

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.03.163>

УДК 520.272.2:
621.396.677.494

PACS number: 95.55.Jz

А. В. АНТЮФЕЕВ¹, А. М. КОРОЛЕВ¹, А. Н. ПАТОКА¹,
В. М. ШУЛЬГА¹, О. М. УЛЬЯНОВ¹, А. М. РЕЗНИЧЕНКО¹,
В. В. ЗАХАРЕНКО^{1,2}, В. И. ПРИСЯЖНЫЙ³, А. В. ПОИХАЛО³,
В. В. ВОЙТЮК³, В. Н. МАМАРЕВ³, В. В. ОЖИНСКИЙ³,
В. П. ВЛАСЕНКО³, В. М. ЧМИЛЬ⁴, В. И. ЛЕБЕДЬ⁴,
М. И. ПАЛАМАР⁵, А. В. ЧАЙКОВСКИЙ⁵, Ю. В. ПАСТЕРНАК⁵,
М. А. СТРЕМБИЦКИЙ⁵, М. П. НАТАРОВ⁶, С. А. СТЕШЕНКО⁶,
В. В. ГЛАМАЗДИН⁶, А. И. ШУБНЫЙ⁶, А. А. КИРИЛЕНКО⁶,
Д. Ю. КУЛИК⁶, А. М. ПИЛИПЕНКО⁷

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мыстэцтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина,
E-mail: oulyanov@gian.kharkov.ua

² Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободи, 4, г. Харьков, 61022, Украина,
E-mail: zakhar@gian.kharkov.ua

³ Национальный центр управления и испытаний космических средств,
Государственное космическое агентство Украины,
ул. Московская, 8, г. Киев, 01010
E-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

⁴ Частное акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Сатурн”,
пр-т Леся Курбаса, 2-Б, г. Киев, 03148, Украина

⁵ Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя,
ул. Русская, 56, г. Тернополь, 46001, Украина

⁶ Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина

⁷ Международный центр науки будущего, Цзилиньский университет,
130012 Чанчуань, Китай

СОЗДАНИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-32 НА БАЗЕ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ MARK-4B. 2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Предмет и цель работы: *Исследуются технические возможности антенной системы MARK-4B для ее дальнейшего использования в качестве 32-метрового радиотелескопа (РТ-32) и проведения одновременных спектральных радиоастрономических наблюдений в С и К диапазонах.*

Методы и методология: *В исследованиях используются результаты наших собственных измерений, проведенных на антенной системе MARK-4B, экспертные оценки, открытые источники информации, техническая документация антенной системы MARK-4B, методы радиоастрономии, методы компьютерного моделирования и сравнительный анализ основных параметров данной антенны с аналогичными параметрами действующих радиотелескопов мирового уровня. Комбинирование разных подходов позволяет определить требования к приемной системе, к параметрам спектроанализатора, методикам калибровки и оптимизировать процедуры модернизации антенной системы MARK-4B.*

Результаты: *Определены основные параметры радиотелескопа, необходимые для проведения спектральных наблюдений в С и К диапазонах. Уточнены возможности системы наведения. Для рабочего диапазона частот антенной системы MARK-4B рассмотрены основные доступные для исследований спектральные линии различных молекул. Приведен перечень переходов, излучающих наиболее интенсивные спектральные линии. Сформулированы радиоастрономические задачи, которые возможно решать с использованием MARK-4B в режиме спектральных наблюдений в С и К диапазонах.*

Оценены необходимые параметры спектроанализатора и значения собственной температуры шумов приемника и всей системы приема в целом. Описаны методики калибровки регистрируемого сигнала, которые будут использованы для проведения спектральных наблюдений.

Заключение: Исследования, представленные в этой статье, показывают, что для проведения спектральных наблюдений на базе лучевой антенной системы MARK-4B возможно создать радиотелескоп РТ-32 с качественными техническими характеристиками, соответствующими лучшим мировым аналогам. Модернизация лучевой антенной системы MARK-4B позволит на первом этапе создать в Украине двухдиапазонный радиотелескоп, на котором возможно будет проводить одновременные спектральные и/или континуальные наблюдения в С и К диапазонах. В последующем количество одновременно работающих диапазонов может быть увеличено.

Ключевые слова: антенна, калибровка, лазеры, MARK-4B, приемная система, поляризация, радиисточник, радиотелескоп, спектроанализатор

1. Введение

Ускоренное развитие методов дальней радиосвязи и мониторинга орбитальных объектов, происходящее в настоящее время, а также развитие приемо-передающих систем, предназначенных для спутников связи, и их переход к более высокочастотным диапазонам приводит к выводу из эксплуатации связных и локационных радиосистем предыдущего поколения. В то же время такие системы обладают большим потенциалом в научном (радиоастрономическом) аспекте из-за больших размеров их первичных зеркал. В последнее время по инициативе научного сообщества и с согласия правительств многих стран активно проводится переоборудование старых связных и радиолокационных комплексов в радиотелескопы. Такие проекты особенно эффективны с экономической точки зрения, поскольку вновь созданные радиоастрономические инструменты (зеркала и решетки) относятся к категории дорогостоящего научного оборудования, такого как ускорители, реакторы и т. п.

Известно множество случаев модернизации старых связных или военных антенн. В США в астрономической обсерватории Pisgah Astronomical Research Institute (Северная Каролина) 12-метровая антенна была переоборудована в учебный радиотелескоп [1]. В Латвии были успешно переоборудованы в радиотелескопы 32-метровая и 16-метровая антенны [2]. В Новой Зеландии в радиотелескоп перестроена 30-метровая телекоммуникационная антенна [3]. Подобные телекоммуникационные антенны переоборудованы в радиотелескопы в Японии [4] и в Африке (Республика Гана) [5, 6]. Существует проект по переоборудованию в радиотелескопы в ближайшем будущем еще нескольких телекоммуникационных антенн, расположенных в Африке [7]. Более подробный обзор таких модернизированных

радиотелескопов сделан в первой работе из этого цикла [8].

Украина располагает рядом крупных антенных систем, модернизация которых в радиотелескопы вполне возможна. Конструкции этих сооружений имеют достаточный ресурс, антенны удалены от крупных городов, что улучшает помеховую обстановку. Эти антенны имеют развитую инфраструктуру (электрические сети, подъездные дороги, служебные здания, оптоволоконные линии связи и т. п.). Одна из них – антенная система MARK-4B – расположена возле г. Золочев Львовской области. Сейчас начался первый этап преобразования этой антенной системы в двухдиапазонный радиотелескоп РТ-32. После завершения первого этапа модернизации этот радиотелескоп сможет одновременно работать в С ($4.7 \div 6.8$ ГГц) и К ($20 \div 26$ ГГц) диапазонах.

Антенная система MARK-4B использовалась для осуществления спутниковой связи. Ее конструктивная особенность – наличие лучевода – относит ее к так называемому классу Beam Waveguide (BWG) антенн. В мире уже есть примеры успешного переоборудования BWG антенн в радиотелескопы.

В первой работе данного цикла [8] более подробно описаны конструкция антенной системы MARK-4B и ее современное техническое состояние. Определен рабочий диапазон частот, который на сегодня составляет $2.3 \div 26$ ГГц. Сделана оценка возможностей системы наведения антенны. В течение последнего года на антенной системе MARK-4B установлен широкополосный приемник (диапазон $4.6 \div 5.1$ ГГц) с детектором и возможностью изменения времени интегрирования сигнала, а также проведены первые тестовые измерения параметров антенны.

Настоящая вторая работа этого цикла посвящена обоснованию возможности создания на базе

антенной системы MARK-4В современного радиотелескопа РТ-32. Этот радиотелескоп будет использован в ряду других задач и для проведения спектральных радиоастрономических наблюдений. В данной работе описан круг актуальных научных задач, решение которых связано со спектральными радиоастрономическими наблюдениями в диапазоне рабочих частот создаваемого радиотелескопа РТ-32. Здесь рассмотрены также требования к устанавливаемой аппаратуре для соответствия нового радиотелескопа современному уровню требований.

2. Научные задачи, доступные для решения с использованием антенной системы MARK-4В

Для антенной системы MARK-4В С и К диапазоны выбраны потому, что именно в этих диапазонах параметры данной системы являются наилучшими. С и К диапазоны достаточно хорошо освоены в радиоастрономии. Для проведения наблюдений в этих диапазонах используются радиотелескопы большого размера с диаметром главного зеркала в несколько десятков метров. При выполнении наблюдений для решения задач астрофизики требуется высокая чувствительность приемных систем и длительное время наблюдений (накопление сигнала). В настоящее время существующие большие и дорогие антенны (с диаметром основного рефлектора 60 м и более) не могут решить все актуальные научные задачи в этих диапазонах частот. Поэтому целесообразно ряд задач решать на радиотелескопах средних размеров (с диаметром основного рефлектора ≈ 30 м). Задачи и связанные с их решением наблюдения на одиночных радиотелескопах можно разделить на три категории – континуальные (детектирование в широкой полосе частот), импульсные (исследования пульсаров и транзиентов, всплесков и вспышек) и спектральные. В этой работе рассматриваются именно спектральные наблюдения с высоким частотным разрешением.

Регистрация излучения атомов и молекул в межзвездной среде и в областях звездообразования является весьма актуальной задачей. Основная тенденция современной наблюдательной радиоастрономии – переход ко все более высокочастотным наблюдениям вплоть до терагерцевого диапазона. Поэтому многие задачи низ-

кочастотных измерений остаются “забытыми” из-за смещения интересов исследователей в более высокочастотные диапазоны. Следует иметь в виду, что спектральные измерения требуют как высокой чувствительности приемных систем, так и их совместного использования с относительно широкополосными спектроанализаторами параллельного типа.

Диапазон рабочих частот антенной системы MARK-4В оценен в предыдущей работе [8]. Он составляет $2.3 \div 25$ ГГц с возможностью работы ниже 2.3 ГГц при условии установки дополнительных облучателей и малошумящих охлаждаемых приемников вблизи первичного или вторичного фокуса.

К настоящему времени в диапазонах L, S, C, X, Ku и K в процессе наблюдений разных радиоастрономических объектов зарегистрированы сотни спектральных линий различных молекул. Подавляющее большинство этих линий характеризуется очень слабыми спектральными плотностями потоков излучения и почти не исследуется. Наиболее интенсивные линии в этих диапазонах, с которыми связано большинство публикаций, приведены в табл. 1. Эта таблица составлена на основе базы данных Национального института стандартов и технологий США NIST (National Institute of Standards and Technology) <<https://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl>> и анализа публикаций в ведущих астрофизических журналах.

Таблица 1. Наиболее интенсивные спектральные линии

| Диапазон | Частота, МГц | Молекула | Переход |
|----------|--------------|--------------------|---|
| L | 1420.0 | H | Атомарный водород |
| L | 1612.2310 | ОН | ${}^2\Pi_{3/2}J = 3/2F = 1-2$ |
| L | 1665.4018 | ОН | ${}^2\Pi_{3/2}J = 3/2F = 1-1$ |
| L | 1667.3590 | ОН | ${}^2\Pi_{3/2}J = 3/2F = 2-2$ |
| C | 4765.562 | ОН | ${}^2\Pi_{1/2}J = 1/2F = 1-0$ |
| C | 6030.747 | ОН | ${}^2\Pi_{3/2}J = 5/2F = 2-2$ |
| C | 6035.092 | ОН | ${}^2\Pi_{3/2}J = 5/2F = 3-2$ |
| C | 6668.5192 | CH ₃ OH | $5(1.5) - 6(0.6)A^{++}$ |
| Ku | 12178.593 | CH ₃ OH | $2(0.2) - 3(-1.3)E$ |
| K | 22235.1204 | H ₂ O | $6(1.6) - 5(2.3)F = 5-4$ |
| K | 23121.024 | CH ₃ OH | $9(2.7) - 10(1.10)A^{++}$ |
| K | 23694 | NH ₃ | Около 20 линий, которые лежат в пределах ± 2 МГц от центральной частоты |

Выделим некоторые из актуальных астрофизических задач, которые могут быть решены с помощью РТ-32 в L, C и K диапазонах.

2.1. Астрофизические задачи для спектральных наблюдений

1. Наблюдение атомарного водорода на частоте 1420 МГц ($\lambda = 21$ см).

2. Поиск и мониторинг источников мазерного излучения различных молекул:

1) многочастотные исследования гидроксильных (ОН) мазеров:

– наблюдение излучения молекулы ОН в основном состоянии на частотах 1612, 1665, 1667 и 1720 МГц,

– наблюдение излучения молекулы ОН в возбужденном состоянии на частотах ≈ 4.7 , 6.03 и 6.035 ГГц;

2) многочастотные исследования мазеров на молекулах метанола (CH_3OH) на частотах ≈ 6.7 , 9.9, 12.2, 19.97, 23.1 и 24.9 ГГц в областях активного звездообразования;

3) исследования мазеров на молекулах воды (H_2O).

3. Изучение теплового излучения:

1) наблюдения молекул гидроксила и метанола;

2) исследование молекулярных облаков в линии молекулы аммония (NH_4^+) для определения температур областей звездообразования (частота ≈ 23 ГГц).

2.2. Космологические задачи для спектральных наблюдений внегалактических источников

Очень интересной и актуальной задачей могут быть наблюдения спектральных линий излучения молекул, находящихся в объектах, сформированных на ранних этапах развития Вселенной. То есть можно использовать низкочастотные системы приема для регистрации спектров излучения молекул в объектах с большим красным смещением z . Например, на частоте ≈ 8 ГГц можно наблюдать излучение мазеров на молекулах H_2O (лабораторная частота которых ≈ 22 ГГц) в объектах с красным смещением $z \approx 1.7$. Имея возможность вести наблюдения на нескольких частотах одновременно, можно ставить задачу по исследованию излучения различных молекул в объектах, находящихся на разных стадиях эво-

люции Вселенной. Это дает возможность исследовать одни и те же спектральные линии воды и/или других молекул в разных частотных диапазонах. Смещение по частоте возникает из-за эффекта Хаббла, когда для объектов с увеличением z линии все больше смещаются в красную область спектра (к нижним частотам).

Абсолютно новой и актуальной задачей является поиск излучения первых молекул, образовавшихся вскоре после Большого взрыва (например, молекулы HeH) [9]. Располагая современным радиотелескопом, можно планировать долгосрочные наблюдения, которые необходимы для изучения внегалактических источников. Сейчас такие задачи из-за загруженности имеющихся в мире больших антенн иницируются довольно редко.

3. Оценка возможностей системы наведения

В первой работе цикла [8] сделана общая оценка возможностей системы наведения. Указаны слепые зоны, связанные с недостаточной длиной кабельного азимутального тракта. Проведенный авторами анализ показывает, что система наведения антенны MARK-4B нуждается в практически полной модернизации. В настоящем разделе на основе проведенных первых тестов, описанных в предыдущей работе, мы определим требования к точности наведения радиотелескопа и уточним размеры слепой зоны вблизи зенита.

Общепринято, что точность наведения радиотелескопа должна быть не хуже $1/10$ углового размера диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности.

Оценку ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности можно получить с помощью выражения $\varphi_{0.5} = c/(Df)$, где c – скорость света в вакууме, D – диаметр основного рефлектора, f – рабочая частота.

Рассчитанная таким образом ширина диаграммы направленности на разных частотах, а также необходимая точность наведения для антенной системы MARK-4B приведены в табл. 2. Следует отметить, что реальные размеры диаграммы направленности радиотелескопа можно определить только с помощью наблюдений за космическими объектами. Поскольку истинные размеры диаграммы направленности можно будет уз-

Таблица 2. Оценки точности наведения антенной системы MARK-4B

| f , ГГц | $\varphi_{0.5}$ | Точность наведения |
|-----------|-----------------|--------------------|
| 4.7 | 6.9' | 0.684' |
| 6.7 | 4.8' | 0.467' |
| 12.2 | 2.6' | 0.250' |
| 22 | 1.5' | 0.133' |

нать только после завершения части работ по созданию системы управления, разрабатывать систему управления нужно ориентируясь на теоретические расчеты. На данный момент из наблюдений радиоисточников сделана оценка $\varphi_{0.5} \approx 6.9'$ лишь на частоте 4.85 ГГц [8].

Для проведения радиоастрономических наблюдений в режиме сопровождения источника система наведения антенны должна успевать следить за суточным вращением небесной сферы. Это требование касается в основном азимутальных двигателей. Опыт других исследователей, полученный при модернизации подобной антенной системы BWG типа в Новой Зеландии [3], а также техническая информация о ведущих мировых радиотелескопах сантиметрового диапазона [1–8] позволяют оценить максимальную скорость слежения за астрономическим источником в $0.03^\circ/\text{с}$.

На рис. 1 приведена слепая зона антенной системы MARK-4B вблизи зенита, рассчитанная по методике [10] для максимальной скорости слежения по азимуту $0.03^\circ/\text{с}$. В этой зоне скорость движения источников по небесной сфере превышает скорость слежения радиотелескопа по азимуту. Как видно, данная слепая зона довольно

небольшая, но она должна быть учтена в программе управления радиотелескопом. Эта программа должна предупреждать наблюдателя о приближении к слепой зоне, но не должна ограничивать наведение радиотелескопа в слепую зону, т. к. это может понадобиться для тестов или для решения особых задач.

Первые тесты системы наведения показывают, что, вероятно, на РТ-32 будет доступна более высокая скорость слежения за астрономическими и космическими объектами. В этом случае слепая зона вблизи зенита уменьшится.

4. Шумовая температура системы

Важной характеристикой сигналов является спектральная плотность потока излучения космического источника. Минимальное значение спектральной плотности потока, которое может быть зарегистрировано радиотелескопом, зависит от параметров антенны, времени наблюдения, спектрального разрешения регистратора и шумовой температуры системы приема. В этом разделе будет показана эта связь и даны рекомендации, относящиеся к шумовой температуре приемников и системы приема в целом.

Минимальный сигнал (флуктуационная чувствительность), который можно зарегистрировать, определяется достигнутым среднеквадратичным отклонением (СКО) накопленного шума $\delta S_R(f)$. В радиоастрономии для диапазонов частот L, S, C, X, Ku и K эти величины, как правило, выражены в янских ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$) – принята в радиоастрономии единица спектральной плотности потока). Для нормальной обработки дан-

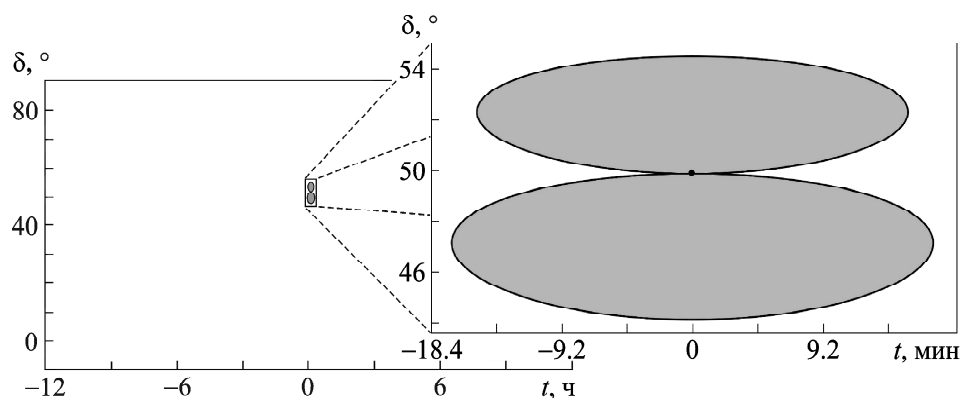


Рис. 1. Слепая зона антенной системы MARK-4B вблизи зенита. Зенит обозначен точкой. По оси абсцисс приведен часовой угол источника (отрицательные значения соответствуют восточной стороне от небесного меридиана, а сам меридиан проходит через зенит и точку с координатами (0, 0)). Ось ординат соответствует склонению источника

ных необходимо, чтобы отношение интенсивности сигнала к СКО шума (SNR) составляло не менее 3, лучше $SNR > 5$.

Пересчет из единиц спектральной плотности потока в единицы антенной температуры осуществляется согласно выражению (здесь для оценки шумовых характеристик приемной системы пренебрегается влиянием атмосферы):

$$T_s(f, \varphi_{El}) \approx \text{DPFU}(f, \varphi_{El}) \cdot S_R(f), \quad (1)$$

$$\text{DPFU}(f, \varphi_{El}) = \frac{A_{eff}(f, \varphi_{El})}{2k},$$

где $T_s(f)$ – антенная температура источника, $S_R(f)$ – спектральная плотность потока объекта, f – текущая/рабочая частота, k – постоянная Больцмана, φ_{El} – угол места, $A_{eff}(f, \varphi_{El})$ – эффективная площадь антенны.

В настоящее время в зарубежной литературе в качестве основной характеристики антенны вместо эффективной площади часто используют величину $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ – коэффициент пересчета кельвина в единицу плотности потока излучения (degrees per flux density unit). $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ имеет размерность К/Ян и используется в качестве коэффициента непосредственно связывающего антенную температуру и спектральную плотность потока объекта без учета собственных шумов антенны и системы приема.

На практике $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ радиотелескопа определяется экспериментально. Вследствие гра-

витационных, ветровых и тепловых деформаций поверхности антенны $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ зависит не только от частоты, но и от угла места. Данные о $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ радиотелескопов подобных антенной системе MARK-4B можно найти в литературе. $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ 32-метрового радиотелескопа в г. Торунь, Польша, в направлении зенита составляет примерно 0.14 К/Ян на частоте 5 ГГц <https://www.astro.uni.torun.pl/~kb/HandbRT32RozdzVII.htm#tth_sEc3>. $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ 32-метрового радиотелескопа Medicina на частоте 6 ГГц при угле места в 45° составляет 0.145 К/Ян <<http://www.med.ira.inaf.it/ManualeMedicina/English/5.%20Efficiency.htm>>. Характеристики антенн и приемных систем современных радиотелескопов сантиметрового диапазона приведены в табл. 3. В этой таблице $T_{REC}(f, \varphi_{El})$ – шумовая температура приемника, $T_{SN}(f, \varphi_{El})$ – температура собственных шумов всей системы приема и регистрации РТ-32.

Первые предварительные оценки характеристик антенной системы MARK-4B были сделаны в декабре 2018 г. на частоте 5 ГГц [8]. Средняя эффективная площадь антенной системы на этой частоте равна 682 м^2 , что соответствует $\text{DPFU}(f, 90^\circ) \approx 0.247$. Дальнейшие расчеты выполнены для этой оценки $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$. Полученное значение $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$ характерно для радиоастрономических антенн С диапазона (см. табл. 3), что делает антенную систему MARK-4B вполне конкурентоспособной среди радиотелескопов с диаметром основного зеркала 32 м.

Таблица 3. Характеристики антенн и приемных систем современных радиотелескопов сантиметрового диапазона

| Радиотелескоп | F , ГГц | φ_{El} | $\text{DPFU}(f, \varphi_{El})$, К/Ян | $T_{REC}(f, \varphi_{El})$, К | $T_{SN}(f, \varphi_{El})$, К |
|------------------|-----------|----------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Torun 32-m | 4.7 | 90° | 0.14 | 15 | 30 |
| | 6.5 | | | 25 | 40 |
| Noto 32-m | 5 | 90° | 0.15 | 30 | 48 |
| | 22 | | 0.13 | 90 | 110 |
| Medicina 32-m | 5 | 45° | 0.160 | 14 | 26 |
| | 6 | | 0.145 | 57 | 65 |
| | 22 | | 0.11 | 20 ÷ 30 | 55 |
| Effelsberg 100-m | 6.668 | 90° | 1.54 | | 28 |
| | 22.35 | 90° | 1.03 | | 70 |

Примечание. Данные, приведенные в табл. 3, размещены на официальных сайтах обсерваторий: <<http://www.med.ira.inaf.it/ManualeNoto/5.EfficienzaEN.htm>>; <<http://www.med.ira.inaf.it/ManualeMedicina/English/5.%20Efficiency.htm>>; <<https://www.astro.uni.torun.pl/~kb/HandbRT32/ChapterIV.htm>>; <https://eff100mwiki.mpifr-bonn.mpg.de/doku.php?id=information_for_astronomers:rx_list>.

Используя данные наших исследований шумовой температуры антенной системы MARK-4В с помощью “теплого” радиометра [8], мы провели предварительные оценки шумовой температуры системы будущего радиотелескопа РТ-32 с малошумящим приемником на частоте 5 ГГц. В настоящее время для РТ-32 изготавливается криогенный приемник, шумовая температура которого должна быть не выше 15 К на частотах $4.7 \div 6.8$ ГГц. Предполагая, что вклад атмосферы в шумовую температуру системы составит 7 К, средняя температура окружающей среды будет 282 К, а также пользуясь оценкой значения результирующего коэффициента передачи по мощности $-0.5 \text{ дБ} < K_p < -0.3 \text{ дБ}$, мы оценили шумовую температуру системы с криогенным приемником. Ее значение лежит в пределах $T_{SN}(f, 90^\circ) \approx 42 \div 53 \text{ К}$. Это значение несколько больше, чем у аналогичных радиотелескопов (см. табл. 3), поскольку антенная система MARK-4В изначально предназначалась для связи и содержит лучевод, вносящий дополнительные потери в приемный тракт. Но за счет более эффективного облучения субрефлектора, основного рефлектора и, соответственно, более высокой эффективной площади радиотелескопа РТ-32 (антенной системы MARK-4В) флуктуационная чувствительность на частоте 5 ГГц будет примерно такой же, как у современных радиотелескопов. На более высоких частотах дифракционные потери, вносимые лучеводом, уменьшатся и ожидается, что характеристики РТ-32 будут лучше, чем у аналогичных радиотелескопов с диаметром главного зеркала 32 м.

Для оценки необходимой шумовой температуры приемника и всей системы РТ-32 в целом мы проанализировали характеристики мазерного излучения в рабочих диапазонах частот антенной системы. На рис. 2 приведены гистограммы распределения интенсивности метанольных мазеров на частоте 6.7 ГГц, построенные по данным двух каталогов [11, 12].

Как видно из рис. 2, в настоящее время известно лишь небольшое количество метанольных мазеров на частоте излучения 6.7 ГГц, имеющих спектральную плотность потока менее 1 Ян. Это означает, что будет достаточно накапливать сигнал до такого уровня, при котором СКО шума не превышает 0.3 Ян ($\text{SNR} > 3$).

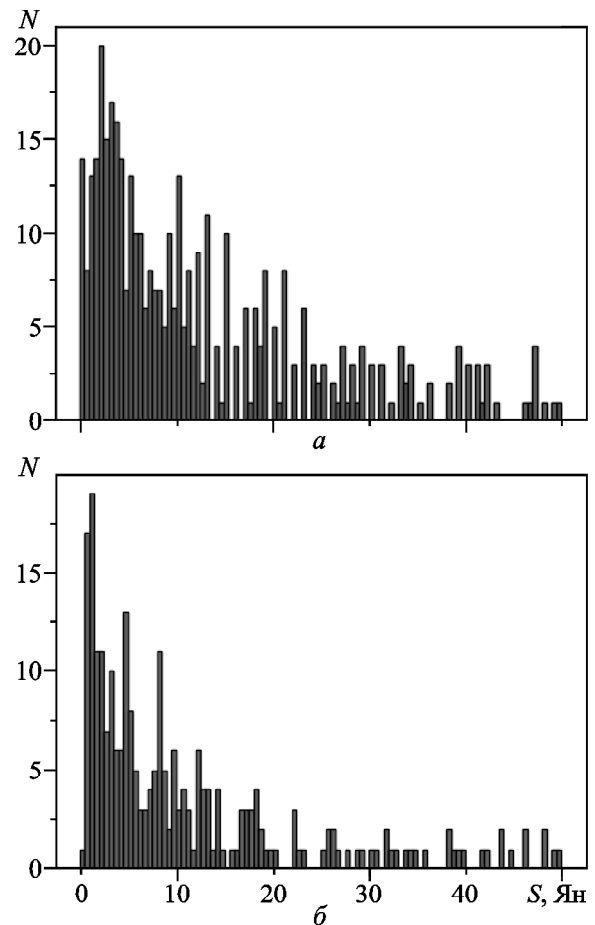


Рис. 2. Гистограммы распределения пиковой плотности потока излучения известных метанольных мазеров на частоте 6.7 ГГц по данным двух каталогов: [11] (а) и [12] (б)

На рис. 3 показана гистограмма распределения интенсивности гидроксильных мазеров на частоте 6.035 ГГц [13]. Из рисунка хорошо видно, что большинство гидроксильных мазеров на частоте 6.035 ГГц имеют спектральную плотность потока менее 1 Ян, а минимальная интенсивность в распределении составляет ≈ 0.3 Ян. То есть минимальное необходимое значение СКО шума для уверенного обнаружения таких мазеров составляет менее 0.1 Ян ($\text{SNR} > 3$).

На рис. 4, а приведена гистограмма распределения спектральной пиковой плотности потока излучения мазеров на молекулах воды на частоте 22 ГГц. На рис. 4, б приведена гистограмма СКО шумов, с которыми были проведены измерения интенсивностей спектральных линий этих мазеров. В данном случае хорошо видно, что большинство H_2O мазеров имеют спектральную плотность потока значительно

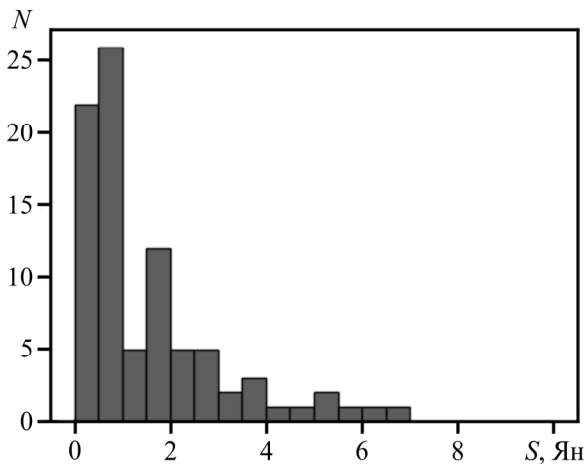


Рис. 3. Гистограмма распределения пиковой спектральной плотности потока излучения известных гидроксильных мазеров на частоте 6.035 ГГц

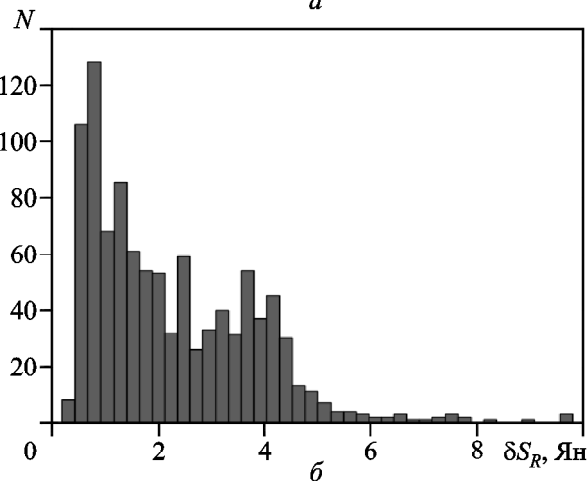
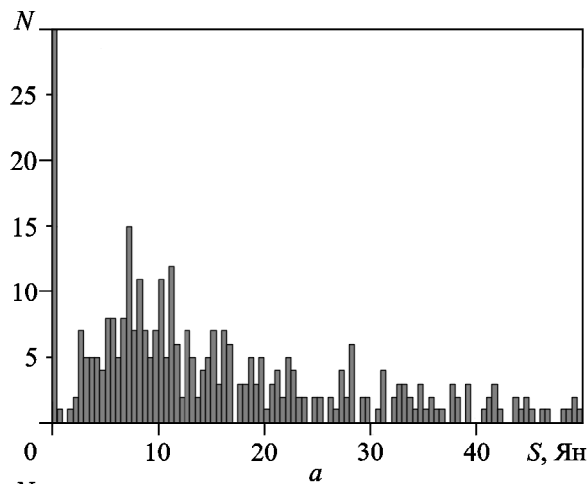


Рис. 4. Гистограмма распределения пиковой спектральной плотности потока излучения мазеров H_2O на частоте 22 ГГц (а) и гистограмма СКО шумов, с которыми были измерены интенсивности спектральных линий этих мазеров (б)

больше 1 Ян. Минимальное необходимое для наблюдений спектральных линий мазеров значение СКО шума в большинстве случаев было более 0.2 Ян (рис. 4, б). Данные для рис. 4 получены из каталога [14].

Таким образом, для наблюдения мазеров на молекулах воды на частоте 22 ГГц и метанольных мазеров на частоте 6.7 ГГц необходимо добиться значения СКО шума, не превышающего $\approx 0.2 \div 0.3$ Ян. Для наблюдения мазеров ОН в возбужденном состоянии на частоте 6.035 ГГц необходимо иметь СКО шума ≈ 0.1 Ян и меньше.

Исходя из вышесказанного, можно оценить значение шумовой температуры системы, которое необходимо для достижения таких значений СКО шума. Связь между СКО шума $\delta T_{SN}(f, \varphi_{EI})$, СКО регистрируемой спектральной плотности потока $\delta S_R(f, \varphi_{EI})$ и шумовой температурой системы определяется следующими формулами:

$$\delta T_{SN}(f, \varphi_{EI}) = \frac{\alpha T_{SN}(f, \varphi_{EI})}{\sqrt{\Delta f \cdot \Delta \tau}}, \tag{2}$$

$$\delta S_R(f, \varphi_{EI}) = \frac{\alpha T_{SN}(f, \varphi_{EI})}{DPFU(f, \varphi_{EI}) \sqrt{\Delta f \cdot \Delta \tau}},$$

где Δf – частотное разрешение спектроанализатора, $\Delta \tau$ – время накопления сигнала, α – коэффициент, соответствующий различным методам наблюдений.

Таким образом, СКО шума $\delta T_{SN}(f, \varphi_{EI})$ можно уменьшить, снизив $T_{SN}(f, \varphi_{EI})$ или увеличив Δf или $\Delta \tau$. Мы провели расчет $\delta S_R(f, \varphi_{EI})$ для различных значений шумовой температуры системы. Расчеты проведены для $\alpha = 2^{0.5}$ (это значение коэффициента соответствует режиму частотной модуляции и наблюдению одной поляризации) и для $\alpha = 1$ (соответствует наблюдению обеих поляризаций) при частотном разрешении $\Delta f = 1$ кГц и $\Delta f = 3$ кГц. Полученные результаты показаны на рис. 5.

Приемная система с $T_{SN} \approx 30$ К позволяет получать $\delta S_R = 0.1$ Ян за время накопления сигнала $\Delta \tau \approx 40 \div 180$ мин в зависимости от метода наблюдений. Это дает возможность проводить наблюдения на современном уровне для решения любых спектральных задач в диапазонах

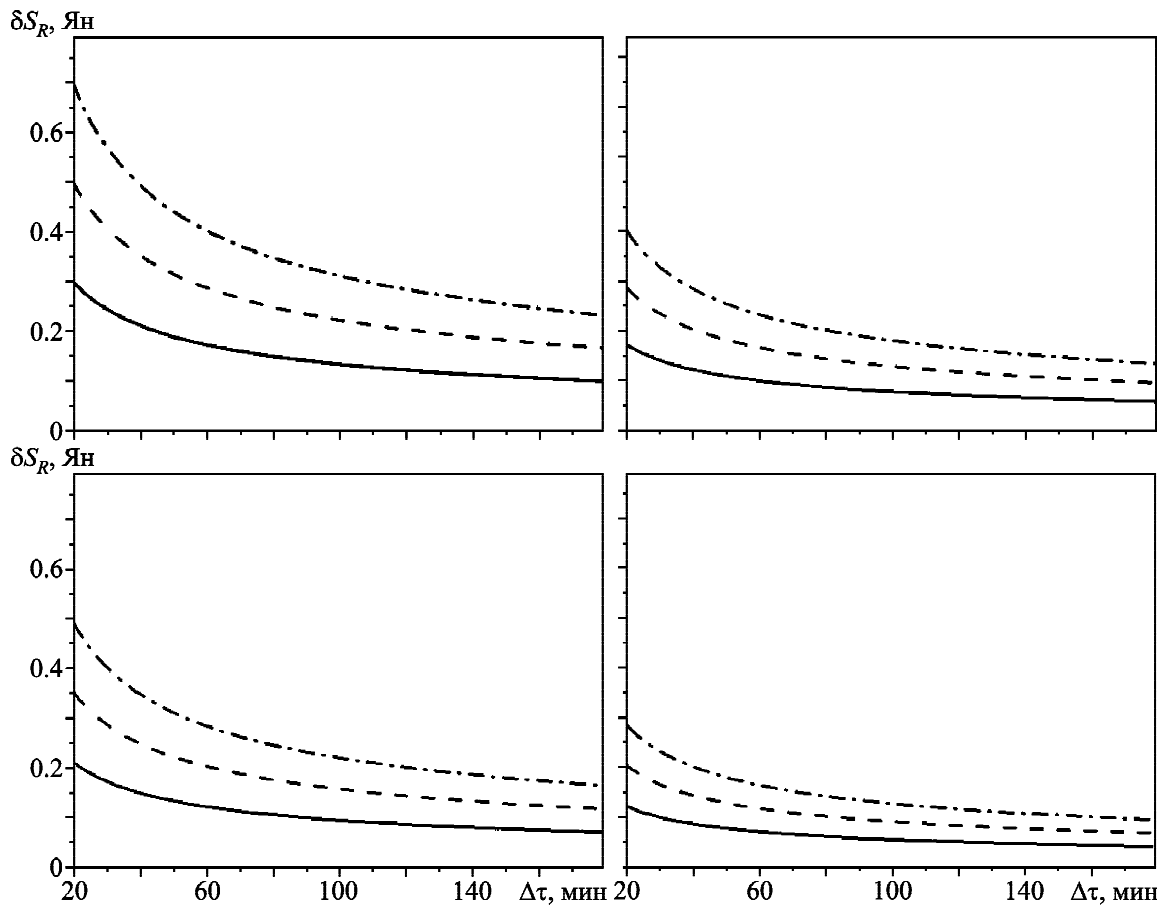


Рис. 5. Зависимость флуктуационной чувствительности радиотелескопа $\delta S_R(f, \varphi_{El})$, которая достигается при измерении спектральной плотности потока, от времени накопления $\Delta\tau$ в частотной полосе $\Delta f = 1 \text{ кГц}$ (справа) и $\Delta f = 3 \text{ кГц}$ (слева) для трех значений шумовой температуры системы: сплошная линия – $T_{SN} = 30 \text{ К}$, штриховая линия – $T_{SN} = 50 \text{ К}$, штрихпунктирная линия – $T_{SN} = 70 \text{ К}$. Верхние панели – $\alpha = \sqrt{2}$, нижние панели – $\alpha = 1$

частот, определенных выше. Увеличение шумовой температуры системы существенно увеличивает время наблюдения источника и ограничивает количество научных задач, которые могут быть решены с помощью антенной системы MARK-4В, рассматриваемой в этой работе. Оценки $T_{SN}(f, \varphi_{El})$ соответствуют значениям шумовой температуры системы, достигнутым на современных радиотелескопах (см. табл. 3).

Исходя из значения шумовой температуры системы, можно оценить необходимую шумовую температуру приемника. Шумовую температуру системы можно определить по формуле $T_{SN}(f, \varphi_{El}) = T_{REC}(f) + T_{BWG}(f) + T_{SKY}(f, \varphi_{El})$, где $T_{REC}(f)$ – собственная температура шумов приемника; $T_{BWG}(f)$ – дополнительный вклад в температуру системы, вносимый лучеводом; $T_{SKY}(f, \varphi_{El})$ – сумма нескольких составляющих: шумовой температуры фона, атмосферного вкла-

да, влияния боковых лепестков диаграммы направленности антенны и других.

$T_{SKY}(f, \varphi_{El})$ зависит от параметров антенны и атмосферы. В табл. 3 приведены параметры радиотелескопов без лучеводов (т. е. $T_{BWG} = 0$). По данным этой таблицы можно оценить значение $T_{SKY}(f, 90^\circ)$ для радиотелескопов без лучеводов. На частоте 6 ГГц оно составляет $15 \div 20 \text{ К}$ и на частоте 22 ГГц – $20 \div 25 \text{ К}$.

В антеннах с лучеводом вклад дифракционных потерь в лучевод для низкочастотного участка С диапазона может быть весьма существенным. Он даже может превышать вклад собственной температуры шумов охлаждаемого приемника. Однако за счет того, что коэффициент использования поверхности в рабочей полосе частот у антенн с лучеводами больше, чем у антенн с облучателями, расположенными во вторичном фокусе, чувствительности обоих типов антенн могут быть соизмеримы.

Использование приемников с большими шумовыми температурами приводит к существенному увеличению времени накопления сигнала или к уменьшению частотного разрешения. Поэтому в настоящее время радиотелескопы оснащаются приемниками с минимальными возможными значениями шумовых температур. Лучшие приемники, установленные на радиотелескопах, имеют температуры собственных шумов менее 15 К на частотах менее 6 ГГц и менее 30 К на частоте ≈ 22 ГГц.

На частотах до 10 ГГц шумовая температура неба в направлении зенита не превышает 10 К. В нее вносят вклад две составляющие – реликтовый фон и отражение излучения тепловых шумов Земли от облаков. Предполагается, что в этом случае температура источника намного меньше других составляющих. Шумовая температура лучевода также может быть меньше 10 К. Например, для подобных антенн было рассчитано, что на частоте 6.7 ГГц шумовая температура лучевода составляет 5.5 К [15]. То есть сумма значений шумовой температуры неба и лучевода равна $\approx 10 \div 20$ К. На частотах около 6 ГГц необходимо иметь приемник с собственной шумовой температурой не выше 15 К, чтобы общая шумовая температура системы не превышала рассчитанных границ. Это значение достижимо для современных приемников с двухконтурным криогенным охлаждением. На двух радиотелескопах BWG типа в Японии были получены следующие значения шумовой температуры системы в направлении зенита: $T_{SN} \approx 30 \div 40$ К на частоте $f = 6$ ГГц, $T_{SN} \approx 25 \div 35$ К на частоте $f = 8$ ГГц, $T_{SN} \approx 40 \div 100$ К на частоте $f = 22$ ГГц зимой и $T_{SN} \approx 150 \div 500$ К на частоте $f = 22$ ГГц летом [4].

На частотах выше 15 ГГц значительный вклад в шумовую температуру системы вносит атмосфера. Поэтому с ростом частоты значение этого вклада будет сильно зависеть от погодных условий. В то же время в К диапазоне вклад лучевода в температуру шумов системы будет несущественным, и этот диапазон в данном разделе не рассматривался.

Из вышесказанного следует, что для адекватного учета влияния погодных условий и процессов распространения электромагнитных волн в ионосфере на наблюдательные данные антенную систему MARK-4В нужно укомплектовать авто-

матической метеорологической станцией, двух-частотным GPS приемником, а также радиометром с рупорной антенной для измерения содержания водяных паров в атмосфере. Полученный набор параметров атмосферы и ионосферы позволит строить их модели непосредственно в месте расположения радиотелескопа.

5. Требования к спектроанализатору

Мазеры в направлении некоторых объектов излучают в относительно широком диапазоне частот (его ширина может составлять несколько мегагерц). Обычно одна часть из зарегистрированных мазерных спектральных линий соответствует объекту исследований, а вторая часть относится к близким областям звездообразования и попадает в регистрируемые данные через относительно широкую диаграмму направленности радиотелескопов. Для корректного выравнивания нулевой линии спектров необходимо иметь участок частотного диапазона, который не содержит спектральных линий. Поэтому ширина полосы спектроанализатора должна быть больше, чем диапазон частот, в котором присутствуют спектральные линии мазеров. На рис. 6 показаны гистограммы распределения частотных диапазонов, в которых наблюдаются различные мазеры. Как видно из этого рисунка, ширина полосы спектроанализатора должна быть не менее $2 \div 6$ МГц [11–14].

Диапазон лучевых скоростей, с которыми движутся объекты Галактики, не превышает ± 125 км/с. Ширины частотных полос $\Delta F_{\max MW}$, соответствующие этому диапазону скоростей, указаны в табл. 4, где приведены параметры наблюдений на современных радиотелескопах: F_0 – центральная частота, на которой проводятся наблюдения; ΔV_{line} – характерная ширина профиля линии в размерности лучевых скоростей; Δf_{line} – эта же ширина в размерности частоты; Δf_{obs} и ΔF_{obs} – частотное разрешение и ширина полосы приемника, использованного при наблюдениях. Эти полосы практически всегда больше, чем предыдущая оценка. В настоящее время ширины полос спектроанализаторов, установленных на радиотелескопах, сравнимы или больше, чем $\Delta F_{\max MW}$.

Как видно из табл. 1, гидроксильные мазеры в высоковозбужденном состоянии излучают

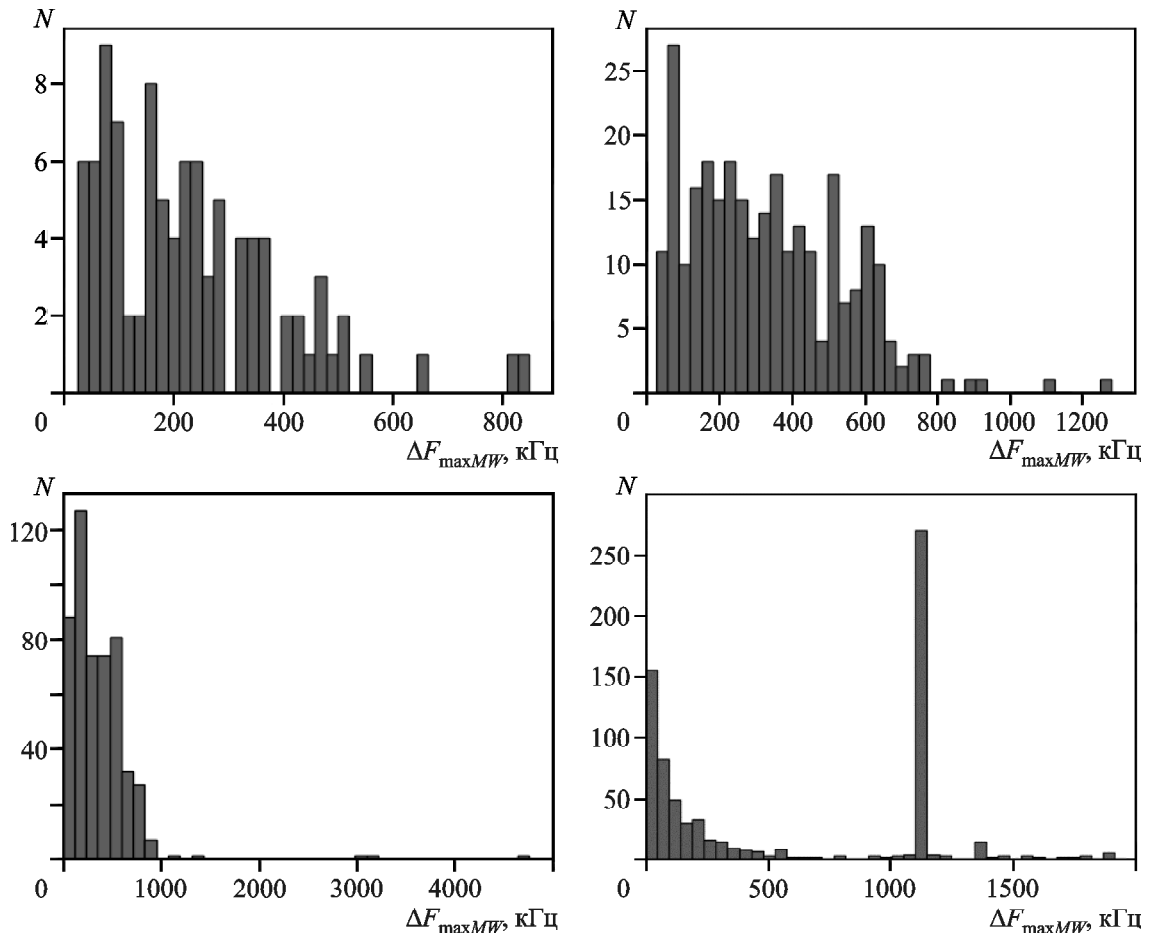


Рис. 6. Гистограммы распределения мазерных линий: линии ОН вблизи частоты 6 ГГц (верхняя левая панель), линии CH_3OH вблизи частоты 6.7 ГГц (верхняя правая панель, нижняя левая панель), линии H_2O вблизи частоты 22 ГГц (нижняя правая панель), – в рабочей полосе частот радиотелескопа

Таблица 4. Параметры наблюдений на современных радиотелескопах

| F_0 , ГГц | ΔV_{line} , км/с | Δf_{line} , кГц | Δf_{obs} , кГц | ΔF_{obs} , МГц | $\Delta F_{max MW}$, кГц | Литература |
|-------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|------------|
| 1.665 | ≈ 5 | ≈ 28 | 1.52 | 4 | ≈ 1400 | [16] |
| 6.035 | ≈ 0.4 | ≈ 8 | 1.53 | 3.125 | ≈ 5000 | [17] |
| 6.7 | ≈ 0.5 | ≈ 11 | 2 | 4 | ≈ 5600 | [18] |
| 22 | ≈ 5 | 370 | 2 | 16 | ≈ 18000 | [19] |

на частотах 6030.747 и 6035.092 МГц. Обычно исследования спектральных линий гидроксильных мазеров проводится одновременно [20–22]. Поэтому желательно иметь спектроанализатор с шириной полосы, покрывающей частотную разницу между двумя типами мазеров ≈ 5 МГц плюс несколько мегагерц для уверенного наблюдения всех линий в режиме частотной модуляции. Таким образом, для исследования гидро-

ксильных мазеров желательно иметь спектроанализатор с шириной полосы в $8 \div 10$ МГц.

Частотное разрешение спектроанализатора должно быть намного меньше минимальной ширины спектральных линий. Возбужденные гидроксильные мазеры являются хорошим инструментом для исследования магнитных полей в среде вокруг мазера. Круговая поляризация спектров позволяет распознать возможные зеемановские пары.

Магнитное поле со значением магнитной индукции даже в 1 мГс приводит к расщеплению спектра на две компоненты с противоположной круговой поляризацией. Это разделяет обе компоненты по лучевым скоростям на 0.079 км/с при расщеплении на частоте 6030 МГц и 0.059 км/с при расщеплении на частоте 6035 МГц [22, 23]. Такое разделение по скоростям соответствует частотным сдвигам ≈ 3.9 кГц и ≈ 2.9 кГц. Поэтому для уверенного исследования магнитных полей в областях звездообразования необходимо иметь частотное разделение спектроанализатора порядка 1 кГц.

Гистограмма распределения напряженности магнитных полей (см. рис. 7), которая определяется по наблюдениям возбужденных гидроксильных мазеров в двух поляризациях, иллюстрирует необходимость иметь высокое частотное разрешение. Провал в распределении вблизи нуля не имеет физического объяснения и возникает только из-за того, что при использовании аппаратуры с недостаточным частотным разрешением нельзя уверенно определять магнитные поля с напряженностью в диапазоне $|\vec{B}| < 1$ мГс.

6. Требования к гетеродину приемника

Для спектральных исследований необходимы низкий уровень фазовых шумов гетеродина и высокая относительная стабильность частоты. Гетеродины с необходимыми параметрами обычно

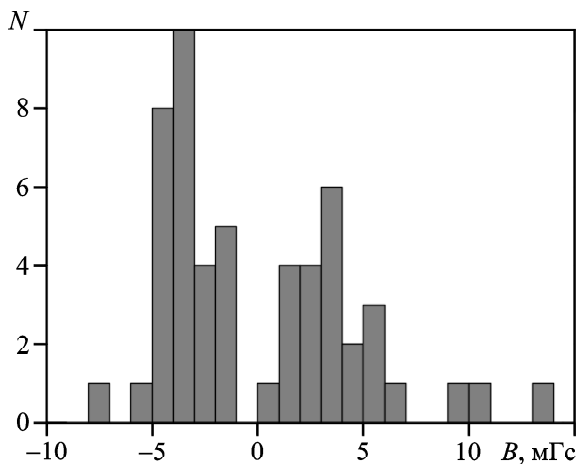


Рис. 7. Гистограмма распределения магнитных полей, которые определены по наблюдениям гидроксильных мазеров в возбужденном состоянии [20]

строятся по схеме с фазовой автоподстройкой частоты. Количественные требования определяются кругом решаемых задач и для случая спектральных наблюдений, рассматриваемого в этой статье, могут быть сформулированы следующим образом.

Относительная нестабильность частоты должна быть не хуже $100/(6 \cdot 10^9) \approx 1.7 \cdot 10^{-8}$ для несущей частоты 6 ГГц и $200/(22 \cdot 10^9) \approx 0.9 \cdot 10^{-8}$ для несущей частоты 22 ГГц. Уровень фазовых шумов при отстройке частоты на 1 кГц должен быть не хуже -50 дБн.

Частота гетеродина должна устанавливаться с точностью, намного меньшей ширины канала спектроанализатора (≈ 100 Гц). Иначе потребуются дополнительная математическая обработка результатов наблюдений.

Для организации режима частотной модуляции гетеродин должен обеспечивать быстрое изменение значения частоты на 1 МГц (целое число каналов) для корректного определения нулевой линии.

Спектральные наблюдения мазерных линий требуют большого времени накопления сигнала и высокой стабильности частоты гетеродина, которая должна изменяться для компенсации различных движений Земли (суточное вращение вокруг оси, движение по орбите вокруг Солнца и пр.). Это предопределяет дополнительные требования к гетеродину. Его частота должна перестраиваться в процессе наблюдений с шагом 100 Гц.

На рис. 8 показано смещение наблюдаемой частоты через 30 с и через 10 мин после начала наблюдений. Расчеты проведены для антенной системы MARK-4B на начало мая 2019 г. Как видно из рисунка, спустя 30 с наблюдений смещение частоты незначительно, но спустя 10 мин для определенных областей неба смещение частоты будет достигать $\Delta f \approx 300$ Гц. При условии, что мазерные линии очень узкие (их ширина может быть менее 1 кГц), такое смещение будет уже существенно сказываться на результатах наблюдений. Поэтому мы рекомендуем переключать частоту гетеродина не реже чем 1 раз в 2 мин. Конечно, движение Земли можно учесть специальной математической обработкой после наблюдений, но технически очень просто реализовать корректировку частоты ге-

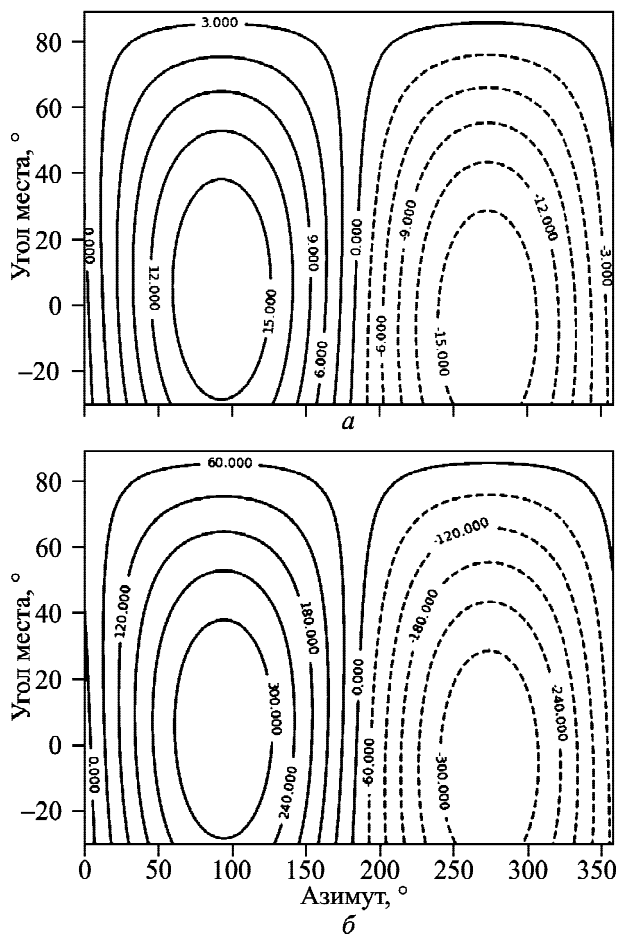


Рис. 8. Смещение наблюдаемой частоты источника за 30 с накопления сигнала (а) и аналогичное смещение за 10 мин (б). В качестве опорной частоты использовалась частота 6.7 ГГц. Значения на графиках в поле рисунков приведены в герцах

теродина, что значительно ускорит и облегчит процесс обработки данных.

7. Методика калибровки для спектральных наблюдений

Калибровки сигналов, принимаемых радиотелескопами сантиметрового диапазона, обычно осуществляется с помощью калибраторов, использующих шумовые диоды [24]. Назначение калибровки – нормировать сигнал, принимаемый в единицах спектральной плотности потока. Можно выделить несколько отдельных этапов процесса калибровки:

- измерение температуры шума калибратора,
- измерение $DPFU(f, \varphi_{El})$ (см. уравнение (1)),
- калибровка уровня сигнала исследуемого источника.

7.1. Измерение температуры шума калибратора

Дополнительную температуру шума, которая добавляется в шум приемника вследствие включения калибратора, можно измерить двумя способами: “У” методом с последовательным использованием “холодной” и “теплой” нагрузок и/или с помощью небесного источника, спектральная плотность потока которого считается калиброванной. В обоих случаях измерения должны вестись во всем диапазоне рабочих частот, в котором предполагается проводить наблюдения.

При использовании “У” метода с последовательным подключением “холодной” и “теплой” нагрузок на вход приемника поочередно подают излучение от “холодной” и “теплой” нагрузок с известными температурами. Необходимо, чтобы нагрузки при этом находились в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР). После достижения ЛТР измеряют уровень спектральной плотности мощности принимаемого сигнала для каждой из нагрузок. Затем, используя одну из нагрузок на входе, включают калибратор. В другом цикле калибратор выключают. Спектральное распределение температуры шума, которая добавилась в результате включения шумового диода $T_{cal}(f)$, можно определить по формуле из [24]:

$$T_{cal}(f) = \frac{P_{on}^{cold}(f) - P_{off}^{cold}(f)}{P_{off}^{hot}(f) - P_{off}^{cold}(f)} (T^{hot} - T^{cold}),$$

где $P_{on}^{cold}(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала, зарегистрированного при подключенной “холодной” нагрузке на входе и включенном калибраторе; $P_{off}^{cold}(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала, зарегистрированного при подключенной “холодной” нагрузке на входе и выключенном калибраторе; $P_{off}^{hot}(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала, зарегистрированного при подключенной “теплой” нагрузке на входе и выключенном калибраторе; T^{hot} – температура “теплой” нагрузки; T^{cold} – температура холодной нагрузки.

В качестве “холодной” нагрузки обычно используют нагрузки, которые охлаждают жидким азотом. Этот метод требует значительного времени, а также наличия жидкого азота, однако

не нужно никакой дополнительной информации (например, о $DPFU(f, \varphi_{El})$), поскольку в состоянии ЛТР шумовая температура нагрузок равна физической.

При измерении температуры шума калибратора по калибровочному источнику проводятся наблюдения калибровочного источника, спектральная плотность потока которого известна. При этом $T_{cal}(f)$ можно определить по формуле из [24]:

$$T_{cal}(f) = DPFU(f, \varphi_{El}) \cdot e^{-\tau(f)/\sin(\varphi_{El})} \times \frac{P_{on}^{ref}(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})}{P_{off}^s(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})} S^{cal}(f),$$

где $\tau(f)$ – оптическая толщина атмосферы в направлении зенита; $P_{on}^{ref}(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала от неба, зарегистрированного приемником при включенном калибраторе; $P_{off}^{ref}(f)$ – параметр, аналогичный предыдущему, но сигнал от неба зарегистрирован приемником при выключенном калибраторе; $P_{off}^s(f)$ – параметр, аналогичный предыдущему, но сигнал зарегистрирован приемником от калибровочного источника при выключенном калибраторе; $S^{cal}(f)$ – спектральная плотность потока калибровочного источника. Этим способом спектральное распределение температуры калибратора можно измерить быстрее, чем “У” методом, но необходимо знать $DPFU(f, \varphi_{El})$ и оптическую толщину атмосферы в направлении зенита.

7.2. Определение коэффициента $DPFU(f, \varphi_{El})$

Если для определения $T_{cal}(f)$ использовать “У” метод, то возможно определить коэффициент $DPFU(f, \varphi_{El})$, решая обратную задачу. Для этого проводятся наблюдения калибровочного источника, спектральная плотность потока $S^{cal}(f)$ которого известна. При этом $DPFU(f, \varphi_{El})$ можно выразить формулой, которая есть простой трансформацией предыдущего уравнения из [24]:

$$DPFU(f, \varphi_{El}) = e^{\tau(f)/\sin(\varphi_{El})} \frac{P_{off}^s(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})}{P_{on}^{ref}(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})} \frac{T_{cal}(f)}{S^{cal}(f)}.$$

Проводя наблюдения калибровочных источников на разных углах места, можно получить соответствующую зависимость $DPFU(f, \varphi_{El})$.

7.3. Определение шумовой температуры системы

Зная $T_{cal}(f)$, можно легко определить шумовую температуру системы. Для этого нужно направить антенну на радиотихий участок неба и найти величину $T_{SN}(f, \varphi_{El})$:

$$T_{SN}(f, \varphi_{El}) = \frac{P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})}{P_{on}^{ref}(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})} T_{cal}(f).$$

7.4. Калибровка сигнала исследуемого источника

Калибровку сигнала исследуемого источника обычно делают непосредственно перед наблюдениями. В дальнейшем рассматриваются методы наблюдения, с использованием которых находится антенная температура источника. Для расчета плотности потока источника $S_s(f)$ пользуются выражением, обратным к (1):

$$S_s(f) = \frac{T_s(f, \varphi_{El}) \cdot e^{\tau(f)/\sin(\varphi_{El})}}{DPFU(f, \varphi_{El})}.$$

Здесь $T_s(f, \varphi_{El})$ – антенная температура объекта.

7.4.1. Континуальный режим

В этом режиме можно выделить два этапа. Каждый этап занимает половину времени наблюдения. На первом этапе антенна наводится на источник, а на втором – на участок холодного неба вблизи наблюдаемого источника. При этом на каждом этапе часть времени калибратор включен, а вторую часть времени выключен. Антенную температуру источника можно выразить формулой [24]:

$$T_s(f, \varphi_{El}) = \frac{T_{cal}(f)}{2} \left[\left(P_{on}^s(f, \varphi_{El}) + P_{off}^s(f, \varphi_{El}) \right) - \left(P_{on}^{ref}(f, \varphi_{El}) + P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El}) \right) \right] \times \left[P_{on}^{ref}(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El}) \right]^{-1}.$$

Продолжительность каждого этапа составляет несколько минут.

7.4.2. Спектральный режим наблюдений с пространственной “ON-OFF” модуляцией

Этот режим аналогичен континуальному режиму, описанному выше. Разница заключается в том, что сигнал $P(f)$ регистрируется не широкополосным детектором, а каждым спектральным каналом. В этом случае рекомендуется пользоваться следующей методикой из [24]:

$$T_s(f, \varphi_{El}) = \frac{1}{2} \left[T_{off}^{sys}(f, \varphi_{El}) \frac{P_{off}^s(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})}{P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El})} + \left(T_{off}^{sys}(f, \varphi_{El}) + T_{cal}(f) \right) \frac{(P_{on}^s(f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f, \varphi_{El}))}{P_{on}^{ref}(f, \varphi_{El})} \right],$$

где $T_{off}^{sys}(f, \varphi_{El}) = T_{cal}(f)(\alpha_{off}(f, \varphi_{El}) - 1)^{-1}$ – температура всей системы приема РТ-32 при выключенном калибраторе, $\alpha_{off}(f, \varphi_{El})$ – полином невысокой (меньше 4) степени. Параметры этого полинома рассчитываются при аппроксимации отношения $P_{on}^{ref}(f)/P_{off}^{ref}(f)$ с помощью метода наименьших квадратов.

7.4.3. Спектральный режим наблюдений с “частотной модуляцией”

В этом режиме также можно выделить два этапа. Каждый этап занимает половину времени наблюдения. Антенна постоянно направлена на источник. На первом этапе частота гетеродина смещается, что приводит к смещению линии на наблюдаемом спектре на величину $+\Delta f$, а на втором смещение линии происходит в обратную сторону, $-\Delta f$. При этом на каждом этапе часть времени калибратор включен, а вторую часть выключен. Антенную температуру источника можно выразить формулами из [24]:

$$T_{sig}^s(f, \varphi_{El}) = \frac{1}{2} \times \left[T_{ref}^{sys}(f, \varphi_{El}) \frac{P_{off}^s(f + \Delta f, \varphi_{El}) - P_{off}^{ref}(f + \Delta f, \varphi_{El})}{P_{off}^{ref}(f + \Delta f, \varphi_{El})} + \right.$$

$$\left. + \left(T_{ref}^{sys}(f, \varphi_{El}) + T_{cal}(f) \right) \times \frac{(P_{on}^s(f + \Delta f, \varphi_{El}) - P_{on}^{ref}(f + \Delta f, \varphi_{El}))}{P_{on}^{ref}(f + \Delta f, \varphi_{El})} \right],$$

$$T_{ref}^s(f, \varphi_{El}) = \frac{1}{2} \times \left[T_{sig}^{sys}(f, \varphi_{El}) \frac{P_{off}^{ref}(f - \Delta f, \varphi_{El}) - P_{off}^s(f - \Delta f, \varphi_{El})}{P_{off}^s(f - \Delta f, \varphi_{El})} + \left(T_{sig}^{sys}(f, \varphi_{El}) + T_{cal}(f) \right) \times \frac{(P_{on}^{ref}(f - \Delta f, \varphi_{El}) - P_{on}^s(f - \Delta f, \varphi_{El}))}{P_{on}^s(f - \Delta f, \varphi_{El})} \right],$$

$$T_s(f, \varphi_{El}) = \frac{1}{2} \left[T_{sig}^s(f, \varphi_{El}) + T_{ref}^s(f, \varphi_{El}) \right],$$

где $T_{ref}^{sys}(f, \varphi_{El}) = T_{cal}(f)(\alpha_{ref}(f, \varphi_{El}) - 1)^{-1}$ – температура всей системы приема РТ-32, полученная при наблюдении известного радиоисточника из каталога; $\alpha_{ref}(f, \varphi_{El})$ – полином невысокой (меньше 4) степени (параметры этого полинома рассчитываются при аппроксимации отношения $P_{on}^{ref}(f + \Delta f)/P_{off}^{ref}(f + \Delta f)$ с помощью метода наименьших квадратов); $T_{sig}^{sys}(f, \varphi_{El}) = T_{cal}(f)(\alpha_{sig}(f, \varphi_{El}) - 1)^{-1}$ – параметры, аналогичные предыдущим, полученные при наведении не на опорный, а на исследуемый источник излучения.

Многие величины в этих формулах зависят от частоты и от угла места. На практике для точных оценок необходимо иметь возможность менять длительность каждого этапа наблюдений от нескольких секунд до нескольких минут.

7.4.4. Учет оптической толщины атмосферы

Для правильного учета оптической толщины атмосферы желательно использовать ее модель [25, 26] или можно использовать дополнительный радиометр. В простейшем случае учет оптической толщины можно провести по следующей схеме. Шумовую температуру системы $T_{SN}(f, \varphi_{El})$ можно представить в виде:

$$T_{SN}(f, \varphi_{El}) = T_{SN0}(f) + T_{atm}(f) \cdot (1 - e^{-\tau(f)/\sin(\varphi_{El})}) \approx T_{SN0}(f) + T_{atm}(f) \cdot \tau(f)/\sin(\varphi_{El}), \quad (3)$$

где $T_{SN0}(f)$ – шумовая температура, состоящая из суммы температур приемника, лучевода и вклада антенны; $T_{atm}(f)$ – эффективная температура атмосферы. Последняя в К диапазоне равна $T_{atm}(f_K) \approx T_{gr} - 17$, где T_{gr} – температура атмосферы у поверхности Земли. Измерив $T_{sys}(f, \varphi_{El})$ при двух различных углах φ_{El} , можно найти $T_{SN0}(f)$ и $\tau(f)$.

Теперь из уравнения (3) получаем

$$\tau(f) = -\sin(\varphi_{El}) \cdot \ln \left(1 - \frac{T_{SN}(f, \varphi_{El}) - T_{SN0}(f)}{T_{atm}(f)} \right).$$

8. Расчет необходимого коэффициента усиления аналоговой части приемника

Необходимое усиление аналогового тракта (G_a) выбирается на основе двух известных характеристик. Во-первых, это нужный уровень сигнала на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) анализатора спектра (U_{out}), который (в предположении АЦП малой разрядности, от 1 до 8, как, например, в сверхдлиннобазовой интерферометрии) составляет 100 мВ для шумоподобного сигнала на нагрузке 50 Ом. Во-вторых, это эффективное значение напряжения сигнала на входе приемника (U_{in}), которое может быть оценено исходя из известных параметров – шумовой температуры системы ($T_{SN}(f, \varphi_{El}) \approx 30$ К), рабочей полосы частот ($\Delta f = 1$ ГГц) и входного сопротивления сверхмалошумящего усилителя ($R = 50$ Ом):

$$G_a = 20 \lg \left(\frac{U_{out}}{2(kT_{SN}(f, \varphi_{El})\Delta f R)^{0.5}} \right) \approx 85 \text{ дБ}.$$

Охлаждаемый усилитель должен обеспечить “отрыв” от шумов, т. е. от шумов последующей части тракта. Соответственно, коэффициент усиления ≈ 30 дБ, стандартный для устройств такого рода, является достаточным. Последующая часть тракта должна иметь усиление 55 дБ и возможность электронного (программного и/или ручного) регулирования в пределах 5 ÷ 40 дБ.

При этом возможно исключение некоторых каскадов усиления (30 ÷ 40 дБ), что обеспечивает большую температурную стабильность общего коэффициента передачи тракта. Это становится возможным, поскольку предполагается использование регистратора с большим динамическим диапазоном и АЦП с разрядностью 12 бит. Как показывает практика, шаг регулирования сквозного усиления должен составлять 0.5 ÷ 1 дБ.

9. Требования к линейности аналоговой части приемника

В условиях работы приемной системы в “стандартном” режиме диаграммной модуляции, с динамическим диапазоном около 3 дБ, особых требований к линейности, на первый взгляд, нет. Они могут появиться в нестандартных наблюдениях с калибровкой по природным объектам. Практика разработки и использования аналогичных систем показывает, что выходной усилитель на базе усилительного блока общего назначения, с нормированным уровнем нелинейных искажений (–40 дБ по сумме 2-й и 3-й гармоник), полностью удовлетворяет требованиям линейности.

Но, поскольку в качестве регистратора планируется использовать цифровой приемник с АЦП на входе, то сквозное усиление обеспечивается только аналоговым приемником. Его значение рассчитано выше. Уровень максимального аналогового сигнала, который АЦП конвертирует без перегрузки, близок к 1 В, и, следовательно, динамический диапазон в полосе регистратора 0 ÷ 1 ГГц для АЦП с разрядностью 12 ÷ 14 бит должен лежать в интервале 1 мВ ÷ 1 В. При этом точка компрессии 1 дБ (снижение коэффициента передачи на 1 дБ при наличии помехи с определенным уровнем) должна лежать на несколько децибел выше максимального аналогового сигнала. Если планируется использование АЦП с максимальным сигналом ≈ 7 дБм, то точка компрессии должна быть выше 12 ÷ 14 дБм (20 мВт). Но, поскольку, как показано выше, нужны два преобразования частоты, линейность должен обеспечивать только последний усилитель с полосой 0 ÷ 1 ГГц, что также не является жестким требованием для современной усилительной техники.

10. Выводы

Определены основные параметры радиотелескопа РТ-32, создаваемого на базе лучевой антенной системы MARK-4В, необходимые для проведения спектральных наблюдений.

Сформулированы основные астрофизические задачи, доступные для решения на MARK-4В (РТ-32) в рабочем диапазоне частот в режиме спектральных наблюдений.

Приведены требования к приемной системе, спектроанализатору и регистратору. Описаны методики калибровки, необходимые для проведения спектральных наблюдений.

Наиболее строгие требования к точности наведения антенны предъявляются при наблюдениях на максимальной частоте 22 ГГц. В этом случае ошибка наведения не должна превышать 9", что сравнимо с ошибками наведения на других радиотелескопах. Шумовая температура приемника T_{REC} должна быть как можно меньше. Лучшие астрономические приемники имеют $T_{REC} \approx 15$ К на частоте ≈ 6 ГГц и $T_{REC} \approx 20 \div 30$ К на частоте 22 ГГц. Рабочая полоса спектроанализатора должна быть не менее 2 МГц при спектральном разрешении $\Delta f = 1 \div 2$ кГц. Относительная нестабильность частоты гетеродина должна быть не хуже 10^{-8} , а уровень его фазовых шумов при отстройке частоты на 1 кГц – не хуже –50 дБн. Сквозной коэффициент передачи (усиления) должен составлять 85 дБ, из которых 30 дБ – усиление малошумящего входного охлаждаемого усилителя. Выходной аналоговый усилитель, сигнал с которого подается на АЦП, должен обеспечивать динамический параметр Р1дБ не хуже 13 дБм.

Результаты настоящей работы подтверждают целесообразность модернизации антенной системы MARK-4В и создания на ее базе радиотелескопа РТ-32. Этот радиотелескоп можно будет использовать, в том числе и для проведения спектральных наблюдений. Основные технические и эксплуатационные характеристики, а также основные параметры РТ-32 не будут уступать мировым аналогам. Это даст возможность проводить спектральные наблюдения мазеров (например, гидроксильных, CH_3OH , H_2O мазеров и др.), исследовать тепловое излучение молекул, например, молекулы NH_3 (эта молекула яв-

ляется базовой для определения температур в молекулярных облаках), проводить исследования внегалактических источников, принимать активное участие в РСДБ наблюдениях и пр. Создание радиотелескопа на базе антенной системы MARK-4В позволит украинским ученым проводить актуальные исследования мирового уровня, а также частично компенсировать утрату радиотелескопов РТ-70 (Евпатория) и РТ-22 (Симеиз), произошедшую в результате аннексии Крымского полуострова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lemley C. and Castelaz M. W. Design and Construction of a New 1420 MHz Receiver System for a 12-meter Radio Telescope. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. 2014. Vol. 223. id. 148.29.
2. Bleiders M., Bezrukovs V., and Orbidans A. Performance Evaluation of Irbene RT-16 Radio Telescope Receiving System. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 2017. Vol. 54, Is. 6. P. 42–53. DOI: 10.1515/lpts-2017-0040
3. Woodburn L., Natusch T., Weston S., Thomasson P., Godwin M., Granet C., and Gulyaev S. Conversion of a New Zealand 30-metre telecommunications antenna into a radio telescope. *Publ. Astron. Soc. Aust.* 2015. Vol. 32. id. e017. DOI: 10.1017/pasa.2015.13
4. Yonekura Y., Saito Y., Sugiyama K., Soon K. L., Momose M., Yokosawa M., Ogawa H., Kimura K., Abe Y., Nishimura A., Hasegawa Y., Fujisawa K., Ohyama T., Kono Y., Miyamoto Y., Sawada-Satoh S., Kobayashi H., Kawaguchi N., Honma M., Shibata K. M., Sato K., Ueno Y., Jike T., Tamura Y., Hirota T., Miyazaki A., Niinuma K., Sorai K., Takaba H., Hachisuka K., Kondo T., Sekido M., Murata Y., Nakai N., and Omodaka T. The Hitachi and Takahagi 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 2016. Vol. 68, Is. 5. id. 74 DOI: 10.1093/pasj/psw045
5. Duah Asabere B., Gaylard M., Horellou C., Winkler H., and Jarrett, T. Radio astronomy in Africa: the case of Ghana. *arXiv e-prints*. 2015. arXiv:1503.08850 [astro-ph.IM].
6. Copley C. J., Thondikulam V., Loots A., Bangani S., Cloete K., Combrinck L., Gioio S., Ludick, J., Nicolson G., Pollak A. W., Pretorius P., Quick J. F. H., Taylor G., Ebrahim F., Humphreys C., Maake K., Maganane R., Majinjiva R., Mapunda A., Manzini M., Mogakwe N., Moseki A., Qwabe N., Royi N., Rosie K., Smith J., Schietekat S., Toruvanda O., Tong C., van Niekerk B., Walbrugh W., and Zeeman W. The African Very Long Baseline Interferometry Network: The Ghana Antenna Conversion. *arXiv e-prints*. 2016. arXiv:1608.02187 [astro-ph.IM].
7. Loots A. The African VLBI network project. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. 2015. Vol. 225. id. 126.02.
8. Ульянов О. М., Резниченко А. М., Захаренко В. В., Антюфеев А. В., Королев А. М., Патока А. Н., При-

- саяжный В. И., Поихало А. В., Войтюк В. В., Мамарев В. Н., Ожинский В. В., Власенко В. П., Чмиль В. М., Лебедь, В. И., Паламар М. И., Чайковский А. В., Пастернак Ю. В., Стрембицкий М. А., Натаров М. П., Стещенко С. А., Гламаздин В. В., Шубный А. И., Кириленко А. А., Кулик Д. Ю., Коноваленко А. А., Литвиненко Л. Н., Яцкив Я. С. Создание радиотелескопа РТ-32 на базе Антенной системы MARK-4В. 1. Проект модернизации и первые результаты. *Радиофизика и Радиоастрономия*. 2019. Т. 24, № 2. С. 87–116. DOI: 10.15407/rpra.24.02.087
9. Novosyadlyj V., Sergijenko O., and Shulga V. M. Molecules in the early universe. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2017. Vol. 33, Is. 6. P. 255–264. DOI: 10.3103/S088459131706006X
 10. Borkowski K. M. Near Zenith Tracking Limits for Altitude-Azimuth Telescopes. *Acta Astronomica*. 1987. Vol. 37, Is. 1. P. 79–88.
 11. Pestalozzi M. R., Minier V., and Booth R. S. A general catalogue of 6.7-GHz methanol masers: I. Data. *Astron. Astrophys.* 2005. Vol. 432, No. 2. P. 737–742. DOI: 10.1051/0004-6361/20035855
 12. Szymczak M., Wolak P., Bartkiewicz A., and Borkowski K. M. The Torun catalogue of 6.7 GHz methanol masers. *Astronomische Nachrichten*. 2012. Vol. 333, Is. 7. P. 634–639. DOI: 10.1002/asna.201211702
 13. Avison A., Quinn L. J., Fuller G. A., Caswell J. L., Green J. A., Breen S. L., Ellingsen S. P., Gray M. D., Pestalozzi M., Thompson M. A., and Voronkov M. A. Excited-state hydroxyl maser catalogue from the methanol multibeam survey – I. Positions and variability. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 461, Is. 1. P. 136–155. DOI: 10.1093/mnras/stw1101
 14. Valdettaro R., Palla F., Brand J., Cesaroni R., Comoretto G., Di Franco S., Felli M., Natale E., Palagi F., Panella D., and Tofani G. The Arcetri Catalog of H₂O maser sources: Update 2000. *Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 368, No. 3. P. 845–865. DOI: 10.1051/0004-6361:20000526
 15. Venter M. and Bolli P. Electromagnetic analysis and preliminary commissioning results of the shaped dual-reflector 32-m Ghana radio telescope. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 321, Is. 1. id. 12003. DOI: 10.1088/1757-899X/321/1/012003
 16. Deacon R. M., Chapman J. M., and Green A. J. OH Maser Observations of Likely Planetary Nebulae Precursors. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2004. Vol. 155, No. 2. P. 595–622. DOI: 10.1086/425329
 17. Al-Marzouk A. A., Araya E. D., Hofner P., Kurtz S., Linz H., and Olmi L. Discovery of 6.035 GHz Hydroxyl Maser Flares in IRAS 18566+0408. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 750, No. 2. id. 170. DOI: 10.1088/0004-637X/750/2/170
 18. Szymczak M., Olech M., Sarniak R., Wolak P., and Bartkiewicz A. Monitoring observations of 6.7 GHz methanol masers. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. Vol. 474, Is. 1. P. 219–253. DOI: 10.1093/mnras/stx2693
 19. Deacon R. M., Chapman J. M., Green A. J., and Sevenson M. N. H₂O Maser Observations of Candidate Post-AGB Stars and Discovery of Three High-Velocity Water Sources. *Astrophys. J.* 2007. Vol. 658, No. 2. P. 1096–1113. DOI: 10.1086/511383
 20. Caswell J. L. Spectra of OH masers at 6035 and 6030 MHz. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2003. Vol. 341, Is. 2. P. 551–568. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2003.06418.x
 21. Baudry A., Desmurs J. F., Wilson T. L., and Cohen R. J. A survey of star-forming regions in the 5 cm lines of OH. *Astron. Astrophys.* 1997. Vol. 325. P. 255–268.
 22. Green J. A., Caswell J. L., and McClure-Griffiths N. M. Excited-state hydroxyl maser polarimetry: who ate all the ps? *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2015. Vol. 451, Is. 1. P. 74–92. DOI: 10.1093/mnras/stv936
 23. Caswell J. L., Kramer B. H., and Reynolds J. E. Magnetic fields from OH maser maps at 6035 and 6030 MHz at Galactic sites 351.417+0.645 and 353.410–0.360. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2011. Vol. 414, Is. 3. P. 1914–1926. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18510.x
 24. Winkel B., Kraus A., and Bach U. Unbiased flux calibration methods for spectral-line radio observations. *Astron. Astrophys.* 2012. Vol. 540. id. A140. DOI: 10.1051/0004-6361/201118092
 25. Stanimirovic S., Altschuler D., Goldsmith P., and Salter C. Single-Dish Radio Astronomy: Techniques and Applications. In: *ASP Conference Proceedings*. Vol. 278. S. Stanimirovic, D. Altschuler, P. Goldsmith, and C. Salter, eds. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2002.
 26. Pardo J. R., Cernicharo J., and Serabyn E. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): An improved model for millimeter/submillimeter applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2001. Vol. 49, No. 12. P. 1683–1694. DOI: 10.1109/8.982447

REFERENCES

1. LEMLEY, C. and CASTELAZ, M. W., 2014. Design and Construction of a New 1420 MHz Receiver System for a 12-meter Radio Telescope. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. vol. 223, id. 148.29.
2. BLEIDERS, M., BEZRUKOV, V. and ORBIDANS, A., 2017. Performance Evaluation of Irbene RT-16 Radio Telescope Receiving System. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* vol. 54, is. 6, pp. 42–53. DOI: 10.1515/lpts-2017-0040
3. WOODBURN, L., NATUSCH, T., WESTON, S., THOMASSON, P., GODWIN, M., GRANET, C. and GULYAEV, S., 2015. Conversion of a New Zealand 30-metre telecommunications antenna into a radio telescope. *Publ. Astron. Soc. Aust.* vol. 32, id. e017. DOI: 10.1017/pasa.2015.13
4. YONEKURA, Y., SAITO, Y., SUGIYAMA, K., SOON, K. L., MOMOSE, M., YOKOSAWA, M., OGAWA, H., KIMURA, K., ABE, Y., NISHIMURA, A., HASEGAWA, Y., FUJISAWA, K., OHYAMA, T., KONO, Y., MIYAMOTO, Y., SAWADA-SATOH, S., KOBAYASHI, H., KAWAGUCHI, N., HONMA, M., SHIBATA, K. M., SATO, K., UENO, Y., JIKE, T., TAMURA, Y., HIROTA, T., MIYAZAKI, A., NIINUMA, K., SORAI, K., TAKABA, H., HACHISUKA, K., KONDO, T., SEKIDO, M., MURATA, Y., NAKAI, N. and OMODAKA, T., 2016. The Hitachi and Takahagi 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* vol. 68, is. 5, id. 74. DOI: 10.1093/pasj/psw045

5. DUAH ASABERE, B., GAYLARD, M., HORELOU, C., WINKLER, H. and JARRETT, T., 2015. Radio astronomy in Africa: the case of Ghana. *arXiv e-prints*. arXiv:1503.08850 [astro-ph.IM].
6. COPLEY, C. J., THONDIKULAM, V., LOOTS, A., BANGANI, S., CLOETE, K., COMBRINCK, L., GIOIO, S., LUDICK, J., NICOLSON, G., POLLAK, A. W., PRETORIUS, P., QUICK, J. F. H., TAYLOR, G., EBRAHIM, F., HUMPHREYS, C., MAAKE, K., MAGANANE, R., MAJINJIVA, R., MAPUNDA, A., MANZINI, M., MOGAKWE, N., MOSEKI, A., QWABE, N., ROYI, N., ROSIE, K., SMITH, J., SCHIETEKAT, S., TORUVANDA, O., TONG, C., VAN NIEKERK, B., WALBRUGH, W. and ZEEMAN, W., 2016. The African Very Long Baseline Interferometry Network: The Ghana Antenna Conversion. *arXiv e-prints*. arXiv:1608.02187 [astro-ph.IM].
7. LOOTS, A., 2015. The African VLBI network project. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. vol. 225, id. 126.02.
8. ULYANOV, O. M., REZNICHENKO, O. M., ZAKHARENKO, V. V., ANTYUFEYEV, A. V., KOROLEV, A. M., PATOKA, O. M., PRISIAZHNI, V. I., POICHALO, A. V., VOITYUK, V. V., MAMAREV, V. N., OZHINSKII, V. V., VLASENKO, V. P., CHMIL, V. M., LEBED, V. I., PALAMAR, M. I., CHAIKOVSKII, A. V., PASTERNAK, YU. V., STREMBITSKII, M. A., NATAROV, M. P., STESHENKO, S. O., GLAMAZDYN, V. V., SHUBNY, A. S., KIRILENKO, A. A., KULIK, D. Y., KONOVALENKO, A. A., LYTUVYENKO, L. M. and YATSKIV, Y. S., 2019. Creating the RT-32 Radio Telescope on the Basis of MARK-4B Antenna System. Modernization Project and First Results. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 24, no. 2, pp. 87–116. DOI: 10.15407/rpra24.02.087
9. NOVOSYADLYJ, B., SERGIJENKO, O. and SHULGA, V. M., 2017. Molecules in the early universe. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. vol. 33, is. 6, pp. 255–264. DOI: 10.3103/S088459131706006X
10. BORKOWSKI, K. M., 1987. Near Zenith Tracking Limits for Altitude-Azimuth Telescopes. *Acta Astronomica*. vol. 37, is. 1, pp. 79–88.
11. PESTALOZZI, M. R., MINIER, V. and BOOTH, R. S., 2005. A general catalogue of 6.7-GHz methanol masers: I. Data. *Astron. Astrophys.* vol. 432, no. 2, pp. 737–742. DOI: 10.1051/0004-6361:20035855
12. SZYMCZAK, M., WOLAK, P., BARTKIEWICZ, A. and BORKOWSKI, K. M., 2012. The Torun catalogue of 6.7 GHz methanol masers. *Astronomische Nachrichten*. vol. 333, is. 7, pp. 634–639. DOI: 10.1002/asna.201211702
13. AVISON, A., QUINN, L. J., FULLER, G. A., CASWELL, J. L., GREEN, J. A., BREEN, S. L., ELLINGSEN, S. P., GRAY, M. D., PESTALOZZI, M., THOMPSON, M. A. and VORONKOV, M. A., 2016. Excited-state hydroxyl maser catalogue from the methanol multibeam survey – I. Positions and variability. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 461, is. 1, pp. 136–155. DOI: 10.1093/mnras/stw1101
14. VALDETTARO, R., PALLA, F., BRAND, J., CESARONI, R., COMORETTO, G., DI FRANCO, S., FELLI, M., NATALE, E., PALAGI, F., PANELLA, D. and TOFANI, G., 2001. The Arcetri Catalog of H₂O maser sources: Update 2000. *Astron. Astrophys.* vol. 368, no. 3, pp. 845–865. DOI: 10.1051/0004-6361:20000526
15. VENTER, M. and BOLLI, P., 2018. Electromagnetic analysis and preliminary commissioning results of the shaped dual-reflector 32-m Ghana radio telescope. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* vol. 321, is. 1, id. 12003. DOI: 10.1088/1757-899X/321/1/012003
16. DEACON, R. M., CHAPMAN, J. M. and GREEN, A. J., 2004. OH Maser Observations of Likely Planetary Nebulae Precursors. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* vol. 155, no. 2, pp. 595–622. DOI: 10.1086/425329
17. AL-MARZOUK, A. A., ARAYA, E. D., HOFNER, P., KURTZ, S., LINZ, H. and OLMÍ, L., 2012. Discovery of 6.035 GHz Hydroxyl Maser Flares in IRAS 18566+0408. *Astrophys. J.* vol. 750, no. 2, id. 170. DOI: 10.1088/0004-637X/750/2/170
18. SZYMCZAK, M., OLECH, M., SARNIAK, R., WOŁAK, P. and BARTKIEWICZ, A., 2018. Monitoring observations of 6.7 GHz methanol masers. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 474, is. 1, pp. 219–253. DOI: 10.1093/mnras/stx2693
19. DEACON, R. M., CHAPMAN, J. M., GREEN, A. J. and SEVENSTER, M. N., 2007. H₂O Maser Observations of Candidate Post-AGB Stars and Discovery of Three High-Velocity Water Sources. *Astrophys. J.* vol. 658, no. 2, pp. 1096–1113. DOI: 10.1086/511383
20. CASWELL, J. L., 2003. Spectra of OH masers at 6035 and 6030 MHz. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 341, is. 2, pp. 551–568. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2003.06418.x
21. BAUDRY, A., DESMURS, J. F., WILSON, T. L., and COHEN, R. J., 1997. A survey of star-forming regions in the 5 cm lines of OH. *Astron. Astrophys.* vol. 325, pp. 255–268.
22. GREEN, J. A., CASWELL, J. L. and MCCLURE-GRIFFITHS, N. M., 2015. Excited-state hydroxyl maser polarimetry: who ate all the ps? *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 451, is. 1, pp. 74–92. DOI: 10.1093/mnras/stv936
23. CASWELL, J. L., KRAMER, B. H. and REYNOLDS, J. E., 2011. Magnetic fields from OH maser maps at 6035 and 6030 MHz at Galactic sites 351.417+0.645 and 353.410–0.360. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 414, is. 3, pp. 1914–1926. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18510.x
24. WINKEL, B., KRAUS, A. and BACH, U., 2012. Unbiased flux calibration methods for spectral-line radio observations. *Astron. Astrophys.* vol. 540, id. A140. DOI: 10.1051/0004-6361/201118092
25. STANIMIROVIC, S., ALTSCHULER, D., GOLDSMITH, P. and SALTER, C., 2002. Single-Dish Radio Astronomy: Techniques and Applications. In: S. STANIMIROVIC, D. ALTSCHULER, P. GOLDSMITH and C. SALTER, eds. *ASP Conference Proceedings*. vol. 278. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific.
26. PARDO, J. R., CERNICHARO, J. and SERABYN, E., 2001. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): an improved model for millimeter/submillimeter applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 49, no. 12, pp. 1683–1694. DOI: 10.1109/8.982447

A. V. Antyufeyev¹, A. M. Korolev¹, O. M. Patoka¹,
V. M. Shulga¹, O. M. Ulyanov¹, O. M. Reznichenko¹,
V. V. Zakharenko^{1,2}, V. I. Prisiazhnii³, A. V. Poichalo³,
V. V. Voityuk³, V. N. Mamarev³, V. V. Ozhinskii³,
V. P. Vlasenko³, V. M. Chmil⁴, V. I. Lebed⁴, M. I. Palamar⁵,
A. V. Chaikovskii⁵, Yu. V. Pasternak⁵, M. A. Strembitskii⁵,
M. P. Natarov⁶, S. O. Steshenko⁶, V. V. Glamazdyn⁶,
A. S. Shubny⁶, A. A. Kirilenko⁶, D. Y. Kulik⁶, A. M. Pylypenko⁷

¹Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

³National Space Facilities Control and Test Center,
State Space Agency of Ukraine,
8, Moskovska St., Kyiv, 01010, Ukraine

⁴Private Joint Stock Company
“Scientific and Production Enterprise “Saturn”,
2B, Les Kurbas Ave., Kyiv, 03148, Ukraine

⁵Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
56, Ruska St., Ternopil, 46001, Ukraine

⁶O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

⁷The International Center of Future Science, Jilin University,
2699 Qianjin St., 130012 Changchun, PR China

CREATING THE RT-32 RADIO TELESCOPE ON THE BASIC OF MARK-4B ANTENNA SYSTEM. 2. ESTIMATION OF THE POSSIBILITY FOR MAKING SPECTRAL OBSERVATIONS OF RADIO ASTRONOMICAL OBJECTS

Purpose: Technical capabilities of the MARK-4B antenna system necessary for its further using as a 32-meter radiotelescope (RT-32) and making simultaneous spectral radioastronomical observations in the C and K frequency ranges, are investigated. *Design/methodology/approach:* The studies use the results of our own measurements made with the MARK-4B antenna system, expert reviews, open information sources, technical documentation of the MARK-4B antenna system, radio astronomy and computer simulation methods and comparative analysis of this antenna main parameters with the corresponding parameters of the world’s best active radio telescopes. Combining different approaches allows us to determine the requirements for the receiving system, parameters of the spectrometer, calibration techniques and optimize the MARK-4B antenna system modernization procedure.

Findings: The radio telescope main parameters required for spectral observations in the C and K frequency ranges are determined. The antenna pointing system capabilities are specified. For the MARK-4B antenna system working frequency range, the main spectral lines of various molecules available for research have been considered. The transitions radiating the most intensive spectral lines are listed. The radio astronomical problems that can be solved using the MARK-4B in the mode of spectral observations are formulated. The required parameters of the spectrum analyzer and the receiver’s self-noise tem-

perature are determined. Calibration techniques of the recorded signal are described, which are necessary for carrying out spectral observations.

Conclusions: The here presented studies show that for making spectral observations based on the beam-waveguide MARK-4B antenna system, it is technically possible to create the RT-32 radio telescope with quality technical characteristics corresponding to the world-best analogs. Modernization of the beam-waveguide MARK-4B antenna system will allow at the first stage to create in Ukraine the dual-band radio-telescope permitting to make simultaneous spectral and/or continued observations in the C and K ranges. Henceforth, the amount of simultaneously working ranges can be increased.

Key words: antenna, calibration, masers, MARK-4B, receiving system, polarization, radio source, radio telescope, spectrum analyzer

О. В. Антюфеев¹, О. М. Корольов¹, О. М. Патока¹,
В. М. Шульга¹, О. М. Ульянов¹, О. М. Резніченко¹,
В. В. Захаренко^{1,2}, В. І. Присяжний³, А. В. Поіхало³,
В. В. Войтюк³, В. Н. Мамарев³, В. В. Ожинський³,
В. П. Власенко³, В. М. Чміль⁴, В. І. Лебідь⁴,
М. І. Паламар⁵, А. В. Чайковський⁵, Ю. В. Пастернак⁵,
М. А. Стрембицький⁵, М. П. Натаров⁶, С. О. Стешенко⁶,
В. В. Гламаздин⁶, О. І. Шубний⁶, А. О. Кириленко⁶,
Д. Ю. Кулик⁶, А. М. Пилипенко⁷

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

³Національний центр управління
та випробувань космічних засобів,
Державне космічне агентство України,
вул. Московська, 8, м. Київ, 01010, Україна

⁴Приватне акціонерне товариство
“Науково-виробниче підприємство “Сатурн”,
пр-т Леся Курбаса, 2-Б, м. Київ, 03148, Україна

⁵Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна

⁶Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

⁷Міжнародний центр науки майбутнього,
Цзілінський університет,
130012 Чанчунь, Китай

СТВОРЕННЯ РАДІОТЕЛЕСКОПУ РТ-32 НА ОСНОВІ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ MARK-4B. 2. ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ РАДІОАСТРОНОМІЧНИХ ОБ’ЄКТІВ

Предмет і мета роботи: Досліджуються технічні можливості антенної системи MARK-4B для її подальшого використання у якості 32-метрового радіотелескопа (РТ-32)

та виконання одночасних спектральних радіоастрономічних спостережень у С і К діапазонах.

Методи і методологія: У дослідженнях використовуються результати наших власних вимірювань, виконаних на антенній системі MARK-4В, експертні оцінки, відкриті джерела інформації, технічна документація антенної системи MARK-4В, методи радіоастрономії, методи комп'ютерного моделювання та порівняльний аналіз головних параметрів даної антени з аналогічними параметрами діючих радіотелескопів світового рівня. Комбінування різних підходів дозволяє визначити вимоги до приймальної системи, до параметрів спектроаналізатора, методик калібрування та оптимізувати процедури модернізації антенної системи MARK-4В.

Результати: Визначено основні параметри радіотелескопу, необхідні для виконання спектральних спостережень у С та К діапазонах. Уточнено можливості системи наведення. Для робочого діапазону частот антенної системи MARK-4В розглянуто основні доступні для досліджень спектральні лінії різних молекул. Наведено перелік переходів, випромінюючих найінтенсивніші спектральні лінії. Сформульовано радіоастрономічні задачі, які можливо вирішувати з використанням MARK-4В у режимі спектральних спостережень

у С та К діапазонах. Оцінено необхідні параметри спектроаналізатора і значення власної температури шумів приймача і всієї системи приймання загалом. Описано методики калібрування сигналу, необхідні для виконання спектральних спостережень.

Висновок: Дослідження, виконані у цій статті, показують, що для виконання спектральних спостережень на основі променеводної антенної системи MARK-4В можливо створити радіотелескоп РТ-32 з технічними характеристиками, що відповідають кращим світовим аналогам. Модернізація променеводної антенної системи MARK-4В дозволить на першому етапі створити в Україні двохдіапазонний радіотелескоп сантиметрового діапазону, на якому можливо буде виконувати одночасні спектральні та/або континуальні спостереження в С та К діапазонах. У подальшому кількість одночасно працюючих діапазонів може бути збільшена.

Ключові слова: антена, калібрування, мазери, MARK-4В, приймальна система, поляризація, радіоджерело, радіотелескоп, спектроаналізатор

Стаття постуила в редакцію 18.07.2019