

В. В. ГУЩИН, Н. И. МУРАВЬЕВ, А. И. ХИЛЬКО

(Горький)

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНОГО И ФАЗОВОГО СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ В КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

При решении некоторых задач, связанных со спектральным анализом, а также с распознаванием и идентификацией сигналов, важное значение имеют фазовые характеристики спектра.

Покажем, что на основе методов пространственной фильтрации в когерентно-оптической системе можно осуществить измерение фазовых соотношений в спектре одномерного сигнала. Принцип работы анализатора поясняется структурной схемой, изображенной на рис. 1. Исходный транспарант 1 с записью одномерного сигнала $f(x)$ в виде распределения плотности почернения

$$f(x, y) = \text{rect}(x/l_1) \text{rect}(y/l_2) f(x),$$

где

$$\text{rect}(z) = \begin{cases} 1, & |z| \leq \frac{1}{2}; \\ 0, & |z| > \frac{1}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

размещается в плоскости P_1 (l_1, l_2 — размеры окна транспаранта 1). Оптическое звено 2 выполняет одномерное преобразование Фурье по координате x . В этом случае в плоскости P_2 распределение комплексных амплитуд $g(u, v)$ будет определяться следующим образом:

$$g(u, v) = F(u) \text{rect}\left(\frac{v - \frac{l_2}{2}}{l_2}\right),$$

где

$$F(u) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \text{rect}\left(\frac{x}{l_1}\right) e^{-iux} dx. \quad (2)$$

(В выражении (2) мы пренебрегаем дифракцией по вертикальной координате.)

В спектральной плоскости P_2 расположен транспарант 3, представляющий собой пространственный фильтр $\Phi(u, v)$, состоящий из си-

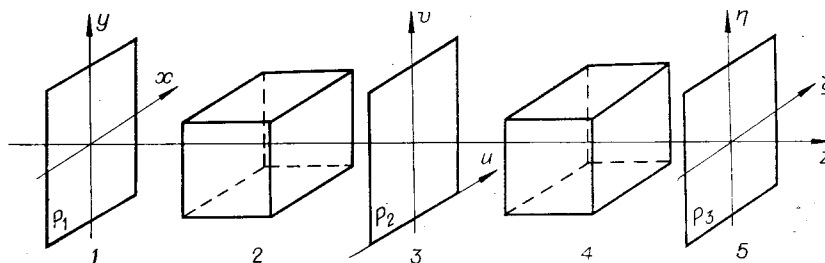


Рис. 1. Структурная схема анализатора.

стемы круглых отверстий диаметром Δu , центры которых расположены вдоль двух прямых линий, симметричных относительно оси координат и составляющих между собой угол α , и вертикальной щели, имеющей ширину Δu :

$$\Phi(u, v) = \begin{cases} \sum_{n=0}^N \text{circ} \left[\sqrt{(u \mp \Delta u n)^2 + \left(v - \frac{\Delta u n}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}\right)^2} \right] \text{rect} \left(\frac{u}{2u_{\text{max}}} \right) \times \\ \times \text{rect} \left(\frac{v}{2u_{\text{max}} \frac{1}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}} \right) + \text{rect} \left(\frac{u}{\Delta u} \right) \text{rect} \left(\frac{v}{2u_{\text{max}} \frac{1}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}} \right), v \geq 0; \\ 0, v < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\text{circ}(\sqrt{u^2 + v^2}) = \begin{cases} 1, & \sqrt{u^2 + v^2} \leq \frac{\Delta u}{2}; \\ 0, & \sqrt{u^2 + v^2} > \frac{\Delta u}{2}; \end{cases}$$

u_{max} — максимальная частота в полосе пропускания оптического звена 2; Δu — разрешающая способность анализатора; $N = u_{\text{max}}/(\Delta u)$ — число независимых точек по спектру.

Угол α выбирается так, чтобы проекции отверстий на ось v не пересекались, при этом α должно удовлетворять неравенству

$$\alpha \leq \pi/2. \quad (4)$$

Круглая форма отверстий в фильтре обеспечивает при условии (4) одновременное выполнение двух требований: простоты изготовления и достаточно большой интенсивности сигнала в отдельном канале. (Нужно заметить, что из всех возможных форм отверстий максимальную интенсивность дадут прямоугольные отверстия, однако практическая реализация фильтра с прямоугольными отверстиями вызывает технические трудности.) Вершина угла, образованного двумя прямыми линиями, соединяющими центры двух систем отверстий, помещается в нулевой максимум спектра исследуемого сигнала, причем так, чтобы вертикальная щель, являющаяся биссектрисой угла α , совпадала с нулевым максимумом спектра. (Мы расположили вершину угла α в точке $v=0$, $u=0$, считая, что эта точка лежит на нижней по координате v границе спектра.) В этом случае вследствие однородности анализируемого спектра в вертикальном направлении фильтр $\Phi(u, v)$ разобьет весь частотный интервал, пропускаемый оптической системой, на N каналов, разнесенных по координате v . Отфильтрованный таким образом спектр преобразуется оптическим звеном 4. По горизонтальной координате оптическое звено 4 осуществляет обратное преобразование Фурье, а по вертикальной координате — перенос изображения в выходную плоскость P_3 .

В результате преобразования в плоскости P_3 формируется выходное изображение 5

$$P(\xi, \eta) = \sum_{n=0}^N A_n \cos(2\pi\gamma u_n \xi + \varphi_n) \text{rect} \left(\frac{\xi}{l_1 \gamma} \right) \text{rect} \left(\frac{\eta - \frac{\Delta u n \beta}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}}{\Delta u \beta} \right) + \\ + A_0 \text{rect} \left(\frac{\xi}{l_2 \gamma} \right) \text{rect} \left(\frac{\eta}{l_2 \beta} \right), \quad (5)$$

где u_n — пространственная частота в отдельном канале; γ, β — коэф-

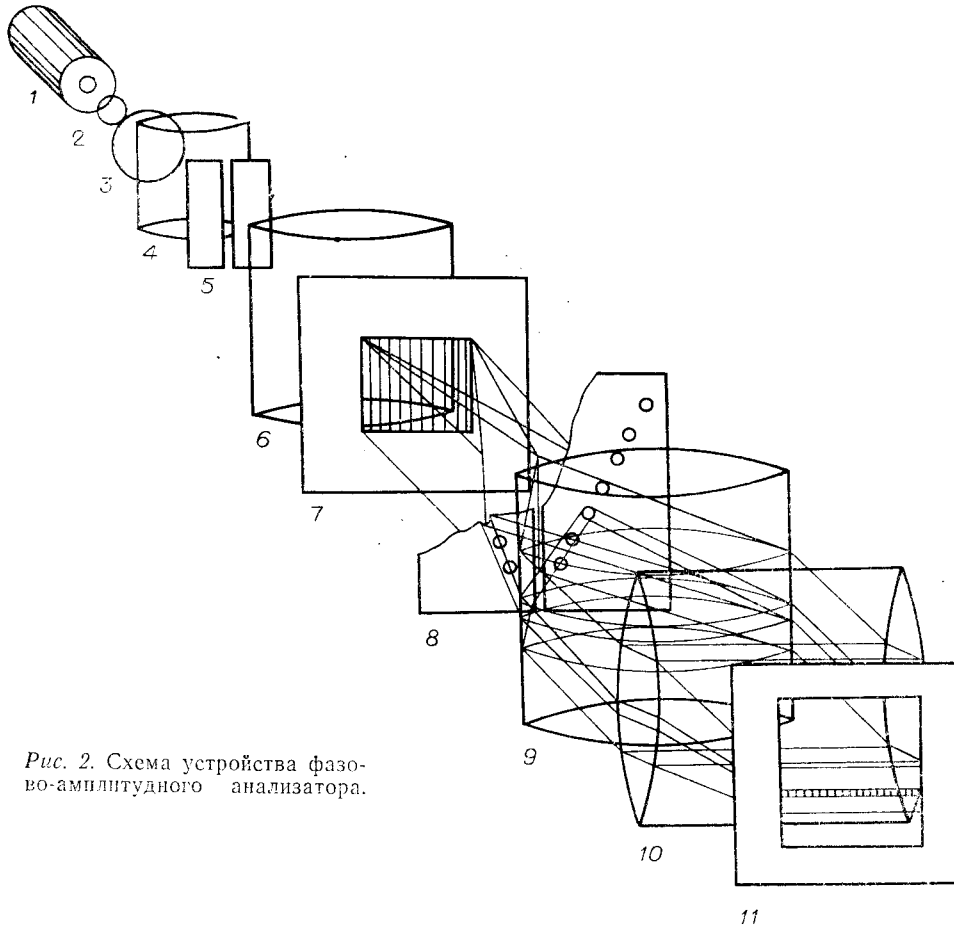


Рис. 2. Схема устройства фазово-амплитудного анализатора.

коэффициенты преобразования масштаба соответственно по горизонтальной и вертикальной координатам; A_n и φ_n — амплитуда и пространственная фаза изображения отдельной спектральной составляющей анализируемого сигнала. (В этом выражении не учитываются дифракционные явления вдоль координаты η .)

Из (5) видно, что выходное изображение представляет результат действия N каналов, разнесенных по вертикальной координате, в каждом из которых формируется изображение отдельной спектральной составляющей с амплитудами и фазами, определяемыми спектром анализируемого сигнала. При этом о пространственной фазе отдельной спектральной составляющей можно судить по расстоянию от ближайшего максимума синусоидального распределения интенсивности света до выбранного начала отсчета.

Зафиксировав выходное изображение на фотопленку, можно осуществить измерения расстояния любыми известными методами. Основными достоинствами такого метода являются его простота и высокая надежность работы.

Рассмотрим практическую схему фазово-амплитудного спектрального анализатора (рис. 2). Система элементов, в которую входят лазер 1, коллиматоры 2 и 3, цилиндрические линзы 4, 6, вертикальная щель 5, формирует пространственно-однородную сходящуюся цилиндрическую волну

$$A(x, y) = \frac{f}{d} e^{i \frac{\hbar}{2d} x^2} \text{rect} \left(\frac{y}{l_2} \right) \quad (6)$$

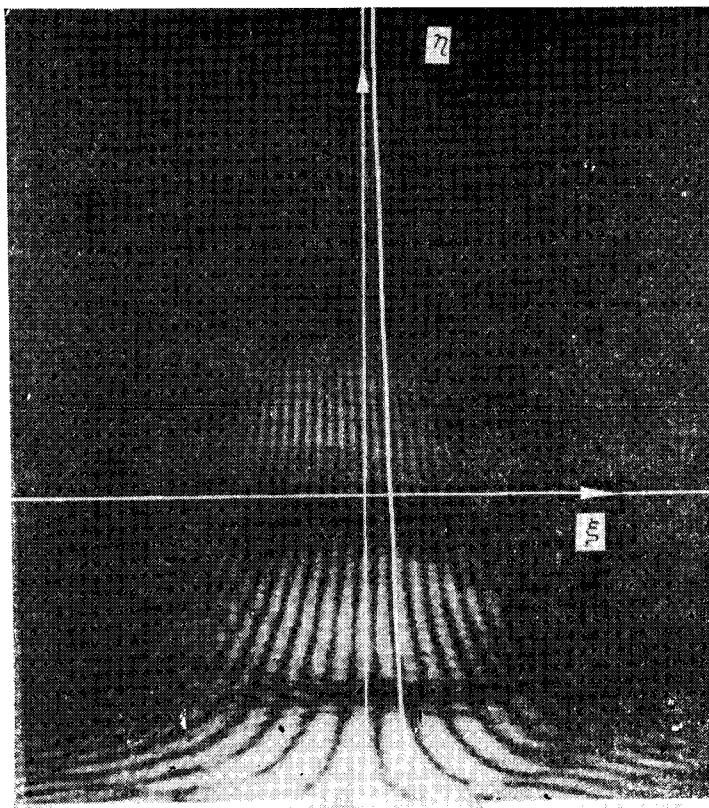


Рис. 3. Спектр щели в выходной плоскости анализатора.

фильтром, так как набег фаз для двух симметрично расположенных спектральных составляющих $u = \pm u_0$ одинаков.

В результате фильтрации в выходной плоскости анализатора формируется изображение, показанное на рис. 3. На этом рисунке вертикальная ось η является осью частот, а горизонтальная ξ — пространственной координатой сигнала.

Полученное изображение обладает следующими характерными особенностями:

1. Интенсивность изменяется по координате η как функция $\sin^2 \eta/\eta^2$, при этом видны характерные провалы интенсивности.
2. Область интерференции уменьшается вдоль горизонтальной координаты ξ с ростом пространственной частоты.

Для того чтобы объяснить последнее обстоятельство, следует учесть следующее: во-первых, в плоскости II в каждом из каналов формируется свертка входного изображения, ограниченного интервалом частот, попадающих в отдельный канал, с импульсной характеристикой оптической системы 4 (см. рис. 1), так что размеры выходного изображения по горизонтальной координате представляют собой величину порядка ширины входной щели, во-вторых, так как интенсивность спектра сигнала на низких частотах значительно выше, чем интенсивность высокочастотных составляющих, в низкочастотных каналах удастся зафиксировать области изображения, являющиеся результатом свертки входного изображения с боковыми лепестками импульсной характеристики.

3. Максимумы интенсивности отдельных спектральных составляющих располагаются вдоль гипербол, асимптотами которых являются

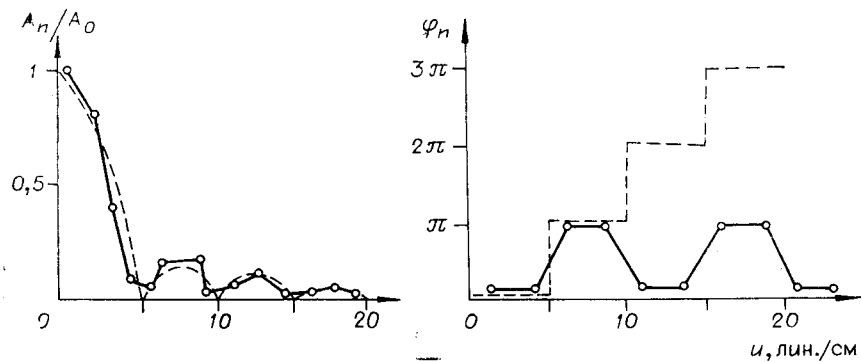


Рис. 4. Результаты измерения амплитудного и фазового спектров щелки (штриховая линия — теоретическая кривая).

оси η и ξ , если фазы спектральных составляющих равны. Это обстоятельство — следствие специальной конструкции фильтра 8. Отклонение максимума интенсивности от положения на гиперболе будет характеризовать изменение пространственной фазы спектральной составляющей. Для измерения фазового спектра сигнала использовалась следующая методика: выходной сигнал фиксировался на фотопленку (коэффициент контрастности выбирался равным приблизительно единице). Дальнейшие измерения осуществлялись с помощью микрофотометра. Измерения проводились относительно координат выбранной гиперболы. Выбор гиперболы, относительно которой осуществлялся отсчет, эквивалентен выбору начала отсчета.

Результаты измерений приведены на рис. 4. На этом же рисунке показаны результаты вычисления фазового спектра аналогичного сигнала, полученного в [3]. Отличие измеренного и вычисленного спек-

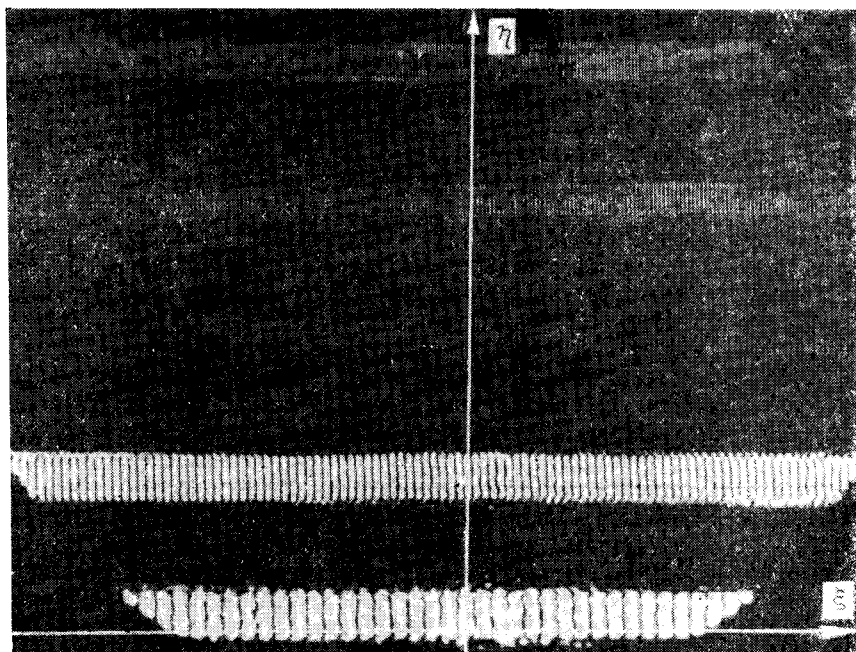


Рис. 5. Спектр решетки в выходной плоскости анализатора.

ров объясняется тем, что наш метод измерения позволяет измерять значение фазы меньше 2π .

Вторым из исследуемых сигналов была прямоугольная дифракционная решетка

$$f(x, y) = \sum_{n=0}^N \text{rect}\left(\frac{y}{l_2}\right) \text{rect}\left(\frac{x - \frac{4}{3}nD}{D}\right),$$

помещенная симметрично во входном окне анализатора. Выходное изображение, полученное в этом случае (рис. 5), несколько отличается от приведенного на рис. 3. Так как выходное изображение имеет ширину порядка входного окна, ограничения выходного изображения на горизонтальной координате не попадают в поле зрения микроскопа, с помощью которого осуществляется наблюдение. Ограничение поля зрения приводит также к тому, что гиперболы, вдоль которых располагаются максимумы интенсивности на наблюдаемом участке, можно аппроксимировать прямыми линиями.

Выходное изображение второго исследуемого сигнала представляет собой последовательность убывающих по амплитуде гармоник основной пространственной частоты решетки. Результаты измерения фазового спектра, проведенного тем же методом, что и для первого сигнала, приведены на рис. 6.

Точность, полученная при измерении амплитудного спектра, совпадает с точностью, которая обеспечивается стандартной методикой измерений с помощью когерентных анализаторов пространственного спектра. То же самое можно сказать и о точности измерения спектра пространственных фаз сигнала. Основные ограничения на точность измерения накладывает спекл-шум.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В. А. Кудрявцеву за полезные советы, высказанные им в процессе разработки анализатора.

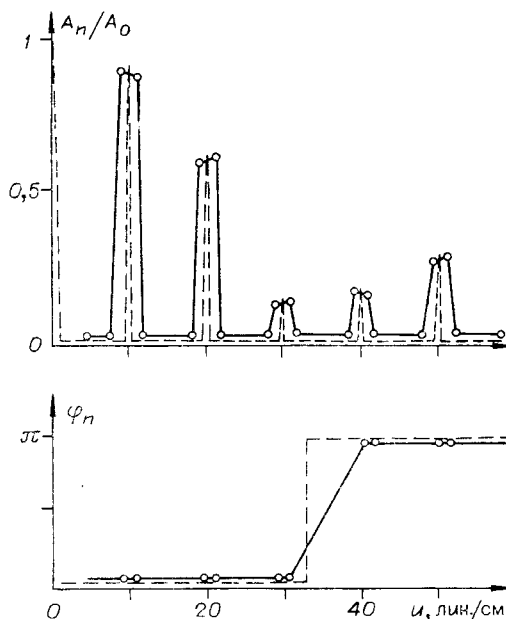


Рис. 6. Результат измерения амплитудного и фазового спектров решетки (штриховая линия — теоретическая кривая).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудмен Г. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
2. Горский С. М., Зверев В. А., Матвеев А. Л. О пространственной фильтрации с помощью когерентно-оптической системы. — «Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика», 1977, т. 20, № 4.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., «Сов. радио», 1967.

Поступила в редакцию 1 июня 1977 г.;
окончательный вариант — 22 ноября 1978 г.