

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.391 : 535.241.13 : 534

М. Г. Высоцкий, В. П. Каасик, С. А. Рогов

(Санкт-Петербург)

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АКУСТООПТОЭЛЕКТРОННЫЙ  
СПЕКТРОАНАЛИЗАТОР С ВРЕМЕННЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ

Рассмотрено устройство оптической обработки сигналов линзой антенной решетки. На его основе может быть создана система, позволяющая осуществлять обработку в реальном масштабе времени. Приведено описание принципа работы и конструкции устройства, а также данные эксперимента.

Среди когерентных оптических устройств обработки информации системы с временным интегрированием представляют особый интерес благодаря возможности их применения для обработки сигналов большой длительности. Это позволяет, в частности, конструировать на их основе спектроанализаторы с частотным разрешением порядка десятков—единиц герц [1, 2]. К настоящему времени создан и испытан ряд одноканальных акустооптоэлектронных (АОЭ) схем с временным интегрированием.

Новые возможности открывает использование многоканальных вариантов таких схем. Авторами было выполнено теоретическое и экспериментальное исследование нескольких многоканальных АОЭ-устройств с временным интегрированием, предназначенных для обработки сигналов линейных и кольцевых антенных решеток [3, 4]. Настоящая статья содержит результаты дальнейших исследований, проведенных в этом направлении. Ниже приводятся описание принципа действия, конструкции и данные испытаний одного из типов многоканального АОЭ-спектроанализатора.

Спектроанализатор, упрощенная схема которого публиковалась ранее (см. [3]), включает в себя два оптических тракта: сигнального и опорного пучков. В первом из них установлен многоканальный акустооптический модулятор (АОМ), на входы которого подаются сигналы с элементов линейной антенной решетки (АР). В тракте опорного пучка находятся два последовательно расположенных одноканальных АОМ, на которые поступают сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы). Когерентный свет от лазера дифрагирует на всех АОМ. После ряда оптических преобразований в выходной плоскости оптической системы возникает интерференция двух пучков. Выходной сигнал получается в результате временного интегрирования на фотодетекторе интенсивности этой интерференционной картины. Существенным для данного устройства является применение в тракте сигнального пучка астигматической системы линз. Эта система формирует в выходной плоскости изображение светового поля вдоль направления, параллельного осям каналов, и осуществляет фурье-преобразование вдоль ортогонального направления.

Пусть на входы многоканального АОМ от элементов линейной АР поступают сигналы, экспоненциальное представление которых имеет вид

$$\tilde{s}_n(t) = \tilde{s}(t) \exp[j\Omega(t - n\tau)],$$

где  $n$  — номер канала;  $t$  — время;  $\tilde{s}(t)$  — сигнал, соответствующий каналу с номером  $n = 0$ ;  $\Omega$  — круговая частота;  $\tau$  — временная задержка, зависящая от координаты источника сигнала. На первый и второй модуляторы опорного пучка подаются ЛЧМ-сигналы, равные соответственно

$$s_1(t) = \exp\{j[\omega_1 t + (a/2)t^2]\},$$

$$s_2(t) = \exp\{j[\omega_2 t + (a/2)t^2]\},$$

где  $\omega_1, \omega_2$  — круговые частоты сигналов в момент времени  $t = 0$ ;  $a$  — постоянный множитель. Световое поле в плоскости фотодетектора представляет собой сумму дифрагированных составляющих сигнального и опорного пучков. Можно показать, что амплитуда его равна

$$A(x, \varphi, t) \sim \tilde{s}[t - (x/v)] \Phi(\varphi) + \exp\{j[(\omega_1 - \omega_2)t + (\omega_1 + \omega_2)x/v + 2axt/v]\}, \quad (1)$$

где  $x$  — координата, параллельная осям каналов АОМ;  $v$  — скорость распространения ультразвука в АОМ; функция  $\Phi(\varphi)$  соответствует диаграмме направленности антенны (см. [3]);  $\varphi$  — координата в выходной плоскости оптической системы, перпендикулярная осям каналов АОМ. При написании формулы (1) учитывалось, что в тракте опорного пучка используются разные дифракционные порядки двух одноканальных АОМ.

Сигнал на выходе фотодетектора получается в результате интегрирования интенсивности интерференционной картины в течение времени  $T$ . Полезная составляющая сигнала имеет вид:

$$Z(x, \varphi) = \operatorname{Re}[\Phi(\varphi) \exp\{-j[(\omega_1 + \omega_2)x/v]\} \times \\ \times \int_0^T s[t - (x/v)] \exp[j(\omega_2 - \omega_1)t] \exp[-j2axt/v] dt]. \quad (2)$$

Выражение (2) по координате  $\varphi$  соответствует диаграмме направленности АР, а по координате  $x$  — спектру сигнала. Таким образом, данная система так же, как и ранее экспериментально исследованное устройство [3], позволяет осуществлять параллельный обзор пространства в координатах угол — частота.

Данная схема является более совершенной по сравнению с рассмотренной в [3]. Во-первых, в ней не требуется перемножать исследуемые и ЛЧМ-сигналы, что само по себе представляет сложную задачу в многоканальном варианте. Кроме того, из-за значительно большей широкополосности ЛЧМ-сигналов по сравнению с исследуемыми указанное перемножение приводит к резкому расширению полосы частот сигналов, подаваемых на многоканальный АОМ. Таким образом, в старом варианте схемы необходимо использование многоканальных АОМ с большой полосой рабочих частот. Изготовление таких АОМ требует значительных усилий. В данной схеме ЛЧМ-сигналы подаются на одноканальные АОМ, в которых гораздо проще обеспечить нужную широкополосность. И наконец, благодаря разнице частот сигналов, подаваемых на модуляторы опорного пучка, имеется возможность выбирать центральную частоту анализа сигнала.

Экспериментальное исследование спектроанализатора проводилось на макете, смонтированном на плите прибора СИН-1, с использованием стандартных оптико-механических деталей, а также специально изготовленных узлов. Схема оптической части макета представлена на рис. 1. В состав схемы входит лазер, призмный расширитель светового пучка (на рис. 1 не показаны), три АОМ, из которых два (АОМ<sub>1</sub> и АОМ<sub>2</sub>) одноканальные, а третий (АОМ<sub>3</sub>) многоканальный, четыре сферических объектива (Л<sub>1</sub>, Л<sub>2</sub>, Л<sub>4</sub>, Л<sub>5</sub>), два цилиндрических объектива (Л<sub>3</sub>, Л<sub>6</sub>), два пространственно-частотных фильтра (Ф<sub>1</sub>, Ф<sub>2</sub>),

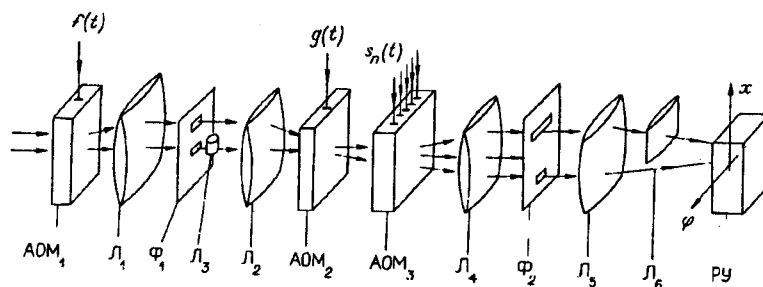


Рис. 1

регистрирующее устройство (PY). Модуляторы  $AOM_1$  и  $AOM_2$  служат для создания опорного оптического сигнала; модулятор  $AOM_3$  — для ввода в систему исследуемых сигналов. Пара сферических линз ( $L_1, L_2$ ) проецирует изображение модулятора  $AOM_1$  на модулятор  $AOM_2$ . Стоящий между ними пространственно-частотный фильтр  $\Phi_1$  пропускает недифрагированный пучок света (пучок нулевого порядка), прошедший через модулятор  $AOM_1$ , и один из пучков первого порядка. Цилиндрическая линза  $L_3$  расширяет пучок нулевого порядка в горизонтальном направлении (перпендикулярно осям каналов модулятора) для эффективного освещения многоканального модулятора  $AOM_3$ . Система линз  $L_4, L_5, L_6$  формирует требуемое распределение света сигнального и опорного пучков в плоскости фотодетектора: для сигнального пучка — изображение модулятора  $AOM_3$  вдоль вертикального направления и фурье-образ его прозрачности вдоль горизонтального, для опорного пучка — распределение с достаточной равномерностью амплитуды и заданным изменением частоты в области формирования светового пятна сигнального пучка. Пространственно-частотный фильтр  $\Phi_2$  обеспечивает пропускание требуемых дифракционных порядков сигнального и опорных пучков, а также экранирование паразитных засветок в плоскости фотодетектора.

В качестве источника когерентного света использован гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения  $0,63$  мкм. Модуляторы  $AOM_1$  и  $AOM_2$  на молибдате свинца имеют частотный диапазон работы в области  $120 \div 200$  МГц; модулятор  $AOM_3$  на стекле —  $25 \div 40$  МГц. Выходные оптические сигналы регистрируются с помощью телевизионной камеры. Предусмотрены возможность наблюдения световых распределений через микроскоп и их фотографирование.

При проведении эксперимента сигналы, подаваемые на многоканальный модулятор  $AOM_3$ , формировались с помощью имитатора сигналов линейной АР, который включал в себя высокочастотный генератор типа Г4-158, линии задержки и усилители. Средняя частота генератора составляла  $30$  МГц. Число задействованных каналов АОМ равнялось  $5$ .

На модуляторы тракта опорного пучка  $AOM_1$  и  $AOM_2$  подавались ЛЧМ-сигналы с линейной частотной модуляцией, сформированные с помощью генераторного блока прибора Х1-42, смесителя и второго генератора Г4-158. Средняя частота ЛЧМ-сигналов равнялась  $160$  и  $130$  МГц, девиация —  $10$  МГц.

Для проверки возможности обработки сигналов от линейной АР в данной системе на входы модулятора  $AOM_3$  от имитатора подавались сигналы, частота которых была одной и той же для всех каналов модулятора. Разность фаз сигналов, подаваемых на соседние входы АОМ, была одинаковой для всех пар сигналов и менялась в соответствии с имитируемой угловой координатой источника сигнала. Для проверки возможности работы устройства в качестве спектроанализатора менялась частота сигналов, подаваемых на входы  $AOM_3$ . На входы модуляторов  $AOM_1$  и  $AOM_2$  подавались ЛЧМ-сигналы для создания опорного пучка.

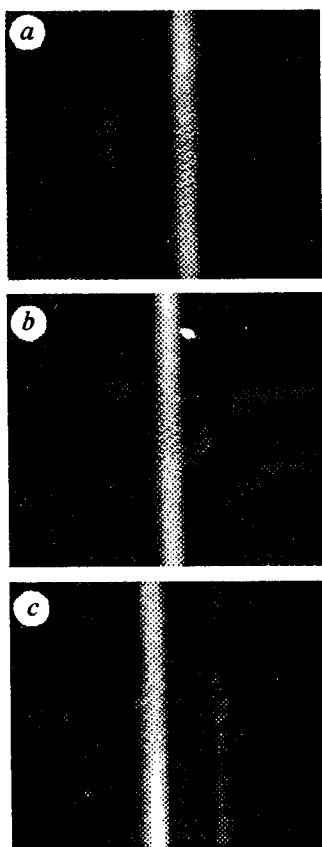


Рис. 2

Как показали наблюдения, осуществлявшиеся с помощью микроскопа и телевизионной камеры, распределение света в выходной плоскости по горизонтальной координате соответствовало диаграмме направленности линейной АР, состоящей из 5 элементов. Изменение соотношения фаз между сигналами, подаваемыми на соседние каналы АОМ<sub>3</sub>, приводило к перемещению максимума распределения вдоль горизонтальной координаты. Изменение же частоты сигнала вызвало перемещение центра распределения света вдоль вертикальной координаты. В данном случае центр светового пятна определялся как участок с максимальной контрастностью интерференционной картины так же, как в одноканальных спектроанализаторах с интегрированием во времени.

В качестве примера на рис. 2 приведены световые распределения в выходной плоскости для трех значений разности фаз сигналов, подаваемых на соседние каналы АОМ<sub>3</sub>. Рис. 2, *b* соответствует синфазным сигналам, рис. 2, *a*, *c* — разнице фаз  $+90^\circ$  и  $-90^\circ$  соответственно. На фотографиях можно видеть изменение положения максимума светового распределения по горизонтали. Аналогичные эксперименты, проводившиеся при изменении частоты подаваемых на АОМ<sub>3</sub> сигналов, показали, что разрешение по частоте составляло 50 Гц. Это значение совпадает с теоретическим для использованного в измерениях времени накопления, равного 20 мс.

Были выполнены также эксперименты по последетекторной обработке изображений, которые позволили выделить полезную составляющую сигнала на фоне постоянного смещения и получить огибающую сигнала.

Проведенное исследование показало возможность использования многоканальной АОЭ-схемы с временным интегрированием для обработки сигналов линейной АР. На ее основе может быть создана система, позволяющая в реальном масштабе времени осуществлять обзор пространства в координатах угол — частота.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность В. С. Дуньковичу за помощь в выполнении экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родес У. Т. Акустооптическая обработка сигналов: свертка и корреляция // ТИИЭР. 1981. 89, № 1.
2. Терпин Т. М. Спектральный анализ сигналов оптическими методами // Там же.
3. Высоцкий М. Г., Каасик В. П., Рогов С. А. Исследование многоканальных акустооптических устройств с временным интегрированием для обработки сигналов антенных решеток // Автометрия. 1991. № 2.
4. Высоцкий М. Г., Каасик В. П., Рогов С. А. Многоканальный акустооптический коррелятор с интегрированием во времени для обработки сигналов антенных решеток // Автометрия. 1991. № 3.

Поступило в редакцию 7 декабря 1994 г.