

УДК 523.98

Разработки приемной аппаратуры, программ и методик для наблюдений на РТ-22 КрАО в диапазоне длин волн 3 мм

И.И. Зинченко¹, В.М. Шульга²

¹ Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород 603950, Россия

² Радиоастрономический институт НАН Украины, ул. Краснойзнаменная, 4, Харьков 61002, Украина

Поступила в редакцию 10 марта 2006 г.

Аннотация. Обзор разработок приемной аппаратуры диапазона длин волн 3 мм для РТ-22 с 70-х годов прошлого века по настоящее время. Кратко описываются охлаждаемые приемники на диодах с барьером Шоттки (ДБШ), мазерный приемник, приемник на переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), а также перспективные разработки матричного приемника. Кроме того, приводятся сведения об использовавшихся спектроанализаторах. Описываются методики и программы наблюдений. Представлены примеры полученных результатов.

DEVELOPMENT OF RECEIVERS, PROGRAMS AND TECHNIQUES FOR OBSERVATIONS WITH RT-22 CrAO IN THE 3 MM WAVELENGTH RANGE, *by Zinchenko I.I., Shulga V.M.* A review of the developments of 3 mm receivers for RT-22 since 1970 until the present time. Cooled Schottky diode receivers, maser receiver, superconductor-insulator-superconductor (SIS) receiver and perspective matrix receiver are briefly described. The used spectrum analyzers are presented. In addition, the information on observing programs and techniques is given. Examples of the obtained results are included.

Ключевые слова: радиоастрономия, радиоастрономические приемники, миллиметровые волны

1 Введение

Активное освоение коротковолновой части миллиметрового диапазона в радиоастрономии началось в конце 60-х, начале 70-х годов. К этому времени были построены крупные антенны, точность поверхности которых позволяла проводить измерения в этом диапазоне, в том числе РТ-22 КрАО. Долгое время после этого, да и сейчас во многих случаях, чувствительность наземных радиотелескопов этого диапазона ограничивалась шумами приемных систем. Хорошо известно, что снижение температуры шума системы в q раз уменьшает время наблюдений, требуемое для получения того же отношения сигнала к шуму, в q^2 раз. Понятно, что разработка приемных систем с возможно более низким уровнем собственных шумов была и остается важнейшей технической задачей миллиметровой радиоастрономии. Естественной вехой на этом пути, к которой стремятся разработчики аппаратуры, являются шумы фона (атмосферные и т. п.) и антенны. Шум “идеального” приемника должен быть существенно ниже этого уровня.

Практически с самого начала было понятно, что для достижения этой цели необходимо охлаждать входные элементы приемника (см., например, Кисляков и др., 1968). Основным типом приемника в этом диапазоне был и остается супергетеродинный радиометр со смесителем на

входе. И в конце 70-х годов в США и Западной Европе появились приемники со смесителями на диодах с барьером Шоттки, охлаждаемых до ~ 20 К. Охлаждались и первые каскады УПЧ. Это дало выигрыш в чувствительности по сравнению с неохлаждаемыми приемниками в 3–4 раза. В дальнейшем, в середине 80-х годов, началось активное внедрение смесителей на туннельных контактах сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС). Они позволяют еще в несколько раз снизить шумовую температуру, практически вплоть до квантового предела, но требуют более глубокого охлаждения (до ~ 4 К).

Мало создать малошумящий приемник в лаборатории. Условия долговременной непрерывной работы на полноповоротной антенне предъявляют к приемной системе дополнительные требования. Это – достаточно высокая надежность, возможность дистанционного (и, желательно, автоматического) контроля за состоянием отдельных элементов и т.п.

Помимо хорошей в указанном смысле входной части приемная система должна иметь другие компоненты, отвечающие решаемой задаче. Для наблюдений спектральных линий необходимы стабильный и перестраиваемый гетеродин, спектроанализатор с подходящим частотным разрешением и полосой анализа. Спектральные наблюдения невозможны без средств автоматизации, позволяющих накапливать и обрабатывать довольно большие объемы информации. Сбор данных должен сочетаться с контролем за состоянием аппаратуры и с управлением антенной радиотелескопа.

В СССР/СНГ лидерство в создании малошумящих (в том числе, спектральных) приемников коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн для радиоастрономии принадлежало Институту прикладной физики РАН, сотрудники которого с начала 70-х годов проводили регулярные наблюдения на РТ-22 КраО. С конца 80-х годов эти работы велись в тесном сотрудничестве с Институтом радиоастрономии НАН Украины, где был создан сверхмалошумящий мазерный усилитель этого диапазона, а также охлаждаемые приемники на ДБШ с рекордно низким уровнем шума.

Ниже мы описываем основные этапы этих работ. Сводка основных параметров приемной аппаратуры, использовавшейся для наблюдений на РТ-22 КраО в разные периоды времени, представлена в табл. 1. Современное состояние миллиметровой и субмиллиметровой астрономии, включая ее цели и задачи, обсуждается в работе Зинченко (2003).

Таблица 1. Основные параметры приемной аппаратуры, использовавшейся для наблюдений на РТ-22 КраО в разные периоды времени

Период	Тип приемника	T (К)	$N \times \Delta\nu$ ($N \times \text{кГц}$)
до 1985	ДБШ 300 К	~ 1500 (DSB)	20×3000
1985–87	ДБШ 20 К	400–500 (DSB)	32×350
1988–90	ДБШ 20 К	~ 250 (DSB)	120×100
1990–94	мазер	~ 60 (SSB)	120×100
с 1995	СИС	~ 100 (DSB)	120×100
с 2000	ДБШ 20 К	~ 100 (DSB)	$120 \times 100, 1024 \times 8$

2 Малошумящие приемники диапазона длин волн 3 мм для РТ-22

2.1 Приемники со смесителем на диоде с барьером Шоттки (ДБШ)

Группой сотрудников ИПФ РАН в 1985 г. был создан аппаратный комплекс диапазона длин волн 3 мм, отвечающий большинству из перечисленных требований (Зинченко и др., 1987). Он включал в себя охлаждаемый радиометр со смесителем на диоде с барьером Шоттки (ДБШ), входной

квазиоптический тракт, стабилизированный гетеродин на ЛОВ, фильтровый спектроанализатор, микро-ЭВМ с аппаратурой КАМАК (Демкин и др., 1986). Охлаждение входных элементов (смесителя и первых каскадов УПЧ) осуществлялось при помощи микрокриогенной системы замкнутого цикла. Основные параметры комплекса были таковы: шумовая температура приемника $T = 400 - 450$ К в двухполосном режиме, спектроанализаторы – 32-канальный с каналами шириной 350 кГц и 20-канальный с каналами по 3 МГц, диапазон перестройки 80–115 ГГц. Этот комплекс был успешно использован в длительных (протяженностью несколько недель) непрерывных циклах наблюдений на РТ-22 КраО.

В последующие годы он модернизировался с целью дальнейшего снижения шумов, улучшения спектрального разрешения и пр. (Зинченко и др., 1989; Вдовин и Зинченко, 1991). В частности, значительного снижения шумовой температуры удалось добиться за счет замены диплексера во входном тракте. Интерферометр Маха-Цендера на сверхразмерных волноводах, который использовался в первых вариантах приемника, был заменен на квазиоптический кольцевой резонатор (Воронов и Зинченко, 1989) с существенно меньшими потерями мощности сигнала. Если в интерферометре Маха-Цендера они достигали 1.5–2 дБ, то в данном резонаторе не превышают 0.4 дБ. Шумовая температура нового варианта приемника составила ~ 250 К (в двухполосном режиме). В последующем использовался также вариант приемника без диплексера со смесителем с независимым вводом сигнала и гетеродина (Вдовин и Зинченко, 1991).

Новый этап в использовании на РТ-22 приемных систем со смесителем на диоде с барьером Шоттки начался в конце 90-х годов прошлого столетия, когда в РИ НАН Украины был создан криогенный приемник для спектральных наблюдений с шумовой температурой меньше 100 К (в DSB-режиме) в полосе рабочих частот 85–116 ГГц. В центральной части этого диапазона (90–105 ГГц) шумовая температура приемника, установленного на телескопе, была около 70 К. Этот приемник всего в 2 раза уступает по чувствительности лучшим SIS приемникам. Для получения такого результата в РИ НАН Украины были разработаны входные узлы приемника с минимально возможными потерями, найдены условия оптимального использования в них смесительных полупроводниковых диодов (Подъячий и др., 2005а,б), а также созданы сверхмалощумящие усилители промежуточных частот на транзисторах с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) (Королев и Шульга, 2003, 2004).

2.2 Мазерный приемник

В 1990 г. был подготовлен вариант аппаратурного комплекса с созданным в РИ НАН Украины квантовым усилителем на входе (Шульга и др., 1991, 1994). Квантовый усилитель резонаторного типа работает в диапазоне частот 85–90 ГГц. Активным веществом служит андалузит. Шумовая температура этого приемника составила около 60 К, что близко к лучшим результатам, достигнутым в мире в этом диапазоне (на SIS-приемниках). Квантовый усилитель требует охлаждения до 2 К, и, к сожалению, его эксплуатация связана со значительным расходом жидкого гелия, а также с необходимостью использования мощной накачки в диапазоне длин волн 2 мм. Мазерный приемник использовался на РТ-22 несколько лет. С его помощью были проведены первые на РТ-22 работы по картографированию в спектральных линиях молекул пространственно протяженных молекулярных облаков (например, Шульга и др., 1996).

2.3 Приемник со смесителем на переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС)

Наиболее перспективным типом радиоастрономического приемника данного диапазона, как сейчас представляется, остается приемник со смесителем на СИС-переходе. По сравнению с мазерным приемником, упомянутым выше, он может обеспечить значительно более широкий диапазон перестройки, он не требует мощной накачки и др. В ИПФ РАН совместно с ИРЭ РАН также проведена разработка такого приемника. В приемнике используется созданный в ИРЭ СИС-смеситель. В 1995 г. был подготовлен вариант приемника для работы на полноповоротной антенне

типа РТ-22 КраО с охлаждением при помощи микрокриогенной системы замкнутого цикла. В июне 1995 г. был проведен успешный 2-недельный цикл наблюдений (Зинченко и др., 1997). Шумовая температура составила ~ 100 К в двухполосном режиме. Этот приемник и далее использовался для наблюдений на РТ-22.

2.4 Матричный (многолучевой) приемник

Многолучевые системы создаются ради возможности быстрого получения изображений объектов. Конечно, это имеет смысл только в том случае, если размеры изучаемого источника значительно превышают ширину диаграммы направленности. Кроме того, построение многолучевой системы будет оправданным, если чувствительность каждого пространственного канала по крайней мере не сильно уступает чувствительности однолучевого приемника. Например, если чувствительность будет в 2 раза хуже, то сканирующий однолучевой приемник будет эквивалентен 4-лучевой системе (по времени, необходимом для получения изображения с тем же отношением сигнал/шум), а стоимость его будет, очевидно, значительно ниже.

В настоящее время сотрудниками ИПФ РАН и РИ НАНУ ведется разработка 4-элементного матричного СИС-приемника для РТ-22. В основу разработки положена конструкция смесителя, подготовленная в результате сотрудничества с Группой Разработки Перспективных Приемников (ГРПП) Радиобсерватории Онсала Чалмерского Технического Университета (Швеция). Проведена ее оптимизация. Изготовлена партия смесителей для многолучевого приемника. Принципиальной особенностью смесителя является фиксированное положение КЗ-плунжера, что делает его крайне привлекательным в качестве элемента многолучевого приемника. Проработана структурная схема гетеродина для 4-канального приемника. Проработаны различные варианты конструкции инжекции гетеродина в сигнальный тракт приемника с учетом возможных вариантов оптического согласования сигнального тракта и гетеродина, включая возможность использования направленных волноводных ответвителей, интерферометров, квазиоптических делителей пучка на базе поляризационных сеток и пленок диэлектрика. Разработана и изготовлена система автоматизации контроля и управления режимами работы блока СИС-смесителей матричного приемника.

3 Спектроанализаторы

Сотрудниками ИПФ РАН было разработано несколько фильтровых спектроанализаторов для работы на РТ-22. Вначале это был 20-канальный спектроанализатор с шириной канала 3 МГц. Такое разрешение является слишком грубым для большинства задач, поэтому позднее он был заменен 32-канальным прибором с шириной канала 350 кГц. Это дает разрешение по скорости ~ 1 км/с в диапазоне длин волн 3 мм, что также с трудом удовлетворяет астрофизическим требованиям. В 1988 г. А.М. Штанюком и др. был разработан и изготовлен 120-канальный спектроанализатор с шириной канала 100 кГц (в 2005 году сотрудниками РИ НАН Украины была проведена его модернизация, улучшившая эксплуатационные характеристики). Это обеспечивает разрешение по скорости ~ 0.3 км/с в диапазоне длин волн 3 мм, что достаточно для большинства спектральных задач. Общая полоса анализа – 12 МГц – также достаточна для большей части исследований плотных ядер молекулярных облаков Галактики. В то же время, для изучения высокоскоростных истечений газа, для наблюдений внегалактических линий и в некоторых других случаях она слишком мала. Поэтому в 1998 г. комплекс был оснащен акустооптическим спектроанализатором, разработанным в СПбГТУ (Есепкина и др., 2000). Его полная полоса анализа составляет 76 МГц, а полоса каждого из 500 спектральных каналов – около 153 кГц. Тракт промежуточной частоты был разработан с учетом возможности работы приемного комплекса как с фильтровым спектроанализатором (центральная частота 242 МГц), так и с АОС. Для этого был изготовлен новый широкополосный преобразователь на вторую промежуточную частоту, имеющий полосу частот 50–280 МГц по уровню 3 дБ с неравномерностью внутри полосы менее 1.5 дБ. Длительное накопление, необходимое при наблюдении слабых сигналов, предъявляет достаточно жесткие

требования к стабильности амплитудных и частотных характеристик АОС. Оценка долговременной амплитудной стабильности проводилась на основании результатов измерения зависимости от времени накопления спектроскопической дисперсии Аллана. Полученная величина эффективного времени накопления между амплитудными калибровками тракта составила не менее 300 с.

Начатые несколько лет назад на РТ-22 исследования мазерного излучения разных молекул (H_2O , OH , CH_3OH) в различных диапазонах длин волн, в том числе и в миллиметровом, стимулировали разработку спектроанализаторов с высоким частотным разрешением. В РИ НАН Украины был создан цифровой Фурье-спектроанализатор с полосой анализа 8 МГц и частотным разрешением в несколько килогерц (Антюфеев и Шульга, 2005). От известных радиоастрономических спектроанализаторов он отличается тем, что для обработки сигнала в нем используется обычный персональный компьютер, а не специально разработанные микросхемы. В настоящее время для обеспечения на РТ-22 наблюдений в более широкой полосе частот (64 МГц) создается 64-канальный фильтровый спектроанализатор, который при необходимости более высокого частотного разрешения может сопрягаться с цифровым Фурье-спектроанализатором.

4 Модернизация антенны РТ-22

Радиотелескоп РТ-22 был построен для радиоастрономических наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн и точность изготовления поверхности главного зеркала антенны кассегреновского типа изначально была таковой, чтобы обеспечить работу даже в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Среднеквадратичное отклонение от поверхности идеального параболоида, которое приводится в литературе на момент ввода РТ-22 в действие, составляло 0.22 мм. Прошедшие десятилетия, естественно, не улучшили эти характеристики, а лишь привели к физическому износу элементов антенны. В какой-то момент времени пришло в полную негодность вторичное зеркало – контррефлектор. Для восстановления работ на РТ-22 в миллиметровом диапазоне в РИ НАН Украины был разработан и изготовлен новый контррефлектор, который и был установлен на антенне. Для сохранения общей геометрии антенны и возникающей при этом необходимости замены всех используемых при наблюдениях облучателей, размеры и параметры гиперboloида были оставлены без изменений. Контррефлектор изготовлен из специально выбранного алюминиевого сплава, его диаметр 1510 мм, а погрешность изготовления гиперболической поверхности не превышает 50 мкм. Такое качество поверхности заведомо выше, чем требуется для обеспечения наблюдений во всем миллиметровом диапазоне. Неоценимую помощь в изготовлении контррефлектора оказали Институт проблем литья и сплавов НАН Украины, подготовивший необходимый алюминиевый сплав и выполнивший отливку весом около 200 кг, и харьковское предприятие “Турбоатом”, где была сделана окончательная обработка гиперboloида.

5 Методики и программы наблюдений

Все описанные аппаратные комплексы работают на антенне в режиме диаграммной модуляции, которая осуществляется при помощи системы зеркал и вращающегося под углом 45° к направлению луча диска с прорезями. Отклонение луча при модуляции составляет около $8'$ в горизонтальной плоскости. Основной метод наблюдений - это попеременное наведение на источник “основной” и “опорной” диаграмм направленности за счет поворота антенны радиотелескопа. Он пригоден практически для всех наблюдений плотных ядер, поскольку их размеры, как правило, не превышают расстояния между диаграммами направленности. Если же источник более протяженный (например, это часто может быть при наблюдениях СО), то есть возможность осуществлять модуляцию между узкой основной диаграммой направленности и широким (несколько градусов) вспомогательным лучом.

Калибровка измеряемой антенной температуры проводится известным методом (см., например, Пензиас и Баррас, 1973) по собственному излучению атмосферы. Величина калибровочного сигнала представляет собой разницу между излучением “черного тела” с температурой, равной температуре

окружающей среды, на входе приемника и излучением атмосферы в направлении источника. При правильном определении эффективной температуры калибровочного сигнала (T_c) этот метод дает эффективную температуру принимаемого полезного сигнала за пределами атмосферы с учетом потерь в антенне (T_A^* в общепринятой нотации, предложенной в работе Пензиас и Баррас, 1973). В первом приближении $T_c = T_0 - T_{bg}$, где T_0 – температура окружающей среды, а T_{bg} – эффективная температура изотропного фона.

В конечном счете мы приводим результаты наблюдений спектральных линий в единицах яркостной температуры в главном лепестке диаграммы направленности T_{MB} . Эта шкала учитывает коэффициент рассеяния вне главного лепестка, который определялся по наблюдениям планет и ряда калибровочных источников молекулярного излучения (главным образом, туманности Ориона). Его величина достигает ~ 0.4 . Ширина диаграммы направленности антенны на волнах $\lambda \sim 3$ мм составляет $40''$. Для источников, характерные размеры которых существенно (в несколько раз) превышают эту величину, температура T_{MB} практически равна их истинной яркостной температуре (T_R). Для “точечных” источников адекватной величиной является плотность потока и для ее определения необходимо знать эффективную площадь антенны. Нами регулярно проводились измерения эффективной площади. Найдено, что на этих волнах она сильно зависит от угла возвышения. На больших углах на волнах около 3.5 мм она достигает ~ 60 м², но резко уменьшается на низких углах.

Реализация описанной методики требует соответствующего программного обеспечения. Его первоначальный вариант был разработан сотрудниками ИПФ РАН. Эти программы дают возможность вести наблюдения в диалоговом режиме. Управление работой системы осуществляется при помощи набора “команд”, которые могут вводиться в произвольном порядке (с некоторыми ограничениями). Основная программа и ряд подпрограмм обеспечивают расчет необходимых астрономических величин, пересчет координат с эпохи на эпоху, расчет текущих координат источника с учетом ошибок наведения, выдачу управляющих команд в систему наведения антенны, расчет скоростей источника в лабораторной системе отсчета, проведение измерений и калибровки, контроль за состоянием аппаратуры.

Одна из основных проблем при наблюдениях источников (в первую очередь с малыми угловыми размерами) при помощи радиотелескопа с узкой диаграммой направленности – это систематические ошибки наведения, достигающие на РТ-22 КраО нескольких угловых минут. Эта проблема – общая для всех больших инструментов, и разработанная нами методика ее решения (Зинченко и Нестеров, 1978), как выяснилось, по существу не отличается от принятой, например, на 12-м радиотелескопе НРАО (США) (Юлик, 1976). Отличие измеренных координат источников от расчетных обусловлено действием таких факторов, как рефракция, ошибки коллимации, наклон вертикальной оси, гравитационные деформации, неточность определения координат телескопа и др., которые долгое время непосредственно не учитывались в системе управления РТ-22. Зависимость ошибок наведения от азимута и угла места можно описать простыми выражениями, коэффициенты в которых (кроме константы рефракции) определялись методом наименьших квадратов по экспериментальным данным об ошибках наведения. Константа рефракции рассчитывалась по известным формулам для заданных значений метеопараметров. Величина среднеквадратичного отклонения остаточных ошибок наведения составляет $\sim 10''$ по обеим координатам. Необходимо отметить, что днем неравномерный нагрев антенны Солнцем приводит к появлению дополнительных ошибок, которые очень трудно контролировать.

Результаты измерений на РТ-22 КраО, проводимых при помощи описанного выше аппаратного комплекса, записываются на магнитном носителе в виде отдельных спектрограмм. Их дальнейший анализ проводится при помощи программ вторичной обработки, составленных на языке ФОРТРАН и реализованных вначале на ЭВМ типа СМ-3, СМ-4, а затем IBM PC. Эти программы включают в себя более или менее обычный набор процедур, используемых в этом случае, а именно: усреднение нескольких спектрограмм, вычитание полиномиальной “базовой линии”, аппроксимация спектральных линий одной или несколькими гауссовыми кривыми, определение дисперсии шумов в каналах и т. п. Результаты сохраняются в виде файла на магнитном носителе, отображаются в графической форме на экране и могут быть напечатаны.

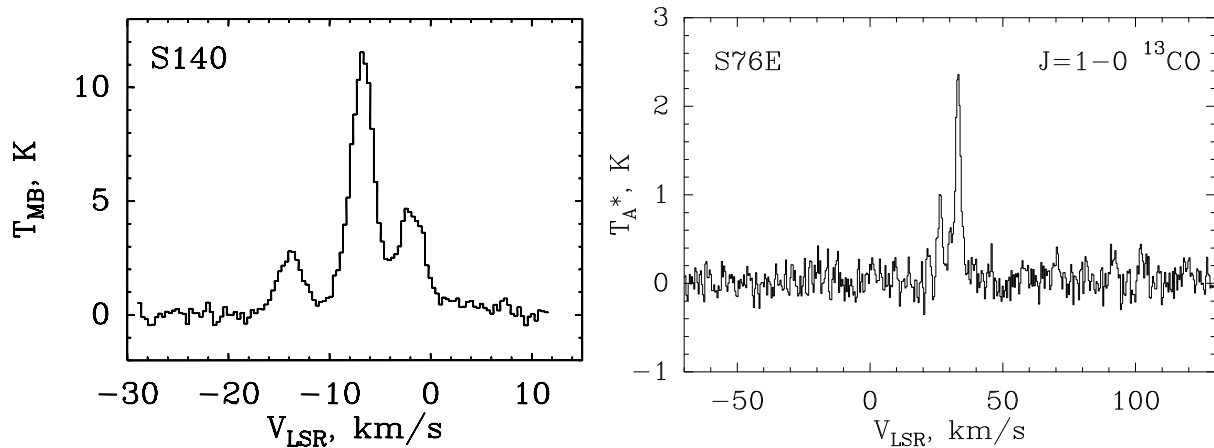


Рис. 1. Примеры полученных спектров: слева – HCN $J = 1 - 0$ в S140 (мазерный приемник с фильтровым спектроанализатором), справа – ^{13}CO $J = 1 - 0$ в S76E (СИС-приемник с акустооптическим спектроанализатором)

Программы не раз модернизировались участвовавшими в этих работах сотрудниками ИПФ РАН и РИ НАНУ.

6 Результаты наблюдений

С помощью описанной выше аппаратуры сотрудниками ИПФ РАН и РИ НАНУ проведены длительные циклы наблюдений различных объектов. Эти программы наблюдений и их основные результаты более подробно описаны в статье Зинченко в данном выпуске. Здесь мы только приведем несколько примеров полученных результатов в качестве иллюстраций, демонстрирующих возможности радиотелескопа.

Основным объектом наших исследований были области звездообразования. Изучались свойства плотного газа в этих областях. Для этого были проведены обзоры таких областей в линиях $J = 1 - 0$ молекул HCN и HCO⁺, а затем детальные исследования некоторых из них в линиях этих и других молекул. На рис. 1 приведены примеры полученных спектров. Они относятся к разным периодам работы на РТ-22.

Качество данных аналогично тому, которое достигается на лучших инструментах, работающих в этом диапазоне, и позволяет получать надежные оценки физико-химических характеристик изучаемых объектов.

7 Заключение

Проведенные работы продемонстрировали возможность эффективного использования РТ-22 КраО для радиоастрономических исследований в диапазоне длин волн 3 мм, в том числе для спектральных наблюдений. РТ-22 остается одним из крупнейших инструментов данного диапазона в мире и при оснащении его современной приемной аппаратурой на постоянной основе может быть важным элементом наблюдательной миллиметровой радиоастрономии.

Благодарности. В описанных работах принимали участие многие сотрудники ИПФ РАН, РИ НАНУ, КраО и других организаций, которым мы чрезвычайно благодарны. Наибольший вклад внесли: А.Б. Буров, В.Ф. Вдовин, В.Н. Воронов, В.М. Демкин, И.В. Замятин, А.Г. Кисляков, А.А. Красильников, Э.П. Кукина, А.В. Лапинов, И.В. Лапкин, Л.Е. Пирогов, В.М. Шанин,

А.М. Штанюк, В.М. Юрков (ИПФ РАН), В.В. Мышенко, А.В. Антюфеев, Л.Б. Князьков, А.М. Королев, В.И. Подъячий (РИ НАНУ), Н.С. Нестеров (КраО), А.М. Барышев, В.П. Кошелец, С.В. Шитов (ИРЭ РАН), В.И. Лебедь, А.М. Пилипенко (НПО “Сатурн”), Н.А. Есепкина, С.К. Круглов, И.И. Саенко (СПбГТУ), Е.Д. Баранов, В.А. Орлов, В.Т. Товстуха (ООО НТК “Криогенная техника”). К сожалению, некоторые из них (В.Н. Воронов, И.В. Замятин, Н.С. Нестеров, В.А. Орлов, В.М. Юрков) безвременно покинули нас.

Работы поддерживались серией грантов РФФИ и ИНТАС.

Литература

- Антюфеев А.В., Шульга В.М. // Радиотехника. 2005. № 5. С. 145.
- Вдовин и Зинченко (Vdovin V.F., Zinchenko I.I.) // Proc. 4-th Soviet-Finnish Symp. on Radio Astronomy (ed. R. M. Martirosian). Armenian Academy of Sciences. Ashtarak. 1991. P. 28.
- Вдовин В.Ф., Зинченко И.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41. С. 1424.
- Воронов В.Н., Зинченко И.И. // XXI Всесоюз. радиоастрономич. конф. Ереван. 1989. Тезисы докл. С. 41–42.
- Демкин В.М., Зинченко И.И., Нестеров Н.С., Шанин В.Н. // Изв. КраО АН СССР. 1986. Т. 74. С. 176–179.
- Есепкина Н.А., Зинченко И.И., Саенко И.И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. С. 935.
- Зинченко И.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. С. 641.
- Зинченко И.И., Буров А.Б., Вдовин В.Ф. и др. // Письма в Астрон. журн. 1987. Т. 13. С. 582.
- Зинченко И.И., Барышев А.М., Вдовин В.Ф., Замятин И.В., Кошелец В.П., Лапинов А.В., Лапкин И.В., Мышенко В.В., Нестеров Н.С., Пирогов Л.Е., Шитов С.В., Шульга В.М. // Письма в Астрон. журн. 1997. Т. 23. С. 145.
- Зинченко И.И., Нестеров Н.С. // XI Всесоюз. радиоастрономич. конф. Ереван, 1978. Тезисы докл. С. 141.
- Зинченко и др. (Zinchenko I.I., Andrijanov A.F., Burov A.V. et al.) // MM Waves and FIR Technology Conf. Digest, P. 35. Beijing, 1989.
- Кисляков А.Г., Лебский Ю.В., Наумов А.И. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1968. Т. 9. С. 1791.
- Королев и Шульга (Korolev A.M., Shulga V.M.) // Proceedings of the Fifth International Symposium on Physics and Engineering of Microwave, Millimeter and Submillimeter waves. Kharkiv (Ukraine). 2004. P. 894.
- Королев А.М., Шульга В.М. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8. С. 429.
- Пензиас и Баррас (Penzias A.A., Burrus C.A.) // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1973. V. 11. P. 51.
- Подъячий и др. (Piddyachiy V.I., Shulga V.M., Korolev A.M., Myshenko V.V.) // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2005a. V. 26. P. 1307.
- Подъячий и др. (Piddyachiy V.I., Korolev A.M., Shulga V.M.) // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2005b. V. 26. P. 1381.
- Шульга В.М., Зинченко И.И., Нестеров Н.С. и др. // Письма в Астрон. журн. 1991. Т. 17. С. 1084.
- Шульга и др. (Shulga V.M., Myshenko V.V., Knjas'kov L.B., Zinchenko I.I., Shtanyuk A.M.) // Tr. J. of Phys. 1994. V. 18. P. 1021.
- Шульга В.М., Мышенко В.В., Назаров Е.А., Антюфеев А.В., Л.Б.Князьков Л.Б., Литвиненко Л.Н., Зинченко И.И., Лапинов А.В., Пирогов Л.Е. // Радиофизика и радиоастрономия. 1996. Т. 1. С. 54.
- Юлик (Ulich B.L.) // Pointing characteristics of the 36-foot telescope. Tucson. 1976. 56p. (*Internal report No. 1/NRAO*).