

$$\frac{R_{mn}}{R_{nm}} = \exp(h\nu/kT). \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что плотность энергии теплового излучения в рассматриваемой равновесной квантовой системе описывается формулой:

$$\rho(\nu, T) = \frac{K_{mn}}{R_{mn}}, \quad (3)$$

по виду отличающейся от формулы Планка.

Интенсивность теплового излучения I_ν , распространяющегося вдоль выбранного направления в равновесной квантовой системе, определяется плотностью его энергии $\rho(\nu, T)$ и скоростью распространения, т. е. это величина $I_\nu(z) = \rho(\nu, T)v$. Изменение интенсивности излучения $dI_\nu(z)$ в основном обусловлено вынужденными переходами типа (II), а вклад переходов типа (I) незначителен и им можно пренебречь. Следовательно, для $dI_\nu(z)$ можно записать дифференциальное уравнение, которое с учетом соотношения (2) имеет вид

$$\frac{dI_\nu(z)}{I_\nu(z)} = R_{mn} \left(N_m - N_n e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right) \frac{h\nu}{v} dz. \quad (4)$$

Решение этого уравнения с граничным условием $I_\nu(z=0) = I_{\nu 0}$ запишем в виде

$$I_\nu(z) = I_{\nu 0} e^{\beta z}, \quad (5)$$

где коэффициент β равен

$$\beta = R_{mn} \left(N_m - N_n e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right) \frac{h\nu}{v}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что в термодинамически равновесной системе, в которой реализуется больцмановское распределение населенностей молекул по уровням энергии, коэффициент β всегда равен нулю. Из (5) следует, что в этом случае $I_\nu(z) = I_{\nu 0} = \text{const}$ – интенсивность теплового излучения не меняется при его распространении по термодинамически равновесной системе. Следовательно, как и следовало ожидать, плотность энергии теплового излучения одинакова в каждом элементарном объеме такой системы. Это доказывает правильность полученного соотношения (2).

$$N_n > N_m > N_n e^{-\frac{h\nu}{kT}}. \quad (7)$$

Из (6) также следует, что для того, чтобы коэффициент β стал положительным, не обязательно получать неравновесную среду с абсолютной инверсией $N_m > N_n$. Усиливающей может быть и среда, для которой выполняется условие.

Другими словами, неравновесная среда может быть усиливающей и без абсолютной инверсии населенностей.

Литература

1. Невдах, В. В. Об излучательных переходах в равновесной квантовой системе / В. В. Невдах // Невская фотоника-2023: Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 9–13 окт. 2023 г.: сб. науч. тр. / под ред. А. Н. Цыпкина. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – С. 192.
2. Halliday, D. Fundamentals of physics / D. Halliday, R. Resnick, J. Walker. – John Wiley & Sons, 2010. – 1330 p.

УДК 621.373.826

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ РЕЗОНАТОРА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Орда В. В., Федорцев Р. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные методы юстировки лазеров, включая как традиционные техники, так и новейшие технологии автоматизации и интеллектуального управления. Особое внимание уделяется применению адаптивной оптики, микропозиционирующих механизмов и систем мониторинга параметров лазерного луча в режиме реального времени. Также обсуждается использование алгоритмов машинного обучения для оптимизации процесса настройки лазерных установок, что способствует повышению точности, стабильности и общей эффективности работы оборудования. Представленный обзор показывает, как классические оптические принципы сочетаются с передовыми технологиями, расширяя возможности применения лазеров в научных исследованиях, промышленности и медицине.

Ключевые слова: лазер, юстировка, адаптивная оптика, микропозиционирование.

INTELLIGENT ADAPTIVE SYSTEMS FOR CONTROLLING THE PROCESS OF AUTOMATIC ALIGNMENT OF THE RESONATOR OF THE LASER EMISSION OF ORBITAL SPACE RANGE FINDERS

Orda V. V., Fiodartsau R. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This article explores modern laser alignment techniques, encompassing both traditional methods and cutting-edge automation and intelligent control technologies. It highlights the use of adaptive optics, micropositioning devices, and real-time beam parameter monitoring systems. The discussion includes machine learning applications for optimizing laser system calibration, enhancing precision, stability, and operational efficiency. The

review illustrates the integration of classical optical principles with advanced technologies, broadening the scope of laser applications in science, industry, and medicine.

Keywords: Keywords: laser, alignment, adaptive optics, micropositioning.

*Адрес для переписки: Орда В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nika.orda@mail.ru*

Юстировка лазеров является важным и многогранным процессом, который обеспечивает корректное выравнивание оптических компонентов и максимальную эффективность работы лазерных систем, используемых в самых различных областях. В современных лазерных установках точность юстировки имеет непосредственное влияние не только на качество луча и стабильность рабочих параметров, но и на безопасность эксплуатации, энергозатраты и срок службы оборудования. С развитием технологий требования к методам юстировки стали значительно более строгими, что привело к внедрению новых подходов, основанных на автоматизации, адаптивной оптике, интеллектуальных алгоритмах и комплексном мониторинге состояния системы.

Традиционные методы юстировки, как правило, основываются на ручной настройке с использованием оптических осей, визирных элементов и механических регуляторов. Однако такой подход часто требует значительного времени, высокой квалификации оператора и подвержен человеческому фактору, что ограничивает воспроизводимость и точность результатов. В современных системах все активнее внедряются автоматизированные методы, которые используют обратную связь на основе данных с сенсоров интенсивности и параметров луча, а также цифровую обработку сигналов. Например, исследование Smith et al. (2021) [1], продемонстрировало высокую эффективность автоматизированной юстировки с применением адаптивной оптики, которая может корректировать волновые фронты луча в реальном времени, устраняя дефекты и нерегулярности. Это значительно сокращает время настройки, повышает воспроизводимость результатов и расширяет возможности применения лазеров в сложных условиях.

Особое внимание уделяется юстировке волоконных лазеров, которые находят широкое применение в телекоммуникациях, медицине и промышленности. Как указывают Chen et al. (2020) [3], такие лазеры чувствительны к механическим воздействиям, температурным колебаниям и вибрациям, что затрудняет поддержание оптимального выравнивания и стабильности излучения. Для таких систем были разработаны микропозиционирующие устройства на основе пьезоэлектрических приводов, которые обеспечивают точные и быстрые перемещения оптических компонентов с нанометровой точностью (Liu et al., 2021) [4]. Эти устройства интегрируются в системы автоматического управления, что позволяет поддерживать стабильность излучения в изменяющихся условиях эксплуатации и значительно повышает надежность и долговечность оборудования.

Современные системы юстировки также оснащаются комплексными сенсорными модулями, которые осуществляют мониторинг параметров луча в реальном времени, таких как интенсивность, профиль, угловое распределение и поляризация. Алгоритмы автоматического анализа данных выдают команды на корректировку, что исключает необходимость ручной перенастройки (Kumar et al., 2022). Такой подход не только повышает надежность работы лазерных систем, но и расширяет их применение в сложных технологических и медицинских процессах, где критически важны стабильность излучения и высокая точность настройки.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в области применения методов машинного обучения и искусственного интеллекта для оптимизации процесса юстировки. García и Johnson (2023) [5] продемонстрировали возможность использования обучаемых моделей, которые способны прогнозировать оптимальные параметры настройки на основе большого объема данных с сенсоров, что делает процесс юстировки более адаптивным и эффективным, а также менее зависимым от человеческого фактора. Это особенно актуально для многоэлементных лазерных систем и сложных установок, где традиционные методы настройки становятся крайне трудоемкими.

Дополнительно стоит отметить работы российских ученых, таких как Соколов А. С. и Никитов С. А., которые разработали методику автоматизированной юстировки лазеров с использованием комбинированных оптических и электронных сенсоров, адаптированных к условиям отечественного промышленного производства. Их подход включает применение программируемых микроконтроллеров и алгоритмов коррекции, что позволяет значительно повысить точность юстировки и сократить время на настройку оборудования [6, 7].

На рисунке 1 предложен адаптивный алгоритм управления автоматической юстировкой лазерного дальномера со следующими выходными характеристиками: рабочая длина 1064 нм; длительность импульса 8 нс; расходимость до 2 мрад; энергия импульса 20 мДж; расходимость лазерного излучения на выходе формирующей системы не более 0,3 мрад.

Алгоритм должен обеспечивать стабильность работы лазерного излучателя при изменяющихся внешних условиях: температура (–10 °С...+60 °С), плотность воздуха (1,225–0,413 кг/м³), турбулентность C_n^2 (5×10^{-14} – 1×10^{-17} м^{–2/3}), давление (101,3–26,5 кПа), влажность (90–< 1 %), вибрации и удары (высокий–минимальный), уровень

шума (90–5 дБ), УФ-излучение (1–5 относительных единиц).

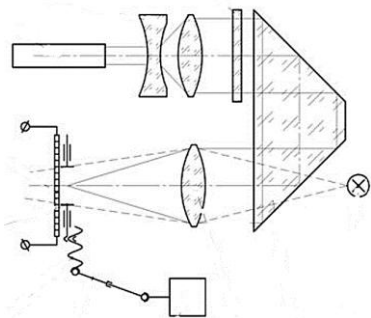


Рисунок 1 – Адаптивный алгоритм управления автоматической юстировкой лазерного дальномера

Конструктивная реализация алгоритма предусматривает наличие двигателя благодаря которому будет приводиться в движение винтовой механизмы, который используя шарнир Гука [8].

Таким образом, современная юстировка лазеров основывается на синтезе классических оптических принципов с передовыми технологиями автоматизации, интеллектуального контроля и адаптивных систем, что открывает новые горизонты для применения лазеров в науке, промышленности, медицине и других высокотехнологических сферах. Повышение точности и эффективности юстировки способствует развитию инновационных технологий и расширению функциональных возможностей лазерных систем, что

делает их незаменимыми инструментами в современном технологическом мире.

Литература

1. Автоматизированная юстировка лазеров с использованием адаптивной оптики / Дж. Смит [и др.] // Optics Express. – 2021. – Т. 29, № 15. – С. 24050–24062.
2. Чен, Л. Методы юстировки волоконных лазеров: проблемы и решения / Л. Чен, Ю. Чжао, Х. Ван // Journal of Laser Applications. – 2020. – Т. 32, № 4. – Ст. 042008.
3. Пьезоэлектрические микропозиционеры для точной юстировки лазеров / Ф. Лю [и др.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Т. 70. – С. 1–8.
4. Кумар, Р. Мониторинг параметров луча в реальном времени в лазерных системах / Р. Кумар, С. Гупта, Т. Ли // Sensors. – 2022. – Т. 22, № 7. – Ст. 2759.
5. Гарсия, М. Методы машинного обучения для оптимизации юстировки лазерных систем / М. Гарсия, К. Джонсон // Applied Optics. – 2023. – Т. 62, № 9. – С. 2345–2354.
6. Соколов, А. С. Автоматизированная юстировка лазерных систем с использованием сенсоров обратной связи / А. С. Соколов, С. А. Никитов // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 3. – С. 245–258.
7. Басов, Н. Г. Квантовая электроника / Н. Г. Басов. – М.: Наука, 1986. – 528 с.
8. Белойван, П. А. Автоматизированная юстировка параллельности энергетической оси передающего канала и оси приемного канала лазерного дальномера / П. А. Белойван [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–2. – С. 136.

УДК 535.6.08 (004.932)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА В КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Савкова Е. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен комплексный подход к описанию результатов определения цвета в количественных и качественных методах колориметрии цифровых изображений, основанный на теории множеств и теории графов, позволяющий снижать частные и глобальные риски ошибок первого и второго рода.

Ключевые слова: цвет, цифровое изображение, координата цветности, множество, граф.

A COMPREHENSIVE APPROACH TO DESCRIBING THE RESULTS OF COLOR DETERMINATION IN DIGITAL IMAGE COLORIMETRY

Savkova Y. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A comprehensive approach to describing the results of color determination in quantitative and qualitative methods of digital image colorimetry based on set theory and graph theory is proposed. This approach allows for reducing the private and global risks of first- and second-order errors.

Keywords: color, digital image, chromaticity coordinate, set, graph.

Адрес для переписки: Савкова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by

В цифровой колориметрии количественные методы исследований переходят в качественные и наоборот, поскольку для отображения цвета используют функциональные цветовые пространства. Поэтому для описания результатов определения цвета может быть применим

комплексный подход. В количественных методах результат измерения представляет собой интервал или область охвата значений величины согласно ISO/IEC GUIDE 98-4:2012(E). В качественных методах осуществляется трансформирование шкал порядка, интервалов,