

## ПРИМЕНЕНИЕ ОХЛАЖДАЕМОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ В РАДИОСПЕКТРОМЕТРЕ

*И. А. Рахимов, Н. Ф. Рыжков, В. С. Санин, А. В. Соколов*

Приводятся результаты исследования и применения охлаждаемого параметрического усилителя в радиоспектрометре для наблюдений радиолинии межзвездного нейтрального водорода. Отмечаются меры, предпринятые для достижения высокой стабильности характеристик усилителя, и приводятся данные о шумовой температуре и реальной чувствительности радиоспектрометра.

Results are given of the investigation and use of a cooled parametric amplifier in a radio spectrometer for observations of the radio frequency line of interstellar neutral hydrogen. The measures taken to obtain higher stability of the amplifier characteristics are outlined. Data on the noise temperature and real sensitivity of the radio spectrometer are presented.

### 1. Введение

Наиболее результативным способом улучшения чувствительности радиоспектрометра является снижение его шумовой температуры. Поэтому на входе радиоастрономических приемников, предназначенных для исследования спектральных линий космического радиоизлучения, необходимо применять малощумящие СВЧ-усилители. Так, благодаря применению мазеров, удается улучшать реальную чувствительность аппаратуры примерно на порядок по сравнению с той, которая была достигнута в радиоспектрометрах со смесителями на входе [1, 2].

Мазеры, обладая наименьшей собственной шумовой температурой и высоким качеством электрических параметров, являются для этой цели, безусловно, наиболее подходящими усилителями. Однако они довольно сложны в эксплуатации, поскольку для их работы требуется жидкий гелий. По этой же причине наиболее эффективно они могут быть использованы на полноповоротных радиотелескопах, когда имеется возможность непрерывно получать полезную информацию в течение всего времени, пока мазер находится в охлажденном состоянии. Только в этом случае коэффициент полезного использования жидкого гелия может быть достаточно высок. Очевидно, что такой режим работы возможен лишь на радиотелескопах узкого «спектрального» назначения.

На инструментах пассажного типа и многоцелевого назначения, каким, например, является Большой пулковский радиотелескоп (БПР) [3], использование мазеров не может быть столь эффективным. Поэтому применять их на таких инструментах целесообразно лишь для решения особо важных задач, требующих предельной чувствительности.

Для регулярных наблюдений, чередующихся в течение суток с длительными перерывами (обычные условия наблюдений на инструментах пассажного типа), проще и экономичнее использовать охлажденные жидким азотом параметрические усилители, допуская при этом некоторое

ухудшение чувствительности радиоспектрометра, по сравнению с той, которая может быть получена с применением мазера. С этой целью нами была выполнена работа по исследованию и применению охлаждаемого параметрического усилителя (ОПУ) от земной станции «Орбита» [4], перестроенного на волну 21 см, в радиоспектрометре для наблюдений межзвездного нейтрального водорода на Большом пулковском радиотелескопе.

## 2. Охлаждаемый параметрический усилитель на волну 21 см

ОПУ представляет собой регенеративный двухконтурный (невырожденный) усилитель на параметрическом диоде. Он работает с внешним (неохлажденным) циркулятором и при усилении 20 дБ имеет полосу пропускания по уровню 3 дБ около 18 МГц (рис. 1).

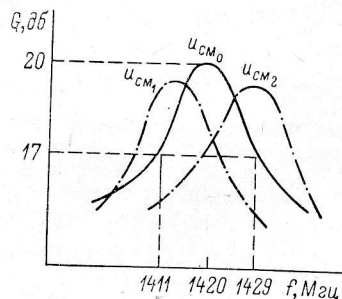


Рис. 1. Частотные характеристики ОПУ при различных напряжениях смещения на параметрическом диоде.

В качестве генератора накачки используется клистрон типа к-54. Криостат ОПУ вмещает 25 л жидкого азота; при непрерывной работе подливка азота производится через 10 сут.

В 1968—1970 гг. были выполнены исследования ОПУ в схеме радиоспектрометра [5] (ОПУ используется в этой схеме вместо мазера) как в лаборатории, так и в реальных условиях наблюдений на БПР. Эти исследования позволили выявить некоторые недостатки усилителя, связанные в основном с высокими требованиями к стабильности его характеристик при неблагоприятных условиях эксплуатации на БПР. Было установ-

лено, что на величину усиления и форму частотной характеристики ОПУ сильно влияет изменение окружающей температуры, поскольку первоначально не было принято серьезных мер по стабилизации мощности и температурного режима клистрона накачки (ОПУ не был рассчитан на работу в полевых условиях, в которых он находится при наблюдениях на БПР).

Для стабилизации режима клистрона нами была применена схема [6], которая позволила значительно ослабить зависимость частоты клистрона от напряжения сети. С целью уменьшения влияния внешних условий клистрон был помещен в массивную масляную ванну, охлаждаемую вентилятором.

Для ослабления интерференционных паразитных сигналов, возникающих в модуляционном СВЧ-тракте при неидеальной развязке между усилителем и СВЧ-переключателем [7], на входе ОПУ был применен дополнительный циркулятор, обеспечивающий развязку порядка 25—30 дБ. Только в этом случае удалось обеспечить достаточную стабильность «нулевых» уровней на выходе каналов радиоспектрометра при длительных наблюдениях.

Была также введена цепь постоянного контроля частоты клистрона накачки с помощью резонансного волномера с целью подстройки частоты после включения ОПУ. В ходе регулярных наблюдений, продолжавшихся несколько месяцев, было установлено, что примерно через 3—4 недели после охлаждения стабильность усиления ОПУ начинает заметно ухудшаться и вновь восстанавливается только после просушки и повторного охлаждения усилителя. По-видимому, ухудшение стабильности вызывалось постепенным проникновением воздуха в усилительную камеру и конденсацией паров воды и воздуха в резо-

наторах усилителя (в первоначальной конструкции испаряющийся азот пропусклся через усилительную камеру).

С целью устранения этого недостатка усилительная камера была герметизирована и после откачки воздуха форвакуумным насосом заполнена газообразным гелием под давлением несколько большим атмосфер-

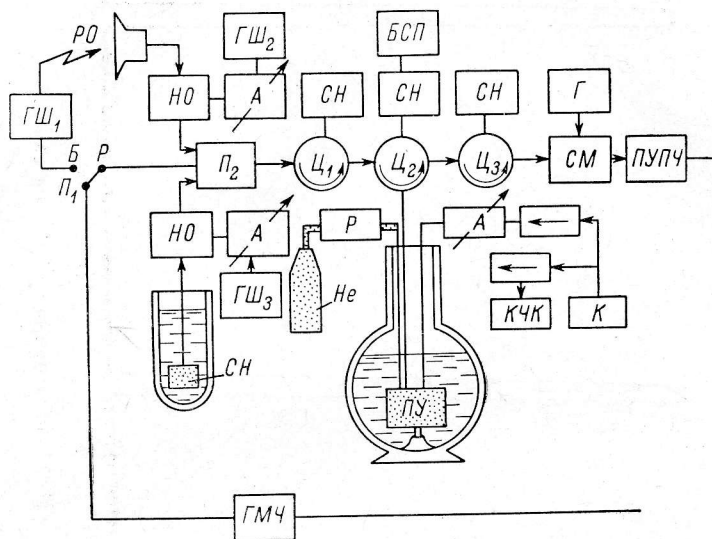


Рис. 2. Блок-схема СВЧ тракта радиоспектрометра на волну 21 см.

РО — рупорный облучатель, НО — направленные ответвители, ГШ<sub>1</sub> — газоразрядная шумовая трубка для балансировки, ГШ<sub>2</sub> и ГШ<sub>3</sub> — газоразрядные шумовые трубки для подгумливания и калибровки, П<sub>1</sub> — переключатель рода работы (Б — балансировка, Р — рабочие измерения), П<sub>2</sub> — диодный СВЧ-переключатель, Ц<sub>1</sub> и Ц<sub>3</sub> — развязывающие циркуляторы, Ц<sub>2</sub> — циркулятор ОПУ, ПУ — параметрический усилитель, СН — согласованные нагрузки, А — аттенюаторы, БСП — батарея смещения ПУ, К — клистрон накачки ПУ, КЧК — контроль частоты клистрона, Г — гетеродин, СМ — смеситель, He — баллон с газообразным гелием, Р — кислородный редуктор, ГМЧ — генератор модулирующей частоты, ПУПЧ — предварительный усилитель промежуточной частоты.

ного. В ходе последующих исследований ухудшений стабильности усиления ОПУ не наблюдалось. Все эти меры позволили значительно повысить стабильность усиления и частотной характеристики ОПУ и успешно использовать его на БПР для регулярных наблюдений радиолинии нейтрального водорода.

Блок-схема СВЧ-тракта радиоспектрометра с использованием ОПУ приведена на рис. 2.

### 3. Исследование стабильности коэффициента усиления и формы частотной характеристики приемника с ОПУ

Нестабильность коэффициента усиления приемника с ОПУ измерялась в схеме модуляционного радиометра с полосой  $\Delta f = 5$  Мгц при постоянной времени выходного устройства  $\tau = 5$  сек. Ко входу СВЧ-переключателя были подключены согласованные нагрузки, охлажденные до температуры жидкого азота. Периодически в одно из плеч через направленный ответвитель подавался калибровочный сигнал величиной  $14^\circ$  К. На рис. 3 приведена копия записи длительностью около 8 час., полученная в лаборатории. Относительная нестабильность за это время не превышает 1%. Подобные записи получались неоднократно и давали близ-

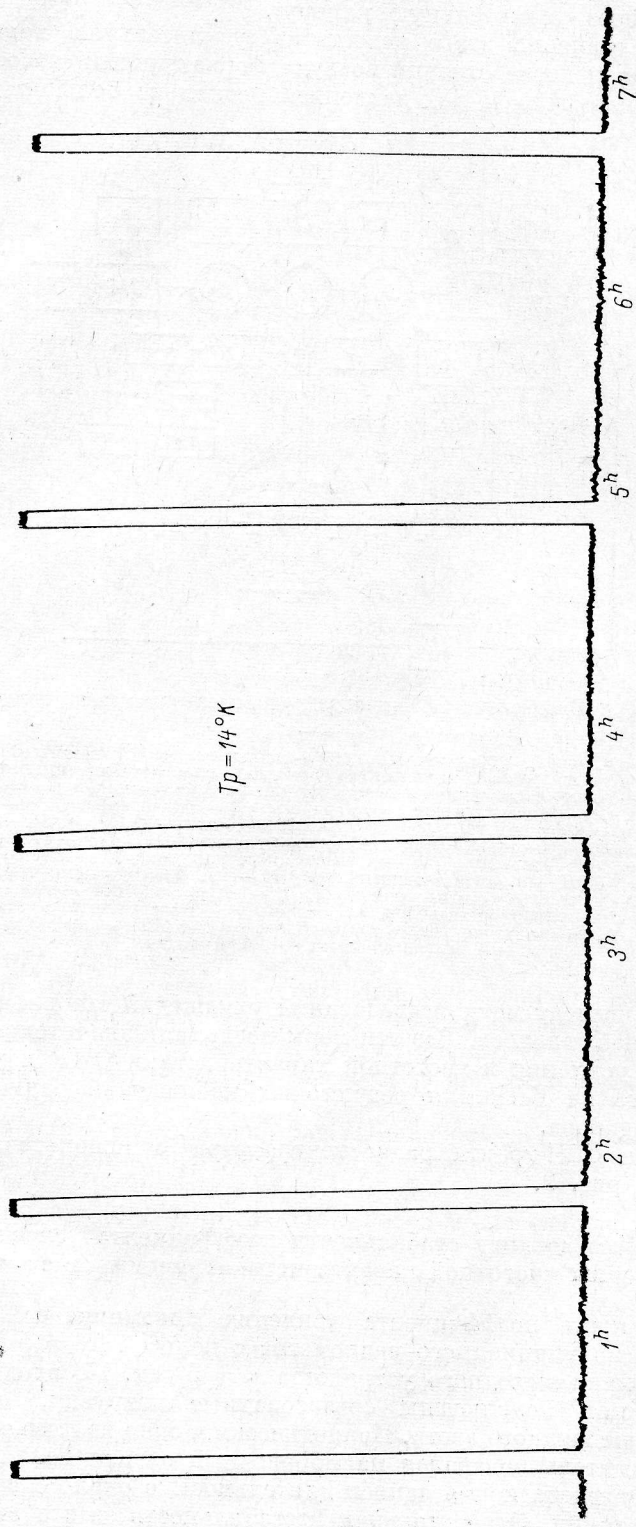


Рис. 3. Копия записи, характеризующая стабильность работы радиометра с ОПУ на входе.

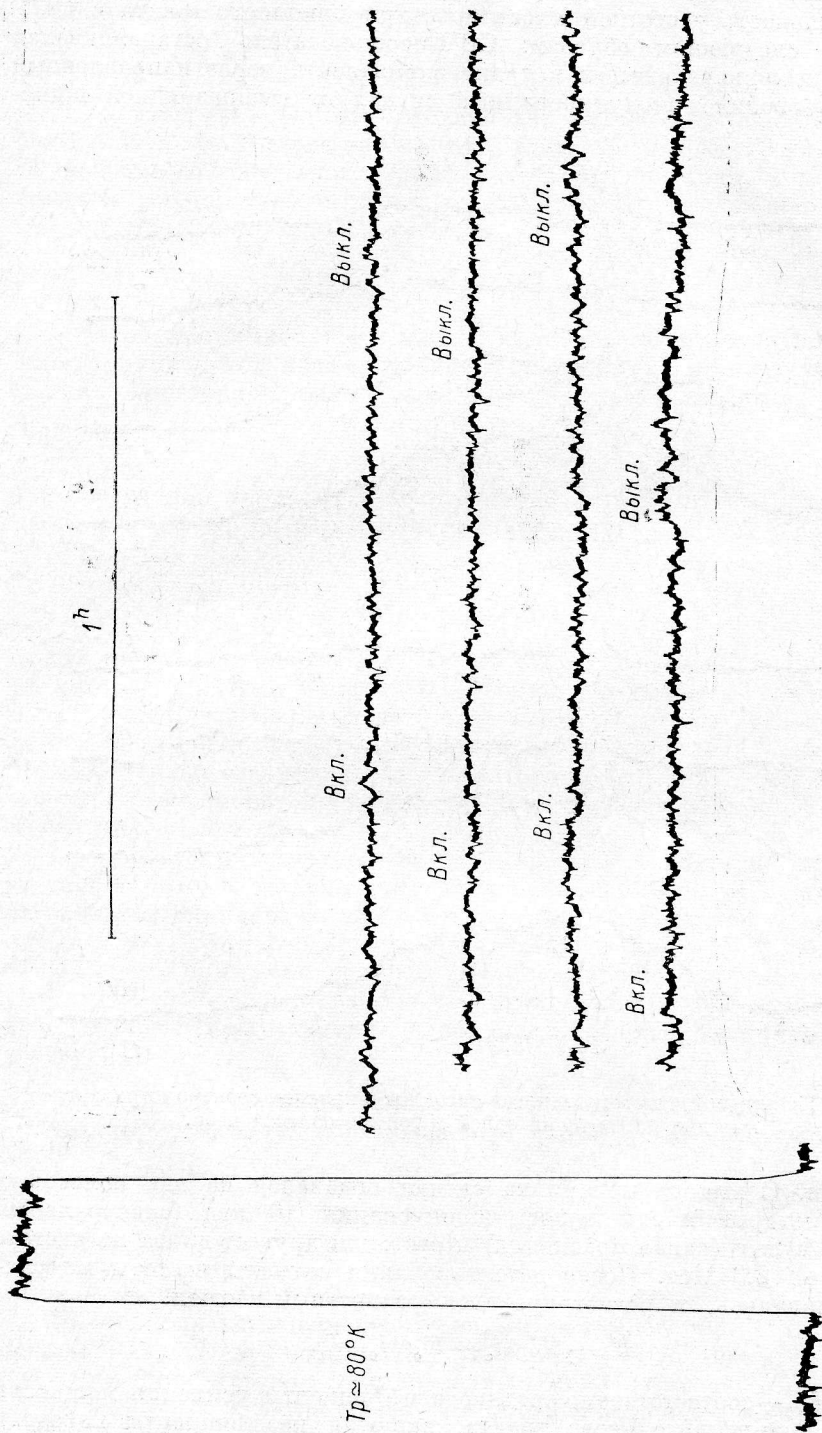


Рис. 4. Конца записи, характеризующая относительно стабильность частной характеристики радиоспектрометра с ОПУ на входе.

кие результаты. При длительных наблюдениях на БПР нестабильность усиления была того же порядка, что и при лабораторных измерениях.

Нестабильность частотной характеристики приемного тракта с ОПУ измерялась следующим образом: СВЧ-переключатель останавливался в положении «эквивалент», а в тракт эквивалента через направленный ответвитель вводился модулированный сигнал от газоразрядной шумо-

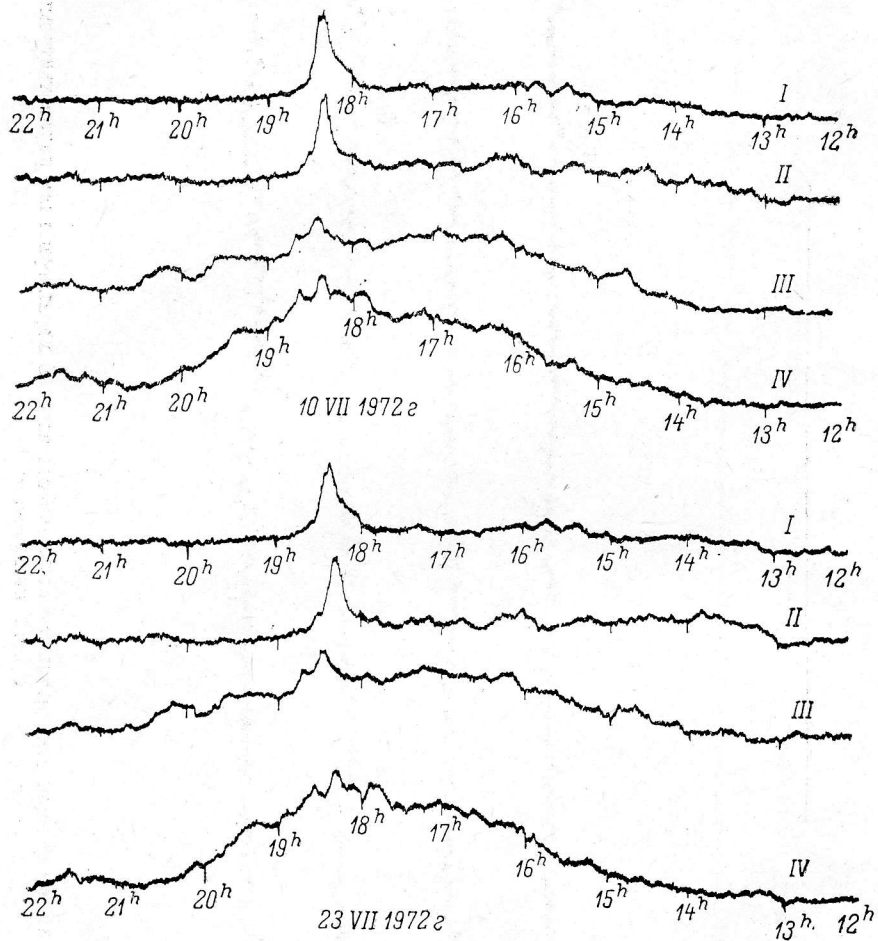


Рис. 5. Копии десятичасовых записей сигналов в каналах спектрометра в разные дни наблюдений одной и той же области неба.

вой трубки. С выхода приемника сигнал подавался на два полосовых фильтра, которые имели полосы пропускания 10 кГц (спектральный канал) и 140 кГц (канал сравнения) и отстояли друг от друга по частоте примерно на 2.3 МГц. После детектирования сигналы частоты модуляции сравнивались, и регистрировался разностный сигнал.

$$U_p \sim (K_c \Delta f_c - K_{cp} \Delta f_{cp}) T_p,$$

где  $K_c$  и  $K_{cp}$  — соответственно средние коэффициенты усиления мощности всего приемно-усилительного тракта, включая коэффициенты передачи детекторов, в полосе  $\Delta f_c$  спектрального канала и в полосе  $\Delta f_{cp}$  канала сравнения;  $T_p$  — сигнал от генератора шума, приведенный ко входу приемника.

В начале измерений этот разностный сигнал уменьшался до уровня флуктуаций путем регулировки усиления в одном из каналов. При этом приближенно выполняется условие балансировки каналов [5]

$$K_c \Delta f_c \simeq K_{cp} \Delta f_{cp}.$$

При изменении формы частотной характеристики приемно-усилительного тракта это условие нарушается, и на выходе будет регистрироваться отклонение от начального уровня, обусловленное изменениями коэффициентов усиления на частотах настройки спектрального канала ( $\Delta K_c$ ) и канала сравнения ( $\Delta K_{cp}$ ):

$$\Delta U_p \sim (\Delta K_c \Delta f_c - \Delta K_{cp} \Delta f_{cp}).$$

Отклонения выходного сигнала калибровались по сигналу от генератора шума при отключенном канале сравнения. В этом случае при включении генератора шума на выходе регистрировался сигнал

$$U_x \sim K_c \Delta f_c T_p.$$

Это позволяло оценить относительную нестабильность усилительного тракта на частотах настройки каналов.

$$\frac{\Delta U_p}{U_x} = \frac{\Delta K_c \Delta f_c - \Delta K_{cp} \Delta f_{cp}}{K_c \Delta f_c}.$$

На рис. 4 приведена копия записи общей длительностью около 7 час., на которой отмечены моменты включения и выключения сигнала генератора шума. Слева можно видеть отклонение выходного уровня, обусловленное этим сигналом ( $T_p = 80^\circ \text{K}$ ), при отключенном канале сравнения. Из этой записи следует, что в лабораторных условиях относительные изменения коэффициентов усиления на частотах настройки каналов за 7 час. не превышали 1.25%.

О высокой долговременной стабильности характеристик приемной системы с ОПУ в реальных условиях наблюдений на БПР можно судить по воспроизводимости сигналов от линии Н1 при повторных наблюдениях одних и тех же протяженных областей Галактики.

На рис. 5 приведены копии десятичасовых записей сигналов в четырех каналах спектрометра в разные дни наблюдений одной и той же области неба. Полосы пропускания каналов равны 20 кгц, постоянная времени 20 сек.

#### 4. Шумовая температура и чувствительность радиоспектрометра с охлаждаемым параметрическим усилителем

Измерение шумовой температуры ОПУ проводилось методом двух отсчетов [8]. Отсчеты производились при «холодной» (согласованная нагрузка при температуре жидкого азота) и «теплой» (согласованная нагрузка при комнатной температуре) нагрузках. Нагрузки в полосе  $\Delta f = 35 \text{ Мгц}$  имели КСВ  $\simeq 1.03$ .

По неоднократным измерениям шумовая температура ОПУ оказалась равной  $\sim 40^\circ \text{K}$  при коэффициенте усиления  $\sim 20 \text{ дб}$ , при этом усилитель работал с циркулятором ( $\Pi_2$ ), имевшим потери во входном плече 0.15 дб. Учитывая шумовую температуру антенны и эквивалента, потери в высокочастотном тракте, а также лабораторные измерения шумовой температуры ОПУ и последующего тракта, можно сделать вывод, что составляющие полной шумовой температуры приемной системы распределяются следующим образом:

Антенна, эквивалент  $\left(\frac{T_a + T_a}{2}\right) \approx 85 \div 95^\circ \text{K}$

СВЧ-переключатель (потери 0.15 дБ)  $\approx 11^\circ \text{K}$

Циркулятор  $\Pi_1$  (потери 0.15 дБ)  $\approx 11^\circ \text{K}$

Соединительный кабель (потери 0.1 дБ)  $\approx 7^\circ \text{K}$

ОПУ (с циркулятором  $\Pi_2$ )  $\approx 40^\circ \text{K}$

Вклад шумов смесителя и ПУПЧа ( $1500^\circ \text{K}$ ) при усилении ОПУ 20 дБ  $\approx 15^\circ \text{K}$ .

---

Полная шумовая температура  $\approx 170 \div 180^\circ \text{K}$ .

Средний квадрат флуктуаций единичной записи в реальных условиях наблюдений (при отсутствии помех) равен  $\sim 0.05^\circ \text{K}$  на выходе широкополосного канала ( $\Delta f = 5 \text{ МГц}$ ,  $\tau = 5 \text{ сек.}$ ) и  $\sim 0.4^\circ \text{K}$  на выходе каналов анализатора спектра ( $\Delta f = 20 \text{ кГц}$ ,  $\tau = 20 \text{ сек.}$ ), что достаточно хорошо соответствует теоретической чувствительности радиоспектрометра двойного сравнения [9], имеющего полную шумовую температуру  $180^\circ \text{K}$ .

### 5. Выводы

На основании лабораторных исследований и результатов наблюдений на БПР можно сделать вывод, что ОПУ типа «Орбита» после некоторых усовершенствований могут успешно применяться на входе радиоспектрометра. Чувствительность спектрометра с ОПУ по сравнению с мазером ухудшается примерно в 1.5 раза, но применение ОПУ значительно упрощает эксплуатацию приемника при регулярных наблюдениях.

В заключение авторы выражают благодарность Т. М. Егоровой и Н. И. Никулину за участие в исследовании ОПУ и проведении пробных наблюдений на БПР.

### Литература

1. Т. М. Егорова, Н. Ф. Рыжков, А. В. Францесон. Шестая Всесоюзная конференция по радиоастрономии (тезисы докладов). «Знание», Рига, 1968.
2. Н. В. Быстрова, И. В. Госачинский и др., ДАН СССР, 191, № 4, 791, 1970.
3. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский и др., Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 164, 140, 1960.
4. Н. В. Галызин, Л. Я. Кантор, М. З. Цейтлин, «Электросвязь», № 11, 3, 1967.
5. Н. Ф. Рыжков, Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 188, 172, 1972.
6. Ф. Менде, В. М. Дмитриев и др., Приборы и техника эксперимента, № 2, 146, 1968.
7. Д. В. Корольков, Изв. Главн. астр. obs. в Пулкове, № 172, 186, 1964.
8. В. С. Эткин, Е. М. Гершензон. Параметрические системы на полупроводниковых диодах. Изд-во «Сов. радио», М, 1965.
9. Н. Ф. Рыжков. Астрофиз. исслед. (Изв. САО), наст. том, стр. 96.