

## АКУСТООПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

*Л. Э. Абрамян, Н. И. Арзамасова, А. П. Венгер,  
И. В. Госачинский, В. Г. Грачев, Н. А. Есепкина,  
С. Р. Желенков, Р. А. Кандалян, И. С. Кочергина,  
Р. М. Мартиросян, А. В. Михайлов, С. В. Прусс-Жуковский,  
А. И. Шишкин*

Приведены основные параметры акустооптического спектроанализатора, разработанного для спектроскопического комплекса РАТАН-600. Полоса анализа 7.6 МГц, разрешение 54 кГц, число каналов 200. Спектроанализатор был испытан в наблюдениях на волнах 21 см (радиолиния нейтрального водорода) и 1.35 см (водяной пар). Результаты испытаний показали, что такие спектрометры могут успешно использоваться в составе автоматизированных спектральных комплексов.

The main parameters of acousto-optical spectrometer, developed for spectrometric complex of the RATAN-600 are presented. The analyzed band-width is 7.6 MHz/s, the resolution is 54 kHz/s, the number of channels is 200. This spectrometer was used for observations at 21 cm (neutral hydrogen line) and at 1.35 cm (water vapour) wavelengths. The results of observations have shown that such spectrometers may be successfully used in the automatic spectral complexes.

В последнее время благодаря главным образом обнаружению молекулярных линий начал быстро расти интерес к радиоспектроскопии, которая становится новой большой областью радиоастрономии. Дальнейшее развитие этой области, в которой используются в основном фильтровые, автокорреляционные и гетеродинные спектрометры, требует создания не только маломощных входных приемных устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов, но и новых выходных устройств — многоканальных широкополосных анализаторов спектра, позволяющих обнаруживать и исследовать различные радиолинии. Весьма перспективны для этой цели появившиеся в последнее время акустооптические анализаторы спектра [1—5]. Созданные на их основе акустооптические спектрометры обладают рядом существенных преимуществ перед фильтровыми и автокорреляционными спектрометрами [6, 7]. Они имеют широкие полосы анализа, большое число каналов, высокое разрешение и позволяют легко изменять параметры. Кроме того, акустооптические спектрометры могут быть сделаны весьма компактными, легкими и с небольшим энергопотреблением. Последние факторы особенно существенны в связи с тем, что область применения гетеродинных спектрометров быстро продвигается в субмиллиметровую и инфракрасную части спектра, где используемая для наблюдений спектральная аппаратура должна располагаться на подвижных объектах (самолетах, спутниках и т. д.).

Большие возможности открывают акустооптические спектрометры и для исследований радиоизлучения Солнца, так как для этой цели требуется применение спектроанализаторов с полосами анализа более 1 ГГц.

Нами разработан акустооптический спектрометр для радиотелескопа РАТАН-600, на котором в 1981—1982 гг. проведено несколько циклов спектральных наблюдений в линиях нейтрального водорода ( $\lambda = 21$  см) и водяного пара ( $\lambda = 1.35$  см).

В статье приведена структурная схема акустооптического спектрометра, установленного на радиотелескопе РАТАН-600. Рассмотрены отдельные части спектрометра, особенности программного обеспечения работы спектрометра,

приведены результаты экспериментального исследования его характеристик, а также результаты спектральных наблюдений радиисточника Orion A-KL в линии водяного пара ( $\lambda=1.35$  см), полученные с помощью разработанного спектрометра.

Структурная схема акустооптического спектрометра (АОС) представлена на рис. 1. Она состоит из трех частей: электронной части — модуляционного спектрального гетеродинного приемника, осуществляющего усиление и преобразования сигнала, с малозумящим усилителем на входе; оптической части — акустооптического анализатора спектра (АОАС) и цифровой части — ЭВМ с выходными устройствами.

Цифровая часть разработанного нами акустооптического спектрометра, на котором проводились спектральные наблюдения на РАТАН-600, выполнена на основе ЭВМ «Электроника-100И». Она может быть выполнена и на основе других ЭВМ, например мини-ЭВМ «Электроника-60».

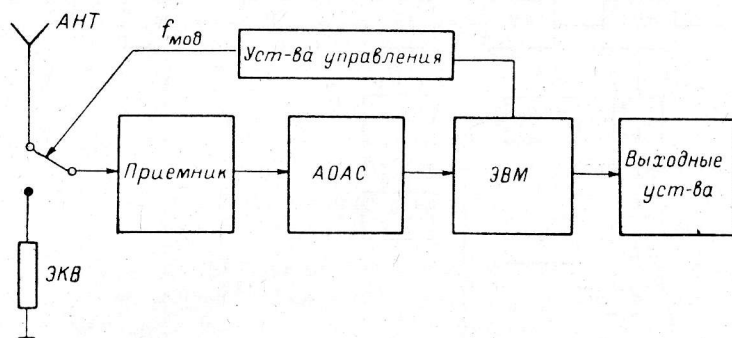


Рис. 1. Структурная схема АОС.

При наблюдениях использовались спектральные приемники с различными малозумящими усилителями: охлаждаемыми параметрическими усилителями на полевых транзисторах при работе на  $\lambda=21$  см, а также с квантовым усилителем (КУ) при работе на  $\lambda=1.35$  см.

**Спектральный приемник.** На радиотелескопе РАТАН-600 с мая 1981 г. начаты наблюдения мазерных источников в линии  $\text{H}_2\text{O}$  на волне 1.35 см с применением спектрального приемника СП-1.35 [8], включенного в состав программно-управляемого спектрометрического комплекса РАТАН-600 [9]. На входе СП-1.35, выполненного по супергетеродинной схеме, в качестве усилителя высокой частоты с апреля 1982 г. используется двухкаскадный волноводный отражательный мазер на рубине [10]. С 1981 г. проводятся пробные наблюдения на СП-1.35 совместно с акустооптическими спектрометрами. В спектральных измерениях на волне 1.35 см с декабря 1982 г. применяется метод с шумовым пилот-сигналом [11, 12]. Функциональная схема СП-1.35 представлена на рис. 2.

В антенный тракт с помощью направленных ответвителей *НО1*, *НО2* и *НО3* могут подаваться сигналы от генераторов шума для калибровки каналов спектрометра (*КГШ1* с шумовой температурой  $T_{\text{к1}}=15$  К и *КГШ2* с  $T_{\text{к2}}=54$  К) \* и для работы по методу с шумовым пилот-сигналом *ГПС* с шумовой температурой  $T_{\text{пс}}=3500$  К. Шумовые температуры указаны приведенными ко входу СП-1.35. Включение этих генераторов производится сигналом, поступающим от системы программного управления СПУ-1 [13] по цепям дистанционного управления. Для работы по методу с пилот-сигналом модулированный шумовой сигнал  $T_{\text{пс}}$ , превышающий на 12 дБ уровень шумов системы «антенна—приемник»  $T_{\text{сист}}=200\text{--}250$  К, вводится через *НО1* в антенный тракт СП-1.35. Синхронно с включением пилот-сигнала производится уменьшение усиления СП-1.35 с помощью модулятора *М* такой глубины, чтобы выполнялось квазиуловное условие на выходе радиоспектрометра.

\* Калибровочный сигнал от *КГШ2* при работе СП-1.35 с фильтровым анализатором спектра [9] используется для балансировки каналов спектрометра. В марте 1983 г. значения калибровочных сигналов уточнены и составляют  $T_{\text{к1}}=12$  К,  $T_{\text{к2}}=50$  К.

Особенностью волноводного квантового усилителя КУ отражательного типа, охлаждаемого жидким гелием до рабочей температуры 4.2 К, является большой диапазон перестройки по частоте (19—25 ГГц) и простота конструкции. Усиление сигнала осуществляется в отрезке волновода, полностью заполненного активным веществом (рубином), в режиме бегущей волны. Сигнал, отражаясь от конца отрезка волновода, дважды проходит через активное вещество, что приводит к эффективному увеличению длины активного участка. В используемом КУ два последовательно включенных каскада обеспечивают коэффициент усиления 25 дБ. Для разделения сигналов в прямом и обратном направлениях применяются неохлаждаемые циркуляторы. В качестве генератора накачки используется лампа обратной волны с выходной мощностью 100—110 мВт в диапазоне частот 41—53 ГГц. Необходимое значение внешнего магнитного поля 8.5 кГс обеспечивается при помощи электромагнита со сверх-

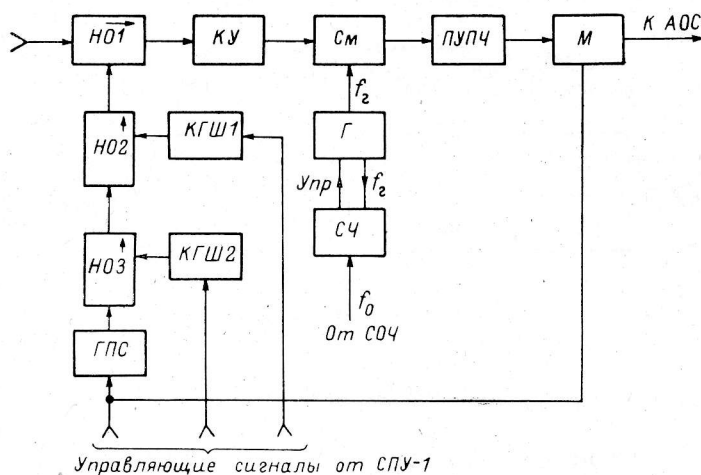


Рис. 2. Функциональная схема спектрального приемника СП-1.35.

проводящими обмотками из ниобия—циркония. Полоса пропускания КУ по уровню  $-3$  дБ равна 25 МГц при коэффициенте усиления 25 дБ. Шумовая температура СП-1.35 равна 150 К.

Усиленный сигнал с выхода КУ поступает на смеситель См с шумовой температурой  $\sim 1000$  К (в двухполосном режиме), где смешивается с сигналом гетеродина, частота которого  $f_r$  стабилизируется с помощью синхронизатора частоты СЧ по гармонике опорной частоты  $f_0$ , поступающей от синтезатора опорной частоты СОЧ [14]. Система фазовой автоподстройки частоты имеет два кольца [15].

Преобразованный к промежуточной частоте сигнал после предварительного усиления в диапазоне  $f_{п.ч} = (65 \pm 25)$  МГц через диодный модулятор усиления М ключевого типа поступает в акустооптический спектрометр АОС.

**Акустооптический анализатор спектра.** Остановимся более подробно на рассмотрении акустооптического анализатора спектра (АОАС), который определяет основные параметры спектрометра: полосу частот, частотное разрешение и число каналов. АОАС осуществляет Фурье-преобразование принимаемых сигналов и формирует в выходной фокальной плоскости, где расположен ПЗС-фотоприемник, распределение интенсивности, пропорциональное спектру мощности исследуемого сигнала.

Одним из основных требований, предъявляемых к оптическим схемам разных систем обработки, является необходимость уменьшения размеров, что кроме снижения габаритов и массы позволяет улучшить их амортизацию и повысить механическую стабильность. В малогабаритных оптических системах приходится использовать и малогабаритные лазеры, имеющие малую мощность, поэтому при конструировании таких систем необходимо наиболее полно использовать мощность и уменьшить потери в системе.

Разработанные нами оптические системы анализаторов спектра (рис. 3) построены по автоколлимационной схеме [4], которая позволяет уменьшить размеры по сравнению с обычно используемыми схемами с двумя линзами. Уменьшить размеры оптической системы позволили и поворотные призмы  $P_1$  и  $P_2$ . Согласование размеров и формы коллимированного пучка и апертуры

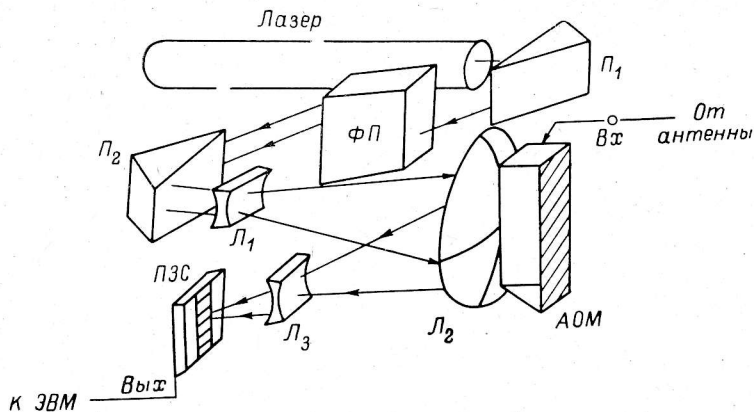


Рис. 3. Оптическая схема АОАС.

акустооптического модулятора (АОМ), которое осуществляется формирователем пучка (ФП), с размерами фотоприемника ( $L_3$ ) позволило использовать в системе ОКГ с выходной мощностью  $P_{\text{вых}} \approx (1-2)$  мВт.

Нами разработаны два варианта оптических систем, которые были использованы для создания анализаторов спектра с различными параметрами.

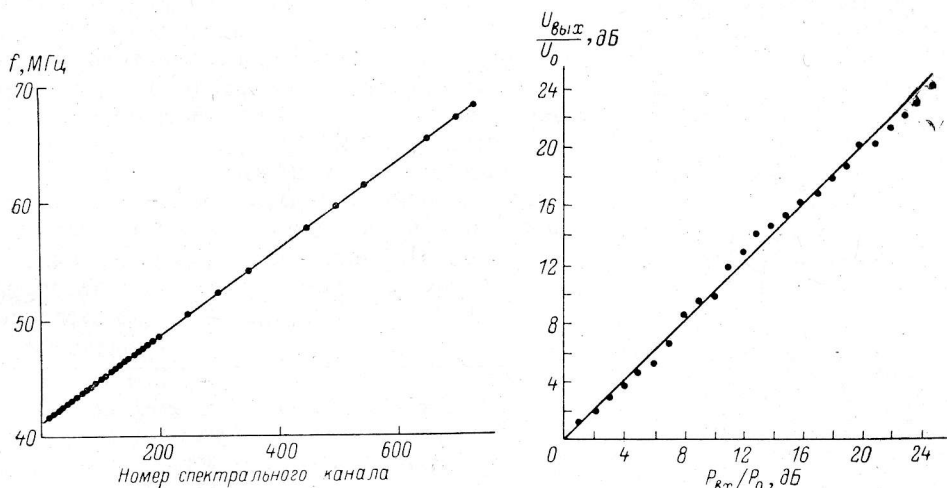


Рис. 4. Зависимость частоты настройки спектрального канала от номера.

29.11.82. АОС —  $\text{TeO}_2$ . Линейность частотной характеристики.  $\Delta f \approx 28$  МГц,  $\Delta f_{\text{min}} 60$  кГц,  $\delta f \approx 38$  кГц.

Рис. 5. Амплитудная характеристика.

29.11.82. АОС —  $\text{TeO}_2$ .

Одна из них, малогабаритная, имеет размеры  $430 \times 220$  мм и используется в анализаторе с небольшим частотным разрешением ( $\Delta f_p = 300$  кГц), в котором модулятор имеет небольшую апертуру. У этого анализатора полоса анализа  $\Delta f \approx 30$  МГц. Он выполнен на основе акустооптического модулятора из стекла ТФ-3 и размещен в стандартном блоке периферии ЭВМ «Электроника-100И».

Другая оптическая система собрана на разметочной плите и имеет размеры  $800 \times 500$  мм. Она используется в анализаторе с высоким частотным разрешением, составляющим десятки кГц. Оптическая система установлена в ка-

бине спектрального облучателя РАТАН-600. Этот анализатор выполнен на основе модулятора из кристалла  $\text{TeO}_2$ , который работает на медленной сдвиговой упругой волне, распространяющейся вдоль направления [110]. Полоса частот анализатора составляет  $\sim 20$  МГц.

Анализатор спектра на  $\text{TeO}_2$  использовался при спектральных наблюдениях источника Orion A, поэтому ниже приведены некоторые его характеристики.

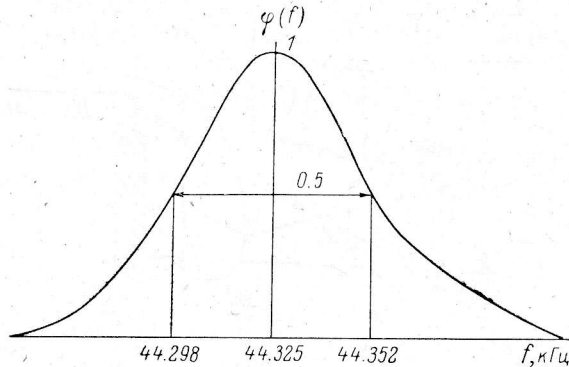
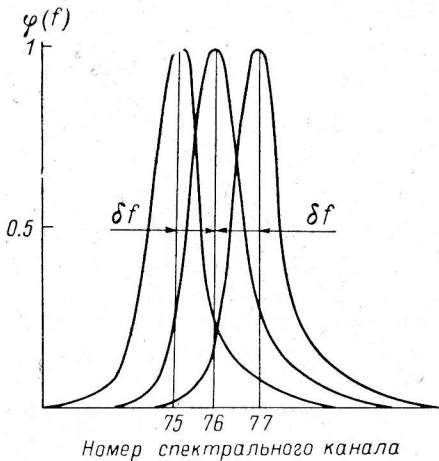


Рис. 6. Аппаратная функция спектрометра.

20.11.82. АОС —  $\text{TeO}_2$ . Канал № 76;  $f_{76} = 44.325$  кГц;  $\Delta f_{\min} = 54$  кГц.

На рис. 4 приведена зависимость частоты от номера канала (номера элемента ПЭС-линейки), которая показывает, что акустооптический анализатор имеет линейный частотный масштаб. На рис. 5 приведена зависимость выходного сигнала от величины входного сигнала (амплитудная характеристика), которая показывает, что при изменении входного сигнала примерно на 25 дБ амплитудная характеристика достаточно линейна. На следующих рисунках приведена



аппаратная функция спектрометра, которая определяет полосу эквивалентного частотного канала и, следовательно, разрешение и чувствительность спектрометра: на рис. 6 — аппаратная функция одного из частотных каналов ( $n = 76$ ), примерно соответствующего середине полосы анализа, а на рис. 7 — аппаратные функции трех соседних частотных каналов. Из рис. 6 и 7 видно, что частотное разрешение спектрометра с анализатором на  $\text{TeO}_2$  составляет  $\Delta f_p = 54$  кГц, а частотный

Рис. 7. Аппаратные функции соседних каналов спектрометра.

$f_{75} = 44.287$ ,  $f_{76} = 44.324$ ,  $f_{77} = 44.362$  кГц;  $f = 38$  кГц;  $\Delta f_{\min} = 54$  кГц.

интервал между соседними спектральными каналами составляет  $\delta f = 38$  кГц. Кроме того, из рис. 7 видно, что различные частотные каналы имеют одинаковые аппаратные функции.

При проведении наблюдений на РАТАНе можно было подключать к спектрометру любой из двух акустооптических анализаторов в зависимости от задач, т. е. от требуемого частотного разрешения. Причем переключение анализаторов осуществляется достаточно просто, путем переключения нескольких кабелей. Структура же всей остальной системы, в частности цифровой части, остается без изменений.

Цифровая часть акустооптического спектрометра выполнена на основе ЭВМ «Электроника-100И» со штатным периферийным оборудованием.

Состав аппаратуры цифровой части спектрометра обеспечивает выполнение следующих функций:

— преобразование оптического изображения спектра исследуемого сигнала в цифровую форму и ввод его в ЭВМ «Электроника-100И»;

— первичную обработку поступающей информации в реальном масштабе времени;

— регистрацию обработанной информации на магнитную ленту с возможностью дальнейшей ее обработки по принятой на РАТАН-600 методике с использованием стандартных программ обработки спектральных наблюдений [16];

— автоматизацию спектральных наблюдений, синхронизацию работы спектрометра по сигналам звездного времени;

— оперативное изменение параметров спектрометра (времени накопления и числа обрабатываемых спектральных каналов), а также оперативный контроль регистрируемой информации на самописцы и дисплей.

Структура цифровой части, обеспечивающей перечисленные функции, представлена на рис. 8. Она содержит интерфейс связи ЭВМ с ПЗС-фотоприемни-

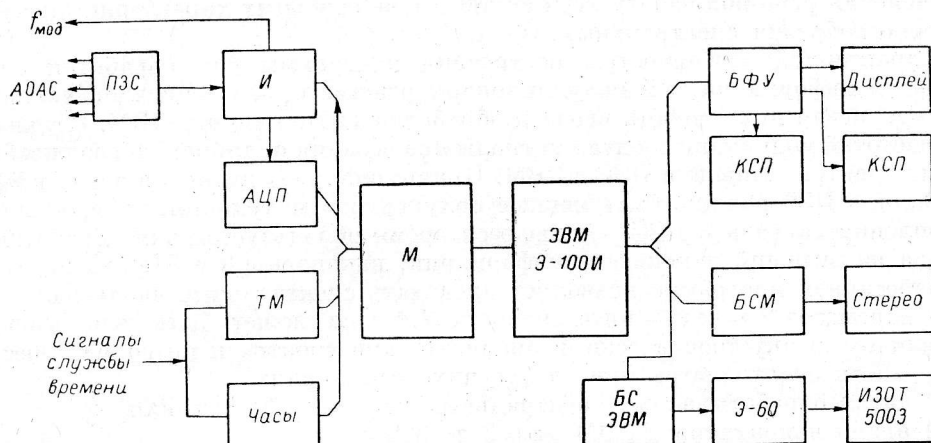


Рис. 8. Структура цифровой части спектрометра.

ком (И), аналого-цифровой преобразователь АЦП, ЭВМ «Электроника-100И», мультиплексор М, многоканальный таймер ТМ, часы звездного времени, многоканальный цифро-аналоговый преобразователь (блок фиксированных уровней) БФУ, дисплей и два самописца КСП.

Разработанный нами интерфейс предназначен для программного управления работой ПЗС-фотоприемника, усиления выходных сигналов ПЗС-линейки, а также для программного управления модуляторами приемника через блок СПУ-1. Конструктивно интерфейс выполнен в виде отдельной печатной платы, содержащей 17 микросхем и 27 транзисторов. Выходной сигнал с интерфейса подается на вход АЦП и далее поступает в ЭВМ. В спектрометре использовалась ПЗС-линейка типа А-1033, которая имеет 1024 светочувствительных элементов.\* Частота модуляции составляла  $f_{\text{мод}} = 25$  Гц.

Многоканальный таймер (ТМ) служит для синхронизации работы спектрометра по сигналам звездного времени. На него от службы времени поступают сигналы 1 кГц зв., 1 мин зв. и 1 с зв.

«Часы» используются для ввода в ЭВМ текущего звездного времени, по которому определяется момент начала регистрации выходной информации на магнитную ленту (МП). Код текущего звездного времени заносится в заголовки регистрируемых на МП массивов.

Дисплей и самописцы используются в процессе наблюдений для проведения оперативного контроля. В процессе наблюдений выходные данные поступают из ЭВМ на систему регистрации, где записываются на магнитную ленту.

Специфика системы регистрации разработанного спектрометра заключается в том, что наблюдения на РАТАНе проводятся при малых временах накопления,

\* Как указано в следующем разделе, разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет регистрировать до 500 каналов при частоте модуляции  $f_{\text{мод}} = 25$  Гц.

составляющих единицы и доли секунды, так как источники наблюдаются в режиме прохождения, а не сопровождения. Это определяет значительный объем информации, регистрируемой на ленту.

В разработанном цифровом комплексе регистрация выходной информации в реальном масштабе времени возможна в двух вариантах: на стереомагнитофон через специально разработанный интерфейс (БСМ) и на магнитофон ИЗОТ 5003 через ЭВМ «Электроника-60», используемую в качестве буферного устройства [17]. Первый вариант позволяет проводить регистрацию сигналов 200 спектральных каналов при времени накопления в ЭВМ не менее 1 с, второй — при времени накопления не менее 0.2 с.

**Программное обеспечение акустооптического спектрометра.** Специфика программного обеспечения цифровой части акустооптического спектрометра определяется, с одной стороны, жесткими требованиями работы системы в реальном масштабе времени, а с другой — необходимостью обеспечить гибкость в изменении режимов работы всей системы и ее основных характеристик с учетом многообразия спектральных задач.

Характерной особенностью построения программы для обработки спектральной информации при модуляционном режиме приема сигналов является двухуровневая цикличность ввода и обработки информации в ЭВМ. С удвоенной частотой модуляции следуют сигналы прерывания от таймера и ввод изображения спектра с линейки ПЗС в ЭВМ. Принципиально, что время ввода в ЭВМ сигналов с ПЗС должно быть меньше полупериода модуляции, т. е. времени накопления сигнала в ПЗС. Оставшееся время используется для обработки и вывода на внешний накопитель информации, накопленной в ЭВМ за время  $\tau$ . Разработанная программа позволяет проводить спектральные наблюдения одного параметра Стокса — интенсивности  $I$ .<sup>\*</sup> Она может быть использована с различными акустооптическими анализаторами спектра и позволяет обеспечить работу спектрометра при следующих параметрах:

- 1) число обрабатываемых спектральных каналов 200 или 400;
- 2) время накопления в ЭВМ от 0.2 до 300 с;
- 3) частота модуляции  $f_{\text{мод}} = 25$  Гц.

Программа может работать как с калибровкой в реальном времени, когда на магнитную ленту записываются результаты наблюдений в антенной температуре, так и с последующей калибровкой полученных результатов на следующих этапах обработки на ЕС ЭВМ, например М-4030.

Рассмотрим структуру разработанной программы. Она состоит из ряда подпрограмм: «ПЗС», «Обработка», «Вывод» и «Калибровка», — которые управляются программой «Диспетчер». Кроме того, имеется еще программа «Модификация», которая осуществляет необходимые изменения в различных подпрограммах при изменении параметров спектрометра. Как указывалось выше, в настоящее время на радиотелескопе РАТАН-600 спектральные наблюдения проводятся по методу с шумовым пилот-сигналом, однако программное обеспечение без изменений может применяться и с обычным модуляционным приемником. Поэтому при описании программ используются термины «Антенна», «Эквивалент», «Синхронное детектирование». Кратко остановимся на функциях отдельных подпрограмм.

Подпрограмма «ПЗС» осуществляет управление модулятором приемника, сдвиг сигналов в ПЗС-линейке, управление работой АЦП, ввод сигналов с линейки ПЗС в ЭВМ, управление работой дисплея.

Подпрограмма «Обработка» производит операцию синхронного детектирования и калибровки.<sup>\*\*</sup> При этом массив «Эквивалент» вычитается из массива «Антенна», результат записывается в массив, предназначенный для регистрации на НМЛ, и в массив для вывода на дисплей.

Подпрограмма «Вывод» производит формирование и вывод заголовка массива выходной информации, соответствующего одному циклу накопления ( $\tau$ ),

\* После небольших изменений она может быть использована и для спектральных наблюдений двух параметров Стокса —  $I$  и  $V$  в приемнике с двумя частотами модуляции.

\*\* Калибровка обработанных сигналов перед выводом из ЭВМ осуществляется при работе в режиме калибровки в реальном времени.

вместе со служебными кодами и затем вывод самого массива на НМЛ. Сигналы выбранных оператором контрольных спектральных каналов выводятся на КСП.

Подпрограмма «Калибровка» используется в режиме калибровки в реальном времени. Здесь перед наблюдениями вычисляется массив «нулей» и массив калибровочных коэффициентов в калибровочном режиме работы спектрометра. Эти массивы могут обновляться в процессе длительных наблюдений при проведении дополнительных калибровочных режимов. Подпрограмму «Калибровка» необходимо использовать и в тех случаях, когда при вторичной обработке используются массивы усредненных коэффициентов и «нулей».

Разработанная структура цифровой части акустооптического спектрометра оптимизирована по минимуму нестандартного оборудования. Это обеспечивает предельные возможности системы обработки, в частности ограничивает число

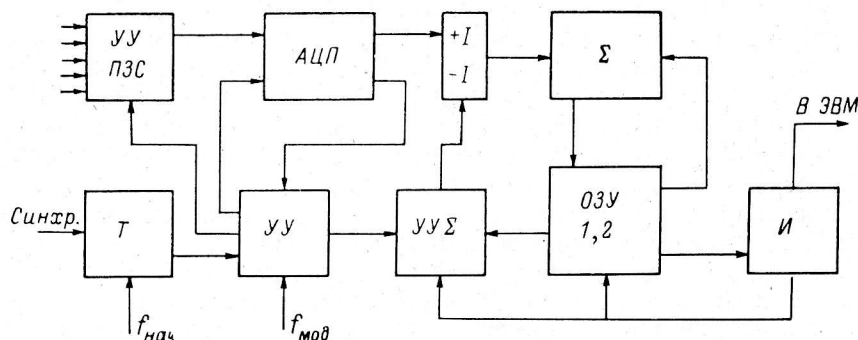


Рис. 9. Функциональная схема многоканального цифрового интегратора.

спектральных каналов и частоту модуляции. Рассмотрение показывает, что уравнение баланса времени ЭВМ при спектральных наблюдениях выглядит так:

$$\tau = N(2\tau T_{\text{мод}}^{-1} t_{\text{ПЗС}} + t_{\text{обр}} + t_{\text{выв}}),$$

где  $\tau$  — время накопления в ЭВМ;  $t_{\text{ПЗС}}$  — время работы подпрограммы «ПЗС»;  $t_{\text{обр}}$  — время работы подпрограммы «Обработка»;  $t_{\text{выв}}$  — время работы подпрограммы «Вывод»;  $N$  — предельно возможное число обрабатываемых спектральных каналов.

Задаваясь значениями  $\tau$ ,  $T_{\text{мод}}$ ,  $t_{\text{ПЗС}}$ ,  $t_{\text{обр}}$  и  $t_{\text{выв}}$ , можно определить возможное число каналов:

$$N \leq \tau(2\tau t_{\text{ПЗС}} T_{\text{мод}}^{-1} + t_{\text{обр}} + t_{\text{выв}})^{-1}.$$

Рассмотрение показывает, что разработанное нами программно-аппаратное обеспечение акустооптического спектрометра позволяет обрабатывать в реальном масштабе времени до 400—600 частотных каналов при частоте модуляции  $f_{\text{мод}} = 25$  Гц ( $T_{\text{мод}} = 40$  мс) для  $\tau \geq 0.2$  с.

Для увеличения числа обрабатываемых спектральных каналов или увеличения частоты модуляции необходимо между акустооптическим анализатором спектра и ЭВМ поместить многоканальный цифровой интегратор (спецпроцессор), который осуществляет сжатие поступающей в ЭВМ информации и увеличивает быстродействие всей системы при использовании ЭВМ с таким же быстродействием. В разработанной нами системе темп обновления информации на входе ЭВМ равен  $T_{\text{мод}}/2$ . Использование спецпроцессора позволит существенно снизить темп обновления информации на входе ЭВМ.

Возможная схема многоканального цифрового интегратора приведена на рис. 9. Она содержит АЦП, сумматор  $\Sigma$  и оперативные запоминающие устройства (ОЗУ1 и ОЗУ2), объем которых определяется числом спектральных каналов спектрометра  $N$ , а разрядность — необходимой точностью (разрядностью применяемого АЦП) и необходимым временем накопления. Кроме того, она содержит таймер (Т), УС, УУ ПЗС, УУ  $\Sigma$  и УУ ОЗУ1, 2 — устройства синхронизации и устройства управления ПЗС-фотоприемником, сумматором и ОЗУ1, 2 соответственно и интерфейс связи (И) спецпроцессора с ЭВМ. В многоканаль-



ном цифровом интеграторе непосредственно осуществляется синхронное детектирование и накопление сигналов для всех спектральных каналов. Аналогичный спецпроцессор используется для увеличения быстродействия в акустическом спектрометре, разработанном NASA [18]. Правда, в этом спецпроцессоре не производится операция синхронного детектирования, в остальном схема подобна нашей.

При использовании спецпроцессора ЭВМ осуществляет калибровку сигналов, формирование выходных массивов и вывод информации на магнитный накопитель и устройства оперативного контроля (дисплей, самописцы).

Рассмотрение показывает, что использование спецпроцессора может обеспечить возможность обработки 1000—2000 частотных каналов при частотах модуляции  $f_{\text{мод}}$  до 1 кГц.

**Методика и результаты наблюдений.** Наблюдения линий космического радиоизлучения с помощью акустооптического спектрометра проводились на РАТАН-600 с приемниками, установленными в спектральном облучателе радиотелескопа. Наблюдения проводились на двух длинах волн:  $\lambda = 21$  и 1.35 см. При этом время накопления для  $\lambda = 21$  см выбиралось  $\tau_{21} = 3$  с, а для  $\lambda = 1.35$  см — равным  $\tau_{1.35} = 0.2$  с путем внесения соответствующих изменений в программу. Число спектральных каналов было равно 200.

Методика проведения наблюдений практически не отличалась от принятой на РАТАН-600 методики спектральных наблюдений, т. е. использовались те же подготовительные режимы, в той же последовательности и той же длительности [19]. Отличие заключалось лишь в том, что с целью уточнения частотной шкалы спектрометра непосредственно до и после наблюдений проводилось достаточно точное измерение частотной настройки одного из спектральных каналов. Эти измерения показали, что за время наблюдений изменение привязки частотной шкалы было незначительно.

При подготовке каждого из циклов наблюдений на РАТАН-600 проводились настройка и измерение характеристик спектрометра. В процессе измерений уточнялась привязка частотной шкалы, измерялись аппаратные функции для различных каналов (рис. 6, 7), а также определялась реальная чувствительность спектрометра с помощью калибровочных шумовых сигналов.

Многочисленные измерения характеристик спектрометра показывают, что все они находятся в хорошем соответствии с расчетными значениями. В частности, чувствительность акустооптического спектрометра, так же как и для спектрометров других типов, определяется шумами приемника, временем накопления сигнала  $\tau$  и эквивалентной полосой отдельного спектрального канала. Для примера на рис. 10 приведены калибровочные ступеньки и шумовые дорожки для двух спектральных каналов спектрометра на  $\lambda = 1.35$  см со смесителем на входе ( $T_{\text{пр}} = 250$  К) и акустооптическим анализатором на  $\text{TeO}_2$ . Время накопления составляло  $\tau = 0.2$  с, а эквивалентная полоса отдельного канала  $\Delta f_p = 54$  кГц. Как видно из рисунка, измеренные и расчетные значения чувствительности в этом случае хорошо совпадают. В других случаях также было получено хорошее совпадение измеренных и расчетных величин чувствительности.

Сравнение результатов наблюдений акустооптического и фильтрового спектрометров иллюстрируется рис. 11, где приведены кривые прохождения источника W 51, полученные при проведении совместных (с двумя спектрометрами) наблюдений на  $\lambda = 21$  см. На рисунке видно хорошее соответствие результатов.

В период с 1980 по 1982 г. на радиотелескопе РАТАН-600 с помощью акустооптического спектрометра проведено несколько циклов наблюдений, в процессе которых проводилась отработка программного обеспечения и отдельных узлов спектрометра. Результаты этих наблюдений частично опубликованы [20, 21].

Здесь мы приведем результаты наблюдений источника Orion A-KL в линии водяного пара ( $\lambda = 1.35$  см), полученные в декабре 1982 г. Наблюдения проводились на Южном секторе РАТАН-600. Использовался акустооптический спектрометр с анализатором на модуляторе из кристалла  $\text{TeO}_2$ . Параметры спектрометра: полоса  $\Delta f = 7.6$  МГц, частотное разрешение  $\Delta f_p = 54$  кГц, частотный интервал между соседними спектральными каналами  $\delta f = 38$  кГц, число спектраль-

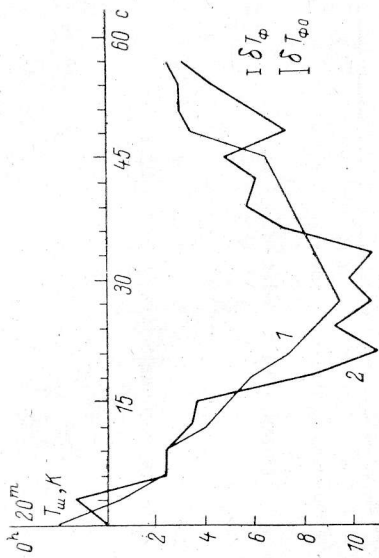
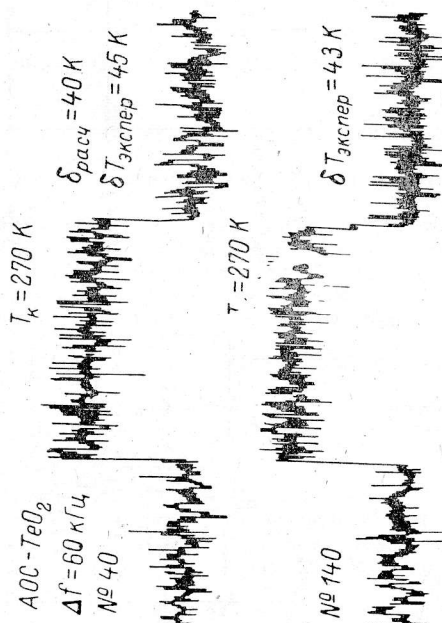
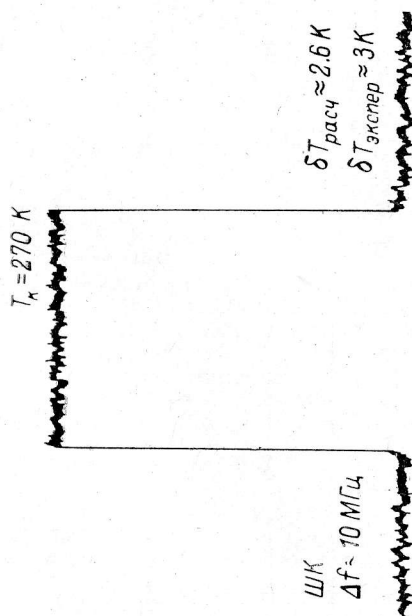


Рис. 14. Кривые прохождения источника W 51. 25.12.79,  $\lambda=21$  см; 1 — фильтровый; 2 — акустооптический.



← Рис. 10. Калибровочные сигналы спектрометра.

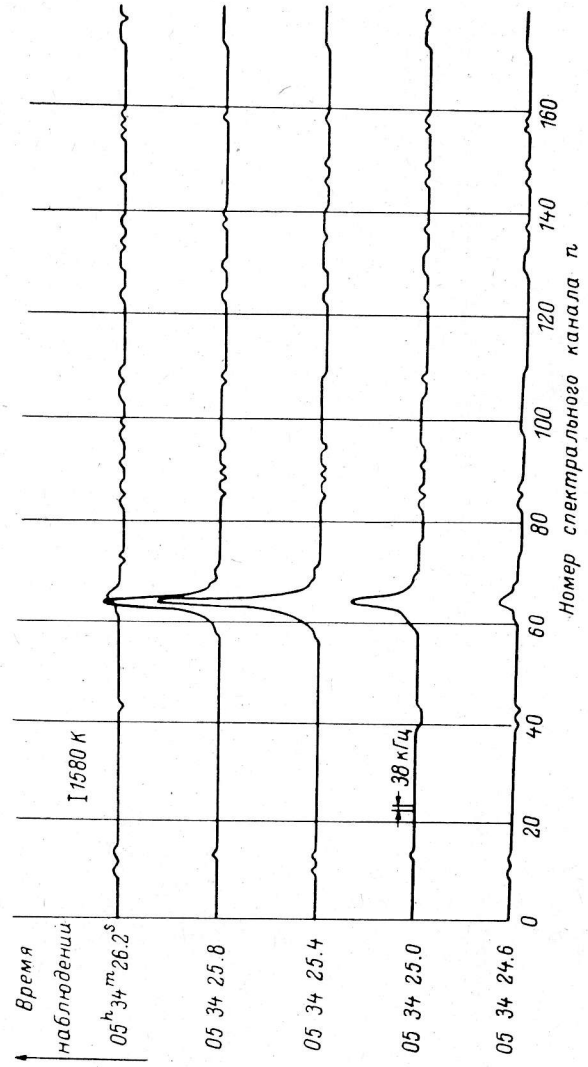
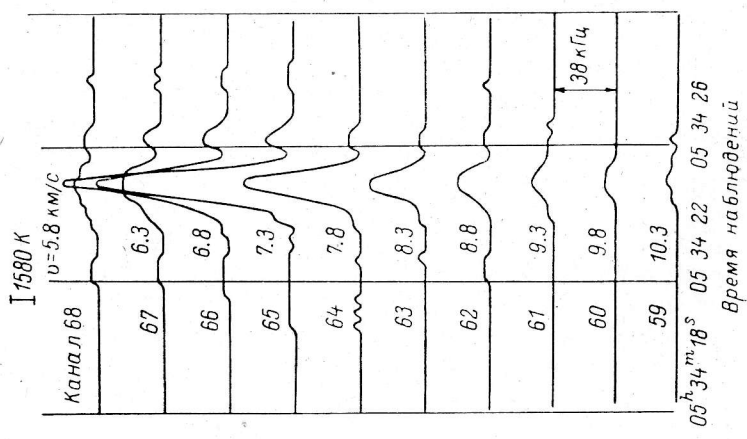


Рис. 13. Профили линии источника Ogieon A-KL 02.12.82.



← Рис. 12. Кривые прохождения источника Ogieon A-KL 02.12.82,

ных каналов  $N=200$ , при этом нулевой лучевой скорости соответствовал канал  $N=80$ .

На рис. 12 представлены кривые прохождения для нескольких спектральных каналов, где наблюдалась большая интенсивность излучения. На рис. 13 показаны профили линии для моментов времени, близких к кульминации. Из кривых видно, что максимуму линии излучения соответствует лучевая скорость  $v=7.3$  км/с ( $n=65$ ). Ширина профиля составляет  $\sim 80$  кГц, т. е. ширина линии излучения менее 60 кГц.

Наблюдения проводились со спектральным приемником СП-1.35 и малошумящим квантовым усилителем на входе. Флуктуационная чувствительность спектрометра с таким приемником составляла  $\sim 4$  К, но в связи с большой интенсивностью источника излучения (наблюдалась вспышка в источнике Orion A-KL в линии водяного пара), усиление приемника было сильно уменьшено и поэтому на приведенных кривых шумовая дорожка практически не видна.

**Выводы.** В результате проведенной работы создан акустооптический спектрометр для радиоастрономических наблюдений. Исследование характеристик спектрометра, а также результаты спектральных наблюдений показывают, что такие спектрометры могут успешно использоваться в составе автоматизированных спектральных комплексов. Они обеспечивают широкие полосы при большом числе спектральных каналов.

Разработанный программно-аппаратный комплекс может быть использован для создания широкополосных акустооптических спектрометров с полосой в сотни и тысячи мегагерц для спектральных наблюдений радиоизлучения Солнца. При этом программа должна быть модернизирована для наблюдений двух параметров Стокса —  $I$  и  $V$ .

Для увеличения частотных каналов до 1000—2000 и увеличения частоты модуляции в составе цифровой части спектрометра необходимо использовать многоканальный цифровой интегратор.

#### Литература

1. Cole T. W. Electrooptical processing in radio astronomy. — *Optica Acta*, 1975, 22, N 2, p. 83—92.
2. A high-resolution acousto-optical radio-spectrometer for millimeter-wave astronomy / N. Kaifu, N. Ukita, Y. Chikada, T. Mijaji. — *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1977, 29, p. 429—435.
3. Robinson B. J. Widelband spectrometers for millimeter wavelength. — *IUU Simp.* 87, Quebec, 6—10/VIII 1979, p. 1.
4. Первые испытания акустооптического анализатора спектра на РАТАН-600 / Н. А. Есепкина, Н. Ф. Рыжков, В. Г. Грачев и др. — *Письма в АЖ*, 1980, 6, № 1, с. 61—64.
5. Возможности использования акустооптических спектрографов в радиоастрономии / Н. А. Есепкина, С. В. Прусс-Жуковский, Е. Т. Аксенов и др. — *Астрофиз. исслед.* (Иzv. SAO), 1981, 14, с. 144—153.
6. Рыжков Н. Ф. Аппаратные методы радиоспектроскопии межзвездной среды. — *Астрофиз. исслед.* (Иzv. SAO), 1974, 6, с. 96.
7. Цифровой корреляционный спектрометр, использующий многоуровневое квантование / К. Бауэрс, Д. Уайт, Т. Лэндекер, Р. Клиглер. — *ТИИЭР*, 1973, 61, № 9, с. 226—232.
8. Спектральный приемник на волну 1.35 см / Л. Э. Абрамян, А. П. Венгер, В. Г. Грачев и др. — *Астрофиз. исслед.* (Иzv. SAO), 1985, 20, с. 149—156.
9. Комплекс программно-управляемых радиоспектрометров радиотелескопа РАТАН-600 / А. П. Венгер, В. Г. Грачев, Т. М. Егорова и др. — В кн.: XI Всесоюзная радиоастрономическая конференция по аппаратуре, антеннам и методам, 26—31 октября 1978 г. Тезисы докл., Ереван, 1978, с. 47—48.
10. Абрамян Л. Э., Мартиросян Р. М., Погосян Н. Г. Мазер с большой полосой перестройки на рубине. — *Радиотехника и электроника*, 1979, XXIV, № 1, с. 191—193.
11. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973.
12. Радиоспектрометр с шумовым пилот-сигналом и импульсной компенсацией / А. П. Венгер, В. Г. Грачев, Г. Н. Ильин и др. — В кн.: XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция, октябрь, 1982 г. Тезисы докл. Ереван, 1982, с. 149.
13. Спектрометрический комплекс радиотелескопа РАТАН-600 / А. П. Венгер, В. Г. Грачев, Т. М. Егорова и др. — *Сообщ. SAO*, 1982, 25, с. 5—31.

14. Егорова Т. М., Могилева В. Г., Рыжков Н. Ф. — Радиофизика, 1976, 19, № 10, с. 1554.
15. Приемное устройство радиоспектрометра на волну 1.35 см / Л. Э. Абрамян, А. П. Венгер, Т. М. Егорова и др. — В кн.: XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция, октябрь, 1982 г. Тезисы докл. Ереван, 1982, с. 92—93.
16. Госачинский И. В., Алферова З. А. Математическое обеспечение спектральных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. — Там же, с. 390—391.
17. Желенков С. Р. Автономная система регистрации данных спектрометров радиотелескопа РАТАН-600 на базе микро-ЭВМ «Электроника-60». — Там же, с. 152.
18. Chin G., Vuhl D., Flores J. M. Acousto-optic spectrometer for radioastronomy. — SPIE, 230, p. 30—37.
19. Рыжков Н. Ф. Радиоспектрограф на волну 21 сантиметр. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 172—179.
20. Гибридные оптико-цифровые системы обработки информации с использованием приборов с зарядовой связью / Н. А. Есепкина, Б. А. Котов, Ю. А. Котов и др. — Радиотехника и электроника, 1982, XXVII, № 8, с. 1622—1630.
21. Методика и результаты наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 с помощью акустооптического спектрометра / Н. А. Есепкина, Н. Ф. Рыжков, С. В. Прусс-Жуковский и др. — В кн.: XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция, октябрь 1982 г. Тезисы докл. Ереван, 1982, с. 156—157.

Поступила в редакцию 6 мая 1983 г.