

ПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО СПЕКТРОМЕТРА НА ВОЛНУ 21 см

А. П. Венгер, Л. Г. Гассанов, Ю. Д. Гудзь, Г. Н. Ильин,
Н. Ф. Рыжков, А. Д. Туз

Приводится описание приемного устройства на волну 21 см, входящего в состав спектрометрического комплекса радиотелескопа РАТАН-600. На входе устройства применяется охлаждаемый до температуры жидкого азота транзисторный усилитель в гибридно-интегральном исполнении. Шумовая температура приемника не превышает 40 К. Описывается методика измерений с шумовым пилот-сигналом.

A description of the receiving device at 21 cm wavelength of the spectrometric complex of the radiotelescope RATAN-600 is presented. At the input of this device a transistor amplifier performed in hybrid-integral design and cooled up to the temperature of liquid nitrogen is used. The noise temperature of the receiver does not exceed 40 K. Measurement methods with the noise pilot-signal is described.

В спектрометрах, применяемых для радиоастрономических спектральных исследований межзвездной среды, полоса пропускания Δf спектрального канала, определяющая разрешающую способность по частоте, и время усреднения выходного сигнала t задаются условиями наблюдений: Δf — шириной деталей профиля спектральной линии, t — временем нахождения исследуемого источника в диаграмме антенны. В этом случае теоретическая чувствительность к изменениям антенной температуры зависит в основном от шумовой температуры $T_{ш.с}$ приемной системы [1]:

$$\delta T = \rho T_{ш.с} (\Delta f t)^{-1/2} \quad (1)$$

(коэффициент ρ определяется методом измерений [2]; для самого распространенного модуляционного метода $\rho=2$). Поэтому в спектрометрах наиболее широкое применение нашли такие малозумящие усилители (МЗУ), как мазеры и параметрические усилители (ПУ). Однако в дециметровом диапазоне в последнее время в качестве МЗУ стали весьма успешно применяться транзисторные СВЧ-устройства, отличающиеся высокой стабильностью параметров, надежностью и простотой эксплуатации.

В составе спектрометрического комплекса радиотелескопа РАТАН-600 [3] для наблюдений линии межзвездного нейтрального водорода (НІ) на волне 21 см в течение длительного времени использовался невырожденный ПУ, охлаждаемый жидким азотом. При этом шумовая температура приемной системы составляла ~ 180 К и чувствительность, близкая к теоретической, достигалась благодаря модуляционному методу измерений с применением в СВЧ-тракте переключателя антенна—эквивалент (эквивалентом служила нагрузка, охлаждаемая жидким азотом). С апреля 1982 г. вместо ПУ стал применяться охлаждаемый транзисторный усилитель, позволивший в сочетании с использованием модуляционного метода измерений с шумовым пилот-сигналом (ШПС) [4, 4] уменьшить в 1.5—2 раза величину $T_{ш.с}$. Ниже приводится описание структурной схемы транзисторного приемного устройства спектрометра на волну 21 см (СП-24), работающего по этому методу, и его основных узлов, выполненных конструктивно в виде отдельных модулей.

Структурная схема СП-24 (рис. 1). На входе приемника находится первичный рупорный облучатель антенны РАТАН-600 [5], соединенный с помощью волноводно-коаксиального перехода и коаксиальной линии с охлаждаемым транзисторным усилителем, на входе которого стоит развязывающий вентиль

В1. Усиленный сигнал, пройдя через вентиль В2 и полосовой фильтр Ф, формирующий рабочую полосу частот и подавляющий зеркальный канал, преобразуется в смесителе СМ к промежуточной частоте $f_{п.ч} = 45$ МГц, на которой работает анализатор спектра [3]. Гетеродинный сигнал стабильной частоты f_r вырабатывается программно-управляемым гетеродином [6]. С выхода смесителя преобразованный сигнал подается на модулятор усиления М, согласованный с коаксиальным кабелем, соединяющим СП-21 с главным усилителем промежуточной частоты (УПЧ) анализатора спектра.

Модуляционный режим работы с ШПС осуществляется следующим образом. Во входной коаксиальный тракт через направленный ответвитель НО подается от генератора шума ПГШ модулированный пилот-сигнал с шумовой температурой на входе приемника $T_{ш.с} \approx 2500$ К. В те полупериоды, когда ПГШ включен (полупериоды «эквивалента»), коэффициент усиления по промежуточной частоте

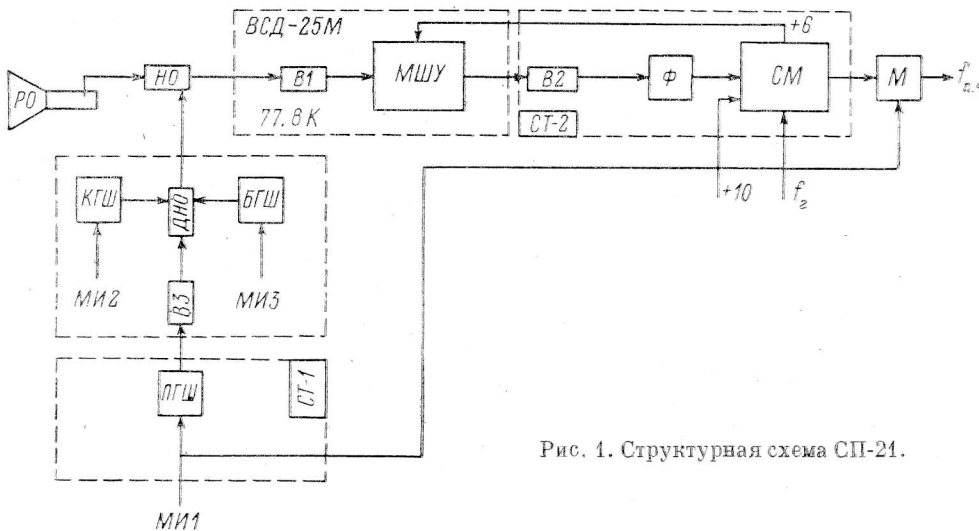


Рис. 1. Структурная схема СП-21.

синхронно уменьшается модулятором М так, чтобы на выходе СП-21 спектральные плотности шумов в отсутствие полезного сигнала в оба полупериода модуляции оставались примерно одинаковыми. Этим достигается квазишумовой режим работы выходных устройств спектротрического комплекса, как при обычном модуляционном методе измерений.

Отношение коэффициентов усиления в полупериоды «антенна» G_a и «эквивалент» $G_э$ в процессе работы модулятора сохраняется постоянным: $L_m = G_a/G_э = \text{const}$. Величина коэффициента L_m , характеризующего глубину модуляции усиления, определяется из условия квазишумового режима работы:

$$G_a T_{ш.с} = G_э (T_{ш.с} + T_{ш.с}), \quad (2)$$

где $T_{ш.с} = T_a + T_n$ — шумовая температура приемной системы; T_a и T_n — соответственно шумовые температуры антенны и приемника;

$$L_m = 1 + \frac{T_{ш.с}}{T_{ш.с}}.$$

Выбранные величины $L_m \approx 12$ дБ и направленного ответвления НО (−21.5 дБ) обеспечивают режим работы, близкий к оптимальному [3], при $T_{ш.с} = 150$ К и шумовой температуре применяемого ПГШ $\sim 3.5 \cdot 10^5$ К.

В реальных условиях наблюдений величина $T_{ш.с}$ меняется в зависимости от положения антенны в пределах от 80 до 150 К. Для обеспечения квазишумового режима работы (2) в диапазоне изменений $T_{ш.с}$ в главном УПЧ анализатора спектра предусмотрена возможность дополнительной плавной регулировки глубины модуляции усиления в пределах 0—3 дБ.

По сравнению с идеальным модулятором СВЧ на входе приемника применение метода измерений с ШПС вызывает ослабление полезного сигнала на вели-

чину $1 - L_m^{-1}$ [1], что эквивалентно ухудшению чувствительности на такую же величину. При $L_m = 12 \div 15$ дБ это ослабление не превышает 6 %. Ранее применявшийся феррит-диодный СВЧ-переключатель, вносящий во входной тракт потери ~ 0.4 дБ, приводит к ухудшению чувствительности на 25 %.

Приведенные цифры показывают преимущество метода измерений с ШПС, причем здесь имеется реальная возможность уменьшения потерь полезного сигнала при использовании более мощного ПГШ путем увеличения L_m . Положительным свойством является также отсутствие во входном тракте паразитных модулированных интерференционных сигналов, характерных для трактов с модуляторами СВЧ. Однако при методе измерений с ШПС предъявляются высокие требования к стабильности пилот-сигнала $T_{п.с}$, глубины модуляции L_m , шумовой температуры приемника $T_{п}$, а также к линейности усилительного тракта до модулятора усиления. Последнее требование удовлетворяется благодаря включению модулятора после

смесителя, где уровень всех усиливаемых сигналов еще достаточно мал.

Для достижения чувствительности, близкой к теоретической (1), относи-

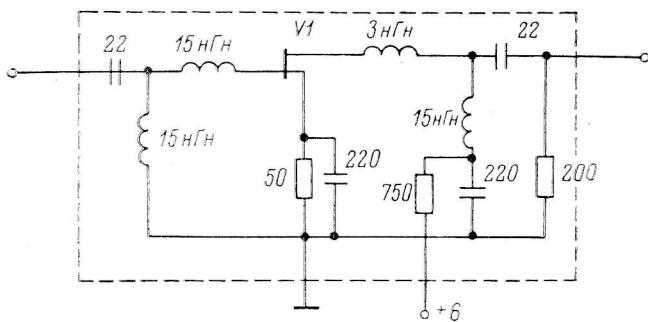


Рис. 2. Принципиальная схема каскада усиления МШУ.

V1 — ПТШ.

тельная нестабильность шумовых температур $T_{п}$, $T_{п.с}$ и коэффициента L_m за время наблюдения не должна превышать $\sim (\Delta f t)^{-1/2}$. Наиболее трудно это требование обеспечить для широкополосного радиометрического канала спектрометра ($\Delta f = 10$ МГц, $t = 6$ с), для которого эта величина составляет $\sim 10^{-4}$.

Стабильность $T_{п}$ достигается предельным упрощением входного тракта и малыми потерями в нем (вклад в шумовую температуру приемника от входного тракта, включая *НО* и *В1*, не превышает 17 К), а также стабилизацией окружающей температуры и питающего напряжения *МШУ* и *СМ*. Требование к $T_{п.с}$ обеспечивается применением высокостабильных генераторов шума на параметрических диодах (типа 1А404), работающих в режиме пробоя (относительная нестабильность $T_{п.с}$ при изменении температуры корпуса *ПГШ* на 1 °С не превышает 10^{-3}). Для ослабления влияния окружающей температуры генератор шума заменен активным термостатом (температура корпуса *ПГШ* поддерживается с точностью до 0.1 °С).

Стабильность параметров модулятора определяется главным образом стабильностью резисторов, входящих в его схему.

Для выполнения операций калибровки и контроля баланса каналов спектрометра [3] во входной тракт через направленные ответвители *ДНО* и *НО* могут подаваться модулированные шумовые сигналы с температурами $T_k = 5.5$ К (калибровочный сигнал) и $T_0 = 50$ К (балансировочный сигнал) соответственно от генераторов шума *КГШ* и *БГШ*. Управление модулятором *М* и всеми генераторами шума производится модулирующими импульсами *МИ1*, *МИ2* и *МИ3*, поступающими от системы программного управления спектрометрического комплекса.

Все узлы приемного устройства термостатируются. Модуль смесителя и узел *ПГШ* помещены в активные термостаты, где температура поддерживается с точностью до 0.1 К устройствами терморегулирования СТ-1, СТ-2. Остальные узлы находятся в пассивных термостатах.

М о д у л ь МШУ. В качестве входного малошумящего усилителя в приемнике используется охлаждаемый до температуры жидкого азота (77 К) трехкаскадный транзисторный усилитель. На рис. 2 представлена схема одного каскада (остальные два аналогичны). Усилитель выполнен на полевых GaAs с барьером Шоттки транзисторах (ПТШ). Особенности работы подобных уст-

ройств подробно описаны в литературе (список литературы можно найти, например, в [7]). Применение ПТШ в МШУ дециметрового диапазона затрудняется высоким импедансом транзистора, дающим коэффициент отражения от входа около 0.9, а также его низкой устойчивостью, способствующей самовозбуждению на высоких частотах. Для устранения этих трудностей существует несколько путей. В данном усилителе для повышения устойчивости в истоковых цепях транзисторов всех каскадов применяется отрицательная обратная связь. Значение индуктивности в цепи обратной связи выбиралось с учетом рекомендации [8]. Кроме того, стоковые цепи транзисторов зашунтированы резисторами. Применение этих мер позволило создать усилитель, устойчивый в широком диапазоне частот при воздействии нагрузок с различными импедансами. Устойчивость усилителя сохраняется при глубоком охлаждении.

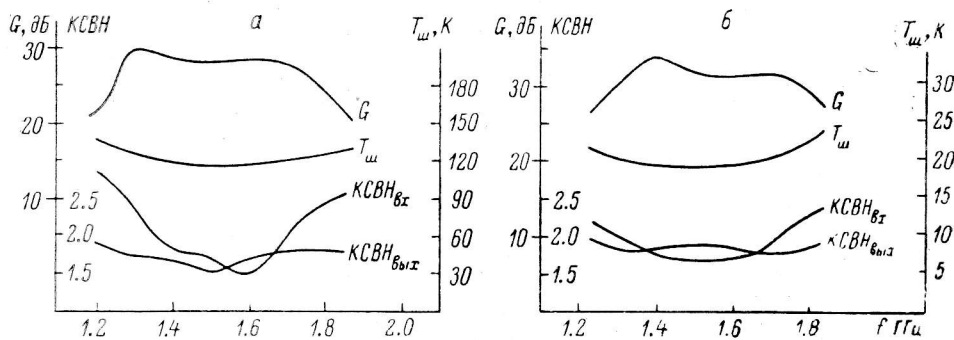


Рис. 3. Характеристики МШУ:

a — при температуре окружающей среды (293 К); *б* — при охлаждении до температуры жидкого азота (77.8 К); *G* — коэффициент усиления; $T_{ш}$ — шумовая температура; $КСВН_{вх}$ — коэффициент стоячей волны напряжения по входу; $КСВН_{вых}$ — коэффициент стоячей волны напряжения по выходу.

Расчет электрической схемы и значений элементов согласующих цепей производился по известным методикам [9] с использованием *S*-параметров транзисторов.

Усилитель выполнен по гибридно-интегральной технологии на элементах с сосредоточенными параметрами. При этом каждый каскад представляет собой отдельную микросхему размером 8×8 мм. Резисторы, проводники и катушки индуктивности изготовлены по тонкопленочной технологии на поликоровой подложке толщиной 0.5 мм. Конденсаторы типа К10-7 и бескорпусные транзисторы — навесные и установлены на микросхемы пайкой. Для снижения влияния диэлектрической проницаемости подложки ее обратная сторона не металлизирована. Под подложкой имеется воздушный зазор 0.25—0.5 мм, который обеспечивается конструкцией и позволяет снизить механические напряжения на подложку и повысить надежность работы микросхемы при охлаждении.

Все три каскада собраны в общем герметичном корпусе с размерами $32 \times 22 \times 16$ мм, на котором установлены два разъема типа СР-50-275С, соединенные с элементами усилителя с помощью герметичных коаксиально-микрополосковых переходов. Модуль МШУ вместе с вентилем *В1* помещен в герметичную камеру, установленную в сосуде Дьюара типа ВСД-25М. Чтобы предотвратить проникновение воздуха и паров воды в элементы СВЧ-тракта, камера заполняется газообразным гелием под давлением, несколько большим атмосферного.

Питание усилителя осуществляется от стабилизатора напряжения, конструктивно входящего в модуль смесителя. Очень важной особенностью усилителей на ПТШ из арсенида галлия является резкое снижение шумовой температуры при глубоком охлаждении. Характеристики модуля МШУ, измеренные при комнатной температуре и при температуре жидкого азота, приведены соответственно на рис. 3, *a* и *б*. Шумовая температура МШУ, работающего в жидком азоте ($T_{э3} = 77.8$ К), близка к 20 К, в то время как при комнатной температуре ($T_0 = 290$ К) она составляла 120 К. Этот результат показывает, что при охлаждении до 77.8 К снижение шумовой температуры МШУ достаточно хо-

рошо соответствует закону $T_{ш. аз}/T_{ш. о} = (T_{аз}/T_0)^{3/2}$ [10]. Остальные характеристики при этом изменяются незначительно.

Модуль смесителя (рис. 4) состоит из двух каскадов. Первый, аналогичный каскаду МШУ, выполнен на малошумящем полевом транзисторе и служит для усиления СВЧ-сигнала. Он также определяет в основном шумовую температуру всего смесителя. Второй каскад, в котором используется биполярный кремниевый транзистор, является смесителем с усилением по промежуточной частоте (он также выполнен в виде отдельной микросхемы размером 8×8 мм). Такая схема позволила отказаться от применения предварительного усилителя

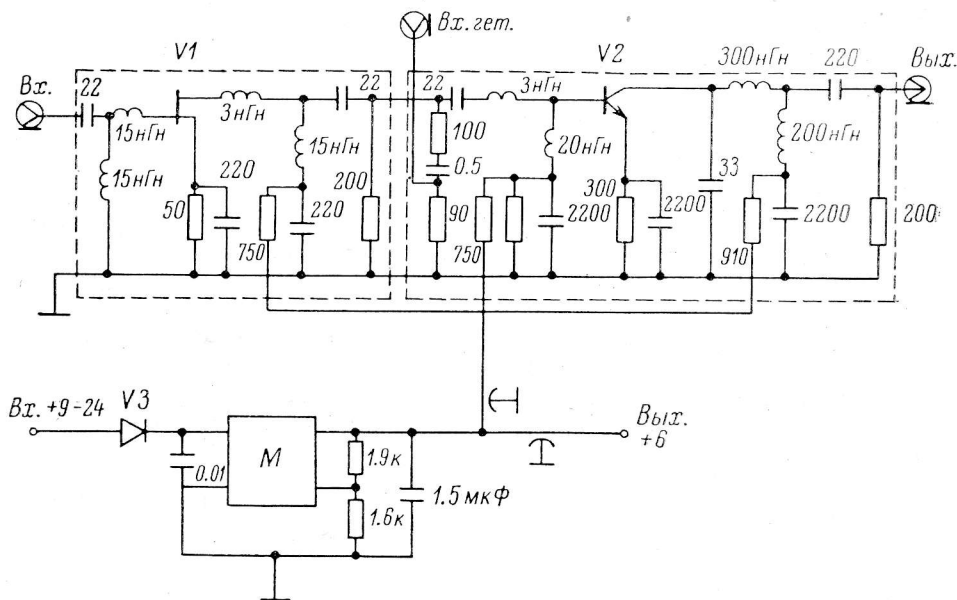


Рис. 4. Принципиальная схема смесителя.

V1 — ПТШ; V2 — КТЗ114; V3 — КД102А; М — 142ЕНЗ.

на промежуточной частоте, необходимого при использовании диодного смесителя. Питание модуля смесителя (а также модуля МШУ) осуществляется от стабилизатора напряжения, собранного на микросхеме 142ЕНЗ. Все три микросхемы помещены в общий герметичный корпус с размерами $41 \times 29 \times 23$ мм, на котором установлены три разъема типа СР-50-275с и два микроразъема питания.

Модуль смесителя имеет следующие параметры:

Центральная частота рабочего диапазона, МГц	1420
Промежуточная частота, МГц	45
Полоса частот УПЧ по уровню -1 дБ, МГц	10
Коэффициент усиления, дБ	20.5
Неравномерность усиления, дБ	0.5
КСВН сигнального входа	1.9
КСВН гетеродинного входа	2.0
Мощность гетеродина, мВт	1.5
Шумовая температура, К	280

Модуль аттенуации (рис. 5) состоит из двух пассивных фиксированных аттенуаторов с ослаблением 3 и 15 дБ, переключаемых с помощью диодных ключей прямоугольными модулирующими импульсами с размахом напряжения ± 5 В. При спектральных измерениях наряду с высокими требованиями к стабильности L_m необходимо постоянство этого коэффициента на всех частотах в полосе анализа. Измеренная частотная зависимость коэффициента L_m не превышает 0.4 дБ на интервале ~ 10 МГц в полосе пропускания УПЧ.

Параметры СП-21:

Диапазон частот принимаемых сигналов, МГц	1400—1440
Усиление приемного тракта, дБ	53
Неравномерность усиления в рабочей полосе частот, дБ	0.5
Нестабильность коэффициента усиления за 0.5 ч работы, %	0.2
Шумовая температура приемного устройства, К	40

Измерение шумовой температуры приемника проводилось методом «теплой» (290 К) и «холодной» (охлажденной до 77.8 К) согласованных нагрузок [1]. Погрешность измерений лежит в пределах $\pm 10\%$ и определяется в основном погрешностью температуры «холодной» нагрузки.

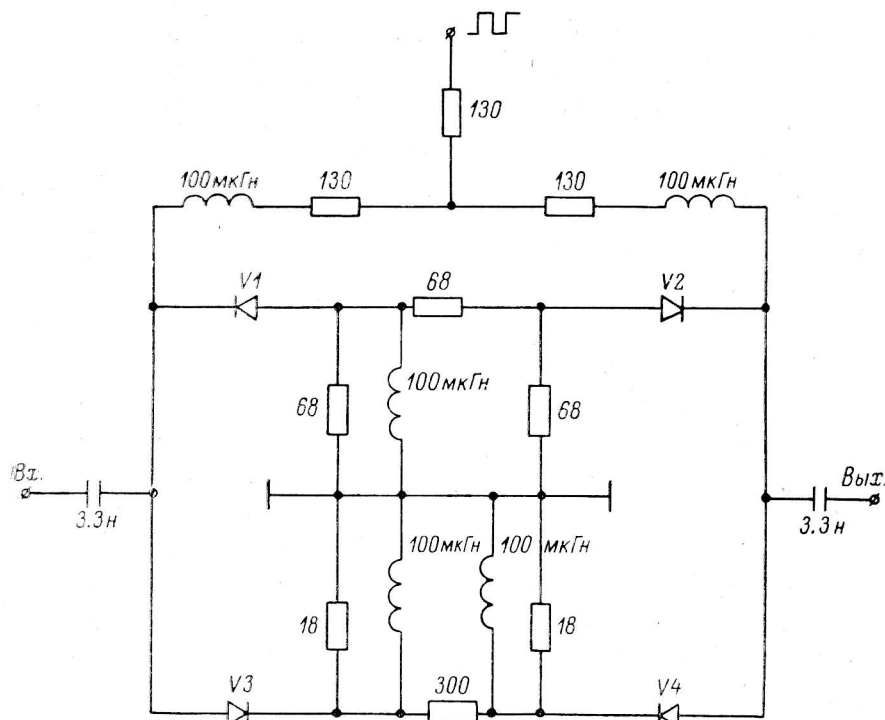


Рис. 5. Принципиальная схема модулятора усиления.

V1—V4 — КД409.

За 1.5 года эксплуатации на РАТАН-600 параметры транзисторного приемного устройства остались практически неизменными, что подтверждает его высокую надежность.

Заключение. Испытания данного приемного устройства показали целесообразность выбранных технических и методических решений.

Использование малошумящего высокостабильного охлаждаемого транзисторного усилителя и методики измерения с шумовым пилот-сигналом позволило улучшить флуктуационную чувствительность в 1.5—2 раза по сравнению с ранее использовавшимся приемником. Надо отметить, что данный приемник может работать в чистом компенсационном режиме для спектральных наблюдений при соответствующей переделке выходных низкочастотных устройств.

В настоящее время в стадии внедрения находится импульснокомпенсационная методика измерения сигналов [8], которая должна увеличить чувствительность в 1.5 раза.

Авторы выражают благодарность В. Г. Грачеву и В. А. Прозорову за полезное обсуждение и помощь при введении данного приемного устройства в эксплуатацию.

Литература

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 415 с.
2. Грачев В. Г., Рыжков Н. Ф. Чувствительность радиометра и метода импульсной компенсации. — *Астрофиз. исслед. (изв. САО)*, 1980, **12**, с. 64—67.
3. Спектрометрический комплекс радиотелескопа РАТАН-600 / А. П. Венгер, В. Г. Грачев, Т. М. Егорова и др. — *Сообщ. САО*, 1982, **35**, с. 5—32.
4. Криорadiометр на волну 7.6 см и опыт его эксплуатации на радиотелескопе РАТАН-600 / А. Б. Берлин, Л. Г. Гассанов, В. Я. Гольнев и др. — *Радиотехника и электроника*, 1982, **27**, № 7, с. 1268—1273.
5. Новый радиотелескоп Академии наук РАТАН-600 / А. Б. Берлин, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. — *ПТЭ*, 1977, № 5, с. 8—16.
6. Егорова Т. М., Могилева В. Г., Рыжков Н. Ф. Программно-управляемые гетеродины для радиоспектрометров. — *Изв. вузов. Радиофизика*, 1976, **19**, № 10, с. 1554—1556.
7. Williams D. R., Lum W., Weinreb S. L-band cryogenically-cooled gas fet-amplifier. — *Microwave J.*, 1980, **23**, N 10, p. 73—76.
8. L. Nevin, R. J. Bong. L-band GaAs FET-amplifier. — *Microwave J.*, 1979, **22**, N 4, p. 82—83.
9. Раев М. Д., Шварц Н. З. Согласование комплексных сопротивлений в СВЧ микроэлектронике. — *Радиоэлектроника*, 1972, № 6, с. 728—738.
10. Piergo J., Louie K. Low temperature performance of GaAs MESFET'S at L-Band. — In: *Microwave Symp. Digest, Orlando, Florida, 1979*, p. 28—30.

Поступила в редакцию 12.04.84