

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

*Н. А. Есепкина, Ю. А. Котов, В. Ю. Петрунькин, Н. Ф. Рыжков,
В. Г. Грачев, А. В. Михайлов, С. В. Прусс-Жуковский, А. И. Шишкин*

Описывается функциональная схема и принцип работы акустооптического радиоспектрометра на волне 21 см для линии нейтрального водорода. Приводятся результаты исследований радиоспектрометра и наблюдений области Гольдштейна на радиотелескопе РАТАН-600.

The functional hook-up and the principle of the operating of the acousto-optical radio spectrometer on the wavelength of 21 sm for the neutral hydrogen line are described. The results of the investigation of the radio spectrometer and the results of the observation of the Goldstein region on the radio telescope RATAN-600 are presented.

Одним из факторов, сдерживающих развитие экспериментальных исследований межзвездной среды методами радиоспектроскопии, является недостаток многоканальных анализаторов параллельного типа. Применяемые для этого многоканальные фильтровые и автокорреляционные анализаторы сложны в изготовлении и имеют довольно узкую специализацию. Поэтому большой интерес представляет разработка новых акустооптических спектрографов для радиоастрономии [1—3], которые являются, по-видимому, наиболее перспективными системами для исследования миллиметровых линий.

Создание таких спектрографов стало возможным благодаря появлению анализаторов нового типа — акустооптических спектроанализаторов [4, 5] и появлению нового класса полупроводниковых устройств — приборов с зарядовой связью (ПЗС) [6—9]. Эти устройства позволили создать новый тип спектрографа, который является гибридной оптико-цифровой системой обработки сигналов.

Для детального исследования возможности применения акустооптического спектрографа в радиоастрономии проведены его испытания совместно со спектральным приемником, а также выполнены наблюдения области Гольдштейна [10] в линии нейтрального водорода на волне 21 см на радиотелескопе РАТАН-600.

Специально для этого был разработан акустооптический анализатор [11] с параметрами, близкими к параметрам штатного фильтрового анализатора спектра АС-30—40 [12], имеющего спектральное разрешение 30 кГц.

Это дало возможность провести сравнительную оценку результатов спектрального анализа, полученных с применением анализаторов разных типов, но имеющих одинаковое разрешение.

Функциональная схема радиоспектрометра. Акустооптический спектрограф работает в составе радиоспектрометра на волну 21 см, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Радиоспектрометр состоит из трех частей: электронной — модуляционного спектрального приемника, оптической — акустооптического анализатора спектра с многоэлементным фотоприемником на основе ПЗС и циф-

ровой, включающей устройство сопряжения (интерфейс), ЭВМ и выходные устройства (НМЛ, МПУ-16-2 и др.). Управление работой радиоспектрометра осуществляется программным путем с помощью ЭВМ.

Спектральный приемник СП-21 [13, 14] представляет собой СВЧ-часть штатного радиоспектрометра для исследования космического излучения в линии Н1 на радиотелескопе РАТАН-600. Он выполнен по супергетеродинной схеме с малоп шумящим усилителем СВЧ на входе и предварительным усилителем промежуточной частоты на выходе. Усиление на СВЧ осуществляется двухкаскадным невырожденным параметрическим усилителем, который охлаждается жидким азотом. СВЧ-тракт рассчитан на применение квазиулевого модуляционного метода измерений. Эквивалентом является охлаждаемая до температуры жидкого азота согласованная

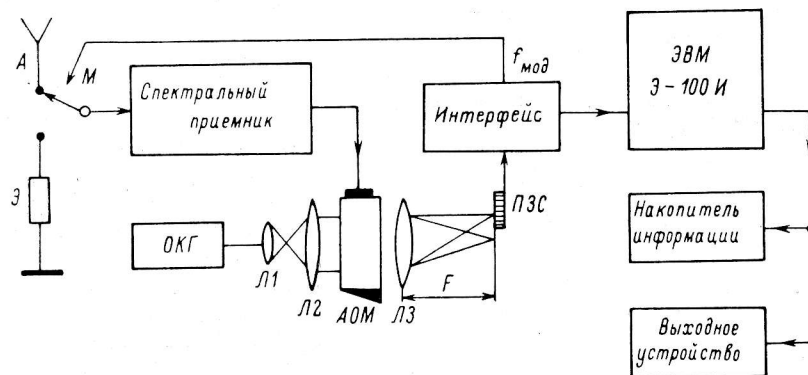


Рис. 1.

нагрузка. Шумовая температура системы антенна—приемник около 180 К.

После усиления сигнал частоты 1420 МГц преобразуется к первой промежуточной частоте ~ 46 МГц. Смеситель выполнен по балансной схеме на обращенных туннельных диодах. В качестве гетеродина используется клистрон с фазовой автоподстройкой частоты по гармонике высокостабильного перестраиваемого опорного сигнала [15].

Сигнал 46 МГц с выхода предварительного усилителя промежуточной частоты преобразуется к рабочей частоте акустооптического анализатора спектра около 31 МГц. Это второе преобразование осуществляется в устройстве, называемом усилителем промежуточной частоты с имитатором спектрального приемника (УПЧИ) [11]. УПЧИ является устройством сопряжения штатного спектрального приемника СП-21 с акустооптическим анализатором спектра и может также формировать сигналы, имитирующие работу СП-21 при испытаниях в лаборатории. Выходной сигнал УПЧИ около 31 МГц, усиленный в полосе 7 МГц, поступает на модулятор (АОМ) акустооптического анализатора спектра [11].

Акустооптический анализатор спектра — одномерный оптический процессор для спектрального анализа радиосигналов в реальном масштабе времени. С целью пояснения работы на схеме рис. 1 приведены основные функциональные узлы анализатора: монохроматический источник света ОКГ, коллимирующая оптическая система Л1, Л2 для расширения светового пучка, акустооптический модулятор света АОМ и интегрирующая линза Л3, в выходной фокальной плоскости которой формируется распределение дифрагированного света.

Для ввода сигнала 31 МГц в систему оптической обработки информации используется жидкостный акустооптический модулятор света, выполненный на воде. Его работа основана на явлении дифракции света на ультразвуковых волнах. С помощью преобразователя исследуемый сигнал

преобразуется в бегущую ультразвуковую волну, которая распространяется вдоль прозрачного звукопровода и модулирует коэффициент преломления его материала (воды). Модулятор работает в режиме дифракции Брэгга. Световая волна от ОКГ, прошедшая такой модулятор, оказывается промодулированной по фазе.

Распределение амплитуды света в выходной фокальной плоскости связано с распределением света в передней фокальной плоскости преобразованием Фурье и формируется в виде дифракционных порядков. В первом дифракционном порядке распределение интенсивности света является функцией (вида $\sin x/x$) частоты исследуемого сигнала. В результате

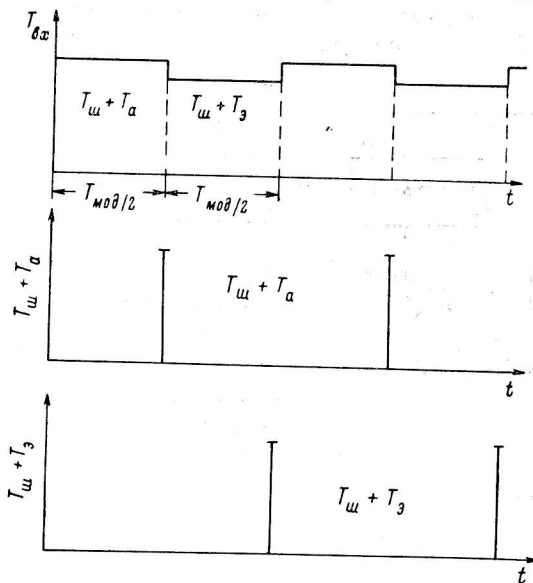


Рис. 2.

В выходной фокальной плоскости анализатора, на месте формирования первого дифракционного порядка, располагается фоточувствительный приемник на основе приборов с зарядовой связью [7, 8] в виде линейки ПЗС. Размеры оптического изображения и линейки ПЗС согласованы так, что на один элемент разрешения акустооптического анализатора приходится два элемента ПЗС-линейки. Поэтому анализатор имеет 200 спектральных каналов.

В каждом фоточувствительном элементе накапливается зарядовый сигнал, величина которого пропорциональна интенсивности света и времени экспонирования и, следовательно, определяется мощностью анализируемого электрического сигнала на частоте, соответствующей положению элемента.

Работает спектрометр следующим образом. В течение первого полупериода модуляции (рис. 2), когда на вход приемника поступает сигнал от антенны, в секции накопления ПЗС-линейки происходит накопление зарядов, пропорциональных полной шумовой температуре ($T_a + T_m$) антенны и приемника. При этом каждому светочувствительному элементу соответствует свой спектральный канал. Затем с приходом управляющего импульса эти заряды сбрасываются в сдвиговые регистры ПЗС-линейки. В течение второго полупериода модуляции сигналы из сдвигового регистра через интерфейс и аналогово-цифровой преобразователь поступают в ЭВМ, где записываются в ячейках оперативной памяти (МОЗУ).

Одновременно с началом второго полупериода модуляции вход приемника переключается на эквивалент, и в течение этого полупериода на светочувствительных элементах линейки ПЗС происходит накопление зарядов,

в выходной фокальной плоскости акустооптического анализатора спектра формируется распределение интенсивности света, пропорциональное спектру мощности входного сигнала. Такая система эквивалентна многоканальному фильтровому анализатору спектра параллельного типа, имеющему форму частотной характеристики в каждом канале вида $\sin x/x$ и полосу пропускания по уровню 3 дБ, равную 30 кГц.

Таким образом, акустооптический анализатор спектра имеет частотное разрешение $\Delta f_{min} = 30$ кГц и полосу одновременного анализа, равную 3 МГц, следовательно, число разрешимых точек в полосе анализа равно 100.

пропорциональных полной шумовой температуре $(T_a + T_m)$ эквивалента и приемника. Вывод этих сигналов производится аналогичным путем в течение следующего полупериода модуляции.

Таким образом, накопление и ввод сигналов в ЭВМ происходит параллельно, а вывод сигналов в ЭВМ — последовательно.

В МОЗУ ЭВМ на каждый элемент линейки ПЗС, т. е. на каждый спектральный канал, отводится две ячейки памяти, в которых записываются и накапливаются сигналы $T_a + T_m$ и $T_a + T_m$ в течение некоторого времени t , определяемого условиями наблюдений.

Далее в ЭВМ осуществляется операция синхронного детектирования, т. е. вычитание сигналов из ячеек, соответствующих антенне и эквиваленту. Полученные результаты выводятся во внешние устройства для оперативного контроля и регистрации.

Условия и методика наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. Для наблюдений на РАТАНе [16] была выбрана протяженная область неба, центр которой имеет координаты $\alpha_{1963.0} = 15^h 29^m 36^s$, $\delta_{1963.0} = 2^h 16^m 00^s$ (область Гольдштейна [19]). В этом направлении интенсивность, полуширина и центральная частота линии излучения нейтрального водорода НI, а также яркостная температура фона с непрерывным спектром сравнительно постоянны на участке размером $6 \times 6^\circ$. Форма профиля линии НI близка к гауссовой, причем ее полуширина (28—29 кГц) сравнима с разрешающей способностью исследуемого акустооптического анализатора.

При неподвижной диаграмме антенны от области Гольдштейна может наблюдаться линия с почти постоянными параметрами в течение $\sim 30^m$. За это время можно произвести последовательное перемещение линии по множеству каналов анализатора путем изменения частоты 1-го гетеродина спектрального приемника СП-21 и, таким образом, проверить характеристики и исследовать работу этих каналов по естественному «монокроматическому» излучению НI.

Для этого эксперимента был использован сектор РАТАНа в азимуте 60° [16]. Для наблюдения области Гольдштейна было установлено 125 элементов кругового отражателя. Вычисления наблюдаемой частоты линии на период наблюдения проводились с учетом эффекта Доплера по программе [17] на ЭВМ «Электроника-100И». Расчеты показали, что изменение наблюдаемой частоты НI сравнимо с шириной полосы пропускания канала анализатора и его нужно учитывать (это изменение обусловлено главным образом тем, что во время наблюдения через неподвижную диаграмму антенны проходят различные участки протяженной области).

Настройка выбранного канала анализатора на спектральную линию производилась с помощью перестраиваемого 1-го гетеродина, синхронизируемого с помощью системы фазовой автоподстройки (ФАП) по гармонике высокостабильной частоты [13, 15]. Благодаря этой системе частота 1-го гетеродина может устанавливаться дискретно с шагом 400 кГц и плавно изменяться в пределах ≤ 1 МГц.

В процессе наблюдений частота 1-го гетеродина изменялась каждые 15^s на 10 кГц. В результате такой перестройки сигнал от линии за 23 мин наблюдений прошел последовательно по 64 каналам анализатора.

Для регистрации было выведено 100 каналов анализатора, соответствующих порядковым номерам линейки ПЗС с 50 до 150. Регистрация разностного сигнала «антенна минус эквивалент», интегрированного по 3-секундным (точнее 2.56^s) интервалам, производилась с помощью цифropечатающего устройства МПУ-16-2. Интегрирование сигнала и вывод на печать отсчетов со всех 100 каналов за один интервал интегрирования занимали около 6^s . Отсчеты на МПУ-16-2 снимались через каждые 15^s звездного времени. В результате применяемой перестройки частоты и способа регистрации на полосу пропускания каждого из каналов анализатора приходилось около 4 отсчетов сигнала.

Помимо цифровой регистрации производилась запись отсчетов в двух каналах с помощью самописцев КСП-4. Это достигалось цифро-аналоговым преобразованием регистрируемых сигналов.

Оперативное отображение информации производилось с помощью дисплея, созданного на базе осциллографа с применением ЭВМ и блока фиксированных уровней (БФУ).

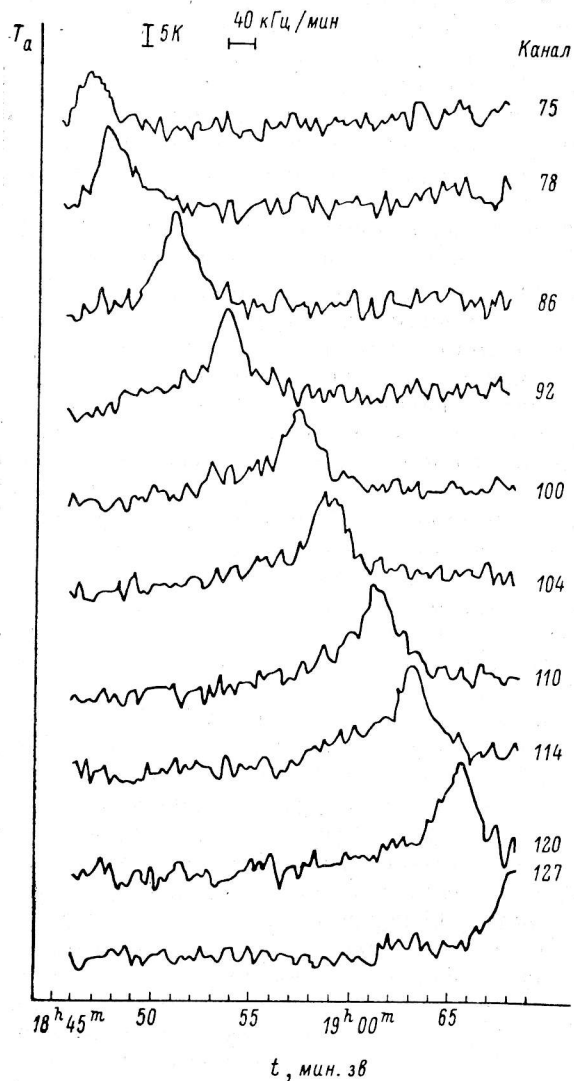


Рис. 3.

Результаты наблюдения области Гольдштейна представлены на рис. 3 в виде кривых, отображающих зависимость выходного сигнала в выбранных каналах от наблюдаемой частоты.

Проведенные исследования показывают, что акустооптический радиоспектрометр обеспечивает чувствительность, близкую к расчетной.

Измеренное значение полуширины наблюдавшейся линии оказалось равным ~ 60 кГц, что примерно на 40% превышает ожидаемую величину (с учетом влияния формы сглаживающей функции анализатора). Такое различие вызвано, по-видимому, воздействием на некоторые узлы анализатора механических вибраций, создаваемых работающей аппаратурой. В дальнейшем этот недостаток будет устранен.

Результаты наблюдений и экспериментальных исследований. Некоторые выводы. По результатам измерений в разных спектральных каналах при времени усреднения 2.56^s чувствительность составляет $(1.2 \div 1.5)$ К, что хорошо соответствует расчетному значению $(1.3 \div 1.4)$ К при шумовой температуре системы 180 К.

Чувствительность используемого на РАТАНе фильтрового кварцевого анализатора АС-30—40 с фильтрами, имеющими прямоугольную характеристику шириной 30 кГц при постоянной времени РС-фильтра $\tau = 6^s$, составляет $(0.5 \div 0.6)$ К. Различие в чувствительности в два раза связано с тем, что у фильтрового анализатора эквивалентное время усреднения $t_0 = 2\tau$ примерно в четыре раза больше, чем у акустооптического спектрографа.

Оценка чувствительности и калибровка производились по калибровочному сигналу 8 К, подаваемому в тракт антенны от эталонного генератора шума.

Следует отметить, что за время испытаний осуществлялась непрерывная работа спектрографа в течение 20 ч, в процессе которой не было отказов аппаратуры. Первые опыты применения акустооптического анализатора для наблюдений на РАТАН-600 прошли вполне успешно. В настоящее время ведется модернизация конструкции с учетом выявленных недостатков. Дальнейшие усилия будут направлены на отработку механических узлов базовой оптической системы с целью повышения ее стабильности, на разработку методики наблюдений, измерение стабильности электронных элементов системы, выяснение основных причин нестабильности и путей их устранения, на измерение характеристик ПЗС-линеек; на отработку программного обеспечения спектрографа.

С учетом ближайших перспектив радиоспектроскопии на РАТАН-600 ведутся исследования возможности создания широкополосных анализаторов спектра с твердотельными акустооптическими модуляторами на основе разработанной базовой оптической системы и системы сопряжения оптического процессора с цифровой вычислительной машиной.

В заключение авторы выражают благодарность Б. А. Котову, И. В. Госачинскому, Н. С. Евграфову, Т. М. Егоровой, В. Г. Могилевой, Н. П. Кумару и С. Р. Желенкову за участие в подготовке и проведении наблюдений.

Список литературы

1. Cole T. W. Electrooptical processing in radio astronomy. — *Optical Acta*, 1975, 22, No 2, p. 83—92.
2. Есепкина Н. А., Петрунькин В. Ю., Бухарин Н. А., Котов Б. А., Котов Ю. А., Прусс-Жуковский С. В. Акустооптические анализаторы спектра для радиоастрономии. — *Изв. вузов. Радиофизика*, 1976, XIX, 11, с. 1732—1739.
3. Kaifu N., Ukita N., Chicada Y., Mijaiu T. A high-resolution acousto-optical radio spectrometer for millimeter-wave. — *Astronomy, Publ. Astron. Soc. Jap.*, 1977, 29, p. 420—435.
4. Lambert L. Wide-band instantaneous spectrum analyzers imploing Leddy-line modulators. — *IRE, Nat. Couv. Rec.*, 1962, 10, pt. 6, p. 79.
5. Есепкина Н. А., Аксенов Е. Т., Григорьев В. А., Прусс-Жуковский С. В. Акустооптический анализатор спектра радиосигналов. — *Проблемы голографии*, 1975, вып. V.
6. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядной связью. — М., «Сов. радио», 1976. 127 с.
7. Березин В. Ю., Котов Б. А. Телевизионная камера на матрице приборов с зарядовой связью. — *Техника кино и телевидения*, 1977, 6, с. 54—59.
8. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. М., «Мир», 1978. 327 с.
9. Есепкина Н. А., Котов Б. А., Котов Ю. А., Михайлов А. В., Петрунькин В. Ю., Прусс-Жуковский С. В. Гибридная оптико-цифровая система для спектрального анализа радиосигналов. — *Автометрия*, 1978, 3, с. 50—54.
10. Goldstein S. A narrow 21-cm emission line from a region of large angular size. — *Proc. IEEE*, 1964, 52, No 9, p. 1046—1047.
11. Грачев В. Г., Котов Б. А. и др. Особенности конструкции и исследование акустооптического спектрографа. — *Настоящий сборник*, с. 77—87.
12. Грачев В. Г., Прозоров В. А. — *Изв. вузов. Радиофизика*, 1976, XIX, 11.
13. Венгер А. П., Грачев В. Г., Егорова Т. М., Могилева В. Г., Прозоров В. А., Рыжков Н. Ф. Программно-управляемый спектрометр на волну 21 см. Науч.-техн. отчет САО АН СССР, 1978.
14. Венгер А. П., Грачев В. Г. и др. Комплекс программно-управляемых радиоспектрометров радиотелескопа РАТАН-600. — В кн.: XI Всесоюзная конференция по радиоастрономии. Тезисы докладов. Ереван, 1978, с. 47—48.
15. Егорова Т. М., Могилева В. Г., Рыжков Н. Ф. Программно-управляемые гетеродины для радиоспектрометров. — *Изв. вузов. Радиофизика*, 1976, XIX, 11, с. 10.
16. Берлин А. Б., Есепкина Н. А. и др. Новый радиотелескоп Академии наук РАТАН-600. — *ПТЭ*, 1977, 5, с. 8—16.
17. Алферова З. А., Госачинский И. В. Математическое обеспечение спектральных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1978, 10, с. 129.