

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОГРАФОВ В РАДИОАСТРОНОМИИ

*Н. А. Есепкина, С. В. Прусс-Жуковский, Е. Т. Аксенов,
З. В. Дравских, А. И. Шишкин, А. С. Щербаков*

Рассмотрена возможность использования акустооптических спектрографов для наблюдения спектральных линий в радиодиапазоне. Показано, что такие спектрографы могут иметь полосы от десятков до сотен мегагерц и разрешение от десятков килогерц до единиц мегагерц и пригодны для наблюдения всех известных и предсказанных линий в радиоастрономии.

A possibility of the use of acousto-optical spectrographs for observations of spectral lines in radio astronomy is considered. It is shown that these spectrographs may have bandwidths from tens to hundreds of MHz and a spectral resolution from tens of KHz to units of MHz. They are suitable for observations of any lines in radioastronomy.

В последнее десятилетие главным образом благодаря обнаружению молекулярных линий начала быстро развиваться радиоспектроскопия, которая стала новой большой областью радиоастрономии. Исследование уже обнаруженных и попытки обнаружения новых линий потребовали разработки спектральных приемников, параметры которых значительно превосходят параметры используемых до недавнего времени спектрографов. При этом желательно было иметь спектрографы с легко изменяющимися параметрами: полосой анализа, разрешением, числом спектральных каналов. Такими спектрографами и являлись акустооптические спектрографы, в которых используются последние достижения когерентной оптики и акустооптики [1—4].

Акустооптические спектрографы являются, по-видимому, наиболее подходящими спектрографами для радиоастрономии. Они позволяют получать такие комбинации полосы, разрешения и числа каналов, которые недостижимы ни для каких других спектрографов при значительно меньшей стоимости и конструктивной простоте, особенно при использовании интегрально-оптических спектроанализаторов [5, 6]. Существенным достоинством акустооптических спектрографов является возможность одновременного наблюдения ряда линий или целой спектральной группы для каждого небесного источника. При таком способе наблюдений, основанном на использовании в спектрографе пространственно-многоканальных акустооптических модуляторов [7, 8], радиоспектроскопия приближается к оптической спектроскопии, в которой на фотопластинке одновременно регистрируется большой участок исследуемого спектра.

Все сказанное делает понятным тот большой интерес, который проявляется в радиоастрономии к акустооптическим спектрографам.

Настоящая статья посвящена рассмотрению возможности использования акустооптических спектрографов в радиоастрономии.

В начале приведен краткий обзор спектральных линий в радиоастрономии, исходя из которого определены требования к спектрографам, а затем рассмотрены характеристики акустооптических спектрографов, которые могут быть реализованы уже в настоящее время.

1. Спектральные линии радиодиапазона и требования к спектрографам.

В радиоастрономии спектральные линии на много порядков слабее линий, излучаемых в оптическом диапазоне. Поэтому в течение длительного времени в радиоастрономии была известна лишь одна линия H I на волне $\lambda=21$ см, открытая в 1951 г. [9] и обязанная своим происхождением нейтральному водороду. В большей части межзвездной среды водород не ионизован, следовательно, не может наблюдаться ни в оптическом диапазоне, ни в радиоконтинууме. Он дает только одну радиолинию — $\lambda=21$ см. Обнаружение радиолинии H I открыло исключительные возможности изучения физических характеристик межзвездной среды, так как водород — самый распространенный элемент во Вселенной.

Исследование монохроматического излучения дает такие параметры космических объектов, которые невозможно определить по изучению непрерывного спектра, поэтому естественным являлось стремление расширить возможности спектральных исследований в радиоастрономии. В 1963 г. после многолетних исследований в диапазоне 18 см были обнаружены 4 линии молекулы межзвездного гидроксила OH [10], которые дают сведения о более холодных областях межзвездной среды, чем линия 21 см.

Открытие линий OH ознаменовало начало новой эры в радиоастрономии. Вслед за линиями OH в 1963 г. были открыты рекомбинационные линии возбужденного водорода H II [11], которые могут наблюдаться в любой части радиодиапазона и играют важную роль в исследовании горячей компоненты межзвездной среды — областей ионизованного водорода. В 1969 г. были обнаружены «сверхкомпактные» источники (≤ 0.0003), излучающие радиолинию водяного пара H_2O на волне $\lambda=1.35$ см [12]. За 10 лет после открытия линий OH был обнаружен целый ряд молекулярных радиолиний в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн [13], при этом наибольшую интенсивность имеют миллиметровые линии. Межзвездные молекулярные радиолинии, так же как линия 21 см, могут быть использованы для исследования структуры Галактики. Как оказалось, основная доля водорода в газово-пылевых комплексах находится в форме молекул H_2 , которые в радиодиапазоне не дают никаких линий и не могут быть обнаружены. Таким образом, наблюдения линии 21 см не дают полной картины распределения газа в Галактике. Эта картина может быть дополнена наблюдениями таких широко распространенных молекул, как CO, которая наиболее обильна в межзвездной среде после молекулярного водорода, молекул CS, H_2CO и др. Методами радиоастрономии уже обнаружено около 50 межзвездных молекул. Большое количество переходов, соответствующих одной молекуле (молекула CO, например, имеет 10 переходов), различие условий возбуждения этих переходов делает наблюдения молекулярных линий одним из наиболее мощных методов исследования межзвездной среды. В радиоастрономии может быть исследовано около 600 переходов различных межзвездных молекул в диапазоне от 35 см до 0.87 мм.

В настоящее время радиоспектроскопия во всех диапазонах волн позволяет исследовать не только различные галактические источники, но дает возможность изучать также внегалактические объекты.

Полуширины рассмотренных выше радиолиний и параметры спектрографов, необходимые для наблюдения этих радиолиний, приведены в табл. 1.

Теперь кратко рассмотрим возможности наблюдения радиолиний на Солнце.

В оптическом спектре Солнца наблюдается множество линий поглощения и излучения, принадлежащих различным элементам. Оптические спектральные линии дают возможность исследовать физические условия на Солнце, проводить количественный химический анализ. По профилям

Полуширины радиолиний и параметры спектрографов

Линия	λ , см	Наша Галактика (разные области)			Центр Галактики и другие галактики			Солнце		
		Полуширина линии, кГц	Полоса анализа спектрографа, МГц	Разрешение спектрографа, кГц	Полуширина линии, МГц	Полоса анализа спектрографа, МГц	Разрешение спектрографа, кГц	Полуширина линии, МГц	Полоса анализа спектрографа, МГц	Разрешение спектрографа, МГц
H I	21	5—150	1—3	1—30	1	10	~25	—	—	—
OH	18	< 1—150	1—3	< 1—30	~1	10	~25	—	—	—
H109 α *	6	60—700	10	25	3—4	~30	~500	—	—	—
Молекулярные линии миллиметрового диапазона**	0.35—0.26	2000—10 000	20—100	250—1000	~100	300—1000	~20 000	—	—	—
Солнечные комбинационные линии***	0.1 и короче	—	—	—	—	—	—	Для $\lambda = 0.1$ ~400	~4000	~80
$2F_{3/2}^2 - 2S_{1/2}^2$	3.04	—	—	—	—	—	—	200—300	~1000	~50
Солнечные циклотронные линии и уступы	1 и длиннее	—	—	—	—	—	—	—	(6 ÷ 9) ω_B	0.1 ω_B

* Для примера взяли линию H109 α . Комбинационные линии возбужденного водорода могут наблюдаться в деци-, санти- и миллиметровых диапазонах волн. Для линий других, нежели H109 α , все полосы изменятся пропорционально частоте.

** Молекулярные линии наблюдаются также в деци- и сантиметровом диапазонах. Для линий сантиметрового диапазона могут быть использованы те же спектроанализаторы, что и для комбинационных линий возбужденного водорода.

*** Ни одна из линий на Солнце до сих пор не обнаружена.

линий изучаются турбулентные движения на Солнце, по расщеплению — магнитные поля. Хотя во многих работах показана возможность наблюдения радиолиний на Солнце [14—16], ни одна из них до сих пор не была обнаружена. Это, по-видимому, связано с тем, что ширины радиолиний на Солнце должны составлять сотни и даже тысячи мегагерц и для их обнаружения необходимо создавать специальные широкополосные спектрографы, которые пока еще не используются в радиоастрономии.

Ожидается, что на Солнце могут быть обнаружены рекомбинационные линии возбужденного водорода на волнах короче 1 мм [14], на волне 3.04 см может наблюдаться линия возбужденного водорода $2P_{3/2}^3 - 2S_{1/2}^3$ [15]. Недавно было показано [16], что в радиоизлучении Солнца

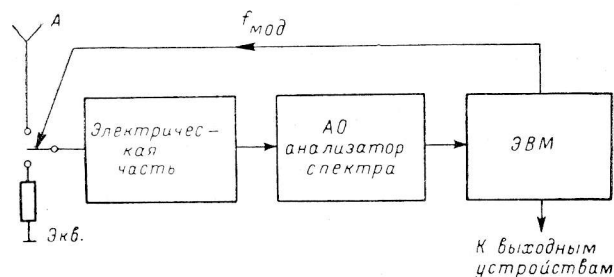


Рис. 1. Блок-схема акустооптического спектрографа для радиоастрономии.

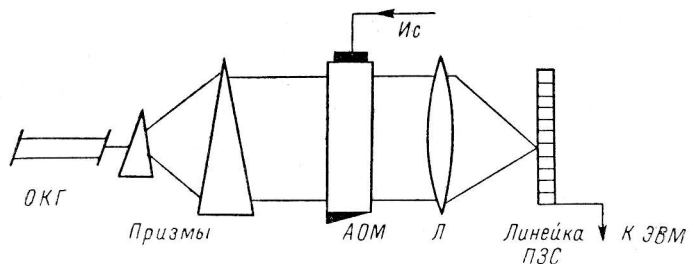


Рис. 2. Функциональная схема акустооптического анализатора спектра.

может наблюдаться тонкая структура в виде отдельных циклотронных линий и высокочастотных уступов в спектре, которая представляет излучение электронов в магнитном поле на гармониках гирочастоты ω_B . Появление тонкой структуры следует ожидать в предвспышечный период, поэтому ее регистрация может использоваться для прогнозирования солнечных вспышек. Для обнаружения тонкой структуры в спектре радиоизлучения Солнца необходимо проводить спектральные наблюдения в широком диапазоне частот (с перекрытием по частоте не менее чем в 3 раза) со сравнительно высокой разрешающей способностью $\Delta\omega/\omega_B \ll 0.1$. Для этого необходимы широкополосные панорамные спектральные приемники, имеющие несколько высокочастотных входов, которые могут быть созданы на основе акустооптики.

Ожидаемые полуширины радиолиний на Солнце и параметры спектрографов, необходимые для их наблюдения, приведены в табл. 1.

2. Акустооптические спектрографы. Как было показано выше, для дальнейшего развития радиоспектроскопии необходимы широкополосные спектрографы нового типа, которые могут быть созданы на основе акустооптики.

Блок-схема акустооптического спектрографа для радиоастрономии представлена на рис. 1. Она состоит из трех частей [1—3]: электронной, т. е. высокочастотной, части обычного модуляционного радиометра, оптической — акустооптического анализатора спектра (рис. 2) и цифро-

вой — содержащей ЭВМ и выходные устройства. Акустооптический спектрограф является гибридной оптико-цифровой системой, сопряжение оптической и цифровой частей которой осуществляется с помощью многоэлементных фотоприемников, например фотоприемников на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). В электронной части спектрографа, на входе которой имеется малошумящий усилитель, осуществляется предварительное усиление и преобразование сигнала. В оптической части осуществляется Фурье-преобразование входного сигнала или спектральный анализ, а в цифровой — накопление сигнала, калибровка и другие операции, не требующие высокого быстродействия. Именно благодаря оптимальному распределению функций обработки между отдельными частями гибридной системы в акустооптическом спектрографе удается получить высокое быстродействие, а следовательно, широкую полосу анализа. В таком спектрографе для наблюдения различных линий достаточно изменить только входную электронную часть и, в случае необходимости, акустооптический модулятор. В спектрографе используется стандартный цифровой комплекс, состоящий из управляющей ЭВМ с периферийными устройствами и специальным интерфейсом управления ПЗС-фотоприемником. ЭВМ заменяет собой сложную низкочастотную часть обычных фильтровых спектрографов, а также управляет модулятором на входе приемника.

Особенности и преимущества акустооптических спектрографов связаны с акустооптическим анализатором спектра (АОАС), на рассмотрении которого мы остановимся более подробно.

Оптическая схема анализатора спектра (рис. 2) достаточно проста и содержит когерентный источник света *OKI*, призмный формирователь пучка, акустооптический модулятор *АОМ*, линзу *L*, осуществляющую преобразование Фурье, и многоэлементный фотоприемник. В качестве выходных устройств в модуляционных спектрографах необходимо использовать фотоприемники с накоплением, которыми и являются фотоприемники на основе ПЗС. Необходимо отметить, что рассмотренная оптическая схема может быть реализована как на основе ультразвуковых модуляторов света на объемных упругих волнах, так и методами интегральной оптики. Ниже будут рассмотрены обе эти возможности.

Основным элементом акустооптического анализатора спектра на основе объемных упругих волн является модулятор, параметры которого в значительной степени определяют параметры всего спектрографа. Так, с заменой одного акустооптического модулятора на другой могут быть существенно изменены такие характеристики радиоспектрографа,

ТАБЛИЦА 2
Параметры одноканальных акустооптических модуляторов

Параметр	Материал звукопровода											
	α -SiO ₂	PbMoO ₄	LiNbO ₃	TeO ₂	H ₂ O	Ti-3	SiO ₂	GaP	LiNbO ₃	GaP	LiNbO ₃	TeO ₂
Центральная рабочая частота модулятора f_0 , МГц	1500	500	1000	65	30	36	210	630	1050	300	500	45
Полоса рабочих частот Δf , МГц	350	45	180	28	3.0	24	39	300	500	150	250	21
Частотное разрешение δf , кГц	450	450	600	60	30	120	130	850	1000	850	1000	40
Число частотных каналов $M = \Delta f / \delta f$	780	100	300	450	100	200	300	350	500	180	250	512
Литература	[18]	[18]	[18]	[20]	[19]	[2]	[2]	[17]	[17]	[17]	[17]	[3]

как полоса рабочих частот, частотное разрешение и число частотных каналов. Акустооптические модуляторы можно реализовать для работы в диапазоне частот от десятков мегагерц до нескольких гигагерц с полосой анализа до 30—40%, частотным разрешением от десятков килогерц до нескольких мегагерц и числом частотных каналов до 1000—2000 [17].

В табл. 2 приведены для примера параметры изготовленных нами одноканальных акустооптических модуляторов, а также некоторых

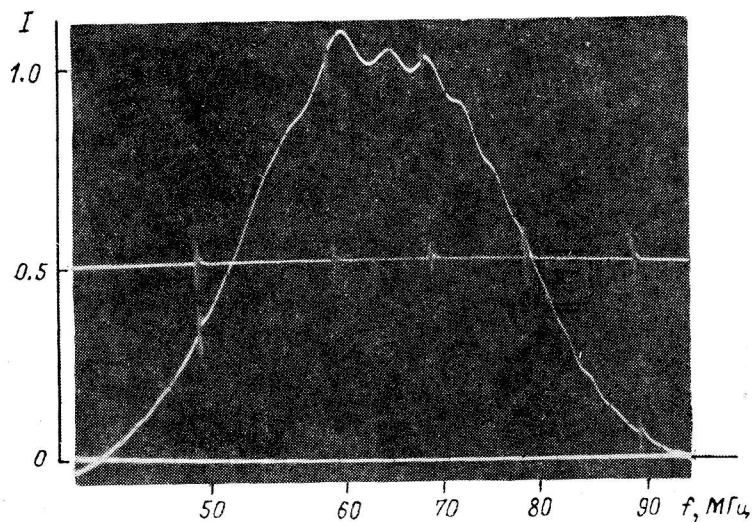


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика модулятора на кристалле TeO_2 .

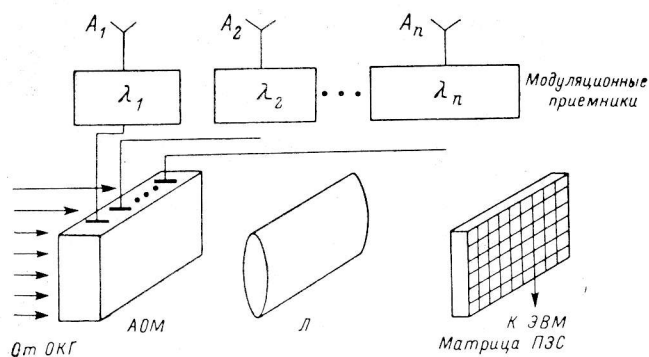


Рис. 4. Функциональная схема спектрографа с пространственно-многоканальным акустооптическим модулятором.

модуляторов, изготовленных за рубежом. Сведения, приведенные в этой таблице, не претендуют на полноту, так как статья не носит обзорного характера. Однако из указанных данных следует, что существующие в настоящее время одноканальные модуляторы позволяют создавать акустооптические спектрографы с полосами анализа в сотни мегагерц и числом каналов 500—1000.

Остановимся более подробно на использовании в акустооптических спектрографах такого перспективного кристалла, как парателлуриит (TeO_2). Модуляторы на основе этого кристалла используются в спектрографах Токийской обсерватории [3]. Нами был изготовлен акустооптический модулятор из парателлуриита, предоставленного нам Институтом геологии и геофизики СО АН СССР. При лабораторном исследовании модулятора из TeO_2 были получены характеристики, указанные в табл. 2. На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика модуля-

тора. На основе модулятора из TeO_2 нами разработан акустооптический модуляционный спектрограф для радиоастрономических наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600, описание которого приводится в работах [4, 20].

Как уже отмечалось выше, для спектрального анализа совокупности сигналов, поступающих от различных радиометров, в радиоспектро-

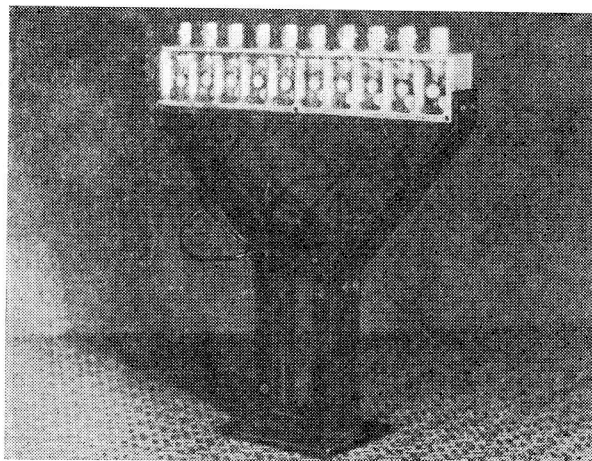


Рис. 5. Внешний вид пространственно-многоканального акустооптического модулятора на кварце.

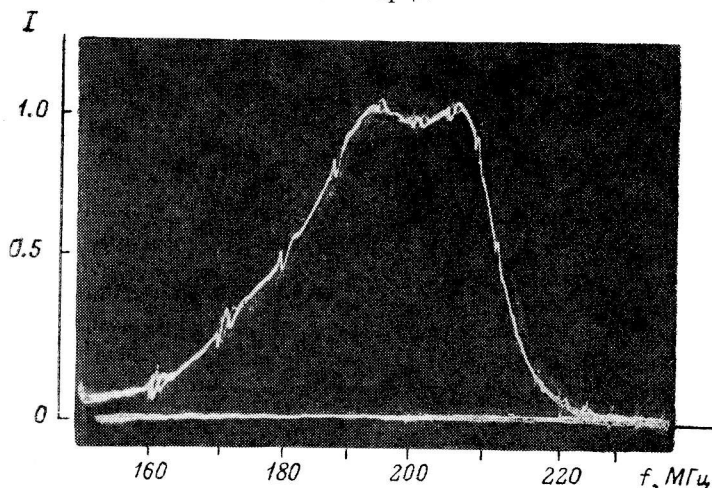


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика одного из каналов многоканального модулятора на кварце.

графе могут быть использованы пространственно-многоканальные акустооптические модуляторы света [8, 21]. Оптическая схема анализатора спектра для проведения одновременных спектральных наблюдений на разных длинах волн представлена на рис. 4. Оптическая система содержит многоканальный акустооптический модулятор света (АОМ), цилиндрическую интегрирующую линзу (L) и матричный ПЗС-фотоприемник. Источник когерентного света и коллимирующие линзы на рисунке не показаны. Число столбцов в матрице ПЗС должно равняться числу пространственных каналов многоканального модулятора N , а число строк — числу частотных каналов M . Параметры разработанных нами многоканальных модуляторов, а также модуляторов, разработанных за рубежом, приведены в табл. 3. Внешний вид разработанного нами много-

Т А Б Л И Ц А 3

Параметры пространственно-многоканальных акустооптических модуляторов

Параметр	Материал звукопровода					
	H ₂ O	SiO ₂	PbMoO ₄	TeO ₂	Тф-7	TeO ₂
Центральная рабочая частота модулятора f_0 , МГц	30	200	250	40	130	—
Полоса рабочих частот одного канала модулятора Δf , МГц	3.5	50	80	5	250	250
Частотное разрешение δf , кГц	35	80	300	150	120	270
Число частотных каналов M	100	400	270	30	400	864
Число пространственных каналов модулятора N	16	20	6	7	20	$2 \times 8 = 16$
Полная полоса частот $N\delta f$, МГц	50	1000	480	35	1000	2000
Число частотных каналов многоканального модулятора	1600	8000	1600	210	8000	14000
Литература	[2]	[8]	—	[22]	—	[3]

канального модулятора на кварце, параметры которого даны в таблице, показан на рис. 5. Частотная характеристика этого модулятора приведена на рис. 6. Из приведенной таблицы следует, что использование пространственно-многоканальных модуляторов позволяет увеличить общее число частотных каналов спектрографа до нескольких тысяч при очень широких полосах анализа, достигающих единиц гигагерц, т. е. позволяет создавать спектрографы нового типа. Использование таких спектрографов в радиоастрономии существенно изменит методику спектральных исследований, позволит ставить такие задачи, решение которых было невозможно с помощью используемых в настоящее время спектральных приемников.

Большой интерес для разработки новых спектральных приемников для радиоастрономии представляют акустооптические спектроанализаторы на основе интегральной оптики. Такие спектроанализаторы по сравнению с их объемными аналогами обладают рядом преимуществ, в частности меньшими габаритами и мощностями управляющих сигналов, большей надежностью. Они позволяют проще реализовать широкие полосы анализа, имеют простую конструкцию и небольшую стоимость. Интегрально-оптические спектроанализаторы могут быть использованы для решения тех задач, где требуются полосы анализа до нескольких сотен мегагерц при разрешении порядка единиц мегагерц. В последнее время как у нас в стране, так и за рубежом проводятся интенсивные исследования, направленные на создание действующих макетов интегрально-оптических спектроанализаторов. В лабораторных условиях уже реализованы полосы анализа порядка 400 МГц при разрешении порядка 2 МГц [6].

Для проверки возможности создания интегрально-оптического спектроанализатора с характеристиками, удовлетворяющими требованиям радиоастрономии, нами был разработан и исследован макет интегрально-оптического спектроанализатора. Основной элемент анализатора был изготовлен на основе пластины ниобата лития y -среза, в которой методом твердотельной диффузии титана [23] был сформирован одномодовый оптический волновод. На этой же пластине была изготовлена сферическая геодезическая линза с фокусным расстоянием ~ 50 мм. Ввод анализируемого сигнала осуществлялся целевым преобразователем [24],

расположенным на торце пластины ниобата лития. Ввод света в оптический волновод осуществлялся призмами из фосфида галлия. Фотоприемником в макете служила линейка ПЗС, позволявшая осуществлять наблюдение спектра анализируемых сигналов непосредственно на экране осциллографа [25]. Полоса анализа разработанного макета интегрально-оптического спектроанализатора составила $\Delta f = 250$ МГц при разрешении $\delta f = (1.5 \div 2)$ МГц.

В настоящее время уже имеется ряд действующих модуляционных акустооптических спектрографов в Австралии и Японии [26, 27]. Первые измерения проведены на такой аппаратуре и на радиотелескопе РАТАН-600. Рабочие характеристики этих акустооптических спектрографов приведены в табл. 4. Разработанные акустооптические спектрографы были использованы для наблюдения молекулярных и рекомбинационных линий [13, 26], линии нейтрального водорода [4], для исследования спектра межзвездных мерцаний [28] и др.

ТАБЛИЦА 4
Параметры акустооптических спектрографов для радиоастрономии

Параметр	CSIRO-1	CSIRO-2	ТОКУО-1	ТОКУО-2	РАТАН-600	РАТАН-600	РАТАН-600
Материал звукопровода	SiO ₂	LiNbO ₃	TeO ₂	TeO ₂	H ₂ O	Тф-7	TeO ₂
Центральная частота спектроанализатора f_0 , МГц	135	405	65	360	30	70	65
Полоса рабочих частот Δf , МГц	90	270	41	200	3.0	30	20
Частотное разрешение δf , МГц	240	1050	38	250	30	300	60
Число частотных каналов $M = \Delta f / \delta f$	512	256	1100	800	100	100	330
Литература	[27]	[28]	[27]	[27]	[4]		[20]

Таким образом, приведенные характеристики акустооптических модуляторов и акустооптических спектрографов (табл. 2—4) показывают, что такие спектрографы позволяют реализовать полосы анализа и разрешение, необходимые для наблюдения практически всех известных в настоящее время и предсказанных линий радиодиапазона (табл. 1).

Существенным достоинством акустооптических спектрографов являются простота конструкции, особенно при использовании интегрально-оптических спектроанализаторов, малая стоимость и, что особенно важно, слабая зависимость стоимости от числа каналов. Создание акустооптических спектрографов для радиоастрономии стало возможно благодаря использованию последних достижений таких новых направлений радиофизики, как акустооптика и интегральная оптика, а также применению разработанных в последнее время твердотельных фотоприемников на основе приборов с зарядовой связью.

Список литературы

1. Cole T. W. An electrooptical radio spectrograph. — Proc. IEEE, 1973, 61, p. 1321.
2. Е с е п к и н а Н. А., П е т р у н ь к и н В. Ю., Б у х а р и н Н. А. и др. Акустооптический анализатор спектра для радиоастрономии. — Изв. вузов, Радиофизика, 1976, 19, № 11, с. 1732.
3. K a i f u N., U k i t a N., C h i k a d a Y., M i y a l T. A high-resolution acousto-optical radio-spectrometer for millimeter-wave astronomy. — Publ. Astron. Soc. Japan, 1977, 29, p. 429.

4. Есепкина Н. А., Рыжков Н. Ф., Котов Ю. А. и др. Первые испытания акустооптического анализатора спектра на РАТАН-600. — Письма в АЖ, 1980, 6, № 1, с. 61.
5. Robinson B. J. Wideband spectrometers for millimeter wavelength. — IUU Symp. 87, Quebec, 6—10 VIII 1979, p. 1.
6. Anderson D. B., Boyd J. T., Hamilton M. C., August R. K. An integration-optical approach to the fourier transform. — IEEE QE-13, 1977, 13, p. 288.
7. Есепкина Н. А., Петрунькин В. Ю., Аксенов Е. Т. и др. Многоканальные акустооптические устройства. — ЖТФ, 1975, 45, с. 2353.
8. Аксенов Е. Т., Бухарин Н. А., Рогов С. А., Саенко И. И. Многоканальные высокочастотные акустооптические модуляторы. — Квантовая электроника. Труды ЛПИ, 1979, № 366, с. 45.
9. Iwen H., Purcell E. Observation of a line in the galactic radio spectrum. — Nature, 1951, 168, p. 356.
10. Weinreb S., Barret A. H., Meeks M. L., Henry J. C. Radio observations of OH in the interstellar medium. — Nature, 1963, 200, p. 829.
11. Дравских А. Ф., Дравских З. В. О попытке наблюдения радиолинии возбужденного водорода. — Астрон. цирк., 1964, № 282.
12. Cheung A. C., Rank D. M., Townes C. H. e. a. Detection of water in interstellar regions by its microwave radiation. — Nature, 1969, 221, p. 626.
13. Lovas F. J., Snyder L. E., Johnson D. R. Recommended rest frequencies for observed interstellar molecular transitions. — Final draft for review only submitted to the Astrophys. J., February 1979, National bureau of standarts.
14. Дравских А. Ф., Дравских З. В. Ожидаемое распределение яркости радиолний возбужденного водорода в атмосфере Солнца. — Бюл. «Солнечные данные», 1981, № 3, с. 99.
15. Wild J. P. The radio-frequency line spectrum of atomic hydrogen and its applications in astronomy. — Astrophys. J., 1952, 115, p. 206.
16. 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.
17. Necht D. L. Spectrum analysis using acousto-optics devices. — Optical Engineering, 1977, 16, N 5, p. 461.
18. Аксенов Е. Т., Есепкина Н. А., Щербачков А. С. Высокочастотные акустооптические дефекторы на кристаллах. — ЖТФ, 1977, 47, № 2, с. 362.
19. Есепкина Н. А., Котов Б. А., Рыжков Н. Ф. и др. Акустооптический спектрограф для радиотелескопа РАТАН-600. — Письма в ЖТФ, 1979, 5, № 9, с. 555.
20. Аксенов Е. Т., Грачев В. Г., Прусс-Жуковский С. В. и др. Акустооптический спектрограф для радиотелескопа РАТАН-600 на основе кристалла TeO_2 . — Настоящий сборник, с. 154—157.
21. Roberts H. N. Multichannel acousto-optics light modulator. — Appl. Optics, 1974, 13, N 4, p. 841.
22. Rodmanizky A. A new multi-channel acousto-optic light modulator in TeO_2 crystal. — Trans. in electro-optic/laser international symp., 1976, p. 94.
23. Аксенов Е. Т., Липовский А. А. Диффузионные волноводы в ниобате лития. — Квантовая электроника. Труды ЛПИ, 1979, № 366, с. 67.
24. Серебряников Л. Я., Шандеров В. М., Шандеров С. М. Широкополосное возбуждение упругих поверхностных волн СВЧ диапазона торцевым пьезоэлектрическим преобразователем. — Письма в ЖТФ, 1979, 5, № 5, с. 288.
25. Арутюнов В. А., Есепкина Н. А., Котов Б. А. и др. Выходные устройства систем оптической обработки на основе приборов с зарядовой связью. — Письма в ЖТФ, 1979, 5, № 20, с. 85.
26. Milne D. K., Cole T. W. A broad-band radio astronomy spectrometer. — Proc. IEEE Austr., March 1979, 10, p. 43.
27. Robinson B. J. Radioastronomy instrumentation. — Triennial report 1979, IAU Comission 40 — Radio Astronomy, p. 20.
28. Cole T. W., Slee O. BoSpectra of interplanetary scintillation. — Nature, 1979, p. 25.