

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лахтиков В. Б., Серегин А. Г.* Оценка оптимальной конфигурации разреженной апертуры для составного главного зеркала адаптивного телескопа // Оптич. журн. 1997. Т. 64, № 3. С. 127—128.
2. The James Webb Space Telescope [Электронный ресурс]: <<http://www.jwst.nasa.gov/>>.
3. *Parkinson C. L.* Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41 (2). P. 173—183.
4. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.20771 [Электронный ресурс]: <<http://aqua.nasa.gov/>>.
5. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969.
6. *Александров П. С.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 1979. 512 с.
7. <http://www.gtc.iac.es>.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-цифровых систем и технологий; заведующий кафедрой; E-mail: dav_60@mail.ru
- Лилия Михайловна Менделеева** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-цифровых систем и технологий; E-mail: mendeleevalm@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и технологий

Поступила в редакцию
18.07.13 г.

УДК 535.32

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, А. М. ГОЛУБЕВ

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ТОЧНОСТИ

Рассматривается усовершенствованный на основе метода выделения контуров рефрактометр Аббе, позволяющий сделать четкой границу разделения темной и светлой областей поля в окуляре прибора. Для теоретического обоснования повышения точности измерения показателя преломления использован метод Монте-Карло.

Ключевые слова: показатель преломления, рефрактометр Аббе, точность измерений, имитационное моделирование, метод Монте-Карло.

Введение. Одним из перспективных направлений развития технологий приборостроения является компьютеризация традиционных лабораторных приборов, что позволяет расширить возможности улучшения качества исследований и повышения точности измерений [1].

Рефрактометры Пульфриха и Аббе, основанные на явлении полного внутреннего отражения на границе эталонной призмы и рабочей среды, позволяют измерить показатель преломления с необходимой для практических целей точностью. При этом рефрактометр Пульфриха обладает более высокой точностью (10^{-5}) по сравнению с рефрактометром Аббе. Рефрактометр Аббе является прибором, скорее, для массового контроля оптических материалов в целях исключения грубых ошибок при их подборе.

В традиционном серийном рефрактометре Аббе граница между темной и светлой областями поля окулярного изображения размыта, что затрудняет измерение реального угла выхода лучей и, как следствие, определение показателя преломления исследуемого образца, внося дополнительную погрешность. Задача модернизации прибора заключается в компьютерной трансформации окулярного изображения в целях существенного повышения резкости границы между светлой и темной частями изображения, что дает возможность повысить как точность наведения на границу, так и точность измерительных отсчетов не менее чем на порядок. Достижение данного результата позволяет отнести модернизированный рефрактометр Аббе к новому классу приборов повышенной точности, соизмеримой с точностными параметрами интерферометра Пульфриха при сохранении таких достоинств рефрактометра Аббе, как конструктивная и эксплуатационная простота, экономичность и оперативность.

В настоящей статье рассматривается принцип модернизации рефрактометра Аббе, а также методика проведения измерений. Показана возможность увеличения точности измерений за счет компьютерной обработки изображения, наблюдаемого в окуляре. На основе методов имитационного моделирования (метода Монте-Карло) теоретически обосновано повышение точности измерений.

Модернизация рефрактометра Аббе. Передача изображения, наблюдаемого в окуляре рефрактометра, на компьютер осуществляется при помощи фотокамеры, позволяющей представить изображение в цифровом виде. Для выполнения этой задачи необходимо создать конструкцию, которая позволит закрепить объектив цифровой камеры на окуляре рефрактометра. Данная конструкция должна быть рассчитана в соответствии с диаметром оправы окуляра и диаметром оправы объектива.

Возьмем за основу рефрактометр ИРФ-22 и фотоаппарат Nikon P5000, конструктивные характеристики которых представлены ниже.

Диаметр	
окуляра $d_{ок}$, мм	26
объектива $D_{об}$, мм	32
Длина объектива $L_{об}$, мм	22
Диаметр резьбы объектива $D_{р.об}$, мм	44
Длина резьбы	
окуляра $h_{ок}$, мм	4
объектива $H_{об}$, мм	4
Шаг резьбы	
окуляра, мм	0,5
объектива, мм	1

На основе этих данных выполнена модель насадки окуляра (рис. 1). Для исключения вибраций при съемке и улучшения качества изображения фотоаппарат фиксируется при помощи насадки.

После установки фотоаппарата можно приступить к съемке изображения, наблюдаемого в окуляре рефрактометра. Съемку можно проводить как в ручном, так и в автоматическом режиме. На полученных снимках граница между темной и светлой областями поля размыта, что затрудняет измерения и вносит дополнительную погрешность (рис. 2).

Для устранения данной погрешности необходимо произвести обработку полученных снимков на компьютере, выделив четкую границу, разделяющую темную и светлую области, как контур. Для этой цели применим метод выделения контура, используемый для обработки интерферограмм [1].

На рис. 3, *а*, *б* приведены графики распределения интенсивности изображения (I) на участке поля, содержащем границу: до выделения контура (*а*) график представляет собой градиент, после (*б*) — импульс.

Данный метод позволяет определить более точно угол выхода лучей за счет уменьшения ширины границы между темной и светлой областями, что видно при сравнении снимка до и после обработки (рис. 4). Так, ширина границы до выделения контура (W) примерно в 10 раз превышает ширину границы после выделения контура (W').

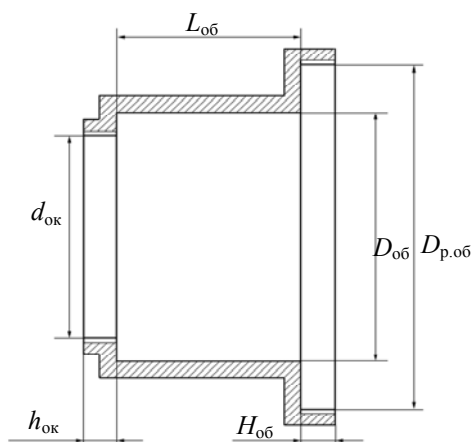


Рис. 1

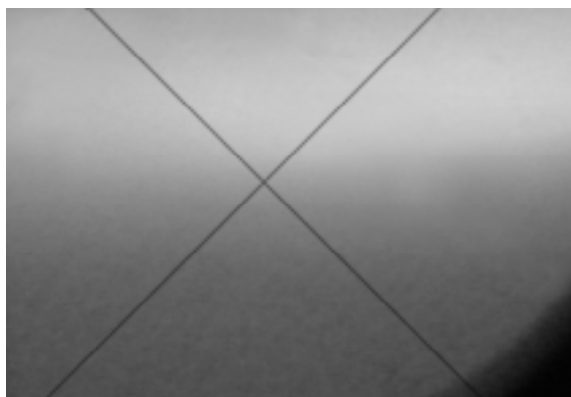


Рис. 2

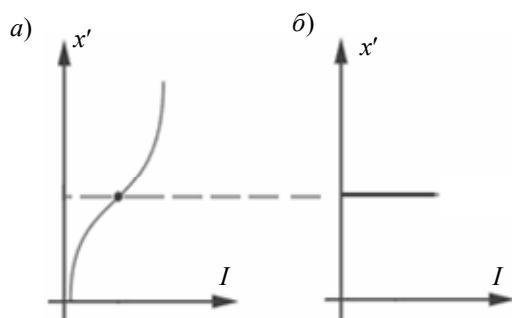


Рис. 3

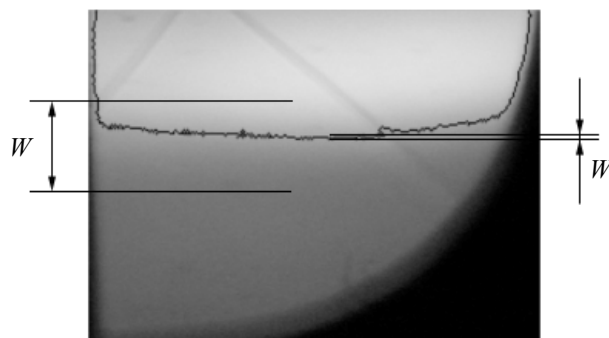


Рис. 4

Таким образом, применение метода выделения контура позволяет увеличить точность проводимых рефрактометром измерений на один порядок, что и было изначальной целью.

Теоретическое обоснование повышения точности измерений. Модернизация рефрактометра Аббе, путем оснащения его цифровой фотокамерой, не ограничивается только конструктивной реализацией.

На практике при измерениях показателя преломления рефрактометром Аббе за результат принимают среднее арифметическое значение нескольких измерений (например, 5—10). Модернизированный рефрактометр Аббе, в котором при обработке изображения применяется метод выделения контура, позволяет добиться четкого разделения темной и светлой областей поля линией контура. Это ведет к снижению погрешности при наводке и, как следствие, к повышению точности измерений показателя преломления.

Во всех отраслях науки и техники в последнее время широкое распространение получили методы имитационного моделирования (статистических испытаний) [2, 3]. Основываясь на этих методах, попытаемся обосновать предположение о том, что используемый в модернизированном рефрактометре Аббе метод выделения контура позволяет повысить точность измерений показателя преломления.

Методика модельного эксперимента. Сравнительный анализ точности измерения показателя преломления серийным рефрактометром Аббе (прибор 1) и модернизированным (прибор 2) выполнялся с помощью ряда модельных экспериментов по измерению показателя пре-

ломления дистиллированной воды n_v (табличное значение показателя преломления 1,33291 при 20 °С).

Прибор 1 позволяет производить измерения с погрешностью $2 \cdot 10^{-4}$. В соответствии со статистическим правилом трех сигм (3σ) можно утверждать, что $3\sigma_1 = 2 \cdot 10^{-4}$, следовательно, $\sigma_1 = 6,6 \cdot 10^{-5}$. Генерируя случайные числа по закону нормального распределения с параметрами $\mu = 1,33291$ и $\sigma_1 = 6,6 \cdot 10^{-5}$, получаем моделируемые результаты измерений.

Прибор 2 за счет использования метода выделения контура позволяет производить измерения с точностью на порядок более высокой: $3\sigma_2 = 2 \cdot 10^{-5}$, поэтому будем генерировать случайные числа по закону нормального распределения с параметрами $\mu = 1,33291$ и $\sigma_2 = 6,6 \cdot 10^{-6}$. Ограничимся проведением 1000 независимых модельных экспериментов для каждого прибора.

Подставив параметры μ и σ в формулу закона нормального распределения, получим

$$f(x) = \frac{1}{6,6 \cdot 10^{-5} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-1,33291)^2}{2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-10}}\right\} \text{ и } f(x) = \frac{1}{6,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-1,33291)^2}{2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-12}}\right\}.$$

Реализация модели производилась с использованием статистических инструментов электронных таблиц MS Excel [4, 5].

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследований, выполненных по изложенной методике, представлены в таблице.

Номер эксперимента	n_v — прибор 1		n_v — прибор 2	
	Результат измерения	Среднее для N измерений	Результат измерения	Среднее для N измерений
1	1,3322	1,3322	1,33284	1,33284
2	1,3329	1,33255	1,33285	1,332845
3	1,3344	1,333167	1,33291	1,332867
4	1,3332	1,333175	1,33293	1,332883
...
999	1,3326	1,332921	1,33295	1,332911
1000	1,3328	1,332921	1,33283	1,332911

Анализ результатов показал, что при использовании прибора 1 даже по окончании 1000 модельных экспериментов не удается достичь высокой точности измерений (рис. 5, кривая 1) (достижение такой точности, вообще говоря, представляется сомнительным). Для прибора 2 точность измерений значительно выше (см. рис. 5, кривая 2).

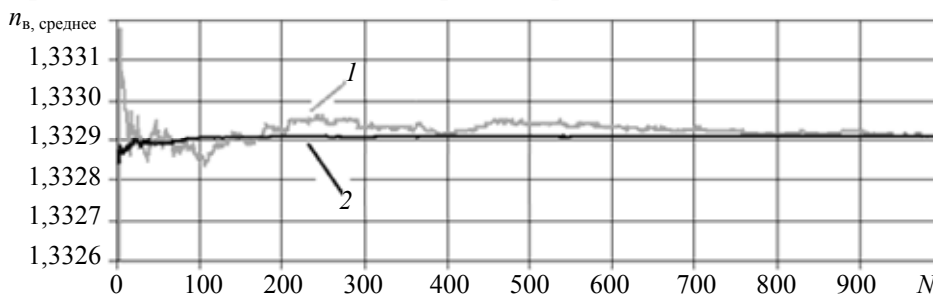


Рис. 5

Для модернизированного рефрактометра Аббе (прибор 2) период стационарности (когда среднее значение практически не изменяется) начинается уже после проведения 200 модельных экспериментов: пять цифр после запятой перестают изменяться. Таким образом, точность измерений, включая пятый знак после запятой, может быть достигнута после 200 реальных (не модельных) экспериментов.

Для серийного рефрактометра Аббе (прибор 1) период стационарности практически не наступил и по окончании 1000 модельных экспериментов (среднее значение сильно колеблется относительно эталонного).

Заключение. В дополнение к изложенному следует отметить, что в качестве регистратора окулярного изображения рефрактометра может использоваться любая фотокамера, имеющая указанные выше параметры. Применение других средств для получения цифрового изображения предполагает изменение параметров насадки окуляра.

Одним из достоинств рассмотренной конструкции является простота ремонта (путем замены ее компонентов).

Модельные эксперименты показали следующее:

— проведения 5—10 измерений прибором 1 недостаточно для определения показателя преломления с точностью до четырех знаков после запятой;

— прибор 2 позволяет повысить точность измерений показателя преломления, исключив погрешность наведения.

Увеличение точности измерений, достигнутое за счет компьютеризации рефрактометра Аббе, позволяет повысить эффективность его использования на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб: Изд-во „Лань“, 2010.
2. Таха Х. Введение в исследование операций: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. Кн. 2.
3. Лебедев А. Н. и др. Вероятностные методы в инженерных задачах: Справочник. СПб: Энергоатомиздат, 2000.
4. Гельман В. Я. Решение математических задач средствами Excel: Практикум. СПб: Питер, 2003.
5. Гультияев А. К. MATLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows. СПб: Корона-Век, 2001.

Сведения об авторах

Владимир Константинович Кирилловский — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru

Алексей Михайлович Голубев — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: golubev.ifmo@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
10.09.13 г.