

## Сравнение различных методов фильтрации результатов спектрометрических измерений

*М.В. Абрамов, С.В. Прытков, М.С. Тертычный, А.В. Якубов*

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет*

**Аннотация:** В данной статье приведен сравнительный анализ различных методов фильтрации сигнала, полученного с помощью спектрометра. В ходе исследования были использованы следующие методы фильтрации: метод скользящего среднего, метод интерполяции сплайнами, метод Савицкого-Голея. В качестве спектрального приемника излучения применялся спектрометр SR-2XR250-25 фирмы Ocean Insight, в качестве источника излучения использовался белый светодиод. По результатам исследования был определен наиболее оптимальный фильтр для обработки результатов спектральных измерений источников света, который в дальнейшем будет использован в программном обеспечении разрабатываемого гониоспектрометра.

**Ключевые слова:** спектральная плотность излучения, спектрометр, приемник излучения, источник излучения, методы фильтрации сигнала.

На базе кафедры светотехники Института электроники и светотехники производится создание спектрогониорадиометра дальнего поля. Данный прибор позволяет определять пространственное распределение спектральных характеристик излучения. Его главным отличием от обычного гониорадиометра является наличие спектрального, а не интегрального приемника – спектрометра.

В период с 70-х годов до конца 10-х годов 21 века при проведении фотометрических и колориметрических измерений основные позиции занимал способ измерения, при котором в качестве измерительных приборов выступали кремниевый светодиод с высококачественным корректирующим светофильтром или призмные оптико-механические приборы [1]. После этого широкое распространение получили спектрометры. Это связано с тем, что большое развитие получила эталонная база в области спектрометрии на основе высокотемпературных моделей черных тел и методов определения их термодинамической температуры [2], а также создание новых источников излучения, которые можно использовать в

качестве эталонов спектральных характеристик радиометрических величин [3]. Помимо этого, благодаря последним достижениям в области электроники, оптики и механики стало возможным создание миниатюрных спектрорадиометров [4,5], одним из которых является спектрорадиометр SR-2XR250-25 фирмы Ocean Insight.

Диапазон длин волн для данного прибора составляет 190-1050 нм, что позволяет работать со всеми диапазонами УФ-излучения. Время интеграции находится в диапазоне от 1 мкс до 2 с. Разрешение составляет 0,28 нм. В качестве приемника используется ПЗС-матрица с 2098 пикселями. Данный спектрометр обладает малыми габаритами (88,1×63,5×31,45 мм) и малым весом (275 г.). Большим плюсом является то, что спектрорадиометр SR2 поставляется с программным обеспечением OceanDirect – мощным набором для разработки кроссплатформенного программного обеспечения (SDK) с интерфейсом прикладного программирования (API). OceanDirect предоставляет пользователям возможность получить доступ к критически важным данным для анализа и использовать программные триггеры для старта измерений. Его внешний вид представлен на рис. 1.



Рис. 1. – Спектрорадиометр OceanOptics SR2

С помощью данного спектрометра было получено спектральное распределение излучения для белого светодиода, представленное на рис. 2. Для обработки полученного сигнала использовался редактор Visual Studio Code и язык программирования Python. Вследствие малой интенсивности излучения была применена темновая калибровка, которая позволила учесть собственные шумы.

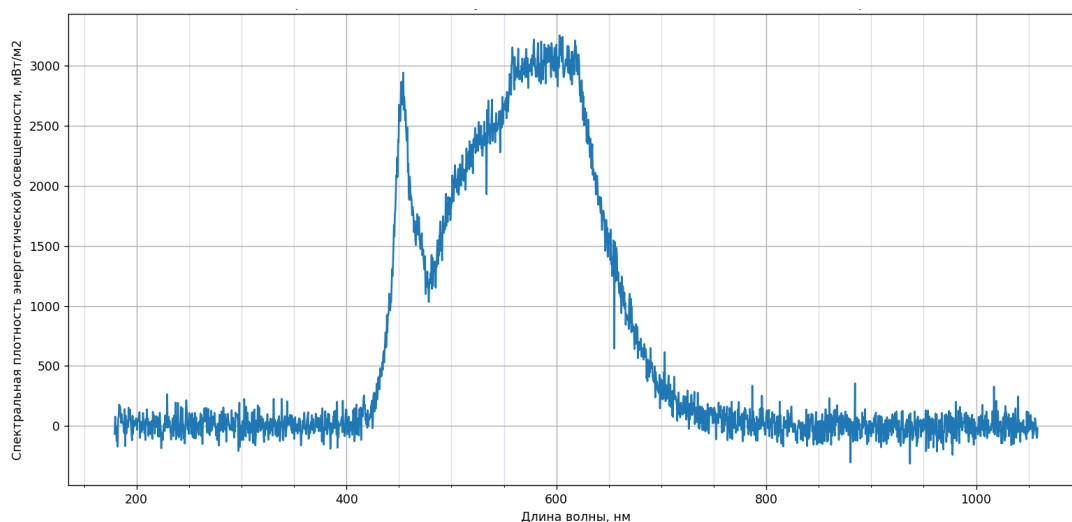


Рис. 2. – Спектральная плотность излучения белого светодиода после темновой калибровки

Исходя из полученного результата было принято решение о применении различных методов фильтрации шумов, первым из которых стал метод скользящего среднего, как один из самых распространенных [6]. При применении данного метода основным параметром является ширина сглаживающего интервала, которая и определяет плавность графика полученного спектрального распределения излучения. Результат применения метода скользящего среднего представлен на рис. 3. Как видно из этого рисунка при увеличении ширины сглаживающего окна спектр излучения становится более гладким и менее зашумленным, но при этом происходит искажение пиковых значений облученности в синей и зеленой областях спектра в сторону их уменьшения.

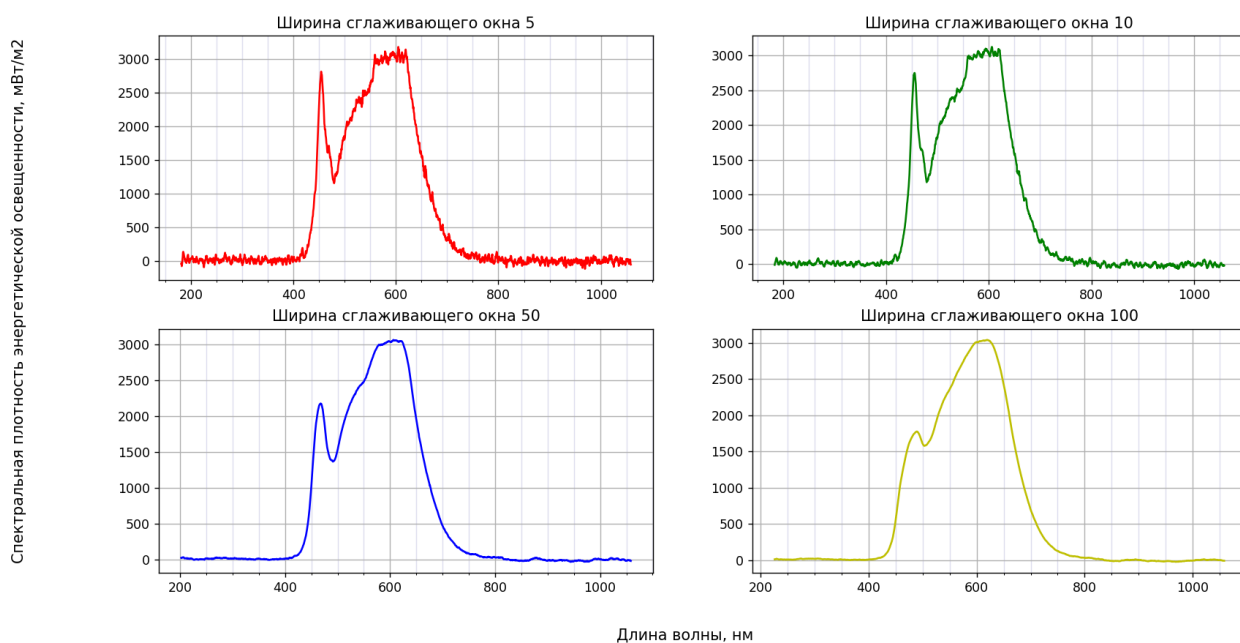


Рис. 3. – Результат применения метода скользящего среднего

Далее был применен метод интерполяции сплайнами. Данный метод получил широкое распространение в системах компьютерного проектирования [7]. Результат представлен на рис. 4.

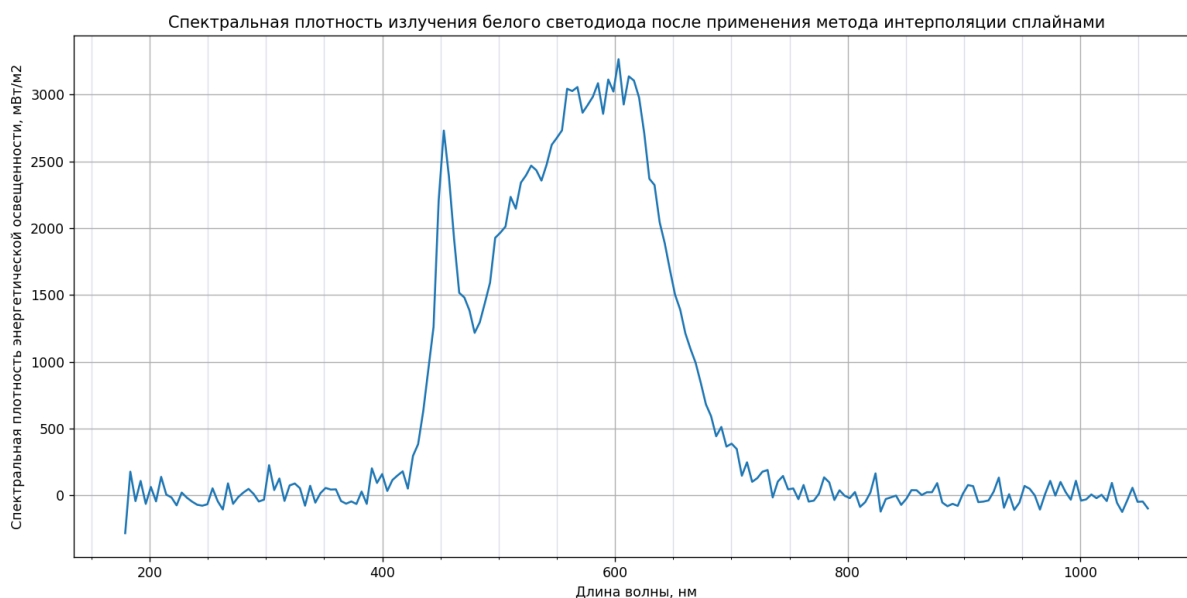


Рис. 4. – Результат применения метода интерполяции сплайнами

Как видно из вышеприведенного рисунка, применение кубической интерполяции не вносит значительных искажений в результаты измерений, но при этом среди массива данных все еще присутствуют посторонние шумы.

В области обработки экспериментальных данных и фильтрации цифровых сигналов все большую популярность набирает метод фильтрации Савицкого-Голея [8, 9]. В данном методе вместо линейного приближения в окрестности каждой точки измерения производится построение аппроксимирующего полинома  $n$ -го порядка с помощью метода наименьших квадратов. Результат применения данного метода фильтрации сигнала представлен на рис. 5.

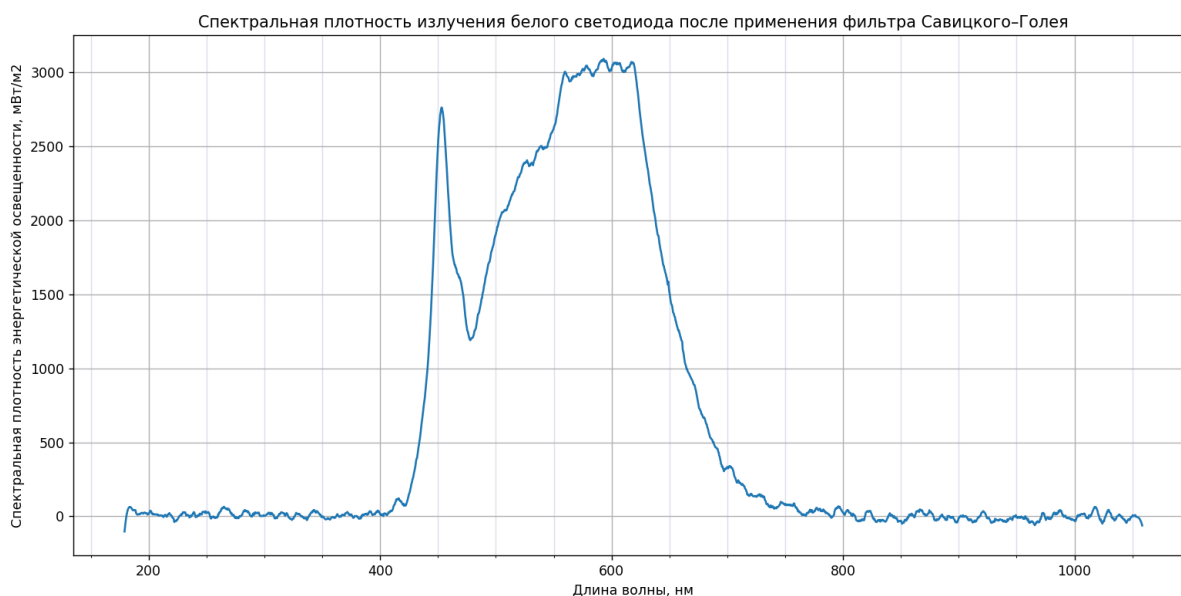


Рис. 5. – Результат применения фильтра Савицкого-Голея

По результатам применения фильтра Савицкого-Голея можно судить о его высокой эффективности: наблюдается минимальное искажение значений спектральной плотности энергетической освещенности и отсутствии основной массы измерительных шумов.

В ходе исследования было рассмотрено три метода фильтрации шумов: метод скользящего среднего, метод интерполяции сплайнами, метод Савицкого-Голея. Эффективность метода скользящего среднего определяется шириной сглаживающего окна, чем оно шире, тем более гладкой получается кривая спектральной плотности энергетической освещенности, но при этом тем большее искажение претерпевают пиковые значения. Метод интерполяции сплайнами не искажает полученных результатов измерений, но при этом значительная часть шумов остается. Фильтр Савицкого-Голея вносит минимальные искажения в результаты измерений и нивелирует большее количество шумов. Исходя из полученных результатов для работы со спектрорадиометром и интеграции в разрабатываемое программное обеспечение был выбран метод фильтрации Савицкого-Голея. Стоит отметить, что благодаря применению спектрорадиометра, разрабатываемый в Институте электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» гониоспектрорадиометр позволит решать нестандартные, но при этом востребованные задачи. Пример решения одной из таких задач приведен в [10].

### Литература

1. Иванов В.С., Котюк А.Ф., Золотаревский Ю.М., Либерман А.А., Саприцкий В.И., Столяревская Р.И., Улановский М.В., Чупраков В.Ф. Основы оптической радиометрии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 544 с.
2. Khlevnoy B., Grigoreva I., Anhalt K., Wähmer M., Ivashin E., Otryaskin D., Solodilov M., Sapritsky V. Development of Large Area High Temperature Fixed-Point Blackbodies for Photometry and Radiometry. // Metrologia. 2018. Vol. 55. No. 2. pp. 43-51.
3. Gerloff T., Lindemann M., Shirokov S., Taddeo M., Pendsa S., Sperling A. Development of a New High-Power LED Transfer Standard // Light &

Engineering. 2013. No. 2. pp. 41-46.

4. CIE (2014) CIE214:2014 Effect of Instrumental Bandpass Function and Measurement Interval on Spectral Quantities. Vienna: CIE. 86 с.
5. Столяревская Р.И. Обзор особенностей использования мини-спектрорадиометров с ПЗС-матрицами в прикладной фотометрии. // Светотехника. 2020. № 6. С. 12-18.
6. Никонов А.В., Давлетшин Р.В., Яковлева Н.И., Лазарев П.С. Фильтрация методом Савицкого-Голя спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств. // Успехи прикладной физики. 2016. Т.4. № 2. С. 198-205.
7. Browne M., Mayer N., Cunmore T. Multiscale polynomial filter for adaptive smoothing. // Digit Signal Proc. 2007. Vol. 17. p. 69.
8. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. // Analytical Chemistry. 1964. Vol. 36. No. 8. p. 1627.
9. Madden H. Comments on the Savitzky-Golay convolution method for least-squares-fit smoothing and differentiation of digital data. // Analytical Chemistry. 1978. Vol. 50. No. 9. p. 1383.
10. Прытков С.В., Абрамов М.В., Гордин И.И., Котлов И.А. Разработка методики расчета и проектирования облучательных установок, применяемых для борьбы с ультрафиолетовой недостаточностью. // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 11. С. 128-131.

### References

1. Ivanov V.S., Kotyuk A.F., Zolotarevskij Yu.M., Liberman A.A., Saprickij V.I., Stolyarevskaya R.I., Ulanovskij M.V., Chuprakov V.F. Osnovy opticheskoy radiometrii [Fundamentals of Optical Radiometry]. M.: FIZMATLIT, 2003. 544 p.
  2. Khlevnoy B., Grigoreva I., Anhalt K., Wähler M., Ivashin E., Otryaskin D., Solodilov M., Sapritsky V. Metrologia. 2018. Vol. 55. No. 2. Pp. 43-51.
-



3. Gerloff T., Lindemann M., Shirokov S., Taddeo M., Pendsa S., Sperling A. Light & Engineering. 2013. No. 2. Pp. 41-46.
4. CIE (2014) CIE214:2014 Effect of Instrumental Bandpass Function and Measurement Interval on Spectral Quantities. Vienna: CIE. 86 p.
5. Stolyarevskaya R.I. Svetotekhnika. 2020. № 6. Pp. 12-18.
6. Nikonov A.V., Davletshin R.V., Yakovleva N.I., Lazarev P.S. Uspekhi prikladnoj fiziki. 2016. T.4. № 2. Pp. 198-205.
7. Browne M., Mayer N., Cunmore T. Digit Signal Proc. 2007. Vol. 17. P. 69.
8. Savitzky A., Golay M.J.E. Analytical Chemistry. 1964. Vol. 36. No. 8. P. 1627.
9. Madden H. Analytical Chemistry. 1978. Vol. 50. No. 9. P. 1383.
10. Prytkov S.V., Abramov M.V., Gordin I.I., Kotlov I.A. Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. 2024. № 11. Pp. 128-131.

**Дата поступления: 22.12.2024**

**Дата публикации: 27.01.2025**