

УДК 621.378.5

Система автоматической юстировки 4-проходного усилителя

**С. А. Бельков, Е. В. Поздняков,
И. И. Соломатин, А. В. Андраманов,
В. Е. Гаганов, А. В. Виноградов**

Создана система автоматической юстировки (САЮ) макета 4-проходного усилительного канала лазерной установки мегаджоульного уровня. Усилительный канал включает систему ввода лазерного излучения от задающего генератора, два пространственных фильтра, разделяющих пространства с активной средой и реверсор. Принцип юстировки оптической схемы основан на видеоконтроле с помощью ПЗС – камер датчика силового усилителя (ДСУ), взаимного положения центров юстировочного пучка и оптических элементов, габариты которых обозначены маркерами. Измеренные рассогласования преобразуются в команды коррекции положения оптических элементов, снабженных исполнительными механизмами. Изображения маркеров и юстировочного пучка заводятся на камеры ДСУ на выходе 4-го прохода при помощи поворотного зеркала, вбрасываемого в оптический тракт на время юстировки. В отличие от усилительных каналов NIF и LMJ применена система маркеров на основе лазерных диодов. Финальная юстировка усилительного канала осуществляется компьютерной системой управления без вмешательства персонала.

Необходимость разработки системы автоматической юстировки для установки мегаджоульного уровня определяется как большим количеством (более трех тысяч) оптических элементов, требующих подстройки в каждом опыте, так и конструктивными особенностями их компоновки в канале главного усилителя. Большая часть этих элементов находится в вакуумных кессонах, коробах и других труднодоступных местах; время настройки ограничено дрейфом элементов и количеством настройщиков.

В данной работе приведено описание стенда отработки системы автоматической юстировки усилительного канала четырехпроходного неодимового лазера. Стенд смонтирован в лазерном зале установки «Искра-5» частично на элементах установки «Искра-5». Стенд включает зеркало торцевое (ЗТ), кюветный пространственный фильтр (КПФ), транспортный пространственный фильтр (ТПФ), реверсор, блок юстировочного лазера (БЮЛ) и датчик силового усилителя (ДСУ). Масштаб стенда близок к реальному, что позволит, после небольшой доработки, в дальнейшем тестировать штатные элементы системы. Автоматическая юстировка стенда основана на применении системы маркеров. Маркерами снабжены торцевые зеркала и диафрагменные узлы пространственных фильтров. Изображения маркеров перестраиваются на матрицы цифровых камер. Измеренные рассогласования относительного положения маркеров или маркеров и юстировочного пучка преобразуются в команды для исполнительных механизмов. На стенде применена система маркеров на основе лазерных диодов. Управление всеми элементами стенда осуществляется через самостоятельно разработанную компьютерную систему.

Многопроходная схема широкоапертурного силового усилителя впервые реализована на установке «NIF» [1]. Первый усилительный блок, работающий в четырехпроходном режиме, включает два кюветных зеркала, пространственный фильтр, поляризационный ввод и вывод излучения. Второй усилительный блок работает в двухпроходном режиме и включает ТПФ, в котором осуществляется ввод начального лазерного импульса и вывод усиленного излучения. На установке «LMJ» реализован полностью четырехпроходный режим усиления [2]. Схема включает ТЗ, две половины усилителя, два пространственных фильтра (первый из которых по традиции назван кюветным, КПФ) и реверсор. Аналогичную схему имеет установка «Луч». В проекте установки «УФЛ-2М» выбрана за основу четырехпроходная схема «LMJ».

Схема хода осевых лучей лазерных пучков через усилительный канал представлена на рис. 1. Для наглядности лучи разных проходов показаны разными цветами. Луч первого прохода показан желтым цветом, второго – зеленым, третьего – синим, четвертого – красным. Диафрагмы пространственных фильтров расположены в фокусе линз фильтров, линзы реверсора и фокусирующей линзы луча системы формирования оптического излучения (СФОИ)/БЮЛ.

Схема работает следующим образом. Излучение СФОИ, сфокусированное линзой Л0, заводится двумя зеркалами М1 и М2 в диафрагму ТПФ1. Линзами Л2 и Л3 изображение ТПФ1 перестраивается в КПФ1 и далее соответствующими линзами перестраивается в КПФ2, ТПФ2, ТПФ3, КПФ3, КПФ4 и ТПФ4 (здесь цифра обозначает номер прохода). Изображение формирующей диафрагмы блока юстировочного лазера БЮЛ последовательно перестраивается оптикой лазерного модуля на ЗТ, зеркало реверсора (ЗР) и область преобразователя частоты. Оси пучков разных проходов распространяются в пределах пространственных фильтров не параллельно друг другу. Для КПФ это связано с тем, что зеркало ЗТ вынесено из фокальной плоскости Л1. Для ТПФ непараллельность существенно больше, так как длина системы транспортировки почти в полтора раза больше фокуса Л4.

Классический метод настройки сложных оптических систем состоит в применении излучения настроечного лазера, по которому последовательно настраиваются все элементы.

Маркерный метод юстировки основан на контроле с помощью цифровых камер взаимного положения центров оптических элементов, которые снабжены маркерами. Центр каждого оптического элемента при этом задается серединой отрезка между световыми маркерами. Световые маркеры ЗТ задают систему координат при настройке по апертуре. Световые маркеры ТПФ4 задают систему координат при настройке по углу. Относительно этих центров определяются разъюстировки (векторы ошибок). Если разъюстировка превышает допустимое значение, то вычисляются управляющие команды, выполнение которых должно привести к требуемому взаимному положению оптических элементов. Команды посылаются на приводы исполнительных механизмов оптических элементов. После отработки этих команд вновь контролируется взаимное положение маркеров. Автоматическая юстировка четырехпроходной схемы установок «NIF» [3] и «LMJ» [4] основана на применении системы оптоволоконных маркеров.

На нашем стенде применяется система маркеров на основе лазерных диодов. Длина волны излучения выбранных лазерных диодов составляет 1060 нм, что очень близко к рабочей длине волны генерации лазера 1053 нм. Максимальная мощность излучения лазерных диодов составляет 200 мВт [5].

Амплитуда маркеров на камере может различаться из-за разброса световых характеристик, диаграммы направленности и точности монтажа. В разных режимах юстировки одни и те же маркеры могут светить непосредственно в ДСУ или после проходов по тракту. На изображении интенсивность свечения разных маркеров должна быть примерно одинаковой, поэтому предусмотрена индивидуальная настройка интенсивности свечения каждого из маркеров при помощи специально созданной схемы, предусматривающей управление через систему автоматического управления (САУ).

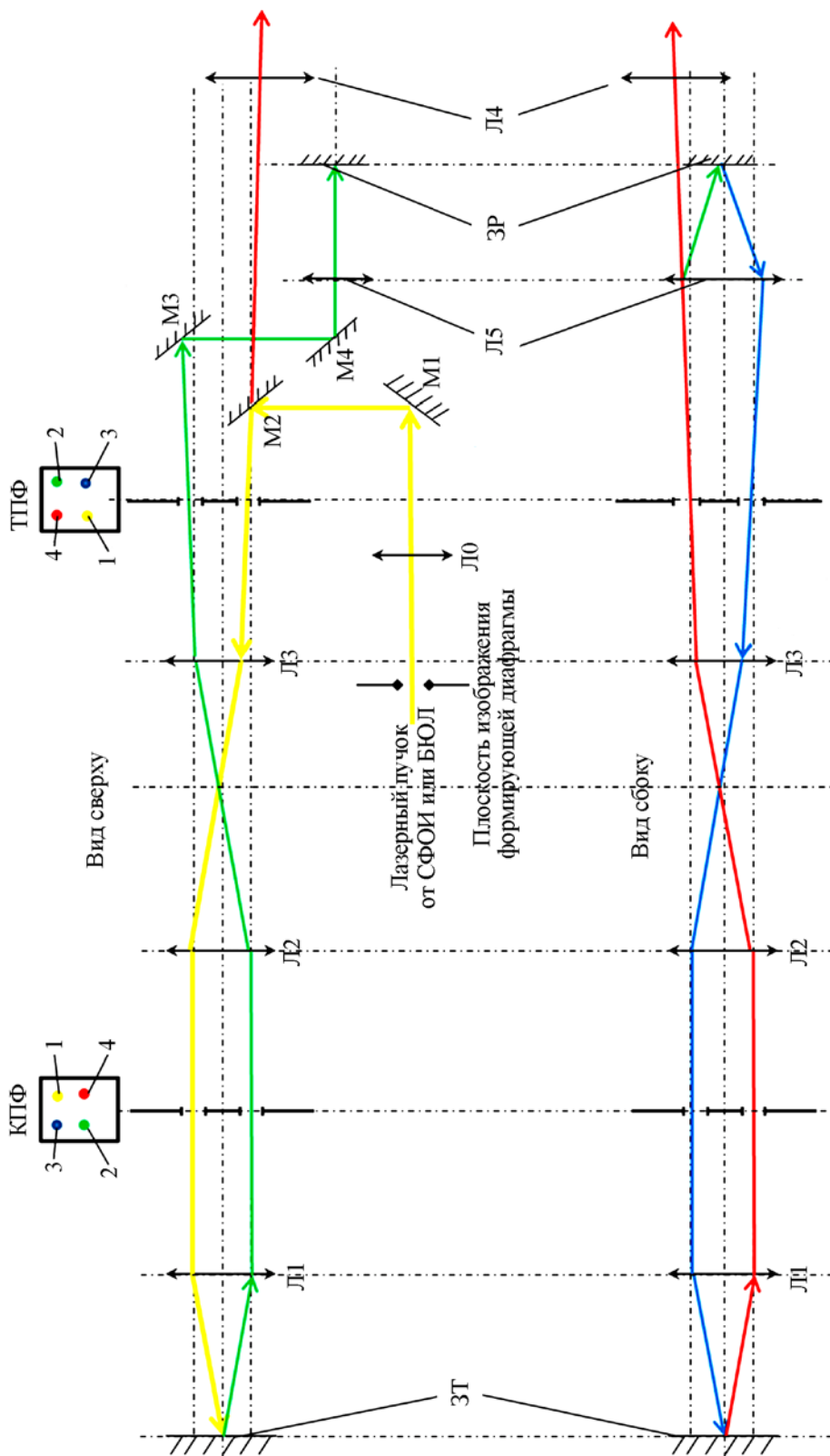


Рис. 1. Оптическая схема стенда САЮ

Маркеры для юстировки по апертуре расположены перед зеркалом торцевым (горизонтально) и за зеркалом реверсора (вертикально). Маркеры для юстировки по углу задают положение диафрагм ТПФ1, ТПФ2, КПФ3, КПФ4 и ТПФ4. Маркеры светят в направлении распространения рабочего излучения.

Зеркало ЗТ стенда САЮ является элементом лазерной установки «Искра-5», оно имеет два электропривода, позволяющих изменять направление отраженного луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Эти электроприводы подключены к стойке САУ. Расстояние между маркерами ЗТ составляет 338 мм при апертуре зеркала 480 мм.

Линзы, образующие кюветный и транспортный пространственные фильтры стенда, являются элементами лазерной установки «Искра-5». Они имеют одинаковые фокусные расстояния $f = 14000$ мм и диаметр $\varnothing = 390$ мм. Линзы имеют заклон порядка 0,01 радиана для исключения фокусировки отраженного излучения на оптических элементах. Линзы Л1 и Л3 заклонены горизонтально, а линзы Л2 и Л4 заклонены вертикально для уменьшения астигматизма.

Диафрагменные узлы пространственных фильтров экспериментального стенда оснащены только юстировочными пластинами без рабочих диафрагм. На рис. 2 приведены эскизы юстировочных пластин пространственных фильтров ТПФ и КПФ.

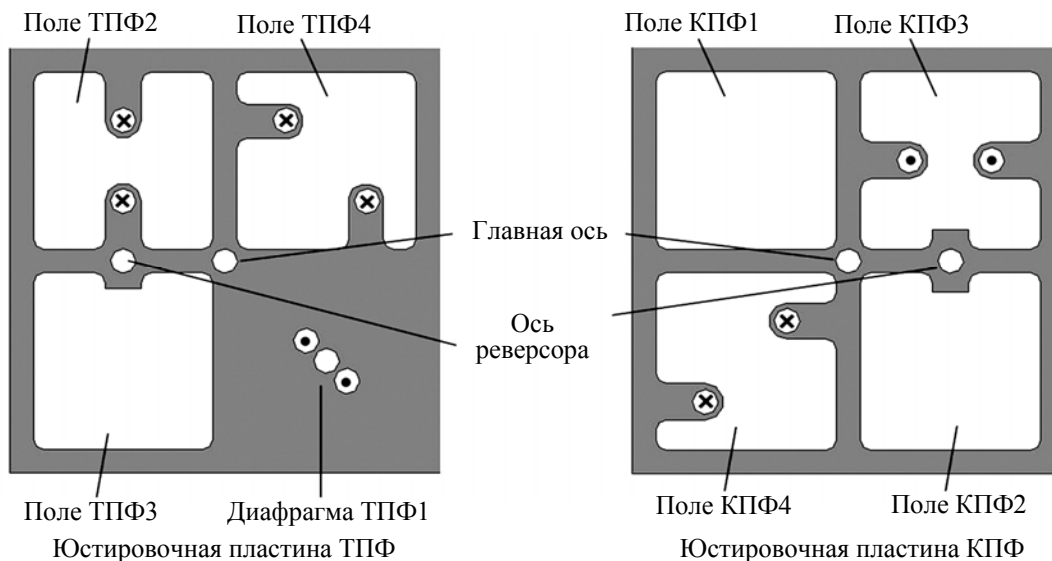


Рис. 2. Юстировочные пластины пространственных фильтров ТПФ и КПФ (вид со стороны ЗТ)

Центры полей пространственных фильтров на юстировочных пластинах обозначают соответствующие пары маркеров. Направления свечения светодиодов указаны стандартным образом. Так как линзы пространственных фильтров ТПФ и КПФ имеют одинаковое фокусное расстояние, то расстояния между центрами полей диафрагм пространственных фильтров ТПФ и КПФ одинаковые и составляют 50 мм. В реальном усилительном канале УФЛ-2М фокусное расстояние линз ТПФ $f = 29000$ мм, расстояние между центрами полей диафрагм для ТПФ составит 50 мм, фокусные расстояния линз КПФ: $f_{\text{лев}} = 14700$ мм, $f_{\text{прав}} = 15000$ мм; расстояние между центрами полей диафрагм для КПФ – 26 мм.

Оптическая схема усилительного канала построена так, что изображение входной диафрагмы ТПФ1 при помощи телескопических пар линз в соответствии с рис. 1 последовательно пере-страивается через соответствующие диафрагмы пространственных фильтров КПФ и ТПФ к выходной диафрагме ТПФ4.

На рис. 3 представлено схематичное изображение, которое будет наблюдаться в поле ТПФ4, в настроенной системе.

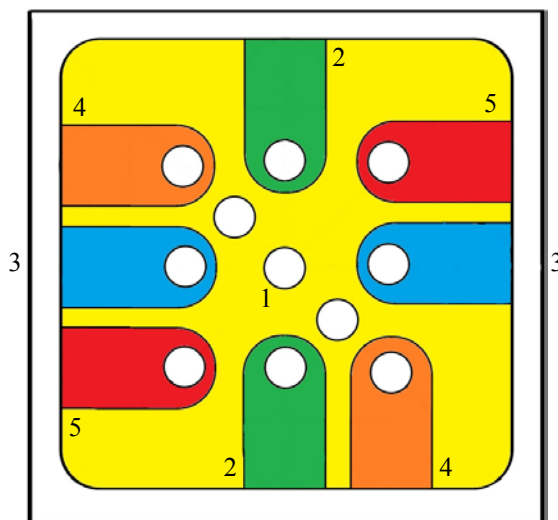


Рис. 3. Схематическое изображение маркеров в поле ТПФ4: 1 – поле ТПФ1; 2 – поле ТПФ2; 3 – поле КПФ3; 4 – поле ПФ4; 5 – поле ТПФ4

Диафрагменная юстировочная пластина КПФ закреплена на двух линейных трансляторах, которые позволяют производить ее перемещение по горизонтали и вертикали в диапазоне ± 50 мм. Поперечные перемещения участвуют в алгоритме автоматической юстировки.

Оптическая схема реверсора показана на рис. 1. Перехватывающее зеркало реверсора М3 установлено в оправу с ручными настройками. Оправа позволяет заклонять зеркало по горизонтали и вертикали при проведении монтажной юстировки.

Зеркало излома реверсора М4 установлено в моторизованную оправу. Оправа позволяет дистанционно заклонять зеркало по горизонтали и вертикали при проведении монтажной и автоматической юстировки.

Линза реверсора Л5 имеет фокусное расстояние $f = 1800$ мм и диаметр $\varnothing = 160$ мм. Она установлена так, что ее фокус находится в плоскости диафрагмы ТПФ. Зеркало реверсора установлено с правой стороны от линзы Л5 в плоскости изображения зеркала ЗТ. ЗР установлено в моторизованную оправу, которая позволяет дистанционно заклонять зеркало по горизонтали и вертикали при проведении монтажной и автоматической юстировки.

Датчик силового усилителя размещается вблизи диафрагменного узла ТПФ. Оптическая схема датчика силового усилителя приведена на рис. 4. Излучение маркеров попадает на матрицу цифровой камеры через два поворотных зеркала М5, М6 и объектив. Датчик позволяет получать изображения маркеров диафрагменных узлов, маркеров торцевых зеркал и поперечного сечения излучения БЮЛ. Зеркала М5 и М6 установлены в оправы с ручными настройками. Оправа зеркала М5 установлена на линейном моторизованном трансляторе. Это позволяет вбрасывать зеркало М5 за диафрагмой ТПФ4 на время проведения юстировки. В качестве объектива ДСУ выбрана асферическая линза с фокусным расстоянием $f = 200$ мм и диаметром $\varnothing = 100$ мм. Цифровая камера PixeLINK B741EG имеет разрешение 1280×1024 пикселей. Размер матрицы составляет $8,6 \times 6,8$ мм, размер пикселя $6,7$ мкм, глубина цвета – 256 градаций серого. Камера установлена на линейном моторизованном трансляторе, что позволяет осуществлять ее дистанционное про-

дольное перемещение. Это обеспечивает возможность получать изображение не только маркеров диафрагменных узлов и маркеров торцевых зеркал, но и всех промежуточных плоскостей, в том числе и плоскостей линз пространственных фильтров.

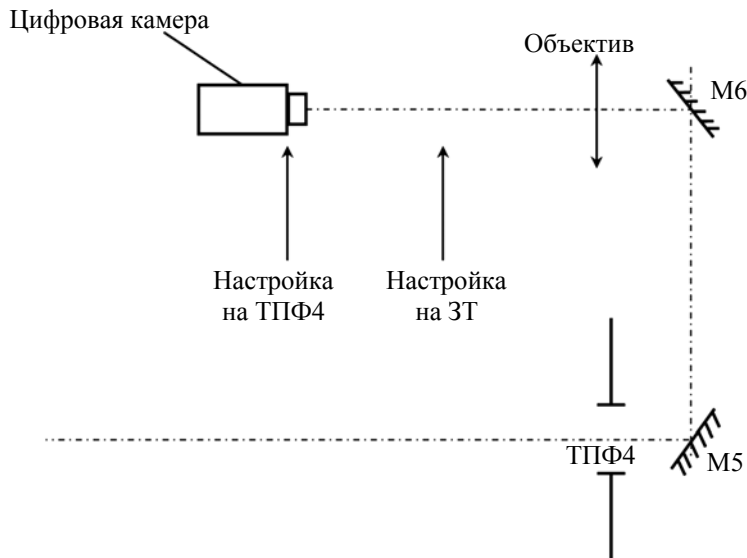


Рис. 4. Оптическая схема датчика силового усилителя

Оптическая система датчика строит изображение поля ТПФ4 с коэффициентом уменьшения $k_{\text{ТПФ}} = 4$ раза. Размер поля наблюдения при этом составляет 36×28 мм. Точность определения координаты в плоскости ТПФ достигает 28 мкм, что составляет примерно 0,5 % от диаметра диафрагм пространственных фильтров ($\varnothing = 5$ мм). В случае регистрации изображения ЗТ оптическая система датчика совместно с оптикой макета усилительного канала строит изображение плоскости ЗТ с коэффициентом уменьшения $k_{\text{ЗТ}} = 72$ раза. Размер поля наблюдения в случае настройки на ЗТ составляет 610×480 мм. Точность определения координаты в плоскости ЗТ достигает 0,5 мм, что составляет 0,1 % от апертуры ЗТ (от световой апертуры ЗТ – 0,48 м).

Блок юстировочного лазера (БЮЛ) предназначен для формирования непрерывного юстировочного луча, геометрически имитирующего рабочий луч СФОИ.

Управление всеми элементами стенда осуществляется через самостоятельно разработанную систему управления. Система смонтирована в двух стойках. Проложены соединительные кабели к элементам стенда. В третьей стойке расположен местный пульт управления, соединенный с системой управления по локальной сети. Для управления элементами стенда разработаны программные драйверы.

Схема заведения излучения БЮЛ в ТПФ1 показана на рис. 2. Излучение БЮЛ фокусируется линзой Л0 и посредством зеркал М1 и М2 заводится в ТПФ1. Линза Л0 располагается так, чтобы ее фокальная плоскость совпадала с плоскостью ТПФ1. Поворотные зеркала М1 и М2 установлены в моторизованные оправы. Оправы позволяют дистанционно заклонять зеркала по горизонтали и вертикали при проведении монтажной и автоматической юстировки.

В автоматической юстировке участвуют элементы, требующие подстройки в каждом опыте и имеющие дистанционную настройку. Автоматическая юстировка осуществляется при условии, что датчики САЮ регистрируют расхождение, в противном случае, если видны не все маркеры,

нужно осуществить ремонт оборудования или вернуться к монтажной юстировке. Автоматическая юстировка считается выполненной, если устранены все рассогласования по датчикам САЮ.

Схема настройки усилительного канала по апертуре показана на рис. 5. Настройка проводится по изображению маркеров, обозначающих центры зеркал ЗТ (горизонтальная пара маркеров) и ЗР (вертикальная пара маркеров) на ДСУ.

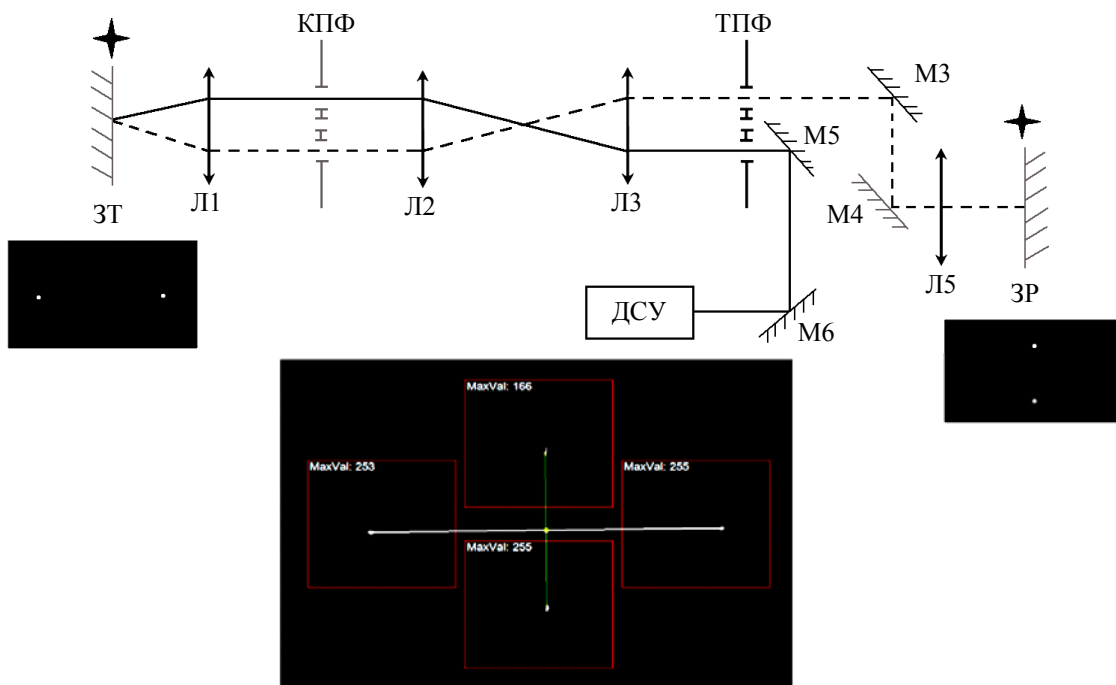


Рис. 5. Схема настройки усилительного канала по апертуре и результат настройки

Пунктиром показан путь распространения излучения маркеров ЗР по третьему проходу. Сплошной линией показан путь распространения излучения маркеров ЗР и ЗТ по четвертому проходу. Серым цветом показаны элементы, имеющие дистанционное управление. Единственным, влияющим на относительное расположение изображений маркеров ЗТ и ЗР является зеркало излома реверсора М4. Этим элементом устраняется несовпадение середин отрезков, соединяющих изображения маркеров ЗТ и ЗР на матрице ДСУ. Эту настройку не могут испортить остальные автоматизированные элементы, поэтому ее можно проводить в первую очередь.

Настройка усилительного канала по углу проводится после завершения настройки по маркерам апертуры. Настройка проводится по изображению маркеров, обозначающих центры ТПФ4, КПФ4, КПФ3 и ТПФ2 на ДСУ. Схема настройки диафрагмы КПФ4 показана на рис. 6. Показан путь распространения излучения маркеров КПФ4 по четвертому проходу. Серым цветом показан диафрагменный узел КПФ, имеющий дистанционное управление. Этим элементом устраняется несовпадение середин отрезков, соединяющих изображения маркеров КПФ4 и ТПФ4 на матрице ДСУ. Эту настройку не могут испортить остальные автоматизированные элементы, поэтому ее можно проводить тоже в первую очередь.

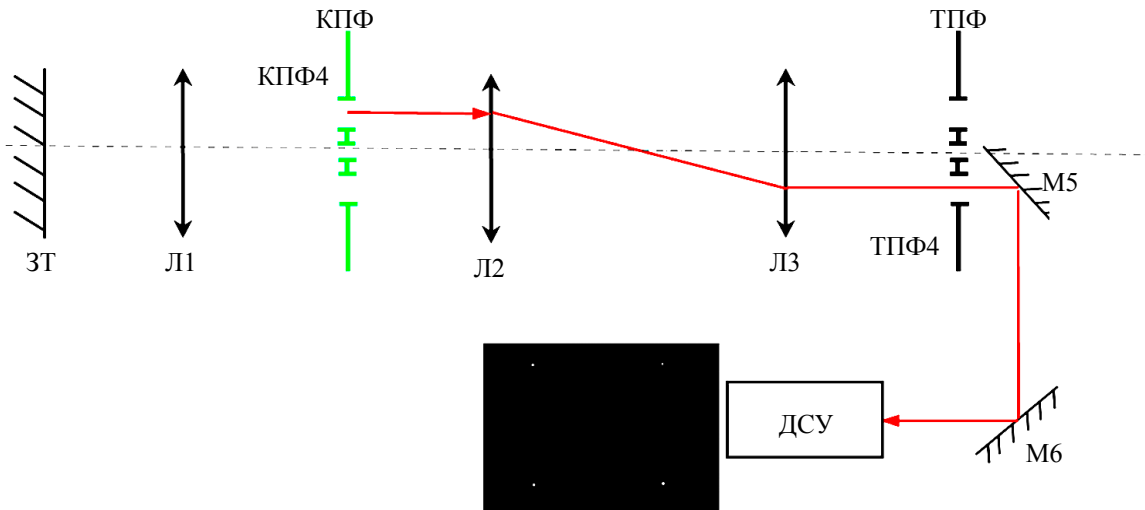


Рис. 6. Схема настройки диафрагмы КПФ4 и результат настройки

Схема настройки диафрагмы КПФ3 показана на рис. 7. Пунктиром показан путь распространения излучения маркеров КПФ3 по третьему проходу. Сплошной линией показан путь распространения излучения маркеров КПФ3 по четвертому проходу. Серым цветом показано ЗТ, которое имеет дистанционное управление. Этим элементом устраняется несовпадение середин отрезков, соединяющих изображения маркеров КПФ3 и ТПФ4 на матрице ДСУ. Эту настройку может испортить перемещение диафрагменного узла КПФ, поэтому ее можно проводить только после настройки диафрагмы КПФ4.

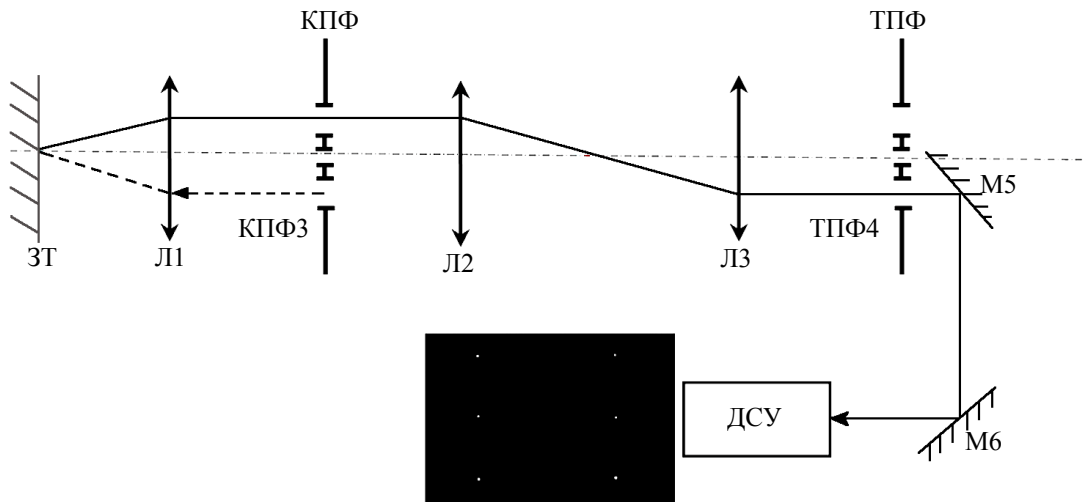


Рис. 7. Схема настройки диафрагмы КПФ3 и результат настройки

Схема настройки диафрагмы ТПФ2 показана на рис. 8. Точками показан путь распространения излучения маркеров ТПФ2 по второму проходу. Пунктиром показан путь распространения излучения маркеров ТПФ2 по третьему проходу. Сплошной линией показан путь распространения излучения маркеров ТПФ2 по четвертому проходу. Серым цветом показано ЗР, имеющее ди-

станционное управление. Этим элементом устраняется несовпадение середин отрезков, соединяющих изображения маркеров ТПФ2 и ТПФ4 на матрице ДСУ. Эту настройку может испортить заклон зеркал ЗТ и М4, поэтому ее можно проводить только после настройки диафрагмы КПФ3 и настройки схемы по апертуре.

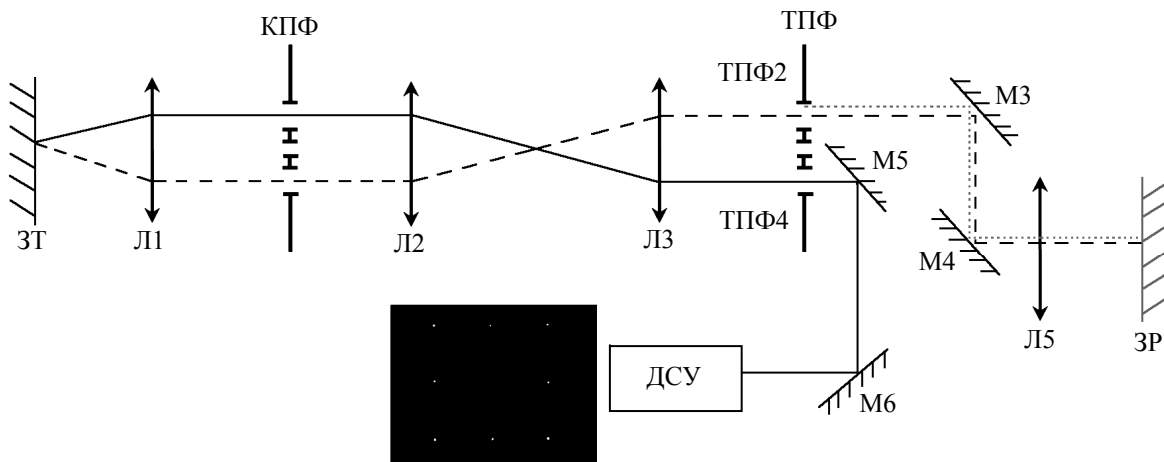


Рис. 8. Схема настройки диафрагмы ТПФ2 и результат настройки

Один из трех возможных вариантов последовательности настройки:

- настройка усилительного канала по апертуре;
- настройка диафрагмы КПФ4;
- настройка диафрагмы КПФ3;
- настройка диафрагмы ТПФ2.

Этот вариант мы принимаем за рабочий.

После проведения юстировки по апертуре и углу проводится заведение излучения СФОИ в оптический тракт усилительного канала. Как показано на рис. 1, излучение СФОИ/(БЮЛ) заводится зеркалами М1 и М2. Изменение положения пучка СФОИ/(БЮЛ) на диафрагме ТПФ1 осуществляется одновременным поворотом зеркал М1 и М2 в одну сторону на одинаковый угол. Положение пучка СФОИ/(БЮЛ) на диафрагме ТПФ1 контролируется ДСУ в положении настройки по углу.

Изменение положения пучка СФОИ/(БЮЛ) на ЗТ осуществляется одновременным поворотом зеркал М1 и М2 в одну сторону, на углы, связанные специально выведенным соотношением. Положение пучка СФОИ/(БЮЛ) на ЗТ контролируется ДСУ в положении настройки по апертуре.

Для осуществления автоматической юстировки стенда создано специальное программное обеспечение – управляющая программа. Задачей системы автоматической юстировки усилительного канала является проведение без участия персонала финальной настройки оптической схемы усилительного канала и проведение архивирования данных юстировки. Автоматическая юстировка должна проводиться после монтажной юстировки.

Под автоматической юстировкой понимается окончательная настройка оптических элементов, имеющих дистанционное управление по определенному алгоритму, чтобы рабочее излучение проходило через центры диафрагм пространственных фильтров и апертур зеркал.

На рис. 9 представлено окно управляющей программы. Верхний левый угол занимает картинка текущего изображения с камеры ДСУ. Над картинкой находятся кнопки включения/выключения электронной камеры и БЮЛ. Перед началом проведения автоматической юстировки каждый маркер должен находиться строго в своей области. Области допустимого начального положения каж-

дого из маркеров очерчены белыми рамками (рамками поиска). В случае попадания любого из маркеров за пределы рамки поиска программа выдает сообщение о необходимости монтажной юстировки. Автоматическая юстировка запускается кнопкой «Полная автоюстировка». При этом отрывается вкладка «Автонастройка» в окне программы, как показано на рис. 9.

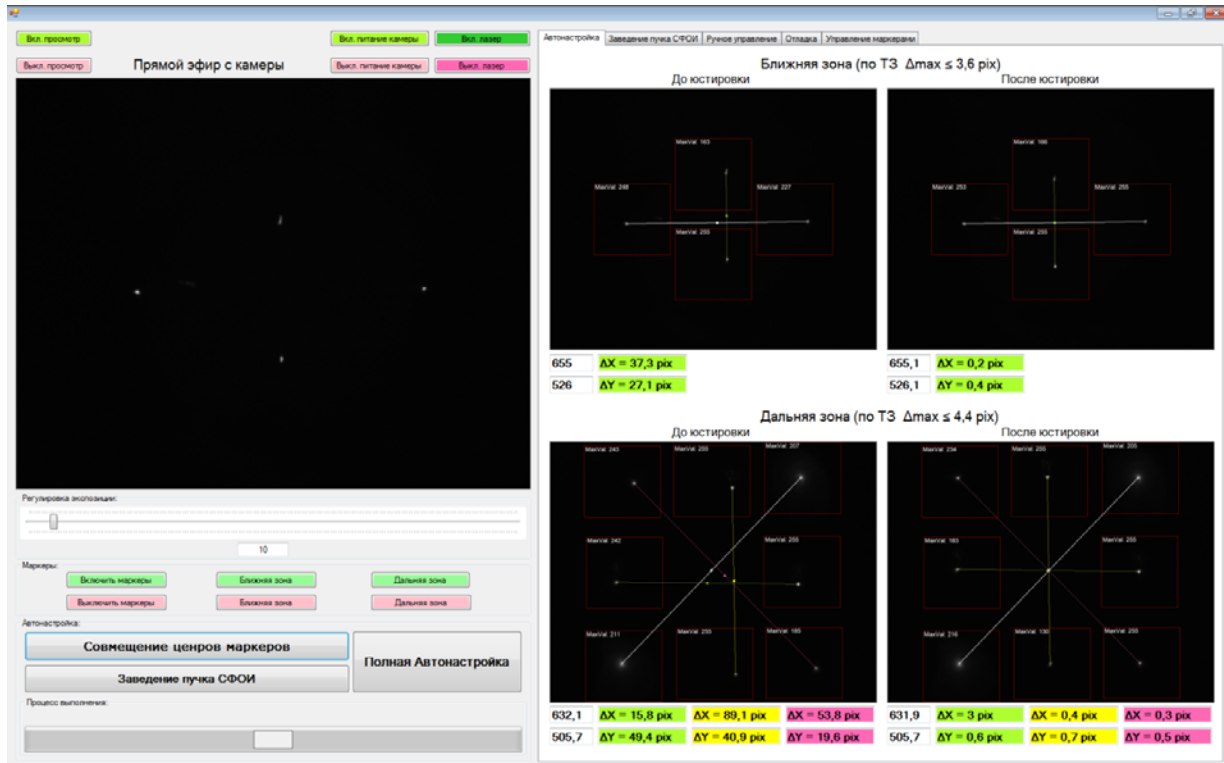


Рис. 9. Окно управляющей программы САЮ

Исходное изображение с камеры в режиме настройки по апертуре помещается в верхнем окне «До юстировки». Изображения всех маркеров во всех окнах сопровождаются рамками поиска и впечатанной величиной максимальной яркости маркера. Там же рисуется белый отрезок, соединяющий реперные маркеры ЗТ, и белый отрезок, соединяющий настраиваемые маркеры ЗР. На отрезках точками отмечены их середины. Под окном в белых полях приводятся координаты середины отрезка, соединяющего реперные маркеры, а в серых полях – начальные величины разъюстировки в пикселях.

Изображение с камеры после выполнения команд приводами оптических элементов помещается в верхнем окне «После юстировки». Так же рисуются отрезки и приводятся величины разъюстировки в пикселях.

В нижних окнах «До юстировки» и «После юстировки» приводятся изображения с камеры в режиме настройки по углу. Белыми отрезками соединены реперные маркеры ТПФ4, КПФ4, КПФ3, ТПФ2. В полях снизу приведены значения начальных и конечных разъюстировок.

Далее в окне программы отрывается вкладка «Заведение пучка СФОИ», как показано на рис. 10. Исходное изображение с камеры в режиме совмещения пучка СФОИ и реперных маркеров ЗТ по апертуре помещается в верхнем окне «До юстировки». Там же рисуется белый отрезок, соединяющий реперные маркеры ЗТ. Белой точкой отмечен центр пучка СФОИ.

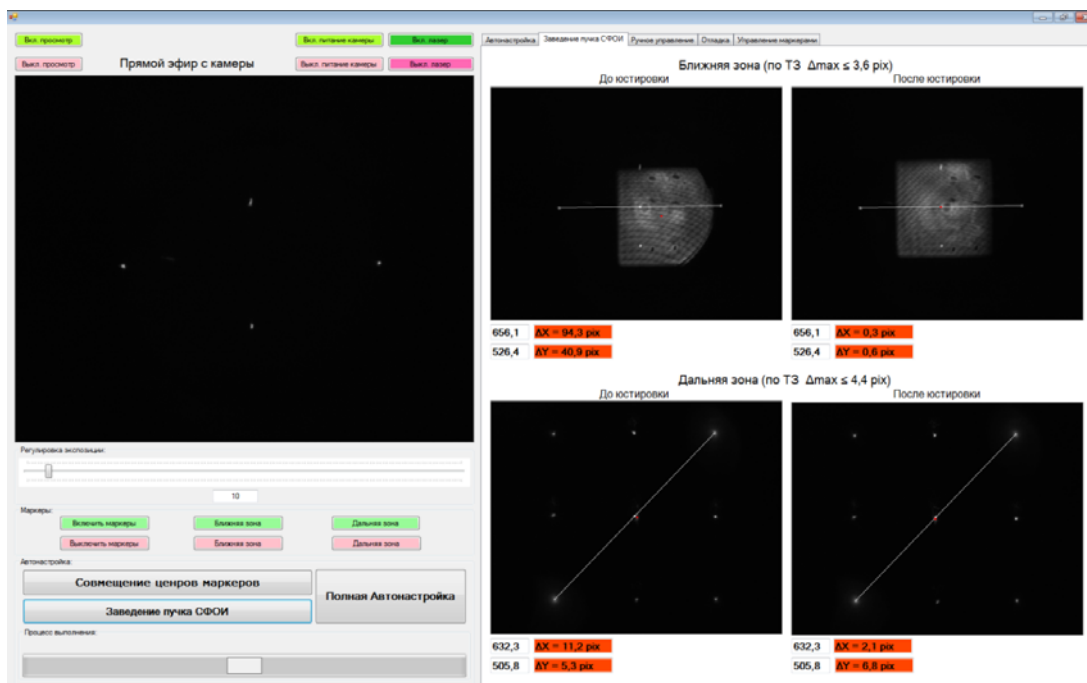


Рис. 10. Окно программы с вкладкой «Заведение пучка СФОИ»

Под окном в белых полях приводятся координаты центра реперных маркеров, а в красных полях – начальные значения разъюстировки в пикселах. Изображение с камеры после выполнения команд моторами помещается в верхнем окне «После юстировки». Точкой отмечен центр пучка СФОИ после настройки, приведены конечные значения разъюстировки.

В нижних окнах «До юстировки» и «После юстировки» приводятся изображения с камеры в режиме настройки по углу. Белыми отрезками соединены реперные маркеры ТПФ4. Точкой отмечен центр пучка СФОИ в плоскости ТПФ4. В полях под изображением приведены значения начальных и конечных разъюстировок. После окончания юстировки появляется сообщение о завершении настройки. В программе осуществлено сохранение изображения маркеров до и после юстировки, а также изображения маркеров и юстировочного пучка со значениями рассогласований относительно центров юстировки по углу и по апертуре.

Список литературы

1. Zacharias R. A., Beer N. R., Bliss E. S. et al. // Optical Engineering, 2004, 43, 12.
2. Grosset-Grange C., Barnier J., Chappuis C. et al. // Proc. of SPIE, 2007, 6584, 658403-1.
3. Bliss E. S., Feldman M., Murray J. E., Vann C. S. // Proc. of SPIE, 1997, 2633, 760.
4. Hilsz L., Challos S., Nicaise F., Luttmann M., Adolf A. // Proc. of SPIE, 2010, 7797, 77970A.
5. www.qphotonics.com

Automatic adjustment system of four passes laser amplifier

S. A. Belkov, E. V. Pozdniakov, I. I. Solomatin, A. V. Andramanov,
V. E. Gaganov, A. V. Vinogradov

Automatic adjustment system of 4-passes amplifying channel prototype of laser facility is created. Amplifying channel involves laser radiation inject system of master oscillator, two spatial filters that split volume with active medium and reverser. Concept of optical scheme adjustment is based on video control by CCD-cameras, relative position of midpoint of positioning of beam and optical elements, dimensions of which are indicated by markers. Measured unbalances are converted to position correction commands of optical elements supplied actuators. Marker and positioning of beam images are sent to cameras of 4-pass output by rotary mirror. Marker system based on laser diodes is used in contrast to amplifying channel of NIF and LMJ. Final adjustment of amplifying channel is realized by computer control system without personnel.