

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫ РАТАН-600 И РАДИОСПЕКТРОМЕТРА НА ВОЛНЕ 21 см

А. П. Венгер, И. В. Госачинский, В. Г. Грачев, Н. Ф. Рыжков

Приведены результаты исследования параметров северного сектора РАТАН-600 на волне 21 см (ширина диаграммы направленности, эффективная площадь, шумовая температура, точность установки первичного облучателя). По наблюдениям опорной области радиолинии измерены потери антенны по яркостной температуре, а также точность настройки и характеристики фильтров анализатора. Приведены также результаты исследования паразитного интерференционного сигнала, возникающего при работе антенны на низких углах.

The results of investigation of the parameters of the North sector of the RATAN-600 (beam width, effective area, noise temperature, accuracy of the position of the secondary mirror) on the wave length 21 cm are reported. With the observation the extended standard region of the sky the beam efficiency and accuracy of filter's tuning are measured. The results of the investigation of the ripple signal on the low elevation of the antenna are also reported.

Параметры северного сектора РАТАН-600 на волне 21 см исследовались по наблюдениям опорных источников с 1976 г. Получены данные о ширине диаграммы направленности антенны, эффективной площади, шумовой температуре. Кроме того, по наблюдениям протяженной опорной области радиолинии получены данные о потерях в антенне для источников больших угловых размеров. Результаты этих измерений используются при обработке наблюдений радиолинии 21 см на радиотелескопе РАТАН-600. По этой же области производится эпизодический контроль настройки гетеродина и параметров фильтров спектроанализатора.

Обнаруженный в 1978 г. при наблюдениях радиогалактики Центавр А паразитный интерференционный сигнал потребовал специальных исследований. В настоящей статье приведены результаты этих измерений.

1. Аппаратура. Наблюдения проводились на северном секторе РАТАН-600 [1] с облучателем № 2, где расположена аппаратура для исследования радиолиний. Программно-управляемый радиоспектрометр работает по квазиулевому методу двойного сравнения [2, 3]. На входе применяется охлаждаемый жидким азотом двухкаскадный параметрический усилитель [4, 5], эквивалентом антенны служит охлаждаемая жидким азотом согласованная нагрузка. Одновременный анализ спектра осуществляется 20-канальным (с июня 1978 г. — 40-канальным) гетеродинно-фильтровым анализатором [6] с шириной канала 30 кГц и расстоянием между каналами также 30 кГц. Для измерения интенсивности радиоизлучения с непрерывным спектром применяется широкополосный канал шириной 8 МГц.

Настройка анализатора на заданную частоту и коррекция настройки за изменение поправки в лучевые скорости, возникающей из-за движения Земли и Солнца, при изменении координат области наблюдения производятся автоматически с помощью программно-управляемого гетеродина [7]. Данные о частоте настройки поступают с управляющей перфоленты, на которой формируются также команды на установку всех параметров радиоспектрометра и требуемых режимов его работы. Подготовка управляющей перфоленты производится на малой ЭВМ «Электроника 100 И» [8].

Постоянные времени выходных фильтров НЧ во всех каналах одинаковы и равны 6 с.

Результаты измерений в спектральных каналах, канале непрерывного спектра и канале сравнения регистрируются в 10-разрядном двоичном коде на перфоленте (с июня 1978 г. — на магнитной ленте) вместе со служебной информацией, сопровождающей каждый цикл опроса каналов. Промежуток времени между последовательными опросами каналов равен 3 с. Обработка перфолент производилась на ЭВМ М-222 [8], а магнитных лент — на ЭВМ М-4030. Калибровка антенной температуры производится по сигналу калибровочного генератора шума (КГШ), неравенство усиленных в канале сравнения и в спектральных каналах в балансном режиме измеряется по сигналу специального балансирующего шумового генератора (БГШ) и автоматически исключается при обработке записей на ЭВМ.

2. Абсолютные измерения сигнала КГШ. Для измерений абсолютного значения сигнала КГШ применялись четыре различных метода:

а) поочередное подключение на вход приемника теплой ($T_0=293$ К) и холодной ($T_{\text{азот}}=77$ К) согласованных нагрузок. Основная погрешность этого метода возникает за счет отклонения характеристики детектора от квадратичной при столь большом диапазоне измеряемых сигналов;

б) нагревание согласованной нагрузки в термостате. Калиброванная ступенька получается при изменении температуры термостата, контролируемой лабораторным термометром;

в) введение в антенный тракт небольшого калиброванного затухания;

г) изменение температуры кипения жидкого азота при изменении давления в криостате, куда помещена согласованная нагрузка [9].

Измеренная этими методами температура сигнала КГШ оказалась равной 8.0 К в 1976 г. и 10.2 в 1979 г. с ошибкой $\pm 15\%$. Минимальная температура эквивалента антенны равна $T_0=93$ К. Долговременная стабильность сигнала КГШ проверялась по наблюдениям опорных источников (см. ниже).

3. Опорные источники. Для измерения параметров антенны производились наблюдения опорных источников, список которых приведен в таблице. Координаты, потоки и размеры источников взяты из ра-

Источник	α (1950.0)	δ (1950.0)	h	θ	F	Примечание
MSH 05-36 *	$\begin{matrix} \text{h} & \text{m} & \text{s} \\ 05 & 21 & 13.3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ & ' & '' \\ -36 & 30 & 14 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 9.69 \end{matrix}$	$\begin{matrix} < 0.25 \\ 2.7 \end{matrix}$	16.25	Поток ядра
3С 358	$\begin{matrix} 17 & 27 & 43.7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -21 & 27 & 00 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 24.71 \end{matrix}$	2.7	15.2	
3С 218 *	$\begin{matrix} 09 & 15 & 41.3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -11 & 53 & 01 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 34.18 \end{matrix}$	Ядро + + оболочка	37.4	
3С 273 *	$\begin{matrix} 12 & 26 & 32.69 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 02 & 19 & 34 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 48.36 \end{matrix}$	$\begin{matrix} < 0.25 \\ < 0.25 \end{matrix}$	41.2	Слабо перемещенный
3С 454.3	$\begin{matrix} 22 & 51 & 29.61 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 15 & 52 & 54 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 62.19 \end{matrix}$	$\begin{matrix} < 0.25 \\ < 0.25 \end{matrix}$	12.0	
3С 409	$\begin{matrix} 20 & 12 & 16.5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 23 & 25 & 41 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 69.68 \end{matrix}$	$\begin{matrix} < 0.25 \\ < 0.25 \end{matrix}$	13.2	
3С 123 *	$\begin{matrix} 04 & 33 & 55.2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 29 & 34 & 13 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 75.8 \end{matrix}$	$\begin{matrix} < 0.25 \\ < 0.25 \end{matrix}$	46.61	
3С 48	$\begin{matrix} 01 & 34 & 49.82 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 32 & 54 & 21 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 79.21 \end{matrix}$	$\begin{matrix} < 0.25 \\ 0.4 \end{matrix}$	15.45	
3С 111	$\begin{matrix} 04 & 15 & 01.5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 37 & 54 & 29 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 84.15 \end{matrix}$	0.4	15.2	
3С 84 *	$\begin{matrix} 03 & 16 & 29.6 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 41 & 19 & 52 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \circ \\ 87.60 \end{matrix}$	—	15.7	

* Основные опорные источники.

бот [10—12]. Источники покрывают диапазон высот от 9 до 87°. Весь список источников использовался при наблюдениях в мае—июне 1976 г., а затем в каждом цикле наблюдений радиолинии 21 см производились наблюдения пяти опорных источников, отмеченных в таблице звездочками.

Обработка наблюдений радиолинии на ЭВМ производится для величины сигнала КГШ, равной 8 К, но для каждого цикла наблюдений в дальнейшем определялся поправочный коэффициент. Для определения ширины

диаграммы направленности выбирались источники с угловым размером < 0.25 ; источники ЗС 273 и ЗС 84, обладающие небольшой переменностью потока, применялись только для контроля положения электрической оси антенны и размера диаграммы направленности.

4. Долговременная стабильность КГШ. Стабильность калибровочного шумового генератора изучалась по результатам наблюдений трех наиболее интенсивных источников ЗС 123, ЗС 218, ЗС 273 с апреля 1977 г. по август 1979 г. На рис. 1 приведено отношение сигналов источников к сигналу КГШ, нормированное для каждого источника к данным за февраль 1979 г. и осредненное по всем трем источникам в каждом отдельном цикле наблюдений. Прямая проведена методом наименьших квадратов по всем точкам, за исключением 06.1977, когда по неизвестной причине сигнал КГШ оказался меньше, чем обычно, на 20%. На рис. 1 заметно систематическое изменение величины сигнала КГШ примерно на 7% в год. Случайные отклонения не превышают 5%. Это и определяет точность калибровки антенных температур по сигналу КГШ.

5. Ширина диаграммы направленности антенны и координатная точность. Ширина диаграммы направленности в горизонтальном направлении

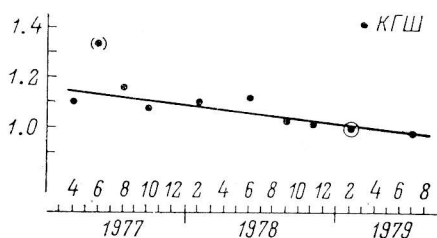


Рис. 1. Отношение сигналов опорных источников к сигналу КГШ (нормировано на 02.1979).

в зависимости от высоты установки антенны определена лишь в пяти точках (рис. 2), поскольку количество точечных источников достаточной яркости ограничено. Прямой линией показаны результаты расчета ширины горизонтальной диаграммы направленности [13], пересчитанные на волну 21 см. Согласие измерений и расчета вполне удовлетворительное.

Ширина диаграммы направленности по вертикали не определялась, и для оценок используется теоретическая кривая из работы [13] (рис. 3),

масштаб которой по оси ординат пересчитан на волну 21 см.

На рис. 4 приведены разности эфемеридных и наблюдаемых моментов кульминации пяти опорных источников для наблюдательных циклов с 1977 по 1979 г. Поскольку на облучателе № 2 не производилось автоколлимационной установки первичных облучателей в фокус, в разброс точек входит также боковое смещение облучателя при его установке на рельсах. Среднеквадратичный разброс разностей примерно 0.2 с, что в 4 раза превышает флуктуационную точность измерения моментов кульминации и соответствует в среднем боковому смещению первичного рупора на 2 мм.

В середине 1978 г. была произведена перестановка первичного рупора на волну 21 см и смена линейки, по которой измеряется его положение, так что величина поправки в положение электрической оси антенны изменилась.

6. Эффективная площадь. Эффективная площадь сектора вычислялась по формуле

$$A_{\text{эф}} = \frac{kT_A}{F},$$

где F — поток источника, Вт/(м²·Гц) (см. таблицу); T_A — антенная температура источника после исправления записи за сглаживающее действие RC -фильтра. Для источников с угловым размером больше $1'$ вводилась поправка за частичное разрешение по горизонтали

$$T'_A = T_A \sqrt{1 + \frac{\theta_i^2}{\theta_A^2}},$$

где θ_A — ширина диаграммы направленности антенны по горизонтали (рис. 2).

Результаты расчета эффективной площади северного сектора РАТАН-600 на волне 21 см по десяти источникам приведены на рис. 5. Ошибка измерения площади составляет $\pm 20\%$. Максимальное значение эффективной площади составляет 870 м^2 в диапазоне высот $20\text{--}50^\circ$. На рис. 6 приведено отношение эффективной площади к геометрической. Последняя вычисляется для фактически выставляемой части сектора. Вертикальный размер апертуры принят равным 5.5 м (высота вторичного зеркала). Видно, что в диапазоне высот от 0 до 40° коэффициент использования площади составляет 0.45 и дальше уменьшается с высотой. Это естественно объясняется увеличением переоблучения сектора первичным облучателем на высоких углах, так как здесь растет фокусное расстояние системы и облучатель отодвигается от сектора.

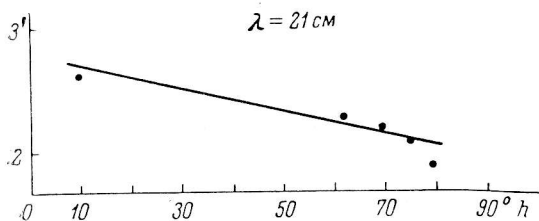


Рис. 2. Ширина диаграммы направленности по горизонтали в зависимости от высоты установки антенны.

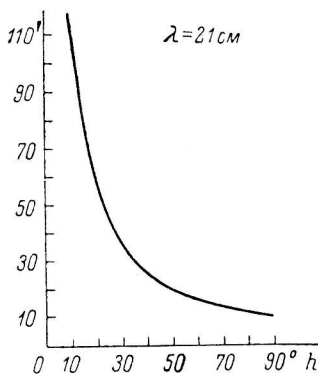


Рис. 3. Ширина диаграммы направленности по вертикали в зависимости от высоты установки антенны.

7. Шумовая температура антенны. Шумовая температура антенны измерялась как на высотах опорных источников, так и еще в ряде точек в диапазоне высот от 3.5 до 89° . Измерялась разность $T_A - T_0$ с помощью калиброванного сигнала КГШ, а T_0 принималась равной 93 К . Результаты измерений приведены на рис. 7. Минимальная шумовая температура антенны оказалась равной 45 К в диапазоне высот $10\text{--}30^\circ$. Рост шумовой

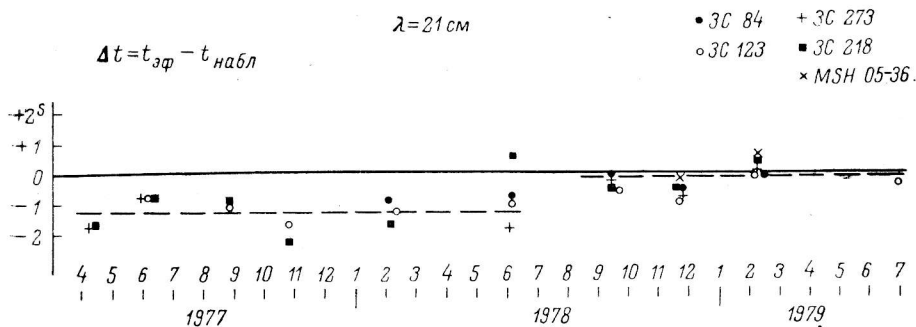


Рис. 4. Разность между эфемеридным и наблюдаемым моментами прохождения опорных источников.

температуры при увеличении высоты установки антенны связан с увеличением переоблучения (растет «задний» лепесток диаграммы направленности), а на малых высотах растет излучение атмосферы, и на высоте $4\text{--}5^\circ$ начинает появляться излучение Земли в главном лепестке (угол укрытия в направлении на юг около 3.5°).

Шумовая температура системы (антенна и радиометр) оказалась равной $150\text{--}180 \text{ К}$, из которых 93 К составляет минимальная температура эквивалента антенны.

8. Контроль работы спектрометра. Контроль работы спектрометра проводился по наблюдениям области узкополосного излучения Н1, обна-

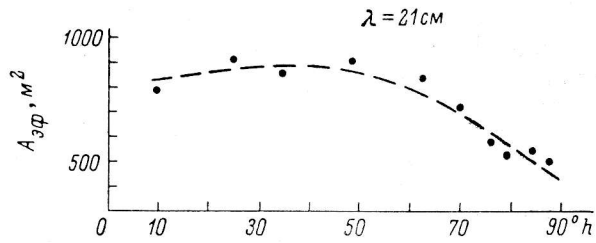


Рис. 5. Эффективная площадь северного сектора РАТАН-600 на волне 21 см.

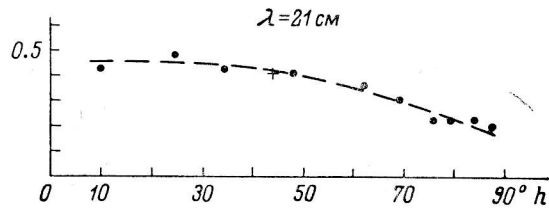


Рис. 6. Коэффициент использования площади сектора.

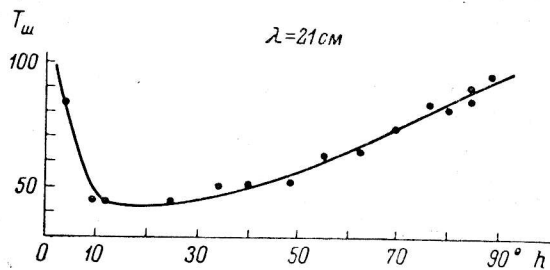


Рис. 7. Шумовая температура антенны.

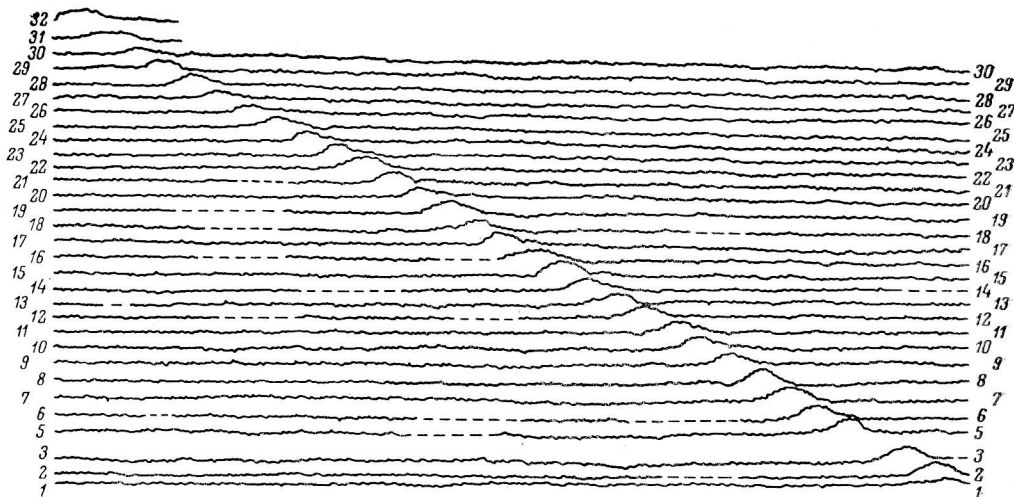


Рис. 8. Результаты наблюдения контрольной области 21.06.78 в азимуте 30°.

руженной в [14]. В этой области размером $6 \times 4^\circ$ излучение радиолитии 21 см имеет одиночный, сравнительно постоянный по частоте, ширине и интенсивности профиль. Это позволяет при наблюдениях на прохождение получить профиль линии в каждом спектральном канале анализатора, быстро перестраивая частоту гетеродина. Таким способом можно по излучению неба проверить с определенной точностью настройку гетеродинов, ширины и частоты настройки каналов спектроанализатора, а также измерить потери в антенне по протяженному источнику.

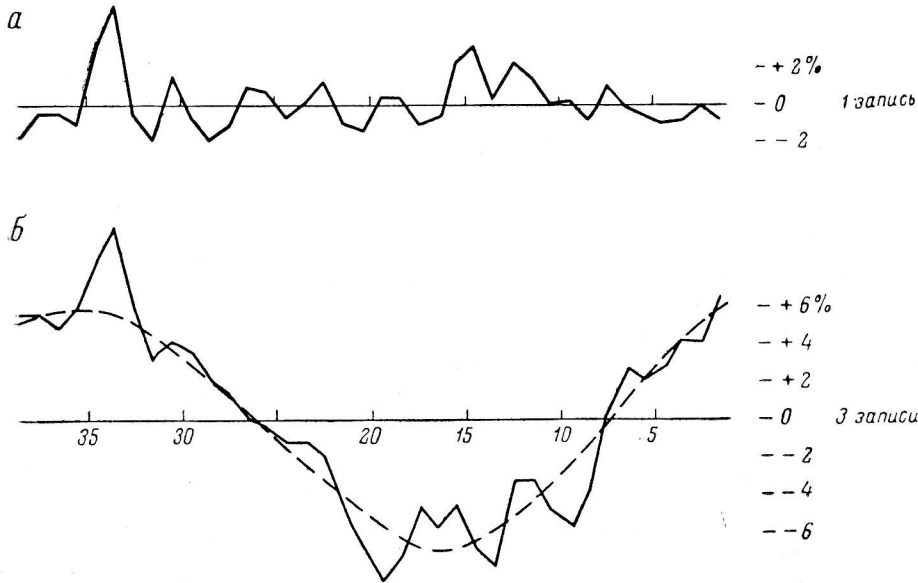


Рис. 9.

а — спектр радиостанции Телец А на волне 18 см в зависимости от номера спектрального канала. Внешний БГШ, все элементы сектора — на источник; б — то же, что и на рис. 9, а, но 5 элементов вертикальны.

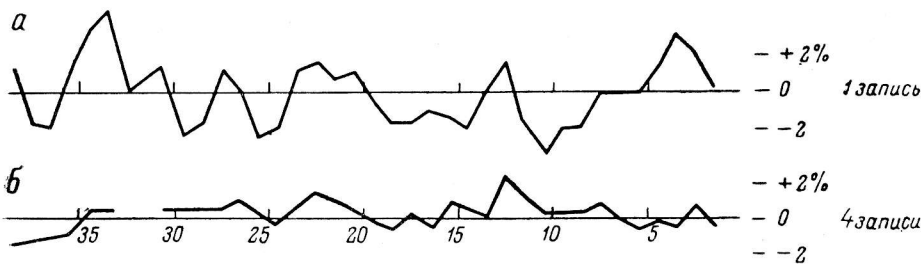


Рис. 10. То же, что и на рис. 9, но для внутреннего БГШ.

Результаты одного из таких наблюдений приведены на рис. 8. Скорость изменения частоты настройки составляла 40 кГц/мин. Антенная температура линии оказалась равной 17 К. Отношение T_A/T_B показано на рис. 6 крестиком. Хорошее совпадение потерь в антенне, измеренных по точечным и протяженным источникам, подтверждает заключение, что основные потери на волне 21 см происходят из-за переоблучения.

9. Интерференционный паразитный сигнал. Интерференционный паразитный сигнал (ИПС), приводящий к синусоидальному искажению нулевой линии наблюдаемого спектра, был обнаружен при наблюдениях Н1 в радиогалактике Центавр А [15]. Этот объект наблюдается на высоте $3^\circ 5'$ и элементы кругового отражателя расположены почти вертикально, что и делает возможным появление паразитного сигнала за счет отражения

принятого антенной сигнала от первичного рупора, а затем от вершины параболы сектора. Кроме того, возможно отражение сигнала балансирующего генератора шума (БГШ), по которому производится измерение неравенства усиления в спектральных каналах и канале сравнения.

Исследование ИПС производилось на восточном секторе РАТАН-600 по радиисточнику Телец А (высота $32^{\circ}8$). Для моделирования условий возникновения интерференционного сигнала 5 центральных элементов сектора устанавливались вертикально. Кроме обычно применяемого БГШ (внешнего), расположенного в плоскости вторичного зеркала на оси рупора, использовался внутренний БГШ, излучение которого впрыскивалось в тракт через направленный ответвитель с развязкой в сторону рупора 60 дБ. Измерения проводились на волне 18 см, так что никакого измеримого сигнала от источника в спектральных каналах не ожидалось.

Результаты измерений приведены на рис. 9 и 10. На рис. 9, а приведен профиль, полученный при установке всех элементов сектора на источник (внешний БГШ), а на рис. 9, б — в случае, когда 5 элементов стояли вертикально. На рис. 10 приведены результаты таких же наблюдений с внутренним БГШ. Видно, что для внутреннего БГШ интерференционный сигнал не превышает 0.5%, в то время как для внешнего БГШ амплитуда его составляет около 4%. Следовательно, наибольший вклад в ИПС дает не излучение источника, а внешний БГШ, так что его не следует применять при наблюдениях на низких углах.

Список литературы

1. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н., Корольков Д. В. и др. Радиотелескоп РАТАН-600. Ввод в действие и исследование первой очереди. — Изв. вузов, Радиофизика, 1976, 19, с. 1581—1593.
2. Рыжков Н. Ф. Радиоспектрограф на волну 21 см. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 172—180.
3. Рыжков Н. Ф. Аппаратурные методы радиоспектроскопии межзвездной среды. II. Сравнительная оценка. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1976, 8, с. 89—119.
4. Венгер А. П., Рахимов И. А. СВЧ тракт квазиузлового радиоспектрометра двойного сравнения на волне 21 см. — Изв. вузов, Радиофизика, 1976, 19, с. 1781—1785.
5. Рахимов И. А. Двухкаскадный охлаждаемый параметрический усилитель для исследования линии нейтрального водорода. — Сообщ. САО, 1975, 15, с. 70—84.
6. Грачев В. Г., Прозоров В. А. Кварцевый фильтровой анализатор спектра. — Изв. вузов, Радиофизика, 1976, 19, с. 1740—1744.
7. Егорова Т. М., Могилова В. Г., Рыжков Н. Ф. Программно-управляемые гетеродины для радиоспектрометров. — Изв. вузов, Радиофизика, 1976, 19, с. 1554—1556.
8. Алферова Э. А., Госачинский И. В. Математическое обеспечение спектральных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1978, 10, с. 129—131.
9. Корольков Д. В., Нижельский Н. А., Тимофеева Г. М. Измерение абсолютной величины и относительной стабильности калибровочных сигналов радиометров РАТАН-600. Тезисы докладов 11-й Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1978. с. 205—206.
10. Kellermank I., Paulini-Toth I. I. K., Williams R. J. S. The spectra of radio sources in the revised 3C Catalogue. — Ap. J., 1969, 157, p. 1—25.
11. Bridle A. H., Davis M. M., Formont E. B., Lequeux J. Flux densities, positions and structures for a complete sample of intense radio sources at 1400 MHz. — A. J., 1972, 77, p. 405—445.
12. Wills B. J. Accurate spectra of 300 radio sources from the Parkes catalogue: observational results. — Astr. J. Phys. Suppl., 1975, N 38, p. 1—73.
13. Есенина Н. А., Бахвалов Н. С., Васильев Б. А. и др. Поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1979, 11, с. 182—196.
14. Goldstein S. L. A narrow 21-sm emission line from a region of large angular size. — Pros. IEE, 1964, 52, p. 1046—1047.
15. Госачинский И. В., Грачев В. Г., Рыжков Н. Ф. Нейтральный водород в радиогалактике Центавр А. — Астрон. ж., 1980, 57, с. 1121—1128.