РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.853.4

АПОДИЗИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ НА АППАРАТНУЮ ФУНКЦИЮ ДВУХЛУЧЕВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПОГРЕШНОСТИ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ СКАНИРОВАНИЯ

© 2009 г. В. В. Архипов, канд. техн. наук

Санкт-Петербург

Показано, что жесткие требования к прецизионности прямолинейности перемещения подвижного зеркала сканирующего интерферометра Майкельсона можно снизить, если использовать симметричный режим сканирования, при котором нулевая разность хода сигнала интерферограммы совпадает с нейтральным относительно начала и конца сканирования положением зеркала.

Коды OCIS: 120.3180

Поступила в редакцию 20.01.2009

В практике вычисления спектров по двухлучевым интерферогаммам пользуются операцией аподизации, которая заключается в умножении интерферограммы на соответствующую функцию (треугольную, параболическую и т.д.), что, однако, сопровождается уширением аппаратной функции (АФ).

При использовании направляющих, у которых нейтральное положение, а следовательно, минимум погрешностей совпадает с нулевой разностью хода, влияние погрешности прямолинейности сканирования на интерферограмму в большой степени аналогично процедуре аподизации (аппаратурная аподизация). Поэтому ограничение на допустимый угол наклона зеркала можно устанавливать, исходя из допустимого уширения АФ [1].

Соотношение между ними при линейном законе погрешности получается из функции $\sin x/x$, если принять ее за аподизирующую, ограниченную одной интерференционной полосой, когда $\sin x/x = 0$. Это возможно при $\sin x = 0$, т. е., например, при $x = \pi$, чему соответствует

$$\Delta\beta(\Delta) = 1/(4\sigma r), \text{ когда } x = 4\pi\sigma r\Delta\beta(\Delta).$$

Здесь Δ – перемещение зеркала интерферометра, $\beta(\Delta)$ – угол наклона зеркала при сканировании на единицу длины, σ – волновое число излучения, $r = D/2$ – радиус зеркала.

Если

$$\Delta\beta = \beta(\Delta)\,\Delta, \text{ то } \Delta\beta = 1/(4\sigma\Delta D).$$

Выражая Δ через ширину АФ $\Delta\sigma = 1/\Delta$, окончательно получим $\Delta\beta = \Delta\sigma/(4\sigma D)$. Данное соотношение позволяет установить погрешность прямолинейности перемещения зеркала в зависимости от ширины АФ с учетом аподизирующего влияния линейного изменения погрешности.

Существование линейного закона подтверждается анализом уравнений погрешности. В частности, для случая параллелограммного варианта уравнение имеет вид [2]

$$\Delta\beta = \Delta\Delta l/hl\sqrt{(1 \pm \Delta/2h)^2 + (h/b)^2}.$$

Это уравнение выведено с учетом того, что допуски на размеры деталей таких направляющих задаются одинаковыми, имея в результате равные погрешности. Так как всегда $\Delta \ll h$ и поэтому $\Delta/2h \ll 1$, то исходное уравнение упрощается и приобретает постоянный множитель

$$C = \Delta l/hl\sqrt{1 \pm (h/b)^2}.$$

Тогда $\Delta\beta = C\Delta$. Следовательно, линейный характер зависимости угла наклона от перемещения очевиден.

Известны [3] уравнения АФ, выведенные аподизированными по таким законам, как линейный и скачкообразный спад, импульсный провал, синусоидальное и экспоненциальное изменения. Их вывод основан на принципе аддитивности и учитывает форму переменной части интерферограммы

$$J_0(\sigma) = \cos(2\pi\sigma_0\delta).$$

При этом уравнение АФ с функцией аподизации A имеет вид

$$A(\sigma) = 2\int_0^{\hat{\sigma}} A\cos(2\pi\sigma_0\delta)\cos(2\pi\sigma\delta)d\delta.$$

Для случая аподизирующего действия угла наклона зеркала

$$A(\Delta\beta/(\delta\hat{\delta}) = J_1(4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta})/(4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta}).$$

Графическое представление $A(\Delta\beta/\hat{\delta}\delta)\big|_{\Delta\beta=\mathrm{const}}$ сделано на рис. 1 при $\sigma_0 = 2950$ см$^{-1}$ и $r = 1{,}5$ см. Для сравнения в этих же координатах построена функция аподизации $A = (1 - \delta/\hat{\delta})$.

Уравнение АФ с $A(\Delta\beta\delta/\hat{\delta})$ имеет вид

$$A(\sigma) = 2\int_0^{\hat{\sigma}} J_1\left(4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta}\right)\times$$
$$\times 4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta}\cos(2\pi\sigma_0\delta)\cos(2\pi\sigma\delta)d\delta.$$

Представляя функцию Бесселя первыми членами степенного ряда, получим уравнение АФ в виде суммы двух интегралов

$$A(\sigma) = 2\int_0^{\hat{\delta}} \cos(2\pi\sigma_0\delta)\cos(2\pi\sigma\delta)d\delta -$$
$$-1/4\left(4\pi\sigma_0 r\Delta\beta/\hat{\delta}\right)^2 \times$$
$$\times\int_0^{\hat{\delta}} \delta^2\cos(2\pi\sigma_0\delta)\cos(2\pi\sigma\delta d\delta).$$

Решая интегральное выражение и проводя последующие преобразования, получим окончательное уравнение АФ

$$A(\sigma) = \left[1 - 2(\sigma_0 r\Delta\beta)^2 + \frac{(\sigma_0 r\Delta\beta)^2}{\hat{\delta}^2(\sigma_0 - \sigma)^2}\right]\times$$
$$\times\frac{\sin[2\pi(\sigma_0 - \sigma)\hat{\delta}]}{2\pi(\sigma_0 - \sigma)} -$$
$$-(\sigma_0 r\Delta\beta)^2\frac{\cos 2\pi(\sigma_0 - \sigma)\hat{\delta}}{(\sigma_0 - \sigma)^2\hat{\delta}}.$$

Следовательно, аподизацию вызывают косинусная составляющая и коэффициент при синусной составляющей, являющийся неаподизированной АФ. На рис. 2 приведена вычисленная по этому уравнению АФ. В тех же координатах построена измеренная АФ при $\Delta\beta = 6''$–$10''$ (кривая *1*) и теоретическая, рассчитанная по формуле, предложенной в [4] (кривая *2*). Первый минимум измеренной АФ подавлен на 15–20 %, а второй максимум – почти вдвое. Такой результат менее эффективен по сравнению с аподизацией по закону $1 - \sigma/\hat{\sigma}$ (кривая *4*), но он получен при меньшей крутизне функции аподизации и демонстрирует возможность снижения требований к качеству

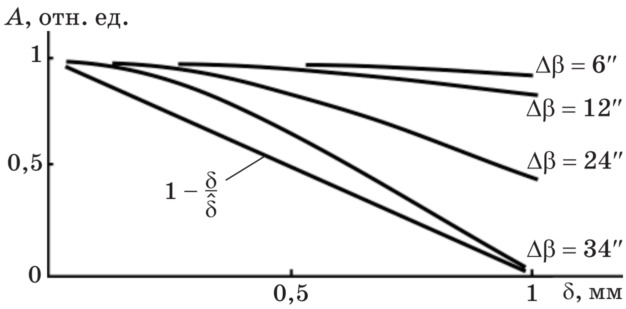

Рис. 1. Графики функции $A(\Delta\beta/\hat{\delta}\delta) = J_1(4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta})/(4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta})$ при $\Delta\beta = \mathrm{const}$ и треугольной функции первой степени $1 - \delta/\hat{\delta}$.

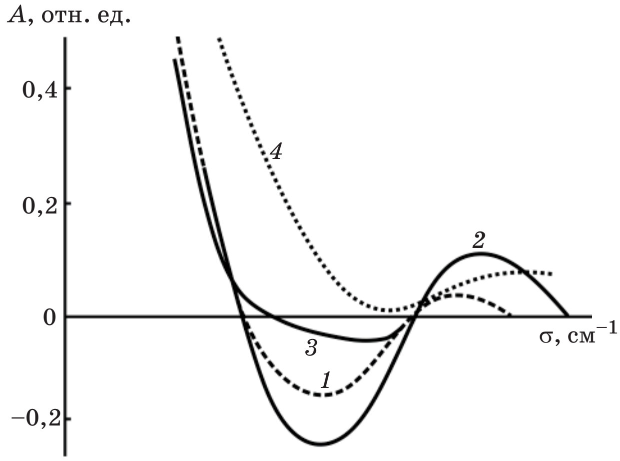

Рис. 2. АФ сканирующего двухлучевого интерферометра с параллелограммной направляющей. *1* – измеренная (спектр излучения He–Ne-лазера на $\lambda = 3{,}39$ мкм), *2* – вычисленная по формуле из [4], *3* – вычисленная по уравнению с аппаратурной аподизацией $A = J_1(4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta})/(4\pi\sigma_0 r\delta\Delta\beta/\hat{\delta})$, *4* – АФ с треугольной аподизацией первой степени $1 - \delta/\hat{\delta}$.

направляющих прямолинейного перемещения в составе двухлучевых интерферометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов В.В., Ежевская Т.Б.* Малогабаритный интерферометр для фурье-спектрометрии // ОМП. 1982. № 9. С. 31–33 .
2. *Андреев А.И., Архипов В.В., Горбунов Г.Г.* Пружинный параллелограмм для сканирующего зеркала фурье-спектрометра // ПТЭ. 1982. С. 187–189.
3. *Пивовар Н.И.* Анализ процесса регистрации интерферограмм в фурье-спектрометрии // Дис. Л.: ГОИ, 1974. 125 с.
4. *Конн Ж.* Спектроскопические исследования с применением фурье-преобразования // в сб. Статей: ИК спектроскопия высокого разрешения. пер. с англ. / под ред. Жижина Г.Н. М.: Мир, 1972. С. 201–305.