

## Особенности использования направляющих прямолинейного перемещения в быстросканирующих фурье-спектрометрах

© В.В. Архипов

(Поступило в Редакцию 2 марта 2010 г.)

Представлены основные типы направляющих прямолинейного перемещения в составе быстросканирующих фурье-спектрометров. Установлены функциональные границы их использования, в том числе с учетом спектральных параметров фурье-спектрометра. Предложена теоретически обоснованная динамическая аппаратная коррекция погрешностей прямолинейного перемещения для раздвижения границ их использования в составе быстросканирующих фурье-спектрометров.

Из существующих направляющих прямолинейного перемещения в быстросканирующих фурье-спектрометрах (БФС) используются, главным образом, пружинные и с газовой смазкой (пневмоподшипники). Пружинных — два варианта: параллелограммный [1] и мембранный [2]. Пневмоподшипники бывают с принудительной подачей воздуха через опору [3] и через каретку [4], одинарные [5] и сдвоенные („катамаран“) [6]. Пружинные допускают сканирование на единицы миллиметров и применяются в БФС низкого разрешения [7], пневмоподшипники — на порядок выше, с обеспечением среднего спектрального разрешения [8].

Это многообразие типов направляющих прямолинейного перемещения требует четкого разграничения областей их использования. Критерием разграничения может служить полнота использования рабочих участков сканирования и сопоставление их величины с учетом ограничивающего влияния погрешности прямолинейности на параметры БФС.

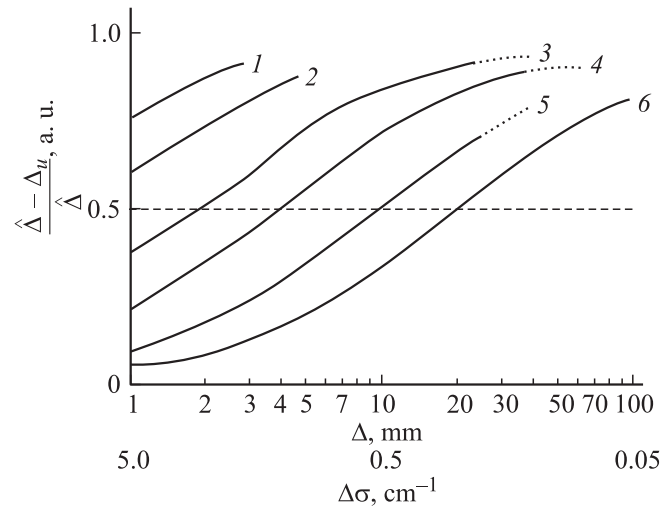
Первый критерий обусловлен наличием нерабочих участков сканирования и определяется соотношением  $(\hat{\Delta} - \Delta_u)/\hat{\Delta}$ , где  $\hat{\Delta}$  — наибольшая величина перемещения отражателя,  $\Delta_u$  — величина нерабочего участка сканирования. На рис. 1 приведены графики этого соотношения. Принимая в качестве неприемлемого сканирования соотношение  $(\hat{\Delta} - \Delta_u)/\hat{\Delta} < 0.5$ , этим установим начальную границу использования. Для установления второй границы диапазона представляется необходимым построить в одних координатах наиболее общие характеристики погрешности каждой направляющей и в этих же координатах — граничные кривые, рассчитанные по формуле зависимости спектрального разрешения  $\Delta\sigma$  и значения погрешности  $\Delta\beta$  [9]:

$$\Delta\beta < \Delta\sigma/4\sigma D \quad \text{или} \quad \Delta\beta < 4\sigma\delta D,$$

где  $D$  — диаметр отражателя.

С учетом этих формул граница определяется численным методом для реальных величин  $\sigma$  и  $D$ . Принимая в качестве наиболее употребительных их величины равными  $10\,000\text{ cm}^{-1}$  и  $5\text{ cm}$  соответственно, вычислим ряд значений  $\Delta\beta$ , представив их в табл. 1. Из приведенных данных следует, что значения углов наклона  $\Delta\beta$ , выраженные в угловых секундах, равны

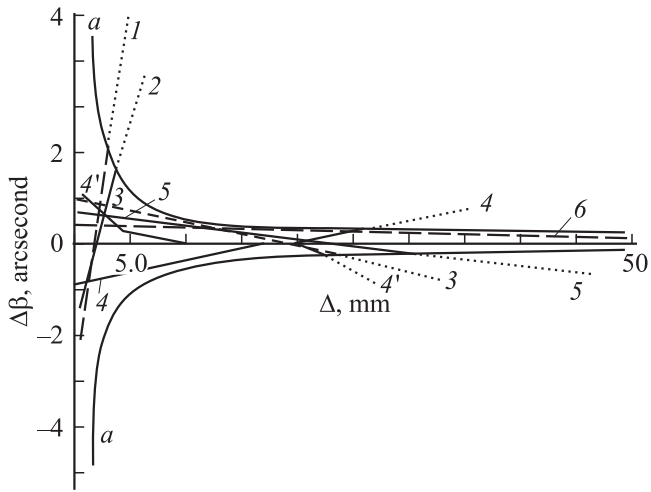
величинам спектрального разрешения  $\Delta\sigma$  в  $\text{cm}^{-1}$  с учетом принятых параметров. По этим численным данным на рис. 2 симметрично оси  $\Delta$  построены пары кривых. Значения углов наклона в области между ними являются допустимыми, а точки их пересечения с характеристиками погрешности направляющих определяют границу диапазона использования.



**Рис. 1.** Характеристики эффективности использования направляющих прямолинейного перемещения в БФС: 1 — мембранная, 2 — параллелограммная, 3, 4 — соответственно одинарный и сдвоенный пневмоподшипники с поддувом через опору, 5, 6 — соответственно одинарный и сдвоенный пневмоподшипники с поддувом через каретку. Уровень  $(\hat{\Delta} - \Delta_u)/\hat{\Delta} = 0.5$  является начальной границей использования направляющих. Продолжение характеристик точками показывает раздвижение границ использования автокоррекцией погрешностей прямолинейности.

**Таблица 1.** Значения погрешностей  $\Delta\beta$  прямолинейности сканирования

$\Delta, \text{mm}$	1	2	3	4	5	10	20	25	50
$\Delta\sigma, \text{cm}^{-1}$	75	2.5	1.67	1.25	1.0	0.5	0.25	0.2	0.1
$\Delta\beta, \text{arcsecond}$	5	2.5	1.67	1.25	1.0	0.5	0.25	0.2	0.1



**Рис. 2.** Итоговое семейство характеристик погрешностей прямолинейного перемещения направляющих: 1 — мембранная; 2 — параллелограммная; 3 — одинарный пневмоподшипник с поддувом через опору; 4, 4' — то же через каретку в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно; 5 — двоярный пневмоподшипник с поддувом через опору; 6 — то же через каретку; *a* — предельная характеристика, учитывающая спектральное разрешение БФС.

**Таблица 2.** Границы использования направляющих в БФС

Тип направляющих	Границы использования, mm
Мембранная	0.3–1.5
Параллелограммная	0.7–30
Пневматическая одинарная с поддувом через опору	2.0–24
Пневматическая одинарная с поддувом через каретку	10–25
Пневматическая двоярная с поддувом через опору	4.0–35
Пневматическая двоярная с поддувом через каретку	20–60

Обе установленные границы приведены в табл. 2. Видно, что для БФС имеют место ограничения.

## Динамическая аппаратная коррекция погрешностей направляющих

Аппаратурная коррекция погрешностей направляющих в реальном времени позволяет расширить границы их использования. Идея такой коррекции в отличие от статической компенсации центрированием каретки [2,10] более универсальна. Она распространяется на все типы прямолинейных направляющих и осуществляется в составе БФС. Аппаратурная коррекция заключается в автоматическом изменении углового положения неподвижного отражателя интерферометра БФС в зависимости от занимаемого в процессе сканирования углово-

го положения подвижного отражателя. Таким образом, действие коррекции приводит к сохранению на выходе интерферометра в процессе сканирования параллельности фронтов интерферирующих волн. Возникновение взаимного наклона фронтов — это дополнительная оптическая разность хода

$$\Delta\delta = l \operatorname{tg} \Delta\beta,$$

где  $l$  — расстояние до произвольной точки в плоскости интерференционной картины,  $\Delta\beta$  — погрешность прямолинейности сканирования.

Ввиду малости угла  $\Delta\beta$  и его переменного характера последнее выражение можно упростить:

$$\Delta\delta = l\Delta\beta.$$

С учетом этого соотношения нормированный по амплитуде сигнал монохроматической интерферограммы запишется следующим образом:

$$J_0(\delta) = \cos 2\pi\sigma_0(\delta + l\Delta\beta).$$

Погрешность  $\Delta\beta$  — систематическая и при соответствующей юстировке интерферометра представляется треугольным знаком, при описании которого рядом Фурье можно ограничиться первым членом  $8 \cos \omega t / \pi$ , где  $\omega$  — частота изменения  $\Delta\beta$ , равная частоте сканирования. Тогда

$$J_0(\delta) = \cos(2\pi\sigma_0\delta + 16\sigma_0\Delta\beta \cos \omega t) = [\omega(\sigma_0)t + m_\varphi \cos \omega t],$$

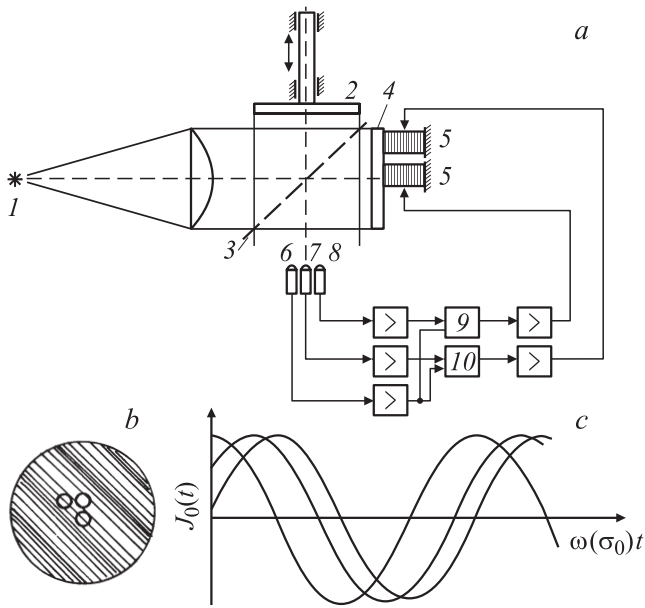
где  $2\pi\sigma_0\delta = \omega(\sigma_0)t$ . Это классическое уравнение модулированного по фазе сигнала, в котором  $m_\varphi = 16\sigma_0 l \Delta\beta$  — индекс модуляции. Оно представляется функциями Бесселя:

$$J_0(\delta) = J_0(m_\varphi) \cos \omega(\sigma_0)t + J_1(m_\varphi) \cos(m_\varphi + \omega t).$$

Первый член соответствует несущей частоте модулированного сигнала и фильтруется при демодуляции. Вторым является уравнением сигнала погрешности, из него путем электронной обработки формируется сигнал погрешности.

В этом случае задача корректирующей аппаратуры сводится к выделению этого сигнала и его электронной обработке с целью формирования сигнала, управляющего приводом неподвижного отражателя. Источником информации о погрешности является модулированный по фазе сигнал монохроматической интерферограммы. Использование фазовой демодуляции этого сигнала позволяет установить не только величину погрешности, но и ее знак, в отличие от амплитудной, выделяющей только величину.

На рис. 3, *a* представлена блок-схема устройства коррекции [11]. Она содержит три фотоприемника, установленных взаимно перпендикулярно в плоскости изображения интерференционной картины (рис. 3, *b*). При перемещении зеркала 2 интерферометра в процессе



**Рис. 3.** Устройство динамической коррекции погрешностей прямолинейного перемещения направляющих в БФС: *a* — блок-схема: 1 — источник монохроматического излучения; 2, 3, 4 — подвижное зеркало, светоделитель, неподвижное зеркало интерферометра БФС соответственно; 5 — двухкоординатный привод зеркала 4; 6–8 — фотоприемники; 9, 10 — синхронные детекторы; *b* — положение фотоприемников в плоскости интерференционной картины; *c* — гармонические сигналы интерферограммы фотоприемников.

сканирования на фотоприемниках формируются гармонические сигналы. Если каретка с зеркалом имеет погрешность направления, то интерференционная картина представляет собой полосы равной толщины, количество которых и ширина характеризуют степень разбюстировки интерферометра, а их расположение — направление разбюстировки. Полосы перекрывают своими различными участками размещенные в плоскости фотоприемники. Поэтому вырабатываемые ими сигналы сдвинуты по фазе (рис. 3, *c*). Величина сигнала зависит от ширины полосы, а знак — от направления расположения. Посредством демодуляции при электронной обработке сигналов выделяются два сигнала, управляющие приводом неподвижного зеркала 4 интерферометра. Третий сигнал из числа исходных является при этом опорным. Практические испытания системы динамической коррекции показали, что диапазон коррекции составил  $\pm 4$  arcsecond, а точность коррекции — 0.1 arcsecond.

## Выводы

1. Границы использования прямолинейных направляющих, пружинных и с газовой смазкой, с учетом спектральных параметров БФС и влияния погрешностей, находятся в диапазоне до 110 mm.

2. Точностный анализ источников погрешностей направляющих установил систематический закон погрешностей с крутизной характеристики 1 arcsecond/mm для пружинных и 0.05 — для пневматических.

3. Новые структуры направляющих с конструктивными вариантами создают эффект повышения качества сканирования.

4. Эффективность динамической аппаратной коррекции погрешностей прямолинейности сканирования такова, что, допуская погрешность в пределах  $\pm 4$  arcsecond, поддерживает параллельность волновых фронтов с точностью  $\pm 0.1$  arcsecond. При этом крутизна характеристики погрешности увеличивается до 0.025 arcsecond/mm для пружинных и 0.001 25 — для пневматических, продлевая границы их использования в БФС.

5. Реализованное спектральное разрешение БФС в диапазоне до  $10\,000\text{ cm}^{-1}$  при световом диаметре отражателя 5 cm составляет  $0.37\text{ cm}^{-1}$  с учетом влияния погрешностей прямолинейности сканирования.

## Список литературы

- [1] Андреев А.И., Архипов В.В., Горбунов Г.Г. // ПТЭ. 1982. № 6. С. 187–189.
- [2] Клементьев В.Г., Архипов В.В. А.с. № 641273. 1979. БИ № 1.
- [3] Архипов В.В., Балащенко Н.К. А.с. № 545876. 1977. БИ № 5.
- [4] Архипов В.В., Балащенко Н.К., Любарский С.В. А.с. № 864938. 1981. БИ № 1.
- [5] Griffiths P.R. // Appl. Spectrosc. Rev. 1972. Vol. 6. № 1. P. 31–33.
- [6] Архипов В.В., Балащенко Н.К., Любарский С.В. А.с. № 759866. 1980. БИ № 32.
- [7] Архипов В.В., Ежеская Т.Б. // ОМП. 1982. № 9. С. 31–33.
- [8] Milward R.C. // IEEE T. Microw. Theory. 1974. Vol. 22. № 12. P. 1018–1021.
- [9] Архипов В.В. // Оптич. журн. 2009. Т. 76. № 6. С. 31–33.
- [10] Суббота Ю.Н., Архипов В.В. А.с. № 1208346. 1986. БИ № 4.
- [11] Андреев А.И., Архипов В.В. А.с. № 662796. 1979. БИ № 18.