

## Акустооптическая спектрометрия

В. Э. Пожар\*

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН  
Россия, 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15*

Описаны оригинальные методы спектральных измерений, основанные на свойствах акустооптических перестраиваемых фильтров. Они позволяют оптимизировать процедуру измерения, сокращая время измерения и обеспечивая высокую точность.

PACS: 42.79.Jq, 07.60.Rd.

УДК:535.

Ключевые слова: акустооптические фильтры, оптическая спектрометрия.

Спектрометрия с использованием акустооптических (АО) перестраиваемых фильтров может рассматриваться как отдельный вид спектральных измерений, отличающийся не только технической реализацией, но и методами измерений, и потенциальными возможностями. Ряд особенностей этих устройств требует или позволяет использовать новые алгоритмы измерения и анализа спектров. В докладе описаны два оригинальных метода измерений: фрагментарная спектральная регистрация (ФСР) и единообразная спектральная реконструкция (ЕСР), позволяющие оптимизировать процесс измерения.

Уникальным свойством АО фильтров является резкая спектральная адресация (РСА), заключающаяся в способности настроиться на любую длину волны  $\lambda$  за одно и то же минимальное время (10 мкс). Это позволяет отойти от классического сканирования спектра и реализовать алгоритм спектральной регистрации самого общего вида  $\lambda(t)$ . В свою очередь, эта возможность требует разработки новой концепции выбора алгоритма измерения спектра. В связи с тем, что во многих задачах спектрального анализа полезная информация содержится только в некоторых линиях спектра, возникает задача выбора минимального набора спектральных точек  $\{\lambda_i\}$ , достаточного для решения данной конкретной аналитической задачи. Решение этой задачи позволяет сократить время измерений в некоторых применениях на 1–2 порядка по сравнению с непрерывным сканированием при том же «качестве» анализа. Этот подход был развит [1] в применении к проблеме количественного анализа воздушных масс в задачах мониторинга и санитарного контроля воздуха [2]. Он получил название фрагментарная спектральная регистрация (fragmentary spectral registration — FSR) [3].

Указанная задача была принципиально решена: были сформулированы критерии сравнения различных алгоритмов и разработаны средства их оценки и сопоставления. Было показано, что методы ФСР эффективны при анализе линейчатых разреженных спектров с помощью акустооптических РСА-спектрометров. Эти ме-

тоды могут найти применения, например, в эмиссионной спектроскопии, в спектроскопии комбинационного рассеяния, в абсорбционной спектроскопии газов, особенно в условиях лимита времени, в таких задачах как мониторинг, экспресс-анализ, контроль процессов.

В то время как метод ФСР решает проблему для линейчатых спектров, для гладких спектров проблема определения оптимального алгоритма сохраняется. Решение этой задачи может быть основано на другом свойстве АО фильтров, финитности фурье-образа (ФО) их функции пропускания  $h(\nu)$ , следующим образом [4]. Процедура измерения спектра описывается уравнением

$$s(\nu_f) = \int b(\nu) h(\nu - \nu_f) d\nu \quad (1)$$

где  $\nu=1/\lambda$  — оптическая пространственная частота,  $b(\nu)$  — оптический спектр объекта,  $s(\nu_f)$  — спектрограмма, т. е. зависимость измеренного сигнала от частоты настройки АО фильтра  $\nu_f$ . Согласно теореме Котельникова спектрограмма в любой точке спектра записывается в виде

$$s(\nu) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s(\nu_m) \frac{\sin\left(\pi\left(\frac{\nu}{\Delta\nu_d} - m\right)\right)}{\pi\left(\frac{\nu}{\Delta\nu_d} - m\right)}, \quad (2)$$

т. е. выражается через отсчеты в точках спектра  $\nu_m = m\Delta\nu_d$ ,  $m$  — целое,  $\Delta\nu_d = 1/(2L_{AO})$ ,  $L_{AO}$  — эффективная длина АО взаимодействия, определяющая ширину ФО функции пропускания АО фильтра. Это выражение позволяет в принципе решить задачу нахождения оптимального алгоритма. Если провести измерения на множестве эквидистантных точек спектра  $\nu_m$ , то спектрограмма может быть точно вычислена в любой точке спектра, в связи с чем этот метод был назван [5] единообразной спектральной реконструкцией (exact spectral reconstruction — ESR). В реальных условиях, конечно, следует учесть случайную погрешность отсчетов и ограниченность их числа ( $\nu_{min} - \nu_{max}$ ), но это приводит лишь к относительно небольшой погрешности формулы (2). Таким образом, метод ЕСР дает возможность

\*E-mail: v\_pozhar@rambler.ru

точно сравнивать спектральные функции, измеренные на разных по характеристикам АО спектрометрах.

Следует отметить, что второе свойство АО фильтров (финитность ФО) в отличие от первого свойства (РСА) является не уникальным, а скорее универсальным, что связано с конечными размерами измерительных инструментов. А потому полученные результаты могут представлять интерес и для других методов измерений оптических спектров.

В заключении доклада отмечены и другие особенно-

сти АО спектрометров, позволяющие эффективно применять их для модуляционной спектроскопии, спектроскопии с временным и пространственным разрешением, а также для двумерной и трехмерной спектральной визуализации структуры объектов. Кроме того, показано, что возможность управления параметрами измерительной процедуры в реальном времени позволяет реализовать на основе АО спектрометров новые, спектрально-адаптивные алгоритмы измерения [6].

- [1] *Fadeyev A.V., Pozhar V.E.* Proc. SPIE. **8082**, 808242. (2011).  
 [2] *Мазур М.М. и др.* Приборы и техника эксперимента. В. 2. С. 140. (2011).  
 [3] *Fadeyev A.V., Pozhar V.E., Pustovoi V.I.* Proc. SPIE. **8890**, 88900H. (2013).  
 [4] *Пожар В.Э., Пустовойт В.И.* Докл. Акад. наук. **406**,

- № 1. С. 40. (2006).  
 [5] *Кутуза И.Б., Пожар В.Э.* Физ. основы приборостроения. **2**, № 4, С. 82. (2013).  
 [6] *Фадеев А.В., Пожар В.Э.* Оптический журнал. **80**, № 7. С. 50. (2013).

## Acousto-optical spectrometry

V.E. Pozhar

*Scientific Technological Center of Unique Instrumentation of Russian Academy of Science. Moscow 117342, Russia  
 E-mail: v\_pozhar@rambler.ru*

Original spectral methods based on unique features of acousto-optical tunable filters are described. They provide an optimization of the detection procedure, and also decrease the acquisition time and decrease the value of inaccuracy.

PACS: 42.79.Jq, 07.60.Rd.

Keywords: acousto-optical tunable filters (AOTF), optical spectrometry.

### Сведения об авторах

1. Пожар Витольд Эдуардович — докт. физ.-мат. наук, руководитель отдела; тел.: (495) 333-24-31, e-mail: v\_pozhar@rambler.ru.