

ВЛИЯНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ УПРУГИХ ВОЛН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

В. В. Молоток, Б. П. Разживин

Основными физическими явлениями, определяющими линейную погрешность измерения спектра в акустооптическом анализаторе, являются поглощение и расходимость упругих волн в материале светозвукопровода модулятора света и частотные ограничения акустооптического взаимодействия. Влияние поглощения упругих волн и частотных ограничений при дифракции света на акустических волнах на аппаратную функцию анализатора спектра с пространственным интегрированием и его комплексный интеграл суперпозиции рассмотрены ранее в статьях [1-3].

Гармоническая упругая волна, распространяющаяся в изотропном светозвукопроводе акустооптического модулятора (рис. 1), записывается в виде следующего соотношения:

$$r_1(x_1) a(x_1, y_1) \exp [j(\Omega_1 t - K_1 x_1 - 0,5 K_1 L)] \exp (-j 0,25 \pi),$$

где

$$a(x_1, y_1) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 (x_1 + 0,5L)}} \int_{-\infty}^{\infty} f(y_2) \exp \left[j \left(\frac{K_1}{2(x_1 + 0,5L)} (y_1 - y_2)^2 \right) \right] dy_2$$

— амплитуда расходящейся волны [4], $f(y_2)$ — распределение давления по плоскости излучения пьезопреобразователя, $K_1 = \Omega_1/V$, λ_1 , V — волновое число, длина волны и скорость распространения упругих волн, L — апертура оптической системы,

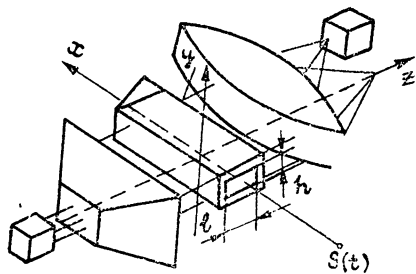


Рис. 1.

в нем бегущей волне. При рассмотрении работы спектральных устройств достаточно учитывать только световую волну первого дифракционного порядка. В приближении слабого звука, т. е. в линейном режиме дифракции, можно записать следующее выражение для световой волны первого порядка:

$$r_1(x_1) a(x_1, y_1) \exp [j(\omega_0 t - k_0 z + k_0 x_1 \operatorname{tg} \theta_i)] \exp [j(\Omega_1 t - K_1 x_1 - 0,5 K_1 L)].$$

Распределение световых колебаний в выходной плоскости анализатора, в задней фокальной плоскости фурье-линзы, определяется как двумерное преобразование Фурье полученного соотношения:

$$G_1(t, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_t) = \exp [j\Omega_1(t - 0,5T)] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r_1(x_1) r_2(y_1) a(x_1, y_1) \times \\ \times \exp [-j(K_1 - k_0 \operatorname{tg} \theta_i) x_1] \exp [j(\Omega_x x_1 + \Omega_y y_1)] dx_1 dy_1,$$

где $\Omega_x = (2\pi/\lambda_0 F) x_2$, $\Omega_y = (2\pi/\lambda_0 F) y_2$, F — фокусное расстояние фурье-линзы,

$$r_2(y_1) = \begin{cases} 1 & \text{при } |y_1| \leq 0,5h \\ 0 & \text{при } |y_1| > 0,5h \end{cases}.$$

Это выражение описывает комплексную аппаратную функцию акустооптического анализатора спектра с пространственным интегрированием, в которой учитывается расходимость упругих волн в материале светозвукопровода модулятора света

При считывании светового распределения в выходной плоскости анализатора одномерным фотоприемником, расположенным вдоль оси, можно не интересоваться видом этого распределения в перпендикулярном направлении. В этом случае модуль аппаратной функции может быть рассчитан следующим образом:

$$|G_1(\Omega_x, \Omega_t)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r_1(x_1) r_2(y_1) a(x_1, y_1) \exp [-j(k_1 - k_0 \operatorname{tg} \theta_i - \Omega_x) x_1] dx_1 dy_1 \right|.$$

Результаты расчетов по этой формуле для акустооптического анализатора спектра ($T=5$ мкс, $h=2$ мм), материалом среды взаимодействия которого является монокристаллический кварц ($V=5,75 \cdot 10^6$ мм/с), представлены на рис. 2. Частотам входного гармонического колебания 5, 60, 100, 300 МГц соответствуют графики модуля аппаратной функции, изображенной на рис. 2а—г. Обычно принято считать, что взаимодействие световых и упругих волн должно происходить в ближней зоне пьезопреобразователя модулятора света, т. е. должны выполняться следующие условия:

$$h^2/4\lambda > L = VT \text{ или } z^2 = h^2F/V^2T > 4. \quad (1)$$

Проведенные расчеты показали, что это условие является слишком жестким и может быть значительно ослаблено. Модуль аппаратной функции, представленной на рис. 2б, мало отличается от модуля идеальной аппаратной функции и соответствует значению параметра $z^2=1,45$, и, следовательно, на указанной рабочей частоте длительность обрабатываемой выборки может быть увеличена в три раза без существенного ухудшения точности измерения спектра. Нам не представляется возможным сравнить полученные результаты с результатами исследований, представленных в статьях [6, 6], ввиду того, что в них не приведены все необходимые параметры акустооптического взаимодействия (h, L, V, F).

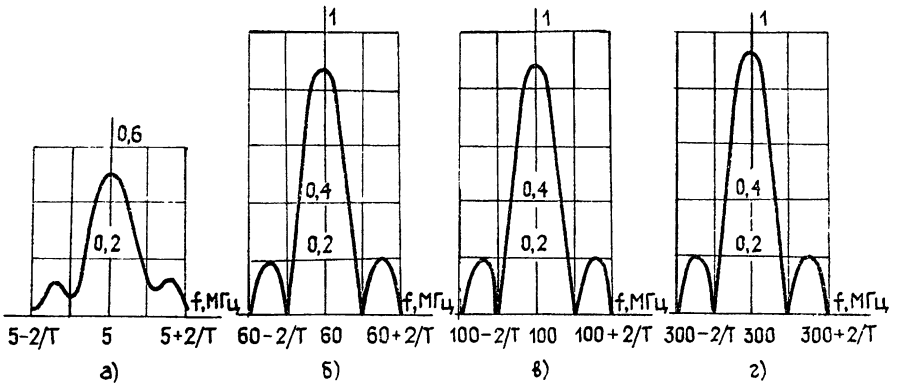


Рис. 2.

В ряде работ [1-3] аппаратная функция реального анализатора приближенно представляется в виде произведения аппаратной функции идеального устройства

$$G_0(t, \Omega_x, \Omega_1) = \exp [j\Omega_1(t-0,5T)] \int_{-\infty}^{\infty} r_1(x_1) \exp [-j((\Omega_1/V)k_0 \operatorname{tg} \theta_i)x_1] \exp (j\Omega_x x_1) dx_1 = \\ = \frac{\sin(0,5(\Omega_x + k_0 \operatorname{tg} \theta_i - \Omega_1/V)L)}{\Omega_x + k_0 \operatorname{tg} \theta_i - \Omega_1/V} \exp [j\Omega_1(t - 0,5T)]$$

и весовой функции, вид которой определяется или амплитудно-частотной характеристикой акустооптического взаимодействия [2] или затуханием упругой волны [3]. Такие весовые функции получаются из выражения для аппаратной функции реального устройства, если положить $\Omega_x = K_1 - k_0 \operatorname{tg} \theta_i$ и $\Omega_y = 0$, т. е. весовая функция соответствует значениям главных максимумов аппаратной функции на оси Ω_x . Указанные приближения справедливы при малых отклонениях аппаратной функции реального анализатора от аппаратной функции идеального устройства, т. е. при малых погрешностях измерения спектра, что соответствует высоким требованиям к современной измерительной технике и устройствам обработки сигналов. Аналогичная весовая функция для рассматриваемого анализатора может быть получена из соотношения для $G_1(t, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_1)$ в следующем виде:

$$W(\Omega_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r_1(x_1)r_2(y_1)a(x_1, y_1)dx_1dy_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r_1(x_1)r_2(y_1) \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{\lambda_1(x_1 + 0,5L)}} dx_1 dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} f(y_2) \exp \left[j \frac{K_1}{2(x_1 + 0,5L)} (y_1 - y_2)^2 \right] dy_2.$$

Результаты численного расчета весовой функции для равномерного распределения давления по плоскости излучения пьезопреобразователя представлены на рис. 3.

Распределение световых колебаний в выходной плоскости анализатора спектра при произвольном входном воздействии определяется интегралом суперпозиции в частотной плоскости, который можно записать в следующем виде.

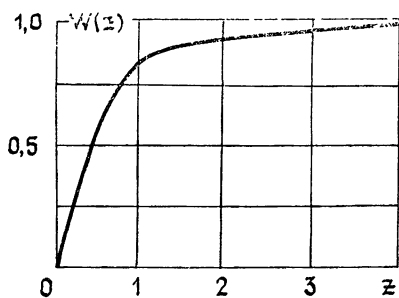


Рис 3.

$$S_2(t, \Omega_x) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\Omega_1) W(\Omega_1) \times \frac{\sin[0,5(V\Omega_x - Vk_0 \operatorname{tg} \theta_i - \Omega_1)L]}{V\Omega_x - Vk_0 \operatorname{tg} \theta_i - \Omega_1} \times \exp[j\Omega_1(t - 0,5T)] d\Omega_1. \quad (2)$$

Из полученного соотношения следует, что в акустооптическом анализаторе расходимость упругих волн в световозвоковводе модулятора света приводит к взвешиванию спектра входного сигнала

Обычно в радиотехнических устройствах не допускается снижение уровня амплитудно-частотной характеристики в заданном диапазоне частот ниже величины 0,7; если этот критерий применить к оценке спектральных искажений в акустооптическом устройстве, то, как следует из графика для $W(\Omega_1)$, параметр z не должен быть меньше 0,6, т. е. должно выполняться условие

$$z = h/V \sqrt{F/T} \geq 0,6 \text{ или } h^2 F / V^2 T > 0,4. \quad (3)$$

Это условие является значительно менее жестким, чем известное условие (1), которое требует обеспечения взаимодействия световых волн с акустическими в ближней зоне пьезопреобразователя. Это означает, что на частоте F в акустооптическом модуляторе размер h пьезопреобразователя можно выбирать в 3 раза меньше, чем по критерию (1), что позволяет также в 3 раза увеличить отношение l/h и, соответственно, интенсивность световых колебаний в первом дифракционном порядке при том же уровне акустической мощности.

Точное значение спектрального распределения в выходной плоскости анализатора можно рассчитать по формуле для интеграла суперпозиции (2). Зная функции $S_2(t, \Omega_x, \Omega_y)$, можно определить линейную погрешность измерения комплексного спектра анализируемого радиосигнала по любому заданному критерию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молоток В. В. В кн.: Оптические методы обработки изображений и сигналов. — Л.: Физико-технический ин-т АН СССР, 1981, с. 63.
2. Молоток В. В., Разживин Б. П. В кн.: Обработка радиосигналов акустоэлектронными и акустооптическими устройствами — Л.: Наука, 1984, с. 97.
3. Молоток В. В., Разживин Б. П. В кн.: Акустооптические методы и техника обработки информации — Л.: Ленинградский электротехнический ин-т им В. И. Ульянова (Ленина) — Ленинградский ин-т авиационного приборостроения, 1980, с. 10.
4. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике — М.: Мир, 1971 — 495 с.
5. Бухарин Н. А., Есепкина Н. А., Рогов С. А. — Радиотехника и электроника, 1983, 23, № 7, с. 1392.
6. Сташкевич А. А. — Опт. и спектр, 1983, 55, вып. 6, с. 1086.

Ленинградский институт
авиационного приборостроения

Поступила в редакцию
10 декабря 1984 г.