

УДК 535:621.373.826; 536.5

РЕШЕТЧАТЫЙ ПРИЕМНИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.О. Пак, Н.Г. Кокодий

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61022, Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: anastaciia.pak@gmail.com*

Поступила в редакцию 10 сентября 2011 г.

В работе рассмотрен решетчатый приемник для измерения характеристик лазерного излучения. Приемник содержит 4 решетки, плоскости которых перпендикулярны направлению распространения излучения. Проволочные элементы решеток расположены под углами 0° , 45° , 90° и 135° к вертикали. Одна решетка содержит 8 никелевых болометров диаметром 40 мкм, расположенных на расстоянии 7.2 мм друг от друга. Диаметр окна – 60 мм. Измерено распределение интенсивности излучения в пространстве, как следствие, определены положение энергетического центра, диаметр, обобщенная площадь поперечного сечения пучка излучения. Математической основой алгоритма обработки сигналов служило преобразование Радона. Также измерены направление поляризации излучения и распределение интенсивности поляризованного излучения путем численного эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: решетка, болометр, распределение интенсивности, поляризация, энергетический центр, диаметр пучка, обобщенная площадь сечения пучка.

У роботі розглянуто ґратчастий приймач для вимірювання характеристик лазерного випромінювання. Приймач містить 4 решітки, площини яких перпендикулярні напрямку розповсюдження випромінювання. Дротяні елементи решіток розташовані під кутами 0° , 45° , 90° і 135° до вертикалі. Одна решітка містить 8 нікелевих болометрів діаметром 40 мкм, розташованих на відстані 7.2 мм один від одного. Діаметр вікна – 60 мм. Вимірний розподіл інтенсивності випромінювання в просторі, як наслідок, визначені положення енергетичного центру, діаметр, узагальнена площа поперечного перерізу пучка випромінювання. Математичною основою алгоритму обробки сигналів служило перетворення Радону. Також вимірні напрямки поляризації випромінювання та розподіл інтенсивності поляризованого випромінювання шляхом чисельного експерименту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: решітка, болометр, розподіл інтенсивності, поляризація, енергетичний центр, діаметр пучка, узагальнена площа перерізу пучка.

In this paper the grid receiver for measuring laser radiation characteristics has been considered. The receiver contains four grids located perpendicular to the direction of propagation. Wire elements are located at angles 0° , 45° , 90° and 135° to the vertical. One grid contains 8 nickel bolometers with diameter 40 microns, bolometers are located on 7.2 mm from each other. The diameter of the window – 60 mm. Intensity distribution in the space has been measured, therefore, the position of the energy center, the generalized cross-sectional square of the radiation beam have been determined. The Radon transformation has been used as the mathematical basis of signal processing algorithms. Also the polarization direction and intensity distribution of polarized radiation have been measured by a numerical experiment.

KEYWORDS: grid, bolometer, intensity distribution, polarization, energy center, beam diameter, generalized cross-sectional square of the beam.

Решетчатый приемник для измерения характеристик лазерного излучения представляет собой несколько решеток из металлической проволоки диаметром от нескольких микрометров до нескольких сотен микрометров, которые стоят на пути распространения лазерного пучка [1, 2]. Излучение нагревает эти проволоки (болометры), и они меняют свое электрическое сопротивление. Измеряя его, можно определить пространственно-энергетические характеристики излучения.

Решетчатые приемники обладают многими достоинствами – они позволяют измерять проходящее через них излучение, поглощая и рассеивая только малую его часть, работают в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра), могут измерять непрерывные мощности от нескольких ватт до сотен киловатт, энергии импульса – от нескольких джоулей до сотен килоджоулей, определяют сразу целый комплекс характеристик излучения, имеют малую инерционность.

Для обработки сигналов с таких приемников используются математические методы, требующие применения компьютерной техники. Ниже описаны такие методы, позволяющие определить следующие характеристики излучения:

- распределение интенсивности в поперечном сечении пучка излучения;
- координаты энергетического центра пучка;
- диаметр пучка;

- направление поляризации излучения;
- форму импульса излучения.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ

Распределение интенсивности излучения в пространстве – очень важная характеристика электромагнитного излучения. Зная ее, можно определить размеры поперечного сечения пучка, положение его энергетического центра, расходимость пучка, общую мощность или импульсную энергию излучения.

Нагрев и электрическое сопротивление отдельного элемента решетки (болометра) зависят от интенсивности излучения в месте его расположения. Измерив сопротивление элементов решетки, можно найти распределение интенсивности в плоскости приемника излучения. Для этого необходимы данные при нескольких положениях решетки. Можно поворачивать решетку или использовать несколько неподвижных решеток.

Рассматриваемый приемник имеет 4 решетки, плоскости которых перпендикулярны направлению распространения излучения. Проволочные элементы решеток расположены под углами 0°, 45°, 90° и 135° к вертикали. Одна решетка содержит 8 никелевых болометров диаметром 40 мкм, расположенных на расстоянии 7.2 мм друг от друга. Болометры включены последовательно с резисторами R сопротивлением 150 Ом. Напряжение питания схемы – 3 В. Диаметр окна – 60 мм.

Алгоритм обработки сигналов

Сигнал с элемента решетки, положение которого определяется параметрами l и θ (рис. 1), определяется формулой

$$u(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL,$$

где $I(x, y)$ – функция распределения интенсивности излучения. Интегрирование идет вдоль проволоки L .

Математической основой алгоритма обработки сигнала служит преобразование Радона [3]:

$$I(x, y) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{x \cos \theta + y \sin \theta - l} \frac{\partial u(l, \theta)}{\partial l} dl d\theta \quad (1)$$

Интеграл (1) вычисляется в два этапа.

1. Внутренний интеграл представляет собой преобразование Гильберта

$$h(l', \theta) = \int_{-\infty}^\infty \frac{\partial u(l, \theta)}{\partial l} \rho(l' - l) dl, \quad (2)$$

где $\rho(z) = -\frac{1}{\pi z}$.

Операция дифференцирования очень чувствительна к погрешностям данных $u(l, \theta)$, определяемых экспериментально. Для уменьшения их влияния выражение (2) интегрированием по частям можно привести к следующему виду:

$$h(l', \theta) = \int_{-\infty}^\infty u(l, \theta) \frac{\partial \rho(l' - l)}{\partial l} dl.$$

Здесь дифференцируется функция $\rho(l' - l)$, заданная аналитическим выражением, так что погрешности определения функции $u(l, \theta)$ влияют на результат значительно слабее.

Функция $\rho(z)$ стремится к бесконечности в точке $z = 0$. Поэтому она заменяется функцией $\rho_A(z)$, которая имеет конечный максимум в этой точке [3]:

$$\rho_A(z) = 2 \int_0^{A/2} \omega F_A(\omega) \cos 2\pi \omega z d\omega,$$

где $F_A(\omega)$ – функция, подбираемая эмпирическим путем. Высота и ширина максимума определяется параметром A .

Это функция окна с шириной полосы пропускания A . Один из возможных ее видов такой [3]:

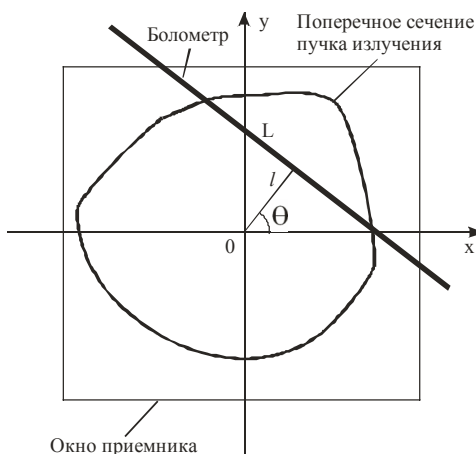


Рис. 1. Геометрия задачи

$$F_A(\omega) = \frac{\sin \frac{\pi\omega}{A}}{\frac{\pi\omega}{A}}.$$

При этом функция $\rho_A(z)$ может быть вычислена аналитически:

$$\rho_A(z) = \frac{2A^2 [2Az \sin(\pi Az) - 1]}{\pi^2 [(2Az)^2 - 1]}.$$
 (3)

Значение параметра A выбирается таким, чтобы из спектра функции $u(l, \theta)$ убрать высокочастотные шумы – случайные погрешности измерений сигналов с приемника. Для этого с помощью преобразования Фурье вычисляются спектры сигналов, и находится такое значение параметра A , при котором через окно $F_A(\omega)$ проходят только составляющие, спектральная плотность которых больше, чем 0.02 от максимальной спектральной плотности.

2. Вычисляется внешний интеграл (1), и находится функция $I(x, y)$:

$$I(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi h_A(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta.$$
 (4)

Измерение характеристик излучения лазера

Источником излучения был неодимовый лазер с энергией импульса излучения 100...500 Дж, длительностью импульса около 1 мс, диаметром пучка 50 мм.

Результаты восстановления функции $I(x, y)$ показаны на рис. 2.

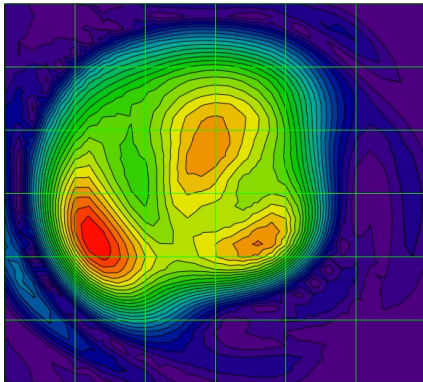


Рис. 2. Распределение интенсивности в излучении импульсного лазера

Зная функцию $I(x, y)$, можно найти координаты энергетического центра пучка. Согласно стандарту ISO [4], они определяются так:

$$x_c = \frac{\int x I(x, y) dS}{\int I(x, y) dS}, \quad y_c = \frac{\int y I(x, y) dS}{\int I(x, y) dS}.$$
 (5)

Интегрирование идет по площади поперечного сечения пучка. Вычисления по этим формулам дают:

$$x_c = -4.5 \text{ мм}, \quad y_c = 1.7 \text{ мм}.$$

Согласно этому стандарту, диаметры пучка вдоль осей Ox и Oy равны:

$$D_x = 4 \sqrt{\frac{\int (x - x_c)^2 I(x, y) dS}{\int I(x, y) dS}}, \quad D_y = 4 \sqrt{\frac{\int (y - y_c)^2 I(x, y) dS}{\int I(x, y) dS}}.$$
 (6)

Используется также среднее геометрическое значение диаметра:

$$D = \sqrt{D_x D_y}.$$
 (7)

Вычисления дают такие значения этих величин:

$$D_x = 48.2 \text{ мм}, \quad D_y = 49.2 \text{ мм}, \quad D = 48.6 \text{ мм}.$$

Существует стандарт [5], которым определяется обобщенная площадь поперечного сечения пучка излучения. Это площадь, в пределах которой содержится больше 80 % энергии пучка. Ее величина зависит от вида функции распределения интенсивности излучения и вычисляется по формуле:

$$S = \frac{\left(\int I(x, y) dS \right)^2}{\int I^2(x, y) dS}.$$
 (8)

Диаметр пучка $D_{gen} = \sqrt{4S/\pi}$, найденный по этому методу, равен 49.5 мм. Это хорошо согласуется со значением диаметра, вычисленного согласно стандарту ISO [4].

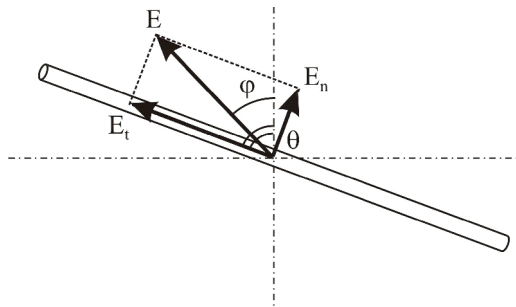
ИЗМЕРЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Фактор эффективности поглощения цилиндра зависит от угла между электрическим вектором падающей волны и осью цилиндра. Его величину при произвольном направлении поляризации

падающей волны можно найти, зная факторы эффективности поглощения Q_{abs}^E (вектор E параллелен оси цилиндра) и Q_{abs}^H (вектор H параллелен оси цилиндра):

$$Q_{abs} = Q_{abs}^E \cos^2(\phi - \theta) + Q_{abs}^H \sin^2(\phi - \theta), \tag{9}$$

где ϕ – угол между вектором E и вертикалью, θ – угол между болометром и вертикалью (рис. 3).



Полезно ввести параметр $k_D = Q_{abs}^H / Q_{abs}^E$ – коэффициент дихроизма, который определяет разницу в поглощении цилиндром E - и H - волн. Формула (9) приобретает при этом следующий вид, более удобный для использования в расчетах:

$$Q_{abs} = Q_{abs}^E [1 + (k_D - 1) \sin^2(\phi - \theta)]. \tag{10}$$

Зависимость сигналов с решетчатого приемника от направления поляризации падающего на него излучения позволяет определить направление поляризации (вектора E).

Рис. 3. К задаче о влиянии поляризации излучения на результаты измерений

Теоретические соотношения

Пусть имеется две решетки – i и j , элементы которых расположены под углами θ_i и θ_j к вертикали, u_i и u_j – сигналы с решеток. Так как эти сигналы пропорциональны факторам эффективности поглощения $Q_{i abs}$ и $Q_{j abs}$, можно с помощью соотношения (10) после некоторых преобразований вывести следующее уравнение:

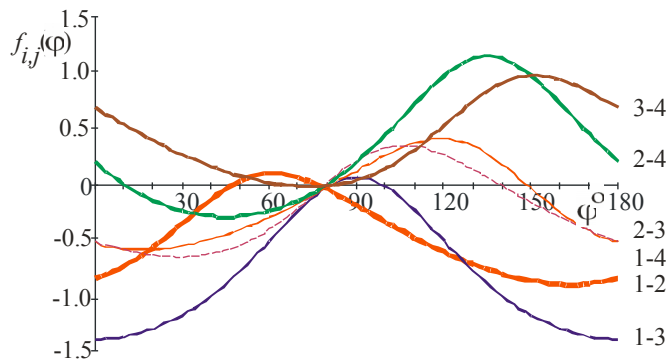
$$f_{i,j}(\phi) = \frac{1 + (k_D - 1) \sin^2(\phi - \theta_i)}{1 + (k_D - 1) \sin^2(\phi - \theta_j)} - \frac{u_i}{u_j} = 0. \tag{11}$$

Решив это уравнение относительно угла ϕ , можно найти направление вектора E падающего на приемник излучения. Но в интересующем нас интервале углов ϕ от 0 до π уравнение (11) имеет два корня. Для выбора правильного значения ϕ необходимо использовать несколько решеток (три и более) и несколько уравнений (11).

В работе [6] показано, что можно однозначно определить направление поляризации с помощью трех решеток. Но в решетчатых приемниках их может быть больше. Уравнение (11) можно применить ко всем возможным комбинациям пар решеток в таких приемниках, что повышает точность полученного результата.

Эксперимент

Излучение неодимового лазера падало на стеклянную пластину под углом Брюстера, так что отраженное от пластины излучение было полностью поляризовано (электрический вектор направлен вертикально). Это излучение попадало на решетчатый приемник, расположенный так, что элементы первой (ближней к лазеру) решетки располагались под углом 80° к вертикали. Если принять это направление за начало отсчета, то направление поляризации излучения должно быть равным 80° .



Уравнение (11) решалось для всех возможных комбинаций решеток: 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4. Результаты решения в виде графиков функции $f_{i,j}(\phi)$ показаны на рис. 4. Значение k_D принималось равным 1.93. Решению уравнения (11) соответствуют точки пересечения кривых $f_{i,j}(\phi)$ с осью абсцисс. Каждая кривая пересекает эту ось в двух точках. Но в области значений угла ϕ около 80° ось абсцисс пересекают все кривые. Это и есть область решения, имеющего физический смысл.

Рис. 4. Графическое решение системы уравнений (11)

Таблица 1. Результаты вычислений угла направления поляризации φ для всех возможных комбинаций решеток

Решетки	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4
φ°	77.0	81.0	81.1	79.0	79.5	81.3

Среднее из шести полученных значений и его погрешность при доверительной вероятности 0.95 равны:

$$\varphi = 79.8^\circ \pm 1.8^\circ.$$

Эта величина хорошо согласуется с истинным значением угла поляризации лазерного излучения.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Информацию о направлении поляризации излучения можно использовать для повышения точности определения функции $I(x,y)$. Для этого в уравнение (1) вместо функции $u(l,\theta)$ необходимо ввести функцию

$$\hat{u}(l,\theta) = u(l,\theta) / Q_{abs}(\phi,\theta), \quad (12)$$

которая учитывает зависимость поглощения излучения в болометре от направления поляризации.

Результаты численного эксперимента по применению этого метода приведены на рис. 5а и 5б.

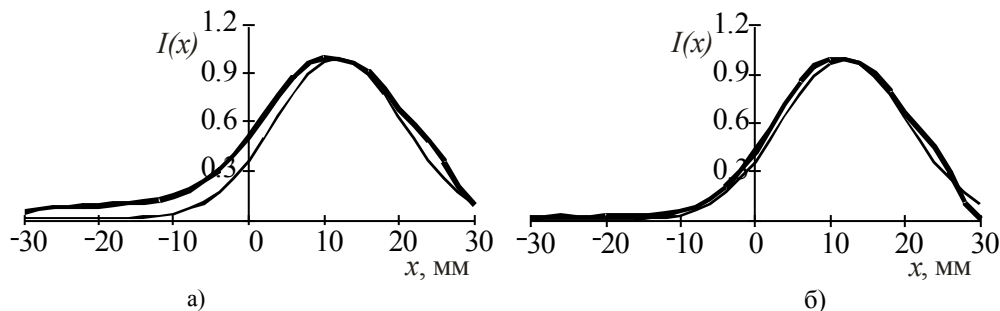


Рис. 5. Измерение распределения интенсивности в поляризованном излучении

Тонкими линиями на обоих рисунках показано истинное распределение интенсивности $I_0(x,y)$ в горизонтальном сечении пучка излучения, толстыми – восстановленное распределение $I(x,y)$: слева – по формуле (1), справа – по этой формуле с учетом соотношения (12). Его учет уменьшает погрешность результата с 23% до 11%.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрен решетчатый приемник для измерения характеристик лазерного излучения, который представляет собой несколько решеток из металлической проволоки диаметром 40 мкм, которые стоят на пути распространения лазерного пучка. Измерено распределение интенсивности излучения в пространстве. Зная эту характеристику, были определены положение энергетического центра, диаметр, обобщенная площадь поперечного сечения пучка излучения. Также измерены направление поляризации излучения и распределение интенсивности поляризованного излучения путем численного эксперимента. Информацию о направлении поляризации излучения можно использовать для повышения точности определения функции распределения интенсивности излучения $I(x,y)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuzmichov V.M., Pogorelov S.V., Kohns P. Transformation of the continuous laser power on wave length 10.6 microns with thin-wire bolometer // Proc. LFNМ-2004. Kharkov, Ukraine. 6 – 9 Sept. - 2004. - P. 238-240.
2. Kokody N.G., Kokody D.N., Pogorelov S.V. et al. Mathematical modeling of devices for measuring of laser radiation characteristics by wire grids // Proc. LFNМ-2004. Kharkov, Ukraine. 6 – 9 Sept. 2004. - P. 140-142.
3. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии. – М.: Мир, 1983. – 349 с.
4. Draft International Standard ISO/DIS 11146. Optics and optical instruments – Laser and laser-related equipment - Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor. – 1995.
5. ГОСТ СССР 24286-80. Импульсная фотометрия. Термины, определения и буквенные обозначения. – 1980.
6. Кузьмичев В.М., Погорелов С.В., Коонс П. Измерение состояния поляризации лазерного излучения тремя профильными болометрическими решетками // Український метрологічний журнал. – 2007. - № 3. – С. 38-42.