Радиооптика
Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана
http://radiooptics.ru

*Ссылка на статью:*
// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 04. С. 1–13.

DOI: **10.7463/rdopt.0416.0847752**

Представлена в редакцию: 16.06.2016
Исправлена: 30.06.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

**УДК 681.785.574**

# Система регистрации и суммирования слабых сигналов в фурье-спектрометре

**Морозов А. Н.**[1,2,*], **Балашов А. А.**[2], **Вагин В. А.**[2], **Хорохорин А. И.**[2], **Голяк И. С.**[1]

[*]amor59@mail.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва. Россия

В работе приведена система регистрации и суммирования слабых сигналов в динамическом фурье-спектрометре непрерывного сканирования. Описываются основные алгоритмы накопления сигнала на основе когерентного суммирования и с привязкой к нулевой оптической разности хода. Для накопления и суммирования слабого сигнала в динамическом фурье-спектрометре предлагается использовать привязку к нулевой оптической разности хода канала белого света, который совмещен с основным каналом. Такое построение системы привязки позволит уменьшить габариты всей системы и обеспечить большую стабильность к тепловым и вибрационным воздействиям. Предложена и описана схема формирователя метки для привязки к нулевой оптической разности хода и описывается его алгоритм работы. Для подтверждения правильности работы с использованием данной системы были проведены эксперименты по регистрации и накоплению слабого сигнала комбинационного рассеяния света тестового вещества 1,4-бис (5-фенил-2-оксазолил) бензола (POPOP, C24H16N2O2). Для возбуждения КР использовался лазер с длиной волны λ = 785 нм. По полученным интерферограммам слабого сигнала комбинационного рассеяния POPOP, с помощью разработанного программного обеспечения, были восстановлены спектры излучения.

**Ключевые слова**: фурье-спектрометр, интерферометр, линейный привод, интерферограмма, уголковый отражатель, система суммирования, слабый сигнал, комбинационное рассеяние

## Введение

С развитием промышленного комплекса все чаще встает задача контроля и анализа на объектах повышенной опасности, современных производствах. Для этих задач необходимо проводить непрерывный дистанционный мониторинг с целью предотвращения загрязнений или утечек. При этом точность анализа должна быть достаточно большой. Для этих целей могут использоваться динамические фурье-спектрометры, обладающие боль-

шой светосилой и высоким спектральным разрешением [1, 2]. При дистанционной регистрации сигнал может оказаться слабым и сильно зашумленным. Поэтому появляется необходимость осуществлять процедуру накопления и суммирования регистрируемого сигнала с целью увеличения отношения сигнал/шум.

В фурье-спектрометре непрерывного сканирования возможны два основных алгоритма суммирования интерферограмм с целью повышения отношения сигнал/шум в измеряемых спектрах - когерентное суммирование и суммирование с помощью канала «белого света».

Когерентное суммирование используется в спектрометрах, регистрирующих относительно сильные сигналы [3, 4], когда амплитуда сигнала при нулевой разности ход (НРХ) интерферограммы во много раз больше уровня шума. В этом случае не нужен канал «белого света» (со всей дополнительной оптико-механикой и электроникой). Но в случае очень слабых сигналов, когда максимум интерферограммы сравним с уровнем шума (или совсем немного превосходит его) без канала «белого света» не обойтись, т.к. когерентное суммирование может привести к очень большим ошибкам.

Задача канала «белого света» – привязать точки регистрации исследуемой интерферограммы к абсолютной шкале оптической разности хода, которая не должна сдвигаться от скана к скану. Обычно это делается с помощью вспомогательного интерферометра в котором подвижное зеркало совмещено с подвижным зеркалом основного интерферометра [5]. Тем самым зеркала перемещаются одновременно и прохождение НРХ во вспомогательном интерферометре совпадает с одним и тем же значением оптической разности хода в основном интерферометре. Такое решение имеет свои недостатки. Так, например, с изменением температуры, при воздействии вибраций или других факторов, могут меняться геометрические размеры интерферометров, что приведет к смещению НРХ во вспомогательном интерферометре относительно оптической разности хода в основном интерферометре. Этот недостаток можно минимизировать, если канал «белого» света организовать непосредственно в основном интерферометре [6].

В известных вариантах фурье-спектрометров с каналом «белого света» прохождение сигнала, вырабатываемого при НРХ в этом канале, запускало процесс регистрации интерферограммы, привязывая его начало к одной и той же стартовой точке оптической разности хода в основном канале. В этом случае НРХ канала «белого света» должна быть сдвинута оптическими методами относительно НРХ основного канала, так чтобы мы могли зарегистрировать двухстороннюю интерферограмму. Т.е. даже в случае использования одного общего интерферометра в канал «белого света» вводились дополнительные элементы, смещающие в нем НРХ. Их появление может также приводить к смещению НРХ в канале «белого света» относительно основного канала, хоть и в меньшей степени, чем в рассмотренном выше случае использования дополнительного вспомогательного интерферометра.

Нами предложен другой механизм использования канала «белого света», в котором положения НРХ обоих каналов совпадают. Это самое удобное построение оптико-

механической части прибора, т.к. не требует каких-то дополнительных элементов, приводящих к дополнительным ошибкам при суммировании интерферограмм.

В этом случае НРХ «белого света» формирует метку на шкале оптической разности хода в интерферограмме основного канала. Далее, с использованием этой метки, осуществляется суммирование интерферограмм, сдвигая их шкалы по оптической разности хода так, чтобы «помеченные» точки интерферограмм совпадали по шкалам и соответственно суммировались.

Для того, чтобы обеспечить такой механизм суммирования был разработан формирователь метки «белого света», предназначенный для привязки максимума интерферограммы основного канала к положению максимума в интерферограмме канала «белого света».

## Схема формирователя метки

На рис.1 приведена разработанная схема формирователя метки. Оптический сигнал канала «белого света» преобразуется в электрический сигнал микросхемой А1, представляющей собой активный фотодиод с полосой спектральной чувствительности от 0,3 до 1,1 нм.

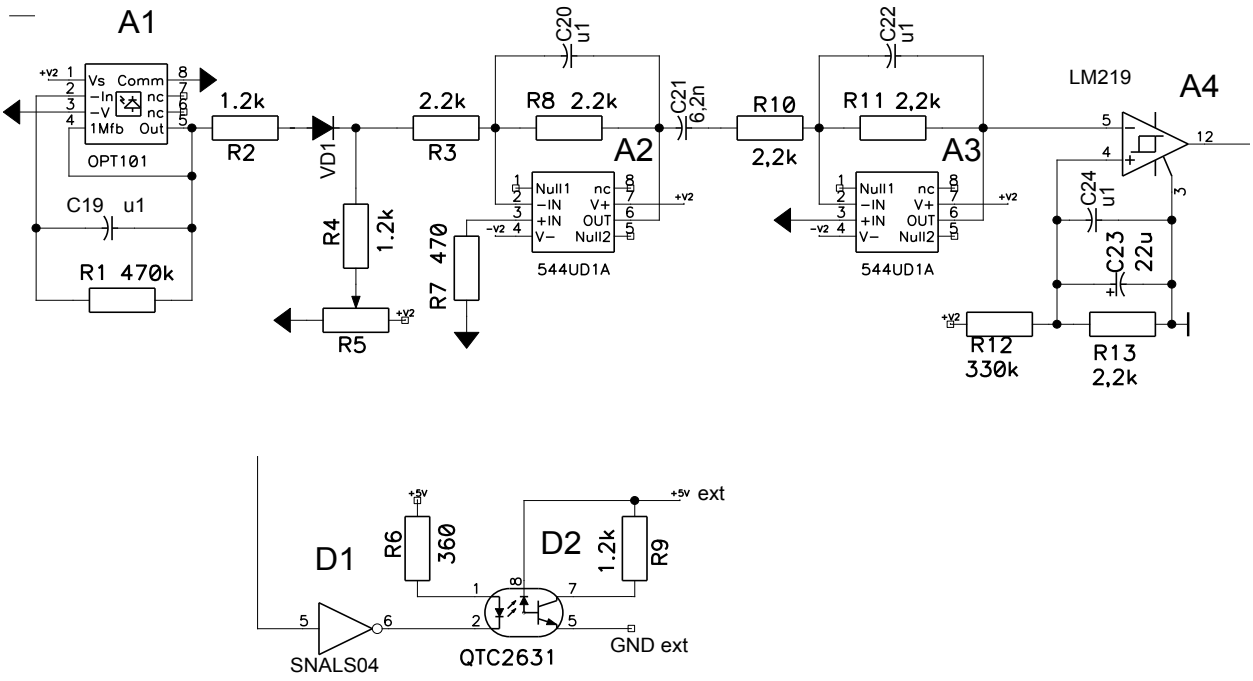


**Рис. 1** Схема формирователя метки

Для излучателя типа галогенная лампа (G4 Accent) получаемая интерферограмма не имеет ярко выраженного максимума. С целью выделения максимума, сигнал интерферограммы детектируется выпрямителем наVD1 с подстройкой уровня среза так, чтобы на выход детектора по амплитуде прошли только три пика положительной полярности в области максимума. С целью улучшения отношения сигнал/шум эти три пика проходят

дифференцирование цепью C21,R10 с постоянной времени, обратной частоте сканирования (12 кГц). При дифференцировании получаем переходы значения сигнала через ноль, когда скорость нарастания сигнала максимальна и влияние шума слабее. Метки перехода через ноль выделяются компаратором A4 и через гальваническую развязку на оптроне D2 поступают на модуль предварительной обработки (на рисунке не показан), где посредством программного счётчика выделяется единственный пик-метка Код метки (0x00/0xAA) входит в состав каждого четырёх-байтного слова отсчёта интерферограммы основного канала, поступающего в PC. При регистрации интерферограммы биты метки рафинируются и заполняют массив, единственный индекс которого будет соответствовать значению метки 0xAA. Этот индекс и будет формальным положением максимума интерферограммы основного канала.

## Экспериментальная проверка работы макета

Проверка работы предложенной системы была проведена на макете динамического фурье-спектрометра (рис. 2), настроенного на работу в ближнем ИК диапазоне 800 – 1100нм. Спектрометр был разработан и изготовлен НТЦ УП РАН. Спектральное разрешение спектрометра составляет 1 $см^{-1}$. В качестве отражателей в плечах интерферометра вместо плоских зеркал используются уголковые отражатели (триэдры). Подобная конструкция позволяет снизить требования к стабильности их пространственного положения, поскольку падающие и отраженные лучи от такого уголкового отражателя строго параллельны друг другу [7]. Для измерения абсолютного значения оптической разности хода между отражателями и управления скоростью движения подвижного отражателя используется референтный канал с монохроматическим источником излучения – He-Ne лазером.

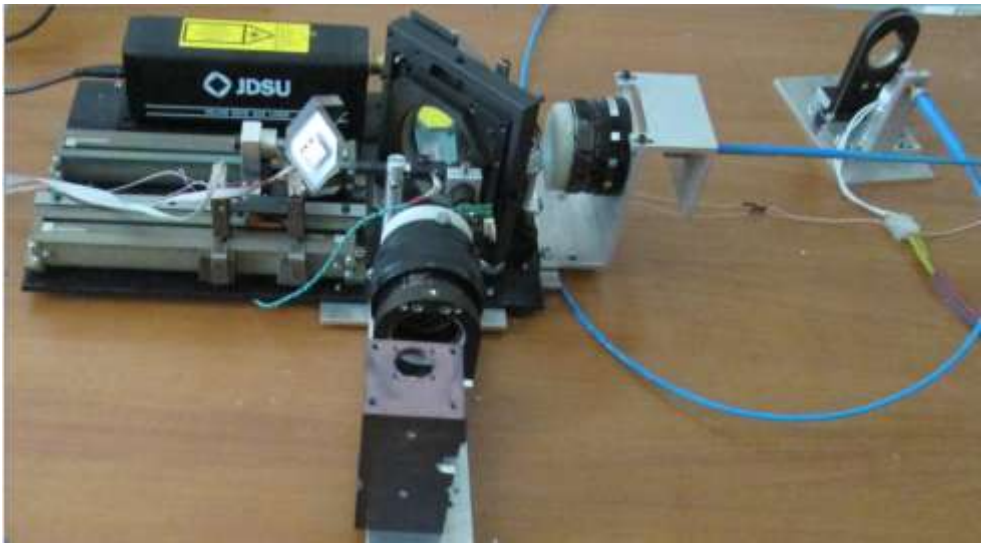


**Рис. 2** Макет фурье-спектрометра ближнего ИК диапазона

В качестве источника слабого излучения регистрировалось излучение комбинационного рассеяния РОРОР при возбуждении лазером с длиной волны $\lambda$ = 785 нм [8, 9]. Так

как положение максимума излучения лазера сильно зависит от температуры, что может приводить к потере спектрального разрешения и воспроизводимости результатов при колебаниях основной частоты лазера, то используется необходимая система стабилизации. Излучение от лазера фокусируется с помощью оптоволоконного зонда на исследуемом образце. Большая часть рассеянного образцом излучения будет иметь ту же частоту, что и падающая (Рэлеевское рассеяние) [8]. Для ослабления Релеевского излучения в конструкции оптоволоконного зонда используется НОТЧ фильтр. Он позволяет ослабить это излучение почти на шесть порядков. Так же в конструкции оптоволоконного зонда установлен ИК фильтр, который пропускает излучение лишь в рабочем диапазоне спектрометра 800-1100 нм, подавляя таким образом солнечную засветку. Излучение от образца с помощью оптоволоконного зонда подается на вход спектрометра, где модулируется при изменении оптической разности хода в интерферометре. Полученные результаты измерения, представляющие собой односторонние интерферограммы, попадают на компьютер. Преимущество регистрации односторонней интерферограммы в отличие от двусторонней состоит в том, что для регистрации интерферограмм требуется меньше времени и вдвое меньшее перемещение подвижного зеркала. При этом могут возникать фазовые ошибки, связанные с неточностью определения нулевой оптической разности хода [10, 11]. Поэтому для получаемых интерференционных картин необходима процедура фазовой коррекции. Учитывая, что в схеме используется привязка по референтному каналу сложностей с восстановлением фазы не возникло.

Регистрируемая в одном скане интерферограмма приведена на рис. 3.

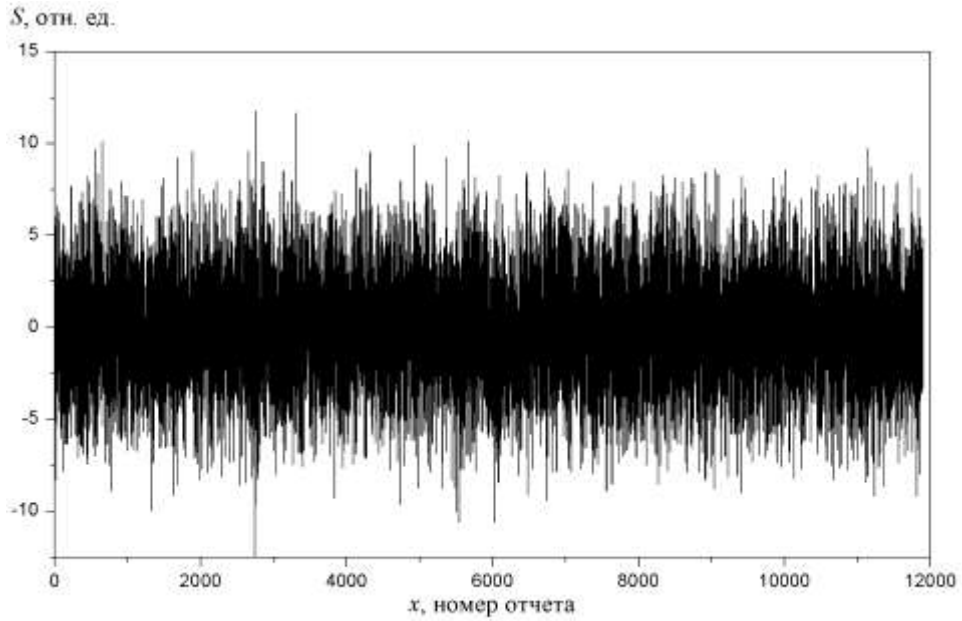


**Рис. 3** Интерферограмма излучения КР РОРОР при однократной записи

По оси ординат отложена интенсивность в относительных единицах, по оси абсцисс номер отчета. Отношение сигнал/шум в ней мало и не позволяет использовать когерентное суммирование для накопления сигнала. Интерферограмму измеряемого излучения комбинационного рассеяния РОРОР в белом шуме и наводках практически не видно.

Суммирование таких интерферограмм производилось по рассмотренной выше схеме с привязкой к нулевой оптической разности хода референтного канала. На рис. 4 приведена просуммированная по 500 кадрам интерферограмма комбинационного рассеяния POPOP, зарегистрированная на динамическом фурье-спектрометре при возбуждении лазером с длинной волны λ=785 нм.

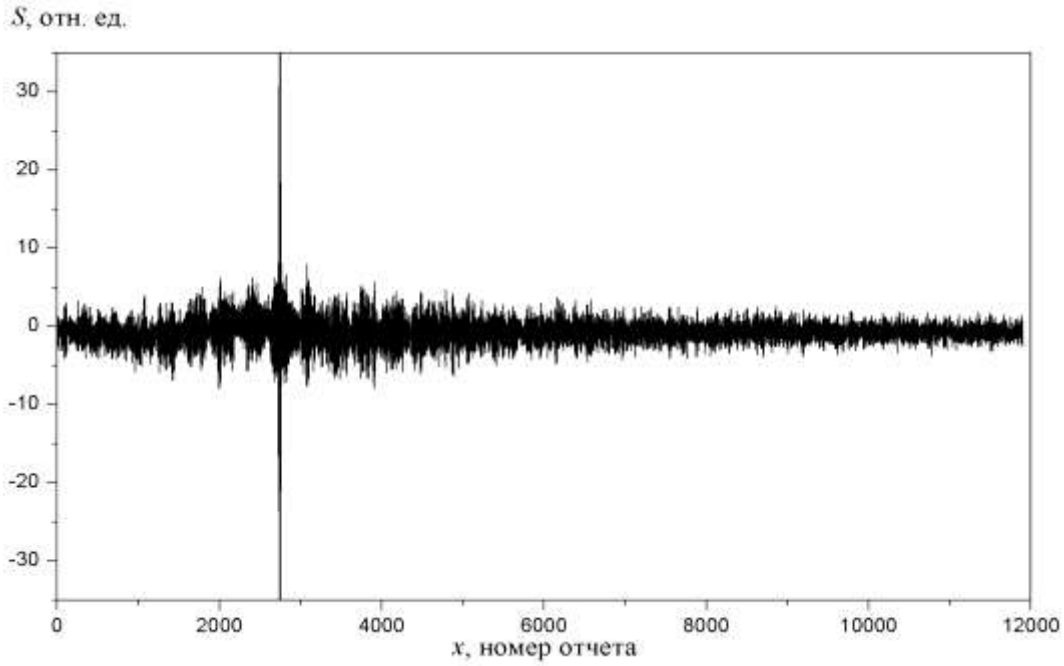


**Рис. 4** Интерферограмма КР POPOP просуммированная по 500 кадрам

Для большей наглядности на рис. 5 построена центральная часть полученной интерферограммы, на ней хорошо видны биения соответствующие сигналу КР POPOP.

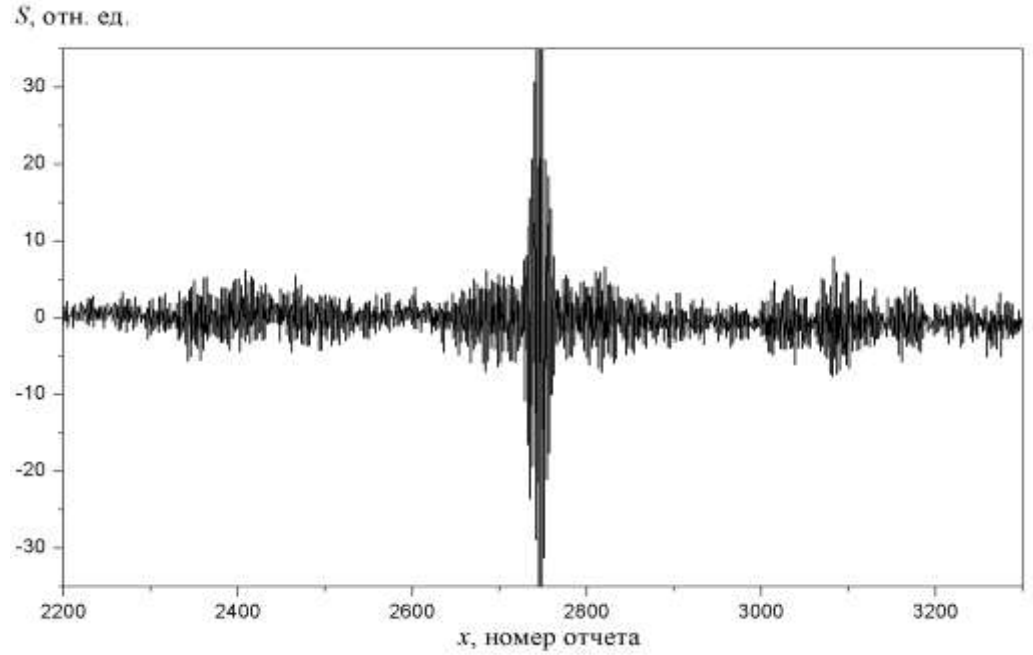


**Рис. 5** Центральная часть интерферограммы КР POPOP просуммированная по 500 кадрам

По полученной интерференционной картине КР РОРОР был восстановлен спектр излучения вещества с учетом восстановления фазы. Данный результат представлен на рис. 6.

Интенсивность отложена в относительных единицах, ось абсцисс представлена в $см^{-1}$ с учетом рамановского сдвига. Сравнивая полученный спектр КР РОРОР с эталонным, полученным на дифракционном спектрометре (рис. 7), можно видеть линии, которые соответствуют комбинационному рассеянию вещества и находятся на следующих частотах ν: 1610 $см^{-1}$, 1510 $см^{-1}$, 1490 $см^{-1}$, 1140 $см^{-1}$ и 1060 $см^{-1}$.

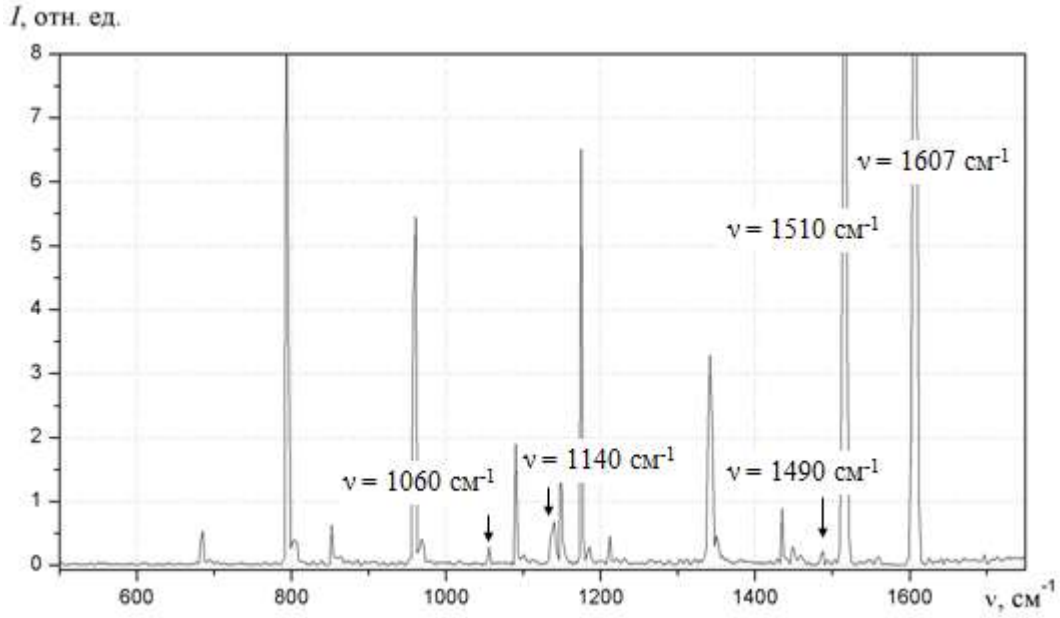


**Рис. 6** Восстановленный спектр комбинационного рассеяния РОРОР, полученный на динамическом фурье-спектрометре

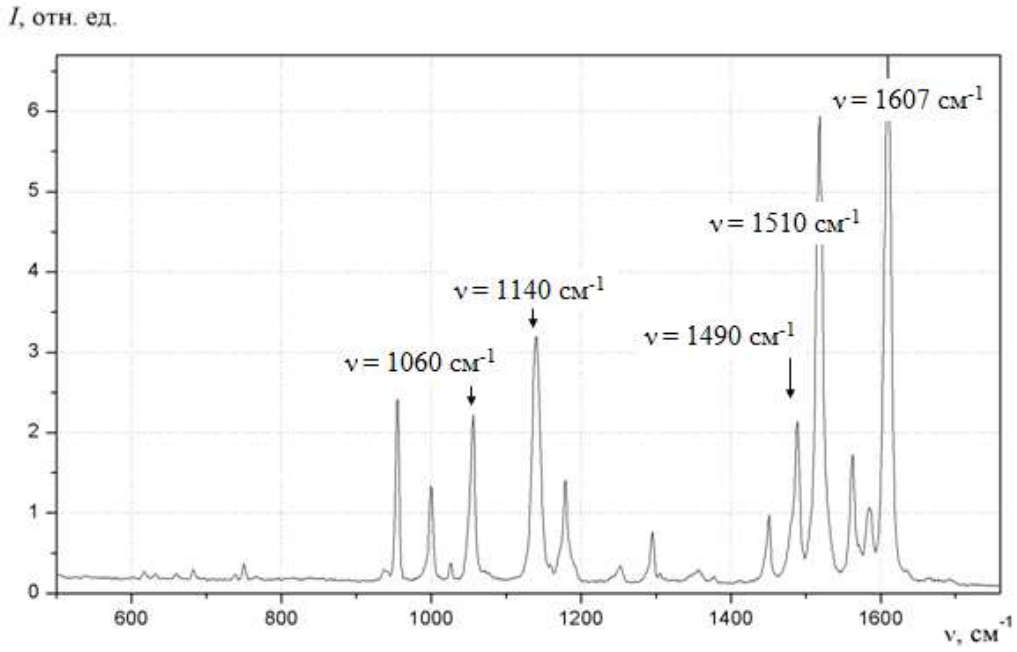


**Рис. 7** Эталонный спектр комбинационного рассеяния РОРОР

Помимо линий, относящихся к самому веществу (рис. 6), наблюдаются паразитные линии, источник появления которых был установлен в ходе экспериментов. Причина их появления связана с попаданием части излучении Ne от источника излучения референтного канала в основной. На рис. 8 представлен фоновый спектр, полученный при перекрытой входной апертуре основного канала.

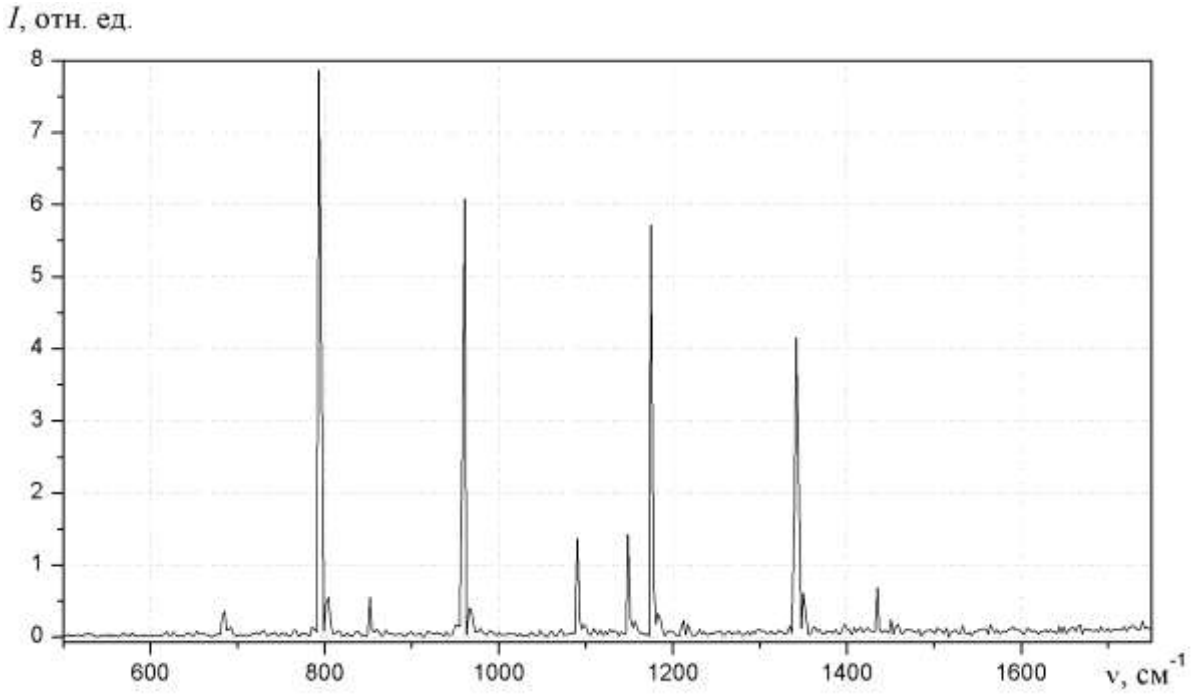


**Рис.8** Фоновый спектр, зарегистрированный на динамическом фурье-спектрометре

При наложении спектра шума на спектр вещества отчетливо прослеживаются линии КР исследуемого вещества. Наложенные друг на друга спектр шума и спектр КР РОРОР представлен на рис. 9. Для большей наглядности на рисунках выделена информативная часть, где присутствует сигнал, относящийся к КР РОРОР. Наличие дополнительных линий, которые не относятся к спектру самого вещества, может заметно ухудшить проводимый анализ и идентификацию веществ. Это объясняется тем, что "паразитные" линии могут перекрывать линии КР самого вещества или их интенсивность может оказаться значительно больше, что полностью "закроет" спектр КР. Для решения данной проблемы в дальнейшем предполагается установить на выходе излучения из лазера референтного канала полосовой фильтр. Он позволит пропустить только излучение лазерной линии, а интенсивность паразитных линий уменьшить более чем на 6 порядков.

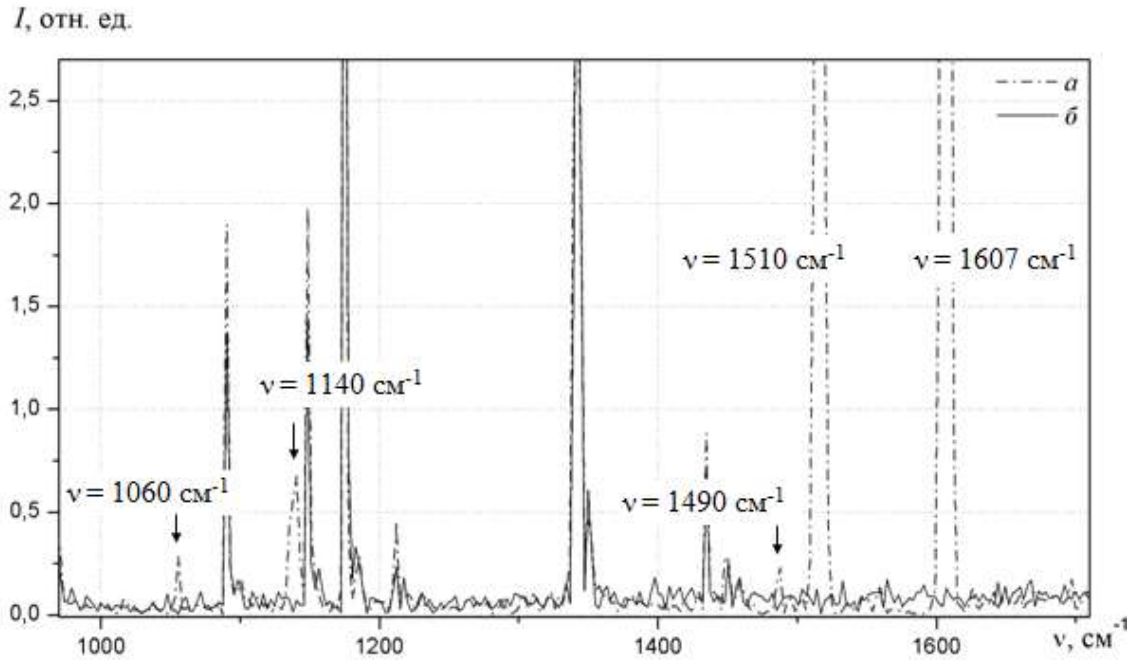


**Рис. 9** Спектр комбинационного рассеяния РОРОР (*а*) с наложенным на него спектром паразитного излучения (*б*)

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной системы суммирования интерферограмм. При меньшем числе накопленных кадров в спектре КР РОРОР (рис.10б, 11б) наблюдаются только две основные линии на частотах 1610 и 1510 $см^{-1}$.

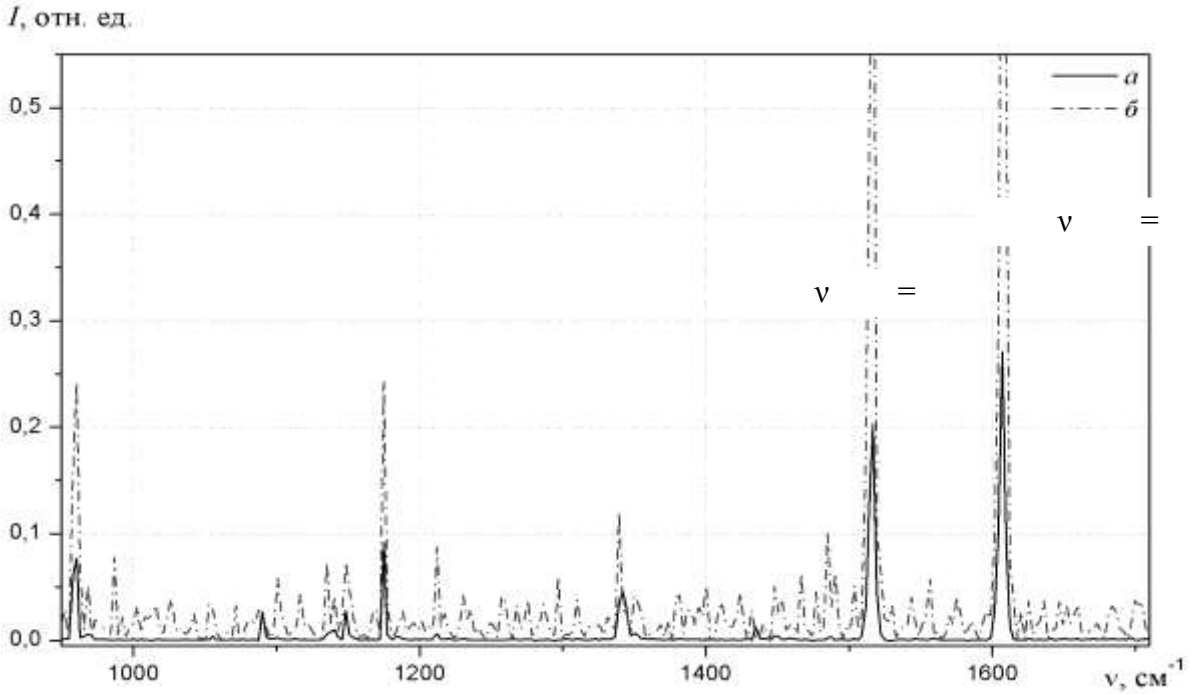


**Рис. 10** Спектр излучения РОРОР полученный при усреднении по 500 кадрам (*а*) и при усреднении по 5 кадрам (*б*)

Их положение совпадает с линиями в восстановленном спектре по 500 интерферограммам (рис. 10а, 11а). Паразитные линии при накоплении по небольшому числу интерферограмм также сохраняются.

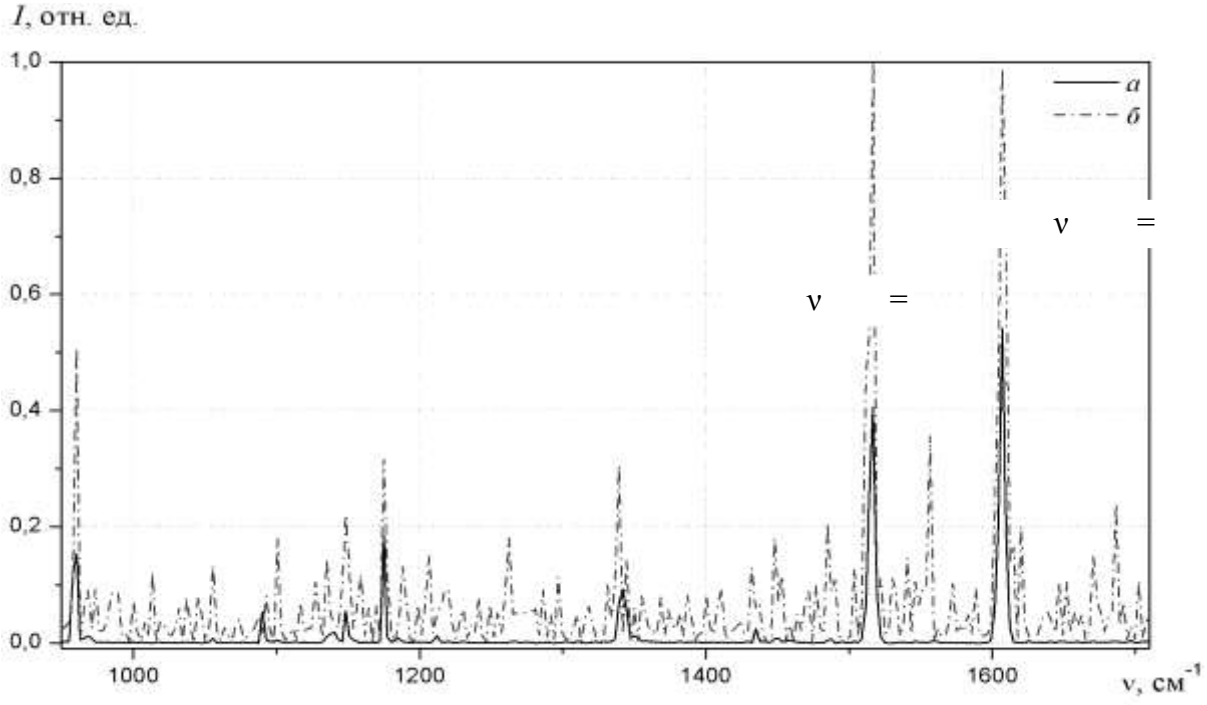


**Рис. 11** Спектр излучения РОРОР полученный при усреднении по 500 кадрам (*а*) и при усреднении по 2 кадрам (*б*)

## Заключение

Полученные результаты по регистрации слабых сигналов КР подтверждают эффективность предложенной системы суммирования интерферограмм.

Можно видеть, что зарегистрированные спектры комбинационного рассеяния света РОРОР, полученные на динамическом фурье-спектрометре, совпадают с эталонными спектрами. Это подтверждает возможность использования настроенного динамического фурье-спектрометра для регистрации и накопления слабых сигналов комбинационного рассеяния в диапазоне длин волн 800-1100 нм.

Проведены эксперименты по регистрации и восстановлению спектров КР тестовых веществ: РОРОР и их сравнительный анализ с эталонами. На основе данного анализа показана возможность использования динамического спектрометра для определения вещества по его спектру, что является в настоящее время одной из актуальных задач. Было установлено, что в основной канал попадает паразитное излучение референтного канала. Для решения данной проблемы в дальнейшем предполагается ввести в основной канал полосовой фильтр и провести повторный эксперимент по регистрации спектров КР большего числа веществ. Так же предполагается использование фазовой коррекции для восстановления спектров

Настоящая работа выполнена в рамках госбюджетной работы 40.6 (Программы ФНИ государственных академий наук) «Неразъюстируемый Фурье-спектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона».

## Список литературы

1. Белл Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975. 380 с. [Bell R.J. Introductory Fourier transform spectroscopy. N.Y.: Academic Press, 1972].
2. Вагин В.А. ИК Фурье-спектроскопия для научных исследований и прикладных применений: дис. …доктора техн. наук. М., 2009. 239 с.
3. Балашов А.А., Вагин В.А., Висковатых А.В., Жижин Г.Н., Пустовойт В.И., Хорохорин А.И. Аналитический Фурье-спектрометр АФ-1 широкого применения // Приборы и техника эксперимента. 2003. Т.46. № 2. С. 87–89.
4. Балашов А.А., Вагин В.А., Хорохорин А.И., Крадецкий В.В., Морозов А.Н., Фуфурин И.Л., Шилов М.А. Фурье-спектрорадиометр ФСР-03 // Приборы и техника эксперимента. 2013. №3. С. 142–143. DOI: 10.7868/S0032816213020171
5. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы Фурье-спектрорадиометрии. 2-е изд. М.: Наука, 2014. 456 с.
6. Balashov A.A., Vagin V.A., Zhizhin G.N., Chelnokov A.I. Fast-scanning Fourier-spectroradiometer BFS-01 // 7th Int. conf. on Fourier transform spectroscopy, june 19-23 1989. Bellingham: Society of photo-optical instrumentation engineers, 1989. P. 395–396.
7. Griffiths P.R., De Haseth J.A. Fourier transform infrared spectrometry. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007. 529 p.
8. Vandenabeele P. Practical Raman spectroscopy: An introduction. Chichester: Wiley, 2013. 161 p.
9. Ferraro J.R., Nakamoto K., Brown C.W. Introductory Raman Spectroscopy. 2nd ed. Amst.; Boston: Academic Press, 2003. 434 p.
10. Mertz L. Correction of phase errors in interferograms // Applied Optics. 1963. Vol. 2. № 12. P. 1332–1332. DOI: 10.1364/AO.2.001332
11. Porter C.D., Tanner D.B. Correction of phase errors in Fourier spectroscopy // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1983. Vol. 4. № 2. P. 273–298. DOI: 10.1007/BF01008607

Radiooptics
Electronic journal of the Bauman MSTU
http://radiooptics.ru

*Radiooptics of the Bauman MSTU*, 2016, no. 04, pp. 1–13.

DOI: **10.7463/rdopt.0416.0847752**

Received: 16.06.2016
Revised: 30.06.2016

© Bauman Moscow State Technical Unversity

# The Recording and Summing System of Weak Signals in the Fourier Spectrometer

**A.N. Morozov[1,2,*], A.A. Balashov[2], V.A. Vagin[2], A.I. Khorokhorin[2], I.S. Golyak[1]**

*amor59@mail.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[2]The «Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation» of the RAS, Moscow, Russia

**Keywords:** fourier spectrometer, interferometer, linear drive, interferogram, corner reflector, summing system, weak signal, Raman scattering

One of the problems in remote monitoring and analysis is to record and analyze accumulation and summation of weak signals, which have intensity at the noise level. Therefore, it becomes necessary to correct accumulation and summation of signal to pull it at the background of noise.

In the existing schemes of Fourier spectrometers, which use a "white light" channel, a recording process of the interferogram in the main channel starts at zero optical path difference (ZPD) of the "white light" channel, and thus binding to the same absolute scale of the optical path difference. With this construction scheme, there should be a shift of the ZPD of the "white light" channel with respect to the ZPD of the main channel, using the optical methods, so that we can record a double-sided interferogram. The additional optical elements can lead to the shift of ZPD in the "white light" channel with respect to the main channel. To solve the given problem we suggest a mechanism of using the "white light" channel, in which the ZPD positions of both channels match. In this case, the ZPD of the "white light" forms a mark on the optical path difference scale in the interferogram of the main channel. Further, using this label, the recorded interferograms are shifted and linked to the absolute scale of the optical path difference, after which they are summed-up. To implement this summing mechanism was developed driver of "white light" label, which allows us to bind a maximum position in the interferogram of the main channel with the maximum in the interferogram of the "white light" channel. Such construction of the binding system allows us to reduce the size of the entire system and provide more stability to thermal and vibration shocks.

The described system of a label driver has found a successful implemented in the layout of the continuous scanning dynamic Fourier spectrometer operating in the Near Infrared spectral range from 800 nm to 1100 nm. The experimental research in recording and accumulating weak Raman signals when exciting by the laser source of 785 nm wavelength used the proposed

system. Further comparison of the recovered Raman spectra with reference spectra proved that the proposed interferogram summation system is efficient.

## References


1. Bell R.J. *Vvedenie v Furie-spektroskopiyu* [Introductory Fourier transform spectroscopy]. Moscow: Mir, 1975. 380 p.
2. Vagin V.A. *IK Furie-spektroskopiia dlia nauchnykh issledovanij i prikladnykh primeninij* [Infrared Fourier spectroscopy for scientific research and applications. Doct. diss.]. Moscow, 2009. 239 p.
3. Balashov A.A., Vagin V.A., Viskovatykh A.V., Zhizhin G.N., Pustovoit V.I., Khorokhorin A.I. An AF-1 analytical Fourier-transform spectrometer for a wide field of applications. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2003, vol. 46, no. 2, pp. 87-89 (In Russian).
4. Balashov A.A., Vagin V.A., Khorokhorin A.I., Kradetskij V.V., Morozov A.N., Fufurin I.L.. Shilov M.A. The Fourier-transform spectroradiometer FSR-03. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2013, no. 3, pp. 142-143 (In Russian). DOI: 10.7868/S0032816213020171
5. Morozov A.N., Svetlichnuj S.I. *Osnovy Furie-spektroradiometrii* [Foundations of Fourier-spectroradiometry]. 2nd ed. Moscow: Nauka Publ., 456 p.
6. Balashov A.A., Vagin V.A., Zhizhin G.N., Chelnokov A.I. Furie-spektroradiometr bystrogo skanirovaniia BFS-01 [Fast-scanning Fourier-spectroradiometer BFS-1]. *7 Mezhdunarodnaia konferetsiia po Furie-spektroskopii* [7th International conference on Fourier transform spectroscopy]. Bellingham: Society of photo-optical instrumentation engineers, 1989. P. 395–396.
7. Griffiths P.R., De Haseth J.A. *Fourier transform infrared spectrometry*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007. 529 p.
8. Vandenabeele P. *Practical Raman spectroscopy: An introduction*. Chichester: Wiley, 2013. 161 p.
9. Ferraro J.R., Nakamoto K., Brown C.W. *Introductory Raman Spectroscopy*. 2nd ed. Amst.; Boston: Academic Press, 2003. 434 p.
10. Mertz L. Correction of phase errors in interferograms // *Applied Optics*. 1963. Vol. 2. № 12. P. 1332–1332. DOI: 10.1364/AO.2.001332
11. Porter C.D., Tanner D.B. Correction of phase errors in Fourier spectroscopy // *Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves*. 1983. Vol. 4. № 2. P. 273–298. DOI: 10.1007/BF01008607