

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 535.853.4

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ ОБЩЕГО  
НАЗНАЧЕНИЯ: УСТРОЙСТВО, ИССЛЕДОВАНИЕ

© 2012 г. В. В. Архипов

Поступила в редакцию 15.07.2011 г.  
После доработки 14.11.2011 г.

Представлены основные параметры фурье-спектрометров ФТ-02, ФТ-10. Описано устройство основного узла фурье-спектрометров – динамического интерферометра, у которого оптические каналы соосны, а подвижный светоделитель перемещается с помощью электродинамического привода посредством параллелограммного механизма. Проведено исследование работы электродинамического привода светоделителя. При обработке результатов измерений использована методика когерентного суммирования интерферограмм.

ВВЕДЕНИЕ

Фурье-спектрометры ФТ-02 и ФТ-10 отечественной фирмы LUMEX предназначены для качественного и количественного спектрального анализа различных веществ в пределах технических параметров, основные из которых приведены в таблице [1].

ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА  
ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

На рис. 1 представлена блок-схема фурье-спектрометра, а на рис. 2 – оптическая схема их основного узла – интерферометра [2]. Интерферометр состоит из двух одинаковых соосных сферических зеркал  $M_1$ ,  $M_2$  и размещенного между ними светоделителя  $СД$ .

Перемещение светоделителя на расстояние  $\pm\Delta$  относительно исходного положения приводит к изменению оптической разности хода на  $\pm 4\Delta$ . Ось входного излучения располагается под таким углом  $\gamma$  к оси зеркал, который позволяет использовать краевую часть одного из зеркал для коллимации, а другого – для собирания выходного излуче-

ния на фотоприемнике. Фокус входного излучения смещен относительно оси зеркальной системы на небольшую величину  $\delta \ll R$  ( $R$  – радиус зеркал), чтобы отраженные после разделения светоделителем лучи не вышли до интерференции. Зеркала и светоделитель имеют отверстия для прохождения лучей.

Входное излучение с углом расходимости  $\Delta\gamma$  от источника  $I$  после коллимации зеркалом  $M_2$  попадает на светоделитель  $СД$ , которым делится на два когерентных луча  $A$  и  $B$ . Далее каждый луч претерпевает три отражения от зеркал, аналогичные трем отражениям в ретрорефлекторе типа “кошачий глаз”, основное назначение которого поворачивать падающий луч на  $180^\circ$  с точностью несколько угловых секунд при углах зрения вплоть до  $10^\circ$  [3]. Для данного интерферометра рассчитано, что при  $\delta = (0.01–0.02)R$  углы падения лучей  $A$  и  $B$  на зеркала не превышают  $1–2^\circ$ . В этом случае лучи  $A'$  и  $B'$ , интерферирующие на светоделителе, параллельны лучам  $A$  и  $B$  с точностью  $1''–2''$ , а угол между ними не превышает долей угловой секунды. Расчет интерферограммы (глубина модуляции  $m \geq 0.9$ ) с учетом виньетиро-

Характеристики	Фурье-спектрометр	
	ФТ-02	ФТ-10
Спектральный диапазон, $\text{см}^{-1}$	4500–550	4000–5000
Спектральное разрешение, $\text{см}^{-1}$	1.25	1.0
Волновая точность, $\text{см}^{-1}$	0.05	0.01
Фотометрическая точность, %	0.1	0.1
Время измерения, с	60	30–60
Источник излучения	керамический	галогенная лампа
Фотоприемник	пирозлектрический	фотодиод

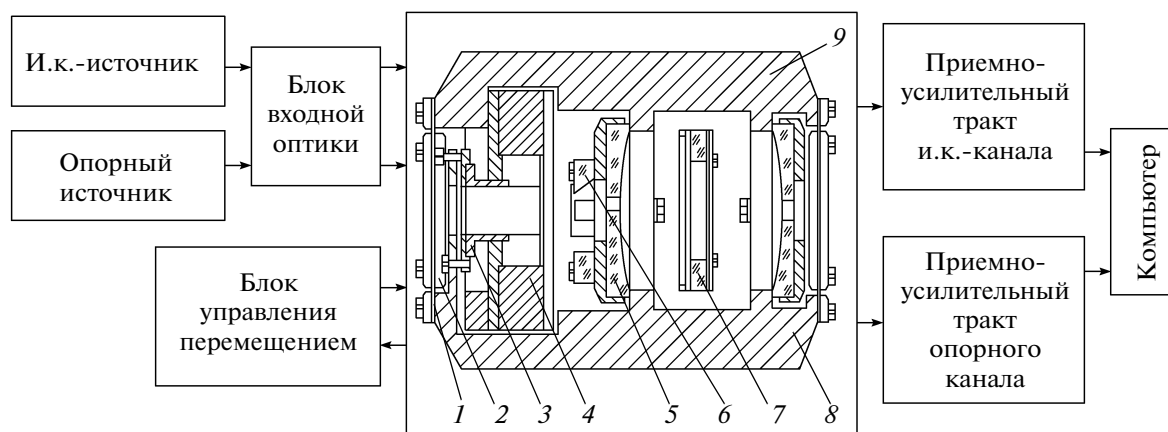


Рис. 1. Блок-схема фурье-спектрометров. 1 – пружина; 2 – прижим; 3 – катушка; 4 – магнит; 5 – сферическое зеркало; 6 – поворотное плоское зеркало; 7 – светоделитель; 8 – нижняя подвижная платформа; 9 – верхняя неподвижная платформа.

вания при перемещении светоделителя на величину  $F/10$  ( $F$  – фокусное расстояние зеркал) показал, что при небольших углах расходимости входного излучения ( $\Delta\gamma \leq 1:10$ ) в точечном источнике (диаметр  $d \ll F$ ) и  $\lambda = 1$  мкм допустимы угловые разъюстировки зеркал и светоделителя до  $20'$  и линейные продольные разъюстировки зеркал до 1 мм. Такие большие допуски позволили изготовить интерферометр без единой юстировки, а сборку параллелограммного механизма выполнить не очень тщательно (наклон светоделителя при перемещении на величину  $F/10$  составил  $4'$ ).

Расчет оптимальных размеров оптической системы показал, что уменьшение размеров интерферометра при заданном разрешении ограничено только виньетированием при перемещении светоделителя, а не искажением волнового фронта, уменьшением глубины модуляции из-за возник-

новения угла между интерферирующими лучами или их относительным сдвигом. Поэтому при выборе конструктивных параметров интерферометра оказалось достаточным выполнить соотношение  $R/\Delta \gg 1$  (для устранения виньетирования) и, рассчитав ход лучей в приближении геометрической оптики, выбрать угол наклона  $\beta$  падающего излучения и размеры отверстий в зеркалах и светоделителе. Установлены следующие параметры интерферометра:  $R = 120$  мм,  $\delta = 2.4$  мм,  $\Delta\gamma = 1:10$ ,  $\beta = 20^\circ$ , максимальная площадь изображения источника  $S = 0.6 \times 0.6$  мм<sup>2</sup>, предельное спектральное разрешение  $1/4\Delta = 100/4R \cong 1.0$  см<sup>-1</sup> при светосиле  $S\Omega = S2\pi(1 - \cos\Delta\gamma/2) \cong 3 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>2</sup> · ср.

Кроме основного канала с источником  $I$  и фотоприемником  $\Phi\Pi$ , интерферометр содержит два традиционных вспомогательных: лазерный канал монохроматического излучения для дискретизации интерферограмм (на рисунке не показан) и широкополосный – для привязки по его сигналу интерферограмм при их когерентном суммировании. Схемной особенностью последнего является использование части излучения источника  $I$  (Архипов В.В., Мурашев В.В. А.с. СССР № 633341, 1978), направляемой в интерферометр зеркалом  $M_3$ . Прохождение излучений обоих вспомогательных каналов аналогично основному.

Конструктивно интерферометр размещен внутри пружинного параллелограммного механизма, светоделитель выполнен двухсторонним, что позволило отказаться от компенсатора.

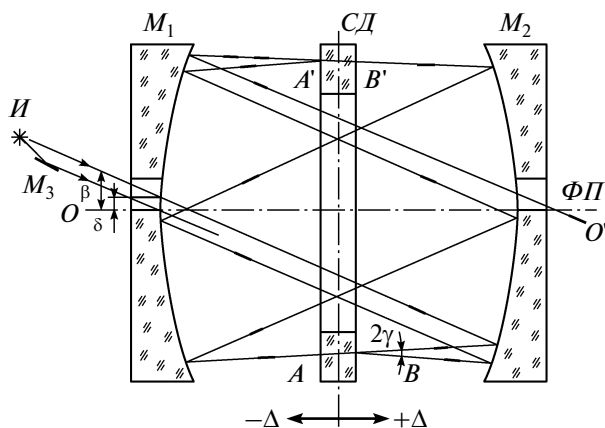


Рис. 2. Оптическая схема и ход лучей в фурье-спектрометре.  $M_1, M_2$  – соосные сферические зеркала;  $M_3$  – зеркало;  $CD$  – светоделитель;  $I$  – источник;  $\Phi\Pi$  – фотоприемник.

#### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СВЕТОДЕЛИТЕЛЯ

Если вопрос влияния погрешности прямолинейности перемещения светоделителя на параметры фурье-спектрометра решен благодаря оптиче-

ской схеме интерферометра, то влияние погрешности скорости сканирования остается актуальным и требует тщательного анализа.

При исследовании погрешности скорости исходим из того, что она является случайной функцией времени. Так как в качестве рабочего используется участок перемещения, где отсутствуют переходные процессы, связанные с изменением скорости от нуля до заданного значения, и, кроме того, причины, вызывающие погрешность скорости, не меняются в цикле сканирования, скорость можно считать эргодическим случайным процессом, свойства которого можно исследовать с помощью одной реализации. Дискретные значения такой реализации приведены на рис. 3. По этой реализации проведена проверка гипотезы о законе распределения и выполнена оценка математического ожидания  $m$  и функции автокорреляции  $K(\tau) = K(r, \Delta\tau)$ . Согласно [4] их можно выразить следующим образом:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} v_i; \tag{1}$$

$$K(r, \Delta\tau) = \frac{1}{n-r} \sum_{i=1}^{n-r} (v_i - m)(v_i + r - n),$$

где  $\Delta\tau$  – шаг дискретизации,  $r$  – число шагов,  $v_i$  – значение реализации в  $i$ -й точке.

На рис. 4 приведена гистограмма распределения значений скорости. Проверка гипотезы по критерию  $\chi^2$  показала, что закон распределения скорости близок к нормальному с вероятностью 0.7. Для реализации, представленной на рис. 3, значение математического ожидания составило  $m = 0.11$  см/с. Оценка дисперсии дает значение

$$D = K(0) = 0.29 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}^2.$$

На рис. 5 приведена вычисленная по формуле (1) функция автокорреляции (кривая 1), которая аппроксимирована зависимостью (кривая 2)

$$K(\tau) = \sigma^2 \exp(-2\pi\alpha|\tau|) \cos(2\pi\beta\tau). \tag{2}$$

При аппроксимации принято  $\sigma^2 = k(0)$ . Значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  определены методом наименьших квадратов [5] и составили:  $\alpha = 1.82$  Гц,  $\beta \sim 2.10$  Гц. Аппроксимирующей функции автокорреляции (2) соответствует спектр погрешности скорости:

$$S(f) = S_0 / [\alpha^2 + (f - \beta)^2], \tag{3}$$

связанный с выражением (2) преобразованием Фурье. Здесь  $f$ , Гц – текущая частота;  $\alpha$  и  $\beta$  – соответственно полуширина и средняя частота.

На рис. 6 приведены в относительных единицах спектры погрешности скорости двух реализаций, вычисленные с помощью быстрого преобразования Фурье по найденной оценке (1) (кривые 1 и 2), и спектр, вычисленный по формуле (3) (кривая 3). Видно, что аппроксимирующая кривая хорошо совпадает с экспериментальными,

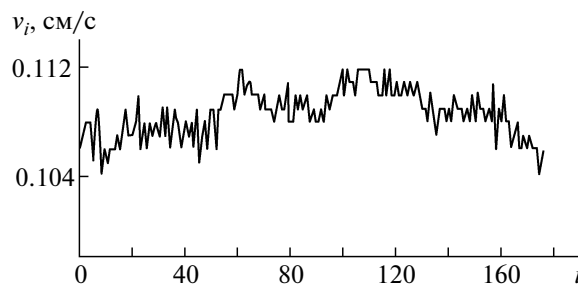


Рис. 3. Дискретные значения реализации скорости сканирования.

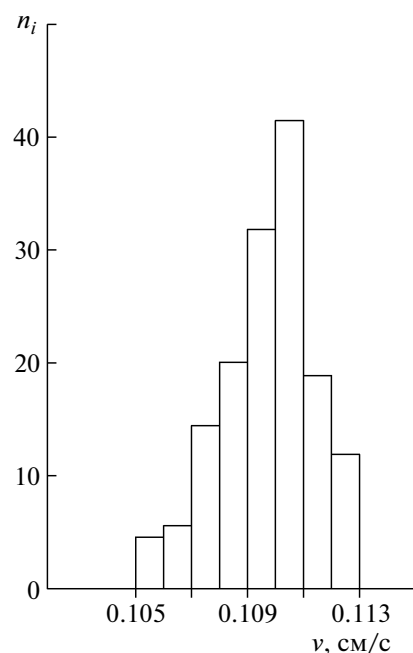


Рис. 4. Гистограмма распределения скорости сканирования.

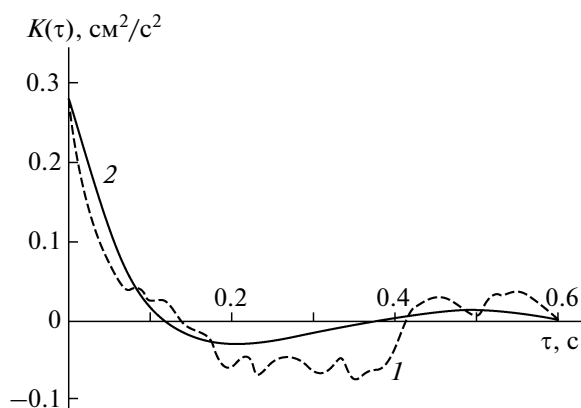


Рис. 5. Функция автокорреляции скорости сканирования: 1 – вычисленная оценка, 2 – аппроксимирующая кривая.

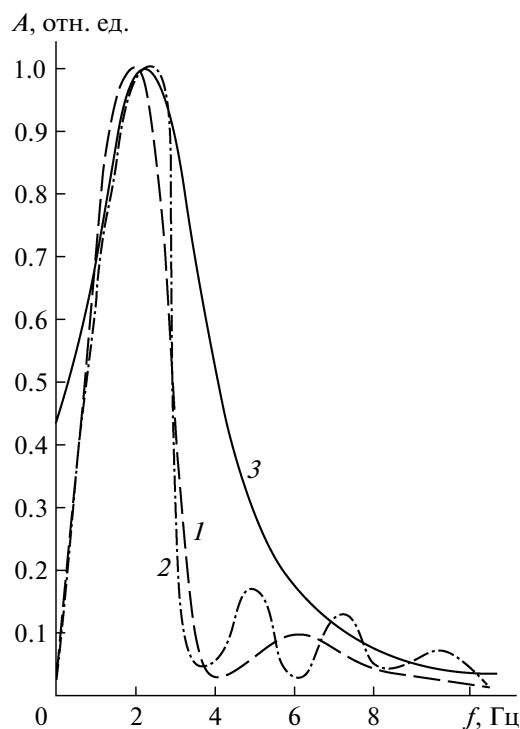


Рис. 6. Спектры погрешности скорости: 1, 2 – для двух реализаций, 3 – вычисленный по формуле (3).

поэтому при исследовании влияния погрешности скорости перемещения светодетектора на результирующий спектр выражение (3) было использовано в качестве модели спектра скорости.

Поскольку для оценки математического ожидания  $m$  и функции автокорреляции  $K(\tau)$  используется реализация конечной длины, полученные оценки  $m$  и  $K(\tau)$  отличаются от их истинных значений. С целью определения точности найденных оценок вычисляются дисперсии оценок математического ожидания  $\sigma_m^2$  и скорости  $\sigma_D^2$ , которые с учетом [5] имеют вид:

$$\sigma_m^2 = \frac{2}{T} \int_0^T (1 - \tau/T) K(\tau) d\tau, \quad (4)$$

$$\sigma_D^2 = \frac{4}{T} \int_0^T K^2(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где  $T$  – длительность одного скана.

Подставляя (2) в (4) и (5), после соответствующих преобразований получим:

$$\begin{aligned} \sigma_m^2/\sigma^2 = (2/L) \{ & [\alpha/(2\pi(\alpha^2 + \beta^2))] - \\ & - [(\alpha^2 - \beta^2) + \exp(-2\pi\alpha T)(\alpha\beta\sin(2\pi\beta T) - \\ & - (\alpha^2 - \beta^2)\cos(2\pi\beta T))] / (4\pi T\beta^2(\alpha^2 + \beta^2)^2) \} = 0.143, \end{aligned}$$

где  $L$  – длина реализации,

$$\begin{aligned} \sigma_D^2/\sigma^4 = [1 - \exp(-4\pi\alpha T)] / (2\pi\alpha T) + \\ + [\alpha + \exp(-4\pi\alpha T)\beta(\sin(2\pi\beta T) - \\ - \alpha\cos(2\pi\beta T))] / (2\pi T(\alpha^2 + \beta^2)) = 0.0645. \end{aligned}$$

Откуда  $\sigma_m = 0.380\sigma$ ,  $\sigma_D = 0.254\sigma^2$ .

С учетом полученных значений относительная погрешность скорости сканирования составила 2%.

Таким образом, закон распределения погрешности скорости сканирования в описываемых фурье-спектрометрах близок к нормальному, среднее квадратическое отклонение составляет примерно 2%, а спектр скорости аппроксимирован дисперсионной кривой с полушириной 1.82 Гц и средней частотой 2.10 Гц. Такой стабильно работающий привод светодетектора (с плавной сменой хода) позволяет увеличить скорость накопления за счет использования прямого и обратного хода (Архипов В.В., Петрова Л.Б. А.с. СССР № 789688, 1980).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурная основа описанных фурье-спектрометров – нерасстраиваемый интерферометр, а также их малые габариты, позволяют пользователю не заботиться о необходимости постоянного контроля состояния юстировки, а погрешности работы привода подвижного элемента настолько малы, что не ограничивают спектральные параметры приборов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проспект фирмы LUMEX Ltd. СПб., 2001.
2. Архипов В.В., Ежеская Т.Е. // ОМП. 1982. № 9. С. 31.
3. Белл Р.Д. Введение в фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
5. Свейников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968.