

УДК 621.373.8

Повышение устойчивости оптической системы лазерного источника на основе позиционно-чувствительного датчика

Hongda Li¹, М.В. Андреев², Ю.Н. Панченко², А.В. Пучикин^{2*}

¹Shenyang Ligong University, Liaoning, No.6,
Nanping Central Road, Shenyang, 110159, P.R. China

²Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3, Россия

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований по контролю и управлению оптическими элементами электроразрядного KrF-лазера с помощью метода пространственной кластеризации на основе плотности для приложений с шумами (англ. DBSCAN). Рассмотрены различные методы обработки цифровых сигналов, полученных с позиционно-чувствительного датчика, контролирующего положение оптической оси лазерной системы. Разработана численная модель устойчивости оптической системы на основе метода DBSCAN с дополнительным включением обработки цифровых сигналов с использованием кумулятивного скользящего среднего. Предложена и реализована методика коррекции управляемых зеркал с точностью их возврата в исходное положение 60 ± 10 мкрад, при этом время юстировки не превышает 5 мин.

Ключевые слова: KrF-лазер, автоматизация юстировки, оптическая система, методы фильтрации; KrF-laser, alignment automation, optical system, filtration methods.

Введение

В настоящее время в мощных лазерных установках используются сложные оптические системы, включающие в себя устройства автоматизации их юстировки [1, 2]. Работа таких систем основана на видеоконтроле положений светового пучка и маркеров оптических элементов лазерной системы с помощью CCD-камер. Отклонения положений светового пучка от заданных начальных координат как в ближней, так и в дальней зоне корректируются с помощью управляющих сигналов на приводы исполнительных механизмов оптомеханических элементов.

В [1, 2] отмечается, что при работе широкоапертурных многокомпонентных лазерных систем практически перед каждым новым импульсом требуется юстировка оптической схемы. Большое количество оптических элементов в лазерных системах, вибрации лазерной установки, возникающие локальные градиенты температуры и др. приводят к разъюстировке оптических схем и, следовательно, к снижению параметров выходного лазерного излучения. Таким образом, включение устройств автоподстройки в различные лазерные системы, используемые как в научных прикладных исследованиях, так и в лазерных технологиях обусловлено существенным влиянием сопутствующих факторов на эффективность работы лазера.

* Hongda Li (308544490@qq.com); Михаил Владимирович Андреев (andreevmv_86@mail.ru); Юрий Николаевич Панченко (yu.n.panchenko@mail.ru); Алексей Владимирович Пучикин (apuchikin@mail.ru).

В [3] был предложен способ юстировки резонатора газоразрядного лазера путем контроля и восстановления изображения лазерного пучка, находящегося в ближней зоне. Однако в ряде случаев такой способ не позволяет обеспечить необходимые параметры. В [4] рассмотрен метод юстировки фемтосекундной Ti:Sa-лазерной системы с помощью 2D-детектора (C10443, HAMAMATSU). Основной задачей было достижение определенной продолжительности времени юстировки оптической системы и точности ее восстановления.

Применение коммерчески доступных детекторов для юстировки оптических систем позволит решить ряд проблем, возникающих при использовании лазеров в прикладных исследованиях и технологиях. Цель настоящей работы – исследование методики юстировки оптических элементов лазерной системы, основанной на использовании позиционно-чувствительных детекторов, и разработка алгоритма измерений, обеспечивающего сокращение времени работы системы автоподстройки.

Экспериментальная установка и методики измерений

Электроразрядные эксимерные лазеры с 1990-х гг. применяются в различных типах лидарных комплексов для измерения параметров атмосферы и изучения ее газовых компонентов, а также для обнаружения опасных веществ в воздухе [5–7]. Для более эффективного применения таких лазеров

используются системы «генератор—усилитель», что позволяет существенно улучшить пространственную и временную когерентность излучения, а также обеспечить плавную перестройку длины волны излучения и генерацию гармоник. Это усложняет оптическую схему лазерной системы и требует привязки к ней автоматической системы юстировки, что особенно актуально для мобильных лидарных комплексов.

Исследования проводились на узкополосном перестраиваемом K_rF-лазере серии EL, разработанном в ИСЭ СО РАН [8]. На рис. 1 представлена оптическая схема электроразрядного K_rF-лазера, состоящая

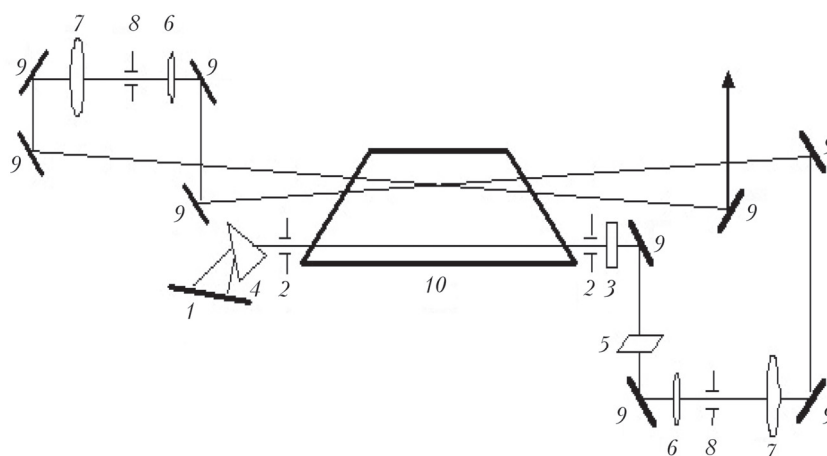


Рис. 1. Оптическая схема одномодульного K_rF-лазера: 1 – дифракционная решетка 2400 штр/мм; 2 – диафрагма диаметром 2×5 мм²; 3 – выходное зеркало, $R = 8\%$; 4 – призмный телескоп, $M = 15$; 5 – воздушный ЭФП; 6 – линза, $F = 150$ мм; 7 – линза, $F = 240$ мм; 8 – диафрагма диаметром 0,3 мм; 9 – зеркало, $R = 99\%$; 10 – активная среда

из задающего генератора (ЗГ) и двухпроходного усилителя (У), оптические оси которых располагались в разных областях активной среды этого модуля.

В состав ЗГ входил дисперсионный резонатор с призмным телескопом и дифракционной решеткой 2400 штр/мм, установленной в автоколлимационном режиме с отражением во второй порядок дифракции. Вывод лазерного пучка осуществлялся через выходное зеркало с коэффициентом отражения $R = 8\%$. В резонаторе ЗГ с обеих сторон от активной среды помещались две щелевые диафрагмы размером 2×5 мм². После выхода из ЗГ пучок проходил через воздушный эталон Фабри–Перо (ЭФП) с базой 30 мкм, отсекающего потоки усиленного спонтанного излучения (УСИ) на входе в дисперсионный резонатор. Далее узкополосное излучение совершало два прохода по усилителю, где перед каждым проходом устанавливались линзовые телескопы с увеличением $M = 2$, которые обеспечивали согласование апертуры усиливаемого пучка с поперечными размерами активной среды, а также фильтрацию УСИ. На выходе из лазерного модуля энергия узкополосного излучения была более 0,25 Дж при контрасте сигнала относительно УСИ $\sim 10^2$. Плавная перестройка узкополосного излучения с шириной спектральной линии 2 пм осуществлялась в диапазоне длин волн 247,5–249,5 нм.

При работе лазера с помощью датчиков С10443-02 (Hamamatsu) контролировалось положение трех зеркал оптической системы: выходного зеркала резонатора ЗГ (3, рис. 1) и двух поворотных зеркал (9, рис. 1), установленных перед согласующими телескопическими фильтрами. Механические устройства этих оптических элементов управлялись с помощью шаговых двигателей в двух плоскостях. В качестве опорного луча для датчиков С10443-02 использовалось излучение непрерывного диодного св-лазера на $\lambda = 632$ нм, при этом нестабильность регистрируемых на датчике сигналов напряжений не превышала $\pm 0,1\%$.

Оптическая схема контроля положения зеркала и система управления шаговыми двигателями оптомеханического устройства показаны на рис. 2. Опорный пучок, генерируемый диодным св-лазером 1, отражался от поверхности контролируемого зеркала 2 и попадал на приемную область датчика С10443-02 4. Лазер и датчик были жестко закреплены между собой. Контролируемое изменение угла поворота зеркала составляло ~ 20 мрад. После автоподстройки зеркала было показано, что имеются некомпенсированные угловые отклонения оптической

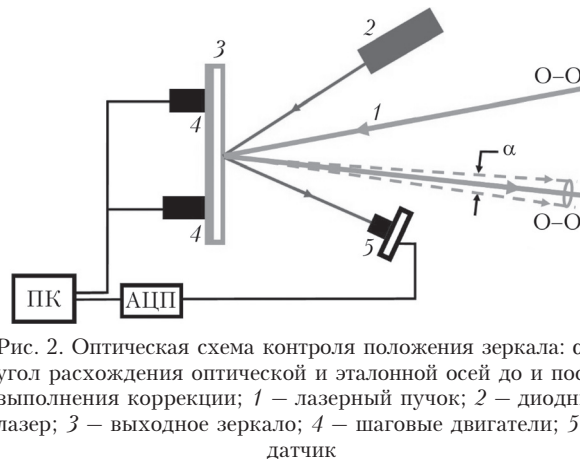


Рис. 2. Оптическая схема контроля положения зеркала: α – угол расхождения оптической и эталонной осей до и после выполнения коррекции; 1 – лазерный пучок; 2 – диодный лазер; 3 – выходное зеркало; 4 – шаговые двигатели; 5 – датчик

оси лазерной системы $O-O^1$ от первоначально го положения, которые лежали в некотором конусе с углом раскрытия α . Экспериментально измеренная величина углового отклонения не превышала 60 ± 10 мкрад как в вертикальной, так и горизонтальной плоскости.

Численная модель

Методика юстировки оптических элементов опиралась на численную обработку получаемого массива данных с датчика. В модели использовался метод пространственной кластеризации на основе плотности для приложений с шумами (англ. Density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN) [9].

В разрабатываемой нами численной модели для уменьшения времени выполнения поиска кластеризация была объединена с методами обработки сигналов. В расчете можно выделить следующие этапы:

1. Подготовка данных с использованием методов обработки сигналов.

2. Кластеризация данных с последующим выделением области с максимальной плотностью координат (X, Y) ;

На первом этапе было произведено сокращение размера массива данных и определены входные параметры метода DBSCAN:

1) ϵ – максимальный радиус «соседства»;

2) минимальное число выборок, которые должны образовывать плотную область P радиусом ϵ ;

3) выделенная область в матрице распределения координат (X, Y) , где плотность точек максимальна.

При преобразовании снимаемых сигналов напряжения (U_1-U_4) в координаты положения светового пятна относительно центра фоточувствительной области позиционно-чувствительного датчика с помощью выражений

$$\frac{2x}{L} = \frac{(U_2 + U_3) - (U_1 + U_4)}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}, \quad (1)$$

$$\frac{2y}{L} = \frac{(U_2 + U_4) - (U_1 + U_3)}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4} \quad (2)$$

(L – размер активной области датчика) погрешность измерения координаты существенно увеличивается и составляет $\sim 10\%$.

Для уменьшения погрешности измерения необходимо решить проблему обработки сигналов и сокращения диапазона разброса данных. Несмотря на достаточно стабильный регистрируемый сигнал невозможно гарантировать стабильность измерений. К примеру, локальное изменение градиента температуры подстраиваемого оптического элемента смещает луч диодного лазера и, следовательно, возникает отклонение регистрируемого положения лазерного пятна на фотодатчике. Поэтому в разрабатываемую модель было введено допущение: вели-

чина сигнала постоянна в краткосрочный интервал времени от 10 до 100 мс. Для уменьшения погрешности измерения были использованы фильтр нижних частот и гистограммы плотности распределения токовых сигналов.

Одним из наиболее распространенных фильтров низких частот [10, 11], используемых в обработке сигналов, является метод скользящего среднего, который позволяет определить форму сигнала. Мы рассматривали следующие виды скользящего среднего: модифицированное скользящее среднее, простое скользящее среднее и кумулятивное скользящее среднее.

Модифицированное скользящее среднее (МСС) вычисляется с помощью рекуррентного соотношения, для которого выходное значение амплитуды тока связано с предыдущим значением:

$$U_{\text{МСС}}(i) = \frac{U(i) + (n-1) \cdot U_{\text{МСС}}(i-1)}{n}. \quad (3)$$

Здесь $U_{\text{МСС}}(i)$ и $U_{\text{МСС}}(i-1)$ – рассчитанные значения напряжения для соседних пар i и $i-1$.

В случае использования простого скользящего среднего (ПСС) среднее значение равно среднему арифметическому спектральной характеристики в установленном диапазоне:

$$U_{\text{ПСС}}(i) = \frac{1}{n} \sum_j^{n-1} U_j, \quad (4)$$

где $U_{\text{ПСС}}(i)$ – расчетное значение напряжения после пересчета; U_j – измеренное значение для данного i ; n – количество значений из набора U для расчета скользящего среднего (сглаживающий интервал).

При использовании кумулятивного скользящего среднего (КСС) не вычисляется полная сумма на каждой итерации, а используется предыдущее полученное значение $(i-1)$. С учетом этого выражение (4) было изменено:

$$U_{\text{КСС}}(i) = \frac{U(i) + (n-1) \cdot U_{\text{КСС}}(i-1)}{n}. \quad (5)$$

Разница между КСС и ПСС заключается в следующем. ПСС учитывает только последние n наблюдений, и для каждого дополнительного наблюдения, добавленного к среднему, старейшее из них выпадает. А КСС учитывает все предыдущие наблюдения.

Для построения гистограммы плотности сигнала необходимо было классифицировать данные, полученные после наложения разных фильтров. Для нашей задачи мы ограничили число кластеров $k = 10$. Далее выбирались кластеры с уровнем плотности сигнала выше, чем $1/e$. На рис. 3 представлено распределение плотности сигнала напряжения U_1 одного из выходных каналов с датчика.

В табл. 1 представлены результаты, полученные с датчика до и после фильтрации одного из сигналов, а также статистические параметры: стандарт-

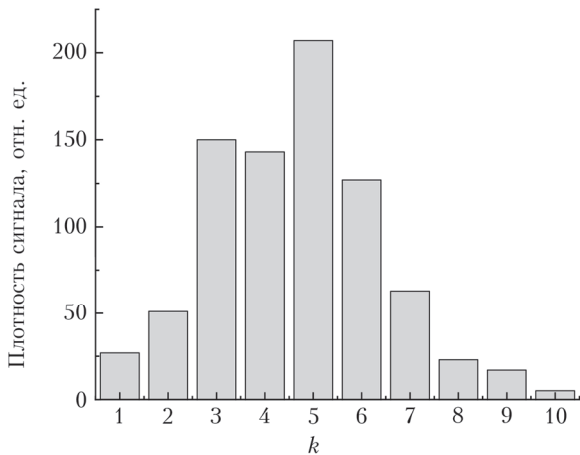


Рис. 3. Гистограмма плотности распределения сигнала U_1

ное отклонение, дисперсия, разброс данных и средняя величина. Из таблицы следует, что в нашем случае метод КСС показал наилучшие результаты при обработке полученных с датчика сигналов. Сходимость метода составила 97%.

Таблица 1

Сравнение статистических данных до и после обработки сигналов разными методами фильтрации

Параметр	Начальное значение	ПСС	КСС	МСС
Среднее, мВ	3482,05	3481,39	3482,05	3482,05
Медиана, мВ	3482,04	3481,32	3482,04	3482,04
Разброс, мВ	10,0	2,2	1,3	2,7
Дисперсия	3,66	0,2	0,12	0,25
Коэффициент вариации	1,05	0,07	0,05	0,08
Коэффициент осцилляции	0,8	0,17	0,15	0,19
Стандартное отклонение, мВ	2,0	1,2	1,1	1,27

Далее с помощью метода КСС были обработаны данные для получения координат положения светового пятна. В табл. 2 представлены статистические данные координаты X до и после фильтрации сигнала. Аналогичные результаты были получены для координаты Y (табл. 3).

Таблица 2

Статистические характеристики координаты X до и после обработки сигнала

Параметр	Начальное значение	КСС
Среднее, мкм	-896,5470	-896,1504
Медиана, мкм	-896,7300	-896,07
Разброс, мкм	66,77	7
Дисперсия	417	3
Коэффициент вариации	2,27	0,2
Коэффициент осцилляции	7,44	1,2
Стандартное отклонение, мкм	20,44	2,5

Таблица 3

Статистические характеристики координаты Y до и после обработки сигнала

Параметр	Начальное значение	КСС
Среднее, мкм	101,09	100,87
Медиана, мкм	100,98	100,86
Разброс, мкм	83,14	8,00
Дисперсия	583,0	4,0
Коэффициент вариации	3,48	0,35
Коэффициент осцилляции	9,12	1,36
Стандартное отклонение	25,83 мкм	3,70 мкм

Как видно из табл. 2, разброс значений полученной координаты X после использования КСС существенно уменьшился.

Для достижения необходимой точности коррекции положения оптического элемента точность полученных координат лазерного пятна на датчике, с нашей точки зрения, недостаточна. Метод DBSCAN [9, 12] будет применяться к области данных $E(x, y)$ распределения координат светового пучка, равной произведению величин разброса координат D_x и D_y соответственно. За ϵ будет принято минимальное из стандартных отклонений координат X и Y sd_x и sd_y . Отправная точка, с которой будет начинаться поиск, вычислена как центр масс распределения координат X и Y :

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad (6)$$

$$M_y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad (7)$$

где N – количество точек, оказавшихся внутри выбранной области; x_i и y_i – координаты точек.

На основе сделанных расчетов было получено, что координаты светового пятна с наибольшей вероятностью находятся в области $E(x, y) \subset \left(M_x - \frac{D_x}{2}, M_y - \frac{D_y}{2}; M_x + \frac{D_x}{2}, M_y + \frac{D_y}{2} \right)$, где $M_x = -894,87$, $D_x = 7$, $M_y = 102,63$, $D_y = 6,5$. При этом радиусы полученных кластеров в области $E(x, y)$ будут определяться минимальных из стандартных отклонений $sd_x = 2,5$, $sd_y = 2,1$; следовательно, $\epsilon = 2,1$. Другим необходимым условием существования этих кластеров является наличие в каждом из них заданного количества точек, которое определяется выражением: $P = N/e^2$, где $e = 2,718$. В нашем случае $P = 28$, $N = 207$.

В соответствии с заданными условиями мы получим несколько кластеров, удовлетворяющих этим требованиям. Далее из гистограммы, представленной на рис. 4, выбираем кластер с наибольшей плотностью точек. После выбора кластера определяем координаты светового пятна, которые и будут соответствовать его положению на площадке датчика. В нашем случае $X = -896,15 \pm 1,07$ мкм

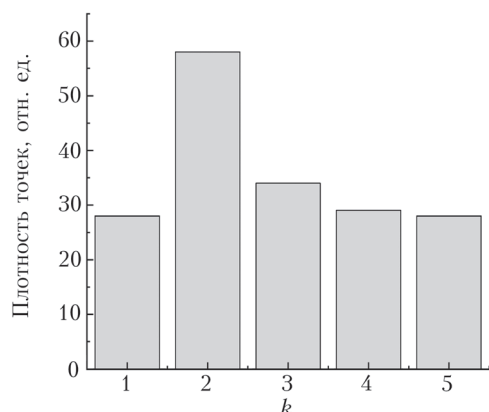


Рис. 4. Гистограмма плотности распределения координат (X, Y)

и $Y = 100,85 \pm 1,38$ мкм. Следует отметить, что из имеющихся 207 точек в области $E(x, y)$ на гистограмме рассматривается 177 точек, остальные выпавшие точки были приняты за шумовые или неудовлетворяющие заданным условиям образования кластера.

Таким образом, предложенный метод на основе пространственной кластеризации позволяет определить координаты положения светового пятна с точностью $\Delta X = \pm 1,1$ мкм и $\Delta Y = \pm 1,4$ мкм.

Заключение

Разработана численная модель устойчивости оптической системы с позиционно-чувствительным датчиком, использующая метод пространственной кластеризации на основе плотности для приложений с шумами. Определены условия объединения DBSCAN с методами обработки сигналов, что позволило обеспечить увеличение скорости работы устройств автоматизации для юстировки оптической системы генератор–усилитель электроразрядного KrF-модуля. Показана возможность коррекции управляемых зеркал с точностью их возврата 60 ± 10 мкрад, при этом время юстировки не превышало 5 мин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 20-08-00371-а, 20-58-00008 Бел_а) и в рамках государственного задания ФНИ СО РАН (№ FWRM-2021-0002).

1. Zacharias R.A., Beer N.R., Bliss E.S., Burkhart S.C., Cohen S.J., Sutton S.B., van Atta R.L., Wintørs S.E., Salmon J.T., Latta M.R., Stolz C.J., Pigg D.C., Arnold T.J. Alignment and wavefront control systems of

the National Ignition Facility // Opt. Eng. 2004. V. 43, N 12. P. 2873–2884.

2. Hilsz L., Challos S., Nicaise F., Luttmann M., Adolf A. Redesign of the image processing techniques used for the alignment of the LMJ Amplifier Section // Proc. SPIE. 2010. V. 7797. P. 77970D-1–16.
3. Андреев М.В., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Панченко Ю.Н., Пушкин А.В., Жарков В.И. Численный метод юстировки резонатора по изображению выходного пучка // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 151–155; Andreev M.V., Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Panchenko Yu.N., Puchikin A.V., Zharkov V.I. Numerical method of cavity adjustment by the output beam image // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 324–328.
4. Nosato H., Murata N., Furuya T., Murakawa M. Automatic adjustment for laser systems using a stochastic binary search algorithm to cope with noisy sensing data // Int. J. Smart Sens. Intell. Syst. 2008. V. 1, N 2. P. 512–533.
5. Букреев В.С., Варпанетов С.К., Веселовский И.А., Галустов А.С., Ковалев Ю.М., Прохоров А.М., Светогоров Е.С., Хмелевцов С.С., Ли Ч.Х. Лидарная система для зондирования стратосферного и тропосферного озона на основе эксимерных лазеров // Квант. электрон. 1994. Т. 21, № 6. С. 591–596.
6. Панченко Ю.Н., Андреев М.В., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Дударев В.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Павлинский А.В., Пушкин А.В., Жарков В.И. Узкополосная перестраиваемая лазерная система для лидарного комплекса // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 6. С. 13–18.
7. Boreisho A.S., Volodenko V.A., Gryaznov N.A., Malamed E.R., Mendov Yu.N., Moshkov V.L., Pantalev S.M., Pankratiev A.V., Finagin A.E., Chakchir S.Ya., Frolov-Bagreev L.Yu., Konyaev M.A. Mobile lidar complex for ecological monitoring of the atmosphere // Proc. SPIE. 2004. V. 5479. P. 176–186. DOI: 10.1117/12.558393.
8. Panchenko Yu.N., Puchikin A.V., Yampolskaya S.A., Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I. Narrowband KrF laser for Lidar systems // IEEE J. Quantum Electron. 2021. V. 57, N 2. P. 1–5.
9. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proc. II Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). 1996. P. 226–231.
10. Боровиков В.П., Боровиков И.П. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М.: Физинформ, 1998. 577 с.
11. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
12. Debnath M., Tripathi P.K., Elmasri R. K-DBSCAN: Identifying spatial clusters with differing density levels // Intern. Workshop on Data Mining with Industrial Appl. (DMIA) 2015. P. 51–60.

Hongda Li, M.V. Andreev, Yu.N. Panchenko, A.V. Puchikin. Improving the stability of the optical system of a laser source based on a position-sensitive sensor.

The results of numerical and experimental studies on the control and management of optical elements of an electric-discharge KrF laser using the developed method based on DBSCAN are presented. Various methods for processing the data obtained from the position-sensitive detectors and a possibility of using the DBSCAN algorithm to increase the speed of the optical system alignment automation device are considered. The conditions for correcting controlled mirrors with an accuracy of their return of 60 ± 10 mrad are determined. The adjustment time does not exceed 5 min.