

К обработке интерферограмм со статического Фурье-спектрометра

06, июнь 2012

DOI: 10.7463/0612.0432616

Голяк И. С., Есаков А. А.

УДК 681.785.574

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

gwynbleidd_85@mail.rutemofeich@inbox.ru**ВВЕДЕНИЕ**

Обеспечение химической безопасности на объектах любого уровня опасности и степени важности является важной задачей внелабораторного химического экспресс-анализа. Для этих целей все чаще применяют малогабаритные приборы, принцип действия которых основан на использовании Фурье-спектрометра [1, 2]. Спектры, по которым осуществляется идентификация химически-опасных веществ, получаются из двумерных интерференционных картин [3]. В связи с этим возникает задача обработки интерферограмм для последующей корректной оценки спектра и идентификации химического вещества. Однако общей теории улучшения интерференционных картин не существует, и существующие алгоритмы хорошо работают либо на модельных данных [4], либо затрачивают время на обработку столь большую, что непригодны для использования в малогабаритных приборах.

В данной работе предложен алгоритм обработки интерференционных картин, позволяющий получать корректные спектры для последующей идентификации веществ, и продемонстрирована эффективность его работы.

1 ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Двумерные интерференционные картины, полученные в полевых условиях с помощью статического Фурье-спектрометра (СФС), имеют существенные отличия от идеальных (математических) картин. Эти отличия обусловлены наличием в интерферограммах дефектов таких, как фон переменной яркости, пятна или царапины, искажения оптической системы и изменениями световой энергии и т.д., а также относительно высоким уровнем шумов, особенно в условиях низкой интенсивности полезного сигнала (рисунок 1). Для устранения вышеприведенных дефектов и повышения уровня сигнал/шум был разработан алгоритм [5, 6].



Рисунок 1 – Пример входного изображения СФС, зарегистрированного при низком уровне интенсивности сигнала. Сильно зашумленная интерферограмма получена при возбуждении излучения лазером с длиной волны 532 нм

Для устранения грубых дефектов изображения (отдельные точки, царапины) строится гистограмма яркости двумерной интерференционной картины и точки, выпадающие по яркости, линейно усредняются. Путем низкочастотной Фурье-фильтрации исходного изображения, в результате которого из интерферограммы удаляются высокие частоты, устраняется неравномерность фона, обусловленная условиями подсветки и характеристиками оптической системы.

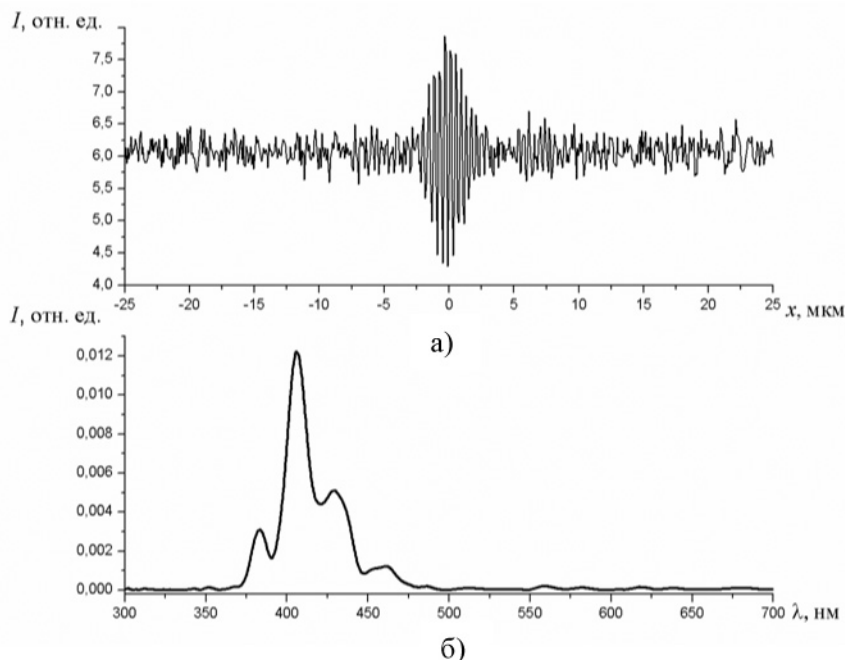
При наличии в интерференционной картине больших углов поворота (несколько градусов) от вертикали, она предварительно поворачивается на заданный угол θ . Для устранения искажения поворота, в анализируемой интерферограмме выделяются профили интерференционных полос по отдельным строкам, отличающиеся построчным сдвигом $f_i(x)$, (i – номер строки, x – координата вдоль строки), и записывается выражение

$$f_i(x) \approx f_{i-1}(x + \theta \Delta y),$$

где Δy – расстояние между строками; θ – угол поворота изображения.

Искажения интерференционной картины, вносимые оптической системой, имеют второстепенное значение, так как для определения угла поворота интерферограммы используется лишь центральная часть интерференционной картины.

Далее формируется усредненный профиль интерферограммы с учетом угла поворота и искажений оптической системы. Полученная усредненная интерферограмма используется для получения спектра с помощью преобразования Фурье (рисунок 2).



а) – интерферограмма вещества стильбен; б) – спектр вещества стильбен

Рисунок 2 – Результат обработки интерферограммы, полученной в результате вторичного излучения стильбена при возбуждении излучением светодиода с длиной волны 280 нм.

Повышение соотношения сигнал/шум происходит в два этапа. Первый этап состоит в усреднении интерференционной картины по направлениям, перпендикулярным к направлению интерференционных полос. Второй этап усреднения использует накопление изображений, что позволяет понизить случайную составляющую шума.

Данные, поступающие от телекамеры, представляют собой массивы целочисленных 10-битных отсчетов интенсивности размером 720 на 576 элементов, разброс которых при малых интенсивностях входного сигнала характеризуется среднеквадратичным значением случайного шума порядка $\sigma \sim (20-30)$ дБ. После усреднения по одному изображению (около 500 строк) шум характеризуется значениями $\sigma \sim (1,0-1,5)$ дБ, что соответствует ожидаемому уменьшению случайной компоненты примерно в 20–25 раз. Указанный случайный разброс определяет нижнюю границу уровня полезного сигнала, при котором его выделение из шумов еще представляется возможным. При меньших уровнях полезного сигнала идентификация возможна лишь с использованием накопления изображений по нескольким кадрам.

2 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА

Процедура построения спектра излучения позволяет оценить шум в каждой точке получаемого спектра. В предположении случайного характера шумов интерферограммы распределение шума по спектру является приблизительно равномерным и пропорциональным уровню шумов интерферограммы. Данные теоретические предсказания проверялись в исследовании, иллюстрацией служит таблица 1, построенная для вещества стильбен при возбуждении излучением источника с длиной волны 280 нм. В таблице 1 величина спектра измеряется в условных единицах; отношение сигнал/шум берется в диапазоне длин волн, используемом для распознавания.

Таблица 1 – Влияние усреднения изображений на отношение сигнал/шум (280 нм)

	Усреднение, кадров		
	1000	100	10
Максимум интерферограммы	1,43	1,51	1,86
Шум интерферограммы	0,06	0,15	0,47
Шум спектра	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Отношение сигнал/шум в спектре	15	5,30	1,50

В данном случае (таблица 1), при усреднении по большому числу изображений, шум интерферограммы убывает медленнее, чем ожидается. Причиной этого является наличие систематической ошибки в виде «сетки» на изображении. При этом шум в спектре лучше соответствует предположению о случайном характере ошибок, поскольку систематическая ошибка лишь частично попадает в интересующий нас спектральный интервал.

Сигналы, получаемые подсветкой лазера с длиной волны 532 нм на один-два порядка более интенсивны, чем полученные при подсветке ультрафиолетовыми источниками. В случае интенсивного излучения восстановленные спектры имеют ошибку неслучайного характера, связанную с нелинейностью характеристики приемной матрицы. Эта ошибка, однако, не критична для распознавания, так как убывает при ослаблении сигналов. Кроме того, спектральное распределение этой ошибки также в основном лежит за пределами интересной для распознавания области спектра.

Наличие спектральных линий идентифицируется при отношениях сигнал/шум, превышающих 1,5–2. Для идентификации различных веществ, однако, требуются уровни сигнал/шум, превышающие 5–7, что связано с наличием близких по виду спектров в базе данных (база эталонных спектров веществ). Соответствующие примеры приведены ниже.

3 ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ СИГНАЛА НА ВОЗМОЖНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ

Для следующих примеров распознавания использованы базы данных, содержащие от 10 до 20 веществ. В качестве спектра базы записывались спектры, полученные при максимальном накоплении изображений (до 1000).

В таблице 2 приводятся результаты распознавания стильбена при уменьшении уровня накопления изображений в условиях относительно узкой базы данных. В таблице приведены значения функции сходства, имеющие смысл, близкий к коэффициенту корреляции.

Таблица 2 – Распознавание стильбена на источнике 280 нм

Число кадров	Сигнал/ шум	Стильбен	Альбумин	РРО	РОРОР	Антрацен	Бумага
32 кадра	11.2	90%	53%	64%	9%	32%	32%
16 кадров	7.1	86%	54%	61%	8%	35%	34%
8 кадров	5.8	82%	55%	64%	10%	35%	35%
4 кадра	5.0	78%	52%	64%	11%	31%	32%
2 кадра	3.7	73%	52%	61%	10%	31%	32%
1 кадр	2.5	61%	47%	59%	12%	27%	29%

Падение уровня корреляции с понижением отношения сигнал/шум характерно для всех исследованных веществ (таблица 2). В условиях низкого уровня полезного сигнала и наличия близких по спектральным свойствам веществ в базе данных это приводит к ограничению возможностей распознавания.

Аналогичные результаты получены при возбуждении лазером 532 нм.

В этом случае распознавание также становится неустойчивым при уровне сигнал/шум ниже 7. При возбуждении лазерной линией, однако, уровни излучения часто оказываются гораздо более высокими, что позволяет вести распознавание практически без накопления

В таблице 3 приведены сравнительные уровни полезного сигнала для различных веществ и возбуждающих излучений. Величины сигналов приводятся в условных единицах; также приведен уровень шумов, соответствующий усреднению 100 изображений. Соотношение интенсивностей при возбуждении различными источниками используется для совместной процедуры распознавания, использующей подсветку одновременно различными источниками.

Таблица 3 – Уровень полезного излучения (среднее по спектру в диапазоне распознавания) в сравнении с уровнем шумов для разных веществ

	280 нм	266 нм	532 нм
Уровень шума при усреднении по 100 кадрам	0,1–0,15	0,3–0,4	10–15*
Триптофан	140	300	225
Альбумин	11,5	22	500
Этанол	35	н/о	52
Вода	4	н/о	7

4 РАСПОЗНАВАНИЕ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Преимущества распознавания с одновременным использованием различных источников подсветки и различных диапазонов спектра определяются следующими основными факторами:

- В различных спектральных диапазонах сходными спектрами обладают различные группы веществ. Этот вывод можно сделать из анализа таблиц, приведенных в предыдущем разделе;
- Интенсивность излучения при подсветке в различных спектральных диапазонах различна для различных веществ. Поскольку в условиях эксперимента отношение интенсивностей подсветки постоянно, отношение интенсивностей излучения является характеристикой вещества.

Задача распознавания для одного спектрального диапазона ставилась следующим образом. Требование найти минимум функционала

$$\Phi(x_1, \dots, x_N) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left[\sum_{k=1}^N x_k \varepsilon_k(\lambda) - \varepsilon(\lambda) \right]^2 d\lambda,$$

где λ_{min} , λ_{max} – используемый для распознавания диапазон длин волн, $\varepsilon(\lambda)$ – зарегистрированный спектр, $\varepsilon_k(\lambda)$ ($k = 1, \dots, N$) – спектры, занесенные в базу данных. Коэффициенты x_k ($k = 1, \dots, N$), определяемые из минимизации функции Φ , имеют смысл отношений $x_k = \frac{c_k}{c_k^0}$, где c_k – концентрации веществ, которые требуется определить, а c_k^0 – концентрации, для которых измерены спектры базы данных $\varepsilon_k(\lambda)$. Для случая двух спектральных диапазонов можно ставить задачу минимизации функционала [3]

$$\begin{aligned} \Phi'(c_1, \dots, c_N) = & \int_{\lambda_{min}^{(1)}}^{\lambda_{max}^{(1)}} \left[\sum_{k=1}^N \frac{c_k}{c_k^{0(1)}} \varepsilon_k^{(1)}(\lambda) - \varepsilon^{(1)}(\lambda) \right]^2 d\lambda + \\ & + \int_{\lambda_{min}^{(2)}}^{\lambda_{max}^{(2)}} \left[\sum_{k=1}^N \frac{c_k}{c_k^{0(2)}} \varepsilon_k^{(2)}(\lambda) - \varepsilon^{(2)}(\lambda) \right]^2 d\lambda. \end{aligned}$$

Верхние индексы в скобках указывают на используемый спектральный диапазон. Заметим, что в этом случае число определяемых концентраций остается тем же, что и в случае одного спектрального диапазона, однако определяются они по двойному набору экспериментальных данных.

Предварительный отбор веществ может производиться так, чтобы присутствовало сходство спектров одновременно в двух диапазонах. На этом же этапе можно осуществить дополнительный отбор по отношению интенсивности излучения в различных спектральных диапазонах. Значения этих отношений (для подсветки с помощью 532 нм и 280 нм источников излучения) приведены в

таблице 4. Для отбора достаточно лишь приблизительно оценить соотношение интенсивностей в экспериментальном спектре. Более точный учет будет автоматически произведен в процессе минимизации функционала Φ' .

Процесс распознавания реализован следующим образом. На первом этапе производится распознавание отдельно по каждому из спектральных диапазонов. На основе полученных результатов отбираются вещества, которые обладают значительным сходством с экспериментом (т.е. классифицированы как найденные) по крайней мере, в одном из диапазонов.

На втором этапе для полученного набора веществ вычисляется функционал Φ' , и окончательное заключение об обнаружении делается на основе его минимизации.

Для реализации процедуры распознавания в различных спектральных диапазонах использовались данные с подсветкой источниками 280 нм и 532 нм. Для распознавания спектров люминесценции использовалась область не выше 500 нм ввиду сильной засветки от линии лазера 532 нм, которая не полностью устраняется notch-фильтром. Спектры люминесценции имеют, как правило, существенно меньшую интенсивность, а потому не влияют на видимый и инфракрасный спектр, наблюдаемые выше 532 нм (фактически линия лазера оказывает влияние до 560 нм).

Число образцов, для которых возможно одновременное распознавание, было ограничено тем, что должны одновременно наблюдаться спектры при различном возбуждении. Для многих веществ, при одновременной подсветке, спектр люминесценции не наблюдался: таковы, например, все эксперименты с использованием телескопа, где виден только спектр от лазерного излучения 532 нм.

Следует отметить, что присутствие мощного излучения лазера 532 нм приводит к появлению артефактов во всем спектральном диапазоне, ввиду чего ультрафиолетовый спектр содержит как случайную, так и регулярную составляющие. Это приводит к тому, что корреляции между спектрами в области 300–500 нм оказываются заметно ниже, нежели при использовании только 280 нм

излучения. Эти артефакты, однако, не влияют на спектр, обладающий гораздо большей интенсивностью полезного сигнала.

В скобках (таблица 4) приведен рассчитанный уровень концентрации (по отношению к сигналу, записанному в базе данных). В данном случае отношение интенсивностей сигналов составило 1:17, и большинство веществ были отсеяны при отборе. Кроме того, для сигнала сравнительно высокого качества (как в данном примере) правильное распознавание достигается и для каждого спектрального диапазона в отдельности. Совместная обработка лишь подтверждает правильность распознавания.

Таблица 4 – Распознавание вещества стилибен (усреднение по 20 кадрам)

	280 нм	532 нм	Суммарно
Стилибен	56.4% (1.448)	98.9% (0.813)	93.0% (1.139)
Альбумин	52.4%	93.0%	—
Вода	54.8%	21.6%	—
РОРОР	52.8%	81.1%	—
РРО	43.1%	90.8%	—
Этанол	51.5%	90.7%	—

В качестве альтернативного метода, устраняющего отмеченное выше влияние излучения 532 нм лазера на ультрафиолетовый спектр, можно предложить попеременное использование подсветки обоими излучателями с последующей совместной обработкой полученных спектров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных данных можно сделать вывод, что использование процедур первичной обработки изображения позволило избавиться от искажений,

вносимых реальной оптической системой, получать адекватные спектры и производить их сравнение со спектрами из базы данных.

Использование метода накопления интерференционных картин, как показали результаты экспериментов, позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум по сравнению со спектром, восстановленным из одиночной интерферограммы.

Предложенный алгоритм обработки интерференционных картин и спектральных данных реализован в виде программного комплекса и применяется при обработке интерферограмм, полученных со СФС.

Предложенный алгоритм распознавания реализован в программном обеспечении и показал работоспособность при распознавании набора тестовых веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Posselt W., Holota K., Tittel H.-O., and Harnisch B. // Vol. 51 of OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 2001), paper FMD10.
2. Sweedler J., Bonner Dentoton M. // Appl. Spec. Vol 43. № 8. 1989. P. 1378-1384.
3. Marcoionni P. // Young forum session on Remote sensing.2002.
4. Barducci A., Pippi I., // Appl. Opt. 2001. Vol. 40. P1464-1477.
5. Бойко А.Ю., Голяк Иг.С., Голяк Ил.С., Дворук С.К, Доровских А.М., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Косенко Д.В., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 2. С. 12-21.
6. Глаголев К.В., Голяк Иг.С., Голяк Ил. С., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. // Опт. и спектр. 2011. Т. 110. № 3. С. 486-492.
7. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы Фурье-спектрометриии. Инт-т энергетических проблем хим. физики РАН. М.: Наука, 2006. 275 с.
8. Васильев В.Н., Гуров И.П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам // СПб.: БХВ, 1998. 240 с.

9. Методы компьютерной обработки изображения / Под ред. Сойфера В.А. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
10. Harvey A.H., Fletcher-Holmes D.W. // Optics Express. 2004. V. 12. № 22 P. 5368-5374.
11. Zhang C., Xiangli B., Zhao B. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2004. V. 6. №8. P. 815-817.
12. Дричко Н.М., Егорова Л.В., Таганов О.К. // Опт. журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 51-56.
13. Ebizuka N., Wakaki M., Kobayashi Y., Sato S. // Appl. Opt. 1995. V. 34. № 34. P. 6035-6040.
14. Padgett M.J., Harvey A.R., Duncan A.J., Sibbett W. // Appl. Opt. 1994. V. 33. № 25. P. 6035-6040.

Processing interferograms from static Fourier transform spectrometer

06, June 2012

DOI: 10.7463/0612.0432616

Golyak I.S., Esakov A.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

gwynbleidd_85@mail.ru

temofeich@inbox.ru

The authors propose an algorithm for processing interferograms obtained with a static Fourier spectrometer. The spectra of secondary radiation of a certain range of substances in the visible and near ultraviolet fields of the spectrum appear when they are excited by different sources of radiation. The authors present and discuss the results of processing of their experiments.

Publications with keywords: [algorithm](#), [interferogram](#), [spectrometer](#)

Publications with words: [algorithm](#), [interferogram](#), [spectrometer](#)

References

1. Posselt W., Holota K., Tittel H.-O., Harnisch B. Compact fourier transform imaging spectrometer for remote sensing. In: *Fourier Transform Spectroscopy*. Vol. 51 of OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 2001), paper FMD10.
2. Sweedler J., Bonner Denton M. Spatially encoded Fourier transform spectroscopy in the ultraviolet to near-infrared. *Appl. Spec.*, 1989, vol. 43, no. 8, pp. 1378-1384.
3. Marcoionni P. Early results from an imaging interferometer prototype operating in the sagnac configuration. Proc. of Young forum session on Remote sensing, 2002.
4. Barducci A., Pippi I. Analysis and Rejection of Systematic Disturbances in Hyperspectral Remotely Sensed Images of the Earth. *Applied Optics*, 2001, vol. 40, no. 9, pp. 1464-1477.
5. Boiko A.Iu., Goliak I.S., Goliak I.S., Dvoruk S.K., Dorovskikh A.M., Esakov A.A., Kornienko V.N., Kosenko D.V., Kochikov I.V., Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E. Sticheskie Fur'e-spektrometr vidimogo diapazona [Static Fourier transform spectrometer of the visible range]. *Izvestiia RAN. Energetika*, 2010, no. 2, pp. 12-21.
6. Glagolev K.V., Goliak I.S., Goliak I.S., Esakov A.A., Kornienko V.N., Kochikov I.V., Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E. Metodika polucheniia i obrabotki spektral'noi informatsii s pomoshch'iu statisticheskogo fur'e-spektrometra [Technique for obtaining and processing spectral information with static fourier spectrometer]. *Optika i spektroskopiia*, 2011, vol. 110, no. 3, pp. 486-492.

7. Morozov A.N., Svetlichnyi S.I. *Osnovy Fur'e-spektroradiometrii* [Fundamentals of Fourier spectroradiometry]. Moscow, Nauka, 2006. 275 p.
8. Vasil'ev V.N., Gurov I.P. *Komp'iuternaia obrabotka signalov v prilozhenii k interferometricheskim sistemam* [Computer processing of signals in the annex to the interferometric systems]. St. Petersburg, BKhV, 1998. 240 p.
9. Soifer V.A., Ed. *Metody komp'iuternoii obrabotki izobrazheniia* [Methods of computer processing of images]. Moscow, Fizmatlit, 2003. 784 p.
10. Harvey A.H., Fletcher-Holmes D.W. Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer. *Optics Express*, 2004, vol. 12, no. 22, pp. 5368-5374.
11. Zhang C., Xiangli B., Zhao B. Permissible deviations of the polarization orientation in the polarization imaging spectrometer. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2004, vol. 6, no. 8, pp. 815-817. [doi:10.1088/1464-4258/6/8/013](https://doi.org/10.1088/1464-4258/6/8/013)
12. Drichko N.M., Egorova L.V., Taganov O.K. Malogabaritnyi staticheskii fur'e-spektrometr poliarizatsionnogo tipa [Small-size static Fourier-spectrometer of polarization type]. *Opticheskii zhurnal*, 2006, vol. 73, no. 12, pp. 51-56.
13. Ebizuka N., Wakaki M., Kobayashi Y., Sato S. Development of a multichannel Fourier transform spectrometer. *Appl. Opt.*, 1995, vol. 34, no. 34, pp. 7899-7906.
14. Padgett M.J., Harvey A.R., Duncan A.J., Sibbett W. Single-pulse, Fourier-transform spectrometer having no moving parts. *Appl. Opt.*, 1994, vol. 33, no. 25, pp. 6035-6040.