

УДК 535.24

А. Б. КАТРИЧ, канд. физ.-мат. наук, В. В. КАМЫШАН, канд. физ.-мат. наук,
В. М. КУЗЬМИЧЕВ, д-р физ.-мат. наук, А. В. ХУДОШИН

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Эффективность применения лазерных источников излучения в научных исследованиях и технологических процессах связана с надежным контролем за основными пространственно-энергетическими характеристиками пучка: его полной энергией или мощностью; положением энергетической оси в пространстве; поляризацией; распределением интенсивности по сечению и др. Существенными преимуществами по сравнению с известными устройствами для измерения перечисленных параметров обладают болометрические измерительные преобразователи решетчатого типа [1]. Основными являются высокая лучевая прочность и незначительное взаимодействие с излучением ввиду малого фактора эффективности поглощения металлических цилиндров и большого по сравнению с диаметром и длиной волны расстояния между ними. Чувствительность к состоянию поляризации определяется цилиндрической формой болометров [2]. Для измерения ряда интегральных пространственных характеристик в работе [3] предложен профильный измеритель, у которого регистрируется приращение сопротивления каждого болометрического элемента.

Известны методики определения основных пространственно-энергетических интегральных характеристик пучка по данным от одного профильного болометрического преобразователя в виде двух решеток параллельных, эквидистантно расположенных болометров. Однако вместо основной пространственной характеристики — диаграммы направленности — с его помощью можно найти только профильные распределения, т. е. наборы интегральных данных вида

$$U_k = C \int_{L_k} f(x, y) dl, \quad (1)$$

где интегрирование ведется вдоль оси болометра с номером k ; C — коэффициент, учитывающий чувствительность и диаметр болометров.

Совокупность сигналов U_k от одной решетки фактически представляет собой проекцию функции распределения (ФР) интенсивности излучения в направлении осей болометров. Но задача восстановления функций распределения различных физических величин по проекциям успешно решается методами машинной томографии [4]. Основной проблемой в данном случае является выбор оптимального метода в соответствии с ограничениями и условиями реальной задачи.

При непосредственном измерении ФР многоэлементным (мозаичным) измерительным преобразователем число каналов регистрации равно количеству элементов изображения N_0 . Для профильного измерителя необходимо $MN = M \times N$ каналов (M, N — число проекций и точек в проекции). Это дает преимущества за счет уменьшения информационных каналов только при $M < N_0/N$ — в случае сохранения одинакового с мозаичным приемником пространственного разрешения.

Анализ погрешности, выполненный в работе [5], в результате дискретизации позволяет для подавляющего большинства ФР использовать до 10 точек в проекции. Число решеток не должно превышать восьми. Это ограничение налагается конструктивным усложнением устройства и возрастанием мощности потерь P на поглощение и рассеяние на цилиндрах $P = 2MdP_0/\lambda$, где d — диаметр цилиндра; λ — шаг решетки. Реальная погрешность измерения сопротивления, эквивалентная зашумленности исходных данных, составляет 5—10%. Представленные условия являются определяющими в случае отбора методик восстановления ФР по профильным распределениям.

При восстановлении по проекциям используются две группы методов — интегральных преобразований и алгебраического восстановления. Первая группа — основная в медицинских приложениях томографии. Однако качество реконструкции при числе проекций, меньшем 16, по данным работы [4] и по результатам численного эксперимента авторов неудовлетворительно даже для простейших функций. Алгебраические методы значительно эффективнее и устойчивее к шумам при малом числе проекций [6].

Основой всех алгебраических методов является дискретизация системы интегральных уравнений (1), приведение ее к системе линейных алгебраических уравнений с последующим ее решением:

$$U_k = \sum_{i=1}^{N_0} A_{ki} f_i, \quad k = \overline{1, MN}. \quad (2)$$

Наиболее простой способ дискретизации системы (1) — аппроксимация ФР в пределах элемента изображения полиномом нулевой степени. Тогда A_{ki} равны длинам болометров, проходящих через данный элемент, и матрица имеет размеры $MN \times N_0$. Кроме простоты реализации, интерполяция нулевого порядка имеет важное преимущество. Для четырех решеток, расположенных через 45° таким образом, что в центрах элизов пересекаются все четыре болометра, количество ненулевых элементов в матрице сокращается до $4N_0$. Их положение легко вычисляется. При $N_0 = 100$ это означает уменьшение требуемого объема оперативной памяти на порядок, а также соответствующее ускорение процесса обработки по сравнению со случаем произвольного размещения болометров и решеток.

Удовлетворительные результаты получены методом параметризации, когда неизвестная ФР представляется в виде разложения по системе известных функций. Разювидностью этого метода можно считать аппроксимацию локальным бикубическим сплайном, когда строится

$$S(x, y) = \sum_{p=0}^3 \sum_{q=0}^3 f_{pq} C_{pq}(x, y), \quad (3)$$

где f_{pq} — значения искомой функции в ближайших к элементу изображения 16 точках сетки; $C_{pq}(x, y)$ — известные бикубические полиномы. Подставляя зависимость (3) в исходную систему (1), после интегрирования и перегруппировки коэффициентов получаем систему вида (2). В связи с условием максимального сокращения числа измерительных каналов следует решать существенно недоопределенную систему (2). В этом случае помимо итерационного процесса можно применять только методы псевдообращения [7] с использованием метода наименьших квадратов из-за значительной зашумленности данных.

Сравнение результатов машинных экспериментов показало, что наиболее устойчивым, кроме итерационного, явился метод псевдообращения с разложением по сингулярным числам и дополнительным регуляризирующим условием минимальности нормы получаемого решения. Он дает примерно одинаковую с другими погрешность в случае хорошо обусловленных матриц (число обусловленности до 10^3). В противном случае метод сингулярных разложений имеет несомненные преимущества, поскольку позволяет получать решения даже сильно недоопределенных систем (2) при $MN < 0,5N_0$.

С помощью разработанного пакета программ были исследованы зависимости погрешностей восстановления от взаимной ориентации системы болометров, сетки разбиения области восстановления, количества элизов, типа интерполяции ФР и др. Погрешности определяли так:

$$\delta_1 = \frac{\max |f_T - f_B|}{\max (f_T)}; \quad \delta_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} |f_T - f_B|}{\sum_{i=1}^{N_0} (f_T)}; \quad \delta_3 = \frac{[N_0 \sum_{i=1}^{N_0} (f_T - f_B)^2]^{0,5}}{\sum_{i=1}^{N_0} (f_T)}, \quad (4)$$

где f_T — точное значение ФР в i -й точке; f_B — восстановленное значение. Практически во всех ситуациях качественные отличия от точного значения наиболее объективно описывает линейная погрешность δ_2 . При $\delta_2 > 15\%$ большинство полученных распределений отличается от исходных, т. е. восстановление является неудовлетворительным. Достаточное соответствие исходных и полученных функций наблюдается для $\delta_2 < 10\%$. Результаты моделирования на ЭВМ продемонстрировали возможность надежного восстановления ФР по профильным распределениям при 4—6 проекциях ($N_0 = 64$ —400).

Болометрические элементы имеют постоянную времени, линейно увеличивающуюся с ростом диаметра. При $d = 10$ мкм временное разрешение не превышает нескольких миллисекунд, следовательно, для регистрации сигналов целесообразно применять схему с последовательным подключением болометров к одному аналого-цифровому преобразователю с циклом менее 100 мкс. Это существенно упрощает измерительный тракт и повышает точность и надежность благодаря использованию единого для всех датчиков канала преобразования. Данные предпосылки легли в основу разработанного устройства для автоматической регистрации информации профильного измерителя.

Конструктивно приемный элемент выполнен в виде четырех решеток болометров, расположенных друг за другом в параллельных плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения излучения. Решетки развернуты на 45° и содержат: две — по 11 болометров; две диагональные — по 21. Общее число датчиков 64. Каждый болометр подключен к соответствующему каналу аналогового коммутатора, выход которого соединен с восьмиразрядным АЦП с временем преобразования 40 мкс. В состав устройства входят также арифметическое и оперативное запоминающее устройства (ОЗУ) на 512 байт, восьмиразрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), преобразователь кода и схема управления.

Цикл измерений начинается с регистрации и записи в ОЗУ начальных сопротивлений болометров. После поступления сигнала запуска система переходит в рабочий режим, когда из поступающего от АЦП значения сопротивления болометра вычитается извлеченное из ОЗУ его начальное значение, а результат записывается в память. Объем ОЗУ позволяет записать восемь полных серий по 64 сигнала. По завершении записи система автоматически переходит в режим индикации, осуществляемой циклически или пошагово. В первом режиме в схеме управления формируются последовательно адреса ячеек ОЗУ, содержащих данную серию. Информация поступает в ЦАП, и профильное распределение в аналоговом виде контролируется на осциллографе либо самописце. В пошаговом режиме параллельный код из ячеек ОЗУ преобразуется в двоично-десятичный и отображается на трехразрядном индикаторе. Одновременно индицируется и номер канала. Система регистрации выполнена на микросхемах серий 176, 564, 572, 590, имеет габаритные размеры стандартного цифрового вольтметра, а также малую потребляемую мощность.

В процессе выполненных испытаний с помощью описанного профильного измерителя определены полная энергия и мощность, состояние поляризации, восстановлен вид функции распределения интенсивности и интегральные пространственно-энергетические характеристики излучения нескольких лазерных установок, в частности расходимость электроионизационного технологического лазера [8]. Возможность определения комплекса параметров в сочетании с высокой лучевой стойкостью болометров и малыми (менее 2 %) потерями энергии на приемном элементе делает профильный измеритель перспективным для использования в системах контроля параметров излучения лазерных технологических установок.

Список литературы: 1. Кузьмичев В. М., Латынин Ю. М., Приз И. А. Решетчатый измеритель энергии импульсов излучения ОКГ // Приборы и техника эксперим.— 1974.— № 2.— С. 194—197. 2. Катрич А. Б., Кузьмичев В. М. Измерение направления поляризации электромагнитного излучения // Импульс. фотометрия.— 1978.— Вып. 5.— С. 129—131. 3. Кузьмичев В. М., Катрич А. Б. К вопросу определения энергетического центра и диаметра пучка излучения ОКГ. // Квантовая электроника.— 1975.— 2, № 1.— С. 177—179. 4. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям.— М.: Мир, 1983.— 356 с. 5. Катрич А. Б. Измерение характеристик излучения приемниками с дискретным расположением элементов // Тепловые приемники излучения.— Л., 1983.— С. 88—89. 6. Цензор Я. Методы реконструкции изображений, основанные на разложении в конечные ряды // Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике.— 1983.— 73, № 3.— С. 148—160. 7. Уилкинсон, Райнш. Справочник алгоритмов на языке Алгол.— М.: Машиностроение, 1976.— 389 с. 8. Расходимость излучения универсального технологического электроионизационного СО₂-лазера / Н. Г. Басов, В. А. Данильчев, А. Б. Катрич и др. // Применение лазеров в народном хозяйстве: Тез. докл., Звенигород, 12—16 мая 1984 г.— М., 1985.— С. 16—17.

Поступила в редколлегию 25.06.85