

# Портативная спектрофотометрическая техника

В. А. Фираго, К. И. Шулико, Н. В. Левкович

*Белорусский государственный университет, Минск, e-mail: firago@bsu.by*

Возможности новых оперативных методов спектрального контроля состава мелкодисперсных рассеивающих материалов и веществ позволяют говорить о возможности их широкого внедрения в практическую деятельность. Их широкое применение возможно только при наличии компактной и недорогой цифровой спектрофотометрической техники. При контроле оптических свойств конденсированных сред методами спектроскопии обратного отражения необходима точная регистрация спектральных зависимостей, поскольку приходится решать некорректные обратные задачи. В докладе рассмотрены возможности современных портативных спектрометров, схемы построения цифровой спектрофотометрической техники различного назначения и обсуждаются методы и алгоритмы обработки получаемых спектров, которые позволяют снизить влияние недостатков, присущих малогабаритным спектрометрам на основе вогнутых дифракционных решеток и линеек фотодиодов.

**Ключевые слова:** спектрометры, параметры спектрофотометров, оптическая неразрушающая диагностика, цифровая обработка сигналов, коррекция спектров

## Введение

Практическое применение спектроскопии диффузного отражения [1, 2] осложнено рядом факторов, которые в основном связаны с необходимостью точной регистрации спектральных зависимостей, поскольку приходится решать обратные задачи по восстановлению неизвестных параметров [3, 4]. Приходится учитывать спектральные характеристики применяемой спектральной аппаратуры и проводить их предварительную градуировку [5], что достаточно трудоемко и требует специального эталонного оборудования. Спектральные измерения всегда сопровождаются наличием шумов и искажений, а также нестабильностью применяемого источника излучения, вводимого в среду. Отмеченные искажающие факторы при решении обратных задач по восстановлению неизвестных характеристик могут приводить к их некорректности по критерию устойчивости решения. Поэтому при практическом применении спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением необходимо по возможности исключать влияние отмеченных факторов на результаты измерений спектральных зависимостей. Цель работы – анализ возможностей использования малогабаритных спектрометров в спектроскопии диффузного отражения.

## 1. Состав аппаратуры и схемы ее подключения к компьютеру

В существующей спектрофотометрической технике обычно используются миниспектрометры, основанные на симметричной оптической схеме Черни-Гернера с применением вогнутой дифракционной решетки и линейки фотоприемников. Длина пути дифрагированного излучения в этих миниспектрометрах около 70 мм, что ограничивает возможности их миниатюризации. Микроспектрометры C12880MA [6] и C11708MA [7], выпуск которых освоила корпорация Hamamatsu, имеют небольшие габариты  $20,1 \times 12,5 \times 10,1$  мм<sup>3</sup> и  $27,6 \times 16,8 \times 13$  мм<sup>3</sup>, соответственно, и работают в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Весьма перспективно их использование в компактной спектрофотометрической технике с ограниченным спектральным разрешением  $r$ , которая предназначена для контроля оптических характеристик конденсированных сред с плавными изменениями спектрального показателя поглощения  $\mu_a(\lambda)$ . В работе экспериментально исследованы параметры этих микроспектрометров, апробированы алгоритмы их коррекции и проведено их сопоставление с параметрами миниспектрометра AvaSpec 2048L, имеющего разрешение  $r = 4.8$  нм при использовании ширины его входной щели, равной 100 мкм.

При создании спектрофотометров на основе C12880MA и 11708MA авторы использовали отладочные платы ARM STM32F103C8T6 STM32 (Blue pill) на мощном микропроцессоре STM32F103C8T6, которые питаются от шины +5 В USB порта. Эта плата обеспечивает хорошее быстродействие, имеет малые габариты и все необходимые разъемы и интерфейсы для подключения к компьютеру и другим устройствам, в том числе и программатору, а также два встроенных 12-разрядных АЦП и 3 таймера. Разработанная схема подключения основана на рекомендациях Hamamatsu и обеспечивает выполнение всех необходимых режимов работы спектрометра.

## 2. Особенности созданного программного обеспечения

Созданное программное обеспечение разделено на нижний (микропроцессорный) и верхний уровни, что позволило упростить комплексирование аппаратуры, градуировку и управление режимами работы спектрофотометров. Диаграмма управляющих сигналов формируются микропроцессором STM32F103C8T6 аппаратно, что обеспечивает формирование частоты тактирования в широком диапазоне времен экспозиции кадра от десятков микросекунд до десятков секунд.

Верхний уровень создан в системе компьютерной математики Matlab, что позволяет оперативно менять алгоритмы обработки исходных спектров и вывода результатов на экран монитора. Такой подход оправдан на начальном этапе внедрения этой спектральной техники, поскольку доработку применяемых методов спектрального контроля лучше проводить в удобной среде, имеющей все необходимые функции.

## 3. Применяемые алгоритмы коррекции регистрируемых зависимостей

Исследования шумовых параметров и спектральных характеристик трех спектрометров показали необходимость применения коррекции регистрируемых спектров  $S_m(\lambda)$ , которая обеспечивает снижение влияния неоднородности темновых отсчетов, устранение нелинейности световой характеристики и необходимое смещение шкалы отсчетов по  $\lambda$ . С целью упрощения алгоритмов дальнейшей обработки устраняется нелинейность шкалы отсчетов по  $\lambda$  и применяется кубическая сплайновая интерполяция регистрируемых спектров на мелкой шкале отсчетов. Для случаев, когда необходимо повышение спектрального разрешения  $r$  микроспектрометров C12880MA и C11708MA, предусмотрена возможность применения к фурье-образу корректируемого спектра фильтрации Винера с последующим восстановлением спектра с помощью обратного преобразования Фурье. При этом возможно улучшение спектрального разрешения  $r$  примерно на 40 % с терпимым уровнем побочных колебаний.

## 4. Градуировка спектрофотометров

При изготовлении спектрометров предприятия проводят градуировку шкалы длин волн  $\lambda$ . В паспортах спектрометров C12880MA и C11708MA приводятся шесть коэффициентов полинома 5-ой степени, с помощью которого связываются номера  $i$  элементов используемой линейки фотодиодов с соответствующей длиной волны  $\lambda_i$ . Градуировка спектрометров по интенсивности регистрируемого излучения  $I(\lambda_i)$  обычно не проводится.

В докладе подробно обсуждаются методы градуировки трех рассматриваемых спектрометров по  $I(\lambda_i)$  для схем измерений, которые встречаются на практике. Рассмотрены варианты проведения градуировки спектрофотометров при использовании излучения модели абсолютно черного тела и излучения вольфрамовой ленты эталонной лампы накаливания. Приводятся результаты градуировки созданных спектрофотометров и обсуждаются причины возникновения нелинейности абсолютной спектральной

чувствительности  $S_{ph}(\lambda)$  на крыльях их спектральных диапазонов. Сопоставляются между собой результаты определения нелинейности световых характеристик в нескольких точках спектрального диапазона при использовании излучения светодиодов и выявленная нелинейность чувствительности  $S_{ph}(\lambda)$ , которая обусловлена возникновением смещения нулевого уровня регистрируемого интенсивного спектра эталонных излучателей по сравнению с уровнем темновых отсчетов.

### Заключение

Показана возможность использования микроспектрометров C12880MA и C11708MA в миниатюрной спектрофотометрической аппаратуре, предназначенной для регистрации плавно изменяющихся спектров диффузного отражения, при условии соблюдения изложенных в докладе рекомендаций.

### Литература

1. Anouk L.P. et al. Subdiffuse scattering model for single fiber reflectance spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*. 2020. Vol. 25, No 1. P. 015001-1 - 015001-11.
2. Тучин В.В. Оптика биологических тканей: методы рассеяния света в медицинской диагностике. Пер. с англ. В. Л. Дербова; под ред. В. В. Тучина. - М.: Физмат-лит, 2012.
3. Kanick S. C. et al. Method to quantitatively estimate wavelengthdependent scattering properties from multidiameter single fiber reflectance spectra measured in a turbid medium. *Optics Letters*. 2011. Vol. 36, No 15. P. 2997–2999.
4. Фираго В.А., Шулико К.И. Экспериментальное исследование спектрально-пространственных свойств сильно рассеивающих сред. *Мат. 6 МНПК «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния»*. Минск : 2021. С. 93–94.
5. Firago V., Notra O., Sakovich I. Radiometric calibration of fiber optic spectrophotometers. *Proceedings of SPIE*. Vol. 11045, *Optical Fibers and Their Applications 2018*; 1104516 (15 March 2019). P. 1–7.
6. Micro-spectrometr C12880MA. Hamamatsu Photonics K. K. Solid State Division. Cat. No. KACC1226E02. Oct. 2015 DN. P. 1–12.
7. Mini-spectrometers C10988MA-01, C11708MA. Hamamatsu Photonics K. K. Solid State Division. Cat. No. KACC1169E11. Oct. 2014 DN. P. 1–10.

## Portable spectrophotometric technique

V.A. Firago, K.I. Shuliko, N.V. Levkovich

*Belarusian State University, Minsk, e-mail: firago@bsu.by*

The possibilities of new operational methods for spectral control of the composition of finely dispersed scattering materials and substances make it possible to talk about the possibility of their widespread implementation in practical activities. Their widespread use is possible only with a compact and inexpensive digital spectrophotometric technique. When monitoring the optical properties of condensed media by back reflection spectroscopy, it is necessary to accurately record the spectral dependences, since it is necessary to solve incorrect inverse problems. The report considers the capabilities of modern portable spectrometers, schemes for constructing digital spectrophotometric equipment for various purposes, and discusses methods and algorithms for processing the obtained spectra, which can reduce the effect of the disadvantages inherent in small-sized spectrometers based on concave diffraction gratings and photodiode arrays.

**Keywords:** spectrometers, spectrophotometer parameters, optical non-destructive diagnostics, digital signal processing, spectrum correction