

УДК 621.378.325

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНОМ ПУЧКЕ НОЖЕВЫМ МЕТОДОМ

Н.Г.Кокодий, Ли Чженьхуа

Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина

61077, пл. Свободы, 4, Харьков, Украина

E-mail: zhenhuaxh@163.com

Поступила в редакцию 21 мая 2010 г.

В статье описан метод измерения распределения интенсивности в пучке оптического излучения и алгоритм обработки сигнала с приемника. Предложенный метод использует ножевой ответвитель специальной формы. С помощью фотоэлектрического приемника измеряется мощность отраженного ножом излучения. Разработан алгоритм и реализующая его программа для обработки сигнала с измерительного преобразователя. Исследовано влияние погрешностей при измерении сигнала с приемника на результаты вычислений. Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность метода и возможность использования его на практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лазер, оптическое излучение, интенсивность, распределение, приемник, прямая задача, обратная задача.

У статті описано метод вимірювання розподілу інтенсивності в пучку оптичного випромінювання і алгоритм обробки сигналу з приймача. Запропонований метод застосовує ножовий відгалужувач спеціальної форми. За допомогою фотоелектричного приймача вимірюється потужність віддзеркаленого ножом випромінювання. Розроблено алгоритм та реалізуюча його програма для обробки сигналу з вимірювального перетворювача. Досліджено вплив похибок при вимірюванні сигналу з приймача на результати обчислень. Експериментальна перевірка підтвердила дієздатність методу та можливість його використання на практиці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лазер, оптичне випромінювання, інтенсивність, розподіл, приймач, пряма задача, зворотна задача.

In this paper has been considered the method of the measurement of the intensity distribution in the beam of optical radiation and the algorithm of processing of a signal from the receiver. The method is using the knife attenuator of the special shape. The power of the reflected radiation on knife was measured by using detector of photoelectric. The algorithm and program for handling of the signal from receiver are developed. The influence of errors in the measurement signal from the receiver on the results of calculations has been researched. The experiment has confirmed the serviceability of the method and the possible of their use in practice.

KEYWORDS: laser, optical radiation, intensity, distribution, receiver, direct problem, inverse problem.

Распределение интенсивности в пространстве – важная характеристика лазерного излучения. Для измерений в видимом диапазоне обычно используются матричные приемники, в которых измерительными преобразователями служат фотодиоды или тепловые преобразователи. В первом случае приборы могут использоваться для регистрации как непрерывного, так и импульсного излучения, но работают они в спектральном диапазоне, охватывающем только видимую и ближнюю инфракрасную области спектра, и обычно рассчитаны на измерение параметров узких маломощных пучков излучения. Во втором случае спектральный диапазон значительно шире, и измерения могут проводиться с пучками большой мощности, но только с лазерами, работающими в режиме одиночных или редко следующих импульсов. Для измерения параметров излучения непрерывных лазеров этот метод непригоден, так как распределение температуры по поверхности приемника не повторяет распределения интенсивности в пучке излучения. При большой мощности излучения приемники нельзя ставить в прямой пучок, а нужно использовать ответвители. Это усложняет приборы и увеличивает погрешность измерений.

Измерять параметры мощного непрерывного излучения могут болометрические решетки из тонких металлических проволок, расположенные на пути распространения лазерного пучка [1]. Сопротивление отдельной проволоки пропорционально ее температуре, то есть интенсивности излучения в данном месте. Болометрические решетки почти не искажают пучок излучения, имеют малую инерционность, могут использоваться в пучках с большими размерами поперечного сечения. К недостаткам их относится хрупкость конструкции и нестабильность параметров, вызванная постепенным окислением проволок, трудности использования в узких пучках излучения.

Решетчатые приемники излучения производятся фирмой Prometec (Германия). Они могут измерять распределение интенсивности излучения и диаметр в лазерных пучках диаметром от 20 до 60 мм при мощности от 100 до 10000 Вт в ближней и средней инфракрасной областях спектра.

В работе [2] описан метод измерения диаметра гауссова лазерного пучка, в котором поперек пучка движется нож, постепенно перекрывая его. Измеряется зависимость отраженной или прошедшей

мощности излучения от положения ножа. Определив эту зависимость, можно найти диаметр пучка излучения.

Недостатком такого метода измерений является то, что он предполагает гауссов закон распределения интенсивности в сечении пучка излучения. Это справедливо для лазеров, работающих в режиме моды TEM_{00} , например, для многих гелий-неоновых лазеров. Но CO_2 - лазеры, как правило, имеют более сложное распределение интенсивности в пучке. Поэтому описанный метод измерений для них неприемлем.

Произвольное распределение интенсивности можно измерить, используя несколько ножей, пересекающих пучок в различных направлениях. В приборе Beam Master (Германия) используется 3 ножа при анализе пучков, близких к гауссовым, и 7 ножей в случае существенно негауссовых пучков. Прибор используется для анализа фокальной области пучка. Разрешающая способность – 0,1 мкм. Используются фотоприемники на основе Si или $InGaAs$, которые работают в спектральном диапазоне от 0,4 до 1,8 мкм. Сигналы с них обрабатываются компьютером, и результаты показываются на дисплее в цифровом и графическом виде.

В данной работе показано, что при специальном расположении одного ножа относительно окна приемника излучения можно измерить распределение интенсивности любого вида.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Геометрия задачи показана на рис. 1. Входное окно прибора – квадрат размерами 25 x 25 мм. Оно разделено на 25 элементарных квадратов размерами 5 x 5 мм. Вначале все окно закрыто ножом, который затем движется вдоль оси x . Ребро ножа расположено под углом $\varphi = 11,3^\circ$ к оси y ($\tan(\varphi) = 1/5$). Затем нож движется вдоль оси x с шагом 1 мм. На рисунке показаны несколько первых положений ножа. Они отмечены числами от 1 до 5. В каждом из этих положений измеряется мощность излучения, прошедшего через окно. Считается, что в пределах элементарного квадрата интенсивность излучения одинакова. Тогда первые несколько соотношений выглядят так:

$$1) 0.1 I_1 S = P_1$$

$$2) 0.3 I_1 S + 0.1 I_6 S = P_2$$

$$3) 0.5 I_1 S + 0.3 I_6 S + 0.1 I_{11} S = P_3$$

$$4) 0.7 I_1 S + 0.5 I_6 S + 0.3 I_{11} S + 0.1 I_{16} S = P_4$$

$$5) 0.9 I_1 S + 0.7 I_6 S + 0.5 I_{11} S + 0.3 I_{16} S + 0.1 I_{21} S = P_5$$

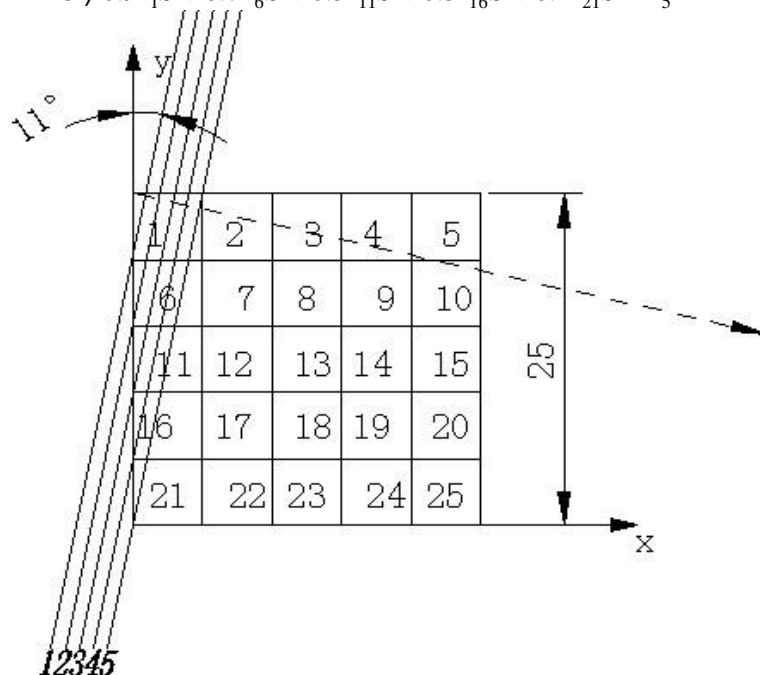


Рис. 1. Геометрия задачи

Здесь I_1, I_2, I_3, \dots — интенсивности излучения в месте расположения квадратов 1, 2, 3, ..., S — площадь элементарного окна, P_1, P_2, P_3, \dots — мощность, прошедшая через окно при положенных ножа 1, 2, 3... Получилась система из 30 уравнений, вектор правых частей которой измеряется в эксперименте.

Число неизвестных в ней - 25. Избыточность системы способствует уменьшению влияния погрешностей измерения мощностей $P_1, P_2, P_3 \dots$ на конечный результат.

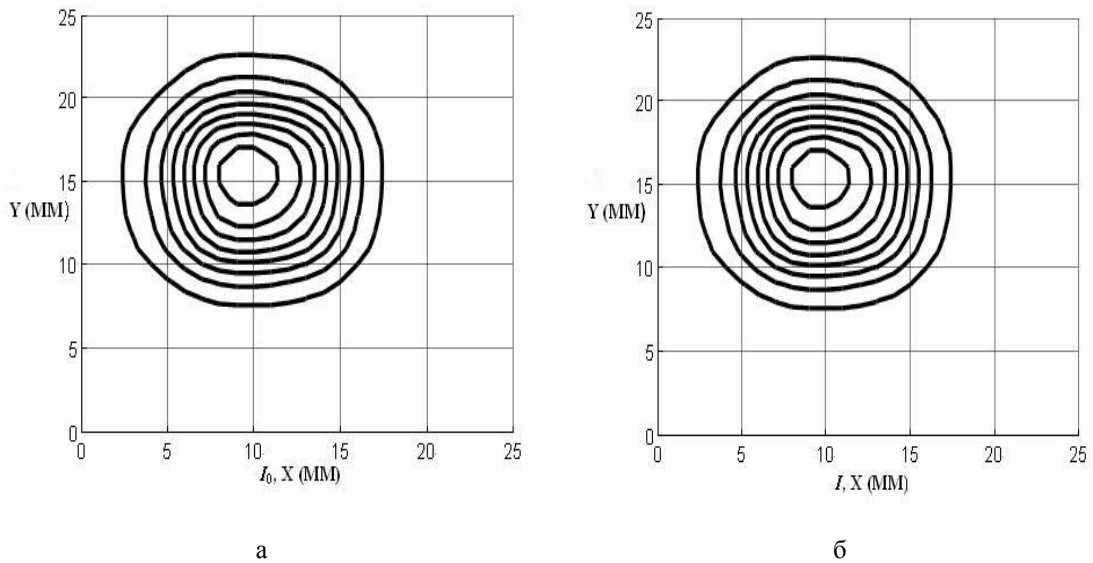


Рис. 2. Исходная (а) и восстановленная (б) функции распределения интенсивности излучения (модель)

Для проверки метода был проведен численный эксперимент. Была задана функция распределения интенсивности излучения:

$$I(x, y) = \exp \left[\frac{-(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{r_0^2} \right],$$

где $x_0 = 7$ мм, $y_0 = 3$ мм — координаты центра пучка, $r_0 = 5$ мм - его среднеквадратичный радиус. Были вычислены значения интенсивностей $I_1, I_2, I_3, \dots, I_{25}$ в центрах элементарных квадратов. С помощью системы уравнений (1), часть которой показана выше, были вычислены мощности $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{30}$, имитирующие сигналы с фотоприемника. Эти результаты были использованы как исходные данные при решении обратной задачи - восстановлении функции распределения излучения.

Результаты решения системы уравнений - функция $I(x,y)$ показана на рис.2б, на рис.2а показана исходная функция $I_0(x,y)$. Видно, что функции $I_0(x,y)$ и $I(x,y)$ хорошо согласуются между собой.

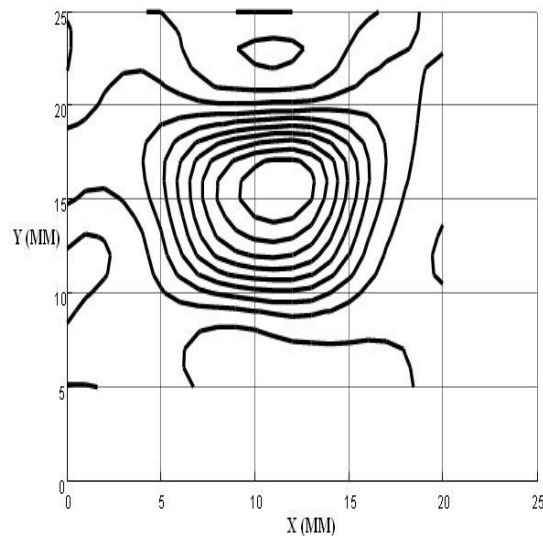


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения лампы накаливания (эксперимент)

Была проведена экспериментальная проверка метода. Источником излучения служила проекционная лампа накаливания с рефлектором, позволяющим фокусировать ее свет. На окно приемника направлялся пучок света диаметром около 20 мм. Приемником излучения служил фотодиод, помещенный в цилиндрическую рассеивающую полость с входным окном 25 x 25 мм.

Поперек светового пучка двигался нож, как показано на рис.1. Сигналы с фотоприемника использовались при решении системы уравнений (1) как ее правая часть. Результаты вычислений показаны на рис.3. На нем виден максимум функции $I(x,y)$ и область высокой интенсивности диаметром около 20 мм, как это и было в эксперименте. Но качество полученной картины распределения интенсивности излучения плохое — функция $I(x,y)$ сильно изрезана, особенно на краях окна.

Причина этого — сильное влияние погрешностей измерения сигналов с фотодиода на результаты вычислений. Данная задача, как и большинство обратных задач — некорректна.

Был проведен численный эксперимент по оценке влияния погрешностей измерения сигналов с фотоприемника на результаты вычисления функции $I(x,y)$. Для этого в значения вектора P (правую часть системы уравнений) вводились случайные добавки, лежащие в заданных пределах, и вычислялась погрешность определения функции $I(x,y)$.

Вычисление погрешности определения функции сейчас стандартами не определено. Есть несколько формул для этого [3, 4]. Мы использовали формулу [4]:

$$\varepsilon_{out} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m,n} - I_{0m,n})^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{0m,n}^2}},$$

где I_0 и I — исходная и восстановленная функции распределения интенсивности излучения, M и N — число точек вдоль осей x и y , в которых вычислялись эти функции.

Погрешность измерения входного сигнала определялась по формуле, полученной аналогично:

$$\varepsilon_{in} = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^Q (P_q - P_{0q})^2}{\sum_{q=1}^Q P_{0q}^2}},$$

где P_0 — идеальный сигнал с приемника, P — сигнал с погрешностями, $Q = 30$ — количество точек, в которых измерен сигнал.

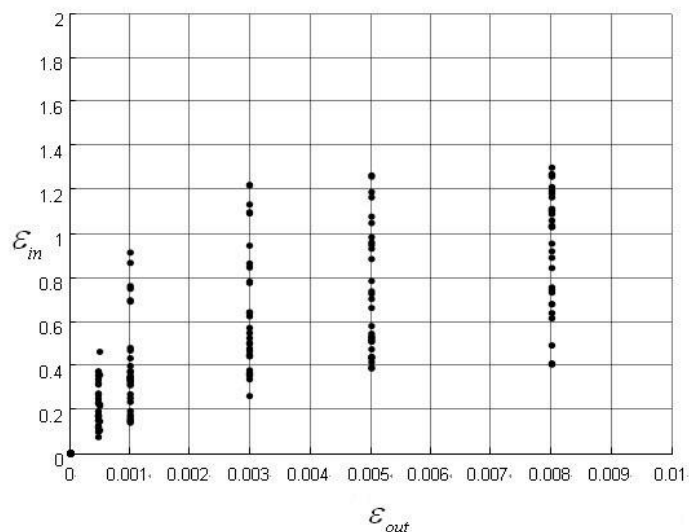


Рис.4. Зависимость погрешности результата измерений от погрешности во входных данных

Результаты испытаний показаны на рис 4. Видно, что погрешности во входном сигнале влияют на конечный результат очень сильно — погрешность результата приблизительно в 100 раз больше погрешности измерений входного сигнала.

Существуют различные методы уменьшения влияния этих погрешностей - сглаживание сигнала по различным алгоритмам, аппроксимация экспериментальной зависимости гладкими аналитическими функциями, метод Тихонова регуляризации решения [5] и др. Выбор наилучшего метода — предмет отдельных исследований.

ВЫВОДЫ

Показана принципиальная возможность измерения функции распределения интенсивности в пучке излучения в приборе с одним движущимся ножом.

Проведены экспериментальные испытания метода. Результаты измерений подтвердили возможность его использования для измерений в узких пучках излучения (диаметром несколько миллиметров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kokodii N.G., Kokodii D.N. Measurement of the distribution of intensity in a beam of thermal radiation. High Temperature. 2007, Vol. 45, No. 2, pp. 255 -260.
2. Khosman J.M., Garetz B.A. Measurement of a gaussian laser beam diameter through the direct inversion of knife-edge data. Applied Optics, 1983, Vol. 22, No. 21, pp. 3406-3410.
3. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии. – М.: Мир, 1983. – 349 с.
4. Fienup J.R. Invariant error metrics for image reconstruction // Applied optics.- 1997. – Vol. 36, No. 32. – pp. 8352-8357.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. – 286 с.