

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

621.378.365

**КВАНТОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ***Л. С. Корниенко, В. Б. Штейншлайгер*

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	287
2. Парамагнитные кристаллы для квантовых усилителей	289
3. Устройство и характеристики современных квантовых усилителей	294
4. Применение квантовых усилителей	300
Цитированная литература	307

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение чувствительности радиоприема всегда являлось одной из основных проблем радиоэлектроники. Острота и актуальность этой проблемы заметно возросла в 60-х годах в связи с началом активного изучения и освоения космического пространства.

В то время в диапазоне микроволн *) — основном диапазоне волн для исследования космического пространства радиометодами — наилучшими по шумовым характеристикам входными радиоприемными устройствами считались кристаллические полупроводниковые смесители с шумовой температурой **) 1000—2000 °К. Впоследствии благодаря разработке ряда новых входных малошумящих устройств (электронных микроволновых усилителей; параметрических, тунNELьных, транзисторных усилителей; квантовых усилителей). шумовую температуру радиоприемников в диапазоне микроволн удалось существенно снизить.

Среди малошумящих устройств в микроволновом диапазоне квантовые усилители или, как их часто называют, мазеры, занимают особое место: они имеют наименьшие собственные шумы и являются своеобразным эталоном, степенью приближения к которому можно характеризовать шумовые устройства других типов малошумящих устройств.

Шумовая температура квантовых усилителей чрезвычайно мала — всего около 10 °К. Поэтому они применяются в тех случаях, когда главным требованием, предъявляемым к радиоприемной системе, является обеспечение предельно малой шумовой температуры.

Именно к такого рода системам относятся наземные радиоприемные системы дальней космической связи (ДКС) и ряд радиоастрономических

*) К диапазону микроволн принято относить дециметровые, сантиметровые и миллиметровые длины волн.

**) Шумовые свойства приемного устройства принято характеризовать шумовой температурой T . Это есть измеренная в градусах Кельвина температура абсолютно черного тела — эквивалента антенны, тепловое излучение которого создает в приемнике шумы, равные по интенсивности собственным шумам последнего.

систем (спектральные радиометры, радиоинтерферометры со сверхдлинной базой, планетные радиолокаторы и др.).

Работа квантовых усилителей основана на использовании вынужденного излучения неравновесных квантовых систем с инверсной населенностью энергетических уровней («активных» систем).

Основным методом получения инверсии населенностей в таких системах является предложенный Басовым и Прохоровым метод «накачки»¹. Согласно этому методу на систему частиц, обладающих тремя уровнями энергии $E_1 < E_2 < E_3$, воздействуют вспомогательным электромагнитным излучением (накачкой) с частотой, соответствующей квантовому переходу между крайними из трех уровней (E_1 , E_3). При достаточно интенсивной накачке этот переход насыщается (населенности уровня E_1 и E_3 становятся одинаковыми) и населенность одного из верхних уровней (E_3 или E_2) оказывается превышающей населенность уровня, расположенного ниже. Это и называют инверсией населенностей.

Активным веществом в квантовых усилителях служат диэлектрические кристаллы с изоморфной примесью парамагнитных ионов, обладающих подходящей системой из трех (или более) энергетических уровней. Расстояния между уровнями, которые можно регулировать, прикладывая внешнее магнитное поле, соответствуют квантовым переходам в радиодиапазоне^{2, 3}. Для получения инверсии населенностей, обеспечивающей эффективную работу усилителя, парамагнитный кристалл должен находиться при достаточно низкой температуре, как правило, при температуре жидкого гелия.

Первые работы в области КУ были посвящены главным образом исследованию нового принципа усиления и протекающих при этом физических явлений. Вместе с тем необходимо было выяснить, как на основе сформулированных общих принципов создать устройства, обладающие требуемыми для практического применения высокими параметрами (большим усилением, предельно малыми шумами, достаточно широкой полосой пропускания, высокой стабильностью и надежностью и т. п.). Для этого в ряде стран (главным образом в СССР и США) были проведены систематические исследования, в результате которых были созданы квантовые усилители (КУ) в широком диапазоне волн — от дециметровых до миллиметровых, — обладающие необходимыми характеристиками. В ходе этих работ были исследованы парамагнитные кристаллы для КУ, разработаны методы построения эффективных усилителей такого типа, созданы надежно работающие КУ различных диапазонов волн и осуществлен их промышленный выпуск. Одновременно были разработаны и внедрены в практику методы сопряжения КУ с большими антennами, обеспечивающие реализацию потенциальных возможностей КУ по повышению чувствительности радиоприемных систем.

В настоящее время КУ успешно применяются в системах дальней космической связи, на крупнейших радиотелескопах и в планетных радиолокаторах, обеспечивая максимально высокую чувствительность этих систем.

В данном обзоре кратко освещаются основные результаты работ (главным образом отечественных) в области квантовых усилителей; описываются устройство и характеристики современных КУ *), приводятся основные сведения об их применении в исследованиях космического пространства и о полученных при этом научных результатах.

*) Приводятся сведения лишь об используемых в настоящее время КУ. Данные о многочисленных лабораторных или не применяемых в настоящее время КУ можно найти в журнальных статьях, приведенных в библиографических перечнях в ⁴⁻⁶.

2. ПАРАМАГНИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ КВАНТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Как уже было отмечено выше, в качестве усиливающего (активного) вещества в КУ используются примесные парамагнитные кристаллы. Так называют кристаллы, в решетку которых, состоящую из диамагнитных ионов, изоморфно входят в виде небольшой примеси (сотые доли процента) парамагнитные ионы элементов, относящихся к одной из переходных групп периодической системы Менделеева.

Эффективность парамагнитного кристалла в режиме усиления можно характеризовать величиной χ'' — мнимой частью комплексной магнитной восприимчивости на частоте усиливаемого сигнала f (подробнее см. гл. 3). Величину χ'' можно выразить соотношением *)⁴⁻⁶

$$\chi'' \approx 10^{-13} (N_1 - N_2) \frac{\sigma^2}{\Delta\nu}; \quad (2.1)$$

здесь N_1, N_2 (см^{-3}) — населенности соответственно нижнего и верхнего уровней энергии, между которыми осуществляется переход на частоте сигнала; $\Delta\nu$ (гц) — ширина линии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на частоте сигнала (ее форма предполагается лоренцевой); σ — безразмерный «эффективный» матричный элемент, определяющий вероятность вынужденных квантовых переходов на частоте сигнала (он вычисляется по известным матричным элементам оператора спина с учетом направления и поляризации СВЧ магнитного поля сигнала, действующего на частицу). Заметим, что для чистых спиновых состояний, соответствующих значению спина $1/2$, при круговой поляризации СВЧ магнитного поля в плоскости, перпендикулярной к приложенному внешнему постоянному магнитному полю, $\sigma^2 = 1/2$.

При инверсии населенностей, достигаемой в результате воздействия накачки (вспомогательного излучения), $N_1 < N_2$. Величина χ'' в этом случае отрицательна, что приводит к усилению электромагнитной волны частоты f , взаимодействующей с парамагнитным кристаллом.

Разность населенностей частиц в активном кристалле $N_1 - N_2$ принято выражать через разность населенностей при тепловом (больцмановском) равновесии $(N_1 - N_2)_B$ и так называемый коэффициент инверсии J :

$$(N_1 - N_2) = -J (N_1 - N_2)_B. \quad (2.2)$$

Коэффициент инверсии J , характеризующий эффективность действия накачки, зависит от отношения значений частот накачки и сигнала, увеличиваясь с ростом этого отношения, а также от относительных значений вероятностей безызлучательных (релаксационных) переходов между уровнями. Он может быть выражен через эти величины на основе анализа кинетических уравнений населенностей рассматриваемой системы уровней²⁻⁶. В КУ микроволнового диапазона населенности уровней различаются незначительно, и для χ'' справедлива приближенная формула

$$|\chi''| \approx 10^{-13} J \frac{N}{n} \frac{hf}{kT} \frac{\sigma^2}{\Delta\nu}; \quad (2.3)$$

здесь N — общее число парамагнитных ионов в см^3 ; n — полное число уровней в основном состоянии иона; h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Эффективность парамагнитного кристалла в квантовом усилителе тем выше, чем больше абсолютная величина χ'' (см. гл. 3). Поэтому для получения требуемых в КУ значений χ'' активный кристалл охлаждают до температур жидкого гелия. Заметим, однако, что даже при гелиевых температурах у парамагнитных

*) Формула написана в системе CGS.

кристаллов, используемых в КУ, величина χ'' невелика и обычно имеет порядок 10^{-3} .

Для того чтобы тот или иной парамагнитный кристалл мог быть эффективно применен в квантовых усилителях, он должен удовлетворять ряду специфических и подчас взаимно противоречивых требований.

Прежде всего, как указывалось выше, примесный парамагнитный ион в кристалле должен обладать в основном состоянии системой из трех или более энергетических уровней. При этом расщепления между ними должны позволять усиливать сигналы заданной частоты при частоте накачки, находящейся в подходящем (технически освоенном) диапазоне. Примесный парамагнитный ион в кристалле испытывает воздействие внутреннего электрического поля, создаваемого окружением⁷⁻⁸. Это поле вызывает расщепления электронных уровней энергии. Величина расщеплений зависит от силы и симметрии поля. Расщепления внутрикристаллическим полем (их принято называть «начальными») можно «подправить» до желаемых значений, дополнительно воздействуя на ион внешним магнитным полем. Последнее вызывает зеемановские расщепления и смещения уровней, зависящие от силы приложенного внешнего магнитного поля и его ориентации относительно осей симметрии внутреннего поля кристалла.

Выбор активного вещества связан также с величинами матричных элементов переходов на частотах сигнала и накачки. Матричный элемент сигнального перехода определяет эффективность активного вещества (см. (2.1)). Поэтому для усиления сигнала обычно используют хорошо «разрешенный» переход, для которого величина матричного элемента близка к единице. При этом величина матричного элемента перехода накачки не должна быть слишком малой, так как она определяет требуемую мощность генератора накачки.

Весьма противоречивы требования, предъявляемые к такой важной характеристике примесного иона в кристалле, как его время спин-решеточной релаксации T_1 ⁵⁻⁸. Величина T_1 зависит от температуры T (увеличиваясь с понижением T), концентрации парамагнитных ионов и, вообще говоря, различна для разных переходов. Чем меньше T_1 , тем большая мощность требуется для насыщения перехода накачки. Вместе с тем излишне большая величина T_1 приводит к уменьшению динамического диапазона усиливаемых сигналов, снижает значение максимальной мощности сигнала, усиливающего без нелинейных искажений (см. гл. 3).

Получение подходящих значений T_1 является еще одной причиной, по которой требуется охлаждать парамагнитные кристаллы до достаточно низких температур. Значение T_1 в кристаллах, применяемых в КУ, обычно лежат в интервале 10^{-3} — 10^{-1} сек.

Важным параметром активного кристалла является достигаемая в режиме усиления величина коэффициента инверсии J ³⁻⁶, которую всегда стремятся иметь возможно большей. Обычно в известных КУ величина J в активном кристалле составляет от одной до нескольких единиц.

Определенные требования предъявляются к линии ЭПР активного кристалла. Обычно в кристаллах для КУ ширина линии находится в пределах 50—100 $M\text{g}\mu$.

Практически важны и такие требования к активным кристаллам, как их устойчивость к различным физико-химическим воздействиям, низкий уровень диэлектрических потерь, существование разработанной технологии синтеза.

Разработка КУ радиодиапазона была осуществлена на основе исследований парамагнитных кристаллов и взаимосвязи их свойств с характеристиками КУ. Результаты этих исследований приведены в ряде обзоров и монографий^{3, 5-9}.

Заметим, что до появления первых КУ в исследованиях явления ЭПР, открытого Е. К. Завойским в СССР в 1944 г.¹⁰, преобладали работы по изучению резонансных спектров, а масштабы исследований релаксационных свойств были сравнительно ограниченными. Вопросы, возникшие с появлением первых КУ, привели к расширению исследований спектров ЭПР в примесных парамагнитных кристаллах, но в еще большей степени они стимулировали исследования релаксационных процессов. Это привело к значительному прогрессу в развитии данной области физики твердого тела^{7, 8}.

Работы в области КУ, в частности, стимулировали экспериментальные и теоретические исследования процессов установления равновесия внутри спин-системы и роли в этих процессах спин-спиновых взаимодействий. Необходимость объяснения ряда новых экспериментальных фактов привела к открытию явления спин-спиновой кросс-релаксации (перекрестной релаксации)¹¹. Кросс-релаксация связывает между собой переходы с различными вероятностями спин-решеточной релаксации, изменяет соотношение скоростей релаксации между различными парами уровней и влияет тем самым на величину коэффициента инверсии J . Явление кросс-релаксации позволило понять, почему существует предел роста абсолютной величины инверсной восприимчивости χ'' при увеличении концентрации парамагнитных ионов в кристалле. С увеличением концентрации растет роль многоспиновых кросс-релаксационных переходов и области действия отдельных процессов перекрываются. Кросс-релаксация постепенно охватывает все переходы, и насыщение любого из них вызывает в той или иной степени насыщение всех остальных переходов («общая кросс-релаксация»). В результате коэффициент инверсии J с дальнейшим ростом концентрации активных ионов начинает уменьшаться. Таким образом, существует некоторая зависящая от температуры оптимальная величина концентрации, при которой абсолютная величина χ'' достигает максимума.

Требования к активным кристаллам накладывают довольно жесткие ограничения на их характеристики. Поэтому не случайно из большого количества исследованных кристаллов лишь немногие оказались пригодными для создания КУ, нашедших практическое применение.

В известных кристаллах для КУ активными являются примесные ионы, относящиеся к переходным группам железа и редких земель, причем большинство описанных в литературе КУ было создано на основе ионов из группы железа, а именно на основе ионов Cr^{3+} и Fe^{3+} .

Среди всех известных активных кристаллов исключительное место занимает рубин, который использован в подавляющем большинстве КУ, получивших практическое применение в современных радиосистемах.

Как известно, рубин представляет собой одну из кристаллических модификаций окиси алюминия (Al_2O_3), называемую α -корундом, в которой небольшая часть ионов Al^{3+} изоморфно замещена ионами Cr^{3+} . Данные о спектре ЭПР иона Cr^{3+} в рубине и его теоретическая интерпретация были впервые даны в¹².

Рубин оказался наиболее подходящим активным веществом в КУ различных типов и назначений по ряду причин. Начальное расщепление основного квадруплетного уровня иона Cr^{3+} на два крамерсовых дублета, вызываемое совместным воздействием внутрикристаллического поля тригональной симметрии и спин-орбитальной связи, находится в сантиметровом диапазоне длин волн (оно равно 11,5 ГГц). При приложении внешнего магнитного поля образуется система из четырех уровней энергии. Варьируя угол между тригональной осью кристалла и направлением магнитного поля, а также силу последнего, можно получить большой выбор вариантов для усиления сигналов с длинами волн, находящимися в дециметровом,

сантиметровом и длинном миллиметровом диапазонах. При этом частота накачки лежит в освоенных диапазонах, а величина внешнего магнитного поля оказывается умеренной. В рубине хорошо сочетаются подходящие значения величин матричных элементов, времени релаксации, ширины линий ЭПР, отличные механические и диэлектрические характеристики (см., например, ^{3, 6}).

Из других исследовавшихся активных кристаллов наибольшее внимание привлекли рутил (одна из кристаллических модификаций окиси титана — TiO_2) с примесью ионов Cr^{3+} или Fe^{3+} , а также корунд с примесью ионов Fe^{3+} .

Примесные кристаллы рутила благодаря значительным начальным расщеплениям уровней энергии позволяют увеличить отношение частоты накачки к частоте сигнала и получить большее значение коэффициентов инверсии J ($J > 10$) при создании КУ в диапазоне 1—6 ГГц.

Примесный ион Fe^{3+} дает принципиальную возможность создать КУ без приложения внешнего магнитного поля и использовать в этом случае активное вещество в виде поликристалла или порошка.

Следует особо упомянуть такие кристаллы, как берилл ($Al_2Be_3Si_6O_{18}$) с примесью ионов Cr^{3+} (изумруд) и андалузит (Al_2SiO_5) с примесью ионов Fe^{3+} . Они, выгодно отличаясь от рубина значительно большими начальными расщеплениями уровней энергии (полное начальное расщепление для изумруда составляет 53,6 ГГц, а в случае андалузита оно составляет почти 350 ГГц), имеют также приемлемые времена релаксации. В этих кристаллах можно достичь увеличенных значений инверсии при меньших магнитных полях (см., например, ¹³⁻¹⁵), а также получить большие значения матричных элементов переходов как на частоте усиливаемого сигнала, так и на частоте накачки.

К сожалению, синтез андалузита пока не освоен. Можно надеяться, что прогресс в получении искусственных кристаллов изумруда позволит в ближайшее время создать на этом кристалле эффективные КУ в миллиметровом диапазоне волн.

Таблица I
Активные кристаллы для квантовых усилителей

Кристалл	Примесный ион	Концентрация примеси, %	Начальные расщепления уровней, ГГц	Типичные величины времени T_1 (месяц) при 4,2 °К
Al_2O_3 (корунд)	Cr^{3+} Fe^{3+}	0,03—0,04 0,02—0,05	11,47 $\Delta_1 = 12,05$ $\Delta_2 = 19,3$	10^2 —10 10—1
TiO_2 (рутил)	Cr^{3+} Fe^{3+}	0,01—0,04 0,01—0,04	43,3 $\Delta_1 = 43,3$ $\Delta_2 = 81,3$	1 1
$Al_2Be_3Si_6O_{18}$ (берилл)	Cr^{3+}	< 0,1	53,6	10—1
Al_2SiO_5 (андалузит)	Fe^{3+}	0,07	$\Delta_1 = 116,1$ $\Delta_2 = 232,2$	1

Для иона Cr^{3+} указано расщепление внутрикристаллическим полем основного спинового квадруплета на два крамерсовых дублета. Для иона Fe^{3+} основной спектральный секстет расщепляется в поле кристаллов на три крамерсовых дублета, указаны расщепления между двумя парами соседних дублетов

В табл. I приведены параметры упомянутых выше кристаллов для КУ.

Более полное и подробное рассмотрение кристаллов для КУ можно найти, например, в работах^{3, 5, 6}.

На примере рубина проиллюстрируем, как используются уровни энергии активного иона в КУ.

Относительное положение уровней энергии примесных ионов хрома определяется силой внешнего магнитного поля и углом θ между направлениями этого поля и тригональной оси симметрии внутрикристаллического электрического поля. В нулевом магнитном поле используемая группа уровней (четыре спиновых подуровня основного орбитального синглета) представляет из себя два спиновых крамерсовых дублета с начальным расщеплением между ними, равным 11,5 ГГц. При приложении внешнего магнитного поля происходит расщепление спиновых дублетов,

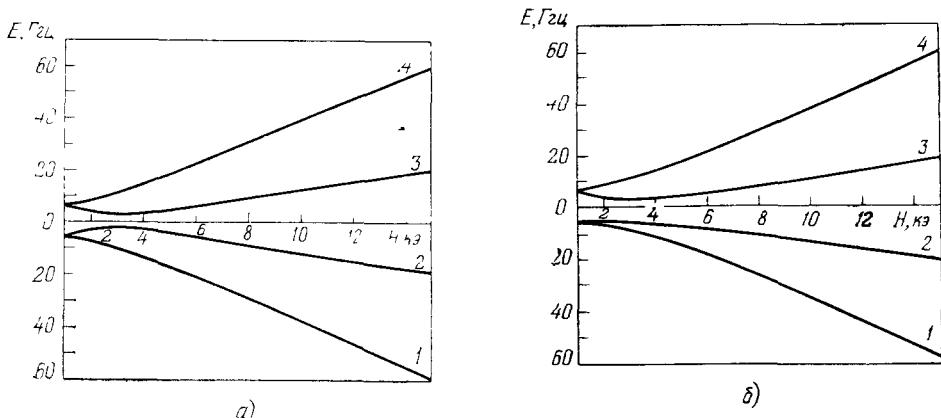


Рис. 1. Уровни энергии в рубине.

a) $\theta = 54^{\circ}44'$; б) $\theta = 90^{\circ}$.

зависимость которого от величины приложенного магнитного поля различна для разных величин угла θ . На рис. 1 приведены зависимости положений энергетических уровней от силы приложенного поля для двух наиболее употребительных случаев $\theta = 54^{\circ}44'$ и $\theta = 90^{\circ}$.

При $\theta = 54^{\circ}44'$ зависимость расщеплений уровней от величины поля оказывается симметричной относительно оси абсцисс. Минимальное расстояние между средними уровнями 2 и 3, переход между которыми обычно используется для усиления принимаемого сигнала, вдвое меньше начального расщепления. Это определяет минимальную возможную частоту усиливаемых сигналов в данном варианте. Для накачки здесь одновременно используются два равных по частоте перехода 1—3 и 2—4. Такая двойная накачка позволяет достигнуть ощутимого выигрыша в коэффициенте инверсии по сравнению со случаем, когда для накачки используется лишь один переход³⁻⁶.

Вариант с $\theta = 90^{\circ}$ применяется, как правило, для более низких усиливаемых частот. Важное преимущество этой ориентации состоит в том, что угловая зависимость спектра ЭПР здесь минимальна, и имеющийся в реальных кристаллах рубина разброс в направлении оси внутрикристаллического поля для отдельных ионов не приводит к заметному уширению линий ЭПР и связанному с этим уменьшением усиления. Для усиления сигнала в этом режиме обычно используется переход 1—2. В усилителях дециметрового диапазона волн для накачки используется переход 1—3; в усилителях сантиметрового диапазона большая величина инверсии

получается при использовании для накачки перехода 1—4. Исследовался также режим с одновременной накачкой на переходах 1—3 и 3—4, отличающийся меньшей, чем при использовании перехода 1—4, мощностью накачки⁶.

3. УСТРОЙСТВО И ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ КВАНТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В принципе квантовое усиление может быть получено, если усиливаемую электромагнитную волну пропустить через обычный волновод, заполненный активным веществом. Однако вследствие малой величины инверсной магнитной восприимчивости кристалла (см. гл. 2) для получения значительного усиления потребовалось бы применять активные кристаллы длиной несколько метров, что практически неосуществимо.

Поэтому в первых экспериментальных установках для исследования эффекта квантового усиления в парамагнитных кристаллах взаимодействие усиливаемой волны с кристаллом осуществлялось в объемном резонаторе. В этом случае электромагнитная волна, многократно отражаясь от стенок внутри резонатора, взаимодействует с активным веществом длительное время, чем и обеспечивается большое усиление при сравнительно небольших размерах кристалла.

Коэффициент усиления G мощности и полоса Δf усиливаемых частот (по уровню 0,5) резонаторного КУ, выполненного по так называемой отражательной схеме (в этой схеме усиливаемая и усиленная волны проходят по одному и тому же волноводу и разделяются с помощью невзаимного устройства — ферритового циркулятора), удовлетворяют следующему приближенному соотношению (подробнее см. ³⁻⁶):

$$(\sqrt{\bar{G}} - 1) \Delta f \approx \frac{2d_m f}{1 + (d_m f / \Delta v)} ; \quad (3.1)$$

здесь Δv — ширина линии ЭПР; f — частота сигнала; d_m — модуль отрицательного магнитного декремента, характеризующего эффективность взаимодействия активного парамагнетика с высокочастотным магнитным полем в резонаторе (для краткости, d_m называют просто магнитным декрементом).

Величина d_m определяется формулой (в системе CGS)

$$d_m = 4\pi |\chi''_{\max}| \eta , \quad (3.2)$$

где χ''_{\max} — магнитная восприимчивость при максимально возможном значении эффективного матричного элемента σ (см. формулу (2.1)); η — так называемый коэффициент использования, характеризующий степень заполнения резонатора активным веществом, а также отклонение направления и поляризации магнитного поля в резонаторе от оптимальных условий, при которых величина σ принимает максимально возможное значение.

Наличие в формуле (3.1) инварианта $(\sqrt{\bar{G}} - 1) \Delta f$, обуславливающего резкое сужение полосы усилителя при увеличении усиления, связано с регенеративной природой усиления в резонаторном КУ и характерно для регенеративных усилителей любого типа.

Коэффициент усиления G регенеративного усилителя определяется при этом формулой

$$G \approx \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right)^2 , \quad (3.3)$$

где β — параметр регенерации, равный отношению модуля отрицательного декремента активного вещества в резонаторе к декременту затухания, обусловленному связью резонатора с внешними цепями, а также потерями в самом резонаторе.

Применявшиеся на первых порах КУ с одним резонатором обладали существенными недостатками, присущими регенеративным устройствам: для получения необходимого большого коэффициента усиления приходилось применять большую степень регенерации ($\beta \approx 1$). Такие КУ нестабильны (см. (3.3)) и усиливают только в весьма узкой полосе частот, недостаточной для большинства практических применений. По этой причине однорезонаторные КУ в настоящее время в практических радиоприемных системах не применяются.

Устранение указанных выше недостатков КУ проводилось параллельно двумя путями. На одном из них велась разработка КУ с несколькими

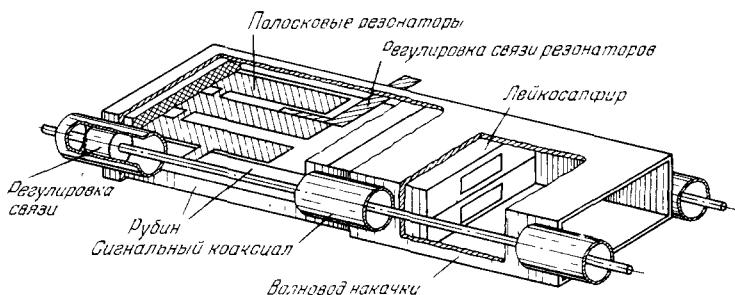


Рис. 2. Резонаторная система квантового усилителя дециметрового диапазона волн.

связанными между собой резонаторами — активными (т. е. заполненными активным веществом) или пассивными (пустыми). Другой путь заключался в создании и совершенствовании практически нерегенеративных КУ — квантовых усилителей бегущей волны (КУБВ).

В ряде работ были предложены¹⁶, теоретически проанализированы в¹⁶⁻¹⁸ и осуществлены¹⁹⁻²² КУ с использованием нескольких связанных активных резонаторов в однокаскадном и двухкаскадном исполнении. Такие многорезонаторные усилители имеют при том же общем числе резонаторов большую ширину полосы по сравнению с усилителями, в которых применяются комбинации активных и пассивных резонаторов²³, поскольку ширина полосы многорезонаторного КУ в первом приближении пропорциональна числу активных резонаторов^{6, 21}.

Многорезонаторные КУ применяются в настоящее время, главным образом, в дециметровом диапазоне волн. На рис. 2 изображена резонаторная система двухкаскадного КУ дециметрового диапазона волн²². В каждом каскаде используются три связанных попарно активных резонатора. Каскады соединены с внешними цепями и между собой с помощью малогабаритного ферритового циркулятора, работающего при температуре жидкого гелия. Параметры усилителя приведены в табл. II (см. с. 299).

В диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн основным типом КУ, получившим практическое применение в действующих радио приемных системах, является КУБВ. В этих усилителях бегущая волна сигнала усиливается, распространяясь в волноводе специального типа — замедляющей системе (ЗС), — заполненной активным парамагнитным кристаллом. Применение волноводных ЗС, в которых групповая скорость v_g волн во много раз меньше скорости распространения волн в свободном

пространстве c , дает возможность сократить длину кристалла, необходимую для получения большого коэффициента усиления КУБВ, до приемлемой величины.

Важной особенностью КУБВ является то, что благодаря поглощению волны обратного направления специальными невзаимными ферритовыми поглотителями, помещаемыми внутри ЗС (внутренняя развязка), регенеративные эффекты в таких усилителях практически полностью подавлены, что делает усилитель нечувствительным к рассогласованию импедансов на входе и выходе. Ввиду нерегенеративного характера усиления стабильность усиления и полоса пропускания КУБВ при большом усилении оказываются значительно большими, чем в резонаторном КУ. Кроме того, в КУБВ можно осуществить быструю электронную перестройку частоты путем одновременного изменения напряженности постоянного магнитного поля и частоты накачки.

Коэффициент усиления КУБВ G , выраженный в децибелах ($G_{(dB)}$), определяется следующим соотношением³⁻⁶:

$$G_{(dB)} = G_{\pi, (dB)} - L_{(dB)} = 27,3 \frac{c}{v_{\text{гр}}} \frac{l}{\lambda} d_m - L_{(dB)}; \quad (3.4)$$

здесь $G_{\pi, (dB)}$ — усиление (в дБ) без учета потерь в ЗС, $L_{(dB)}$ — потери в ЗС (в дБ), l — длина кристалла и ЗС, λ — длина волны в свободном пространстве, d_m — магнитный декремент активного кристалла.

При типичных значениях d_m порядка 10^{-2} и величине l/λ в пределах от ~ 1 до ~ 5 (в зависимости от диапазона волн) для получения требуемого коэффициента усиления КУБВ $G_{(dB)} = 25-30 \text{ дБ}$ необходимо обеспечить коэффициент замедления волны $c/v_{\text{гр}}$ от 50 до 200.

Полоса пропускания КУБВ (на уровне 3 дБ) определяется формулой

$$\Delta f = \Delta v \cdot \sqrt{\frac{3}{G_{\pi, (dB)} - 3}}. \quad (3.5)$$

Для КУБВ типичным является значение $\Delta f = 20-30 \text{ МГц}$, что значительно больше, чем в резонаторных КУ. Еще большее расширение полосы Δf в КУБВ можно получить, используя магнитное поле, напряженность которого меняется от точки к точке вдоль расположенного в ЗС кристалла, вызывая соответствующие изменения частоты ЭПР^{4, 6, 24}. Таким способом в КУБВ реализована величина $\Delta f = 150 \text{ МГц}$.

Замедление электромагнитной волны по групповой скорости можно получить увеличением диэлектрической проницаемости среды внутри волновода либо путем применения систем с частотной дисперсией, причем в последних удается получить большее замедление. Различные типы ЗС детально исследовались как теоретически, так и экспериментально⁶. На основе этих исследований были разработаны высокоеффективные гребенчатые ЗС для КУБВ сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

На рис. 3 представлено устройство высокочастотного узла КУБВ диапазона волн 0,8 см^{6, 25}. В этом усилителе применена гребенчатая замедляющая система, размещенная в волноводе накачки. По одну сторону от штырей находится парамагнитный кристалл — тонкий рубиновый стержень (поперечный размер $\sim 0,75 \text{ мм}$, длина $\sim 40 \text{ мм}$), а по другую — тонкая поликоровая *) пластинка, размеры сечения которой подбираются для получения нужной дисперсионной характеристики, обеспечивающей требуемую величину замедления групповой скорости (в описываемом

*) Поликор представляет собой керамику, приготавляемую на основе поликристаллического корундового порошка.

КУБВ — около 50). Рядом с этой пластинкой, вдоль всей замедляющей системы размещается на диэлектрической подложке ферритовый вентиль в виде длинного стержня из поликристаллического иттриевого ферро-граната. Феррит находится в области ЗС, где с. в. ч. — магнитное поле — имеет почти круговую поляризацию; это дает возможность получить хорошие характеристики вентиля (затухание обратной волны не менее 75 дБ при потерях в прямом направлении около 2,5 дБ).

Параметры КУБВ восьмимиллиметрового диапазона волн приведены в табл. II.

Температура шума является наиболее важным параметром входного радиоприемника устройства диапазона микроволн.

В ряде работ ^{4, 20, 27} проанализирован вопрос о предельной чувствительности приемников электромагнитного излучения. В частности, исходя

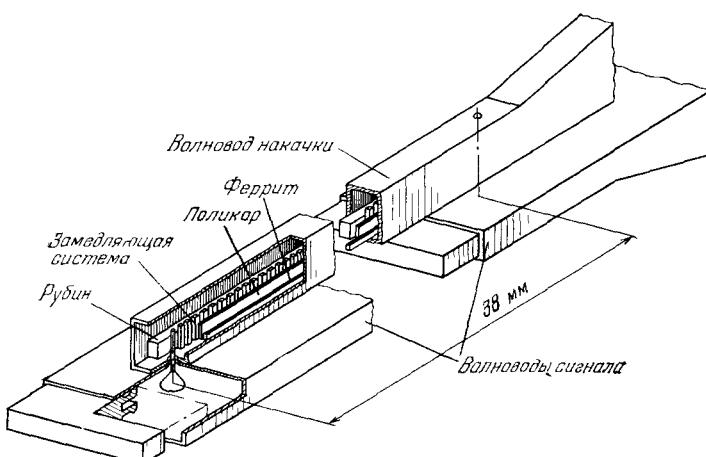


Рис. 3. Принцип устройства высокочастотной части квантового усилителя бегущей волны в диапазоне волн 0,8 см.

из принципа неопределенности Гейзенберга, показано ²⁶, что для линейного когерентного усилителя, т. е. усилителя, в котором с точностью до аддитивной постоянной сохраняется фаза усиливаемого колебания, предельная минимальная температура T_{\min} шума определяется формулой

$$T_{\min} = \frac{1}{\ln 2} \frac{hf}{k} \quad (3.6)$$

(обозначения пояснены ранее).

Такой усилитель называют идеальным.

В радиодиапазоне величина T_{\min} чрезвычайно мала: так, например, в трехсантиметровом диапазоне волн $T_{\min} \approx 0,7$ °К.

Температура шума квантового усилителя приблизительно равна предельной величине T_{\min} в случае, если населенность нижнего энергетического уровня квантового перехода на частоте сигнала много меньше, чем верхнего. В действительности же в КУ радиодиапазона населенности энергетических уровней различаются между собой незначительно и температура шума оказывается отличной от T_{\min} .

Для КУБВ радиодиапазона температура шума непосредственно на входе замедляющей системы (T_{3c}) определяется приближенной формулой ⁴⁻⁶:

$$T_{3c} \approx \frac{T}{J} \frac{G_{(\theta\theta)} + L_{(\theta\theta)}}{G_{(\theta\theta)}} + T \frac{L_{(\theta\theta)}}{G_{(\theta\theta)}} ; \quad (3.7)$$

здесь T — температура парамагнитного кристалла, J — коэффициент инверсии (остальные обозначения см. выше).

Первое слагаемое в (3.7) обусловлено спонтанным излучением, второе — джоулевыми потерями в ЗС. При типичных параметрах КУБВ температура шума T_3 с составляет около 3°K , т. е. мало отличается от предельной величины T_{\min} .

Вследствие неизбежных потерь во входном волноводе, соединяющем вход КУ с ЗС, температура шума всего КУ $T_{\text{ш}, \text{ку}}$ обычно в несколько раз больше, чем T_3 с.

Для сантиметрового диапазона волн $T_{\text{ш}, \text{ку}}$ составляет $5-10^{\circ}\text{K}$ а в миллиметровом диапазоне — около 20°K .

Одной из характеристик КУ является величина максимальной мощности выходного сигнала, при которой еще сохраняется линейность его амплитудной характеристики (мощность насыщения P_n). Для КУБВ типичной величиной является $P_n \approx 10^{-6} \text{ вт}$ при усилении непрерывных сигналов (при усилении импульсных сигналов она оказывается соответственно больше).

Теория нелинейных эффектов, возникающих при воздействии на КУ сильных сигналов, показывает, а эксперименты подтверждают, что, в отличие от малошумящих усилителей других типов, в которых насыщение неизбежно связано с ограничением и с нелинейными искажениями спектра сигналов, в КУ даже значительное насыщение не приводит к заметным искажениям такого рода⁴⁻⁶.

В ряде практических применений КУ чрезвычайно важна высокая стабильность амплитудных и фазовых характеристик усилителей. Анализ показал⁵, что стабильность этих характеристик прежде всего определяется стабильностью необходимого для работы КУ постоянного магнитного поля.

В целях обеспечения высокой стабильности магнитного поля в СССР специально для КУ были разработаны электромагниты и соленоиды со сверхпроводящими обмотками (это был один из первых примеров практического применения вне стен физических лабораторий эффекта сверхпроводимости), что позволило существенно повысить стабильность квантовых усилителей и уменьшить их габариты. После включения усилителя и получения поля требуемой величины источник питания магнита отключается и магнитное поле «замораживается».

В современных КУБВ нестабильность коэффициента усиления составляет $1-2\%$, а нестабильность фазы — около одного градуса^{6, 25}. С помощью специальных мер (увеличение внутренней развязки, предотвращение попадания жидкого гелия в ЗС, стабилизация мощности и частоты накачки и т. п.^{6, 28}) оказалось возможным уменьшить нестабильность фазы до десятых и даже сотых долей градуса.

Для охлаждения высокочастотного узла КУ со сверхпроводящим магнитом до гелиевой температуры применяют два метода. В первом из них охлаждаемый узел помещают в металлический сосуд Дьюара — криостат, в который периодически заливают (или подливают) жидкий гелий. Испаряющийся гелий, как правило, собирают и вновь сжижают в отдельной холодильной установке. Во втором методе используют специальные холодильные машины, непосредственно связанные с квантовым усилителем и являющиеся его составной частью («холодильные машины замкнутого цикла»)⁶. Оба указанных метода охлаждения имеют свои достоинства и недостатки, и выбор оптимальной системы зависит от конкретных условий эксплуатации.

В табл. II приведены параметры квантовых усилителей, используемых в системах дальней космической связи и в радиоастрономии. В таб-

Таблица II

Параметры некоторых квантовых усилителей, используемых в системах ДКС и в радиоастрономии

Диапазон волн, см	Коэффициент усиления, дБ	Полоса пропускания, Гц	Полоса перестройки, Гц	Температура шума, °К	Парамагнитный кристалл	Страна	Примечание
30	23	15		6	Рубин	СССР	2 каскада по 3 связанных резонатора
30	30	3,5	70	6	Рутил (Cr^{3+})	Швеция	Температура кристалла 2 °К
17	32	4,5	200	6	Рутил (Fe^{3+})	»	
12	27—45	10	180	6	Рубин	США	
5	30	30	250	10	»	СССР	
5	24	20	850	10	Рутил (Fe^{3+})	Швеция	
3,5	45	17—20	100	10	Рубин	США	
3,5	25	20	700		Рутил (Fe^{3+})	Швеция	Температура кристалла 1,7 °К
2	30—45	17	2000	13	Рубин	США	
1,3	30—40	30	2000	20	»	СССР	
0,8	25—30	25	2000	20	»	»	

лице перечислены лишь основные типы усилителей из числа находящихся в эксплуатации в настоящее время.

Все указанные в таблице усилители, за исключением первого, построенного по описанной выше многорезонаторной схеме (см. рис. 2), являются усилителями бегущей волны. В дециметровом диапазоне волн, в тех случаях, когда не требуется перестройка частоты усилителя в широком частотном диапазоне, усилитель, построенный по многорезонаторной схеме (первая строка табл. II) обеспечивает большую полосу пропускания, чем КУБВ того же диапазона (вторая строка табл. II).

Несмотря на вытекающую из теоретических оценок большую по сравнению с рубином эффективность рутила в диапазоне 1—7 ГГц³⁰, практически квантовые усилители на рутиле в этом диапазоне в большинстве случаев все же уступают по основным параметрам усилителям на рубине (см. табл. II).

Аналогичные оценки, говорящие о преимуществе рутила, делались и применительно к восьмимиллиметровому диапазону, представляющему значительный интерес для радиоастрономии. Однако попытки разработать КУБВ этого диапазона на рутиле, предпринятые в США³¹ и Франции³², пока что не привели к созданию устройств, пригодных для практических применений³³. В этих КУБВ замедление волны осуществлялось благодаря высокой диэлектрической проницаемости рутила, заполняющего волновод. Вследствие недостаточной величины получаемого таким способом замедления эти усилители не обеспечивали требуемого усиления при 4,2 °К (температура жидкого гелия при нормальном атмосферном давлении) и приходилось понижать температуру до 1,7 °К. Такое понижение температуры достигается уменьшением давления в криостате путем непрерывной откачки паров гелия вакуумным насосом, а это заметно осложняет эксплуатацию усилителей.

В разработанном в СССР КУБВ того же диапазона²⁵ применена высокоэффективная гребенчатая замедляющая система (см. рис. 3), а в ка-

честве активного вещества использован рубин. Требуемые параметры были обеспечены при температуре 4,2 °К. Эти КУБВ, являющиеся самыми высокочастотными квантовыми усилителями из находящихся в эксплуатации³⁰, применяются на отечественных радиотелескопах, начиная с 1968 г. (подробнее см. гл. 4). !

4. ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Растущие требования к информативности и дальности действия линий космической связи с космическими станциями, направляемыми в дальний космос, а также ограниченность энергетических ресурсов таких станций, привели к необходимости обеспечить предельно высокую (при современном уровне науки и техники) эффективность наземных радиоприемных систем.

По этой причине в наземных системах ДКС широко применяются квантовые усилители в совокупности с большими антеннами, специально приспособленными для работы совместно с квантовыми усилителями.

Температура шума T_c всей радиоприемной системы (т. е. совокупности антennы и радиоприемного устройства) определяется соотношением

$$T_c = T_A + T_0 \frac{1 - \eta}{\eta} + \frac{T_{ш, ку}}{\eta}; \quad (4.1)$$

здесь T_A — шумовая температура собственно антенны, являющаяся мерой шумов, принимаемых антенной из окружающего пространства, η — к. п. д.

фидерного тракта, соединяющего первичный облучатель антенны с квантовым усилителем; $T_0 \approx 300$ °К — температура фидерного тракта; $T_{ш, ку}$ — шумовая температура квантового усилителя.

Для того чтобы можно было реализовать потенциальные возможности КУ в снижении температуры шума системы, первые два компонента в (4.1) должны быть малы. Это предъявляет определенные требования к устройству антенны.

В частности, поскольку антенный фидерный тракт вносит заметный вклад в шумовую температуру (например, в трехсанитметровом диапазоне волновод длиной 1 м дает вклад около 10 °К), необходимо до минимума сократить длину тракта между КУ и облучателем антенны.

Это потребовало разработки специальных малошумящих антенн.

В настоящее время наиболее распространенным типом малошумящей антенны является двухзеркальная антenna, которую по аналогии с известной оптической системой называют кассегреновской.

На рис. 4 дана схема сопряжения квантового усилителя с такой антенной. Благодаря двухзеркальному принципу построения антенны квантовый усилитель может быть установлен вблизи вершины большого зеркала у первичного облучателя, что позволяет свести до минимума длину волноводного тракта и вместе с тем обеспечивает легкий доступ к квантовому усилителю и другой приемной аппаратуре (при использовании обычной однозеркальной параболической антенны выполнить оба эти требования одновременно не удается).

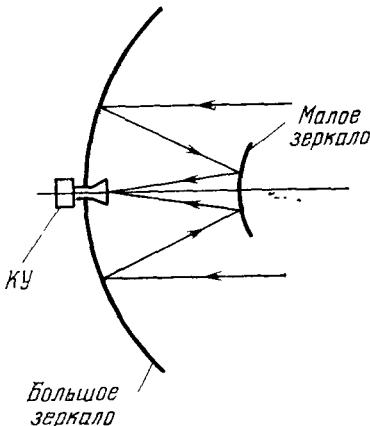


Рис. 4. Сопряжение КУ с антенной типа Кассегрена.

В описанных системах с квантовыми усилителями удается реализовать шумовую температуру T_c всей радиоприемной системы около нескольких десятков градусов по Кельвину (рекордные значения для систем с большими антеннами достигают ~ 20 °К в сантиметровом диапазоне при антенне, направленной в зенит).

На рис. 5 представлена одна из малошумящих антенн системы ДКС, оснащенных квантовыми усилителями. Квантовые усилители обеспечили

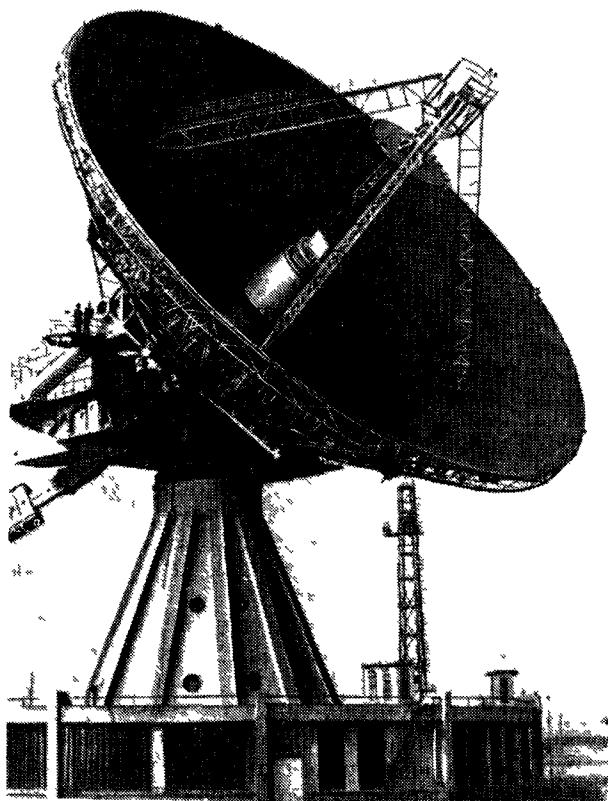


Рис. 5. Антenna системы дальней космической связи, оснащенная квантовыми усилителями.

надежную связь с автоматическими межпланетными станциями (АМС) серий «Зонд», «Луна», «Марс», «Венера» в ходе важнейших космических экспериментов, в том числе при фотографировании обратной стороны Луны и при получении уникальных фотографий поверхности Венеры при полетах АМС «Венера-9» и «Венера-10».

В американских наземных системах ДКС (в американской терминологии — deep space networks), установленных в ряде пунктов земного шара, также в качестве малошумящих входных приемных устройств применяются квантовые усилители. Так, в наиболее известном Годстоунском комплексе НАСА, в состав которого входят три антенны диаметром 26 м и одна — диаметром 64 м, на всех антенных установлена по 1—2 квантовых усилителя двенадцатисантиметрового диапазона волн, а на антенне диаметром 64 м дополнительно еще несколько усилителей других диапа-

зонов³⁵. Указанные усилители регулярно применяются при приеме информации от межпланетных станций (в том числе от АМС серий «Пионер», «Маринер», «Викинг» и др.), для радиолокации планет, при различных радиоастрономических исследованиях, в том числе при советско-американских экспериментах по радиоинтерферометрии (подробнее см. ниже).

При полетах АМС к далеким планетам Солнечной системы обеспечить необходимую информативность линий ДКС значительно сложнее (рис. 6). В этих условиях значение квантовых усилителей еще более возрастает.

Применение квантовых усилителей в радиоастрономии, более чем на порядок повысившее чувствительность радиотелескопов, открыло новые возможности для радиоастрономических исследований и расширило наши знания о Вселенной.

Так, фундаментальное открытие современной астрофизики — обнаружение реликтового фонового космического излучения, имеющего температуру около 3 °К, — было сделано в 1965 г. при помощи радиоприемной установки с квантовым усилителем³⁶. Установка, предназначавшаяся для приема слабых сигналов, отраженных от пассивного спутника Земли в семисантиметровом диапазоне волн, благодаря ее исключительно малой шумовой температуре и точной калибровке смогла четко зарегистрировать указанный «аномальный» избыток шумовой температуры над шумовой температурой атмосферы.

Рис. 6. Информативность линии связи Космос — Земля³⁴.

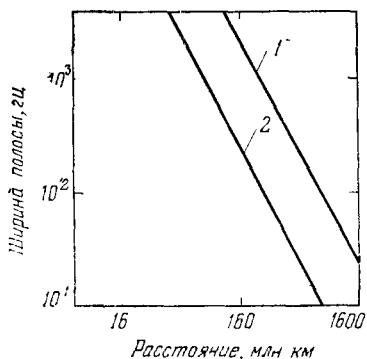
Температура шума наземной системы $T_c = 50^\circ \text{ К}$; длина волны 13 см; диаметр зеркала бортовой антенны 1,2 м; диаметр зеркала наземной антенны 64 м. Мощность бортового передатчика 10 вт (1) и 1 вт (2).

«Нормальный» избыток шумовой температуры, обусловленной тепловой, в значительной мере также связаны с появлением квантовых усилителей.

В настоящее время в планетных радиолокаторах в СССР и США в качестве входного малошумящего усилителя, как правило, применяются квантовые усилители.

С использованием квантового усилителя, специально разработанного для этой цели³⁷ и заменившего ранее применявшийся параметрический усилитель, в СССР была впервые осуществлена радиолокация планет Меркурий, Марс, Юпитер³⁸ и проведены новые, более информативные радиолокационные исследования планеты Венера. Роль квантовых усилителей при этих исследованиях можно проиллюстрировать следующими примерами. При радиолокации планеты Меркурий во время наибольшего приближения этой планеты к Земле даже с использованием квантового усилителя требуется накапливать сигнал в течение 10—15 дней, чтобы выделить сигнал из шумов. Без применения КУ сигнал пришлось бы накапливать в течение многих циклов приближения планеты, повторяющихся каждые три месяца. Это растянуло бы наблюдения на несколько лет. Применение КУ сделало возможным проведение надежных радиолокационных наблюдений Венеры и Марса на больших участках их траекторий, что существенно при коррекции полета межпланетных станций.

Одной из важнейших областей радиоастрономии являются исследования спектральных линий космического радиоизлучения. Начало этим исследованиям было положено около 25 лет назад, когда на волне 21 см была обнаружена первая в радиодиапазоне спектральная линия космического излучения, обусловленная квантовыми переходами в сверхтонкой



структуре спектра нейтрального водорода. Наблюдения линии на волне 21 см нашли широкое применение при изучении межзвездной среды и дали астрономии фундаментальные сведения о структуре и динамике Галактики. Применение квантовых усилителей³⁹⁻⁴¹ на несколько порядков увеличило объем участка Вселенной, доступного исследованию таким способом.

Большой интерес имеет изучение областей возбужденного и ионизированного водорода (так называемые области НП), тесно связанных со звездами и представляющих важную составную часть Галактики. Спектральные линии радиоизлучения возбужденного водорода (линии рекомбинационного спектра) имеют примерно на два порядка меньшую интенсивность, чем линия нейтрального водорода на волне 21 см. Поэтому прежние попытки радиоастрономов ряда стран обнаружить эти линии были безуспешными.

Здесь необходимо сделать некоторые пояснения. Чувствительность радиотелескопа (пороговый сигнал, выраженный в градусах антенной температуры) определяется формулой⁴²

$$\Delta T = \alpha \frac{T_c}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}} ; \quad (4.2)$$

здесь T_c — температура шума всей радиоприемной системы (см. (4.1)); Δf — полоса пропускания радиоаметра до детектора; τ — постоянная времени последетекторного интегратора; α — коэффициент (порядка единицы), зависящий от типа радиометра и интегратора.

При проведении радиоастрономических наблюдений в непрерывном спектре чувствительность радиотелескопа (при данном времени интегрирования τ , обычно ограниченном допустимым временем наблюдения), может быть повышена не только путем уменьшения температуры шума T_c , но и расширением полосы пропускания Δf радиометра. Этот способ широко применяется при радиоастрономических наблюдениях в непрерывном спектре. Однако при исследованиях спектральных линий космического радиоизлучения полоса пропускания должна быть значительно меньше ширины спектральной линии, которая даже в миллиметровом диапазоне волн не превышает нескольких Мгц, а в отдельных случаях имеет порядок кГц. Поэтому при такого рода радиоастрономических исследованиях единственным методом повышения чувствительности является понижение температуры шума системы T_c . В связи с этим малошумящие усилители других типов (электронные лампы бегущей волны, параметрические усилители, туннельные усилители и т. п.), широко применяемые в радиометрах непрерывного спектра, где они благодаря широкой полосе пропускания обеспечивают высокую радиометрическую чувствительность, заметно уступают квантовым усилителям при наблюдениях спектральных линий.

Обнаружение советскими радиоастрономами спектральных линий радиоизлучения возбужденного водорода стало возможным после резкого (приблизительно в 20 раз) повышения чувствительности спектральных радиометров, достигнутого благодаря применению квантовых усилителей). С использованием КУБВ пятисантиметрового диапазона волн впервые наблюдался профиль спектральной линии возбужденного галактического водорода (рис. 7) и были проведены систематические исследования этой линии в ряде туманностей^{43, 44}, в том числе от весьма слабых источников — вплоть до интенсивности 0,06 °К *).

*) На той же аппаратуре в пятисантиметровом диапазоне волн была обнаружена спектральная линия радиоизлучения возбужденного гелия⁴⁵.

Оснащение радиотелескопов РТ22 Физического института АН СССР (ФИАН) и РТ22 Крымской Астрофизической обсерватории (КАО) квантовыми усилителями бегущей волны восьмимиллиметрового диапазона волн позволило снизить общую шумовую температуру приблизительно в 25 раз⁴⁶. Была получена чувствительность $\Delta T = 0,05 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ($\Delta f = 1 \text{ МГц}$, $\tau = 50 \text{ сек}$) при спектральных наблюдениях и $\Delta T = 0,08 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ($\Delta f = 20 \text{ МГц}$, $\tau = 1 \text{ сек}$) при наблюдениях в непрерывном спектре. Следует отметить, что основной вклад в шумовую температуру вносили входные волноводные узлы радиометра⁴⁶, так что указанные значения могут быть улучшены (например, путем охлаждения входного ферритового модулятора и т. п.),

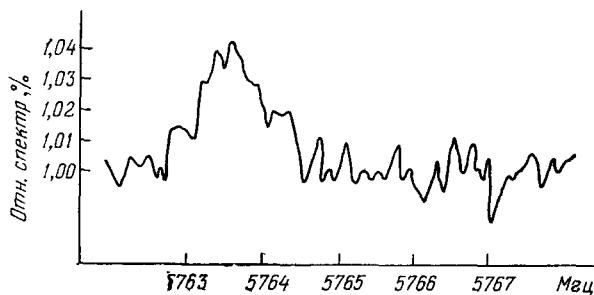


Рис. 7. Спектрограмма линии радиоизлучения возбужденного водорода в туманности Омега в 5-см диапазоне.

Осьдано четыре спектрограммы; за единицу принята средняя интенсивность вне линии.

особенно при использовании усилителя в радиоинтерферометре (см. далее), поскольку при этом сокращается количество волноводных узлов на входе.

Достигнутая высокая чувствительность позволила обнаружить первую спектральную линию в миллиметровом диапазоне волн — линию радиоизлучения возбужденного водорода Н56 α на волне 0,8 см⁴⁷. Исследования этой линии дали возможность благодаря высокому угловому разрешению радиотелескопа РТ22 на волне 0,8 см перейти от получения интегральных характеристик к изучению распределения физических условий по всему объему источника.

Открытие и широкое исследование спектральных линий радиоизлучения галактического водорода позволило получить ряд важных научных результатов. Так, было доказано существование дискретного спектра возбужденного водорода в радиодиапазоне, установлено отсутствие штарковского уширения спектральных линий (последнее заставило пересмотреть существующую теорию), определена электронная температура и распределение электронной материи в различных областях Галактики, изучена динамика ее движения⁴⁸.

В 1973—1974 гг. радиотелескопы РТ-22 были оснащены КУБЕ диапазона 1,25—1,35 см. Этот диапазон представляет для радиоастрономии особый интерес, так как именно в нем в конце 60-х годов в ряде областей Галактики были зарегистрированы спектральные линии радиоизлучения молекул водяного пара и аммиака. При этом линия паров воды, как правило, была необычайно узкой (порядка десятков кГц), что объясняется эффектом вынужденного излучения в космических неравновесных системах («космический мазер»). Дальнейшие исследования этой линии могут пролить свет на процесс образования звезд.

Применение квантовых усилителей значительно увеличило количество слабо излучающих областей, в которых могут исследоваться подобные явления.

В диапазоне 1,35 см на радиотелескопе РТ22 КАО была получена общая шумовая температура системы T_c в пределах от 80 до 120 °К (в зависимости от сложности входного волноводного тракта радиометра и от состояния атмосферы). Это соответствует приблизительно двадцати атмому выигрышу в чувствительности.

На рис. 8 даны примеры записей⁴⁹, полученных с применением усилителей в диапазоне 1,35 см на радиотелескопах РТ22 ФИАН (рис. 8, а) и РТ22 КАО (рис. 8, б).

За рубежом до последнего времени не создано радиометрической аппаратуры, обладающей в диапазоне 0,8—1,3 см чувствительностью, которая достигнута на радиотелескопах РТ22, оборудованных квантовыми усилителями^{30, 35, 65}. Это относится не только к спектральным радиометрам, но и к эксплуатируемым на радиотелескопах радиометрам непрерывного спектра⁵⁰. Высокая чувствительность аппаратуры в этих диапазонах волн позволила провести на радиотелескопах РТ22 ряд актуальных радиоастрономических исследований также и в непрерывном спектре: измерить

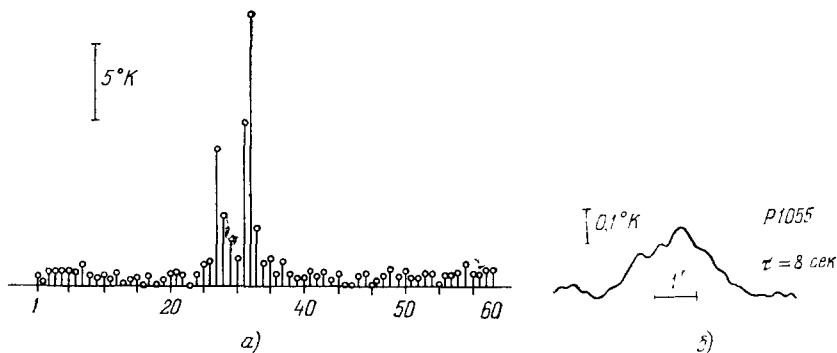


Рис. 8. Примеры записей, полученных с применением КУБВ на волне 1,35 см.
а) Спектрограмма линии излучения паров воды в источнике W3 (отсчеты через 115 кгц); б) запись радиоизлучения источника Р 1055 в сплошном спектре.

на волнах 0,8 и 1,35 см интенсивности излучения от многих космических источников (квазаров, галактик, остатков сверхновых и т. п.) и проследить изменения потока в течение нескольких лет^{51—53}; измерить и привязать друг к другу на указанных волнах с высокой точностью яркостные температуры почти всех планет Солнечной системы^{54, 55} и т. д.

В последнее время повысился интерес к радиоастрономическим наблюдениям на более коротких миллиметровых волнах, особенно в связи с обнаружением в этом диапазоне линий космического излучения, соответствующих вращательным спектрам ряда молекул. Чувствительность радиометров на этих волнах весьма низка, поэтому задача создания эффективных малошумящих входных устройств на волнах короче 0,8 см является весьма актуальной.

Эффективность параметрических усилителей в этих диапазонах мала, а создание работоспособных КУ, особенно КУБВ, для радиотелескопов на коротких миллиметровых волнах связано с большими трудностями.

Учитывая эти обстоятельства, представляется весьма перспективным для применения на коротких миллиметровых волнах малошумящее устройство в виде комбинации описанного КУБВ диапазона 1,35 см (или 0,8 см), используемого в качестве малошумящего усилителя промежуточной частоты, и перестраиваемого малошумящего преобразователя частоты (джозефсоновского⁵⁶, варакторного и т. п.), включенного на входе замед-

ляющей системы КУБВ и охлаждаемого вместе с ней до температуры жидкого гелия. Можно надеяться, что общая шумовая температура такого устройства в целом не превысит 100 °К почти во всем миллиметровом диапазоне волн.

Весьма эффективным оказалось применение квантовых усилителей в радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой, которые в последнее время стали мощным средством изучения квазаров и ядер галактик — исключительно интересных космических объектов, исследование природы которых является одной из фундаментальных проблем современной астрофизики. В середине 60-х годов появились косвенные данные о том, что большинство этих объектов имеет крайне малые угловые размеры — менее тысячной доли угловой секунды. Стало ясно, что для их исследования необходимо создание радиоастрономических инструментов, обладающих угловым разрешением указанного порядка. Это послужило стимулом для создания радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ), позволяющих получить требуемое высокое разрешение при разнесении конечных пунктов радиоинтерферометра на максимально возможное в пределах земного шара расстояние (8—10 тыс. км) и при использовании коротковолновой части сантиметрового диапазона волн *).

Метод РСДБ заключается в независимой синхронной регистрации сигналов от исследуемого радиоисточника на концах базы и последующей совместной корреляционной обработке этих сигналов на ЭВМ. Когерентное преобразование принимаемых высокочастотных сигналов в сигналы видеочастоты, записываемые на магнитную ленту, а также синхронизация записей на разных пунктах осуществляется с помощью высокостабильных квантовых (атомных) стандартов частоты^{42, 57–60}.

Первые эксперименты на межконтинентальных базах, выполненные на волнах 18 и 6 см, показали, что для эффективной работы РСДБ необходимо применять более короткие сантиметровые волны и приемную аппаратуру с максимально возможной чувствительностью^{58, 60}.

Как и при исследованиях спектральных линий, возможности повышения чувствительности приемной аппаратуры путем увеличения ширины полосы принимаемых сигналов здесь ограничены. В данном случае ограничения обусловлены средствами регистрации сигналов: максимальная частота записываемых сигналов не превышает в современных устройствах нескольких $M\text{гц}$ ⁶¹. Поэтому единственным путем повышения чувствительности РСДБ является использование приемных устройств с минимально возможной температурой шума. В связи с этим был сделан вывод, что для РСДБ наиболее подходящим приемным устройством, особенно на коротких сантиметровых волнах, является квантовый усилитель бегущей волны^{30, 60}.

Оба указанных условия — использование коротких сантиметровых волн и высокочувствительных приемных устройств — были выполнены при совместных советско-американских наблюдениях компактных источников космического радиоизлучения, проведенных на волне 3,5 см в 1971 г. на межконтинентальном радиоинтерферометре с базой СССР — США длиной около 10 тыс. км^{62–64}.

Реализованные в этом радиоинтерферометре угловое разрешение и высокая чувствительность (при десятикратном превышении над флуктуационной чувствительностью регистрировался поток менее одной единицы потока — $10^{-26} \text{ ет}/\text{м}^2\text{гц}$), обеспеченная благодаря применению квантовых усилителей⁶³, позволили выявить сложную структуру ряда ком-

*.) Угловое разрешение радиоинтерферометра (в радианах) приблизительно равно отношению длины волны к длине базы.

пактных источников (квазаров, галактик и т. п.) и установить наличие в них компактных компонент, угловые размеры которых меньше $3 \cdot 10^{-4}$ угл. сек⁶⁴. Исследование таких компонент требует перехода на еще более короткую длину волн. В 1976 г. были проведены эксперименты с РСДБ на волне 1,35 см при расположении телескопов на трех континентах: в СССР (Крым, радиотелескоп РТ22 КАО), в США и в Австралии. Наименьшей температурой шума обладал радиотелескоп РТ22 КАО, где использовался квантовый усилитель²⁹, ⁶⁵. В этих экспериментах было достигнуто угловое разрешение около 10^{-4} угл. сек⁶⁵.

Превращение РСДБ в инструмент для систематических радиоастрономических наблюдений позволяет значительно расширить наши знания о Вселенной. Метод РСДБ может найти также ряд весьма важных применений в геофизике и навигации. При этом, как правило, требуется максимально возможная чувствительность, обеспечиваемая квантовыми усилителями⁶⁶, ⁶⁷.

Таким образом, за период, прошедший со времени открытия принципа квантового усиления, квантовые усилители радиоволн превратились из лабораторных исследовательских установок в технически совершенные устройства, применение которых в ДКС и радиоастрономии дало возможность получить ряд важных результатов в исследовании космического пространства.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Б а с о в Н. Г., П р о х о р о в А. М.— ЖЭТФ, 1955, т. 28, с. 249.
2. В л о е м б е р г е н N.— Phys. Rev., 1956, v. 104, p. 324.
3. З в е р е в Г. М., К а р л о в Н. В., К о р н и е н к о Л. С., М а н е н к о в А. А., П р о х о р о в А. М.— УФН, 1962, т. 77, с. 61.
4. С и г м е н А., М а з е р ы.— М., Мир, 1966.
5. К а р л о в Н. В., М а н е н к о в А. А. Квантовые усилители.— М., ВИНИТИ, 1966.— (Итоги науки).
6. Ш т е й н ш л е й г е р В. Б., М и с е ж и н к о в Г. С., Л и ф а н о в П. С. Квантовые усилители СВЧ.— М.: Сов. Радио, 1971.
7. А л ь т ш у л е р С. А., К о зы р е в Б. М. Электронный парамагнитный резонанс.— М.: Наука, 1972.
8. А б р а г а м А., Б л и н и Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов.— М.: Мир, 1972.
9. К о р н и е н к о Л. С.— В кн. Парамагнитный резонанс.— М.: Наука, 1971.— с. 108.
10. З а в о й с к и й Е. К. Докторская диссертация.— М.: ФИАН СССР, 1944; J. Phys. USSR, 1945, v. 9, p. 245.
11. В л о е м б е р г е н N., S h a r i g o S., P e r s h a n P., A g t m a n J.— Phys. Rev., 1959, v. 114, p. 445.
12. М а н е н к о в А. А., П р о х о р о в А. М.— ЖЭТФ, 1955, т. 29, с. 762.
13. Е р у И. И., П е ск о в а ц и й С. А., Ч е р н е ц А. Н.— ФТТ, 1967, т. 9, с. 1329.
14. Е р у И. И., П е ск о в а ц и й С. А., Ч е р н е ц А. Н.— Радиотехн. и электрон., 1968, т. 13, с. 1045.
15. А х у м я н А. А., М а р т и р о с я н Р. М., Ш а х п а р я н В. П.— В кн. Тезисы докладов II Всесоюзной школы-семинара по радиоприемным устройствам СВЧ.— Ереван: АН Арм. ССР, 1974.— С. 33.
16. Ш т е й н ш л е й г е р В. Б.— Радиотехн. и электрон., 1959, т. 4, с. 1947; 1962, т. 7, с. 1253.
17. К а р л о в Н. В., П р о х о р о в А. М.— Ibid., 1963, т. 8, с. 453.
18. Ж а б о т и н с к и й М. Е., Ф р а н ц е с с о н А. В.— Ibid., 1967, т. 12, с. 56.
19. М а р т и р о с я н Р. М., П р о х о р о в А. М.— ПТЭ, 1964, № 1, с. 106.
20. Л и ф а н о в П. С., Н е в о с т р у е в а Л. И., С т о л п я н с к и й М. П., Ф и л а т о в К. В., Ш т е й н ш л е й г е р В. Б.— Радиотехн. и электрон., 1966, т. 11, с. 1586.
21. Ж а б о т и н с к и й М. Е., Ф р а н ц е с с о н А. В.— Ibid., 1967, т. 12, с. 63.
22. Т у р е в с к и й В. М., Ш у м я ц к и й П. С.— ПТЭ, 1971, № 4, с. 444.

23. Cook J. J., Cross L. G., Baird M. E., Terhune R. W.—PIRE, 1961, v. 49, p. 768.
24. Мисежников Г. С., Мухина М. М., Штейншлейгер В. Б.—ПТЭ, 1971, № 3, с. 138.
25. Загатин В. И., Мисежников Г. С., Штейншлейгер В. Б.—Радиотехн. и электрон., 1967, т. 12, с. 539.
26. Непег Н.—PIRE, 1962, v. 50, p. 1601.
27. Карлов Н. В., Прохоров А. М.—Радиотехн. и электрон., 1962, т. 7, с. 328.
28. Шамфаров Я. Л., Черпак Н. Т., Тридуб А. В.—Ibid., 1975, т. 20, с. 1673.
29. Загатин В. И., Мисежников Г. С., Штейншлейгер В. Б.—Изв. вузов. Сер. «Радиофизика», 1973, т. 16, с. 685.
30. Kollberg E. L.—PIEEE, 1973, v. 61, p. 1323.
31. Adams F. R., Peyton B. J.—PIEEE, 1965, v. 53, p. 12.
32. De Coaptont Y., Robert A.—L'Onde Electr., 1967, t. 47, p. 165.
33. Yngvesson S.—IEEE Intern. Conv. Digest., 1971, p. 161.
34. Экспресс-информация. Сер. «Радиотехника сверхвысоких частот».—М.: ВИНИТИ, 1967.—№ 33.
35. Reid M. S., Clauss R. C., Bathker D. A., Stelzried C. T.—PIEEE, 1973, v. 61, p. 1330.
36. Renzias A. A., Wilson R. W.—Astrophys. J., 1965, v. 142, p. 419.
37. Жаботинский М. Е., Францессон А. В.—Радиотехн. и электрон., т. 9, с. 114.
38. Котельников В. А. и др.—ДАН СССР, 1962, т. 147, с. 1320; 1964, т. 155, с. 1037; 1965, т. 163, с. 50.
39. Lilleuy A. E., Tgeacu E. B.—In: Proc. of the 3rd Intern. Conference on Quantum Electronics.—Paris: 1964.—P. 872.
40. Мартirosyan P. M., Прохоров А. М., Сороченко Р. Л.—ДАН СССР, 1964, т. 156, с. 1326.
41. Быстрова Н. В., Госачинский И. В., Егорова Т. М., Рыжков Н. Ф., Францессон А. В.—Астрон. ж., 1968, т. 45, с. 225.
42. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парицкий Ю. П. Радиотелескопы и радиометры.—М.: Наука, 1973.
43. Дравских А. Ф., Дравских З. Д., Колбасов В. А., Мисежников Г. С., Никулин Д. Е., Штейншлейгер В. Б.—ДАН СССР, 1965, т. 163, с. 332.
44. Гуднов В. М., Сороченко Р. Л.—Астрон. ж., 1967, т. 44, с. 1001.
45. Гуднов В. М., Золотов В. В., Нагорных Л. М., Сороченко Р. Л.—Ibid., 1968, т. 45, с. 942.
46. Загатин В. И., Мисежников Г. С., Пузанов В. А., Salomonovich A. E., Сороченко Р. Л., Штейншлейгер В. Б.—ПТЭ, 1968, № 5, с. 118.
47. Sorochenko R. L., Puzanov V. A., Salomonovich A. E., Shteinshleiger V. B.—Astrophys. Lett., 1969, v. 3, p. 7.
48. Сороченко Р. Л., Берулис И. И.—Астрон. ж., 1970, т. 47, с. 4.
49. Аблазов В. С., Загатин В. И., Кутузов Б. Г., Нагорных Л. М., Сороченко Р. Л., Сосин В. И., Штейншлейгер В. Б.—В кн. II Всесоюзная школа-семинар по радиоприемным устройствам СВЧ: Краткие тезисы докладов.—Ереван: АН СССР, 1974.—С. 135.
50. Кисляков А. Г.—УФН, 1970, т. 101, с. 607.
51. Efano V. A., Moiseyev I. G., Toomasjan H. M., Shteinshleiger V. B., Zagatin V. I.—In: Symposium No. 44. Uppsala, Sweden.—Amsterdam: D. Reidel, 1972.—P. 225.
52. Ефанов В. А., Загатин В. И., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С., Штейншлейгер В. Б.—Астрон. цирк., 1974, № 842.
53. Ефанов В. А., Кисляков А. Г., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С., Чернышев В. И., Штейншлейгер В. Б.—Изв. Крымской астрофиз. обс., 1975, т. 53, с. 196.
54. Кузьмин А. Д., Ветухновский Ю. Н.—Астрон. вестн., 1970, т. 4, с. 8. Лосовский Б. Я., Кузьмин А. Д.—Ibid., 1971, т. 5, с. 78.
55. Ефанов В. А., Загатин В. И., Кисляков А. Г., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С., Штейншлейгер В. Б.—Ibid., 1977, т. 14, с. 25.
56. Taig Y., Classen J., Richards P.—IEEE Trans., 1974, v. MTT-22, p. 1005.
57. Cohen M. H.—PIEEE, 1973, v. 61, p. 1192.

58. Коуин М., Джонси Д., Келлерман К., Кларк Б.— УФН, 1970, т. 100, с. 135.
59. Келлерман К.— УФН, 1973, т. 109, с. 591.
60. Kellerman K. I., Jauncey D. L., Cohen M. H., Shaffer B. B., Clark B. G., Broderick J., Kopnang B., Rudbeck O. E. H., Matveev L., Moiseyev I., Vitkevitch V. V., Cooreg B. F. C., Batchelor R.— Astrophys. J., 1971, v. 169, p. 1.
61. Clark B.— PIEEE, 1973, v. 61, p. 1242.
62. Кларк Б., Бродерик Д. Д., Ефанов В. А., Келлерман К. И., Коуэн М. Х., Коган Л. Р., Костенко В. И., Матвеенко Л. И., Моисеев И. Г., Мухина М. М., Штейншлейгер В. Б., Янси Д. Л.— Астрон. ж., 1972, т. 40, с. 700.
63. Мухина М. М., Мисежников Г. С., Штейншлейгер В. Б.— Радиотехн. и электрон., 1973, т. 18, с. 1746.
64. Матвеенко Л. И., Коган Л. Р., Костенко В. И., Моисеев И. Г., Ефанов В. А., Кларк Б. Г., Келлерман К. И., Гроу Д. Д., Коуэн М. Х., Бродерик Д. Д., Джонси Д. Л.— Астрон. ж., 1973, т. 50, с. 1187.
65. Р. Батчелор и др.— Письма Астрон. ж., 1976, т. 2, с. 467.
66. Shariqo I., Knigh t C.— In: Earthquake Displacement Fields and the Rotation on of the Earth/Ed. L. Mansinha et al.— Amsterdam: D. Reidel, 1970.— P. 284.
67. Counsellman C.— PIEEE, 1973, v. 61, p. 1225.