

ИЗОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНИЙ СПЕКТРА МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В. К. Кирилловский, Т. В. Точилина*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
*tvtochilina@itmo.ru

Аннотация. Рассмотрены возможности методов изофотометрии для анализа линий спектра малой интенсивности. Назначение изофотометрии спектра состоит в способности выявления линий и зон спектра с низким уровнем интенсивности. Предложенный метод служит альтернативой традиционным методам регистрации линий спектра, в которых используется фотографирование спектра на приемнике изображения, что позволяет получить информацию о распределении относительной интенсивности спектра в диапазоне 10^{-2} . Изофотометрия функции рассеяния точки позволяет получать диапазон перепада относительных освещенностей в изображении $10^{-4}—10^{-5}$. Такие же возможности открываются при изофотометрии спектра. Кратко рассмотрены основы инновационных методов изофотометрии излучений и полей. Отмечено основное достоинство метода изофотометрии спектра — возможность обнаружения новых спектральных линий, которые не удастся зарегистрировать традиционными методами. Отмечена эффективность метода и области его применения.

Ключевые слова: спектр, изофотометрия, функция преобразования, интенсивность спектра, инновационный метод

Ссылка для цитирования: Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Изофотометрический метод определения линий спектра малой интенсивности // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 7. С. 513—519. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-513-519.

ISOPHOTOMETRIC METHOD FOR DETERMINING LOW-INTENSITY SPECTRUM LINES

V. K. Kirillovsky, T. V. Tochilina*

ITMO University, St. Petersburg, Russia,
*tvtochilina@itmo.ru

Abstract. The possibilities of isophotometry methods for the analysis of low-intensity spectral lines are considered. The purpose of spectrum isophotometry is to detect spectral lines and zones of a low intensity level. The proposed method serves as an alternative to the traditional methods of registering spectrum lines that use photographing the spectrum on the image receiver, which allows obtaining information on the distribution of the relative intensity of the spectrum in the range of two orders of magnitude. The isophotometry of the point spread function makes it possible to obtain a range of relative illumination differences in the image up to $10^{-4}—10^{-5}$. The same possibilities open up with spectrum isophotometry. The basics of innovative methods of isophotometry of radiation and fields are briefly reviewed. It is noted that the main advantage of the spectrum isophotometry method is the possibility of detecting new spectral lines that cannot be detected by traditional methods. The method effectiveness and the scope of its application are described.

Keywords: spectrum, isophotometry, transformation function, spectrum intensity, innovative method

For citation: Kirillovsky V. K., Tochilina T. V. Isophotometric method for determining low-intensity spectrum lines. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 7. P. 513—519 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-513-519.

Введение. Традиционные методы регистрации линий спектра заключаются в фотографировании спектра на используемом приемнике изображения (фотопластинка, матрица) и последующем получении графика распределения освещенности в линиях спектра. Такие приемники, как фотоматериал и матрица, позволяют получать информацию о распределении относительной интенсивности спектра в диапазоне 10^{-2} в связи с характером и формой соответствующей функции преобразования [1, 2]. С другой стороны, методы изофотометрии дают возможность исследовать излучающие объекты в расширенном диапазоне спектра 10^{-4} — 10^{-5} [2, 3].

Назначение изофотометрии спектра — возможность обнаружения линий и зон спектра с низким уровнем интенсивности. Такая возможность появляется благодаря тому, что изофотометрия позволяет работать в широком, не достижимом другими методами, диапазоне перепада относительной интенсивности [2]. Главное достоинство метода изофотометрии — распознавание новых линий спектра, которые не удается регистрировать традиционными методами [4, 5—10].

В работах [2—4] рассмотрены инновационные изофотометрические методы исследования излучений и полей. Использование таких методов позволяет выполнять экспериментальный анализ пятна рассеяния с помощью определения функции рассеяния точки, регистрировать перепады освещенности в пятне рассеяния и строить кривые распределения. Для описания механизма формирования функции распределения интенсивности в изображении спектра в диапазоне 10^{-5} применяется аппарат функций преобразования [1, 2]. Методы изофотометрии с переменным накоплением и переменным световым потоком рассмотрены в [3], а также предложены области применения методов при исследовании, производстве и эксплуатации различных групп оптических приборов и их элементов. Методы изофотометрии были разработаны и успешно внедрены в виде действующих приборов при контроле и аттестации главного зеркала большого телескопа азимутального (БТА) диаметром 6 м [11—13].

Изофотометрические методы находят применение в различных областях научных исследований, в том числе в медицине, биологии [2—4], астрономии [2, 3, 12, 13] и других областях [14—16], что требует, в частности, определения линий спектра малой интенсивности. Показать новые возможности и перспективы в разработке метода определения линий спектра малой интенсивности на основе применения изофотометрии спектра — цель настоящей статьи.

Работа является продолжением нового направления развития методов оптических исследований на основе нового принципа регистрации полей с использованием третьей координаты — изменения способа накопления энергии света путем управления экспозицией. Начало этим работам было положено благодаря участию проф. В. А. Зверева.

Основные положения. Анализ традиционных методов исследования спектра [5, 6, 9, 10] показывает, что для спектра действует линейная функция преобразования (ФП), определяемая как зависимость

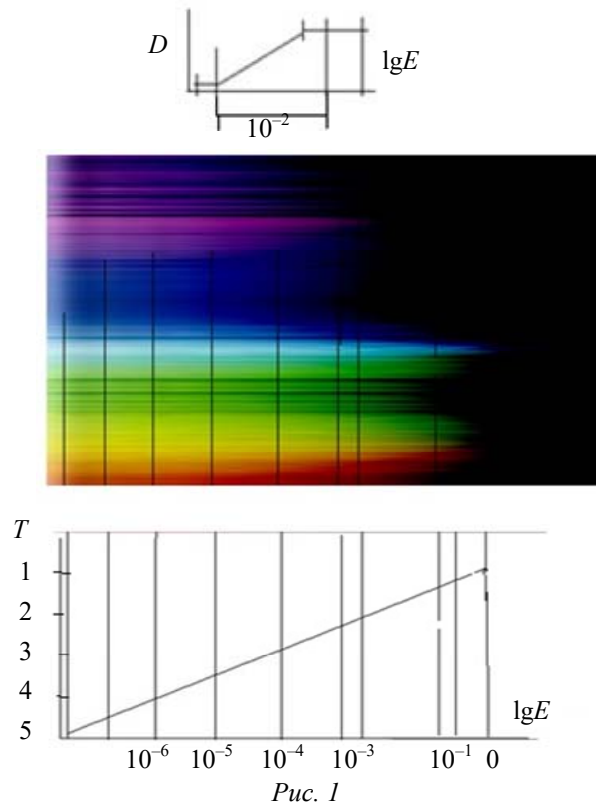
$$D = f(\lg E),$$

где D — сигнал приемника изображения, E — освещенность в оптическом изображении спектра.

Световая характеристика характеристической кривой обеспечивает распределение относительной интенсивности в спектре диапазона 10^{-2} (рис. 1, на графике по оси ординат T — номер изофоты).

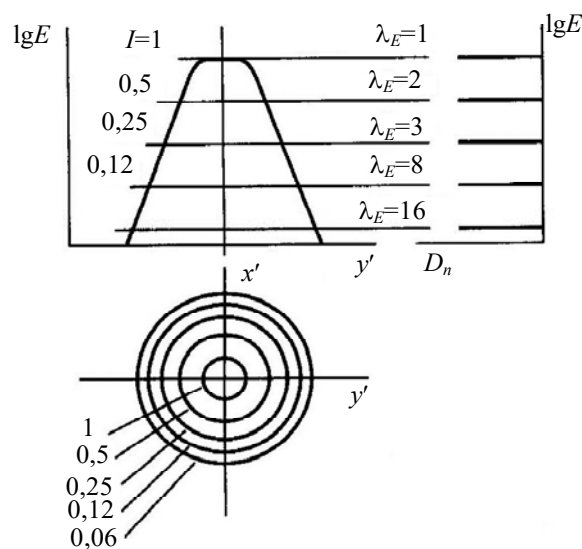
При изофотометрии получен сигнал относительной освещенности в изображении объекта в диапазоне до 10^{-4} .

Изображение спектра характеризуется плавным распределением освещенности. При проведении изофотометрического измерения получают множество самостоятельных изображений путем быстрой последовательной регистрации и множество значений функции распределения освещенности в ряде характерных линий.



Фундаментальное отличие метода изофотометрии заключается в создании дополнительной переменной для процесса регистрации и исследования объекта. Эта переменная может быть разных видов. Возрастающими могут быть: длительность экспозиции, управление световым потоком от объекта, управление чувствительностью приемника изображения, совмещение способов управления.

Каждая изофота — геометрическое место точек, имеющих различные пространственные координаты и равные значения координаты относительной освещенности. Формирование изофоты исследуемого оптического изображения осуществляется благодаря применению приемника изображения, обладающего ФП типа „импульс“. На рис. 2 представлена схема метода изофотометрии с переменным временем накопления, здесь I — относительная освещенность в изображении (максимум соответствует $I=1$); x' , y' — координаты изображения, λ_E — шаг дискретизации при изофотометрической регистрации оптического изображения.



Для изофотометрии характерна периодическая ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа „гребенка“ [2—4, 11, 12, 17—20].

Периодическая ФП может быть наглядно представлена выражением

$$I_{y,z} = \text{comb}(E / \lambda_E) = \sum_{n=1}^N \delta(E - n\lambda_E),$$

где y, z — координаты на оптическом изображении спектра.

Для интерферометрии периодическая ФП соответствует деформации исследуемого волнового фронта, для изофотометрии светящихся объектов — относительной освещенности в изображении объекта.

На практике:

$$I(E) = I_{\max} \text{ при } E/\lambda_E = 0, 1, 2, 3..., \\ I(E) = 0 \text{ при } E/\lambda_E \neq 0, 1, 2, 3...,$$

при $\lambda_E \leq E \leq n\lambda_E$.

Как показал анализ [12, 13], разработанная система ФП дает ряд специальных положительных эффектов, таких как сокращение избыточности информации, улучшение наглядности и выявление новых деталей и свойств объекта, повышение чувствительности контроля и точности измерений, упрощение задачи автоматизации контроля и исследований.

Взаимовлияние синтезируемых методов исследования прецизионных поверхностей с достижением новых результатов и свойств иллюстрируется на примере предложенного метода.

Принцип действия метода. Сравним результаты оценки интенсивности спектра при использовании традиционных методов и предложенного метода изофотометрии. На рис. 3 представлены спектры звезды: *а* — без обработки, *б* — фотография, перекрытая фотометрическим клином (опция „клин“ программы Photoshop), *в* — изофотограмма спектра. Видно, что на изофотограмме спектра прослеживаются новые спектральные линии.

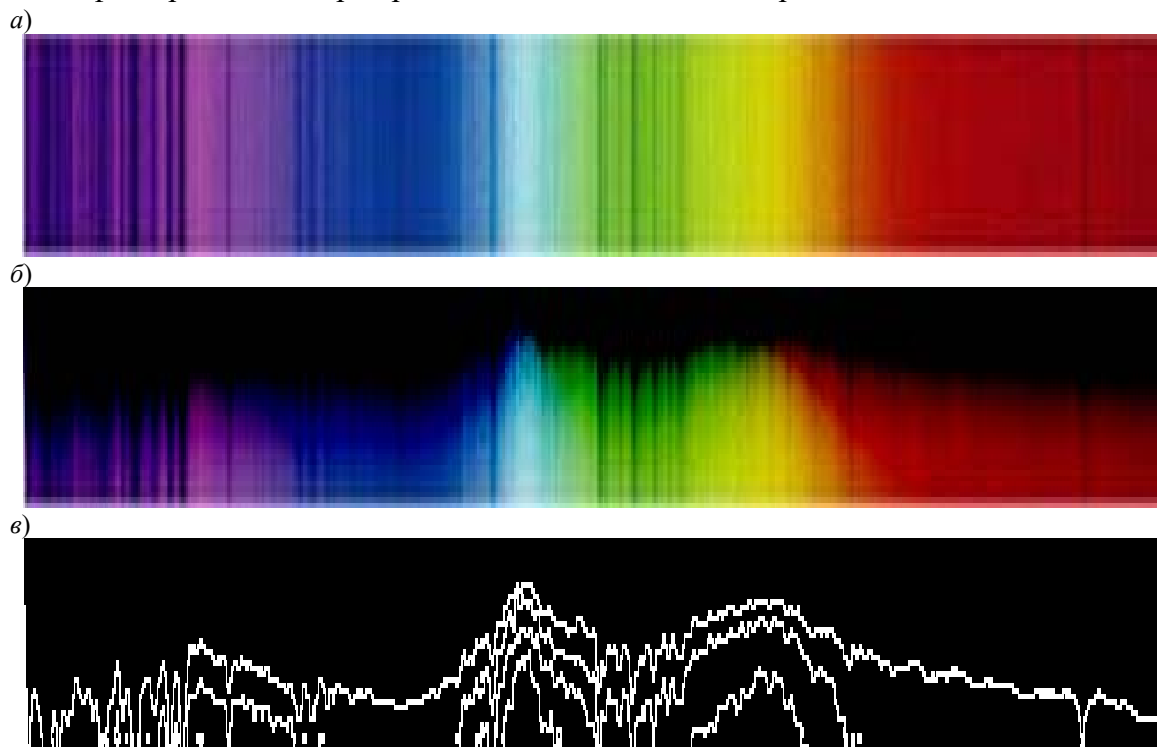


Рис. 3

Сравнение возможностей традиционных приемников изображения и изофотометрии показывает, что сигнал интенсивности может достичь соотношения в 10^{-6} .

В качестве иллюстрации дополнительных возможностей при реализации скоростной компьютерной изофотометрии изменений спектра выбрано трехмерное отображение распределения интенсивности в изображении спектра при визуализации изменения спектра во времени (рис. 4). Визуализация показывает возможность 3D-отображения девиаций спектра во времени, что вполне реально при высоком быстродействии современных компьютеризированных регистраторов изображения.

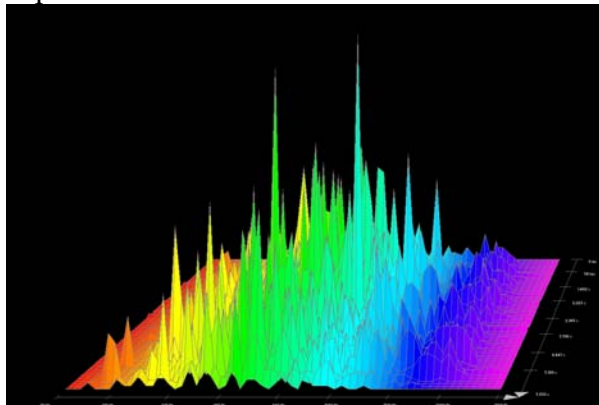


Рис. 4

Заключение. Рассмотрен метод изофотометрии спектра, предназначенный для выявления линий и зон спектра с низким уровнем интенсивности. Предложенный метод служит альтернативой традиционным методам регистрации линий спектра и позволяет получать информацию о распределении относительной интенсивности спектра в диапазоне 10^{-5} . Рассмотрено понятие и применение развитой функции преобразования. Экспериментально подтверждено, что изофотометрия функции рассеяния линии обеспечивает обнаружение и регистрацию новых спектральных линий.

Представленный метод в дальнейшем может найти широкое применение в различных областях науки и техники, где используются методы спектрального анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество оптического изображения. СПб: Ун-т ИТМО, 2019.
2. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб: Изд-во „Лань“, 2022. 340 с.
3. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб: Ун-т ИТМО, 2018. 86 с.
4. Иванова Т. А., Кирилловский В. К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 231 с.
5. Родионов С. А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 167 с.
6. Зверев В. А. Основы геометрической оптики. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
7. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
8. Еськова Л. М., Гаврилин Д. В. Компьютерные методы контроля оптики. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2004. 89 с.
9. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
10. Зайдель А. Н. Основы спектрального анализа. М.: Наука, 1965. 324 с.
11. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Ч. 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб: Ун-т ИТМО, 2019. 96 с.
12. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Сокольский М. Н. К методике расшифровки результатов изофотометрической съемки изображений точечных объектов // Современная прикладная оптика и оптические приборы: Материалы Всесоюз. науч.-техн. конф. Л.: ЛИТМО, 1975. С. 62—63.

13. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Соколовский М. Н. Применение метода изофотометрической регистрации при исследованиях и аттестации главного зеркала БТА // ОМП. 1976. № 12. С. 6—8.
14. Sahu R., Mordechai Sh. Spectroscopic techniques in medicine: The future of diagnostics // Applied Spectroscopy Rev. 2016. N 51(6). P. 484—499. DOI: 10.1080/05704928.2016.1157809.
15. Hammes G. G. Spectroscopy for the Biological Sciences. Wiley, 2005. 192 p.
16. Popescu M., Birlan M., Gherase R.M., Sonka A., Naiman M., Cristescu C. P. Applications of visible and infrared spectroscopy to astronomy // UPB Scientific Bulletin, Ser. A: Applied Mathematics and Physics. 2012. N 74(3). P. 107—120.
17. Mandon J., Guelachvili G., Picqué N. Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb // Nature Photonics. 2009. Vol. 3. P. 99—102. DOI:10.1038/nphoton.2008.293.
18. Coddington I., Swann W. C., Newbury N. R. Coherent Dual Comb Spectroscopy at High Signal to Noise // Physical Rev. E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics. 2010. N 82(4). DOI: 10.1103/PhysRevA.82.043817.
19. Schiller S. Spectrometry with frequency combs // Opt. Letters. 2002. N 27. P. 766—768. DOI: 10.1364/OL.27.000766.
20. Gohle C., Stein B., Schliesser A., Udem T., Hänsch T.W. Frequency comb vernier spectroscopy for broadband, high-resolution, high-sensitivity absorption and dispersion spectra // Phys. Rev. Lett. 2007. N 99. P. 263902. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.263902.

Сведения об авторах

- Владимир Константинович Кирилловский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: vkkir@mail.ru
- Татьяна Вячеславовна Точилина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Поступила в редакцию 15.03.22; одобрена после рецензирования 22.03.22; принята к публикации 31.05.22.

REFERENCES

1. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Chast' 5* (Optical Measurements. Part 5), St. Petersburg, 2019, 35 p. (in Russ.)
2. Kirillovskiy V.K. *Sovremennye opticheskie issledovaniya i izmereniya* (Modern Optical Studies and Measurements), St. Petersburg, 2022, 340 p. (in Russ.)
3. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Chast' 4. Otsenka kachestva opticheskogo izobrazheniya i izmereniye yego kharakteristik* (Optical Measurements. Part 4. Evaluation of optical image quality and measurement of its characteristics), St. Petersburg, 2018. 86 p. (in Russ.)
4. Ivanova T.A., Kirillovskiy V.K. *Proyektirovaniye i kontrol' optiki mikroskopov* (Design and Control of Microscope Optics), Leningrad, 1984, 231 p. (in Russ.)
5. Rodionov S.A. *Osnovy optiki. Konspekt lektsiy* (Fundamentals of Optics. Lecture Notes), St. Petersburg, 2000, 167 p. (in Russ.)
6. Zverev V.A. *Osnovy geometricheskoy optiki* (Fundamentals of Geometric Optics), St. Petersburg, 2002, 218 p. (in Russ.)
7. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryayev D.T. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)
8. Eskova L.M., Gavrilin D.V. *Komp'yuternyye metody kontrolya optiki* (Computer Methods for Controlling Optics), St. Petersburg, 2004, 89 p. (in Russ.)
9. Malacara D., ed., *Optical shop testing*, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., 2007.
10. Zaydel' A.N. *Osnovy spektral'nogo analiza* (Fundamentals of Spectral Analysis), Moscow, 1965, 324 p. (in Russ.)
11. Kirillovskiy V.K., Tochilina T.V. *Opticheskie izmereniya. Chast' 6. Innovatsionnyye napravleniya v opticheskikh izmereniyakh i issledovaniyakh opticheskikh system* (Optical Measurements. Part 6. Innovative Directions in Optical Measurements and Research of Optical Systems), St. Petersburg, 2019, 96 p. (in Russ.)
12. Zverev V.A., Kirillovskiy V.K., Sokol'skiy M.N. *Sovremennaya prikladnaya optika i opticheskiye pribory. Chast' 2* (Modern Applied Optics and Optical Devices. Part 2), Leningrad, 1975, pp. 62—63. (in Russ.)
13. Zverev V.A., Kirillovskiy V.K., Sokol'skiy M.N. *Journal of Optical Technology*, 1976, no. 12, pp. 6—8. (in Russ.)
14. Sahu R., Mordechai Sh. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2016, no. 6(51), pp. 484—499, DOI:10.1080/05704928.2016.1157809.
15. Hammes G.G. *Spectroscopy for the Biological Sciences*, 2005, 192 p., DOI:10.1002/bmb.2006.49403402161.
16. Popescu M., Birlan M., Gherase R.M., Sonka A., Naiman M., Cristescu C.P. *UPB Scientific Bulletin, Series A: Applied Mathematics and Physics*, 2012, no. 3(74), pp. 107—120.
17. Mandon J., Guelachvili G. & Picqué N. *Nature Photonics*, 2009, vol. 3, pp. 99—102, DOI:10.1038/nphoton.2008.293.

18. Coddington I., Swann W.C., Newbury N.R. *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics*, 2010, no. 4(82), DOI:10.1103/PhysRevA.82.043817.
19. Schiller S. *Opt. Lett.*, 2002, no. 27, pp. 766–768, DOI:10.1364/OL.27.000766.
20. Gohle C., Stein B., Schliesser A., Udem T. & Hänsch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, no. 99, pp. 263902, DOI:10.1103/PhysRevLett.99.263902.

Data on authors

- Vladimir K. Kirillovsky** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Engineering and Research;
E-mail: vkkir@mail.ru
- Tatiana V. Tochilina** — PhD; ITMO University, Faculty of Engineering and Research;
E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Received 15.03.22; approved after reviewing 22.03.22; accepted for publication 31.05.22.