

УДК 621.317.36: [535.241.13:534] : 621.373.826

Гибридный акустооптоэлектронный спектроанализатор высокого разрешения с синтезированной апертурой. Водоватов И.А., Высоцкий М.Г., Каасик В.П., Пучков В.А., Рогов С.А., Самсонов В.Г. // Научное приборостроение. Методы и приборы биотехнологии. Л.: Наука, 1988, с.56.

Рассмотрен принцип действия и проведено исследование возможности создания прибора. Показано, что за счет голографической регистрации N реализаций спектра в акустооптической схеме с последующим их когерентным сложением в цифровой ЭВМ можно в N раз увеличить разрешающую способность устройства. Проведено математическое моделирование машинного восстановления голограмм спектров и эксперименты в статическом режиме с использованием фотолитографических масок. Лит. - 5 назв., ил. - 4.

ГИБРИДНЫЙ АКУСТООПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Акустооптические (АО) спектроанализаторы принадлежат к числу наиболее перспективных приборов оптической обработки сигналов [1]. Быстродействие, возможность параллельного анализа многих сигналов, относительная простота и дешевизна создают им преимущества перед радиоэлектронными аналогами. Вместе с тем, разрешающая способность АО спектроанализаторов для ряда применений оказывается недостаточной. Существует несколько путей улучшения разрешающей способности АО спектроанализаторов. Среди них следует указать применение схем со "свернутым" спектром [2], схем с временным интегрированием [3].

Нами проведено исследование возможности создания АО спектроанализаторов с высоким разрешением, работающего по принципу синтеза апертуры модулятора. Синтез апертуры обеспечивается голографической регистрацией ряда реализаций спектра сигнала "парциальных" спектров в АО схеме с пространственным интегрированием с последующим их восстановлением и когерентным оложением в ЭМ. При этом разрешающая способность прибора увеличивается в число раз, равное числу зарегистрированных реализаций спектра.

Принцип работы прибора

Как известно [4], если в переднюю фокальную плоскость объектива L поместить АО модулятор, на который подан радиосигнал $\Phi(t)$ (рис.1) и осветить его пучком когерентного света с плоским фазовым фронтом и равномерным распределением амплитуды, то при соответствующих условиях поле в задней фокальной плоскости $U_L(f_x)$ в первом дифракционном порядке будет определяться выражением

$$U_L(f_x) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \Phi(x) e^{-j2\pi f_x x} dx, \quad (1)$$

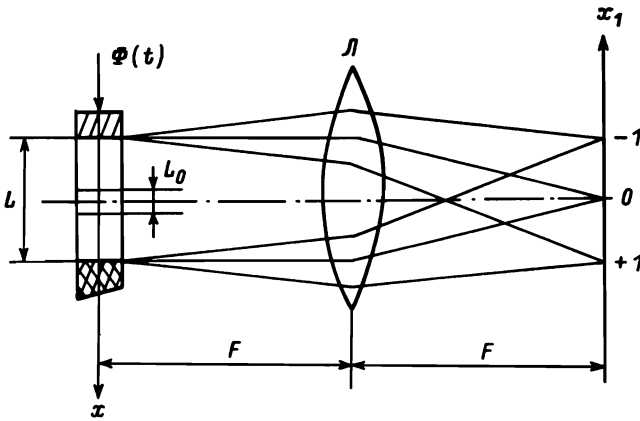


Рис.1. К пояснению принципа синтезирования апертуры модулятора

где L – длина апертуры модулятора; $\Phi(x)$ – исследуемый сигнал, рассматриваемый как функция координаты x ; $f_x = \frac{x_1}{\lambda F}$ – пространственная частота; x_1 – координата в задней фокальной плоскости объектива; F – фокусное расстояние объектива; λ – длина волны света. Распределение $U_L(f_x)$ соответствует спектру радиосигнала, подаваемого на пьезопреобразователь модулятора.

Мысленно разделим апертуру модулятора на N равных частей размером $L_0 = \frac{L}{N}$ и представим распределение света $U_L(f_x)$ от всего модулятора в виде суммы распределений от отдельных частей. Тогда формула (1) получит вид:

$$U_L(f_x) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \int_{(n-\frac{1}{2})L_0}^{(n+\frac{1}{2})L_0} \Phi(x) e^{-j2\pi f_x x} dx. \quad (2)$$

Вводя обозначения $x_n = x - nL_0$, $\Phi(x) = \Phi_n(x_n)$, получим из формулы (2)

$$U_L(f_x) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} e^{-j2\pi f_x nL_0} U_n(f_x), \quad (3)$$

где

$$U_n(f_x) = \int_{-L_0/2}^{L_0/2} \Phi_n(x) e^{-j2\pi f_x x} dx$$

Поскольку сигнал $\Phi(x)$ перемещается вдоль оси x со скоростью ультразвука в звукопроводе модулятора V , то распределения $U_n(f_x)$ можно рассматривать как реализации спектра сигнала, регистрируемые в схеме с модулятором длиной L_0 через интервалы времени $\Delta t = L_0/V$. Таким образом, выходное распределение поля в спектроанализаторе с апертурой модулятора L выражается через сумму последовательно регистрируемых выходных распределений "парциальных" спектров спектроанализатора, модулятор которого имеет в N раз меньшую апертуру. Учитывая это соотношение, можно с помощью АО модулятора с апертурой L_0 последовательно зарегистрировать N "парциальных" спектров сигнала и сложить их с нужными фазами в соответствии с выражением (3). Полученное в результате распределение поля будет соответствовать выходному сигналу спектроанализатора, у кото-

рого модулятор имеет синтезированную апертуру в N раз большую размеров реального модулятора и позволяет, благодаря этому, достичь в N раз лучшего разрешения.

С х е м а у с т р о й с т в а

Основу оптической части спектроанализатора, работающего в соответствии с рассмотренным принципом, (рис.2) составляет голографическая схема записи фурье-спектра радиосигнала, находящегося в апертуре модулятора, что позволяет сохра-

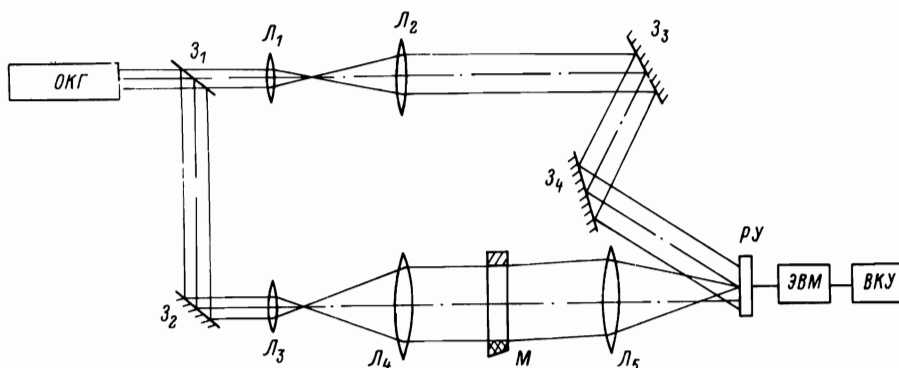


Рис.2. Функциональная схема акустооптоэлектронного спектроанализатора с синтезированной апертурой

нить информацию о его фазе. Схема аналогична описанной в работе [5] и включает в себя лазер (ОКГ), полупрозрачное зеркало ($З_1$), два коллиматора в каналах опорного и сигнального пучков объективы ($Л_1$, $Л_2$ и $Л_3$, $Л_4$ соответственно), интегрирующий объектив ($Л_5$) и несколько отражательных зеркал ($З_2$, $З_3$, $З_4$). Эффективность регистрации голограмм спектров сигнала, вводимого в систему с помощью АО модулятора ($М$), обеспечивается за счет импульсной работы лазера. Длительность световых импульсов должна быть достаточно малой, так чтобы за время экспозиции интерференционная картина, регистрируемая в фокальной плоскости объектива $Л_5$, могла считаться неподвижной. Необходимо также, чтобы период повторения световых импульсов равнялся времени распространения ультразвука в модуляторе.

Как отмечалось в работе [5], требования к длительности светового импульса могут быть ослаблены, если применить схему с частичной компенсацией сдвига частоты. В этом случае в канал опорного пучка нужно поместить другой АО модулятор и для получения интерференционной картины использовать первый дифракционный порядок.

В качестве регистрирующего устройства ($РУ$) целесообразно использовать ПЗС-фотоприемник, позволяющий оперативно фиксировать распределения света и передавать информацию для обработки в ЭВМ. Функции ЭВМ в данной системе состоят в машинном восстановлении голограмм с записью реализаций спектра и их сложением с соответствующими фазовыми множителями. Для вывода результатов вычислений схему следует дополнить видеоконтрольным устройством (ВКУ): осциллографом, дисплеем и т.п.

Экспериментальное исследование проводилось в статическом режиме работы с использованием фотолитографических масок. В соответствии с рис.2, на базе прибора СИН-1 была собрана голографическая схема. Источником когерентного света служил He-Ne лазер $\lambda = 0,63$ мкм. Для имитации двух радиосигналов с отличающимися частотами использовалась пара дифракционных решеток, наклоненных относительно друг друга. Регулировка угла наклона позволяла моделировать изменение частотного расстояния между сигналами. В качестве фотоприемника использовалась ПЭС-линейка типа ЦД-1 с числом элементов, равным 1024, связанная через спецпроцессор с микроЭВМ "Электроника-60". Результаты обработки сигналов выводились на осциллограф.

На первом этапе экспериментов была отлажена программа машинного восстановления голограмм и их суммирования. С этой целью в память машины вводились предварительно рассчитанные данные о распределении интенсивности света в выходной плоскости устройства при наличии нескольких сигналов и опорного пучка. Программа позволяла вычислять амплитудные распределения спектров согласно предложенному в работе [6] методу по формуле

$$U_n(x_1) = \frac{2 \xi_m}{CR} \sum_{k=-M}^{k=M} I \left[\frac{k}{2(\xi_R + \xi_m)} \right] \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc} \left[2(\xi_R + \xi_m)x' - k \right] \cdot \text{sinc} \left[2 \xi_m (x_1 - x') \right] \times \\ \times \exp(j2\pi \xi_R x') dx',$$

где $I[\cdot]$ – распределение интенсивности светового поля в голограмме; ξ_m – максимальная пространственная частота Фурье-образа информационного поля; ξ_R – пространственная частота опорного поля; R – амплитуда опорного поля; C – константа; k – индекс суммирования.

На втором этапе в машину вводилась информация непосредственно с ПЭС-фотоприемника. При этом программа была дополнена вспомогательными операциями, такими как компенсация фона, компенсация неравномерности опорного пучка и др.

На рис.3 и 4 приведены фотографии осциллограмм распределений поля, полученных в результате вычислений. Рис.3 иллюстрирует первый этап эксперимента – математическое моделирование синтеза апертуры модулятора. На рис.3, а представлен один из "парциальных" спектров сигнала, который включает шесть различных частот. На рис.3, б – результат суммирования десяти "парциальных" спектров того же сигнала. Фотографии рис.4 получены в эксперименте с фотолитографическими масками. Как видно из рис.4, б, в результате сложения десяти реализаций спектра удается разрешить сигналы, которые в отдельной реализации (рис.4, а) не разрешаются.

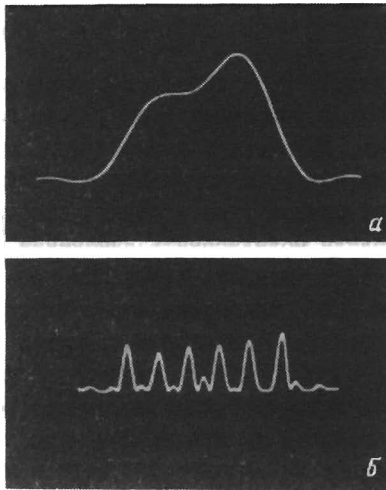


Рис.3. Результаты математического моделирования работы спектроанализатора. Осциллограммы "парциального" (а) и суммарного (б) спектров

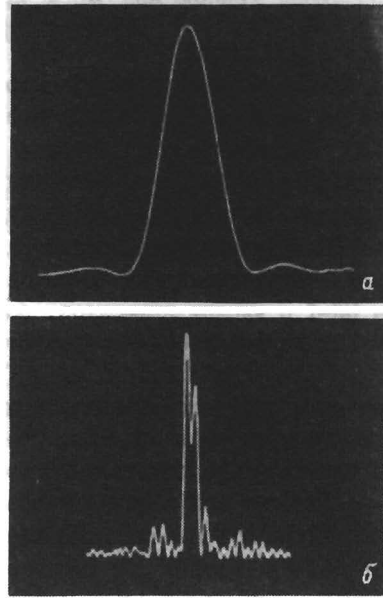


Рис.4. Результаты эксперимента в статическом режиме работы. Одна из реализаций спектра (а), сумма десяти реализаций (б)

Обсуждение результатов

Проведенное исследование подтвердило возможность создания акустооптоэлектронного спектроанализатора с синтезированной апертурой. Более подробный анализ показывает, что применение такого прибора целесообразно в случаях, когда, с одной стороны, обычные АО спектроанализаторы с пространственным интегрированием не удовлетворяют требованиям по частотному разрешению, а традиционные радиоэлектронные спектроанализаторы, с другой стороны, не обеспечивают необходимой скорости обработки информации. На наш взгляд, прибор наиболее перспективен для сигналов, у которых область вероятного появления велика по частоте, но фактический частотный спектр занимает малую часть указанной области. В этом случае АО часть прибора играет роль блока предварительной обработки, который позволяет в реальном масштабе времени по одной реализации грубо определить спектр сигнала и, таким образом, существенно сократить объем вычислений, выполняемых цифровой ЭВМ.

Практическая реализация прибора может быть осуществлена, например, на основе импульсного лазера на парах меди и АО модулятора на парателлурите. Данные исследования отечественных лазеров на парах меди свидетельствуют, что частота повторения световых импульсов может быть согласована со временем распространения ультразвука в существующих образцах модуляторов на парателлурите ($\Delta t \approx 60$ мкс), а длительность импульса лазера ($\tau \approx 10$ нс) позволяет регистрировать голограммы спектров сигналов, вводимых с помощью АО модулятора, с шириной частотной полосы порядка десятков мегагерц.

Оперативная запись серии световых распределений может быть реализована с помощью матричного ПЗС-фотоприемника, работающего в режиме с "открытой" строкой, при котором для регистрации оптического излучения используется лишь одна строка,

а остальные строки служат сверхоперативным запоминающим устройством.

В заключение авторы выражают благодарность проф. В. Ю. Петрунькину за постоянное внимание к работе и обсуждение ее результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ежов В. А., Тарасов Л. В. // Зарубежная радиоэлектроника, 1982, № 7, с. 3-35.
2. Thomas C. E. // Appl. Opt., 1966, V. 5, No. 11, p. 1782-1790.
3. Patent 3634749 USA. Acousto-optical signal processing system. Montgomery R. M., 1972.
4. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1969.
5. Арм, Кинг // Зарубежная радиоэлектроника, 1970, № 5, с. 37-48.
6. Wolf E. // Opt. Soc. Amer., 1970, V. 60, No. 1, p. 18-20.