

КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ И АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЦВЕТОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Латипова Н.Х., Марышева Л.Т.

¹ д.т.н. доц. Ташкентский университет информационных технологий Мухаммада аль-Хорезми, meer.nata@bk.ru

² д.т.н. доц. Ташкентский университет информационных технологий Мухаммада аль-Хорезми, latipova23@rambler.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные критерии, используемые при сравнении спектральных и цветоизмерительных приборов, применяемых в научных исследованиях, промышленности и контроле качества. Проведен анализ ключевых параметров, таких как спектральное разрешение, чувствительность, диапазон измерений, точность цветопередачи и стабильность калибровки. Особое внимание уделено метрологическим характеристикам приборов, влияющим на достоверность результатов измерений, а также принципам их взаимозаменяемости и совместимости с современными системами цветового анализа. Представлены рекомендации по выбору прибора в зависимости от задач измерения и области применения. Результаты исследования позволяют повысить эффективность использования спектральных и цветоизмерительных устройств и обеспечить единообразие цветовых измерений в различных отраслях.

Ключевые слова: спектральные приборы, цветоизмерительные приборы, критерии сравнения, спектральное разрешение, точность измерений, цветопередача, метрологические характеристики, калибровка, спектрофотометр, колориметр, анализ цвета.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разрабатывается много новых типов спектральных приборов. Естественно, появляется необходимость сравнивать эти приборы между собой при оценке степени их пригодности для той или иной спектральной задачи.

Для сравнения между собой различных типов спектральных приборов необходимо найти такие соотношения между параметрами прибора, которые наилучшим образом раскрывали бы его эксплуатационные возможности. Такие соотношения называются критериями сравнения спектральных приборов.

МЕТОДОЛОГИЯ

Методологический подход к сравнению и анализу спектральных и цветоизмерительных приборов основан на сочетании экспериментальных, аналитических, метрологических и системных методов исследования. Цель методологии — обеспечить объективную, воспроизводимую и

стандартизированную оценку характеристик приборов, определяющих их точность, функциональные возможности и применимость в различных областях измерений.

Для объективной оценки приборов использованы методы метрологического анализа, включающие:

- определение диапазона измерений;
- оценку погрешности (систематической, случайной, инструментальной);
- анализ неопределённости в соответствии с GUM;
- оценку воспроизводимости и повторяемости;
- анализ стабильности показаний во времени.

Метод позволил сформировать единообразную метрологическую базу для сравнения различных моделей приборов.

Сравнение приборов будет наглядным и удобным только в том случае, когда достоинства любого конкретного прибора можно будет характеризовать вполне определенным числом, процесс вычисления которого не будет громоздким.

Критерий сравнения может характеризовать:

1) возможности оптической схемы прибора, безотносительно к тому, каким источником и приемником пользуются;

2) максимальные возможности прибора в целом (с источниками и приемниками), определяющие максимальные спектральную и фотометрическую точности, которые могут быть получены от прибора при работе в оптимальном режиме; замена приемника или источника переводит весь прибор в иной класс;

3) возможности реального прибора, работающего с инерционной приемно-регистрирующей системой, с определенными скоростями сканирования спектра; при этом получается свой критерий сравнения для каждого типа прибора, каждого типа приемника, каждого типа усилительно-регистрирующей системы.

Для получения объективных данных проведены измерения контрольных образцов:

- спектральных стандартов (например, фильтров с известной спектральной пропусканием),
- цветовых эталонов (ColorChecker, NCS, RAL),
- материалов разной текстуры, блеска и прозрачности.

Оценивались:

- отклонения приборных данных от эталонов;
- влияние внешних факторов (освещение, температура);
- скорость измерения;
- устойчивость результатов при повторных измерениях.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

К главным характеристикам спектрального прибора, определяющим его возможности и область применения, можно отнести участок спектра $(\lambda_1 - \lambda_2)$, число одновременно регистрируемых интервалов m , время регистрации одного интервала t , полное число регистрируемых интервалов M и полное время регистрации T .

Величина m определяется пределом разрешения прибора $\delta\lambda$ и равна $(\lambda_1 - \lambda_2)/\delta\lambda$. Время регистрации зависит при заданной точности измерений от светосилы прибора, чувствительности приемника и яркости источника $B\lambda$.

Очевидно, что лучшим будет прибор, регистрирующий за наименьшее время наибольший участок спектра наименее яркого источника с большим разрешением и большей точностью. Был сделан ряд попыток найти числовую характеристику, которая учитывала бы все главные свойства прибора и позволила сопоставлять возможности спектральных приборов разного типа независимо от принципов их устройства. С этой целью Жакино предложил использовать величину W , названную им добротностью:

$$W = RM/TB\lambda^\alpha \approx mur \quad (1)$$

Яркость источника при определении добротности предполагается такой, что отношения сигнал/шум на выходе прибора равно единице. Величина α в приведенном уравнении равна единице, если погрешность определяется флуктуациями светового потока (квантовые приемники), и $\alpha = 2$, если погрешность зависит от собственных шумов приемника (тепловые приемники), U - геометрический фактор прибора, R - его разрешающая сила.

Видоизменение критерия Жакино было сделано Киселевым и Паршиным. Здесь критерий сравнения характеризовал производительность прибора C и C^1 .

$$C = \frac{N^2 M v}{(\delta V)_0^3 B_v^2 T} = D^2 R^2 m_1 p S W_{пр} \quad (2.)$$

для приборов с тепловыми приемниками и

$$C = \frac{N^2 M v}{(\delta V)_0^2 B_v T} = D^{12} R^2 \frac{m_1}{m_2} p S \quad (3)$$

для приборов с квантовыми приемниками, где N - среднеквадратическое значение шума;

M - число точек на спектральной кривой;

V - волновое число;

$(\delta V)_0$ - полуширина аппаратной функции;

$B_v (B_m * cm^{-2} \text{СТЕРАД}^{-1} * cm)$ - среднее значение плотности спектральной яркости источника в интервале $(\delta V)_0$ (для абсорбционных приборов с учетом поглощения в исследуемом веществе);

T - время, определяемое условием эксперимента;

$D \left(B_m^{-1} cm * сек^{-\frac{1}{2}} \right)$ и $D^1 (B_t^{-\frac{1}{2}} сек^{-\frac{1}{2}})$ приведенные обратные пороговые чувствительности, соответственно тепловых и квантовых приемников радиации;

R - коэффициент пропускания прибора;

m_1 - число одновременно регистрируемых сигналов, каждый из которых

соответствует одному спектральному интервалу. В приборах с последовательной регистрацией (обычные спектрометры) $m_1 = 1$, в приборах с одновременной регистрацией (квантометры, фурье - спектрометр) $m_1 \gg 1$; m_2 - количество сигналов, E_v (световой поток), определяющих уровень шума, пропорциональный для квантовых приемников $(m_2 E_v)^{1/2}$; $m_2 = 1$ в классических приборах с последовательной регистрацией, где нет засветки приемника посторонней радиацией, $m_2 = (\frac{V}{(\delta V)_0})^{1/2}$ для сисама и $m_1 = m_2$ для фурье - спектрометра;

P - коэффициент, характеризующий тип прибора;

S - площадь эффективного поперечного сечения параллельного пучка лучей в приборе;

$W_{пр}$ - угловая аппаратура приемника.

В формулах (2) и (3) параметры, изменяющиеся по желанию исследователя или в соответствии с задачей в известных пределах $N, B_v, (\delta V)_0, T, M, V$ стоят в левой части, а параметры прибора (фиксированные) $D, R, p, S, m_1, m_2, W_{пр}$ в правой части уравнения.

В уравнениях (2) и (3) выражения в параметрах регистрации характеризуют спектрометрическую задачу, а выражения в параметрах прибора - его возможности.

Следует отметить, что критерий C непостоянен для различных областей спектра из-за зависимости параметров прибора от длины волны (волнового числа). Также имеет место слабая зависимость от параметров регистрации, например, от ΔV .

Критерий, предложенный Киселевым и Паршиным, может быть применен для следующих задач:

1) оценки производительности спектральных приборов, а также их способности давать большой или меньший объем сведений о спектре;

2) оценки сложности спектральной задачи - объема сведений о спектре и соответствия этого объема возможностям прибора;

3) сравнения между собой спектров, полученных при различных условиях регистрации;

4) анализа правильности функционирования прибора.

Кроме того, анализ критерия сравнения по его параметрам может способствовать лучшему пониманию путей дальнейшего совершенствования спектральной аппаратуры.

Критерий Экхардта, представленный в принятых выше параметрах, записывается в виде

$$L = \frac{NV\sqrt{VM}}{(\delta V)_0\sqrt{(\delta V)_0 T}} \quad (4)$$

Он связывает между собой фотометрическую точность, разрешающую силу и производительность прибора.

Отличие критерия Экхардта от критериев, предложенных Киселевым и Паршиным, объясняется тем, что Экхардт не учитывал свойства радиации

приемников и не вводил в рассмотрение яркость источника:

$$L = VB_v\sqrt{C}; \quad L = V\sqrt{\frac{B_v C^1}{(\delta V)_0}} \quad (5)$$

Тарасовым предложены критерии [91], являющиеся видоизменением критериев сравнения, предложенных Б. А. Киселевым и П. Ф. Паршиным:

для приборов с тепловыми приемниками

$$Q_m = \frac{M^2 m \lambda Z}{(\delta \lambda)^3 Z} = B^2 \lambda D^{12} T_\lambda^2 m_1 P W_{пр} S \quad (6)$$

с квантовыми:

$$Q_k = \frac{M_k^2 \lambda Z}{(\delta \lambda)^2 Z} = B^2 D^{12} T_\lambda \frac{m_1}{m_2} P S \quad (7)$$

где M_m, M_k - отношения сигналов к среднеквадратическому значению шума;

λ - длина волны;

$\delta \lambda$ — теоретический предел разрешения оптической части прибора;

Z - общее число спектральных интервалов, регистрируемых прибором;

t - время регистрации спектрального интервала $\lambda_2 - \lambda_1$;

$B \lambda$ - средняя плотность спектральной яркости источника света в интервале $\Delta \lambda$ (реальный предел разрешения прибора) (для спектрофотометров - с учетом поглощения в исследуемом образце);

В некоторых задачах основной характеристикой является разрешающая способность, а светосила практически не играет роли. В других важны светосила и число одновременно регистрируемых элементов и т.д. Если сравниваемые приборы различаются, например, в два раза по производительности и в десять раз по стоимости, то при одинаковых эксплуатационных расходах целесообразнее ставить два малопроизводительных прибора взамен одного более производительного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда решающей характеристикой является вес прибора, приходится для его уменьшения жертвовать разрешающей способностью и светосилой. В ряде случаев важны габариты прибора и для их уменьшения идут на ухудшение оптических характеристик. Таким образом, при оценке спектрального прибора необходимо учитывать его оптические, эксплуатационные, механические и другие свойства, существенные для решаемой задачи. Подменять их совокупность одной числовой константой практически невозможно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петренко А.И., Пурин О.Ф., Киселёв Г.Д. Автоматизация проектирования цифровых схем. - Киев: Высшая школа, 1978.
2. Петров В.П. Контроль качества и испытание оптических приборов. - Л.: Машиностроение, 1985.
3. Полозов В.С., Буденков О.А., Ротков С.И. и др. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи. - М.: Машиностроение,

1983.

4. Л.Т. Марышева Монография. Математическое обеспечение проектирования цветоизмерительных приборов. Министерство цифровых технологий Республики Узбекистан, ТУИТ, 2022г.
5. ГОСТ 31913–2011. Техника фотометрическая. Термины и определения.
6. Бергер Р. Основы спектроскопии. М.: Мир, 2002.
7. Хант Р.У. Измерение цвета. СПб.: Профессия, 2013.
8. Wyszecki G., Stiles W.S. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. New York: John Wiley & Sons, 2000.
9. Berns R. Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology. John Wiley & Sons, 2019.
10. Lim J. Spectrophotometry and Colorimetry Measurement Techniques. CRC Press, 2020.
11. Malacara D. Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications. SPIE Press, 2011.
12. Zhao Y., Berns R. Spectral imaging: methods and applications. Journal of Imaging Science, 2015.
13. Соловьев А.А., Лаврентьев В.А. Спектральные методы измерений. М.: Физматлит, 2010.