ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.378.325

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМ РАБОТЫ ЮСТИРОВОЧНОГО МОДУЛЯ МНОГОПУЧКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ “ИСКРА-6”

© 2006 г. **И. А. Бубнов**[*]; **С. Г. Гаранин**[**], доктор физ.-мат. наук; **С. В. Григорович**[**]; **Т. П. Малинова**[*]; **В. Ю. Матвеев**[*]; **И. И. Соломатин**[**]; **А. Н. Старченко**[*], канд. техн. наук; **В. Г. Филиппов**[*]; **А. В. Чарухчев**[*], канд. техн. наук; **В. Н. Чернов**[*], канд. физ.-мат. наук

[*] Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: contact@niiki.ru

[**] Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл.

E-mail: garanin@otd13.vniief.ru

Разработан и исследован модуль системы автоматической юстировки, представляющий собой масштабированный фрагмент основного четырехпроходного усилителя 128-пучковой лазерной установки “ИСКРА-6”. Методы юстировки основаны на использовании малоразмерных световых маркеров, сцентрированных с апертурами элементов. Экспериментально исследованы алгоритм юстировки, методы обработки изображений, точности и скорости юстировки. Разработан пакет программ для моделирования распространения излучения через оптическую систему и ее автоматической юстировки и проведено сравнение с экспериментом. Результаты служат основой для дальнейшей разработки системы автоматической юстировки лазерной установки.

Коды OCIS: 140.3530.

Поступила в редакцию 12.04.2005.

Введение

Лазерная установка “ИСКРА-6”, создаваемая во ВНИИЭФ (г. Саров), представляет собой 128-пучковую лазерную термоядерную установку на Nd-стекле [1]. Прототипом этой установки является 4-пучковая установка “ЛУЧ” [2] с дистанционной системой юстировки, управляемой оператором [3]. Система автоматической юстировки (САЮ) установки “ИСКРА-6” должна содержать ~ 6700 приводов, управляемых несколькими десятками компьютеров. Для ее создания необходимо проверить алгоритмы юстировок, методы обработки изображений, точность автоматической юстировки и требования к устройствам и программному обеспечению системы юстировки. Кроме того, целесообразно разработать методы математического моделирования САЮ для тестирования алгоритмов и средств юстировки.

Целью данной работы было экспериментальное и теоретическое исследование характеристик модуля САЮ, представляющего масштабированный фрагмент основного усилителя установки “ИСКРА-6”.

Оптическая схема и состав макета модуля САЮ

На рис. 1 показана схема юстировки одного канала 4-проходового основного усилителя установки “ИСКРА-6”. Длина усилителя составляет ~ 100 м, а размеры усиливаемого пучка 300×300 мм. Усилитель содержит два дисковых усилительных каскада и два вакуумных пространственных фильтра. Входной пучок вводится в усилитель вблизи узла фокальных диафрагм (пинхолов) транспортного пространственного фильтра. После двух проходов по усилителю пучок возвращается назад с помощью реверсера. Реверсер открывается затвором Поккельса только на время прохождения лазерного импульса. Торцевые зеркала усилителя М3 и реверсера М5 изображаются фильтрами друг в друга, и поэтому при многократном прохождении через усилитель положение пучка на зеркале М3 остается неизменным. В фокальных плоскостях фильтров положение пучка, наоборот, меняется при каждом проходе из-за внеосевого прохождения по усилителю. Погрешность юстировки должна составлять ±0,5% от размера пучка в ближнем поле (БП) и ±2,5% от диаметра пинхолов в дальнем поле (ДП) [3].

Методы юстировки были предложены в [4] и применены в САЮ создаваемых многопучковых лазерных установок NIF (США) [5–7] и LMJ (Франция) [8]. Эти методы основаны на использовании системы малоразмерных световых маркеров, сцентрированных с апертурами зеркал и с пинхолами пространственных фильтров. Свет подводится к маркерам по оптико-волоконной сети. В процессе юстировки маркеры центрируются друг с другом и с юстировочным

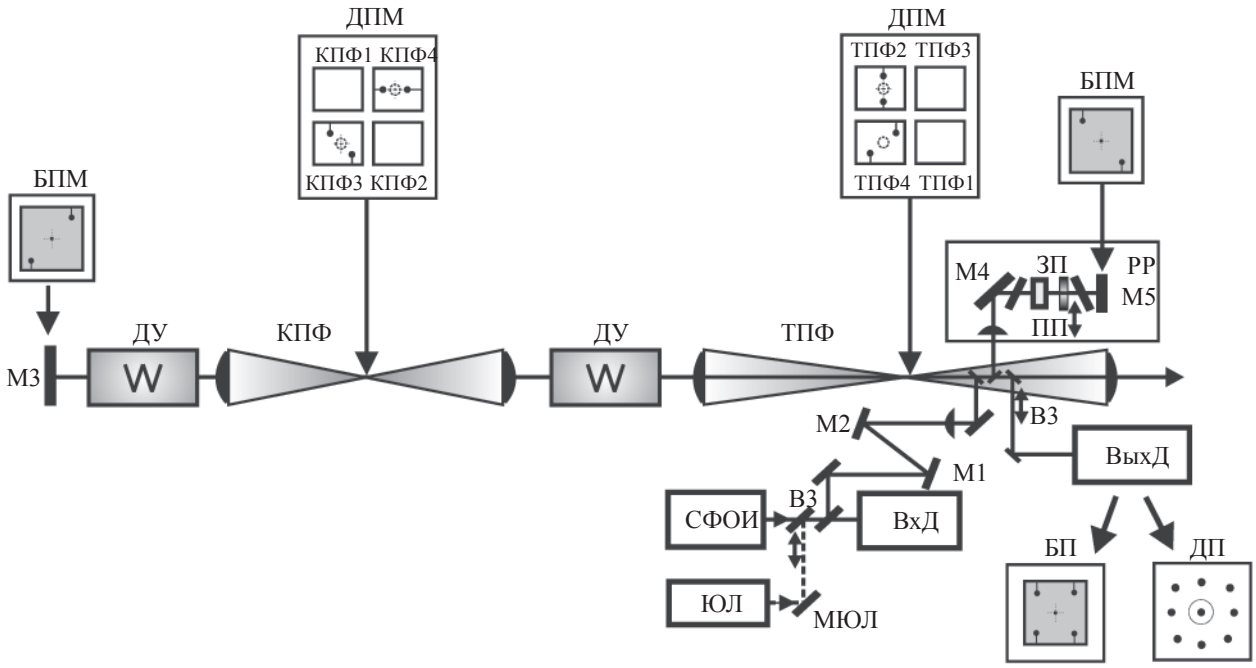


Рис. 1. Схема юстировки основного усилителя установки “ИСКРА-6”.ДУ – дисковый усилитель, ТПФ – транспортный пространственный фильтр, КПФ – кюветный пространственный фильтр, СФОИ – система формирования опорного излучения, ЮЛ – юстировочный лазер, М – зеркала основного усилителя с приводами на шаговых двигателях, ЗП – затвор Поккельса, ПП – вбрасываемая полуволновая пластина, В3 – вбрасываемые зеркала, МЮЛ – зеркало юстировочного лазера с приводом на шаговых двигателях, РР – реверсер, ВхД, ВыхД – входной и выходной датчики.

пучком. В качестве последнего может быть использовано импульсное излучение задающего генератора либо пучок вспомогательного непрерывного лазера.

В САЮ используются приводы на шаговых двигателях пяти зеркал М1–М5 и пинхольного узла кюветного пространственного фильтра, две пары БП-маркеров и четыре пары ДП-маркеров, расположенных вблизи торцевых зеркал М3 и М5 и пинхольных узлов пространственных фильтров соответственно. На время юстировки реверсер открывается вбрасываемой полуволновой пластиной. Юстировочный лазер непрерывного действия вводится в тракт на входе в усилитель. Контроль его совмещения с импульсным пучком системы формирования осуществляется с помощью входного датчика, содержащего ПЗС-камеры с оптическими системами передачи изображений пучков в БП и ДП. Контроль юстировки усилителя осуществляется с помощью выходного датчика, на который юстировочное излучение подается с помощью зеркала, вбрасываемого за выходным пинхолом транспортного фильтра. Примеры картин излучения, наблюдаемых на выходном датчике, показаны на рис. 1. Пары маркеров расположены симметрично относительно апертур элементов и развернуты один относительно другого. Маркеры, расположенные последними по ходу пучка, являются опорными и задают центр системы координат, относительно которой определяются разъюстировки (векторы ошибок) других маркеров и пучка. Если разъюстировки превышают допустимую величину, то вычисляются и посылаются на приводы необходимые управляющие воздействия, результатом которых является достижение требуемого взаимного позиционирования пучка и маркеров.

Оптическая схема исследованного модуля САЮ представлена на рис. 2. Юстируемая схема модуля состоит из четырех зеркал с приводами М1–М4 и одного пространственного фильтра, образованного линзами Л1 и Л2. Эта схема является уменьшенной частью схемы основного усилителя. В ней моделируется распространение пучка на третьем и четвертом проходах по усилителю на рис. 1, в котором пучок вводится со стороны развернутого на 45° торцевого зеркала реверсера М5 (в модуле зеркало М2), а между пространственными фильтрами в плоскости изображения торцевого зеркала реверсера дополнительно установлено отражающее назад зеркало (в модуле зеркало М4). Таким образом, зеркала М2 и М4 изображаются пространственным фильтром друг в друга. Рабочий пучок в модуле был круглого сечения с диаметром 14 мм. Пинхольный узел пространственного фильтра близок по размерам к пинхольному узлу транспортного фильтра основного усилителя. Диаметры пинхолов составляли 5 мм, а расстояние между ними 40 мм.

К элементам и устройствам САЮ относятся приводы зеркал на шаговых двигателях ДШР-39, лазер со схемой формирования юстировочного пучка, световые маркеры с оптико-волоконной сетью и системой ввода лазерного излучения, датчик БП и ДП

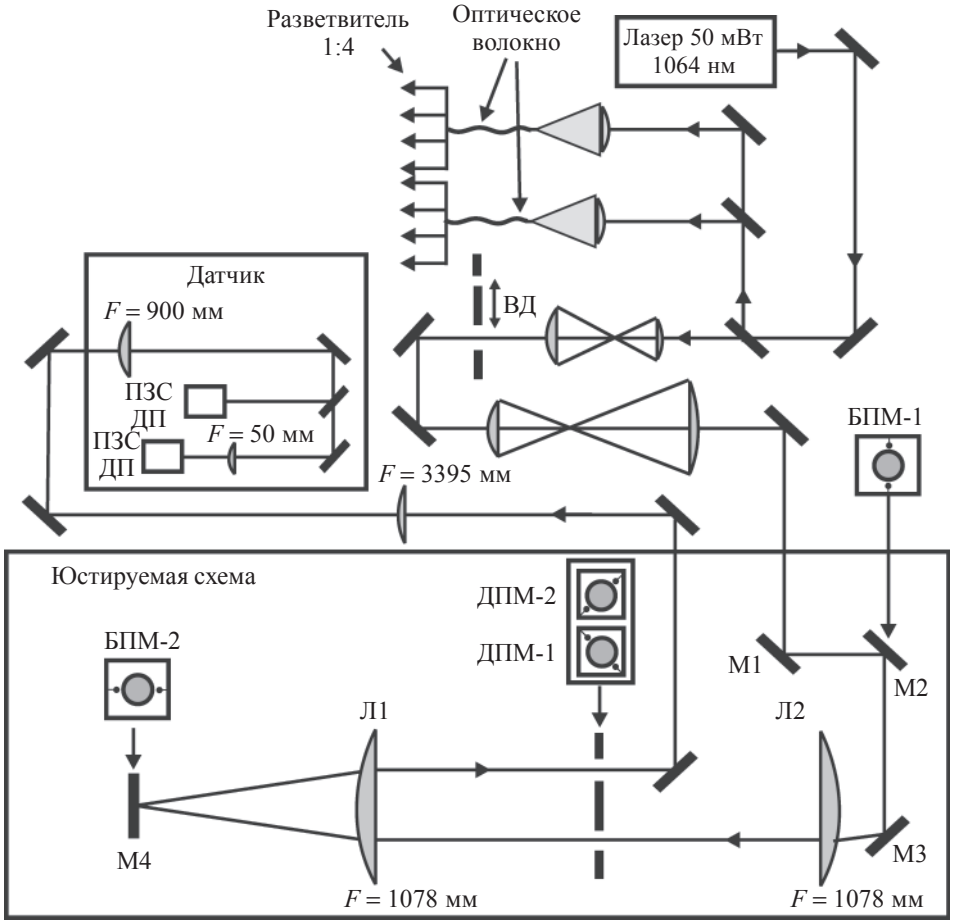


Рис. 2. Схема модуля системы автоматической юстировки. ВД – вбрасываемая диафрагма, Л – линзы пространственного фильтра, БПМ – ближнепольные маркеры, ДПМ – дальнопольные маркеры, М – зеркала с приводами на шаговых двигателях.

и вбрасываемая диафрагма (ВД). Датчик и элементы с приводами аналогичны применяемым в системе юстировки установки ЛУЧ [3]. Поворот зеркала на шаг двигателя составлял 1,5 мкрад. Пучок непрерывного лазера с длиной волны 1064 нм и мощностью 50 мВт разделялся зеркалами на три пучка, два из которых вводились в оптико-волоконную сеть для формирования световых маркеров. Изображение ВД передавалось в плоскость зеркала М2. Диафрагма была выполнена в виде двух отверстий, которые попеременно вводились на оптическую ось с помощью линейного транслятора. С помощью одного из отверстий формировался полномасштабный 14-миллиметровый пучок, который использовался для центрировки пучка в ДП, а с помощью второго отверстия – пучок с диаметром 5 мм для юстировки пучка в БП. Оптико-волоконная сеть была выполнена на многомодовом оптическом волокне и содержала два разветвителя 1:4. Юстировочное излучение пучка и маркеров после выходного пинхола фильтра транспортировалось зеркалами на датчик, содержащий две ПЗС-камеры БП и ДП с оптическими системами.

Система управления состояла из управляющего компьютера с платой видеозахвата NI PCI-1409 (фирма “National Instruments”) и платой интерфейса RS-485 Моха CP-132, аналоговых ПЗС-камер VBS-555 (ЗАО ЭВС, Санкт-Петербург), коммутатора видеосигналов КТП4-1-3 (ЗАО ЭВС) и контроллеров шаговых двигателей КП-39 [3]. Управление всеми устройствами осуществлялось по последовательному интерфейсу RS-485.

Математическое моделирование модуля САЮ

Для моделирования распространения излучения через оптическую систему и процесса ее автоматической юстировки был разработан пакет программ “ОКСАЮ”. Распространение излучения рассматривается в геометрическом приближении по методу трассировки лучей. Разъюстировки модуля измеряются на его выходе в виде вектора ошибок маркеров и пучка в двух опорных плоскостях, одна из которых расположена в БП в плоскости зеркала М4, а вторая – в ДП в плоскости пинхолов пространственного фильтра.

Оптическая схема модуля является многосвязной системой, поскольку повороты отдельных зеркал вызывают смещения выходного пучка в обеих опорных плоскостях. Для таких систем в приближении

небольших разъюстировок выходной вектор ошибок **Y** связан с вектором поворотов зеркал **X** линейным соотношением

$$\mathbf{Y} = W\mathbf{X}, \qquad (1)$$

где W – матрица перекрестных связей оптической схемы размерностью 8×8. Для юстировки модуля необходимо на зеркала подать воздействия **Z**, равные по величине, но противоположные по знаку их разъюстировкам,

$$\mathbf{Z} = -W^{-1}\mathbf{Y}. \qquad (2)$$

Если выходной вектор ошибок **Y** измерен абсолютно точно и дискретность приводов достаточно мала, то схема с известной матрицей W будет съюстирована за одну итерацию. Коэффициенты матрицы перекрестных связей были получены путем измерений в имитационной модели соотношений вида

$$w_{ij} = \Delta y_j/\Delta x_i, \qquad (3)$$

где Δy_j и Δx_i – приращения соответствующих компонент векторов. Аналогичным образом матричные коэффициенты могут быть получены в экспериментах на реальной оптической схеме. Алгоритм юстировки, выраженный соотношением (2), справедлив и в том случае, когда разъюстировки происходят не только вследствие разворотов зеркал, имеющих приводы, но и других элементов схемы.

Найденная матрица W была использована в программе, моделирующей процесс автоматической юстировки модуля. В программе задаются угловые разъюстировки зеркал, точности измерения векторов разъюстировок и значения дискретности приводов зеркал. Разъюстировки зеркал могут быть непосредственно введены для каждого зеркала или заданы случайными величинами. Программа позволяет проводить статистические эксперименты по юстировке, выполняя заданное число юстировочных циклов. Предусмотрены два режима юстировки модуля. В первом режиме при наличии всех измеренных разъюстировок в БП и ДП юстировка осуществляется за один этап путем разворота всех четырех зеркал на углы, вычисленные в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом. Во втором режиме юстировка осуществляется в два этапа. На первом этапе юстировка проводится в БП при сохранении разъюстировок в ДП без изменений, а на втором этапе – в ДП при сохранении разъюстировок в БП без изменений (возможен и обратный порядок юстировки). Второй режим может применяться также в дистанционной системе юстировки, управляемой оператором.

В качестве примера на рис. 3 показан вид рабочего окна программы по окончании юстировки при задании распределения случайных разъюстировок зеркал по нормальному закону со среднеквадратичным

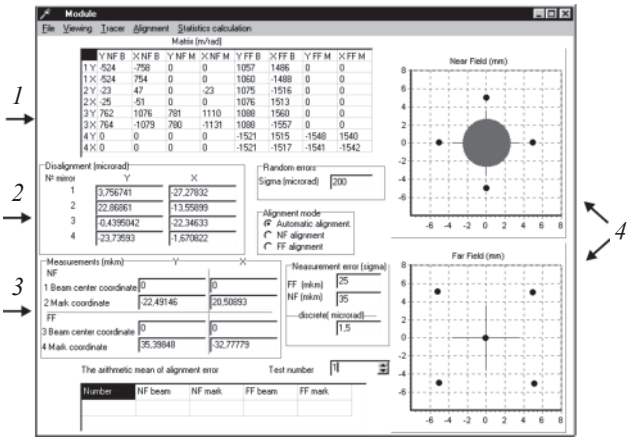


Рис. 3. Вид экрана монитора после моделирования юстировки. *1* – матрица перекрестных связей, *2* – таблица заданных разъюстировок зеркал, *3* – таблица измерений остаточных ошибок центрировки маркеров и пучка, *4* – изображения маркеров и юстировочного пучка в ближнем и дальнем полях.

отклонением (СКО) 200 мкрад. Ошибки измерений также были заданы распределенными по нормальному закону с СКО 26 мкм в ДП и 35 мкм в БП (размеры элементов разрешения в экспериментальном модуле). В рабочем окне показаны матрица перекрестных связей, заданные угловые разъюстировки зеркал и измеренные остаточные ошибки центрировки маркеров и пучка и изображения маркеров и пучка. При расчете вектора ошибок за центры пар маркеров принимались середины соединяющих их отрезков.

Моделирование юстировки модуля в режиме статистического эксперимента при обработке по 300 опытам и нормальном законе распределения разъюстировок зеркал показало, что при точном измерении вектора ошибок в отсутствие дискретности приводов СКО остаточных разъюстировок на ~25% превышали СКО ошибок измерений. Это объясняется тем, что при нормальном законе распределения ошибок по двум взаимно-перпендикулярным направлениям с СКО, равным σ, распределение модуля вектора ошибок будет подчиняться уже релеевскому закону, согласно которому математическое ожидание модуля вектора ошибок равно $(\pi/2)^{0,5}\sigma = 1{,}25\sigma$. Дискретность приводов зеркал для рассматриваемого юстировочного модуля (1,5 мкрад/шаг или 3 мкм в плоскости пинхолов) практически не влияет на точность юстировки вследствие ее малости по сравнению с СКО ошибок измерений.

Экспериментальное исследование модуля САЮ

Процесс автоматической юстировки модуля состоял из следующих этапов:

1. Получение и обработка изображений юстировочного излучения в БП и ДП.

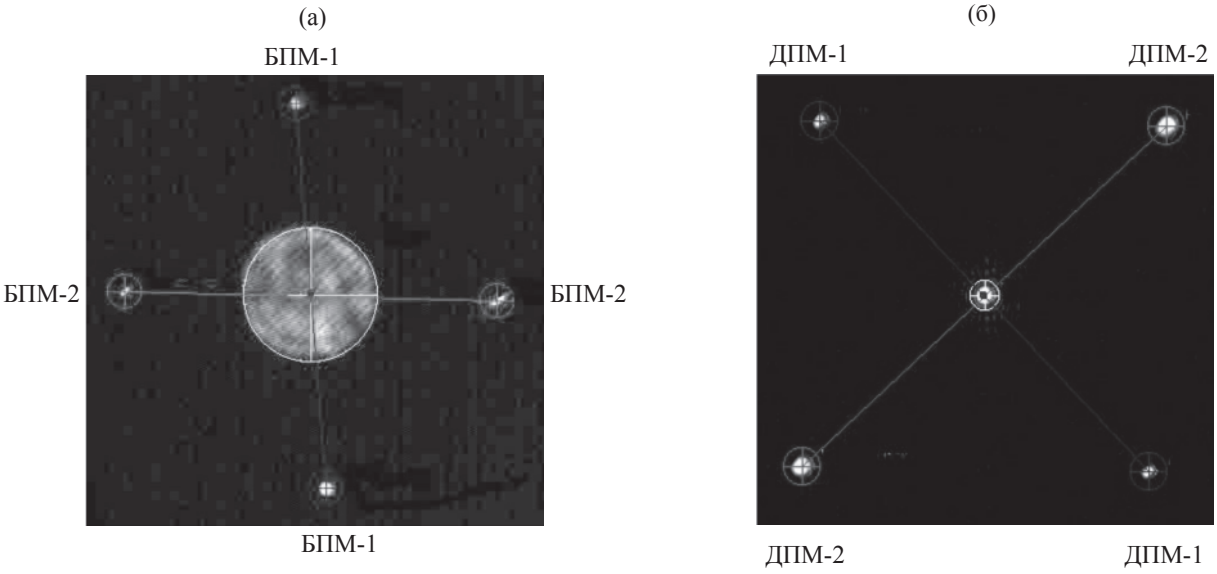


Рис. 4. Изображения пучка и маркеров на датчиках ближнего (а) и дальнего (б) полей по окончании юстировки модуля. На изображения пятен нанесены их центры и эффективные окружности.

2. Определение вектора ошибок пучка и маркеров в БП и ДП и сравнение его с заданными точностями юстировки. Если различия больше заданных точностей юстировки, то происходит выдача команды на расчет управляющих воздействий на приводы зеркал.

3. Расчет управляющих воздействий на приводы зеркал с использованием матрицы перекрестных связей.

4. Выполнение юстировки путем подачи управляющих воздействий на приводы зеркал и переход к следующей итерации.

Программное обеспечение работало под управлением операционной системы MS Windows и имело иерархическую модульную структуру. При ее реализации использовалась концепция объектно-ориентированного программирования. Программный модуль низшего уровня обеспечивал управление контроллерами шаговых двигателей, камерами и коммутатором по последовательному интерфейсу RS-485. Каждое из этих устройств имело уникальный адрес, хранящийся в его энергонезависимой памяти. Скорость обмена данными по интерфейсу составляла 115,2 кбит/с для всех устройств.

Изображения с ПЗС-камер вводились в компьютер с помощью программного модуля для работы с платой видеозахвата. Аналоговые изображения преобразовывались в 8-битные цифровые изображения с разрешением 768×576 пикселов. Размеры элементов разрешения изображений в предметных плоскостях БП и ДП, как было определено экспериментально, составляли 35 и 26 мкм соответственно.

С помощью программного модуля обработки и распознавания изображений проводились фильтрация шумов, определение положений центров изображений пучка и маркеров и их идентификация. Фильтрация шумов осуществлялась путем увеличения контраста с помощью возведения в квадрат интенсивности изображения в кадре и последующей отсечки шумов на уровне 25% от максимальной интенсивности. Пример изображений пучка и маркеров в БП и ДП по окончании юстировки показаны на рис. 4. Положение центров маркеров и пучка определялось на основе результатов предварительных измерений размеров пятен и их положения в кадре. Как показали измерения, размеры маркеров в БП и ДП и пучка в ДП не превышают 30 пикселов, а размер пучка в БП не превышает 200 пикселов. Поэтому поиск пятен осуществлялся путем сканирования кадра с шагом 15 пикселов. Для этого из исходной точки последовательно строились окружности с возрастающим радиусом и изучалась зависимость энергии излучения в этих окружностях от их радиуса. По количеству и положению точек перегиба определялся характер расположения исходной точки (внутри или вне пятна), а также оценивался радиус пятна. Положение центра пятна и определение его радиуса проводилось путем изменений положения центра окружности и ее радиуса и подсчета энергии в пятне. Варьирование положения центра и диаметра окружности продолжается до тех пор, пока не перестает расти энергия, попадающая в окружность. Это означает, что радиус окружности стал близок к эффективному радиусу пятна. Центр пятна определялся по положению его центра масс.

Так как на изображениях присутствовали малоразмерные, не превышающие размеров 1–2 пикселов, пятна, вызванные световыми помехами и дефектами матрицы, то в алгоритм поиска включалась селекция пятен по энергии, поскольку энергия та-

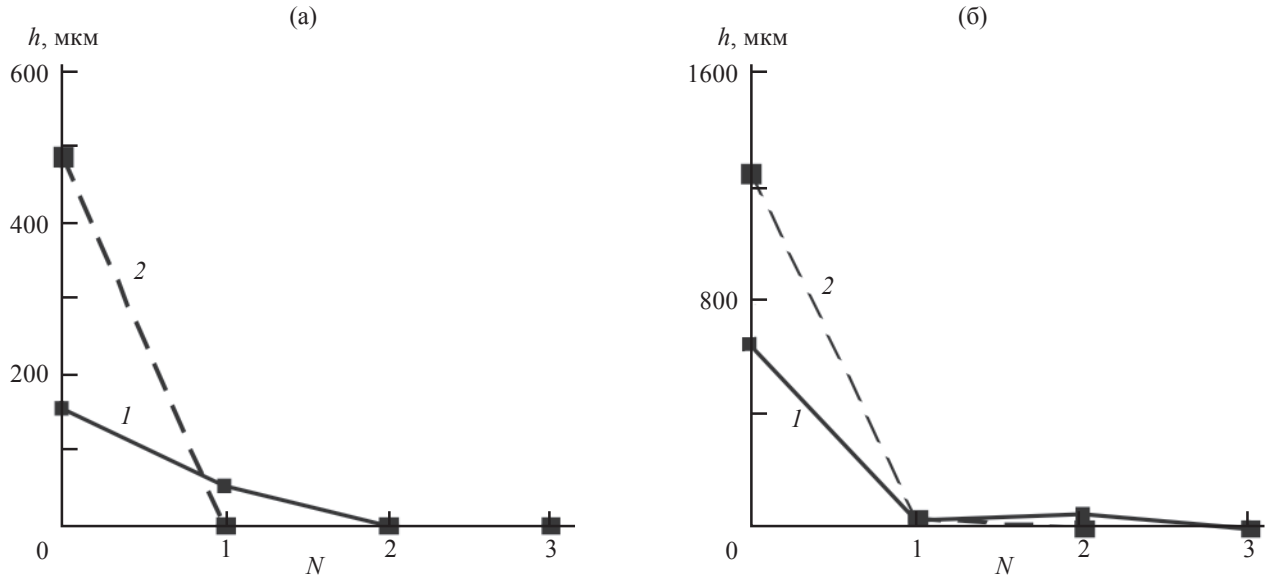


Рис. 5. Зависимости точности юстировки пучка от числа итераций автоматической юстировки в ближнем (а) и дальнем (б) полях в горизонтальной (*1*) и вертикальной (*2*) плоскостях при разъюстировке зеркала М1 одним из приводов на угол 605 мкрад.

ких помеховых пятен была значительно меньше энергии пятен маркеров. Распознавание пучка и маркеров осуществлялось по их положению в кадре. Пятно, расположенное максимально близко к центру масс кадра в БП, принималось за изображение пучка. Пучок в ДП определялся по его центральному положению в кадре. Идентификация маркеров проводилась по их положению в системе координат XOY с центром в левом нижнем углу кадра. Как видим, в БП (рис. 4а) опорные маркеры БПМ-2 имеют наименьшую и наибольшую координаты по горизонтальной оси X. В ДП (рис. 4б) опорные маркеры ДПМ-2 имеют минимальную и максимальную суммы координат по обеим осям X и Y. Идентификация пар маркеров возможна также по величине и ориентации соединяющего их отрезка, что упрощает распознавание, в особенности при большом количестве маркеров в кадре.

После идентификации пятен вычислялся вектор ошибок положения пучка и пар маркеров БПМ-1 и ДПМ-1 относительно пар опорных маркеров БПМ-2 и ДПМ-2. За центры пар маркеров принимались середины соединяющих их отрезков. При превышении ошибок заданных точностей юстировки вычислялся по формуле (2) вектор управляющих воздействий с использованием матрицы перекрестных связей оптической схемы. Коэффициенты матрицы были найдены путем математического моделирования, а также измерены экспериментально с помощью специально разработанной программы. Отличия экспериментальных значений от теоретических не превышали 5%.

Управляющие воздействия передавались на контроллеры шаговых двигателей приводов зеркал. На рис. 5 приведен пример сходимости процесса юстировки пучка в БП и ДП после разъюстировки зеркала М1 одним из приводов на 605 мкрад. Приводы двигателей заклоняют зеркала под углами 45° к горизонтальной плоскости, в которой приведена оптическая схема на рис. 2. Оси координат ПЗС-камер, по которым проводятся остаточные разъюстировки, ориентированы по вертикали и горизонтали. При обработке изображений координаты центров пучков и маркеров округлялись до целочисленных значений пикселов камер. По этой причине остаточные разъюстировки на рис. 5 после 2–3 итераций имели нулевую величину, что соответствует точности юстировки менее одного пиксела и соответственно 35 и 26 мкм для БП и ДП. Таким образом, остаточные ошибки юстировки в БП не превышали 0,2% от полного размера пучка, а в ДП – 0,5% от диаметра пинхола, что заметно лучше требуемых точностей юстировки. Изменение коэффициентов матрицы перекрестных связей в пределах 10% практически не влияло на требуемое количество итераций и точность юстировки.

Длительность одной итерации юстировки составляла около 30 с. Большая часть времени (~ 20 с) затрачивалась на установку с помощью линейного транслятора диафрагмы, формирующей пучок при юстировке в БП. Коммутация, ввод сигналов ПЗС-камер, обработка изображений и формирование вектора управляющих воздействий проводились за 1–2 с. Остальное время 8–9 с уходило на работу приводов зеркал.

Заключение

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования модуля САЮ продемонстрировали эффективность разработанного алгоритма

автоматической юстировки, методов обработки изображений и высокую точность юстировки. Эти результаты являются основой для разработки и изготовления системы автоматической юстировки установки “ИСКРА-6”.

Авторы благодарны Никитину Н.В., Потапову С.Л. и Сердюкову А.В. за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kirillov G.A.* Development of a high-power 300-kJ neodymium laser // Proc. SPIE. 1997. V. 3047. P. 43–53.
2. *Sukharev S.A.* The high-power phosphate-glass laser system “Luch” – a prototype of the “Iskra-6” facility module // Proc. SPIE. 1999. V. 3492. P. 12–24.
3. *Аушев А.Ф., Бородин В.Г., Бубнов И.А., Вензель В.И., Гаранин С.Г., Горелов А.В., Деркач И.Н., Львов Л.В., Малинова Т.П., Матвеев В.Ю., Михайлов Ю.В., Никитин Н.В., Потапов С.Л., Сидоровский Н.В., Смирнов А.Б., Старченко А.Н., Сухарев, С.А., Угрюмов А.В, Филиппов В.Г., Чарухчев А.В., Чернов В.Н.* Система дистанционной юстировки четырехканальной лазерной установки на Nd-стекле “ЛУЧ” // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 4. С. 56–64.
4. *Bliss E.S., Feldman M., Murray J.E., Vann C.S.* Laser chain alignment with low power local light sources // Proc. SPIE. 1996. V. 2633. P. 760–767.
5. *Boege S.J., Bliss E.S., Chocol C.J., Holdener F.R., Miller J.L., Toeppen J.S., Vann C.S., Zacharias R.A.* NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351 nm laser source // Proc. SPIE. 1998. V. 3047. P. 248–258.
6. *Zacharias R.A., Beer N.R., Bliss E.S., Burkhart S.C., Cohen S.J., Sutton S.B., Van Atta R.L., Winters S.E., Salmon J.T., Stolz C.J., Pigg D.C., Arnold T.J.* National Ignition Facility alignment and wavefront control // Proc. SPIE. 2004. V. 5341. P. 168–179.
7. *Stout E.A., Miller Kamm V.J., Spann J.M., Van Arsdall P.J.* A prototype distributed object-oriented architecture for image-based automatic laser alignment // Proc. SPIE. 1997. V. 3047. P. 214–221.
8. *Rioland J., Thibout P., Jano P.J.* Use of the laser front end for alignment the 240 beamlines of the laser megajoule // Proc. SPIE. 1997. V. 3047. P. 222–226.