

УДК 681.7.069.24

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА С РЕШЕТЧАТОГО ПРИЕМНИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Г. Кокодий, А.О. Пак

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

E-mail: pak_anastacia@mail.ru

Поступила в редакцию 21 апреля 2009 г.

В статье рассматривается разработка прибора для измерения распределения интенсивности в пучке оптического излучения, а также алгоритма обработки сигнала с приемника излучения. Предложен метод измерения распределения интенсивности оптического излучения с помощью болометрической решетки. Разработанные алгоритмы и реализующие их программы для обработки сигнала с измерительного преобразователя проверены экспериментально, подтверждена их работоспособность. Сравнительная характеристика алгоритмов, основанных на преобразовании Фурье и преобразовании Радона, показала возможность их использования на практике.

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

У статті розглядається розробка приладу для виміру розподілу інтенсивності в пучку оптичного випромінювання, а також алгоритму обробки сигналу із приймача випромінювання. Запропоновано метод виміру розподілу інтенсивності оптичного випромінювання за допомогою болометричної ґратки. Розроблені алгоритми й реалізуючі їх програми для обробки сигналу з вимірювального перетворювача перевірені експериментально, підтверджена їх працездатність. Порівняльна характеристика алгоритмів, що ґрунтуються на перетворенні Фур'є та перетворенні Радону, показала можливість їхнього використання на практиці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лазер, оптичне випромінювання, інтенсивність, болометр, пряма задача, обернена задача.

In this paper has been considered the development of the device for the measurement of the intensity distribution in the beam of optical radiation. The algorithm of processing of a signal from the receiver of radiation is studied. The method of measurement of the intensity distribution of optical radiation by the bolometric grid is offered. The developed algorithms for processing a signal from the measuring converter and programs realizing them are checked up experimentally, their serviceability is confirmed. The comparative characteristic of algorithms based on the transformation of Fourier and transformation of Radon has shown an opportunity of their use in practice.

KEY WORDS: the laser, optical radiation, intensity, bolometer, direct task, reverse task.

Успешное использование лазерной техники в науке, промышленности, медицине предполагает наличие соответствующей измерительной аппаратуры, способной контролировать необходимые параметры и характеристики лазерного излучения. Разработке новых измерительных приборов способствует широкое распространение вычислительной техники, что позволяет проводить измерения с более высокой точностью, а также проводить такие измерения, которые были бы невозможны без применения компьютеров.

В статье проведено сравнение алгоритмов, основанных на интеграле Радона и преобразовании Фурье, определялся более рациональный алгоритм для применения на практике.

Распределение интенсивности в пространстве – важная характеристика электромагнитного излучения, зная которую, можно определить размеры поперечного сечения пучка, положение его энергетического центра, расходимость. В видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, при небольших диаметрах пучков (до 1 см) эта задача успешно решается с помощью фотодиодных матриц. Они могут использоваться для регистрации как непрерывного, так и импульсного излучения. В инфракрасном диапазоне используются, в основном, термоэлектрические и пироэлектрические тепловые приемники. Их спектральный диапазон значительно шире, и измерения могут проводиться с пучками большой мощности, но только с лазерами, работающими в режиме одиночных импульсов. При измерениях параметров излучения непрерывных лазеров распределение температуры по поверхности приемника не повторяет распределения интенсивности в пучке излучения, и нужно использовать специальные алгоритмы обработки сигналов. При измерениях больших мощностей необходимо применять ослабители излучения. Приемник становится сложным, а погрешность измерений увеличивается [1].

В работах [2, 3] показана возможность измерения параметров оптического излучения (в том числе лазерного) с помощью решетчатых приемников из тонких металлических проволок – болометров. Нагрев и электрическое сопротивление проволоки зависят от интенсивности излучения в месте ее

расположения. Измерив сопротивление элементов решетки, можно найти распределение интенсивности в плоскости приемника излучения, для чего необходимы данные для нескольких положений решетки. Можно поворачивать решетку или использовать несколько неподвижных решеток. Недосток первого способа состоит в увеличении времени измерений. Недосток второго способа – увеличение потерь энергии в приборе [4, 5].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерительный прибор состоит из трех частей: решетчатый измерительный преобразователь; аналого-цифровой преобразователь (АЦП); компьютер.

Решетчатый измерительный преобразователь имеет три решетки, расположенные под углами 0° , 60° , 120° и 180° (четвертая мнимая решетка, расположенная под углом 180° по отношению к первой решетке) к вертикали. Схема одной решетки показана на рис. 1. Она состоит из 16 платиновых болометров диаметром 10 мкм, расположенных на расстоянии 3,75 мм друг от друга. Диаметр окна – 60 мм.

Источником излучения была проекционная лампа накаливания. Мощность излучения – около 10 Вт. Сигналы с болометров подаются на АЦП L-780 (фирма L-Card, Москва, Россия), который имеет 32 входных аналоговых канала. Число двоичных разрядов – 14, диапазон измерения напряжений –

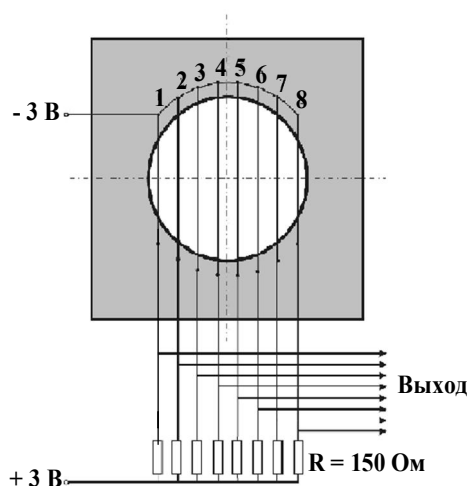


Рис. 1. Болометрическая решетка

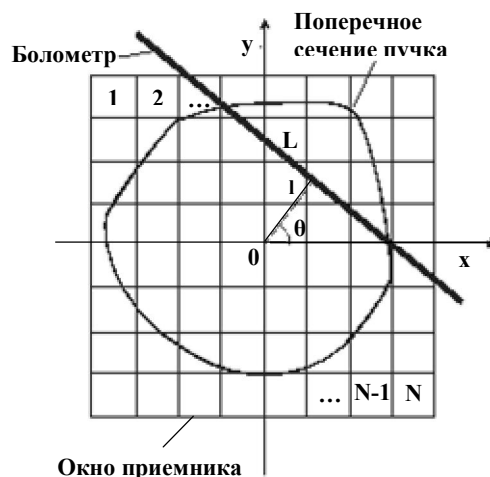


Рис. 2. Окно решетчатого приемника

0,08...5В, максимальная частота опроса – 400 кГц. При измерениях АЦП работал с частотой 1 кГц. С каждого канала в компьютер поступало 1000 данных. Для работы с АЦП используются программы PowerGraph и File Recorder (фирма PowerGraph, Москва, Россия). Они служат для записи данных на жесткий магнитный диск (НЖМД) в двоичных форматах *.bin, *.dat или в десятичном формате *.txt, а также могут вести первичную обработку этих данных. Для окончательной обработки сигналов используется пакет программ Mathcad. Полученные данные обрабатывались по специальному алгоритму.

Алгоритм обработки сигналов с решетчатого приемника здесь аналогичен алгоритму, используемому в компьютерной томографии [6].

Известно, что необходимо знать распределение сигналов поперек окна приемника (вдоль координаты l) и по азимутальному углу (углу между болометром и вертикалью) (рис. 2).

В медицинской томографии используется несколько сотен значений сигналов вдоль координат l и θ . В то время как в исследуемом приборе количество точек вдоль координаты l – 16 (число болометров), количество точек вдоль координаты θ – 3 (число решеток).

В решетчатых приемниках UF6-60 и UF6-80 фирмы Prometec (Германия) используется 6 решеток из платиновой проволоки диаметром 7 - 12 мкм. Большое количество решеток приводит к тому, что потери энергии в приборе достигают 4%. В ряде случаев (для технологических лазеров и т. д.) это очень много. В данной работе были проведены исследования, цель которых – определить минимально возможные количество решеток и болометров в них, необходимые для надежного определения функции распределения интенсивности.

Для анализа алгоритмов обработки сигналов использован метод математического моделирования. Вначале решается прямая задача: задается функция распределения интенсивности излучения $I_0(x, y)$ и вычисляется мощность, поглощенная каждым из болометров. Сигнал с этого болометра будет пропорционален этой мощности

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

где S – координата, направленная вдоль проволоки, L – длина проволоки в окне приемника (рис. 2).

Измерив сигналы с приемника – функцию $u(l, \theta)$, можно восстановить функцию $I(x, y)$. Для этого на сегодняшний день используется несколько алгоритмов.

Интегральное преобразование Радона. В компьютерной томографии часто используется этот метод, основанный на соотношении:

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

где l – расстояние болометра от центра окна прибора,
 θ – угол отклонения болометра от вертикали.

Интегрирование по переменной l производится в пределах окна приемника излучения, так как вне окна $u(l, \theta) = 0$. Интегрирование по переменной θ ведется в пределах половины окружности. Поэтому в приборах данного типа для надежной интерполяции функции $u(l, \theta)$ по этой переменной используется шесть и более решеток [7, 8].

Одна из трудностей при вычислении этого интеграла заключается в том, что в некоторых точках знаменатель подынтегральной функции обращается в нуль. Кроме того, операция дифференцирования функции $u(l, \theta)$, определяемая экспериментально, очень чувствительна к ошибкам во входных данных.

Функция распределения интенсивности излучения находится по формуле:

$$F_{xy}(x, y) = \int_0^{\pi} h(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta. \quad (2)$$

Другой известный алгоритм обработки сигналов основан на преобразовании Фурье:

$$I(x, y) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} \hat{u}(\omega, \theta) \exp\{i\omega[x \cos(\theta) + y \sin(\theta)]\} |\omega| d\omega, \quad (3)$$

где $\hat{u}(\omega, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} u(l, \theta) \exp(-i\omega l) dl$.

Программа, реализующая этот алгоритм, была испытана при проведении численного эксперимента. Результаты показаны на рис. 3. Слева – исходная функция распределения интенсивности, справа – восстановленная. Качество восстановления удовлетворительное.

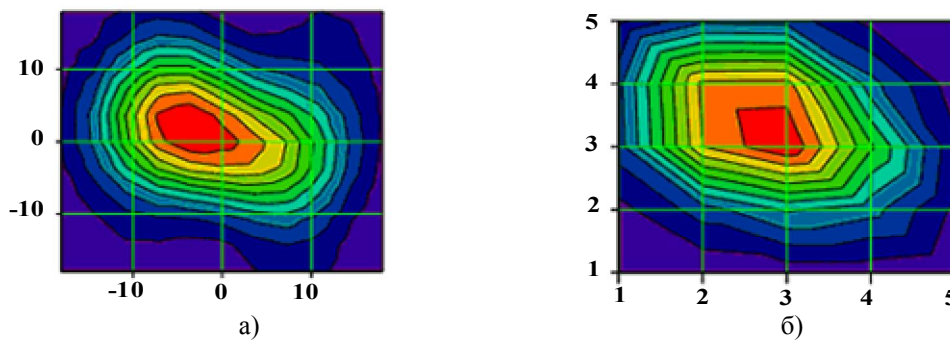


Рис. 3. Исходная (а) и восстановленная (б) функции распределения интенсивности

Объектом исследования был выбран алгоритм, основанный на преобразовании Фурье. Задавалась функция распределения интенсивности излучения, падающего на приемник, и вычислялись сигналы с каждого болометра. Затем эти сигналы использовались в качестве исходных данных при решении обратной задачи (обработка в компьютере) – восстановлении функции распределения интенсивности излучения. Вычисленная функция распределения интенсивности сравнивалась с исходной. Как критерий качества восстановления использовалась погрешность определения восстановленной функции распределения.

Основными источниками погрешностей при измерениях являются: цифровая фильтрация сигналов при их обработке; дискретность расположения болометров в решетке (влияет на точность интегрирования по координате l); количество решеток (влияет на точность интегрирования по

координате θ); случайные погрешности измерений сигналов с приемника излучения; нагрев всего прибора при измерении непрерывного излучения. Эта погрешность оценивалась следующим образом:

1) Вычислялось среднее квадратичное отклонение функции:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} (I_{mn} - I_{0mn})^2}{N - 1}},$$

где I_{0mn} и I_{mn} – значения исходной и восстановленной функций в узловых точках, $N = N_x \cdot N_y$, N_x и N_y – количество узловых точек вдоль осей x и y соответственно ($N_x = N_y = 31$).

2) Определялся коэффициент Стьюдента t при доверительной вероятности 0,95. В данном случае $t = 1,962$.

3) Вычислялась абсолютная погрешность измерения функции $I(x, y)$:

$$\Delta I = \frac{t \cdot S}{N}.$$

4) Находилась относительная погрешность функции $\Delta I/I$. В качестве нормирующей величины было принято среднее по площади окна прибора значение интенсивности излучения:

$$I_{cp} = \frac{\int_{-R}^R \int_{-R}^R I_0(x, y) dx dy}{4R^2},$$

где $2R$ – длина стороны квадратного окна.

Исследование зависимости погрешности от параметров фильтра

При дальнейших исследованиях принимали, что на входное окно приемника падает пучок с поперечным сечением в виде круга радиусом 10 мм. Фронт излучения плоский. Координаты центра пучка – $x_0 = 8$ мм, $y_0 = 10$ мм. Расчеты велись для случая, когда число решеток было 3, то есть они располагались через 60° , и каждая решетка содержала 16 элементов (расстояние между ними – 4 мм).

Такое количество данных о сигнале по переменным l и θ давало возможность вычислить интеграл Фурье (3) с большой точностью и считать, что получившиеся искажения в восстановленной функции распределения интенсивности связаны только с наличием фильтра, через который проходит сигнал.

Сигналы проходили через цифровой фильтр нижних частот, который удаляет высшие гармоники – случайные ошибки измерений. Но при этом происходит и некоторое искажение полезного сигнала, проявляющееся в затягивании пространственных фронтов сигнала, то есть уменьшении разрешающей способности прибора. В роли цифрового фильтра выступает разработанная программа и непосредственно формула:

$$\psi(\omega) = \frac{U}{\Delta l} \sin\left(\frac{\omega \Delta l}{U}\right) \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega \Delta l}{U}\right)}{\frac{\omega \Delta l}{U}} \right)^2.$$

Параметр U определяет ширину полосы пропускания фильтра. При чрезмерно широкой полосе пропускания будут сильно сказываться ошибки при измерении сигналов с приемника, при слишком узкой полосе – будет искажаться полезный сигнал (становятся слишком пологими фронты функции).

При $U=11$ полоса пропускания фильтра слишком широкая, и случайные ошибки измерения сигнала очень сильно сказываются на результатах вычислений (график осциллирует). Расстояние Δx , на котором функция меняется от минимального до максимального значения, составляет около 4 мм. В данном случае оно определяется расстоянием между соседними элементами решетки. При $U=4$ полоса пропускания фильтра слишком узкая. Осцилляции на графике отсутствуют, но становятся слишком пологими фронты функции: $\Delta x = 12$ мм.

Оптимальным является значение $U=6$. На рисунке 4, где изображены горизонтальные сечения восстановленной функции распределения интенсивности излучения, проходящей через центр пучка, видны небольшие осцилляции, которые более точно характеризуют восстановленную функцию распределения (рис. 4). Величина Δx составляет около 5 мм.

На рис. 5 показана зависимость погрешности восстановления функции распределения интенсивности излучения от значения параметра U .

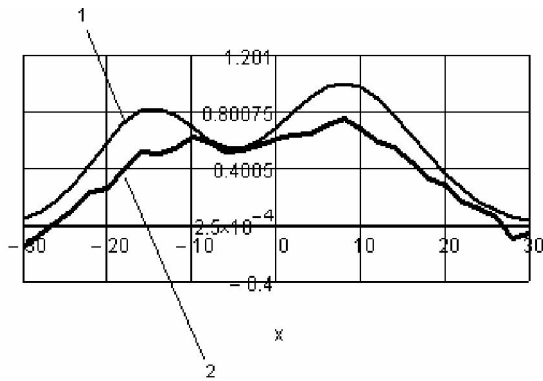


Рис. 4. Горизонтальное сечение пучка по линии $y=y_0, U=6$.
1 – Исходная функция,
2 – восстановленная функция

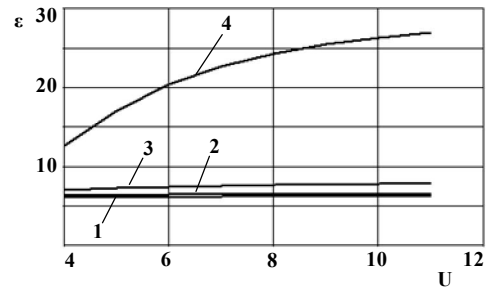


Рис. 5. Зависимость погрешности восстановления функции от ширины полосы пропускания фильтра.
1 соответствует погрешности при верхнем пределе интегрирования $\omega_{\max}=0.4$; 2 – $\omega_{\max}=1.0$; 3 – $\omega_{\max}=1.25$; 4 – $\omega_{\max}=1.4$ соответственно

Исследование зависимости погрешности от числа болометров

Зависимость погрешности измерения параметров излучения от периода решетки изучалась с помощью математической модели, в которой можно было этот период менять.

При небольшом количестве болометров, например, $i=11$ ($\Delta l=6$ мм), случайные ошибки измерения сигнала сказываются на результатах вычислений, и график осциллирует.

Наиболее рациональным является количество болометров, равное значению 16 ($\Delta l=4$ мм). Это хорошо видно на рис. 6. На нем изображены горизонтальные сечения восстановленной функции распределения интенсивности излучения, проходящей через центр пучка.

На рис. 7 показано значение погрешности от расстояния Δl , на котором функция возрастает от нуля до максимума. Кроме того, изображены графики зависимости погрешности при различном количестве решеток. В первом случае их было 4, во втором – 19. Как видно, динамика погрешности в обоих случаях слабо различается. Итак, как вывод, значение $\Delta l=4$ мм, соответствующее $i=16$, оптимально.

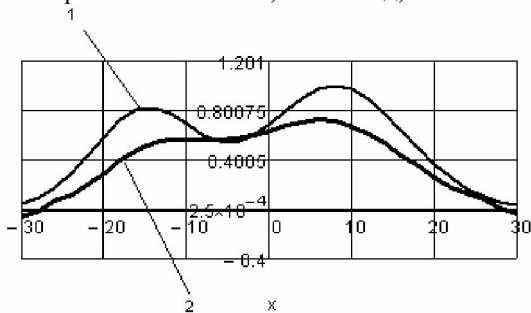


Рис. 6. Горизонтальное сечение пучка по линии $y=y_0, i_{\max}=16$ ($\Delta l=4$ мм).
1 – Исходная функция, 2 – восстановленная функция

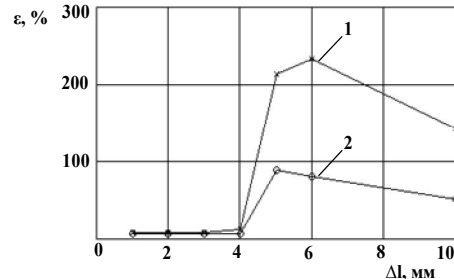


Рис. 7. Значение погрешности в зависимости от количества болометров.
1 – погрешность при 4-х решетках,
2 – погрешность при 19-ти решетках

Исследование зависимости погрешности от числа решеток

Зависимость качества восстановления функции распределения интенсивности излучения $I(x,y)$ от числа решеток в приборе исследовалась с помощью той же программы Mathcad. Число болометров в решетке оставалось постоянным – 21 (расстояние между болометрами 3 мм), а число решеток менялось. Угловое расстояние $\Delta\theta$ между ними бралось равным 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60 и 90.

На рис. 8. рассмотрим горизонтальные сечения восстановленной функции распределения интенсивности излучения, проходящей через центр пучка.

При 4-х решетках ($\Delta\theta=60^\circ$), случайные ошибки измерения сигнала сильно сказываются на результатах вычислений, и график, как выходит из исследований, осциллирует. Таким образом, исходная и восстановленная функции распределения интенсивности излучения сходны менее всего.

При 19-ти решетках ($\Delta\theta=10^\circ$) даже визуально исходная и восстановленная функции распределения интенсивности излучения совпадают максимально, исходя из исследований (рис 8).

При $\Delta\theta=90^\circ$ (2 решетки) восстановленная функция не похожа на исходную.

На рис. 9 показано, как зависит погрешность восстановленной функции от числа решеток. Для исходной функции Гаусса она не превышает 8%.

Как видно из графика, погрешность с увеличением угла увеличивается, но очень плавно, т. е. зависимость погрешности от числа решеток монотонная.

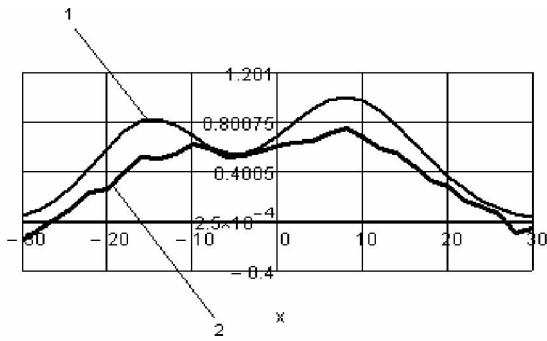


Рис. 8. Горизонтальное сечение пучка по линии $y=y_0, j_{\max}=19$ ($\Delta\theta=10^\circ$)
1 – Исходная функция,
2 – восстановленная функция

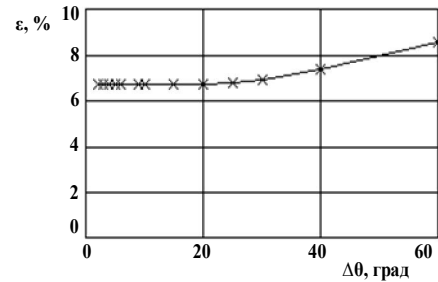


Рис.9. Значение погрешности в зависимости от количества решеток

Влияние случайных погрешностей при измерении сигналов с приемника

В обратных задачах (какой является и данная задача) на результат решения существенно влияют погрешности в исходных данных.

Для оценки погрешности полученного в эксперименте результата в значения функции $u(l, \theta)$, полученные при решении прямой задачи, вводились случайные добавки, значения которых лежали в заданных пределах. Так имитировались случайные погрешности результатов измерения сигналов с приемника излучения.

Результаты вычислений показаны на рис. 10. По оси абсцисс отложены значения погрешности $\Delta u/u$, где u – максимальное значение сигнала с приемника. Именно с максимумом сигнала сравнивалась

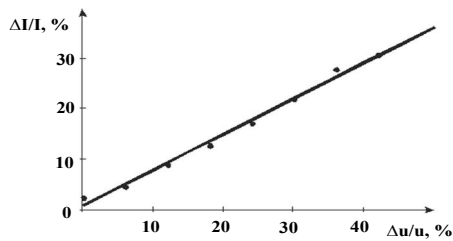


Рис. 10. Влияние случайных погрешностей измерения сигнала на результаты измерений

абсолютная погрешность его измерений в реальном эксперименте. Значения погрешности $\Delta I/I$ вычислялись при $P = 0.95$ и $N = 100$. Каждая точка на графике получалась в результате усреднения пяти запусков программы обработки данных при заданных пределах погрешности $\Delta u/u$. Через эти точки с помощью метода наименьших квадратов проведена прямая.

Влияние погрешностей на результат невелико. Значения погрешности примерно такие же, как и погрешности входного сигнала, хотя обычно в подобных задачах они в несколько раз больше. По-видимому, это объясняется влиянием функции окна, ограничивающей спектр входного сигнала и

отсекающей его высокочастотные составляющие (помехи).

Случайные погрешности измерения сигналов с приемника в эксперименте составляли около 10%. Из рис. 10 видно, что погрешность результата при этом равна 8%.

Когда случайные погрешности отсутствуют, функция $I(x, y)$ восстанавливается все же с погрешностью около 2%, которая вызвана некоторым искажением спектра полезной части сигнала при прохождении его через цифровой фильтр.

Влияние нагрева прибора при измерении непрерывного излучения

В процессе измерений происходит нагрев излучением всего приемника. Тепло передается решетке, и сопротивление ее элементов увеличивается на некоторую величину, примерно одинаковую для всех элементов. Это также может служить источником погрешностей.

Для оценки величины этой погрешности все значения функции $u(l, \theta)$ изменялись на некоторую величину Δ , после чего вычислялась функция $I(x, y)$. Оказалось, что наличие в сигнале добавки Δ приводит к сдвигу по вертикали всей функции $I(x, y)$ почти без искажения ее формы. На рис. 11а показаны графики изменения функций $I_0(x, y)$ (линия с кружками) и $I(x, y)$ (линия с крестиками) вдоль оси Ox при $\Delta = -6$ и $u_{\max} = 16.6$, что соответствует довольно большой погрешности (около 35%). На рис. 11б показаны эти же графики, когда нижняя кривая смещена вверх так, чтобы значения интенсивностей $I_0(x, y)$ и $I(x, y)$ при $x = 0$ совпали. Видно, что кривые идут почти одинаково. Относительная погрешность $\Delta I/I$ составляет при этом не более 1%.

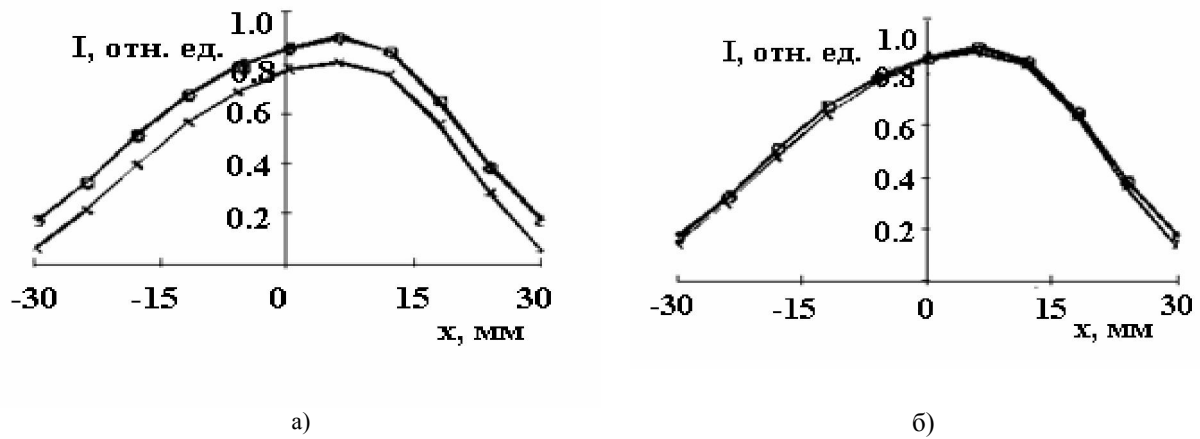


Рис. 11. Влияние общего нагрева приемника на результаты измерений

Сравнение алгоритмов, основанных на интеграле Радона и преобразовании Фурье

Были проведены исследования с помощью математического моделирования, направленные на сравнение двух выше рассмотренных алгоритмов. Основным критерием была принята погрешность восстановления исходной функции распределения.

В данном случае сравнивалась зависимость погрешности восстановления функции от числа решеток. Как показали результаты исследований, отображенные на рис. 12, погрешности примерно одинаковы по величине. Делая вывод, можно утверждать, что данные алгоритмы, основанные на интеграле Радона и преобразовании Фурье, можно использовать на практике в равной степени.

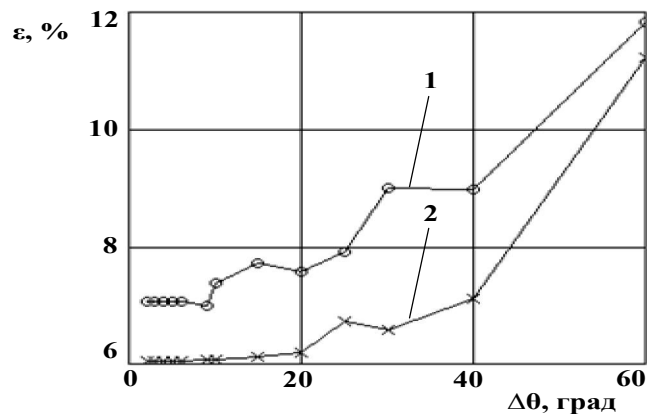


Рис. 12. Зависимость погрешности восстановления функции распределения интенсивности излучения от числа решеток.

- 1 – погрешность в алгоритме, основанном на преобразовании Фурье,
2 – погрешность в алгоритме, основанном на интеграле Радона

ВЫВОДЫ

Проведены исследования алгоритмов обработки сигналов с решетчатого прибора, предназначенного для измерений пространственно-энергетических характеристик оптического излучения. Разработана программа (Mathcad) обработки сигналов с приемника, использующая интегральное преобразование Фурье, для теоретических исследований и программа обработки результатов эксперимента.

Исследованы погрешности восстановления функции распределения интенсивности излучения в алгоритмах, основанных на интеграле Радона и преобразовании Фурье. Эти погрешности примерно одинаковы по величине. Поэтому на практике можно использовать и тот и другой алгоритм в равной степени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокодий Н.Г. Тепловой метод измерения пространственного распределения интенсивности теплового излучения // ТВТ. 2000. Т. 38. № 1. С. 91.
2. Вейко В.П., Сулов Г.П. Исследование равномерности излучения ОКГ на стекле с неодимом // Журнал прикладной спектроскопии.-1972. - Т.17, №2.-С.223-227.
3. Гаврилов О.Д., Грацианов К.В., Гришин В.К. и др. Некоторые особенности измерения энергетической расходимости. Сб. Импульсная фотометрия.-Л.: Машиностроение, 1975.-Вып.4.-С.109-112.

4. Kokody N.G., Kokody D.N., Pogorelov S.V., Dobrova V.E., Timanyuk V.A., Kohns P. Mathematical modeling of devices for measuring of laser radiation characteristics by wire grids // Proc. LFNМ-2004. Kharkov, Ukraine. 6 – 9 Sept. 2004. p. 140.
5. 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.
6. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии. – М.: Мир, 1983. – 349 с.
7. Soto I. Arbitrary-intensity-profiles measurements of laser beam by a scanning and rotating slit // Applied Optics. – 1993. – V.32, No.35, pp. 7272 – 7276.
8. Soto I., Rendon M., Marbin M. Experimental demonstration of tomographic slit technique for measurement of arbitrary intensity profiles of light beam // Applied Optics. – 1997. – V.36, No.29, pp. 7450 – 7454.