

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РАН

На правах рукописи

Кутуза Игорь Борисович

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ, ИЗМЕРЕННЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМЕТРОМ

Специальность: 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в Федеральном Государственном Бюджетном Учреждении Науки Научно-технологическом центре уникального приборостроения Российской академии наук.

Научный руководитель: Академик РАН,
Доктор физико-математических наук, профессор
Пустовойт Владислав Иванович

Научный консультант: Доктор физико-математических наук
Поляр Витольд Эдуардович

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ
Главный научный сотрудник,
Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Доктор физико-математических наук, профессор
Кравченко Виктор Филиппович

Декан факультета информационных систем и
компьютерных технологий
Российский новый университет
Доктор физико-математических наук, профессор
Крюковский Андрей Сергеевич

Ведущая организация: Институт космических исследований РАН

Защита диссертации состоится **«18» декабря 2013 года в 15 часов 00 минут**
на заседании Диссертационного Совета Д 002.135.001
НТЦ Уникального приборостроения РАН
По адресу 117342 г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НТЦ Уникального приборостроения
РАН

Автореферат разослан **«18» ноября 2013 года**

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.135.001



Отливанчик Е.А.

Общая характеристика работы

Актуальность

Оптические спектрометры на основе акустооптических (АО) перестраиваемых фильтров используются и как самостоятельные приборы, и как составные части сложных спектральных систем. Они применяются в научных исследованиях, биологии, медицине, в экспресс-анализах образцов, при контроле технологических процессов, в мониторинге окружающей среды и во многих других областях.

Основная особенность акустооптических спектрометров заключается в том, что дифракционная решетка создается в кристалле динамически бегущей ультразвуковой волной. Спектральная перестройка осуществляется изменением периода решетки при изменении частоты высокочастотного (ВЧ) электрического сигнала, подаваемого на ультразвуковой излучатель. Следовательно, время перестройки определяется временем пробега ультразвука по кристаллу и составляет $\sim 10^{-5}$ с. За это время акустооптический спектрометр может быть адресован в любую точку спектра. Это свойство, называемое произвольным спектральным доступом (random spectral access), является уникальным и составляет принципиальное отличие акустооптических спектрометров от классических спектрометров на дифракционных решетках [1].

Благодаря этому свойству акустооптические спектрометры позволяют реализовать произвольный алгоритм обзора спектра объекта в ходе измерения. И это ставит проблему выбора одного (наилучшего) из всего множества возможных алгоритмов [2]. Этой проблемы не существует для классических дифракционных спектрометров: в них можно выбрать лишь начальную (λ_{\min}) и конечную длину (λ_{\max}) волны, шаг перестройки ($d\lambda$) и время накопления в каждой точке (τ_{acc}), либо скорость сканирования ($d\lambda/dt$).

Указанная проблема была решена [3] для спектров, имеющих линейчатый вид. В этом случае, очевидно, интерес представляет измерение отдельных линий,

потому критерий выбора алгоритма спектральной адресации базируется на минимизации времени измерения при заданном уровне точности и достоверности. Этот подход был реализован в виде детерминированной процедуры выбора измеряемых спектральных линий, исходя из требований задачи и априорной информации об объекте, обеспечивая снижение времени спектрального анализа на 1-2 порядка, и был назван фрагментарной спектральной регистрацией (fragmentary spectral registration) [4].

Однако для сплошных спектров, когда необходимо измерить “все” точки спектра, такого очевидного критерия не существует. И проблема выбора алгоритма остается нерешенной. Это является причиной того, что при выборе режима измерения акустооптических спектрометров задаются те же несколько параметров (λ_{\min} , λ_{\max} , $d\lambda$), что и для сканирующих дифракционных спектрометров, и потому не дает возможности использовать в полной мере преимущества, которые есть у АО спектрометров.

Таким образом, актуальной является задача выработки алгоритмов измерений, реализующих особые возможности акустооптических спектрометров.

Выбор определенного алгоритма для сплошных спектров может быть осуществлен на основе свойства, на которое впервые было обращено внимание в статье [5] и которое было доказано в общем виде работе [6]. Оно заключается в нижеследующем. Уравнение измерений оптического спектра АО спектрометром при определенных условиях имеет вид свертки.

$$s(v_f) = \int g(v)h(v - v_f)dv \quad (1)$$

где g – измеряемая спектральная функция, h – аппаратная функция акустооптического спектрометра, s – спектрограмма, регистрируемая спектрометром, v – спектральная координата (волновое число, см^{-1}), v_f – волновое число, соответствующее центру окна пропускания акустооптического спектрометра, определяемое частотой ультразвука f .

Если аппаратная функция имеет разностный вид, то уравнение может быть преобразовано в следующий вид

$$S = GH, \quad (2)$$

где большими буквами S , G , H обозначены фурье-образы от функций s , g , h соответственно. Вышеуказанное свойство [5, 6] заключается в финитности функции H . Действительно фурье-образ передаточной функции классического акустооптического фильтра $\text{Sinc}^2(v-v_f)$ представляет собой треугольник (рис.1)

$$H(x) = \left(1 - \frac{|x|}{x_L}\right) \Theta(x_L - |x|), \quad (3)$$

где Θ – ступенчатая функция Хевисайда, $\text{Sinc}(v) \equiv (\sin v) / v$.

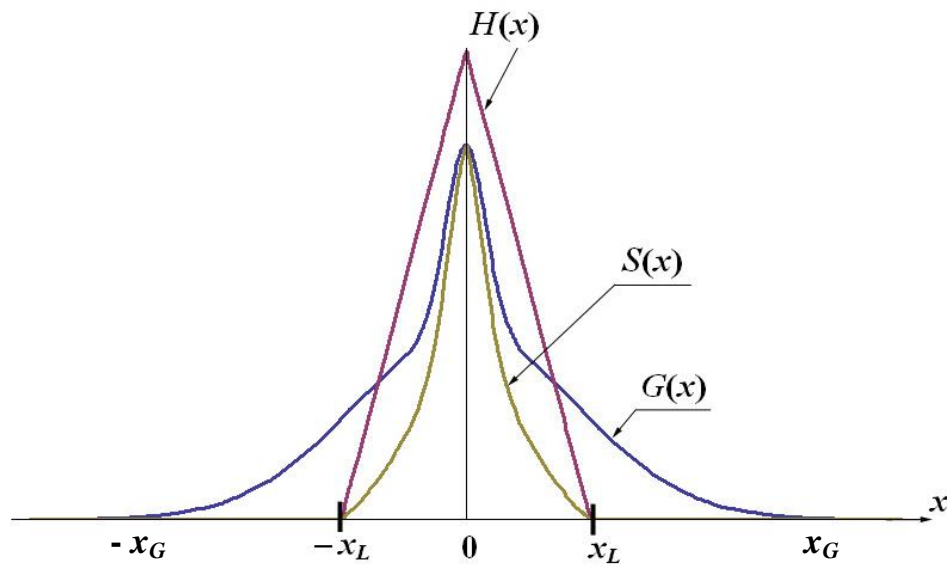


Рис. 1. Фурье-образы аппаратной функции АО спектрометра H , измеряемой спектральной функции G , и регистрируемой прибором спектрограммы S .

В этом случае уравнение описывает “отрезание” быстроосциллирующих компонент ($x > |x_L|$) измеряемой функции g и по сути сглаживание спектрограммы $s(v)$ в результате измерения. В итоге фурье-образ $S(x)$ спектрограммы также оказывается финитен, а потому к ней применима теорема Котельникова. Это значит, что значение спектрограммы $s(v)$ в любой точке спектра v может быть восстановлено по измерениям этой функции на множестве эквидистантно расположенных точек $v_m = m v_d$, где m – целое, $v_d = 1/(2L_{eff})$, L_{eff} – эффективная длина, связанная с размером носителя x_L функции H .

Это обстоятельство и определяет выделенный алгоритм: он заключается в измерении g на множестве точек v_m и по результатам измерений спектрограмма s может быть восстановлена в любой точке спектра по формуле

$$s(\nu) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s_m \operatorname{Sinc} \left(\pi \left(\frac{\nu}{\nu_d} - m \right) \right), \quad (4)$$

где $s_m \equiv s(\nu_m)$ – измеренное значение спектрограммы в точке ν_m .

Практическая реализация этого алгоритма сталкивается с рядом проблем, из которых наиболее важные следующие:

- 1) ограничение числа измеряемых точек вследствие ограниченности спектрального диапазона;
- 2) неточность адресации акустооптического спектрометра по спектру, связанная с различными причинами (неточностью калибровки, температурным дрейфом спектральной шкалы прибора и т.п.)

Поэтому необходимо решение второй группы проблем: оценка точности восстановления измеряемой спектрограммы $s(\nu)$. Все вышеописанное позволяет сформулировать цели работы.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является оценка влияния факторов, возникающих при работе акустооптических спектрометров, на точность получения спектральных данных и разработка метода измерений, основанного на предложенном оптимальном алгоритме измерения. В частности, были поставлены и решены следующие задачи.

1. Оценка погрешности, связанной с ограниченностью диапазона измерений.
2. Оценка погрешности, связанной с шумами фотоприемника.
3. Оценка погрешности, связанной с неточностью задания спектральной координаты.
4. Разработка методов минимизации погрешности определения спектральной координаты.

Научная новизна

1. Впервые систематически разработан и обоснован метод измерения оптических спектров с помощью акустооптических спектрометров. Полученные результаты могут быть использованы для любых спектрометров с ограниченным фурье-образом аппаратной функции, способных работать в режиме быстрой произвольной спектральной адресацией.
2. Впервые проанализировано и вычислено влияние на погрешность измерения основных неисключаемых факторов, в том числе неточности адресации по спектру. Количественный учет этих факторов позволяет обосновать оптимальность алгоритмов измерения.

Практическая значимость

Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления работой акустооптических спектрометров в различных задачах при измерении разных типов спектров.

Разработанные подходы к обоснованию оптимальности алгоритмов проведения измерений могут быть применены не только к классическим АО спектрометрам, но и к АО спектрометрам изображения. Особенно актуально это будет отражаться в задачах, в которых требуется контроль определения спектральной координаты.

Все полученные результаты направлены на оптимизацию работы акустооптического спектрометра и на повышение достоверности измеряемых данных, гибкости используемых алгоритмов работы, эффективности проведения измерений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Измерение спектра оптического излучения акустооптическим спектрометром на множестве эквидистантно расположенных точек $\nu_m = m \nu_d$, (где $\nu_d = 1/(2L_{eff})$ – эффективная длина, определяемая размером носителя фурье-образа аппаратной функции акустооптического спектрометра) позволяет восстановить значение измеряемой спектральной функции в любой точке интервала измерений и исключить области недостоверных значений по краям

интервала, размер которых зависит от заданного уровня β погрешности $\Delta\nu \sim \beta^{-1/3} \nu_d$.

2. При использовании вышеуказанного метода (положение 1) в реальных спектрометрах, эффективная длина L_{eff} акустооптического взаимодействия которых может различаться для разных частей светового пучка и разных условий измерения, в качестве L_{eff} следует выбирать максимальную длину, что соответствует минимальному шагу перестройки по спектру $\nu_d = 1 / (2 \cdot \max L_{eff})$. Шаг перестройки может быть увеличен свыше этой величины только для априори гладких спектров, у которых носитель фурье-образа уже, чем у аппаратной функции акустооптического спектрометра $\text{supp } G(x) \subset \text{supp } H(x)$.

Апробация работы

Результаты проведенных исследований были представлены на следующих научных конференциях.

- XVI European Frequency and Time Forum (EFTF). St. Peterburg, 12-14 March, 2002.
- European Conferences On Biomedical Optics (ECBO 2003). Munich, Germany, 22-25 June 2003.
- 2-я Межд. конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP). Суздаль, 25-27 сентября 2007 г.
- 3-я Межд. конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2009). Суздаль, 22-24 сентября 2009 г.
- V Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям. (Саров, 25-27 апреля, 2011 г.)
- XVII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". Томск, 28 июня - 1 июля 2011 г.
- XVIII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". Иркутск, 2-5 июля 2012 г.

- 5-я Межд. конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2012). Суздаль, 18-19 сентября 2012 г.
- 6-я Межд. конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2013). Суздаль, 16-17 сентября 2013 г.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Диссертация содержит 104 страницы текста, 25 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 98 наименований и 20 авторских публикаций.

Содержание работы

Во Введении приведено обоснование актуальности темы исследования, представлено краткое содержание работы, отмечена научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 представлен обзор спектральных акустооптических (АО) приборов и методов измерений, выполняемых с их помощью. Описаны АО спектрометры, которые применялись в данной работе. Приведены сведения из акустооптики, необходимые для понимания работы АО спектрометра и его особенностей. Сформулированы основные цели работы и определены решаемые задачи.

На примере акустооптического спектрометра комбинационного рассеяния показаны особенности процесса измерения. Показано, что существующие методы не в полной мере позволяют реализовать возможности таких спектрометров и что реализация оптимального алгоритма управления спектрометром требует новых подходов. В рамках теоремы Котельникова рассмотрены методы измерения и восстановления спектров с помощью акустооптического спектрометра и обоснован выбор одного из них (оптимального).

Рассмотрены существующие методы спектральной адресации АО спектрометра и его калибровки по спектральной координате. Показана необходимость учета температурной зависимости калибровочной кривой. Сформулированы требования к точности позиционирования по спектральной координате и контролю температуры.

В Главе 2 проводятся расчеты, необходимые для получения оценки точности спектров, измеренных акустооптическим спектрометром. Основными факторами, влияющими на точность восстановления спектрограммы, являются: 1) неполнота (конечность) выборки отсчетов; 2) влияние шумов регистрации; 3) неточность (неравномерность) расположения спектральных точек (случайная или систематическая). Оптимальный алгоритм измерения спектра заключается в регистрации значений выходного сигнала спектрометра s при его последовательной настройке на оптические частоты ν_m в пределах заданного интервала измерений. В этом случае значение сигнала в любой точке спектра может быть восстановлено по этим отсчетам с помощью ряда

$$s(\nu) = \sum_{m=M_1}^{M_2} s(\nu_m) \frac{\sin(2\pi L(\nu - m\nu_d))}{2\pi L(\nu - m\nu_d)} \equiv \sum_{m=M_1}^{M_2} s(\nu_m) \frac{\sin(\pi(\nu/\nu_d - m))}{\pi(\nu/\nu_d - m)} \quad (5)$$

Оценим влияние указанных факторов на погрешность восстановления спектрограммы по формуле (1). Следует отметить, что все перечисленные факторы являются принципиально неустранимыми. Существует также множество иных факторов, проявляющихся в тех или иных условиях, которые здесь не рассматриваются.

1. Поскольку измерения всегда производятся на конечном множестве отсчетов, необходимо оценить влияние этого фактора. Если, например, измерения проведены на множестве из $2N+1$ отсчетов, то в формуле остается лишь ограниченное число членов. В этом случае отличие функции, построенной по этой ограниченной выборке $s_N(\nu)$, от точной, т.е. погрешность измерения, описывается выражением

$$\delta_N^2 \equiv \int |s(\nu) - s_N(\nu)|^2 d\nu = \nu_d \sum_{m=-\infty}^{\infty} |s(m\nu_d) - s_N(m\nu_d)|^2 = \nu_d \sum_{m=-\infty}^{-N} |s(m\nu_d)|^2 + \nu_d \sum_{m=N}^{\infty} |s(m\nu_d)|^2 \quad (6)$$

Если измеряемая функция спадает на бесконечности степенным образом $|g(v)| < \alpha |v/v_d|^{-n}$, то можно получить следующую оценку

$$\delta_N^2 \leq 2v_d \sum_{m=N}^{\infty} \frac{\alpha^2}{(m)^{2n}} \leq 2\alpha^2 \int_{Nv_d}^{\infty} \frac{dv}{\left(\frac{v}{v_d}\right)^{2n}} = \frac{2\alpha^2 v_d}{(2n-1)N^{2n-1}} \quad (7)$$

Поскольку аппаратная функция АО спектрометра описывается функцией вида $\text{Sinc}^2\left(\frac{\pi v}{2\Delta v_{0.5}}\right)$, то любой финитный спектр, измеренный этим прибором, спадает как v^{-2} . Соответственно, в этом случае вклад неизмеренных участков в погрешность можно оценить следующим образом

$$\delta_N^2 \leq \frac{2v_d}{3\pi^4 N^3} \cdot \quad (8)$$

Эта оценка относится к середине интервала измерений. А для точек вблизи края интервала число N равно числу периодов осцилляции функции Sinc до ближайшего края и влияние этого фактора растет с приближением к краю. На самом краю оценка может существенно зависеть от поведения измеряемого спектра за пределами интервала измерения.

Таким образом, вблизи края интервала измерения рассматриваемая составляющая погрешности становится существенной. Если задан допустимый уровень погрешности $\delta_N^2 \sim \beta \ll 1$, то из формулы (8) следует, что расстояние от края, где погрешность становится приемлемой, зависит от заданной точности следующим образом $(\Delta v)_b \sim \beta^{1/3}$ и фактически с каждого края диапазона должен быть “отрезан” соответствующий интервал $(\Delta v)_b$.

Поэтому, если задан спектральный интервал $v_{\min} \div v_{\max}$, на котором должна быть определена спектрограмма, то интервал измерений должен быть расширен за этот диапазон на величину «отрезаемых» интервалов $v'_{\min} = v_{\min} - \Delta v_b^-$, $v'_{\max} = v_{\max} + \Delta v_b^+$.

2. Вторым фактором, который всегда присутствует при измерениях, является шум, который далее будет рассматриваться как случайная аддитивная добавка $\tilde{\xi}$ к

полезному сигналу. Такой шум дает следующий вклад в регистрируемую спектрограмму

$$\tilde{s}(v) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (s(mv_d) + \tilde{\xi}_m) \frac{\sin(2\pi L(v - mv_d))}{(2\pi L(v - mv_d))} = s(v) + \tilde{\chi}(v, t) . \quad (9)$$

Если шум имеет нулевое среднее и не коррелирован во времени, т.е. $\langle \tilde{\xi}_m(t) \rangle_t = 0$, $\langle \tilde{\xi}_m(t) \tilde{\xi}_k(t) \rangle_t = \langle \tilde{\xi}_m^2(t) \rangle \delta_{mk}$ (где δ_{mk} – символ Кронекера), то среднее значение вычисленной функции не смещается

$$\langle \tilde{s}(v) \rangle_t = s(v) . \quad (10)$$

Среднеквадратичное отклонение, вызванное шумовой составляющей дается выражением:

$$\sigma^2 = \langle \tilde{s}^2(v) \rangle_t - (\langle s(v) \rangle_t)^2 = \langle \tilde{\chi}^2(v, t) \rangle_t = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \langle \tilde{\xi}_m^2(t) \rangle_t \frac{\sin^2(2\pi L(v - mv_d))}{(2\pi L(v - mv_d))^2} . \quad (11)$$

Если дисперсия шума однородна по спектру, т.е. $\langle \tilde{\xi}_m^2(t) \rangle_t = b^2 = const$, то эта составляющая погрешности постоянна

$$\sigma^2 = b^2 . \quad (12)$$

Таким образом, вычислительная процедура не увеличивает погрешность, вызванную аддитивным шумом.

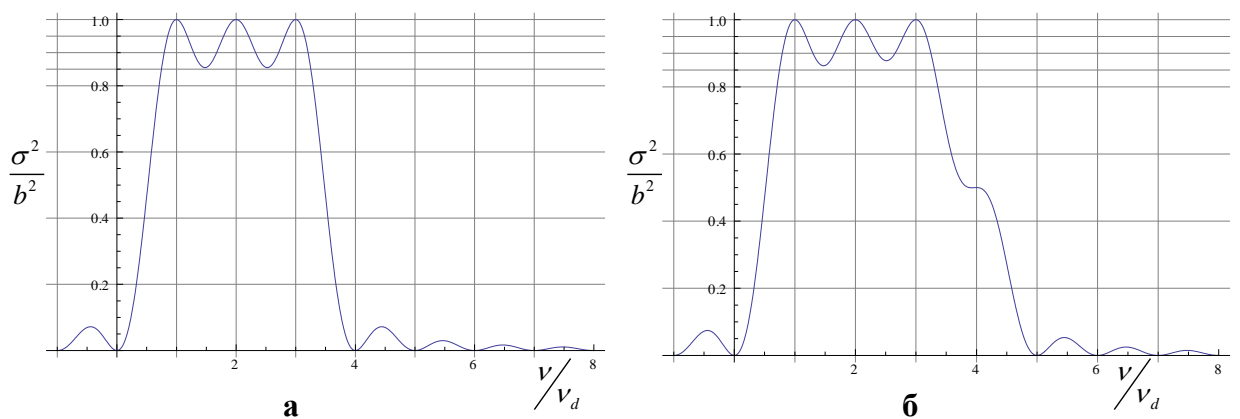


Рис. 2. Нормированная функция влияния шума $\sigma^2(v)$ для модельных случаев:

- а) в случае трех отсчетов с одинаковым уровнем шума;
- б) в случае четырех отсчетов с неоднородным уровнем шума $\langle \tilde{\xi}_m^2 \rangle = b^2$ ($m=1,2,3$), $\langle \tilde{\xi}_4^2 \rangle = b^2/2$.

Для конечного ряда Котельникова (5) среднеквадратичная погрешность интерполяции σ_N^2 меньше (рис.2) ввиду меньшего числа суммируемых слагаемых, но в области далекой от краев интервала измерения это различие мало и зависит от числа спектральных отсчетов в выборке аналогично формуле (8): $|\sigma_N^2 - \sigma^2| \sim N^{-3}$.

На краю интервала измерения вклад отсчетов, которые были измерены, примерно равен вкладу от «неизмеренных» отсчетов, так что $(\sigma^2)_{\text{bound}} = b^2/2$.

В Главе 3 рассмотрена третья составляющая погрешности, относящаяся к спектральной координате. Эта составляющая связана с тем, что реальные точки адресации АО спектрометра могут не совпадать с точками, задаваемыми теоремой Котельникова $v_m = mv_d + \tilde{\gamma}_m$. Сдвиг m -ой точки $\tilde{\gamma}_m$ относительно точного значения может быть вызван несколькими разными факторами и носить как случайный, так и систематический характер. Спектральная адресация АО фильтра, а соответственно и АО спектрометра, определяется заданием управляющей акустической частоты f

$$v_f = f / (V \cdot \Delta n), \quad (13)$$

где $\Delta n(v)$ – величина, определяемая показателями преломления рабочего кристалла АО фильтра (для коллинеарного АО фильтра – их разность $\Delta n = n_e - n_o$), которая вследствие дисперсии спектрально зависима. Эта перестроечная характеристика $v_f(f)$ наглядно демонстрирует основные причины неточности спектральной адресации АО фильтра.

Во-первых, сдвиг может быть обусловлен нестабильностью высокочастотного (ВЧ) генератора, задающего частоту ультразвука f . Хотя в современных генераторах может быть обеспечена достаточно высокая стабильность, этот фактор не может быть полностью исключен.

Во-вторых, хотя ВЧ генераторы выдают дискретную сетку равноотстоящих частот, эта сетка не является равномерной по оптической частоте из-за спектральной дисперсии (которая особенно заметна при приближении к краю области прозрачности материала). Если это не учитывается или учитывается

неточно, то возникает регулярный сдвиг точек по спектру, который может носить монотонный характер – вариант *a*. Если же эффект дисперсии учитывается (вариант *b*), т.е. выбирается наиболее близкое к требуемому значение частоты ультразвука, то ясно что ввиду дискретности сетки частот имеются небольшие остаточные несоответствия частоты, которые носят квазислучайный характер (цифровой шум).

В-третьих, еще одним существенным фактором является зависимость показателей преломления от температуры кристалла T . Это значит, что если температура не учитывается или не известна точно, то шкала сдвигается вследствие изменения оптических свойств кристалла $\Delta n(T)$. Следует отметить, что этот эффект может иметь место вне зависимости от дисперсии материала (т.е. и в ИК диапазоне). Этот фактор приводит к равномерному (линейному) сдвигу точек отсчетов по спектру. Но даже и в том случае, если температурный учет производится, сдвиг может возникать по целому ряду причин: а) неточность поправочного температурного коэффициента; б) изменение температуры в процессе работы АО спектрометра (вследствие выделения тепла при распространении акустической волны); в) неоднородный нагрев по сечению кристалла, повторяющий профиль мощности ультразвука, что затрудняет отслеживание изменения температуры поверхностным датчиком, устанавливаемым в АО спектрометре.

Таким образом, различные факторы, которые имеют место в реальных АО спектрометрах, вызывают погрешности в спектральной адресации, что отражается в погрешности восстановления спектральной кривой. Ниже рассмотрено влияние этого фактора и приведены результаты оценки влияния как для случайных сдвигов и для коррелированных.

Если считать сдвиги относительно малыми, то в первом приближении их влияние сводится к «шумоподобной» добавке

$$\tilde{s}(mv_d) = s(mv_d) + \tilde{\gamma}_m(t) \frac{ds(mv_d)}{dv} \equiv s(v) + \tilde{\eta}(v, t), \quad (14)$$

величина которой определяется в общем случае крутизной спектра. Погрешность восстановления спектра, которая, как и сам сдвиг, может быть нестационарной величиной, в этом случае записывается формулой

$$\tilde{\eta}(v, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(\tilde{\gamma}_m(t) \frac{ds(mv_d)}{dv} \frac{\sin(2\pi L(v - mv_d))}{(2\pi L(v - mv_d))} \right). \quad (15)$$

В зависимости от временной динамики и от статистических свойств сдвигов величина этой погрешности может заметно различаться. Для сдвигов, вызванных случайными некоррелированными причинами, $\langle \tilde{\gamma}_m(t) \rangle_t = 0$, и соответственно нет систематического смещения величины вычисляемой спектрограммы $\langle \tilde{\eta}_m(t) \rangle_t = 0$. Неточность калибровки (сбой спектральной шкалы), приводящая к однородному сдвигу по спектру $\tilde{\gamma}_m(t) \approx \gamma = const$, и некоторые другие эффекты, когда возникает долговременный не коррелированный со спектром сдвиг, приводят к погрешности, которая может быть оценена как

$$\tilde{\eta}(v, t) < \gamma \left| \frac{ds(v)}{dv} \right|. \quad (16)$$

Эта оценка показывает, что во всех точках погрешность сдвига шкалы примерно определяется величиной производной спектрограммы в этой точке (также как и в точках непосредственно измеренных отсчетов).

Следует отметить, что производная спектра, измеряемого АО спектрометром, не только является конечной величиной, что очевидно из энергетических соображений, но и дополнительно ограничена сглаживанием в процессе измерения из-за ограниченного разрешения спектрометра. Например, для одиночной узкой лазерной линии, имеющей спектральную плотность энергии оптического сигнала – I_s , максимальная величина производной составит

$$\tilde{\eta}(v, t) < 0,3 I_s L \gamma. \quad (17)$$

Дрейф температуры приводит к изменению эффективной длины L_{eff} , прежде всего из-за изменения показателей преломления $\Delta n(T)$. Это требует изменения шага $v_d = 1/(2L_{eff})$ в теоретической формуле (4) по мере прогрева кристалла. Этой дополнительной непростой процедуры можно избежать, если сразу в качестве шага в практической формуле (5) взять величину, соответствующую максимальному значению эффективной длины $v_d = 1/(2 \cdot \max L_{eff})$. Действительно, этому случаю соответствует максимальный размер носителя фурье-образа аппаратной функции АО спектрометра $\text{supp } H(x)$ и во всех других случаях носитель функции $H(x)$ будет

принадлежать указанному множеству. Такой выбор соответствует минимальному шагу по спектру ν_d и соответственно максимальному спектральному разрешению. Этим же принципом следует руководствоваться, если, например, для разных оптических лучей длина взаимодействия различна по сечению светового пучка.

В то же время шаг перестройки по спектру ν_d может в некоторых частных случаях быть увеличен свыше указанной величины $\nu_d = 1 / (2L_{eff})$. Например, если априори известна гладкость измеряемого спектра $g(\nu)$, так что носитель его фурье-образа уже, чем у аппаратной функции акустооптического спектрометра $\text{supp } G(x) \subset \text{supp } H(x)$, т.е. $x_G < x_L$ (рис.1), то в качестве шага может быть взята величина $\nu_d = 1 / (2x_G)$.

Суммарная погрешность измерений определяется всеми тремя составляющими погрешности, которые складываются как случайные и систематические погрешности. В частности, совместные вклады двух случайных составляющих, шума и некоррелированного разброса спектрального сдвига, складываются квадратично $\sigma^2 = \sigma_\chi^2 + \sigma_\eta^2$

С учетом важности точной спектральной адресации для рассматриваемого алгоритма в Главе 3 также проведен анализ используемых методов калибровки спектрометра по спектральной координате. Обоснован и описан алгоритм, позволяющий снизить систематическую погрешность калибровки до практически приемлемого уровня.

Проанализированы методы учета температурных зависимостей калибровочных кривых. Предложены алгоритмы контроля.

Обсуждена задача управления мощностью АО сигнала $P \sim \nu^2$ для обеспечения разностной формы аппаратной функции $h(\nu, \nu_f) = h(\nu - \nu_f)$.

С учетом важности точной спектральной адресации для рассматриваемого алгоритма в Главе 3 также проведен анализ используемых методов калибровки спектрометра по спектральной координате. Обоснован и описан алгоритм, позволяющий снизить систематическую погрешность калибровки до практически приемлемого уровня.

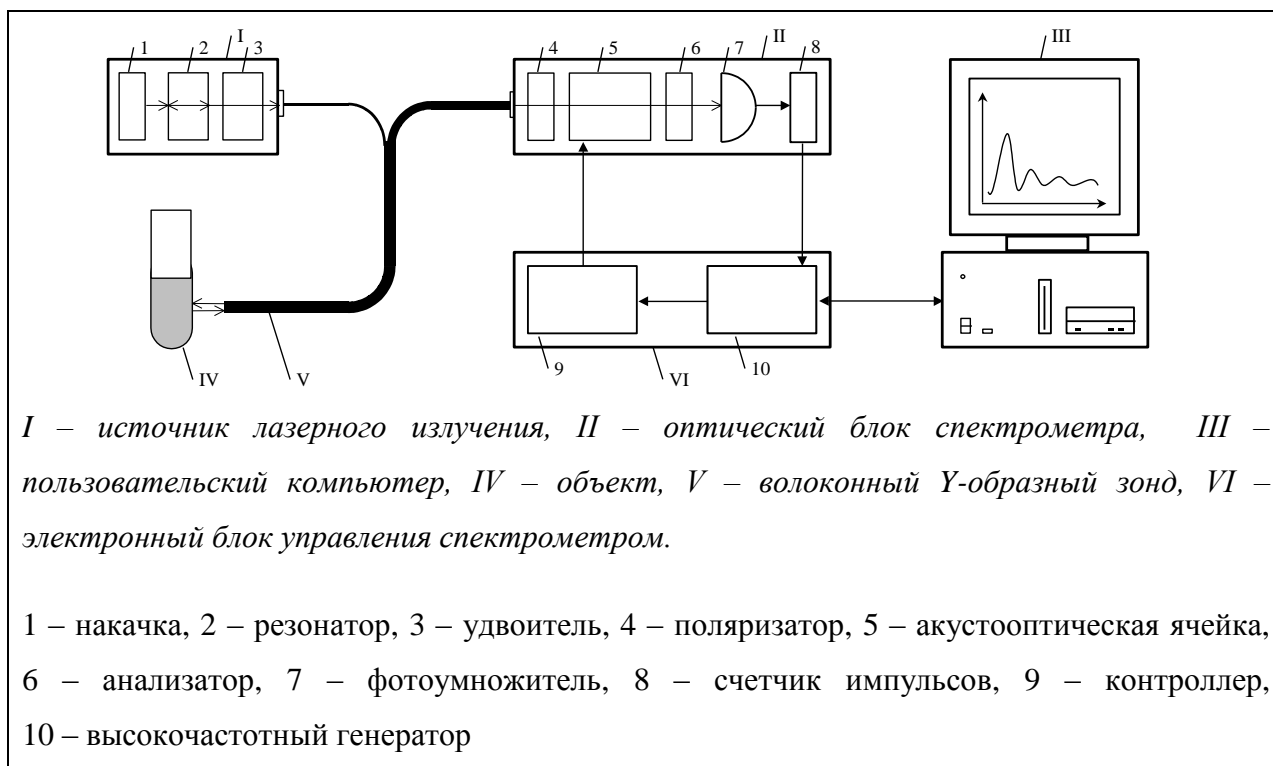


Рис. 3. Схема измерений оптических спектров образцов с использованием АО спектрометра РАОС с оптоволоконным зондом.

Проанализированы методы учета температурных зависимостей калибровочных кривых. Предложены алгоритмы контроля.

Обсуждена задача управления мощностью АО сигнала $P \sim \nu^2$ для обеспечения разностной формы аппаратной функции $h(\nu, \nu_f) = h(\nu - \nu_f)$.

В Главе 3 также приведена схема измерений (рис.3), проводившихся с помощью АО спектрометров комбинационного рассеяния и флуоресценции.

Представлены спектры веществ разного типа (кристаллических, аморфных, жидких, биологических), полученных в различных задачах (идентификация образцов, качественный анализ состава, определение динамики распространения веществ в тканях подопытных животных, мониторинг окружающей среды, научные исследования и др.) Представленные спектры (рис.4) иллюстрируют требования, предъявляемые к регистрируемым спектрам, и показывают особенности методики.

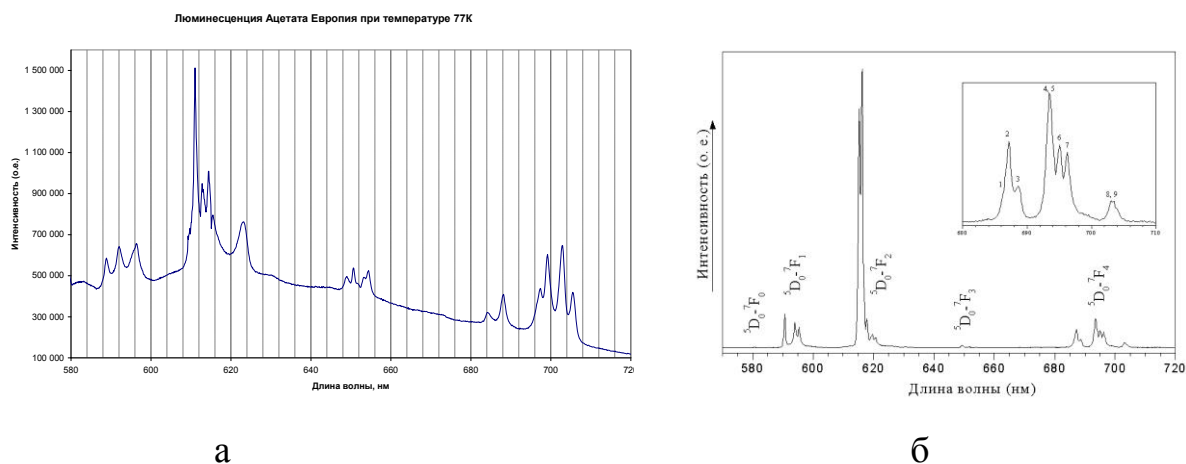


Рис. 4. Оптические спектры при 77К комплекса Европия в виде поликристаллического порошка:

а) измеренный на АО спектрометре;

б) после обработки и анализа.

(Из работы [3] из авторского списка).

В Заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Разработан метод измерения сплошных оптических спектров акустооптическими спектрометрами, позволяющий восстановить спектр во всех точках в пределах диапазона измерения.
2. Вычислена оценка погрешности метода, обусловленная ограничением множества измеряемых точек, и определены границы “отрезания” недостоверных результатов.
3. Определено влияние шума, в том числе в точках спектра, где спектр восстанавливается путем вычислений
4. Определено влияние неточности спектральной адресации АО спектрометра. Обоснован выбор шага перестройки по спектру для различных задач и разных ситуаций.
5. Сформулированы в виде технического задания требования к программно-методическому обеспечению, реализующему разработанный метод.

Литература

1. Shipp W.S., Biggins J., Wade C.W. Performance characteristics of an electronically tunable AOF for fast scanning spectrophotometry // Rev. Sci. Instr., 1976, v.47, N 5, p.565-569.
2. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Об оптимальном алгоритме спектрального химического анализа с помощью акустооптических спектрометров // Электромагнитные волны и электронные системы, 1997, т.2, N 4, с.26-30.
3. A.V. Fadeyev, V.E. Pozhar. Optimization of measuring and calibration procedures for gas analyser based on acousto-optical tunable filters // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII, P.H.Lehmann, W.Osten, K.Gastinger, Eds. Proc. SPIE, 2011, v. 8082, 808242.
4. A.V. Fadeyev, V.E. Pozhar. Application of independent component analysis method in real-time spectral analysis of gaseous mixtures for acousto-optical spectrometers based on differential optical absorption spectroscopy // Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XV, K.Stein, J.Gonglewski, Eds. Proc. SPIE, 2012, v. 8535, 85350C.
5. Ананьев Е.Г., Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Акустооптические методы измерения спектров оптического излучения // Оптика и спектроскопия, 1987. Т. 62. С. 159-165.
6. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Общие свойства аппаратных функций акустооптических спектрометров // Доклады академии наук, 2006, Т. 406, №1, С.40-43.

Список публикаций по теме диссертации

1. I. V. Kutuza, V. E. Pozhar, V. I. Pustovoit. Raman Acousto-Optical Spectrometer testing. XVI European Frequency and Time Forum (EFTF). Preliminary program and Abstracts, (St.Peterburg, 12-14 March, 2002), p.199.
2. Григорянц В.В., Кутуза И.Б., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Румянцева В.Д., Шилов И.П. Акустооптический видеоспектрометр для ранней диагностики рака. Труды XXIX международную конференцию «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе» (Гурзуф, Украина, 20-30 мая 2002), с.183-184.

3. И.Б.Кутуза, Л.Н.Пунтус, В.Ф.Золин, В.Э.Пожар, В.И.Пустовойт. Определение параметров кристаллического поля иона Европия по спектрам люминесценции, полученным с помощью акустооптического спектрометра. Журн. прикл. спектроскопии, 2003, т.60, в.6, с.774-778.
4. Kutuza I.B., Pozhar V.E., Pustovoit V.I., Puntus Z.N., Zolin V.F. Determination of parameters of the Europium ion crystal field by the luminescence spectra obtained by means of an acousto-optical spectrometer. Journal of Applied Spectroscopy. 2003, v.70, No. 6, p. 875-879.
5. I.B.Kutuza, V.E.Pozhar, V.I.Pustovoit. Experience of acousto-optic spectrometer application in Raman spectroscopy. Abstr. Int. conf. "Spectroscopy in special applications " (Kyiv, June 18 - 21, 2003), p.173.
6. I.B.Kutuza, V.E.Pozhar, V.I.Pustovoit. AOTF-based Imaging Spectrometers for Research of Small-Size Biological Objects. In "Novel Optical Instrumentation for Biomedical Applications", A.-C.Воссара, Ed. Proc. SPIE, v.5143, p.165-169, 2003.
7. В.Э.Пожар, В.И.Пустовойт, И.Б.Кутуза, А.В.Перчик, В.В.Григорьянц. Перспективы использования акустооптического видеоспектрометра для задач фотолюминесцентной диагностики. Альманах клинической медицины, т.ХІІ, М.: 2006, с.28.
8. В.И.Пустовойт, В.Э.Пожар, Е.А.Отливанчик, С.В.Боритко, А.В.Перчик, В.А.Суворов, Г.Н.Шкроб, В.В.Твердов, И.Б.Кутуза, А.Е.Отливанчик, В.Н.Шорин, М.М.Мазур, В.Н.Жогун. Современные средства и методы акустооптической спектрометрии. Успехи современной радиоэлектроники, 2007, в.8, с.48-56.
9. В.Э. Пожар, А.В. Перчик, В.Н. Шорин, С.В. Боритко, И.Б. Кутуза. Спектрометрический стенд на основе акустооптических монохроматоров для задач фотолюминесцентной спектроскопии. Труды 2-й Межд. конференции "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (Суздаль, 25-27 сентября 2007), с. 112-116.
10. В.Э. Пожар, С.В. Боритко, И.Б. Кутуза, А.В. Перчик, В.Н. Шорин. Стенд для отработки методов и средств флуоресцентной диагностики рака. Альманах клинической медицины, 2008, т.17, ч.2, с.123.

11. И.Б. Кутуза, А.В. Перчик, В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт, В.Н. Шорин, С.В. Боритко, Б.В. Никифоров. Развитие методов акустооптической спектromетрии для медицины. 3-я Международная конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2009, Суздаль, 22-24 сентября 2009 года), с.236-239.
12. Кутуза И.Б., В.Пожар. Особенности применения Акустооптических спектрометров в минералогии. 3-я Международная конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2009, Суздаль, 22-24 сентября 2009 года), с.239-244.
13. Кутуза И.Б., Пожар В.Э., Шерстобитов И.В. Применение лазерно-индуцированной флуоресценции для диагностики радиационных дефектов алмазов. V Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 25-27 апреля, 2011 г.), с.195-198.
14. Кутуза И.Б., Пожар В.Э., Перчик А.В., Отливанчик Е.А., Пустовойт В.И., Мазур М.М., Шорин В.В. Разработка подводных измерительных спектрометрических комплексов на основе перестраиваемых акустооптических фильтров. XVII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (28 июня-1 июля, 2011 г., Томск), с.В-217–220.
15. Кутуза И.Б., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Отливанчик Е.А. Исследование природных водоемов методами акустооптической спектromетрии. XVIII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы " (Иркутск, 2-5 июля 2012 г.)
16. И.Б. Кутуза, В.Э. Пожар, А.П. Цапенко, А.В. Шурыгин. Отработка методов измерений спектров комбинационного рассеяния жидких углеводородов с помощью акустооптических спектрометров. 5-я Международная конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2012, Суздаль, 18-19 сентября 2012 г.)
17. И.Б. Кутуза, В.Э. Пожар, А.П. Цапенко, А.В. Шурыгин. Создание базы данных спектров комбинационного рассеяния для акустооптических спектрометров. II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, (Москва, 23-25 января 2013 г.), Сборник научных трудов, с.246-247.

18. Кутуза И.Б., Пожар В.Э., Шурыгин А.В., Фадеев А.В. Разработка средств системы измерения, обработки и хранения спектров комбинационного рассеяния. 6-я Международная конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2013, Суздаль, 16-17 сентября 2013 г.)
19. Кутуза И.Б., Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Определение физических свойств алмазов с использованием акустооптических спектрометров. 6-я Международная конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2013, Суздаль, 16-17 сентября 2013 г.)
20. И.Б. Кутуза, В.Э. Пожар. Алгоритм измерения гладких спектров с помощью акустооптических спектрометров. Физические основы приборостроения, 2013, т.2, №4, с.82-87.

Усл. печ. л. 1,5 Тираж 100 экз. Заказ №20

Отпечатано 14.11.2013 в НТЦ УП РАН

117342, г.Москва, ул.Бутлерова,