

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.373.8

Численный метод юстировки резонатора по изображению выходного пучка

М.В. Андреев¹, С.М. Бобровников², Е.В. Горлов²,
Ю.Н. Панченко¹, А.В. Пучикин¹, В.И. Жарков^{2*}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 8.08.2017 г.

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований по управлению оптическими элементами резонатора КгF-лазера с помощью метода обработки изображений. Рассмотрены различные методы бинаризации изображения пучка для определения граничных размеров и выравнивания распределения интенсивности его излучения. Определены условия, позволяющие ускорить процесс юстировки дисперсионного резонатора в автоматическом режиме работы лазера и восстановить исходные параметры выходного пучка с точностью до 5%.

Ключевые слова: эксимерный лазер, обработка изображений, методы бинаризации, лазерный пучок, резонатор, интенсивность излучения; excimer laser, image processing, binarization methods, laser beam, cavity, radiation intensity.

Введение

В настоящее время электроразрядные ХеСl- и КгF-лазеры, генерирующие высокоэнергетическое излучение в УФ-диапазоне спектра [1], широко применяются в лидарах с целью измерения температуры и влажности воздуха, обнаружения вредных и опасных веществ в атмосфере [2, 3], а также определения концентрации озона в тропосферных слоях атмосферы [4]. В этих случаях для транспортировки зондирующего пучка на большие расстояния необходимо иметь высококачественное излучение со стабильными параметрами.

Для формирования в эксимерном лазере излучения с малой расходимостью, как правило, используют либо неустойчивый телескопический резонатор, либо оптическую систему генератор—усилитель. Однако в процессе работы лазерного источника может происходить разъюстировка оптических элементов резонатора, что приводит не только к снижению энергии выходного пучка, но и к ухудшению его качества. Среди основных причин, приводящих к расстройке резонатора, следует выделить вибрацию корпуса лазера, изменение температуры

оптических и механических элементов, несовершенство подвижных оптико-механических узлов резонатора и др.

В связи с этим контроль наличия обратной связи и автоматическое управление оптико-механическими элементами резонатора лазера представляют собой актуальные задачи. Цель настоящей работы — разработка численного метода, позволяющего осуществлять контроль и управление параметрами выходного излучения в автоматическом режиме.

Метод восстановления изображения и положения лазерного пучка

Разрабатываемый метод включает в себя ряд последовательно выполняемых этапов: определение поперечных размеров изображения; сведение центров текущего и эталонного положений пучка; выравнивание величины интенсивности по сечению пучка. Очередность действий обусловлена минимальным интервалом времени, в течение которого необходимо восстановить изображение с максимальной заданной точностью.

Для эффективного выполнения каждого этапа метода решались несколько задач, а именно: приведение растрового изображения к бинарному виду, выбор адаптивного медиального фильтра, расчет момента центра масс изображения, сегментирование изображения пучка и вычисление средней интенсивности в сегменте.

* Михаил Владимирович Андреев (andreevmv_86@mail.ru); Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru); Евгений Владимирович Горлов (gorlov_e@mail.ru); Юрий Николаевич Панченко (yuranchenko@sibmail.com); Алексей Владимирович Пучикин (apuchikin@mail.ru); Виктор Иванович Жарков (zharkov@iao.ru).

Сложность определения положения пучка и его границ на растровом изображении обуславливает необходимость приведения изображения к бинарному виду, где два соседних пикселя могут принимать только значения 0 или 1.

В нашем случае для бинаризации изображения был использован метод Оцу [5]. Выбор был сделан, исходя из сравнения эффективности и точности вычисления порога бинаризации для полутонового изображения с помощью методов Оцу, Бернсена, Яни и метода «среднего с поправкой» [6]. Следует отметить, что метод «среднего с поправкой» на среднюю интенсивность позволял более точно определить порог бинаризации по интенсивности из неравенства

$$\frac{E(p) + \Delta E(p_k)}{S(p) + \Delta S(p_k)} \geq \frac{E(p)}{S(p)},$$

где $E(p)$ – суммарная интенсивность с порогом P ; $S(p)$ – сумма пикселей с порогом P ; $\Delta E(p_k)$ – приращение интенсивности с порогом P_k ; $\Delta S(p_k)$ – приращение суммы пикселей с порогом P_k .

Начальная величина порога бинаризации задавалась выражением

$$P = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2},$$

где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности пикселя на изображении.

Значение порога на каждом последующем шаге увеличивалось на единицу, при этом осуществлялось сравнение величин полученной и вычисленной ранее интенсивности.

Основной недостаток метода «среднего с поправкой» – длительное время нахождения порога, так как на каждом шаге приходится просматривать все пиксели. Тем не менее этот метод обеспечивает высокую точность бинаризации изображений лазерного пучка, поэтому он был принят нами за образцовый.

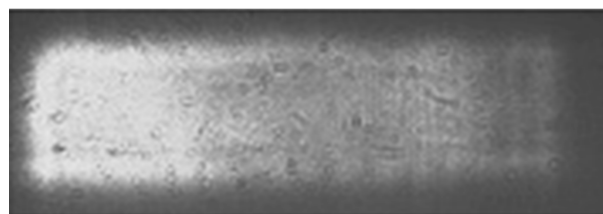
При анализе изображения лазерного пучка прямоугольной формы разъюстированного резонатора (рис. 1) величина порога бинаризации по методу Оцу составила 85, Бернсена – 104, Яни – 100, по методу «среднего с поправкой» – 80. Площадь полученного различными методами пучка сокращалась относительно образцового пучка на 2, 23 и 21% соответственно. Отметим, что предлагаемый метод обработки изображений тестировался нами для лазерных пучков с различными формой (круглой, гауссовой) и профилем распределения интенсивности по сечению.

После приведения исходного растрового изображения к бинарному виду применяется адаптивный медиальный фильтр, который убирает с обработанного изображения точечный шум в виде «соли и перца». На этом же этапе определяются координаты центра масс (M_x, M_y) исходного растрового изображения, которые принимаются за начальное положение центра пучка на изображении:

$$M_x = \frac{\sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} (p_{\max} - x_i p_{ij})}{\sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} p_{ij}};$$

$$M_y = \frac{\sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} (p_{\max} - y_j p_{ij})}{\sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} p_{ij}},$$

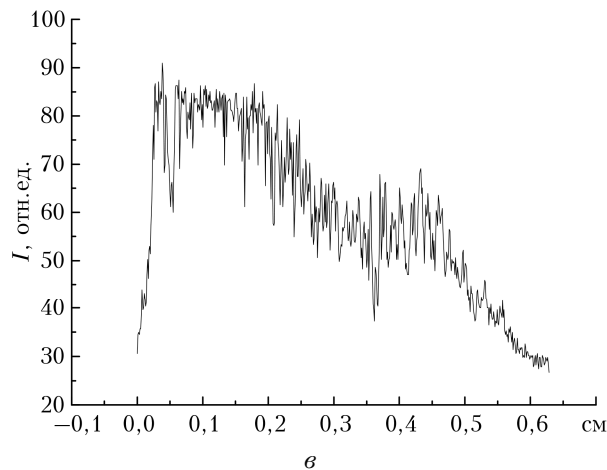
где p_{ij} – интенсивность пикселя в точке (x_i, y_j) ; p_{\max} – максимальная интенсивность пикселя на изображении; N_x – ширина растрового изображения; N_y – высота растрового изображения.



а



б



в

Рис. 1. Изображение пучка, полученного при разъюстированном резонаторе, в растровом (а) и в бинарном виде (б); распределение интенсивности по сечению пучка вдоль горизонтальной стороны (в)

Для нахождения границ прямоугольного пучка бинарного вида применяется следующий алгоритм. Вначале определяются координаты границ пучка по горизонтальным сторонам и положение центра пучка соответственно этим координатам, затем – коор-

динаты границ пучка по вертикальным сторонам и положение центра пучка относительно них. Для нахождения координат боковых границ пучка задаются следующие условия: $x_l \in [1, M_x - 1]$ – положение левой и $x_r \in [M_x + 1, N_x - 2]$ – положение правой границ пучка; $I(x_l, M_y)$ – интенсивность пикселя в точке (x_l, M_y) , равная 0 или 1;

$$I(x_l, M_y) = I(x_l + 1, M_y);$$

$$I(x_l, M_y) \neq I(x_l - 1, M_y);$$

$$I(x_r, M_y) = I(x_r - 1, M_y);$$

$$I(x_r, M_y) \neq I(x_r + 1, M_y).$$

Координата положения центра пучка по оси x

$$x_c = \frac{x_l + x_r}{2}.$$

Затем задаются условия для определения координат верхней и нижней границ пучка и вычисляется координата положения центра пучка по оси y : $y_h \in [1, X_c - 1]$ и $y_l \in [X_c + 1, N_y - 2]$ – координаты верхней и нижней границы пучка соответственно;

$$I(x_c, y_l) = I(x_c, y_l + 1);$$

$$I(x_c, y_l) \neq I(x_c, y_l - 1);$$

$$I(x_c, y_h) = I(x_c, y_h - 1);$$

$$I(x_c, y_h) \neq I(x_c, y_h + 1);$$

$$y_c = \frac{y_l + y_h}{2}.$$

После вычисления координат x_c и y_c центра исследуемого пучка проводилась дополнительная итерация первоначального цикла с целью повышения точности координаты x_c .

Далее определяются геометрические размеры бинаризованного пучка: высота $H = y_l - y_h$ и ширина $W = x_l - x_r$, которые затем сравниваются с размерами эталонного прямоугольного пучка. Однако полученные данные позволяют определить только величину его смещения от первоначального эталонного положения с точностью σ , не превышающей 10–15%, так как исходное распределение интенсивности по сечению пучка остается неизвестным.

Для дальнейшего повышения точности восстановления изображения пучка в алгоритм метода была введена дополнительная функция, контролирующая профиль распределения интенсивности по сечению пучка. Это обеспечивалось сегментацией растрового изображения пучка с последующим сравнением уровня интенсивности на каждом единичном сегменте. Для оценки имеющейся амплитудной неоднородности интенсивности по сечению пучка вводился двумерный массив данных I_{ij} ($i \in [0, N]$, $j \in [0, M]$), N и M – количество строк

и столбцов соответственно). Каждый элемент массива, определяющий величину интенсивности, рассчитывался следующим образом:

$$I_{ij} = \sum_{k=\frac{N_x}{N}i}^{\frac{N_x}{N}(i+1)} \sum_{x=\frac{N_y}{M}j}^{\frac{N_y}{M}(j+1)} I_{kx}.$$

После нескольких итераций с растущими величинами N и M определялись сектора пучка с пониженными значениями интенсивности. Условия достижения симметрии распределения интенсивности по сегментам можно записать как

$$\left| 1 - \frac{\sum_{j=0}^{M-1} I_{kj}}{N-1} \right| < \delta;$$

$$\left| 1 - \frac{\sum_{j=0}^{N-1} I_{ik}}{M-1} \right| < \delta,$$

где k – номер сектора, который в данный момент просматривается; δ – степень асимметрии распределения интенсивности.

Экспериментальное исследование применения численного метода для юстировки резонатора

Исследования проводились на КгF-лазерной системе, состоящей из задающего генератора и усилителя. Подробное описание системы приведено в [7]. Качественное излучение формировалось в отдельном КгF-лазерном модуле, где был установлен дисперсионный резонатор, обеспечивающий работу задающего генератора (ЗГ), и было реализовано однопроходное усиление.

Оптическая схема ЗГ представлена на рис. 2. Излучение ЗГ выводилось через прямоугольную призму с полным внутренним отражением, у которой часть поверхности использовалась как полупрозрачное резонаторное зеркало с $R = 10\%$, а вторая половина поверхности имела просветляющее покрытие. Для обратной связи в резонаторе устанавливалась дифракционная решетка 2400 штр/мм, работающая в автоколлимационном режиме с отражением во 2-й порядок. Перед ней размещался призмный телескоп с увеличением 10^x по одной координате. Для повышения выходной энергии излучения без потери спектральной яркости в селективном резонаторе использовались две щелевые диафрагмы 2×7 мм, ориентированные вдоль нарезки дифракционной решетки. Для формирования линейно-поляризованного излучения окна лазерной

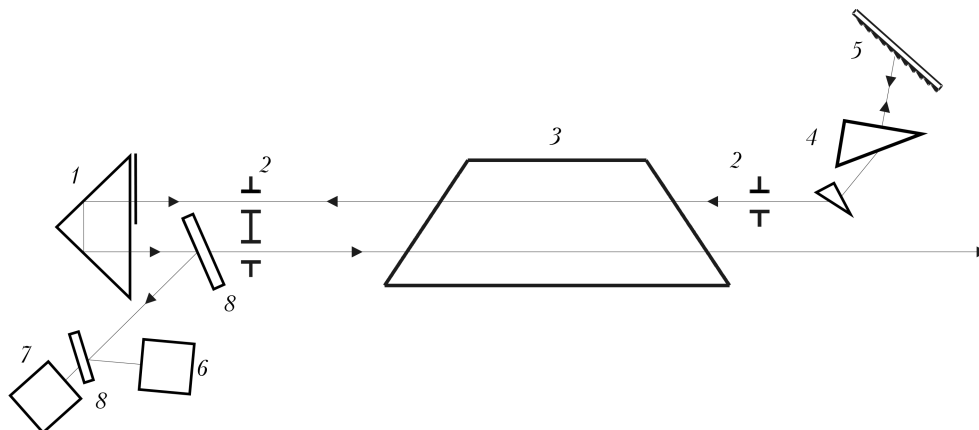


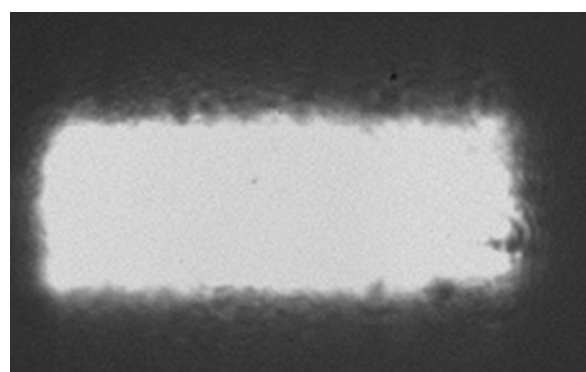
Рис. 2. Оптическая схема задающего генератора: 1 – прямоугольная призма с коэффициентом отражения 10%; 2 – диафрагма 7 × 2 мм; 3 – активная среда; 4 – призмный телескоп; 5 – дифракционная решетка 2400 штр/мм; 6 – профилометр SP620U; 7 – определитель длины волны WS6-776; 8 – делительная пластина

камеры располагались под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Степень поляризации выходного пучка, измеренная в максимуме его интенсивности, была не менее 0,9. Ширина спектральной линии генерации составила 2 пм, энергия излучения – 1–2 мДж при длительности импульса 16 нс. После прямого усиления энергия пучка увеличилась до 10–15 мДж; расходимость усиленного пучка составила в одной плоскости 0,2, а в другой 0,9 мрад.

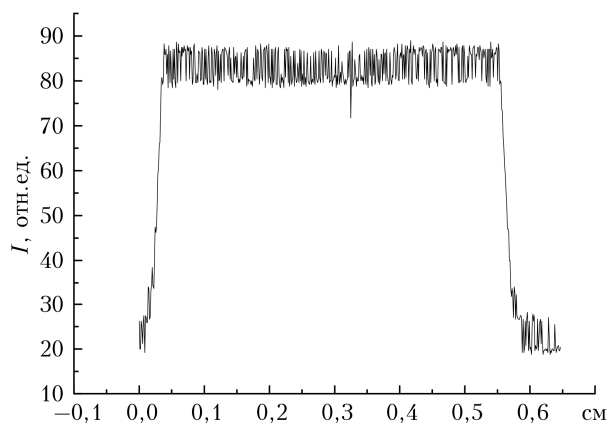
Автоматизированное управление оптико-механическими устройствами, удерживающими концевую резонаторную оптику 1 (прямоугольная призма) и 5 (дифракционная решетка) на рис. 2, осуществлялось с помощью шаговых двигателей. Кроме регистрации пространственного распределения интенсивности выходного излучения с помощью профилометра SP620U, прибором WS6-776 также контролировались длина волны, ширина спектральной линии и энергия лазерного пучка. При возникновении разъюстировки дисперсионного резонатора происходило изменение ряда параметров выходного излучения относительно начальных образцовых показаний. После выявления конкретного оптического узла, ответственного за расстройку резонатора, автоматически осуществлялся возврат данного элемента в первоначальное положение. В случае отклонения обоих узловых элементов резонатора выполнялось несколько итераций юстировки резонатора до полного восстановления первоначальных параметров выходного излучения.

На рис. 1, *a* приведено растровое изображение пучка в случае расстройки дисперсионного резонатора. Видно, что после приведения изображения к бинарному виду наблюдается некоторое уменьшение размеров пучка, ввиду того что низкоинтенсивная часть пучка не превышает порог бинаризации. Рассчитанные геометрические границы пучка при пороге бинаризации, равном 85, составили $W \times H = 446 \times 168$ пк². После выполнения операции выравнивания интенсивности при заданной степени асимметрии $\delta = 0,02$, $N = 64$ и $M = 32$ на выходе из резонатора был получен первоначальный образ-

цовый пучок. На рис. 3 представлены растровое изображение восстановленного пучка и распределение его интенсивности после проведения всех итераций предлагаемого метода.



a



б

Рис. 3. Растровое изображение лазерного пучка на выходе из съюстированного резонатора (*a*); распределение интенсивности по сечению пучка вдоль горизонтальной оси (*б*)

Данное изображение (рис. 3, *a*) практически полностью соответствует исходному виду пучка; первоначальные характеристики излучения также восстанавливались.

Заключение

Численно и экспериментально исследован метод обработки изображения, включающий в себя вычисление геометрического контура лазерного пучка и определение распределения интенсивности излучения по его сечению. Метод позволяет работать с изображением пучков различной формы и с разными профилями распределения интенсивности по сечению. Найдены условия применения данного метода, позволяющие ускорить процесс юстировки дисперсионного резонатора в автоматическом режиме работы KrF-лазера и восстановить исходные параметры выходного качественного пучка с точностью до 5%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (соглашение № 17-19-01229).

1. *Ражев А.М., Каргапольцев Е.С., Чуркин Д.С.* Мощные газоразрядные эксимерные ArF-, KrCl-, KrF- и XeCl-лазеры на газовых смесях без буферного газа. // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 2. С. 106–111; *Razhev A.M., Kargapoltsev E.S., Churkin D.S.* High-power gas discharge excimer ArF, KrCl, KrF, and XeCl lasers on gas mixtures free of buffer gas // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 575–579.

2. *Bobrovnikov S.M., Vorozhtsov A.B., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Maksimov E.M., Panchenko Y.N., Sakovich G.V.* Lidar detection of explosive vapors in the atmosphere // Russ. Phys. J. 2016. V. 58, N 9. P. 1217–1225.
3. *Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И.* Экспериментальная оценка чувствительности СКР-лидара при использовании среднего УФ-диапазона длин волн // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 70–74; *Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I.* Experimental estimation of raman lidar sensitivity in the middle UV // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 320–325.
4. *Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., Ельников А.В.* Наблюдение прорыва стратосферных воздушных масс в верхнюю тропосферу по лидарным измерениям озона // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 593–599.
5. *Shapiro L.G., Stockman G.C.* Computer Vision. London: Prentice Hall, 2001. 617 p.
6. *Gonzales R.C., Woods R.E.* Digital Image Processing. Boston MA: Addison Wesley, 2001. 813 p.
7. *Панченко Ю.Н., Андреев М.В., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Дударев В.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Павлинский А.В., Пучикин А.В., Жарков В.И.* Узкополосная перестраиваемая лазерная система для лидарного комплекса // Изв. вуз. Физика. 2012. Т. 55, № 6. С. 13–18.

M.V. Andreev, S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, Yu.N. Panchenko, A.V. Puchikin, V.I. Zharkov.
Numerical method for cavity alignment by output beam image.

Numerical and experimental studies of the control of optical elements of the KrF-laser cavity using the image processing method are carried out. Different image binarization methods are considered as applied to determining the boundary dimensions and equalizing the intensity distribution of the laser beam. Conditions for rapid adjustment of the dispersion cavity in automatic mode of laser operation are ascertained, and the initial parameters of the output beam are retrieved within 5%.