1$. В качестве критерия оценки равномерности можно рассматривать величину

$$\delta_1 = 1 - M_{00}^6, \quad (3)$$

где $0 \leq \delta_1 \leq 1$.

Критерий, основанный на показателе однородности РПЭ. Другой характеристикой степени равномерности является величина, близкая к понятию однородности РПЭ лазерного пучка [3], равная нулю для равномерного распределения и определяемая выражением

$$\delta_2 = \sqrt{\int \int_G \left(1 - s(x, y) / M_{00}^6 \right)^2 dx dy / S}, \quad 0 \leq \delta_2 \leq 1.$$

С учётом (2) этот критерий оценки степени равномерности принимает вид

$$\delta_2 = \sqrt{\int \int_G s^2(x, y) dx dy / \left(\sqrt{S} M_{00}^6 \right)^2} - 1. \quad (4)$$

Критерий, основанный на применении логарифмического момента. Оценка, базирующаяся на использовании логарифмического момента РПЭ [4], выражается как

$$\mu = \hat{H} / H_p, \quad (5)$$

где $\hat{H} = - \int \int_G s(x, y) \ln |s(x, y)| dx dy$; $H_p = -M_{00}^6 S \ln M_{00}^6$ — логарифмический момент для равномерного РПЭ.

Оценка (5) принимает наибольшее значение для равномерного РПЭ из всех возможных распределений с одинаковыми нулевыми моментами M_{00}^6 . Для равномерного РПЭ $\mu = 1$, для остальных $0 \leq \mu < 1$. Универсальность оценки (5) состоит в том, что при видоизменении H_p можно определять степень схождения измеренных РПЭ с распределением Гаусса [4]. В качестве критерия оценки равномерности может служить величина

$$\delta_3 = 1 - \mu. \quad (6)$$

Из трёх представленных критериев оценок равномерности РПЭ сформируем многокритериальный вектор $\mathbf{R} = (\delta_1, \delta_2, \delta_3)$, каждая координата которого в зависимости от неравномерности Δ может изменяться от нуля до единицы. Отличие вектора равномерности измеренного РПЭ от нулевого вектора равномерного РПЭ будем характеризовать евклидовым расстоянием между векторами, т. е.

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}. \quad (7)$$

Рассмотрим приведённые выше критерии оценки равномерности РПЭ для распределения (1). Для описания функциональной зависимости чувствительности критериев оценок от неравномерности Δ введём показатель, равный производной $\chi_n(\Delta) = d\delta_n(\Delta) / d\Delta$, $n = 1 \dots 3$. Из (2) найдём M_{00}^6 при площади $S = T^2$ входной апертуры области G многоэлементного измерительного преобразователя:

$$M_{00}^6 = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} \left(1 - (x^2 + y^2) \Delta / L^2 \right) dx dy / T^2 = 1 - 2\Delta \gamma^2 / 3,$$

где $\gamma = T / (2L)$ — отношение линейных размеров входной и выходной апертур многоэлементного измерительного преобразователя и фотометрического устройства.

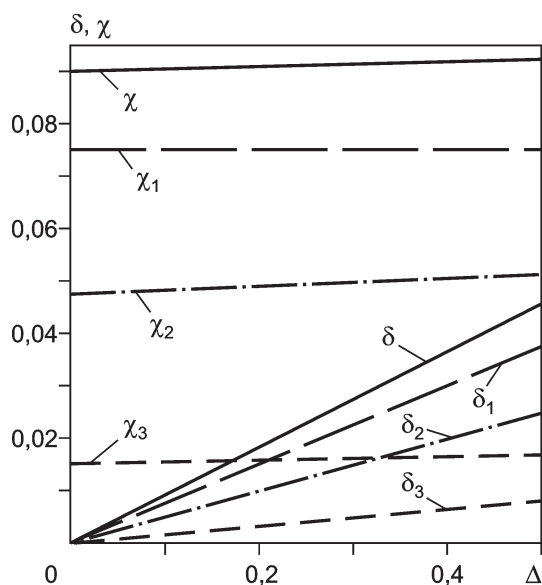


Рис. 2. Зависимости критериев оценки δ и их чувствительности χ от неравномерности Δ распределения плотности энергии

Получим критерий оценки (3) и её чувствительность

$$\delta_1(\Delta) = 2\Delta\gamma^2/3;$$

$$\chi_1(\Delta) = 2\gamma^2/3.$$

Подставив (1) в (4), с учётом найденного момента M_{00}^6 запишем критерий оценки (4) и её чувствительность

$$\delta_2(\Delta) = \sqrt{2/5} \left(2\Delta\gamma^2 / (3 - 2\Delta\gamma^2) \right);$$

$$\chi_2(\Delta) = \sqrt{2/5} \left(6\gamma^2 / (3 - 2\Delta\gamma^2)^2 \right).$$

После подстановки (1), (2) в (5), (6) получим приближенные значения критерия оценки $\delta_3(\Delta)$ и её чувствительности, справедливые при малых Δ :

$$\delta_3(\Delta) \approx \gamma^2 \Delta \left(2/15 + 134\Delta\gamma^2/945 \right);$$

$$\chi_3(\Delta) \approx \gamma^2 \left(2/15 + 268\Delta\gamma^2/945 \right).$$

После упрощений многокритериальная оценка равномерности РПЭ (7) и её чувствительность примут окончательный вид

$$\delta(\Delta) \approx \gamma^2 \Delta \left(0,8 + 0,172\Delta\gamma^2 \right);$$

$$\chi(\Delta) \approx \gamma^2 \left(0,8 + 0,344\gamma^2\Delta \right).$$

На рис. 2 приведены зависимости критериев оценок $\delta(\Delta)$, $\delta_n(\Delta)$ и чувствительностей $\chi(\Delta)$, $\chi_n(\Delta)$, $n = 1, \dots, 3$ для $\gamma = 0,33$ от неравномерности Δ . Максимальной чувствительностью обладает многокритериальный показатель, далее в порядке уменьшения чувствительности следуют критерии плоскостности вершины, однородности РПЭ и критерий, основанный на применении логарифмического момента. В таблице представлены экспериментальные значения критериев равномерности РПЭ, полученные на ГЭТ 187—2010 при калибровке многоэлементного измерительного преобразователя Hamamatsu S7170-0909-01 с линейным размером 12 мм и числом элементов 520×532 для трёх значений γ . При $\gamma = 0,33$ многокритериальная оценка неравномерности составляет порядка 1 %.

Результаты измерений равномерности РПЭ

γ	Критерий			
	δ_1	δ_2	δ_3	δ
0,50	0,01670	0,00828	0,00200	0,01870
0,33	0,00984	0,00399	0,00080	0,01069
0,25	0,00740	0,00260	0,00045	0,00703

Таким образом, использование многокритериальной оценки по сравнению с оценкой по одному критерию позволяет увеличить чувствительность к изменению неравномерности РПЭ для ГЭТ 187—2010.

Литература

- ГОСТ Р ИСО 8.780—2012. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 2,0 мкм.
- Основы оптической радиометрии / Под ред. проф. А. Ф. Котюка. М.: Физматлит, 2003.
- ГОСТ Р ИСО 13694—2010. Оптика и оптические приборы. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений распределения плотности мощности (энергии) лазерного пучка. М.: Стандартинформ, 2011.
- Каспаров В. М., Райцин А. М., Улановский М. В. Методы идентификации пространственных распределений интенсивности лазерных пучков // Измерительная техника. 2016. № 10. С. 39—42.

Дата принятия: 25.01.2017.