

ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

*Н. А. Есенкина, Г. М. Блаер, Э. В. Дравских,
А. А. Жуков, И. И. Саенко*

Приводятся результаты исследования широкополосного акустооптического спектроанализатора, а также описание отдельных его элементов, в частности модулятора света. Спектроанализатор имеет полосу анализа 270—300 МГц и частотное разрешение около 0.9 МГц. Он выполнен на основе акустооптического модулятора со звукопроводом из ниобата лития (LiNbO_3) и ПЗС-фотоприемников, содержащих 500 или 1024 элементов. Для обработки сигналов спектроанализатора используется ЭВМ «Электроника-100И». Указывается, что примененный в модуляторе метод возбуждения упругой волны позволяет получить полосы анализа до 1 ГГц при работе на сдвиговых волнах и еще более широкие полосы при работе на продольных упругих волнах.

It is presented the results of an investigation of the broadband acousto-optic spectrum analyzer and also the description of separate units in particular of the light modulator. The bandwidth of analysis of the spectrum analyzer is about 270—300 MHz and frequency resolution is about 0.9 MHz. An acousto-optic modulator with LiNbO_3 acoustic line and CCD photoreceivers containing 500 or 1024 elements were used. For data processing the «Electronic-100И» was used. It is shown that the used method of an elastic wave excitation permits to obtain bandwidths up to 1GHz and broader depending on the type of elastic waves.

1. В радиоастрономии большую роль играет исследование монохроматического излучения галактических источников, так как спектральные линии несут в себе значительно больше информации, чем непрерывный спектр; в частности, исследование профилей дает возможность изучать движение излучающих объектов, а отсутствие поглощения в межзвездной среде в радиодиапазоне обеспечивает возможность исследования Вселенной до очень больших расстояний.

Эра спектральных наблюдений в радиоастрономии началась с 1951 г., когда была открыта линия нейтрального водорода $\lambda=21$ см.

Используемые до настоящего времени спектральные приемники имели сравнительно узкие полосы анализа — единицы и десятки мегагерц. С их помощью исследовались распределение и характер движения нейтрального водорода ($\lambda=21$ см), ионизованного водорода (рекомбинационные линии возбужденного водорода) в нашей Галактике, излучение гидроксила, формальдегида, мазерное излучение и т. д.

В последнее время в связи с развитием акустооптики появилась возможность создания новых широкополосных акустооптических спектрографов с полосами анализа в сотни мегагерц. Применение таких спектрографов открывает большие возможности для спектральных исследований в радиоастрономии и позволит решить ряд новых задач, представляющих большой интерес для исследования Вселенной [1]. Прежде чем переходить к результатам исследования разработанных нами широкополосных спектроанализаторов, на основе которых могут быть созданы акустооптические спектрографы для радиоастрономии, кратко рассмотрим такие задачи.

2. К задачам, для решения которых требуются широкие полосы анализа, относятся следующие.

а) Исследование в рекомбинационных линиях возбужденного водорода ядра нашей Галактики, где наблюдаются высокоскоростные потоки газа (≥ 200 км/с) и ширины линий составляют на сантиметровых волнах десятки мегагерц [2, 3].

б) Исследование в рекомбинационных линиях возбужденного водорода радиогалактик и квазаров. В настоящее время эти линии обнаружены в излучении в двух относительно близких галактиках M 82 и NGC 253 и, возможно, в спиральной галактике NGC 4631 [4, 5]. Наблюдения показали, что излучение в линиях — вынужденное излучение от ионизованного газа, окружающего яркое радиоядро. В работе [6] показано, что в компактных радиоисточниках, отождествляемых с галактиками и квазарами и имеющих спектры с низкочастотной точкой перегиба в области высоких частот (≥ 5 ГГц), могут быть обнаружены линии возбужденного водорода в поглощении, если завал спектральной характеристики обусловлен поглощением излучения компактного источника ионизованным водородом, расположенным около источника. Обнаружение таких линий позволило бы надежно выделить тепловую компоненту, определить плотность, температуру, характер движений ионизованного водорода в радиогалактиках. Ширины указанных линий составляют на сантиметровых волнах десятки мегагерц.

в) Одновременное исследование двух соседних рекомбинационных линий возбужденного водорода от одного и того же объекта. Наблюдение таких линий от радиогалактик и квазаров даст метод определения красного смещения без предварительного оптического отождествления, что весьма важно для очень удаленных объектов. Кроме того, можно показать, что, наблюдая две рекомбинационные линии от одной и той же туманности в нашей Галактике, можно (решая систему уравнений) из полной ширины линии выделить ту часть, которая обусловлена эффектами давления. Другим каким-либо способом это сделать невозможно. Выделение этой компоненты сразу даст метод непосредственного определения электронной плотности в туманности. Причем, если из наблюдений непрерывного спектра получаем значение электронной концентрации, относящееся к самым ярким центральным областям туманности, здесь имеем значение, относящееся к тем частям туманности, которые ответственны за излучение рекомбинационных линий. В плотных ярких туманностях это излучение из-за эффектов насыщения с увеличением длины волны имеет тенденцию относиться все более и более к тем областям, где мера эмиссии и, следовательно, электронная концентрация малы. Таким образом, такое исследование не только даст возможность непосредственно определять электронную концентрацию в туманности, но позволит изучать степень ее неоднородности. Для таких исследований нужны спектрографы с полосами анализа, превышающими расстояние между соседними линиями, которое составляет на сантиметровых волнах сотни мегагерц.

г) Исследование молекулярных линий миллиметрового диапазона. Наблюдение межзвездных молекул даст возможность построить детальную картину распределения и динамики газовых масс в Галактике. Исследование нейтрального водорода не дает полного представления об этом, так как преобладающая доля водорода в газовой-пылевой комплекс находится в форме молекул H_2 , которые в радиодиапазоне не могут быть обнаружены. Методами радиоастрономии в настоящее время обнаружено около 50 межзвездных молекул. Молекулы играют важную роль в охлаждении облаков межзвездного газа, следовательно, исследование молекулярных линий приведет к лучшему пониманию процесса звездообразования. Ширины молекулярных линий миллиметрового диапазона составляют сотни мегагерц [4].

д) Исследование межпланетных мерцаний источников. Это исследование даст возможность изучать нерегулярности межпланетной среды. Здесь нужны спектрографы с полосами анализа в октаву [7].

е) Обнаружение радиолиний на Солнце. До сих пор на Солнце не наблюдается ни одной радиолинии, хотя теоретически предсказана возможность обнаружения различных радиолиний. Это рекомбинационные линии возбужденного водорода в излучении на волнах короче 1 мм [8], линия возбужденного водорода в поглощении на волне 3.04 см, образующаяся при переходах между компонентами тонкой структуры второго квантового состояния водорода $2P_{3/2}^2 - 2S_{1/2}^2$ [9], циклотронные линии и высокочастотные уступы [10], которые отражают характер теплового циклотронного радиоизлучения нейтральных токовых слоев в верхней хромосфере и короне. Обнаружение радиолиний на Солнце

дало бы возможность определять температуру и электронную концентрацию в атмосфере Солнца, а также магнитное поле и тепловые скорости электронов. Для обнаружения радиолиний на Солнце необходимы спектрографы с полосами анализа 1000 МГц и более. Именно необходимость таких широких полос была до последнего времени основным препятствием для попыток обнаружения радиолиний на Солнце. Лишь с появлением акустооптических спектроанализаторов, которые, как показано ниже, позволяют получить столь широкие полосы анализа, возможность наблюдения радиолиний на Солнце стала реальной.

3. Перейдем теперь к описанию макета акустооптического спектроанализатора, который позволяет получить полосы, необходимые для решения перечисленных выше задач. При разработке и исследовании спектроанализатора основное внимание уделялось наиболее важным вопросам: обеспечению широкой полосы анализа и проверке возможности работы спектроанализатора с выпускаемыми в настоящее время ПЗС-фотоприемниками и его стыковки с ЭВМ. Необ-

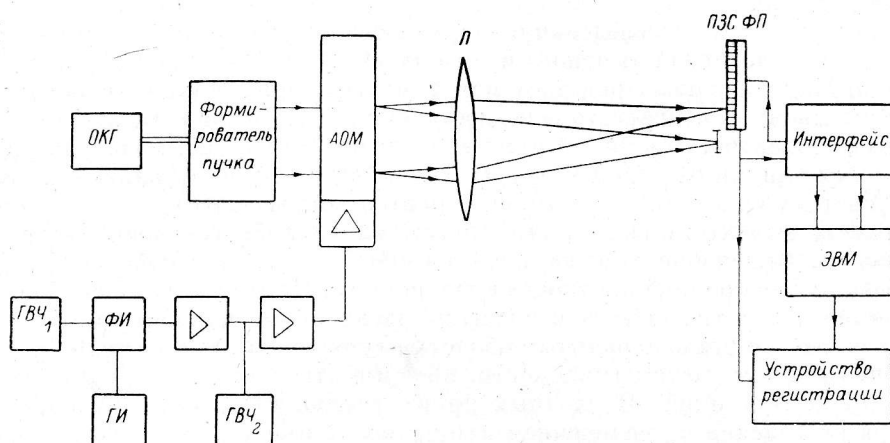


Рис. 1. Схема макета спектроанализатора.

ходимость в такой проверке была связана с тем, что широкополосные, высокочувствительные, акустооптические модуляторы имеют обычно более низкую дифракционную эффективность, чем использованные нами ранее низкочастотные модуляторы [11].

Спектроанализатор выполнен по обычной схеме (рис. 1) и состоит из источника когерентного излучения (ОКГ), формирователя оптического пучка, акустооптического модулятора (АОМ), интегрирующей линзы (Л), линейного ПЗС-фотоприемника, управляемого либо от автономного устройства управления, либо через специальный интерфейс от ЭВМ, и устройства регистрации выходных данных. На рис. 1 изображены, кроме того, электронные блоки: генераторы высокой частоты (ГВЧ), генератор импульсов (ГИ), формирователь импульсов (ФИ) и усилители, — которые позволяли формировать различные входные сигналы.

Источником излучения служит гелий-неоновый лазер мощностью 15 мВт. Формирователь пучка состоит из 2 цилиндрических линз и дает на выходе параллельный пучок с соотношением размеров в поперечном сечении 1 : 4, что соответствует соотношению размеров световой апертуры модулятора и позволяет устранить потери света. Интегрирующая линза Л с фокусным расстоянием $f = 250$ мм формирует в выходной фокальной плоскости, где расположена линейка ПЗС, распределение интенсивности, соответствующее спектру мощности входного сигнала АОМ [12].

4. Для ввода радиосигналов в спектроанализатор используется акустооптическая ячейка, которая представляет собой единую гибридную схему, включающую в себя акустооптический модулятор света, широкополосный усилитель ВЧ-сигналов и устройство электрического согласования модулятора с усилителем. Внешний вид акустооптической ячейки с модулятором представлен на

рис. 2. В левой части фотографии виден модулятор и оптическое окно звукопровода, которое имеет размеры 2×8 мм.

Акустооптический модулятор выполнен на основе кристалла ниобата лития с ортогональной ориентацией кристаллографических осей X, Y, Z относительно

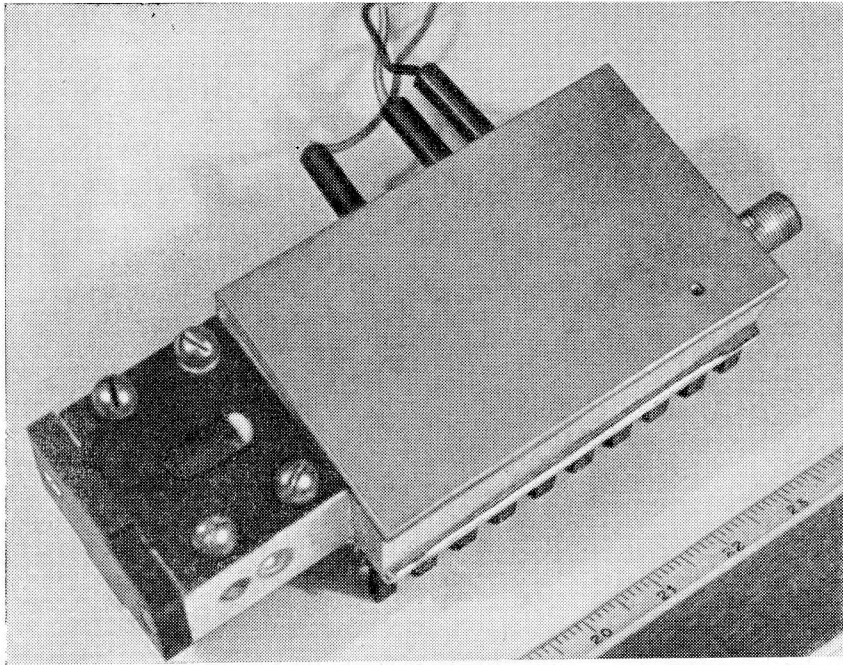


Рис. 2. Внешний вид акустооптической ячейки.

граней кристалла. Оптическая ось совпадает с направлением оси Y , а возбуждение объемных сдвиговых акустооптических волн в направлении оси Z осуществляется с поверхности кристалла с помощью встречно-штыревой структуры, электроды которой ориентированы вдоль оси X . Электрическое согласование нерезонансного встречно-штыревого преобразователя с усилителем осуществляется согласующим устройством, выполненным на поверхности кристалла и составляющим единое целое с системой возбуждения. Система возбуждения и согласования нанесена на поверхность кристалла методом фотолитографии, что позволяет изготавливать разработанные модуляторы с помощью стандартного технологического оборудования.

Достоинством рассмотренной акустооптической ячейки является ее широкополосность. На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики акустооптического модулятора, определяющие зависимость эффективности дифракции от частоты при различных углах падения оптического излучения на модулятор (кривые 1 и 2). Оптимальный угол брэгговского акустооптического взаимодействия подбирался по форме амплитудно-частотной характеристики и соответствовал кривой 1. Как видно из этой кривой, центральная рабочая частота модулятора равна $F=850$ МГц, а полоса частот по уровню 3 дБ составляет $\Delta F=380$ МГц. Эффективность дифракции I_1/I_0 в полосе составляет около 0.1% при мощности возбуждения $P=(100 \div 200)$ мВт.

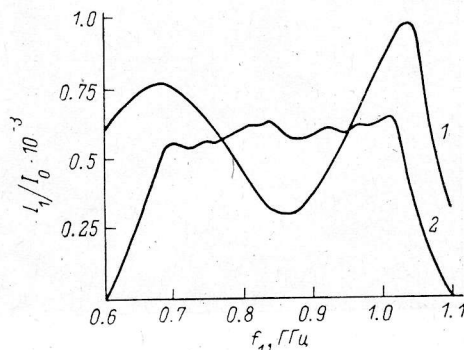


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики акустооптической ячейки.

Анализ характеристик разработанных нами акустооптических модуляторов с встречно-штыревыми преобразователями объемных упругих волн, выполненных на ниобате лития, позволил установить, что диапазон рабочих частот ограничивается возможностями фотолитографии и простирается до 2.5 ГГц для

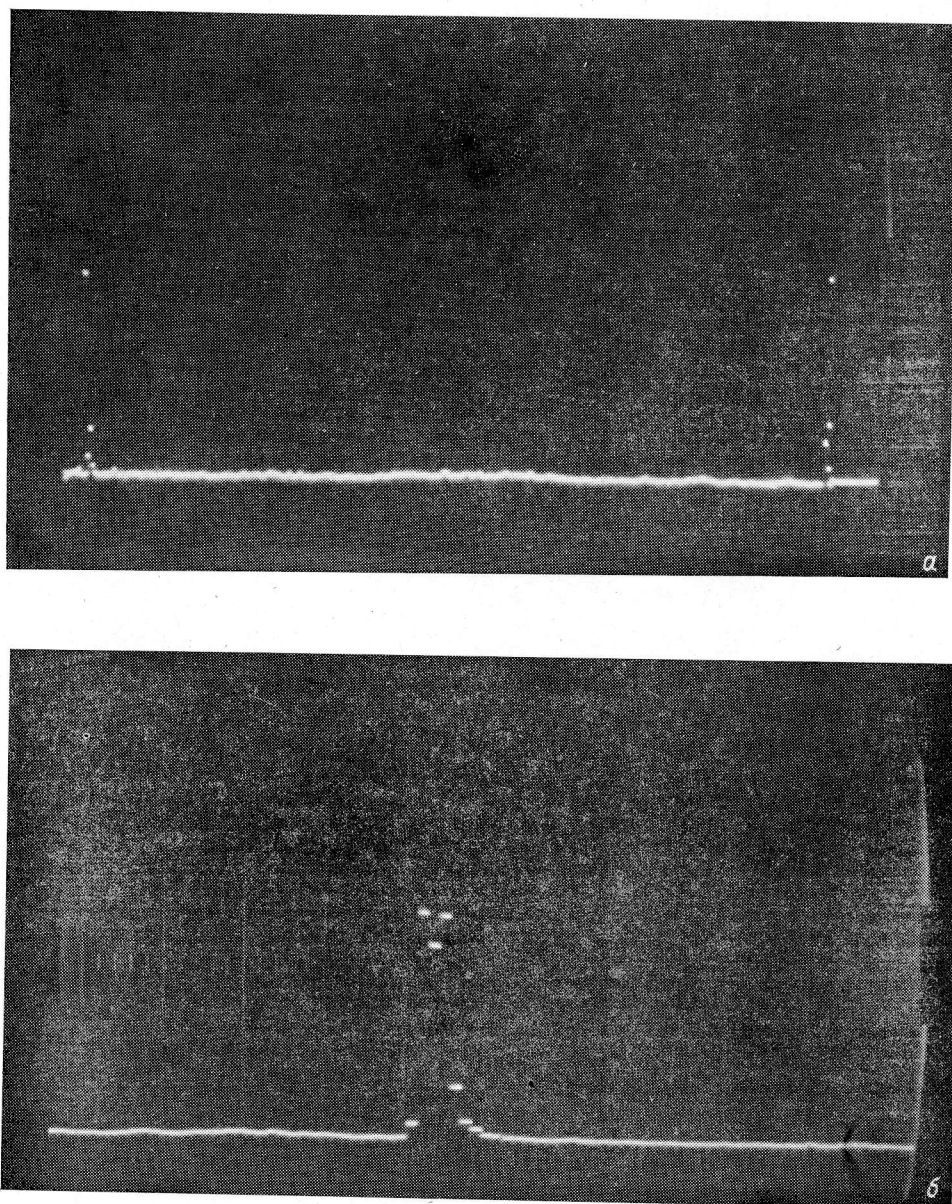


Рис. 4. Выходной сигнал спектроанализатора с 500-элементной линейкой ПЗС при подаче на вход двух гармонических сигналов.

а — $F_1=750$ МГц, $F_2=1024$ МГц; *б* — $F_1=849$ МГц, $F_2=850$ МГц.

сдвиговых и 5.8 ГГц для продольных акустооптических волн. При этом полоса модуляторов, работающих на сдвиговых волнах, может достигать 1 ГГц, а при работе на продольных волнах — до 2 ГГц.

На столь высоких частотах частотное разрешение, а следовательно, и число разрешимых точек или число частотных каналов спектроанализатора ограничивается затуханием акустооптических волн в звукопроводе модулятора. Предельно достижимые величины для частотного разрешения и числа каналов при

указанных выше полосах составляют 1 МГц и 1000 каналов для сдвиговых волн и 0.4 МГц и 5000 каналов для продольных акустооптических волн. Дифракционная эффективность изготовленных и исследованных нами акустооптических модуляторов со встречно-штыревыми преобразователями, рассчитанных на работу

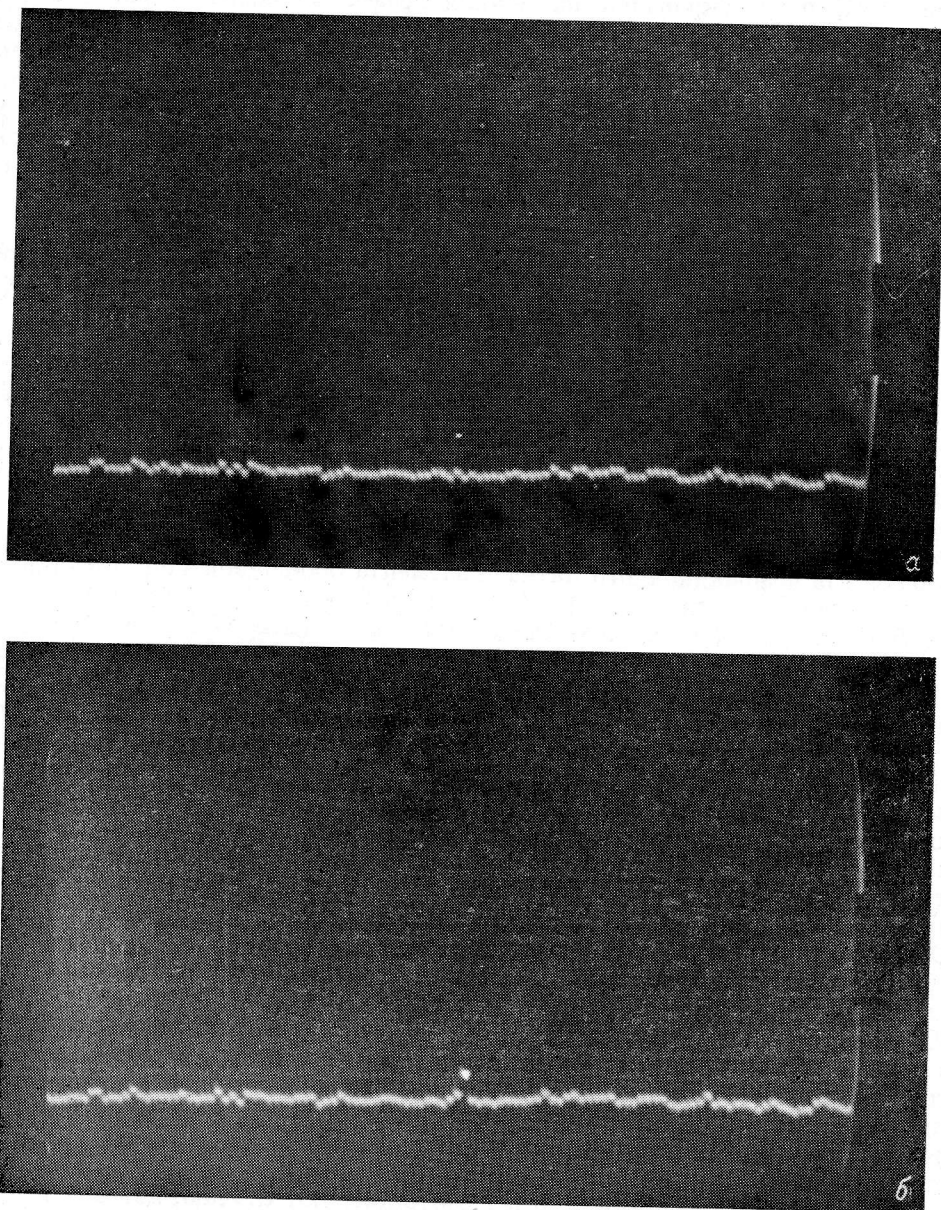


Рис. 5.

a — сигнал фона на выходе спектроанализатора при отсутствии входного сигнала; *б* — выходной сигнал спектроанализатора при подаче на вход одиночного импульса длительностью $\tau_{\text{имп}}=3$ мкс, на частоте $F=850$ МГц.

в полосе 1 ГГц, составила 0.3%/Вт. Для использования таких модуляторов в макетах широкополосных спектроанализаторов необходимо разработать усилители, работающие в полосе 1—2 ГГц и имеющие выходную мощность $P_{\text{вых}} \approx 500$ мВт.

5. В качестве выходного устройства спектроанализатора использовались линейные ПЗС-фотоприемники 2 типов: 500-элементный с размерами элементов 24×200 мкм и фотоприемник с числом элементов 1024 и размерами элементов

15×15 мкм. Управление работой 500-элементной линейки ПЗС осуществлялось от автономного устройства управления, схема которого аналогична рассмотренной в [13]. Устройство управления позволяло изменять время накопления в элементах ПЗС от 1 до 100 мс. Выходной сигнал, снимаемый с 500-элементной линейки ПЗС, регистрировался на осциллографе. Управление работой 1024-элементной линейки ПЗС производилось программно от ЭВМ «Электроника-100И» с помощью специального интерфейса. В этом случае время накопления зарядов в элементах ПЗС задается программным образом и в наших экспериментах составляло 50 мс. После обработки в ЭВМ выходной сигнал выводился для регистрации на дисплей. Интерфейс и вся цифровая часть системы была такой же, как в разработанном нами ранее узкополосном оптико-цифровом спектрографе [11, 14].

6. Исследование спектроанализатора проводилось при непрерывных и импульсных входных радиосигналах. На рис. 4 и 5 приведены осциллограммы выходных сигналов для случая, когда в качестве фотоприемника использовалась 500-элементная линейка ПЗС, а на рис. 6 и 7 — для случая 1024-элементной линейки ПЗС, управляемой от ЭВМ.

Осциллограммы на рис. 4 получены при непрерывных входных сигналах. Каждая точка на осциллограммах соответствует сигналу с одного элемента ПЗС. Положение выходного сигнала по горизонтальной оси определяет его частоту, а величина сигнала по вертикали — его интенсивность. Рис. 4, а соответствует случаю, когда на вход спектроанализатора подано одновременно два сигнала с частотами $F_1=750$ и $F_2=1020$ МГц. Разница частот ($\Delta F=270$ МГц) соответствует предельной полосе спектроанализатора при выбранном соотношении размеров дифракционного пятна и элемента 500-элементной ПЗС-линейки, которое в нашем случае примерно равнялось 2. Осциллограмма на рис. 4, б получена для случая двух входных сигналов, частоты которых различаются на $\Delta F=1$ МГц ($F_1=850$ и $F_2=849$ МГц). Такая разница частот близка к измеренной величине частотного разрешения спектроанализатора, равного $\Delta F_{\min}=0.9$ МГц (время задержки сигнала в модуляторе $\tau=1.1$ мкс). Число разрешимых точек спектроанализатора (число частотных каналов) составляет 300. На осциллограмме рис. 4, б частотный масштаб растянут в 10 раз по сравнению с рис. 4, а. Максимальная величина выходного сигнала с линейки ПЗС около 2.5 В. Измеренный динамический диапазон спектроанализатора составил 28 дБ. Он ограничен неравномерностью рассеянного фона, которая может быть уменьшена путем дополнительной обработки выходного сигнала за счет некоторого усложнения устройства управления ПЗС-фотоприемником либо специальной обработки в ЭВМ (см. ниже).

С помощью разработанного спектроанализатора проводился также спектральный анализ импульсных сигналов. Высокая чувствительность ПЗС-фотоприемников позволила регистрировать спектры коротких импульсов длительностью до 1 мкс. На рис. 5, а приведена осциллограмма выходного сигнала при подаче на вход спектроанализатора импульса длительностью 3 мкс на несущей частоте 850 МГц. Для сравнения на рис. 5, б показан сигнал на выходе спектроанализатора при отсутствии входного сигнала, который характеризует величину и характер оптического фона системы.

Как указывалось выше, рис. 6 и 7 соответствуют случаю, когда для управления ПЗС, обработки сигнала и регистрации использовалась ЭВМ, т. е. случаю оптико-цифрового спектроанализатора.

На рис. 6, а показан выходной сигнал, снимаемый с линейки ПЗС, при подаче на вход спектроанализатора двух непрерывных сигналов с частотами $F_1=840$ и $F_2=880$ МГц. На рис. 6, б показан сигнал на выходе ЭВМ после устранения оптического фона путем специальной обработки в ЭВМ. Видно, что обработка в ЭВМ позволяет значительно уменьшить неравномерность оптического фона.

На рис. 7 показан выходной сигнал спектроанализатора, выведенный из ЭВМ, для случая двух входных сигналов с частотами $F_1=700$ и $F_2=1000$ МГц, т. е. для разницы частот $\Delta F=300$ МГц. В этом случае в ЭВМ также проведено устранение оптического фона. Полученные результаты показывают, что разработанные широкополосные акустооптические модуляторы с поверхностным воз-

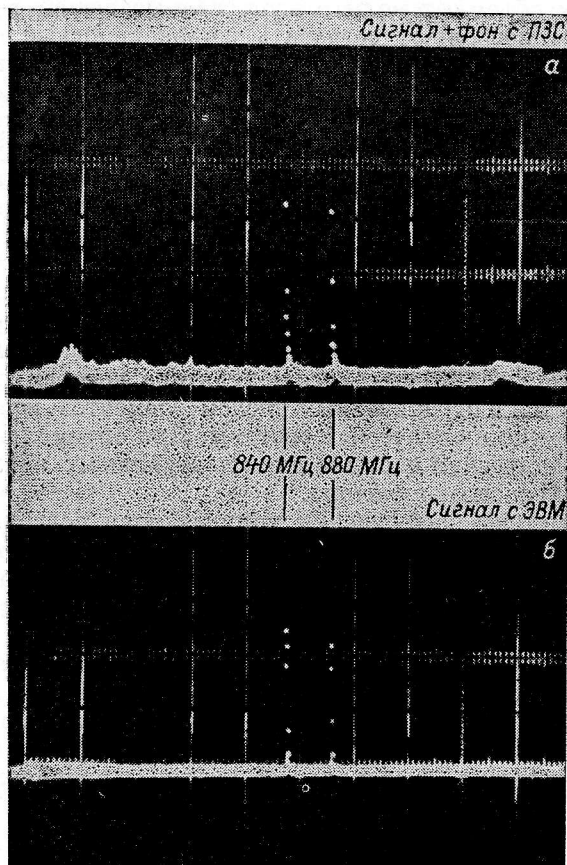


Рис. 6. Выходной сигнал опико-цифрового спектроанализатора при подаче на вход двух гармонических сигналов: $F_1=840$, $F_2=880$ МГц.

а — сигнал на выходе линейки ПЭС; б — сигнал на выходе спектроанализатора после обработки в ЭВМ.

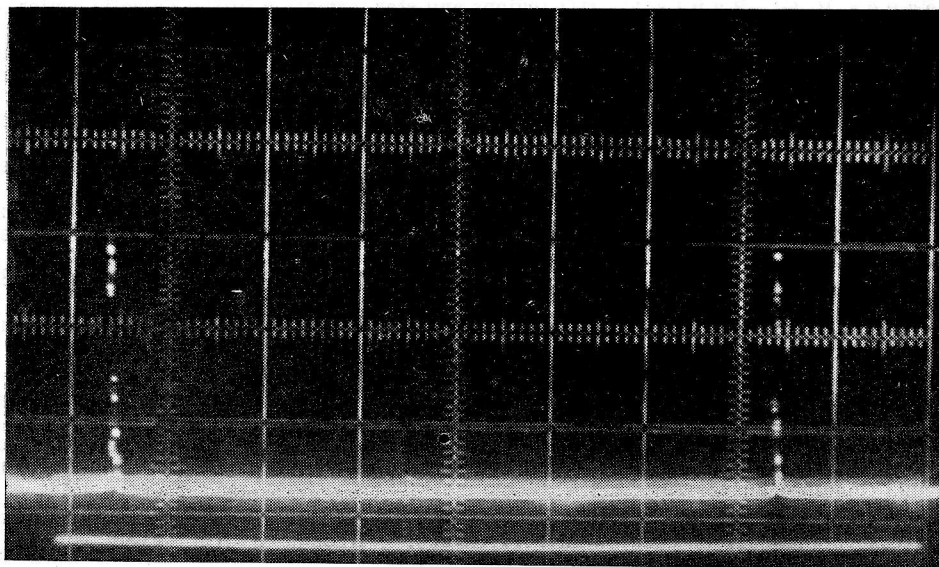


Рис. 7. Выходной сигнал спектроанализатора при двух входных сигналах с частотами ($F_1=700$ и $F_2=1000$ МГц), соответствующими краям полосы анализа.

буждением упругих объемных волн и выпускаемые нашей промышленностью ПЗС-фотоприемники позволяют создавать широкополосные оптико-цифровые системы для спектрального анализа радиосигналов. Такие спектроанализаторы могут быть использованы для создания акустооптических спектрографов для радиоастрономии [15—17, 1]. В этом случае в ЭВМ должна осуществляться обработка сигналов, соответствующая модуляционному режиму работы приемника [18]. Кроме того, должна быть проведена конструктивная доработка оптической системы спектроанализатора, что необходимо для удобства работы со спектроанализатором в реальных условиях при проведении наблюдений на различных радиотелескопах.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в настоящее время реально создание акустооптических спектроанализаторов с полосами анализа в сотни мегагерц. Реализованная нами полоса спектроанализатора ($\Delta F_{\text{спек}} = 300$ МГц) несколько уже полосы самого модулятора, которая составляла $\Delta F_{\text{мод}} = 380$ МГц, что связано с ограниченным числом элементов использованной линейки ПЗС и параметрами оптической системы. При оптимальном выборе параметров элементов оптической системы для спектрального анализа может быть использована вся полоса модулятора.

Разработанные методы возбуждения упругих волн позволяют значительно расширить полосу акустооптических модуляторов, а следовательно, и полосу спектроанализаторов и довести ее до единиц гигагерц. Использование таких полос приведет к качественному скачку в спектральных исследованиях в радиоастрономии.

Полоса анализа может быть увеличена за счет использования пространственно многоканальных модуляторов и матриц ПЗС [1].

Разработанный спектроанализатор может быть использован не только в радиоастрономических спектрографах, но и в различных других системах, в которых необходимо проводить спектральный анализ широкополосных сигналов в реальном масштабе времени.

Литература

1. Возможности использования акустооптических спектрографов в радиоастрономии/Н. А. Есепкина, С. В. Прусс-Жуковский, Е. Т. Аксенов и др. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1981, 14, с. 144.
2. Mezger P. G., Pauls T. III regions and star formation in the galactic center. — *IAU Symp.* 84 «The large-scale characteristics of the Galaxy», 1979, p. 357.
3. Observations of the motion and distribution of the ionized gas in the central parsec of the Galaxy. II/J. H. Lacy, C. H. Townes, T. R. Geballe, D. J. Hollenbach. — *Astrophys. J.*, 1980, 241, p. 132.
4. Chaisson E. J., Rodriguez L. F. Detection of extragalactic radio recombination line emission from M82. — *Astrophys. J.*, 1977, 214, p. L111.
5. Radio recombination lines from NGC253/U. Mebold, P. A. Shave, M. B. Bell, E. R. Seaquist. — *Astron. Astrophys.*, 1980, 82, p. 272.
6. Дравских З. В., Парийский Ю. Н. О рекомбинационных линиях возбужденного водорода в компактных радиоисточниках, связанных с галактиками и квазарами. — *Астрон. ж.*, 1981, 58, № 3, с. 486.
7. Cole T. W., Slee O. B. Spectra of interplanetary scintillation. — *Nature*, 1980, 285, p. 93.
8. Дравских А. Ф., Дравских З. В. Ожидаемое распределение яркости радиолиний возбужденного водорода в атмосфере Солнца. — *Солнечные данные*, 1981, № 3, с. 99.
9. Wild J. P. The radio-frequency line spectrum of atomic hydrogen and its applications in astronomy. — *Astrophys. J.*, 1952, 115, p. 206.
10. Железняков В. В., Злотник Е. Я. Тепловое циклотронное излучение из активных областей на Солнце. Приглашенный доклад на симпозиуме МАС № 86 «Радиофизика Солнца», август 1979, США.
11. Есепкина Н. А., Рыжков Н. Ф., Котов Ю. А. Первые испытания акустооптического анализатора спектра на РАТАН-600. — *Письма в АЖ*, 1980, 6, № 1, с. 61.
12. Necht D. L. Spectrum analysis using acousto-optics devices. — *Optical engineering*, 1977, 16, N 5, p. 461.
13. Выходные устройства систем оптической обработки на основе приборов с зарядовой связью/В. А. Арутюнов, Н. А. Есепкина, Б. А. Котов и др. — *Письма в ЖТФ*, 1979, 5, № 20, с. 85.

14. Г и б р и д н а я оптико-цифровая система для спектрального анализа радиосигналов / Н. А. Есепкина, Б. А. Котов, Ю. А. Котов. — Автометрия, 1978, 3, с. 50.
15. Cole T. W. An electrooptical radio spectrograph. — Proc. IEEE, 1973, 61, p. 1324.
16. А к у с т о о п т и ч е с к и й анализатор спектра для радиоастрономии / Н. А. Есепкина, В. Ю. Петрунькин, Н. А. Бухарин. — Изв. вузов. Радиофизика, 1976, 19, № 11, с. 1732.
17. A high-resolution acousto-optical radio-spectrometer for millimeter-wave astronomy / N. Kaifu, N. Ukita, Y. Chikada, T. Miyai. — Publ. Astron. Soc. Japan, 1977, 29, p. 429.
18. А к у с т о о п т и ч е с к и й спектрометр для радиотелескопа РАТАН-600 / Н. А. Есепкина, Ю. А. Котов, В. Ю. Петрунькин. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1980, 12, с. 88.

Поступила в редакцию 22.12.81