

## РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.02.87>

УДК 520.272.2:  
621.396.677.494

PACS number: 95.55.-Jz

О. М. УЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, А. М. РЕЗНИЧЕНКО<sup>1</sup>, В. В. ЗАХАРЕНКО<sup>1,2</sup>,  
А. В. АНТЮФЕЕВ<sup>1</sup>, А. М. КОРОЛЕВ<sup>1</sup>, А. Н. ПАТОКА<sup>1</sup>,  
В. И. ПРИСЯЖНЫЙ<sup>3</sup>, А. В. ПОИХАЛО<sup>3</sup>, В. В. ВОЙТЮК<sup>3</sup>,  
В. Н. МАМАРЕВ<sup>3</sup>, В. В. ОЖИНСКИЙ<sup>3</sup>, В. П. ВЛАСЕНКО<sup>3</sup>,  
В. М. ЧМИЛЬ<sup>4</sup>, В. И. ЛЕБЕДЬ<sup>4</sup>, М. И. ПАЛАМАР<sup>5</sup>,  
А. В. ЧАЙКОВСКИЙ<sup>5</sup>, Ю. В. ПАСТЕРНАК<sup>5</sup>, М. А. СТРЕМБИЦКИЙ<sup>5</sup>,  
М. П. НАТАРОВ<sup>6</sup>, С. А. СТЕШЕНКО<sup>6</sup>, В. В. ГЛАМАЗДИН<sup>6</sup>,  
А. И. ШУБНЫЙ<sup>6</sup>, А. А. КИРИЛЕНКО<sup>6</sup>, Д. Ю. КУЛИК<sup>6</sup>,  
А. А. КОНОВАЛЕНКО<sup>1</sup>, Л. Н. ЛИТВИНЕНКО<sup>1,2</sup>, Я. С. ЯЦКИВ<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Мыстэцтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина,  
E-mail: oulyanov@rian.kharkov.ua

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина,  
E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

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

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

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

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

<sup>7</sup> Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,  
ул. Академика Заболотного, 27, г. Киев, 03143, Украина,

### СОЗДАНИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПА RT-32 НА БАЗЕ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ MARK-4B 1. ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*Предмет и цель работы: Создание радиотелескопа на основе антенной системы MARK-4B, которая была разработана для телекоммуникационных приложений, определение возможностей использования лучевой антенной системы в широкополосном многодиапазонном режиме работы и оценка характеристик антенны с помощью радиоастрономических измерений.*

*Методы и методология: Комплексный анализ всех систем MARK-4B дает возможность выделить блоки и узлы, которые подлежат замене или модернизации. Анализ конструкции рефлектора и субрефлектора, лучевода, гофрированного рупора и волноводной системы позволяет определить возможные частотные диапазоны работы создаваемого радиотелескопа. Установка широкополосного приемника с предусмотренной возможностью калибровки по охлаждаемой и неохлаждаемой нагрузке позволяет определить температуру антенной системы. Наведение антенны на калибровочные источники и запись сканов за счет вращения Земли исключает систематические ошибки или погрешности системы наведения. Таким образом определяется ширина диаграммы направленности и эффективная площадь радиотелескопа.*

*Результаты: Произведен анализ конструкции антенны и определены первоочередные этапы реконструкции антенной системы MARK-4B. Демонтированы узкополосные передатчик и приемник диапазона С и установлен широкополосный*

приемник (диапазон  $4.6 \div 5.1$  ГГц) с детектором и возможностью изменения времени интегрирования сигнала. По результатам наблюдений сделаны первоначальные оценки температуры шумов системы, которые позволяют надеяться на то, что радиотелескоп РТ-32 (г. Золочев, Львовская обл., Украина) совместно с охлаждаемым приемником будет обладать низкими собственными шумами. Рассчитана и установлена новая система наведения антенны, с помощью которой в С диапазоне проведены астрономические тесты ширины диаграммы направленности ( $\approx 7.2'$ ) и уровня ее боковых лепестков ( $-12.5$  дБ), эффективной площади ( $\approx 680$  м<sup>2</sup>) и коэффициента использования поверхности ( $\approx 0.84$ ). Заключение: Выполненные измерения и расчеты показывают, что на базе антенной системы MARK-4B возможно создать высокоэффективный радиоастрономический инструмент. Разработанные на данный момент системы приема и наведения для радиотелескопа РТ-32 свидетельствуют о высоком потенциале украинской науки. Дальнейшая кооперация научных исследований и высоких технологий приведет к созданию эффективного украинского радиотелескопа сантиметрового диапазона.

Ключевые слова: антенна, излучатель, интерферометрия, поляризация, радиоастрономия, радиоисточник, радиотелескоп, сервер, стандарт частоты

## 1. Введение

Создание новых радиотелескопов в любом диапазоне частот представляет собой весьма сложную задачу и определенный вызов для авторов проекта. Это связано как с необходимостью достижения максимально возможных значений технических параметров радиотелескопа (чувствительности, широкополосности, эквивалентной температуры шумов системы, динамического диапазона, ошибки наведения, скорости наведения и т. п.), так и с тем, что другие страны и/или научно-технические консорциумы разрабатывают альтернативные высококонкурентные проекты и реализуют их, как правило, очень эффективно. Поэтому, если в новом проекте не предусматривается, что разрабатываемый радиотелескоп должен быть уникальным хотя бы по одному параметру (например, эффективной площади, чувствительности, месту расположения), то целесообразность подобного проекта ставится под сомнение. Исходя из этого при разработке нового инструмента или модернизации существующих систем первоочередной задачей является анализ уже имеющихся решений в выбранном диапазоне частот для радиотелескопов определенного типа и реализация тех характеристик, которые делают новый инструмент уникальным и востребованным в перспективных радиоастрономических исследованиях.

Антенная система MARK-4B была предназначена для связи через геостационарные спутники в диапазоне  $4 \div 6$  ГГц и расположена неподалеку от с. Сасив Золочевского района Львовской области (принадлежит Центру космических исследований и связи Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУИКС)). Развитие Интернета и оптоволоконных связных

технологий сделало спутниковые телекоммуникации маловостребованными. Однако достаточно большое первичное зеркало (диаметр 32 м) и исправные механические системы позволили в 2018 г. приступить к созданию на базе антенной системы MARK-4B полноценного радиотелескопа.

Переделка связной антенны в радиотелескоп с возможностью работы в диапазонах P, L, S, C, X и K ( $0.3 \div 1.0$ ,  $1.0 \div 2.0$ ,  $2.0 \div 4.0$ ,  $4.0 \div 8.0$ ,  $8.0 \div 12.0$  и  $18.0 \div 27.0$  ГГц соответственно) в сети глобальной интерферометрии EVN (European VLBI Network) с низкой шумовой температурой системы приема требует существенного усовершенствования или замены ряда блоков или систем радиотелескопа. Основными преимуществами разрабатываемого радиотелескопа могут быть многодиапазонность, максимальная широкополосность в каждом диапазоне, высокий динамический диапазон и универсальность использования.

Полноценным можно считать радиотелескоп, который способен к сопровождению источников естественного и искусственного происхождения с допустимыми ошибками наведения и имеет малозумящую высокостабильную приемную систему. Кроме этого, необходимо обеспечить:

- наличие системы точного времени, синхронизированной с помощью локального цезиевого или водородного стандарта частоты;
- высокую точность формирования вторичных меток времени (сигналы 1pps – pulse per second) и синтезирование сетки высокостабильных синхронных частот для работы по различным радиоастрономическим программам, включая радиоинтерферометрию со сверхдлинными базами (РСДБ);

- быстрое переключение диапазонов либо наличие многорупорных облучателей и параллельно работающих приемников и регистраторов без потери чувствительности;

- наличие широкополосных и помехоустойчивых регистраторов сигналов;

- наличие как минимум двухчастотной GPS станции, автоматической метеостанции и радиометра (диапазон 22 ГГц) для оценки уровня водяных паров в атмосфере;

- удаленное управление наведением, калибровкой, приемом и регистрацией данных;

- наличие высокоскоростной локальной сети, серверов обработки и хранения данных;

- наличие высокоскоростных оптоволоконных линий связи с серверами сети Интернет.

Для проведения эффективных спектральных радиоастрономических исследований необходимо иметь высокостабильный гетеродин с перестраиваемой частотой для компенсации вращения Земли. Поэтому модернизация антенной системы MARK-4B должна проходить в несколько этапов.

Приведенные в разделе 2 анализ технических характеристик и обзор работ, посвященных модернизации подобных связных антенн в радиотелескопы [1–6], позволили определить, какие физические параметры и технические характе-

ристики могут и должны быть получены в результате модернизации антенной системы MARK-4B. В третьем разделе обсуждаются возможности, задачи и структура радиотракта проектируемого радиотелескопа. В четвертом разделе представлены результаты первых тестов антенной системы. В последнем разделе приведены выводы.

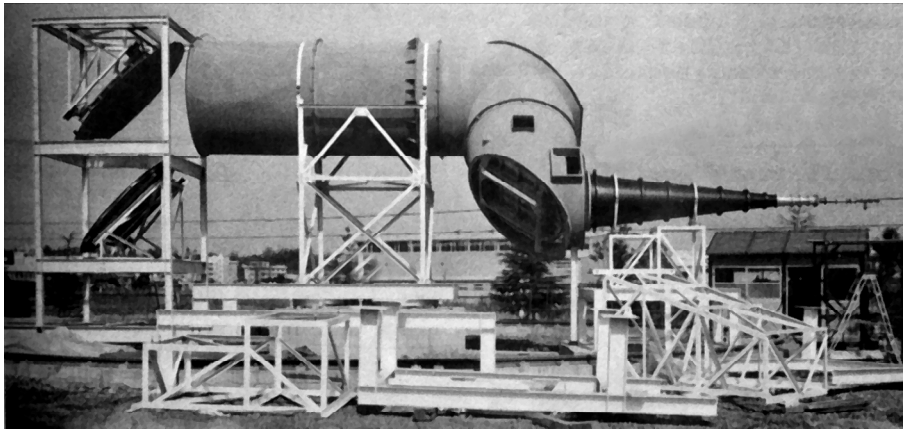
## 2. Антенная система MARK-4B и аналогичные антенны, модернизированные до уровня радиотелескопов

Антенная система MARK-4B (рис. 1) была сконструирована японской фирмой NEC и относится к классу антенн с лучеводами. Согласно западной классификации, это так называемые антенны BWG (Beam Wave-Guides) типа. В них для распространения радиоволн от зеркал до облучателя используется ломаная труба (лучевод) с подвижными сочленениями. Диаметр лучевода радиотелескопа РТ-32 (г. Золочев, Львовская область) составляет  $\approx 2.35$  м (рис. 2).

Антенны BWG типа имеют свои преимущества и недостатки. К преимуществам относятся стационарное расположение выходных элементов волноводного тракта – излучателя, волноводов, малошумящих приемников и цифровых регистраторов, а также короткие кабельные и



Рис. 1. Общий вид антенной системы MARK-4B



**Рис. 2.** Общий вид лучевода с оконечным гофрированным облучающим рупором и цилиндрическим волноводом антенной системы MARK-4B. Фото из технической документации фирмы NEC (Япония)

криогенные соединения. Сюда же можно отнести удобство обслуживания всей приемной и регистрирующей аппаратуры и ее работу при стабильной комнатной температуре и заданной влажности. Все основные элементы приема, регистрации и сервиса (стандарты, частоты, криогенные установки и т. п.) конструктивно расположены на нижних уровнях антенны. Это дает возможность стационарной монтажа приемного оборудования в здании, устраняет ограничения на размеры оборудования, снижает требования к климатическим параметрам и обеспечивает удобный доступ ко всем функциональным узлам и элементам систем РТ-32.

К недостаткам относятся значительный уровень дифракционных потерь сигнала в низкочастотной области спектра и некоторые ограничения в области высоких частот. Высокочастотные ограничения у систем с лучеводом связаны с большим количеством отражающих зеркал, чем у более простых двухзеркальных антенн. Наличие четырех дополнительных зеркал в лучеводоводе приводит к большим результирующим шероховатостям поверхностей всех зеркал у антенн BWG типа. Эти параметры будут обсуждаться в разделе 3.

В антенной системе MARK-4B в качестве облучателя использован гофрированный рупор (рис. 3). Такое решение, с одной стороны, приводит к наличию полос пропускания и полос отражения в сплошном частотном диапазоне радиотелескопа (см. раздел 4). С другой стороны, потери в полосах пропускания гофрированного



**Рис. 3.** Гофрированный рупор облучателя АС MARK-4B

рупора меньше, чем могли бы быть в тех же полосах рупора с гладкой поверхностью.

В 80-е гг. прошлого столетия японская фирма NEC выпустила 6 связанных антенн BWG типа. Они были расположены в Новой Зеландии (№ 1), Швейцарии (№ 2), Ирландии (№ 3), Египте (№ 4), Тунисе (№ 5) и в Украине (№ 6). В последнее время антенны аналогичного типа разрабатываются в США (обсерватория Голдстоун, Калифорния) ([https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/txt\\_daep.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/txt_daep.html)) и в России ([http://www.okbmei.ru/as\\_tna\\_321.html](http://www.okbmei.ru/as_tna_321.html)) для более широкого круга применений, в том числе для радиоастрономии и поддержки дальних космических миссий. Такие антенны сравнительно дешевы в эксплуатации при весьма высоких технических параметрах.

## 2.1. Модернизация антенной системы BWG типа в Новой Зеландии

В работе [1] описан процесс модернизации 30-метровой антенны с лучеводом (№ 1 в вышеприведенном списке). Эта антенна была создана в 1984 г., а в 1987 г. уже выведена из эксплуатации. Она расположена примерно в 60 км к северу от г. Окленда (Новая Зеландия) и принадлежит Институту радиоастрономии и космических исследований Оклендского технологического университета.

Реконструированный радиотелескоп (РТ-30) доказал свою работоспособность, поэтому реализованный проект очень интересен именно своим комплексным подходом. Для преобразования связанной антенной системы в радиотелескоп были выполнены следующие работы [1]:

- заменены моторы, кабели, система наведения и декодирования для приведения механических характеристик к требуемым, с точки зрения радиоастрономии;

- спроектированы и установлены конструкции удлиненного азимутального шлейфа кабелей для обеспечения сопровождения радиисточников и изменены положения концевых датчиков, поскольку для спутниковой связи направление на юг в интервале  $\pm 10^\circ$  не использовалось и необходимо было расширить диапазон поворота радиотелескопа с  $\pm 170^\circ$  до  $\pm 270^\circ$ ;

- очищена поверхность антенны и ее несущих конструкций, проведена антикоррозионная обработка ржавых участков поверхности, заменены ржавые болты и обновлена краска;

- внедрено программное обеспечение для сопровождения источников на небесной сфере;

- установлен приемник С диапазона и сопряжен с существующей антенно-фидерной системой.

Первоначально установленные фирмой NEC моторы давали помехи из-за наличия токоснимателей щеточного типа. Их заменили на синхронные моторы (сервомоторы без токосъемников) для обеспечения возможности двунаправленного вращения с частотой от 0 до 3000 об/мин. Были установлены новый угломестный 26-битный кодер с погрешностью  $\pm 5''$  ( $\pm 0.0014^\circ$ ) и 25-битный азимутальной кодер с погрешностью  $\pm 20''$  ( $\pm 0.006^\circ$ ).

Поверхность основного рефлектора РТ-30 исследовалась с помощью лазерного сканера. Исходное сканирование было проведено с земли. Измерения на поверхности отражателя проводились с шагом 1 мм. Полученные данные были

обработаны и сопоставлены с теоретической поверхностью. Была выявлена заметная гравитационная деформация антенны в вертикальном направлении. Динамическое отклонение всей поверхности от оптимальной теоретической формы поверхности составляло  $\Delta \approx 3.5$  мм [1]. Среднеквадратическое отклонение (СКО) поперечного сечения в горизонтальном направлении, на которое не влияет гравитационное деформирование, составляло  $\sigma \approx 1.0$  мм, что соответствовало точности лазерного сканера (1 мм). СКО вдоль вертикального поперечного сечения через главный центр отражателя составляло  $\approx 5$  мм.

*Приемник РТ-30.* Радиотелескоп был настроен для приема сигналов спутниковой связи С диапазона,  $3.7 \div 4.2$  ГГц, и передачи в диапазоне  $5.925 \div 6.425$  ГГц. При модернизации преобразователь ортогональных мод, диплексор и иные компоненты, связанные с этой телекоммуникационной схемой, были удалены. Была оставлена небольшая часть конического рупора для возбуждения неохлаждаемых усилителей на НЕМТ транзисторах с центральной частотой 6.6 ГГц и полосой пропускания  $\approx 300$  МГц. Эти усилители обеспечивали низкий уровень шумов в обоих каналах с ортогональными круговыми поляризациями. В приемнике использовался гетеродин, который синхронизировался с помощью водородного мазера. Частота гетеродина равнялась 5.8 ГГц. Промежуточные частоты (ПЧ) лежали в диапазоне  $750 \div 1050$  МГц. После дальнейшего усиления и фильтрации сигналы ПЧ подавались на аналоговый вход цифрового преобразователя к нижним частотам (Digital Base Band Converter – DBBC). Приемник имел также внутреннюю амплитудно-фазовую калибровку сигналов. Кроме этого, было установлено унифицированное радиоастрономическое программное обеспечение для подобных антенн с модернизацией входных и выходных сигналов для существующих моторов и датчиков. Из-за относительно низкой угловой скорости ( $\approx 20$  градус/мин) для перенаведения с одного радиисточника на другой иногда может потребоваться до 18 мин. Чтобы свести к минимуму время, отведенное на поворот, использовалась стратегия, с помощью которой каталог источников был разделен на две подгруппы: северные (склонение  $\geq 0^\circ$ ) и южные (склонение  $< 0^\circ$ ) источники. Наблюдение северной, а затем южной групп обеспечило существенное уменьшение времени наведе-

ния и достаточное количество данных для создания статистически устойчивой модели наведения.

В качестве аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) был использован DBBC фирмы NatLab совместно с регистратором Mark5B. Это стандартные устройства, которые обычно используются в радиointерферометрических наблюдениях со сверхдлинными базами. Аналоговый вход DBBC оснащен четырьмя радиочастотными модулями ПЧ с четырьмя отдельными гетеродинами. Это позволяет пользователю выбрать, какие из четырех входных сигналов подключить к цифровой регистрации. Каждый модуль ПЧ оборудован набором из 4-х фильтров ( $0.01 \div 512$  МГц,  $512 \div 1024$  МГц,  $1024 \div 1536$  МГц,  $1536 \div 2048$  МГц), которые можно установить с помощью программного обеспечения для определения диапазона аналогового ввода. Каждый ПЧ модуль DBBC подключен ко входу одной поляризации приемника (правой круговой – RCP или левой круговой – LCP).

*Связь и система хранения данных на PT-30.* Система регистрации Mark5B подсоединялась к DBBC через так называемый стандартный интерфейс VLBI (VLBI Standard Interface – VSI), который обеспечивает запись наблюдательных данных в режиме автономного радиотелескопа. Была установлена также станция 10G Ethernet. Она использовалась, в том числе, для передачи время-частотной привязки к водородному стандарту, который был установлен в другом здании.

## 2.2. Антенны с лучеводами в Японии, Гане и США

Корпорацией Mitsubishi Electric в 1983 г. в Японии была построена антенна Hitachi с диаметром главного зеркала 32 метра. Впоследствии в 1992 г. рядом была построена еще одна практически идентичная первой антенна Takahagi. Обе антенны относятся к классу BWG антенн. Они использовались для спутниковой связи. Впоследствии эти антенны были модернизированы и превращены в радиотелескопы, которые включены в сеть РСДБ JVN (Japan VLBI). Был разработан новый рупор (облучатель) на диапазоны частот 6.7, 8 и 22 ГГц. Для каждой антенны были разработаны две приемные системы: одна на частоты ( $6.3 \div 7.0$  ГГц и  $8.0 \div 8.8$  ГГц) и другая на частоты ( $21 \div 25$  ГГц). Каждая приемная система охлаждалась до 10 К с помощью криогенной машины “Suzuki-Shokan RF273S”. На этих радиотелескопах достигли сле-

дующих значений шумовой температуры системы в направлении зенита:  $30 \div 40$  К (6 ГГц),  $25 \div 35$  К (8 ГГц),  $40 \div 100$  К (22 ГГц зимой),  $150 \div 500$  К (22 ГГц летом) [3]. С использованием антенны Hitachi уже были проведены РСДБ наблюдения на частоте 6.7 ГГц, а также самостоятельные долгосрочные наблюдения вариаций интенсивностей метанольных мазеров на частоте излучения 6.7 ГГц.

Еще одной телекоммуникационной антенной диаметром 32 метра с лучеводом является антенна в Республике Гана на западе Африки. В настоящее время принято решение превратить ее в радиотелескоп. Планируется использовать ее на частотах  $5 \div 6.7$  ГГц с последующим постепенным освоением других частотных диапазонов. Ожидается достичь точности наведения антенны не хуже 30". Этот параметр получен на основе теоретических рассуждений и качества поверхности главного зеркала. Планируется установка необходимого оборудования и включение этой антенны в сеть EVN [4]. Известно, что принято решение модернизировать еще около 30 телекоммуникационных антенн, создав на их основе радиотелескопы по всей Африке. Часть из этих антенн является BWG антеннами. Они расположены на Мадагаскаре, в Кении и Замбии.

В 1990 г. в Голдстоуне, Калифорния, США была построена 34-метровая антенна. Ее использовали для связи с космическими аппаратами дальних миссий (DSS-13 Deep Space Station). Эта станция рассматривалась как прекурсор использования BWG телекоммуникационных космических антенн в Ка диапазоне [5, 6]. Строительство DSS-13 было завершено в мае 1990 г. С тех пор антенна непрерывно используется в исследовательских программах. Первый этап проекта был разработан для независимой работы в X и Ка диапазонах. На втором этапе проекта планировалось одновременное использование S и X диапазонов или X и Ка диапазонов. Эта антенна использовалась для поддержки связи с аппаратами дальних космических миссий.

## 2.3. Анализ структуры и реализованных технических решений в радиотелескопах BWG типа

Конструкция верхней части антенны BWG типа базируется на критериях геометрической оптики, введенных в 1973 г. [7]. Это гарантирует идеаль-

ное отражение от пары рефлекторов. В антеннах такого типа важно выдержать компромисс между эффективностью облучателя (по сути его угловым раскрытием) и эффективностью основного зеркала с субрефлектором. Угловой раскрыт облучателя определяет и его линейные размеры. Большие углы раскрытия облучателя повышают его коэффициент полезного действия, но ведут к увеличению диаметра лучевода и субрефлектора. Увеличение диаметра субрефлектора до значений выше 10 % от диаметра главного зеркала ведет к падению эффективности всего радиотелескопа из-за появляющегося дополнительного затенения основного зеркала. Гофрированный конический излучатель (см. рис. 3) должен обеспечить узкую и симметричную относительно центральной оси диаграмму направленности. Принято считать, что геометрические размеры этого облучателя должны быть такие, что в его излучающем раскрытии в рабочей полосе распространяется гибридная сферическая волна типа  $HE_{11}$ . Кроме этого, в указанном раскрытии эта волна должна быть почти синфазной. В узкой горловине этого излучателя должен находиться конвертор, который трансформирует гибридную сферическую волну типа  $HE_{11}$  в волну  $TE_{11}$ . Далее  $TE_{11}$  волна распространяется в цилиндрическом волноводе. Этот волновод должен быть одномодовым для наиболее длинной волны, которую планируется в нем возбуждать. Тогда его радиус  $r$  надо выбирать из следующего соотношения:  $2.62 < \lambda_c < 3.41r$ . Откуда для средней длины волны, равной  $\lambda_c = 5.22$  см в С диапазоне можно получить соотношение  $1.53 \text{ см} < r < 2 \text{ см}$ . При пересчете на наибольшую длину волны ( $\lambda = 6.386$  см), которую планируется использовать в С диапазоне, получается соотношение  $1.87 \text{ см} < r_L < 2.44 \text{ см}$ . Помимо этого, глубина канавок  $d$  в гофрированной части излучателя должна удовлетворять соотношению  $n\lambda_c/4 \leq d < n\lambda_c/2$ , где  $n$  – нечетное число (1, 3, 5, ...), а  $\lambda_c$  – центральная длина волны, распространяющейся в гофрированном облучателе. Ширина одной канавки в начале рупорного излучателя МАРК-4В  $t = 2$  мм, а толщина выступа гофра составляет  $p = 2$  мм. Поэтому период гофра в раскрытии рупора МАРК-4В составляет  $s = t + p = 8$  мм. Гофрированная структура рупора позволяет “оторвать” электрическое поле от его стенок, обеспечивая оптимальную передачу энергии поля в горловину рупора в полосах пропускания. В настоящее время

диаметр цилиндрического волновода, который соединяется с коническим рупором, составляет  $2r = 6.9$  см. Это свидетельствует о том, что цилиндрический волновод был рассчитан на передачу более низких частот, чем те, которые указаны выше. Поэтому при переходе в радиоастрономическую полосу рабочих частот в С диапазоне, а именно в полосу  $4.7 \div 6.8$  ГГц, система облучения и последующей волновой трансформации должна быть незначительно изменена.

Антенна BWG типа, которая используется в Золочеве, весьма схожа с антенной МАРК-4В в Золочеве. Эти антенны различаются углами раскрытия конических гофрированных рупоров и углами облучения субрефлекторов. В технической документации фирмы NEC указан полный угол раскрытия конусного рупора  $11.4^\circ$  (рис. 4). То есть угол его полураскрытия составляет  $5.7^\circ$ . Исходя из этого и используя графики, приведенные в [6], мы можем оценить фазовое распределение в облучателе золочевской антенны и коэффициент полезного действия облучателя. Можно оценить также уровень затекания токов на кромку конического рупора облучателя золочевской антенны.

Оценки, полученные таким образом, дают несколько худшие значения параметров чем те, что приведены фирмой NEC для основных составляющих потерь сигнала в лучеводе, дополнительных шумов от эффекта затекания и др. По нашим оценкам, антенна МАРК-4В имеет в низкочастотной части С диапазона эффект затекания на уровне  $-12.5$  дБ (уровень первого бокового лепестка), а не  $-14$  дБ, как указано в документации фирмы NEC, и суммарный КПД излучателя на уровне 90 %. Потери сигнала в лучеводе в режиме приема, как следует из технической документации NEC, не превышают 0.2 дБ, что соответствует КПД 95.5 %. Основные параметры антенны МАРК-4В в Золочеве, которые гарантируются фирмой NEC, приведены в табл. 1.

### 3. Технические возможности, задачи и структура радиотракта проектируемого радиотелескопа

#### 3.1. Оценка полосы рабочих частот радиотелескопа

Самые высокие частоты, до которых еще возможна успешная работа антенны, обычно определяются СКО поверхности главного зеркала от

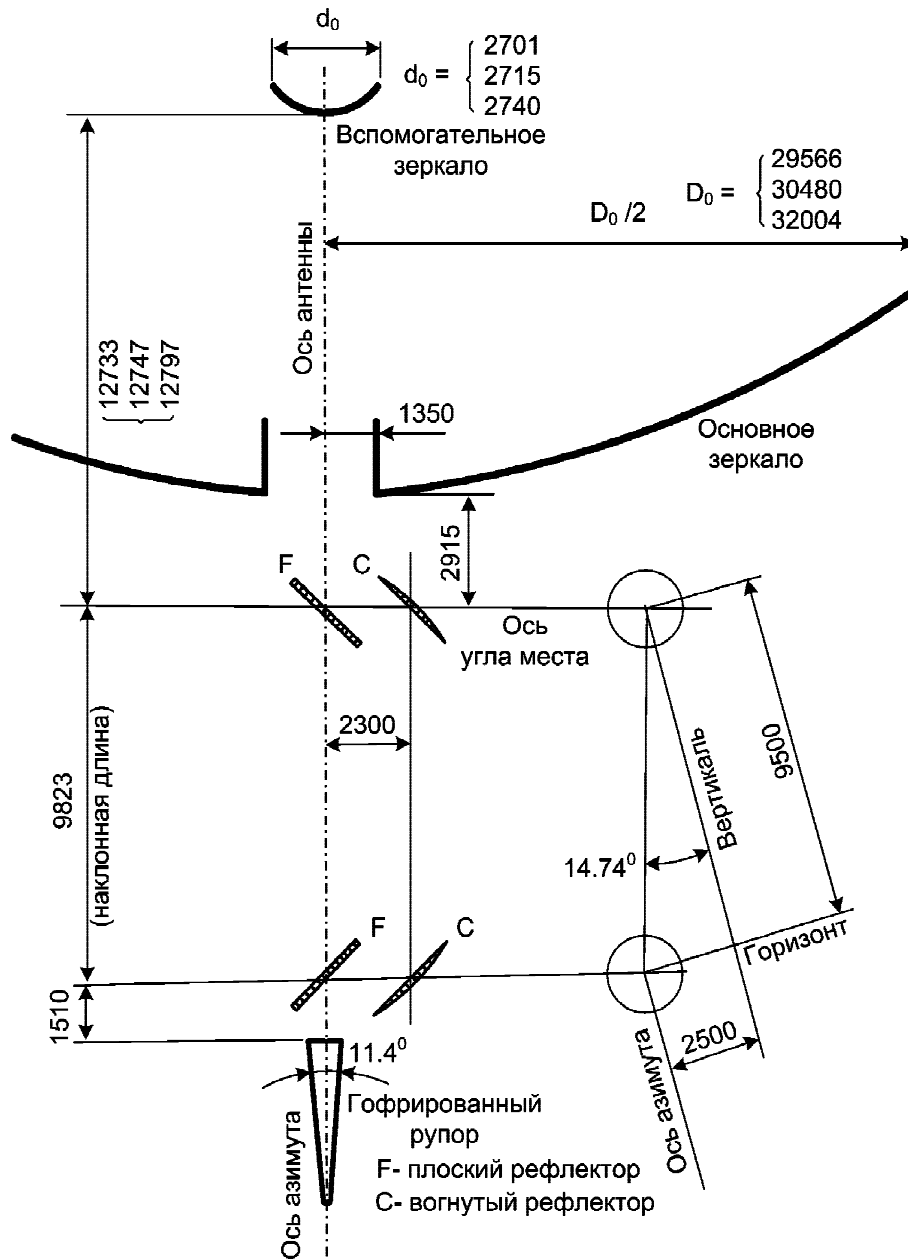


Рис. 4. Геометрия антенны MARK-4B (Золочев) в документации фирмы NEC (Япония). Полурастрыв гофрированного облучателя составляет  $5.7^\circ$ , а угол облучения субрефлектора  $\theta \approx 5^\circ$

параболической формы, аналогичными параметрами для поверхности субрефлектора и других квазиоптических элементов, которые присутствуют в ее конструкции. Теоретически СКО поверхности  $\sigma_{rms}$  связано с длиной волны  $\lambda$  формулой:

$$\sigma_{rms} \approx \lambda/20.$$

Согласно документации, СКО поверхности главного зеркала антенной системы MARK-4B  $\sigma_1$  составляет 0.43 мм при скорости ветра

$V < 72$  км/ч ( $< 20$  м/с). Примем во внимание, что значение аналогичной величины для субрефлектора составляет  $\sigma_2 < 0.2$  мм, для четырех зеркал лучевода –  $\sigma_3 \approx 0.3$  мм. Таким образом, результирующее СКО всех поверхностей MARK-4B

$$\sigma_{rms} \approx (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)^{0.5} \approx 0.6 \text{ мм.}$$

Отсюда следует, что максимальная рабочая частота для антенной системы MARK-4B составляет  $\approx 25$  ГГц при скорости ветра, не превышаю-



Таблица 1. Параметры антенны MARK-4B (Золочев)

Параметр	Значение
Эффективное усиление антенно-фидерной системы со входа или с выхода	$G_4 = 61.5$ дБ на частоте $f_4 = 4$ ГГц, $G_6 = 64.4$ дБ на частоте $f_6 = 6$ ГГц, $G_f = G_6 + 20 \log(f/f_6)$
Шумовая температура антенны на частоте $f_4 = 4$ ГГц при сухой и ясной погоде	$T_{\max} = 52$ К (угол места $5^\circ$ ), $T_{\max} = 41.8$ К (угол места $10^\circ$ ), $T_{\max} = 35.5$ К (угол места $20^\circ$ ), $T_{\max} = 33.4$ К (угол места $30^\circ$ )
Уровень первого бокового лепестка	$< -14$ дБ на прием или передачу
Поляризация	Двойная круговая поляризация на прием или передачу
Поляризационная развязка	$\leq -25$ дБ для приема или передачи
Коэффициент стоячей волны	$< 1.3$ в полосе приема или передачи
Потери композиционной фидерной системы	0.2 дБ в полосе приема, 0.27 дБ в полосе передатчика

щей 20 м/с. Эти данные соответствуют значениям таких же параметров известного итальянского радиотелескопа Medicina с диаметром главного зеркала 32 м ([https://www.med.ira.inaf.it/Manuale\\_Medicina/English/2.5%20Summary.htm#2.5.2](https://www.med.ira.inaf.it/Manuale_Medicina/English/2.5%20Summary.htm#2.5.2)).

К сожалению, в документации к антенной системе MARK-4B ничего не сказано об условиях, при которых была измерена точность поверхности главного зеркала. Мы можем лишь предположить, что эта величина получена при положении антенны, близком к наведению на горизонт. На точность поверхности главного зеркала влияет также точность юстировки его панелей, которая могла ухудшиться с момента построения антенны. Поэтому более корректный верхний предел рабочей частоты для антенны можно определить только экспериментально.

У антенной системы MARK-4B есть определенные ограничения на низких частотах. Они связаны с наличием лучевода конечных размеров. Основные ограничения определяются дифракционными потерями. В документации указано, что дифракционные потери в лучеводе незначительны, если число Френеля  $N > 1.0$ . На рис. 5 приведена зависимость числа Френеля от длины волны. Число Френеля рассчитывалось по методике, указанной в документации к антенной системе MARK-4B:

$$N = D^2 / (4\lambda L),$$

где  $D$  – диаметр лучевода,  $L$  – расстояние между криволинейными зеркалами лучевода,  $\lambda$  – длина волны.

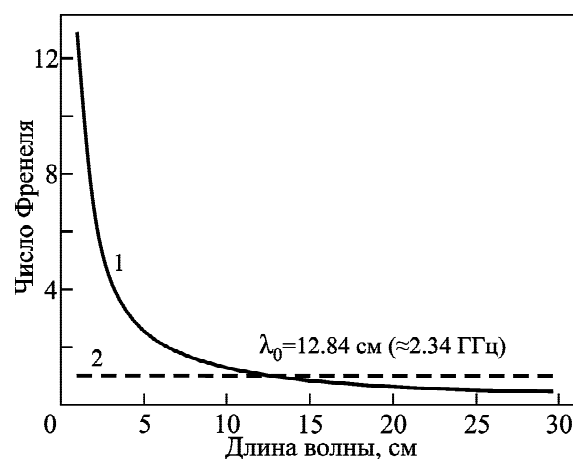


Рис. 5. Зависимость числа Френеля от длины волны для антенной системы MARK-4B (линия 1). Линией 2 показан уровень, где число Френеля равно 1.0. Значение  $\lambda_0$  на графике показывает при какой длине волны (частоте) число Френеля для антенной системы MARK-4B равно 1.0

Таким образом, теоретический диапазон рабочих частот для антенной системы MARK-4B, который можно использовать без существенной модернизации лучевода, составляет  $2.3 \div 25$  ГГц. Возможна также установка приемных систем более низкочастотных диапазонов (P и L) до входа лучевода.

### 3.2. Система наведения и сопровождения объектов

Одной из важнейших составляющих радиотелескопа является система наведения на космические объекты естественного и искусственного происхождения и сопровождения их с заданными скоростью и точностью.

Изначально система наведения телекоммуникационной антенной системы MARK-4B обеспечивала нацеливание антенны в направлении выбранного геостационарного спутника и не имела программ автоматического сопровождения. К тому же, как и у всех антенн BWG типа фирмы NEC, запаса длины кабелей азимутального шлейфа хватает только для поворота на  $\pm 170^\circ$  от южного направления (для антенн, расположенных в северном полушарии), т. е. в направлении на север имеется недоступный сектор – “мертвая зона” (рис. 6). Это исключает полноценное сопровождение незаходящих на широте установки радиотелескопа (координаты радиотелескопа:  $\approx 50^\circ$  с. ш.,  $\approx 25^\circ$  в. д.) космических источников. Кроме того, относительно низкая скорость поворота антенны ( $\approx 0.3$  градус/с) не только не позволяет проводить сопровождение быстро движущихся объектов (например, эле-

ментов космического мусора на орбитах ниже  $\approx 1000$  км), но и определяет еще одну недоступную для сопровождения объектов область вблизи зенита (см. рис. 6), где азимутальная скорость антенны превышает вышеприведенную максимальную скорость системы наведения радиотелескопа.

Поэтому, система управления подлежит практически полной реконструкции. Кроме замены электронной части и программ управления, удлинения азимутального шлейфа, изменения положения концевых датчиков, а также, возможно, установки новых двигателей, необходимо будет провести большую работу по исследованию люфтов приводных механизмов, систематических ошибок наведения из-за наличия дефектов в механических конструкциях и деформаций по причине гравитационных воздействий при различных наклонах антенны.

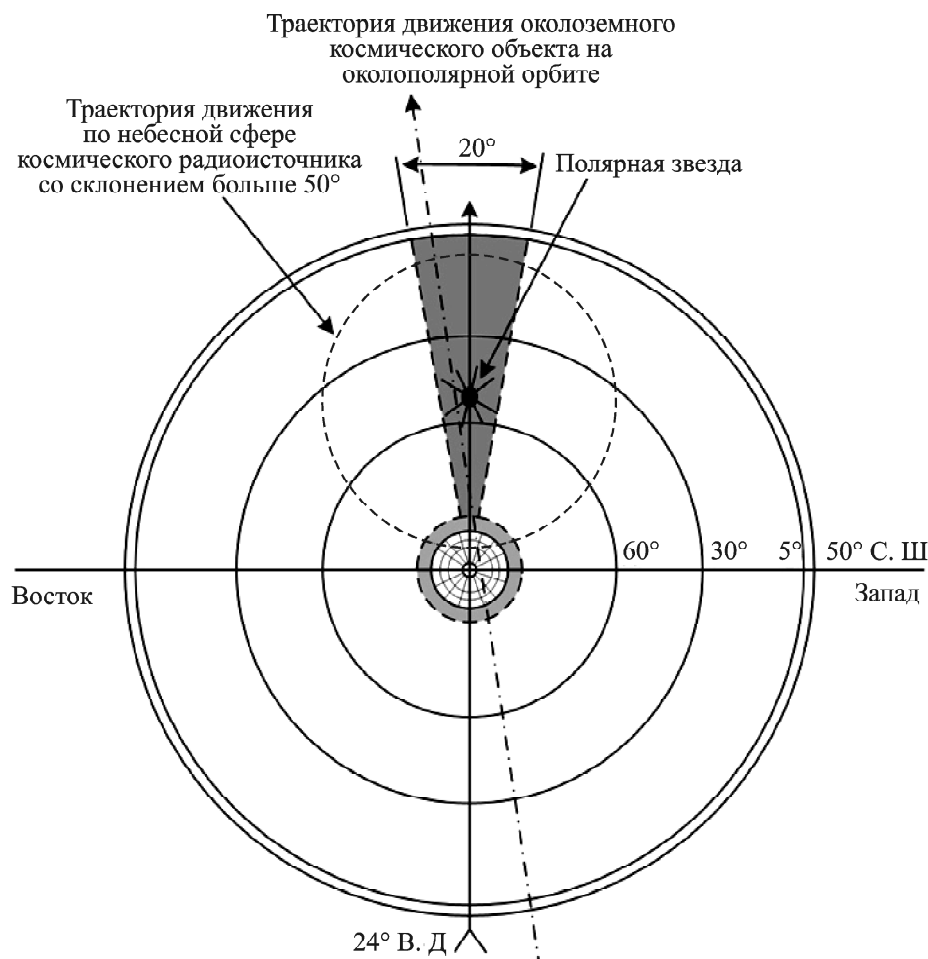


Рис. 6. Пример конструктивных ограничений при наблюдениях некоторых типов космических объектов, связанных с недостаточной длиной азимутальной кабельной петли и “мертвой” зоной в окрестностях зенита

### 3.3. Научные задачи

Как было указано во введении, отличительной чертой разрабатываемого радиотелескопа будет многодиапазонность и широкополосность. Успешный опыт модернизации радиотелескопа РТ-70 [8], когда после вторичного зеркала параллельно с основным приемником были размещены спиральные антенны и высоколинейные малошумящие усилители приемной системы, работающей в диапазоне  $(327 \pm 20)$  МГц, демонстрирует возможность создания на радиотелескопе РТ-32 приемных систем более низкочастотных диапазонов, чем допускает лучевод.

Тогда, исходя из предположения, что частотный диапазон радиотелескопа простирается от 1 до 25 ГГц, можно сформулировать достаточно обширный круг радиоастрономических задач, поскольку широкополосный прием обеспечит высокую чувствительность и позволит изучать разнообразные источники континуального, импульсного и транзиентного излучения.

Широкополосные исследования Солнца и межпланетных мерцаний, проводимые одновременно с радиотелескопами низкочастотных диапазонов (УТР-2, УРАН, ГУРТ [9, 10]), дадут уникальную информацию об эволюции солнечных вспышек в короне Солнца, о солнечном ветре и межпланетной среде. Использование многоантенного приема (с участием украинских, итальянских, французских, латвийских и польских радиотелескопов) позволит существенно расширить возможности изучения различных типов спорадического радиоизлучения.

Предполагая большое время накопления при спектральных исследованиях, можно проводить изучение радиорекомбинационных линий водорода и углерода на всех доступных длинах волн в различных областях Галактики (в облаках нейтрального или ионизированного водорода, районах звездообразования, планетарных туманностях) для определения таких их параметров, как плотность, температура, мера эмиссии, динамика и химический состав. Спектральные наблюдения будут включать также линии водорода (1.4 ГГц), гидроксильных (ОН), метанольных и водяных мазеров.

Рассеяние импульсных сигналов на высоких частотах ( $4 \div 6$  ГГц) достаточно мало, поэтому возможна регистрация пульсаров из самых отда-

ленных областей Галактики за ее центром. Быстрые алгоритмы поиска меры дисперсии с наработанными процедурами конвейерной обработки данных позволят проводить эффективный поиск пульсаров, транзиентов, послесвечений гамма-всплесков, и т. п. Возможность высокоскоростной записи данных АЦП и устранения дисперсионной задержки импульсов когерентными методами позволит изучать гигантские импульсы пульсаров в L и S диапазонах с временной разрешающей способностью порядка одной наносекунды, что сравнимо с временной разрешающей способностью приемных систем лучших радиотелескопов мира.

Использование радиотелескопа в составе радиоинтерферометра расширит круг задач благодаря возможности получать очень высокое пространственное разрешение и строить изображения. С учетом указанного диапазона рабочих частот РТ-32 радиоастрономам будут доступны все основные рабочие полосы диапазона Европейской РСДБ сети (табл. 2).

Интерферометрические наблюдения будут проводится как в системе EVN, так и в других коллаборациях, например, с участием Украины, Франции, Польши, Латвии, Италии.

Большинство внегалактических источников, которые предполагается исследовать, составляют активные ядра галактик (Active Galactic Nuclei – AGN). В список изучаемых объектов попадают как галактики Сейферта и радиотихие квазары, так и радиогромкие объекты (блазары, радиогромкие квазары и радиогалактики). Особый интерес представляют исследования внегалактических объектов с большим красным смещением. В этот список входят также галактики с интенсивным звездообразованием, инфракрасные га-

Таблица 2. Основные диапазоны, используемые в сети EVN

Длина волны (диапазон), см	Центральная частота диапазона, МГц
18 (L)	1664
13 (S)	2268
6 (C)	4992
5 (C)	6030 (ОН)
4.5 (C)	6668 (Метанол),
4 (X)	8418
1.35 (K)	22230

лактики с высокой и сверхвысокой светимостью и гравитационные линзы. Формирование сверхмассивных черных дыр и их развитие в активных ядрах галактик, особенно при большом красном смещении (в ранней Вселенной), в настоящее время представляет особый интерес. Радиоисточники с ультракрутым спектром (Ultra Steep Spectrum – USS) интересны также с точки зрения поиска радиогалактик с большим красным смещением и построения изображений их структур (ядра, струи, и лепестки). Такие радиокарты имеют важное значение при изучении формирования черных дыр. При исследовании галактических источников предметом особого интереса являются кривые блеска и изображения структуры рекуррентных Новых, микро-квазаров и транзиентов.

Чрезвычайно интересными являются спектральные РСДБ наблюдения галактик с промежуточными и малыми красными смещениями в линии водорода 21 см, а также мазерных линий OH на частоте 1.6 ГГц и линии метанола на частоте 6.7 ГГц, которые возникают в регионах звездообразования в нашей собственной Галактике.

Представляется перспективным и изучение мелкомасштабной структуры Галактики по результатам поглощения “подсвечивающего” излучения внегалактических источников в линии 21 см.

### 3.4. Структура приемного тракта

Предлагаемая структурная схема радиотелескопа РТ-32 изображена на рис. 7. Для работы современных радиотелескопов необходимы дополнительные системы. Это система частот и единого времени, которая нужна для когерентной

регистрации входных сигналов и их временной привязки. Нужна также система позиционирования и временной синхронизации импульсов 1pps. Эта система может одновременно использоваться для измерения полного электронного содержания в ионосфере Земли (двухчастотный или трехчастотный GPS приемник). Необходимы также дизельные генераторы на случай отключения электроснабжения в момент наведения антенны (система энергоснабжения с дублирующими аварийными дизель-генераторами), автоматическая метеостанция и радиометр на частоту 22 ГГц. Радиометр нужен для измерения уровня водяных паров в атмосфере и корректной оценки атмосферных шумов в К диапазоне. Это позволит при обработке данных использовать оценку эквивалентной температуры шумов системы с учетом состояния атмосферы (наличия водяных паров).

Каждая из систем, обозначенных прямоугольниками, может быть представлена гораздо более подробно. Но в целях обоснования шумовых параметров радиотелескопа дальше будет рассмотрена только система “Поляризатор, приемник, калибратор” как ключевая (рис. 8).

Поляризатор – это прибор, предназначенный для разделения правой и левой круговых поляризаций. Эти две ортогональные поляризации присутствуют обыкновенной и необыкновенной нормальным волнам в слабо анизотропной холодной плазме межзвездной и межпланетной среды, а также ионосферы Земли. Поляризатор должен быть принадлежностью криогенного модуля в К диапазоне (в К диапазоне геометрические размеры поляризатора сравнительно малы) или иметь очень малые потери сигнала (в более длинноволновых диапазонах). Рабочая полоса поляризатора при

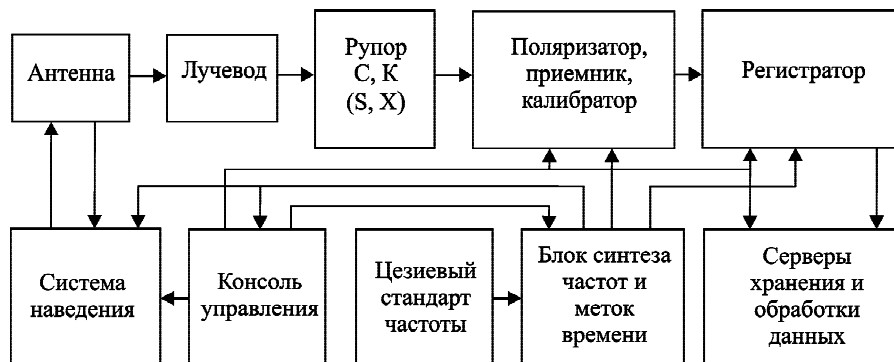


Рис. 7. Общая структурная схема радиотелескопа РТ-32 (Золочев) с дополнительными системами

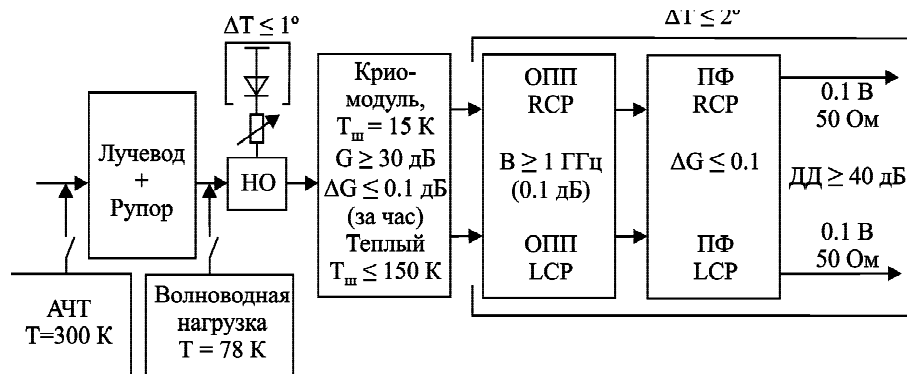


Рис. 8. Детализация модуля “Поляризатор, приемник, калибратор”

развязке поляризаций  $-20$  дБ равна 30 % от центральной частоты выбранного диапазона. В более узкой частотной полосе, которая может достигать 10 %, поляризатор должен обеспечивать развязку в ортогональных поляризационных каналах не хуже  $-30$  дБ.

На рис. 8 приведены предполагаемые значения коэффициента усиления ( $G$ ) охлаждаемого блока. Усилители сигналов обеих поляризаций с температурой собственных шумов  $\approx 10 \div 15$  К должны “отрезать” шумы последующих устройств. Поэтому их минимальное усиление должно быть порядка 30 дБ или более. Очень важно уделить внимание стабильности коэффициента передачи ( $\delta G$ ) всех систем в приемном тракте. Долговременные изменения усиления не должны превышать 0.1 дБ в час. На рис. 8 указаны также рабочая полоса частот ( $B$ ) – 1 ГГц или более, минимальный динамический диапазон (ДД) и ожидаемый уровень сигнала на входе АЦП – 0.1 В.

Шумовой диод подключается через регулируемый аттенюатор и направленный ответвитель (НО) на вход криогенного модуля. Добавлена возможность калибровки по абсолютно черному телу (АЧТ) с температурной ступенькой от “теплой” до “холодной” волноводной нагрузки, имеющей температуру жидкого азота для калибровки шумов диода. Как шумовой диод, так и “теплая” часть приемника – однополосные приемники (ОПП) правой и левой круговых поляризаций (RCP, LCP) и полосовые фильтры (ПФ) – должны находиться в термостате.

Еще одним необходимым свойством должен быть “теплый” ( $T_{ш} \leq 150$  К) режим работы усилителей, которые размещены в криомодуле. Поскольку время наработки на отказ холодиль-

ных машин ограничено, а многие измерения не требуют предельно достижимой чувствительности, нередко весь приемник должен работать без охлаждения. Такие задачи, как контроль ошибок наведения, контроль ширины диаграммы направленности и др., с одной стороны, занимают относительно много времени, а с другой стороны, не требуют охлаждения приемника. Поэтому значительные ресурсы жидкого гелия и азота могут быть сэкономлены благодаря использованию “теплого” режима работы приемника. При этом усилители должны быть стабильными и иметь стабильную форму амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной характеристик.

Шумовой диод (в радиотелескопах для калибровок достаточно широко используются диоды с шумовой температурой  $\sim 10^4$  К) будет подключен через регулируемый аттенюатор для “впрыскивания” дополнительных шумов после направленного ответвителя (НО) с малыми потерями сигнала. Диод планируется использовать как вторичный эталон шума. Для проверки шумов самого диода будет использоваться волноводная нагрузка, которая должна быть охлаждена до температуры жидкого азота. Для проверки потерь сигнала (оценки шумовой температуры) лучевода необходим поглотитель, который имитирует абсолютно черное тело. Этот поглотитель в режиме калибровки при необходимости будет устанавливаться на входе лучевода (вторичный фокус антенной системы MARK-4B). Он должен иметь низкий ( $< 1.2$ ) коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) во всех рабочих диапазонах, верхний отражатель (для удвоения коэффициента поглощения, выраженного в децибелах) и иметь встроенный датчик температуры.

После криогенного блока планируется установить однополосный приемник (ОПП) с преобразованием частоты в диапазон  $0 \div 1000$  МГц и высококачественный фильтр, который устраняет наложения при цифровом приеме (anti-aliasing filter), с потерей не более  $10 \div 15$  % полосы  $0 \div 1000$  МГц. Как шумовой диод, так и “теплая” часть приемника должны находиться в термостате. В нем стабильная температура должна поддерживаться с помощью элементов Пельтье с погрешностью порядка одного Кельвина.

Процесс модернизации антенной системы MARK-4B планируется вести поэтапно. На первом этапе исследуются параметры этой системы в С диапазоне и общие параметры будущего радиотелескопа, которые свойственны всем диапазонам (скорости наведения, точность временной привязки и т. п.). Далее планируется проведение тестовых радиоастрономических наблюдений в С и К диапазонах с помощью “теплых” радиометров (до настоящего времени такие наблюдения проведены в С диапазоне). После чего основные радиоастрономические наблюдения будут проводиться с помощью “холодных” малошумящих приемников в С и К диапазонах. После устранения недостатков, выявленных в ходе наблюдений в С и К диапазонах, первый этап модернизации РТ-32 будет завершен.

Второй этап модернизации связан с освоением S и X диапазонов. При этом X диапазон ( $8 \div 12$  ГГц) планируется использовать для работы с сигналами искусственных спутников Земли. S диапазон ( $2 \div 4$  ГГц) планируется использовать для радиоастрономических наблюдений. Поскольку в имеющемся лучевом дифракционные потери в этом диапазоне велики, рассматривается вариант использования дополнительных облучателей с неохлаждаемыми малошумящими усилителями, смесителями и передачей сигналов в рабочее помещение на низкой частоте минуя лучевод.

Третий этап требует исследований параметров РТ-32 в L ( $1 \div 2$  ГГц) и P ( $0.3 \div 1$  ГГц) диапазонах. Планируется проведение дополнительных расчетов и тестовых наблюдений. По их результатам будет принято решение о целесообразности третьего этапа модернизации.

Проведение юстировки радиотелескопа РТ-32 покажет возможность его использования в более отдаленной перспективе в низкочастотной части Ка диапазона.

#### 4. Первые результаты измерений характеристик РТ-32 в С диапазоне

Тестирование параметров антенной системы было бы невозможным без разработки и установки критически важных систем будущего радиотелескопа. Важнейшим шагом модернизации к концу 2018 г. явилась разработка и установка тестового образца новой системы наведения и сопровождения объектов, которая разработана в Тернопольском национальном техническом университете имени Ивана Пулюя. Ее описанию будет посвящена отдельная статья, которая будет подготовлена после проведения детального исследования матрицы ошибок наведения. Второй важнейший блок для проведения измерений – широкополосный приемник с диапазоном входных частот  $4.6 \div 5.1$  ГГц, который первоначально разрабатывался для радиотелескопа РТ-70 ПРАТ “Научно-производственное предприятие “Сатурн”. На этом же предприятии был разработан квадратичный детектор с системой регистрации. Кроме того, для поляризационных измерений учеными Института радиофизики и электроники имени А. Я. Усикова НАН Украины был разработан вспомогательный разделитель поляризаций (септум-поляризатор).

Благодаря этому в декабре 2018 г. были проведены калибровки “теплого” радиометра и всего приемного тракта системы MARK-4B в С диапазоне. Получена оценка точности наведения РТ-32. По данным радиоастрономических наблюдений 3C461 (Кассиопея А), 3C405 (Лебедь А), 3C454.3 в С диапазоне произведена оценка ширины диаграммы направленности РТ-32.

По ширине диаграммы направленности и шумовой температуре всей системы приема были сделаны оценки эффективной площади антенны, коэффициента использования поверхности РТ-32 и чувствительности этого радиотелескопа в С диапазоне. По данным наблюдений проведена оценка весовой балансировки РТ-32 и максимальных погрешностей наведения в С диапазоне.

##### 4.1. Измерение шумов антенной системы с помощью “теплых” радиометров

Лабораторные измерения параметров широкополосного “теплого” двухканального радиометра, которые предварительно были сделаны сотрудниками ПРАТ “НПО Сатурн”, показали, что эквивалентная шумовая температура приемника на момент измерений составляла  $\approx 150$  К.

Типичная АЧХ на выходе ПЧ “теплого” радиометра приведена на рис. 9. Видно, что приемник не возбуждается. Форма его АЧХ относительно пологая без существенных резонансов.

Калибровки “теплых” радиометров проводились с использованием так называемого “У” метода. Этот метод основан на регистрации отношения значений шумового напряжения, снимаемого радиометром с согласованной нагрузки при температуре окружающей среды и температуре кипения жидкого азота (с учетом некоторой добавки температуры за счет неидеальности терморазвязки). В наших условиях температура окружающей среды составляла  $T_1 = 282$  К (+9 °С), а температура кипения жидкого азота с учетом терморазвязки составляла  $T_2 = 82$  К. Согласованная нагрузка была помещена в экран из алюминиевой фольги.

Перепад выходной мощности регистрировался АЦП, который располагался после квадратичного детектора. Отклик, который был получен для первого канала радиометра, приведен на рис. 10.



Рис. 9. АЧХ первого канала “теплого” радиометра

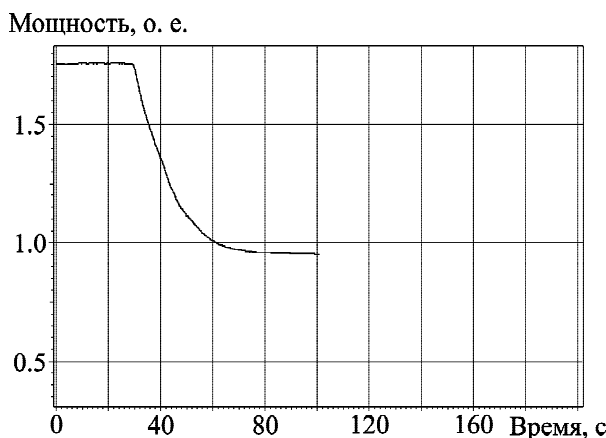


Рис. 10. Отклик первого канала “теплого” радиометра на температурный скачок на согласованной нагрузке

Из рис. 10 можно видеть, как изменяется отклик “теплого” радиометра в зависимости от охлаждения нагрузки.

Для метода холодной и горячей нагрузки в первом приближении справедливо уравнение:

$$T_{SN} = \frac{T_1 - T_2 r_1}{r_1 - 1}, \quad (1)$$

где  $T_{SN}$  – температура собственных шумов радиометра,  $T_1 = 282$  К,  $T_2 = 82$  К,  $r_1 = 1.751/0.95 = 1.8432$  – зарегистрированное отношение уровней мощности на температурной ступеньке радиометра.

Из уравнения (1) получаем температуру собственных шумов радиометра  $T_{SN} \approx (155 \pm 5)$  К. Относительно этой собственной температуры шумов радиометра и проводились следующие калибровки приемного тракта и его отдельных составляющих.

Кроме эквивалентной шумовой температуры “теплых” приемников в ходе тестирования отдельных узлов РТ-32 была сделана оценка эквивалентных шумов всей приемной системы с учетом и без учета собственных шумов “теплого” радиометра.

Оценка собственных шумов всей системы приема радиотелескопа РТ-32 в диапазоне 4.6 ÷ 5.1 ГГц основана на измерениях собственных шумов радиометра в этом диапазоне (155 К), технической документации фирмы NEC, в которой приведен уровень первых боковых лепестков, наших собственных оценках этого уровня и параметрических оценках потерь сигнала в лучевом и облучающем гофрированном коническом рупоре.

При этом мы исходили из того, что уровень теплового шума Земли, который присутствует на входе антенны из-за наличия боковых лепестков (–14 ÷ –12.5 дБ) составляет  $\approx 10 \div 16$  К (в среднем 13 К). Дополнительная добавка на входе лучевода определяется температурой реликтового фона  $T_R = 2.7$  К и атмосферной температурной добавкой  $T_{ATM} \approx 7$  К, которая возникает из-за наличия рассеянного парами воды излучения Земли (вместе 10 К). К этому уровню следует добавить величину  $T_{SN} K_P + T_{ENV} (1 - K_P)$  (здесь  $T_{ENV} \approx 282$  К – температура окружающей среды,  $K_P$  – коэффициент передачи по мощности лучевода плюс облучателя). Эквивалентная температура шумов всей приемной системы РТ-32

$T_{SYS}$ , рассчитанная для различных значений  $K_P$ , и ее составляющая  $T_{BWG}$  – температура всей антенны без учета эквивалентной температуры собственных шумов “теплого” радиометра, представлены в табл. 3. Расчеты проведены по формулам:

$$T_{SYS}(K_P) = T_{BWG}(K_P) + T_{SN}K_P, \quad (2)$$

$$T_{BWG}(K_P) = T_R + T_{ATM} + T_{ENV}(1 - K_P).$$

Здесь  $K_P = K_{PBWG}K_{PH}$  – коэффициент передачи по мощности последовательно соединенных лучевода ( $K_{PBWG}$ ) и облучателя ( $K_{PH}$ );  $T_{BWG}$  – добавка, вносимая в эквивалентную температуру шумов антенной системой без учета собственных шумов “теплого” радиометра;  $T_{SN}$  – эквивалентная температура собственных шумов “теплого” радиометра;  $T_R = 2.7$  К – яркостная температура реликтового фона;  $T_{ATM} \approx 7$  К – атмосферная добавка в эквивалентную температуру шума;

$T_{SL} \approx 13$  К – добавка в эквивалентную температуру шума за счет наличия боковых лепестков у диаграммы направленности РТ-32.

Полезно также рассчитать уровень шумов всей системы на входе “теплого” радиометра с учетом и без учета его собственных шумов. Этот расчет выполняется по формулам, аналогичным уравнениям (2), и не представляет затруднений. Результаты расчета приведены в табл. 4.

В результате удалось установить, что температура тепловых шумов, которую добавляет лучевод без септум-поляризатора составляет  $(50 \pm 5)$  К. Эта оценка соответствует значениям результирующего коэффициента передачи по мощности в пределах  $-0.5$  дБ  $< K_P < -0.3$  дБ. Во время проведения наших тестов не работали дегидратор облучателя и компрессоры наддува лучевода, т. к. в рабочем помещении одновременно с нашими измерениями шли ремонтные работы. То есть все измерения проводились при влажном лучевode. Поскольку погодные условия во время

Таблица 3. Эквивалентная температура шумов приемной системы РТ-32 на частоте 5 ГГц

$K_P$ , дБ	$K_P$	$T_{SN}K_P$ , К	$T_{ENV}(1 - K_P)$ , К	$T_{SYS}$ , К	$T_{BWG}$ , К
-0.1	0.9772	151.47	6.42	183.89	32.42
-0.2	0.9550	148.02	12.69	186.71	38.69
-0.3	0.9333	144.65	18.82	189.47	44.82
-0.4	0.9120	141.36	24.81	191.17	50.81
-0.5	0.8913	138.14	30.67	194.81	56.67
-0.6	0.8710	134.00	36.39	196.39	62.39
-0.7	0.8511	131.93	41.98	199.91	67.98
-0.8	0.8318	128.92	47.44	202.35	73.44
-0.9	0.8128	125.99	52.78	204.77	78.78
-16.3	0.0234	3.63	275.39	301.72	298.09
-16.4	0.0229	3.55	275.54	301.79	298.25
-16.5	0.0224	3.47	275.69	301.86	298.39

Таблица 4. Эквивалентная температура шумов на входе “теплого” радиометра

$K_P$ , дБ	$K_P$	$T_{SN}$ , К	$T_{ENV}(1 - K_P)$ , К	$\Delta T_{SKY}$ , К	$T_{EQ}$ , К
-0.1	0.9772	155.00	6.42	25.41	186.83
-0.2	0.9550	155.00	12.69	24.83	192.52
-0.3	0.9333	155.00	18.82	24.26	198.09
-0.4	0.9120	155.00	24.81	23.71	203.52
-0.5	0.8913	155.00	30.67	23.17	208.84
-0.6	0.8710	155.00	36.39	22.65	214.04
-0.7	0.8511	155.00	41.98	22.13	219.11
-0.8	0.8318	155.00	47.44	21.63	224.07
-0.9	0.8128	155.00	52.78	21.13	228.91



тестов были неблагоприятными (шел то дождь, то снег), мы не смогли оценить влияние радиопрозрачного покрытия на шумовую температуру всего приемного тракта. Поэтому аналогичные измерения должны быть осуществлены повторно в сухую и ясную погоду при дальнейшем тестировании РТ-32.

Особое внимание в будущем следует уделить калибровке приемного тракта в различных сечениях лучевода. Доступных точек для калибровки с использованием поглотителей в лучеводе две. Первая из них расположена непосредственно на входе лучевода (рис. 11, левая панель). Вторая точка расположена на входе облучателя (рис. 11, правая панель). Оба сечения надо последовательно перекрывать поглотителем с отражателем и дальше, измеряя температуру поглотителя, действовать аналогично тому, как описано выше. Температурный скачок в данном случае обеспечивает разность между температурой реликтового фона 2.7 К и температурой окружающей среды\*. Отклик радиотелескопа на фоновое излучение неба регистрируется при снятом поглотителе и снятом радиопрозрачном покрытии при наведении антенны в зенит.

\*Нужно также учесть дополнительный нагрев из-за наличия водяных паров в атмосфере и “просачивания” радиоизлучения Земли через боковые лепестки диаграммы направленности антенны.

#### 4.2. Сравнительная оценка нестабильности коэффициента передачи и ошибок системы наведения

Перед проведением измерений параметров антенной системы необходимо было провести оценку ошибок наведения и нестабильности работы тестовой радиоприемной аппаратуры. На рис. 12 приведен скан источника 3С454.3. Видно, что шумы и нестабильности коэффициента передачи (вне направления на источник) не превышают 0.3 %, что меньше требуемых в проекте модернизации 0.1 дБ (см. раздел 3).

Наличие ошибок наведения в первой версии программы сопровождения точечного источника можно проиллюстрировать пробным сеансом слежения за интенсивным источником 3С405. При длительном слежении без “подстройки” с помощью матрицы ошибок в первых наблюдениях проявились заметные вариации сигнала (до 10 %) на выходе антенны (рис. 13), которые, как показано выше, не могут быть объяснены нестабильностями приемного тракта. Поэтому необходимость изучения особенностей механических узлов и построения матрицы ошибок в дальнейшей работе не вызывает сомнений. При наблюдениях в марте 2019 г. в программной части системы наведения были учтены замеченные недостатки. В результате в программу наведения были введены ограничения на максимальные значения ускорений/замедлений по обеим коор-

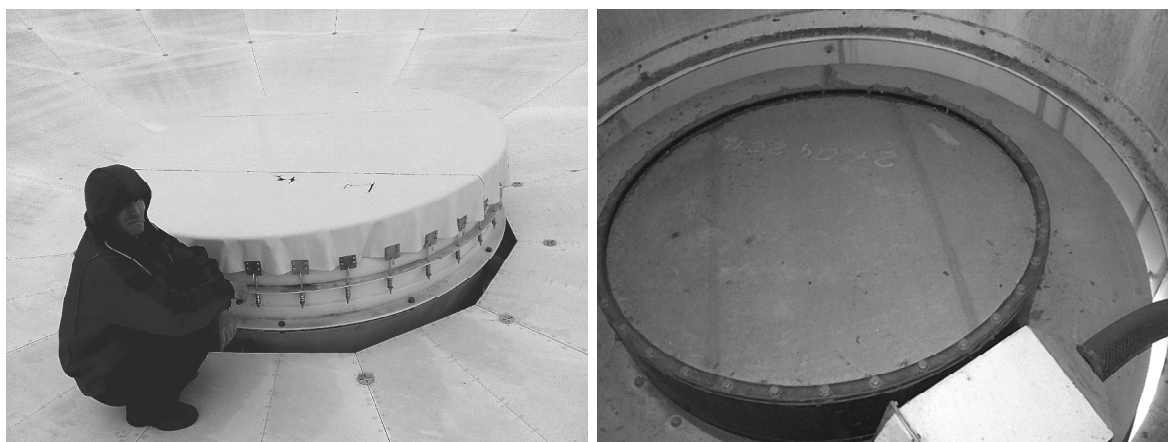
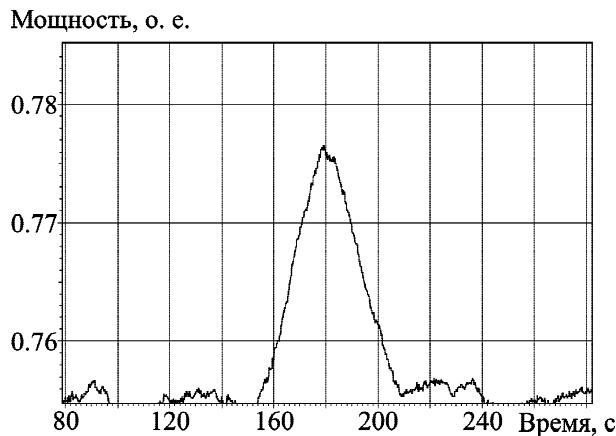
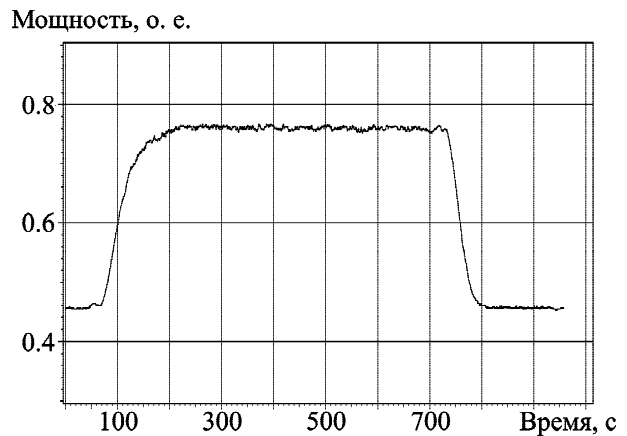


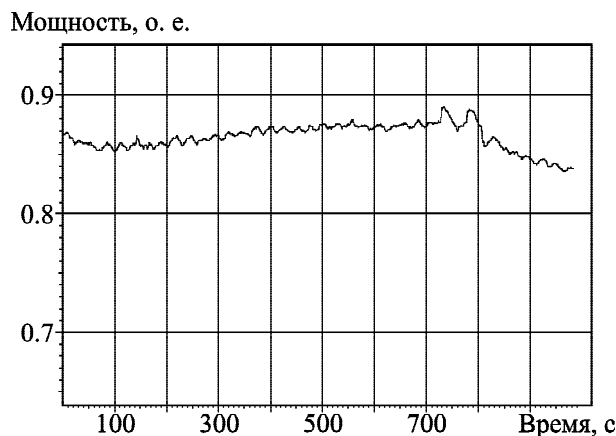
Рис. 11. Сечения лучевода, в которых возможны калибровки приемного тракта РТ-32 с помощью поглотителей: левая панель – вход лучевода, правая панель – вход облучателя



**Рис. 12.** Скан радиисточника 3С454.3 на частоте 4.85 ГГц после наведения радиотелескопа РТ-32 без предварительной коррекции, полученный 12 декабря 2018 г.



**Рис. 14.** Результаты тестирования среднесрочной стабильности сигнала на выходе РТ-32 на частоте 4.85 ГГц при сопровождении источника 3С405 в марте 2019 г.



**Рис. 13.** Результаты тестирования среднесрочной стабильности сигнала на выходе РТ-32 на частоте 4.85 ГГц при сопровождении источника 3С405 в декабре 2018 г.

динамам. Это позволило радикально уменьшить количество аварийных остановок антенной системы при сопровождении объекта или в режиме перенаведения. Диаграммная модуляция из-за рыскания антенны при этом практически исчезла (см. рис. 13, рис. 14).

О необходимости изучения механических узлов и особенностей двигателей антенной системы говорит также показанный на интерфейсе программы наведения сигнал контроля токов управления (рис. 15, правая панель). Интерфейс имеет возможность обращаться к различным каталогам радиисточников или искусственных спутников Земли. Данные каталоги могут дополняться новыми объектами. Программа наведения воспроизводит карту звездного неба, на

которую проецируются эфемериды исследуемого объекта и положение максимума диаграммы направленности антенны (рис. 15, левая панель). Кроме того, программа обеспечивает контроль работы механических и электрических узлов антенны, а также удобный контроль скоростей наведения по обеим координатам и управление режимами работы. На рис. 16 в качестве примера показаны режим перенаведения радиотелескопа с источника на источник и соответствующий трек движения центра диаграммы направленности по небесной сфере. На рис. 17 приведена эфемерида сопровождения квазара 3С9 (3С26 FK5). В правом верхнем углу этого рисунка показаны эпюры распределения скоростей движения РТ-32 по азимуту и углу места уже в усовершенствованной программе наведения (после введения ограничений на максимальные ускорения). Их можно сравнить с аналогичными эпюрами на рис. 15. Это сравнение показывает, что основной причиной диаграммной модуляции была разбалансированность ускорений/скоростей в системе наведения по углу места.

#### 4.3. Пробные измерения погрешностей наведения РТ-32 в направлении на радиисточники 3С461, 3С405 и 3С454.3

За короткий интервал тестовых наблюдений невозможно снять всю матрицу ошибок (эта матрица должна отображать систематические погрешности наведения РТ-32 на достаточно густой сетке

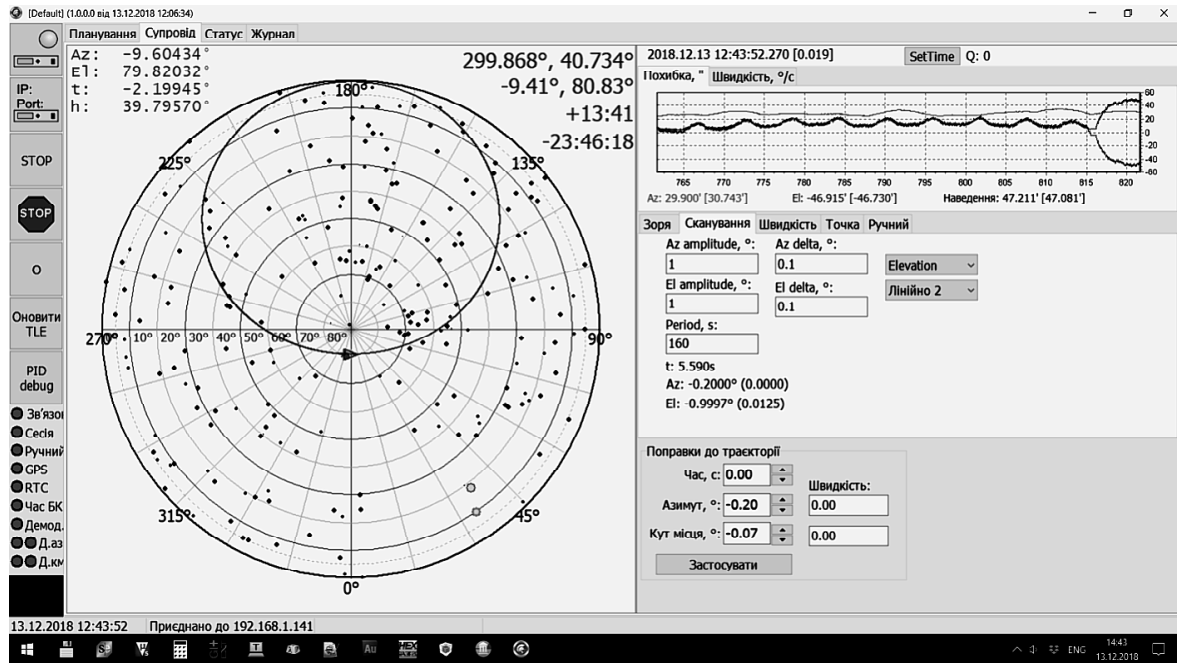


Рис. 15. Общий вид интерфейса системы наведения. На левой панели представлена карта звездного неба и эфемериды 3C405 (Лебедь А), а также точка максимума диаграммы направленности при слежении за выбранным объектом. На правой панели приведены ошибки/скорости движения антенны по азимутальной и угломестной координатам. Наблюдения проведены на PT-32 13 декабря 2018 г.

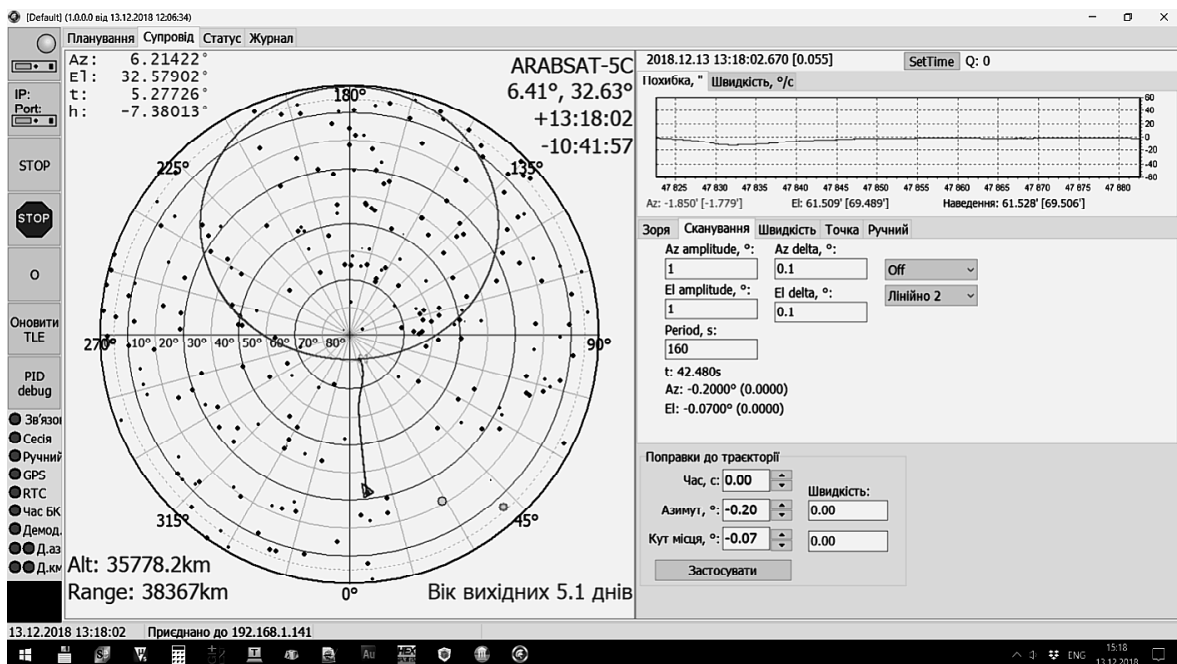


Рис. 16. Интерфейс программы наведения при перенаведении с источника 3C405 на искусственный спутник Земли ARABSAT 5C. Линией на небесной сфере, соединяющей эфемериду источника 3C405 с положением геостационарного спутника ARABSAT 5C, показан трек перенаведения антенны

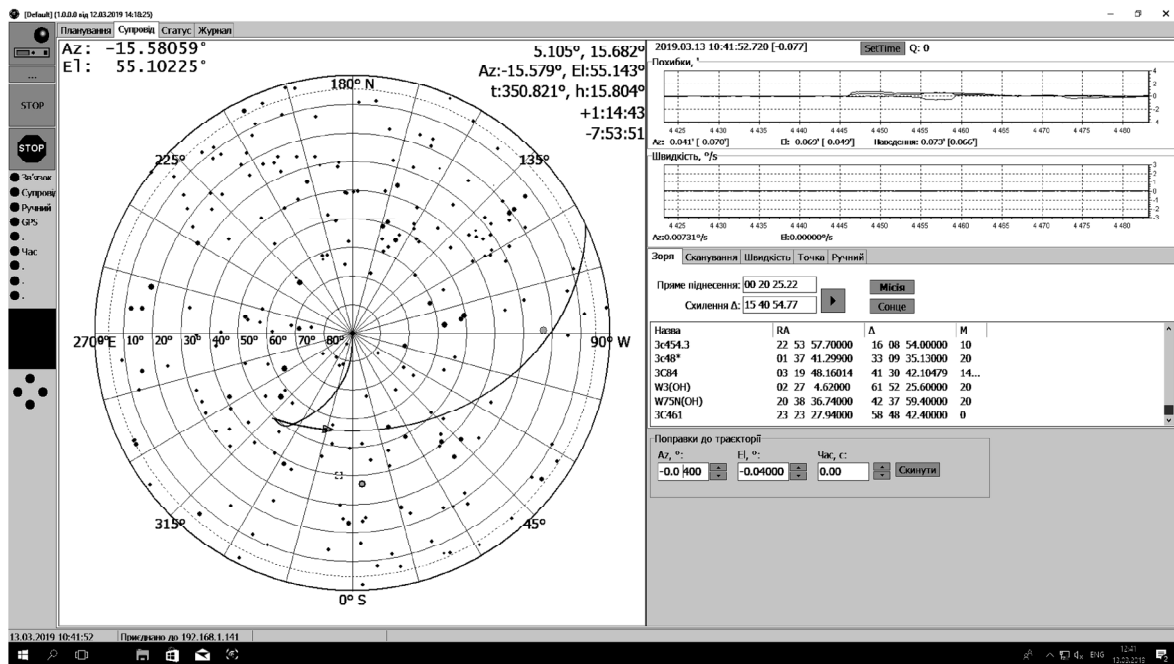


Рис. 17. Эфемериды радиостанции ЗС9 (ЗС26 FK5). В правом верхнем углу изображены эпюры распределения скоростей движения зеркала радиотелескопа РТ-32 по азимуту и углу места

азимутов и углов места или направляющих косинусов по  $U$  и  $V$  координатам). Поэтому было принято решение оценить систематическую составляющую погрешностей наведения только в направлениях на мощные радиостанции излучения: Кассиопея А (ЗС461), Лебедь А (ЗС405) и радиостанция ЗС454.3, который имеет относительно небольшую интенсивность.

При тестировании наведения в координаты выбранного источника вводилось упреждение на четыре временных минуты по прямому восхождению. Далее антенна наводилась в эту точку и останавливалась. Для повышения точности оценок источник сканировался только за счет вращения Земли.

Для оценки систематических погрешностей наведения использовался следующий алгоритм. Вначале прицельная точка наведения выбиралась по углу места ниже на  $0.5^\circ$  того места, где по расчетам должен был находиться исследуемый радиостанция. Далее с шагом по углу места  $+0.02^\circ$  делалось несколько сканов по азимуту того участка неба, в котором находился объект исследования. По максимальному отклику радиометра определялись систематические погрешности по азимуту и углу места в направлении на выбранный радиостанция (рис. 18).

Тестирование наведения РТ-32 осуществлялось как вблизи положения кульминации, так и на значительных часовых углах от него. Результаты наведения на “слабый” радиостанция ЗС454.3 были приведены выше (см. рис. 12).

Более подробно погрешности наведения были проанализированы при слежении за радиостанциями ЗС461 (Кассиопея А) и ЗС405 (Лебедь А). Оба радиостанция являются довольно интенсивными. На центральной частоте измерений  $f_c = 4.85$  ГГц ( $\lambda_c = 6.194$  см) спектральные плотности потоков радиоизлучения обоих радиостанций оказываются соизмеримыми,  $\approx 300 \div 400$  Ян, несмотря на то, что Кассиопея А – это остаток вспышки сверхновой (галактический источник), а Лебедь А – радиогалактика (внегалактический источник). Их угловые размеры тоже оказываются соизмеримы. На рис. 19 приведена карта радиогалактики ЗС405, взятая нами из базы данных NED (Extragalactic Database). Из данной карты видно, что ширина радиогалактики Лебедь А по координате “прямое восхождение” составляет  $\approx 2'$ , а по координате “склонение” –  $\approx 1'$ . Кассиопея А является классическим остатком сверхновой почти сферической формы с радиусом  $r_{Cas-A} \approx 2'$  в оптическом диапазоне.

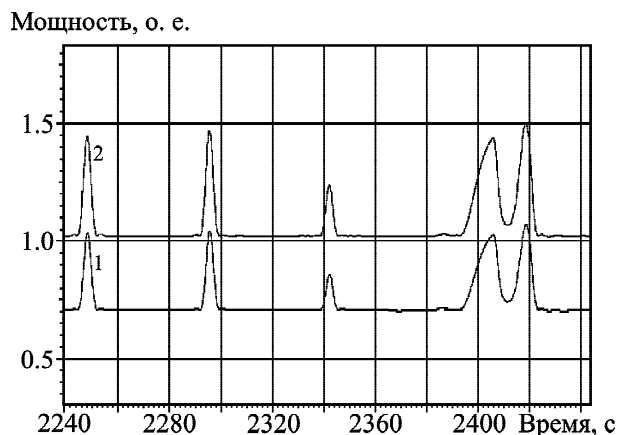


Рис. 18. Определение систематической ошибки наведения РТ-32 в направлении на радиисточник Лебедь А (3С405), проведенное 11 декабря 2018 г.

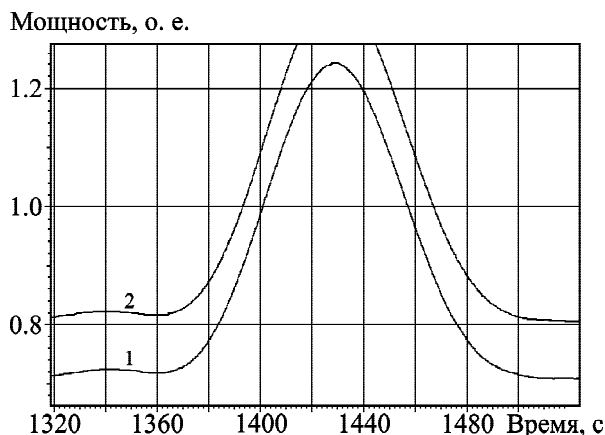


Рис. 20. Прохождение остатка сверхновой Кассиопея А через диаграмму направленности РТ-32 в обоих поляризационных каналах С диапазона: нижняя линия – первый канал, верхняя линия – второй канал

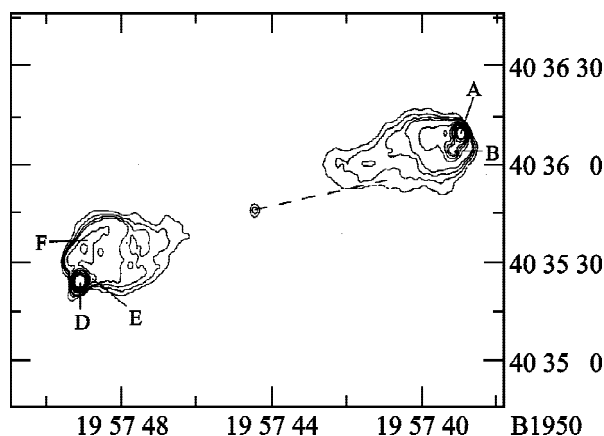


Рис. 19. Карта радиогалактики Лебедь А, полученная на частоте 5 ГГц ([https://ned.ipac.caltech.edu/uri/NED::Image/jpg/1984MNRAS.209..851A/Cygnus\\_Afg2a:I:6cm:1984abs](https://ned.ipac.caltech.edu/uri/NED::Image/jpg/1984MNRAS.209..851A/Cygnus_Afg2a:I:6cm:1984abs))

Расчетная ширина диаграммы направленности РТ-32 при 100 %-ом коэффициенте использования поверхности (КИП) на среднегеометрической частоте измерений  $f_c = 4.85$  ГГц ( $\lambda_c = 6.194$  см) составляет  $\varphi_{cal}(\lambda_c) = \lambda_c / D_{РТ-32} = 6.654'$ . Задачей радиоастрономических измерений является оценка видимой ширины диаграммы направленности в направлении на источник и дальнейший расчет КИП с учетом склонения и угловой ширины наблюдаемого радиисточника.

Правильность наведения на 3С461 (рис. 20) подтверждается тем, что ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности больше, чем аналогичный параметр для 3С405. Этот факт обусловлен тем, что при одинаковых угловых размерах у 3С461 и 3С405 склонение Кассиопеи А

$\delta_{Cas-A} = 58^\circ$ , а склонение Лебеда А  $\delta_{Cyg-A} = 40.5^\circ$ . Соответственно видимая ширина диаграммы направленности при наблюдениях Кассиопеи А должна быть шире в  $\cos(\delta_{Cyg-A}) / \cos(\delta_{Cas-A}) = 1.435$  раза, чем видимая ширина диаграммы направленности при наблюдениях Лебеда А.

После нескольких определений систематических составляющих погрешностей наведения в направлениях на 3С405, 3С461 и 3С454.3 при различных азимутах и углах места выяснилось, что эти погрешности не превышают  $0.02^\circ \pm 0.005^\circ$ , т. е.  $1.5'$ . Для первых тестовых наблюдений это очень хороший результат, потому что значения этих систематических погрешностей наведения не превышают 15 % ширины диаграммы направленности РТ-32 в С диапазоне. Вполне понятно, что после соответствующих исследований и учета полной матрицы погрешностей и последующей ее компенсации в программе управления почти все системные ошибки будут нивелированы.

С появлением соответствующей регистрирующей аппаратуры аналогичная программа исследования погрешностей наведения будет проведена и в К диапазоне. Необходимо также исследовать, будут ли коррелировать обе матрицы погрешностей наведения в С и К диапазонах. Это позволит определить основные составляющие, которые влияют на погрешности наведения. Ими могут быть люфты азимутального и угломестного приводов, задержки в прохождении управляющих команд или сигналов от координатных кодировщиков и т. п.

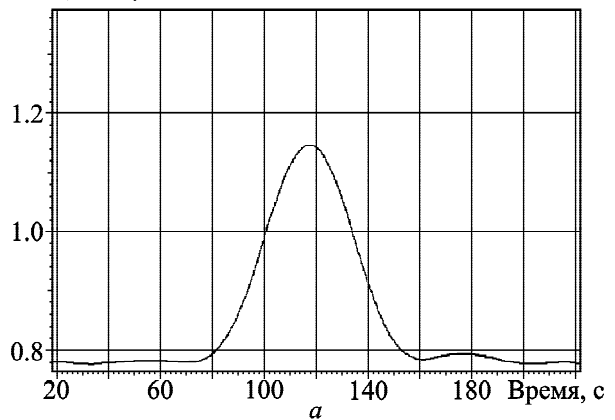
#### 4.4. Первоначальная оценка ширины диаграммы направленности РТ-32 в С диапазоне, уровня ее боковых лепестков, КИП и эффективной площади

Одним из важнейших параметров эффективности работы любого радиотелескопа является значение его эффективной площади. Эту площадь, а также КИП в первом приближении можно оценить по ширине диаграммы направленности на уровне 0.5 от максимального отклика, зарегистрированного в единицах мощности. При этом в идеале должен наблюдаться интенсивный удаленный точечный радиоисточник. Мы регистрировали не точечные, а протяженные мощные источники. Поэтому наши последующие оценки будут сделаны в некоторых модельных приближениях. Ниже рассмотрим результаты наблюдений.

Зарегистрированная ширина диаграммы направленности при наблюдении источника 3С461 (Кассиопея А) составляет 57 временных секунд (57 с) (см. рис. 20). Это значение соответствует 14.25'. Пересчет на склонение источника ( $\delta_{Cas-A}$ ) дает видимую ширину диаграммы направленности  $\varphi_{viz}(\lambda_c) = 7.551'$ . Отсюда уже можно получить оценку реальных угловых размеров диаграммы направленности РТ-32 по азимутальной координате:  $\varphi_{RT-32}(\lambda_c) = \left[ (\varphi_{viz}(\lambda_c))^2 - (r_{Cas-A})^2 \right]^{0.5} = 7.28'$ . Теперь, предположив, что ширины диаграммы направленности по азимутальной и угломестной координатам одинаковы, можно оценить КИП антенны. КИП РТ-32 на частоте 5 ГГц оцениваем как  $\eta_5 = (\varphi_{cal}(\lambda_c) / \varphi_{RT-32}(\lambda_c))^2 = 0.835$ . Это максимальное значение оценки КИП.

Ниже, на рис. 21, а и б приведен один и тот же отклик РТ-32 в С диапазоне на прохождение радиоисточника 3С405 (Лебедь А). Этот радиоисточник выбран в качестве тестового потому, что он имеет высокую спектральную плотность потока. По данным каталога NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/simplesearch>), спектральная плотность мощности потока этого радиоисточника в диапазоне 5 ГГц составляет  $S_f \approx 262.5$  Ян. Угловые размеры этой радиогалактики не превышают 1.9'. Видимая ширина диаграммы направленности РТ-32 в направлении на источник 3С405 составляет 9.5'. Расчеты, аналогичные проведенным по наблюдениям Кассиопеи А, для Лебеда А дают  $\varphi_{viz}(\lambda_c) = 7.224'$ . Тогда реальная ширина диаграммы направленности по наблюдениям Лебеда А составляет

Мощность, о. е.



Мощность, о. е.

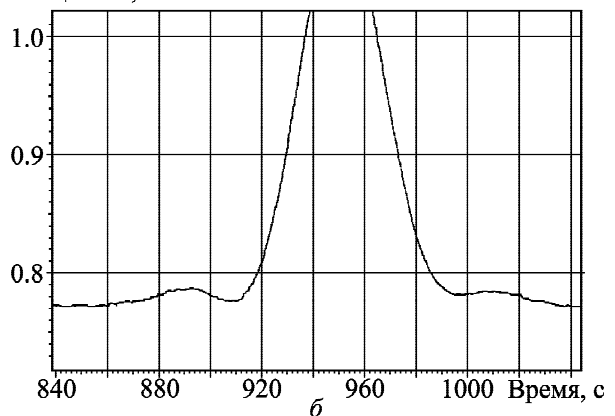


Рис. 21. Первоначальные оценки ширины диаграммы направленности РТ-32 и уровня боковых лепестков в С-диапазоне по радиоастрономическим наблюдениям радиоисточника 3С405 (Лебедь А) 13 декабря 2018 г при транзите источника через локальный меридиан: а – форма всей диаграммы направленности, б – форма ее боковых лепестков

$\varphi_{RT-32}(\lambda_c) = \left[ (\varphi_{viz}(\lambda_c))^2 - (r_{Cas-A})^2 \right]^{0.5} = 6.97'$ , и КИП РТ-32 на частоте 5 ГГц равен  $\eta_5 = (6.654/6.97)^2 = 0.911$ . А эффективная площадь РТ-32 составляет  $A_{eff} = \eta\pi(D/2)^2 = 732.67$  м<sup>2</sup> по результатам наблюдения 3С405 и  $A_{eff} = 671.55$  м<sup>2</sup> – по результатам наблюдения 3С461.

Если предположить, что при наблюдении 3С405 мы наблюдали сечение только одной восточной или западной компоненты радиогалактики, т. е., по сути, точечный радиоисточник, то мы должны переоценить КИП:  $\eta_5 = (6.654/7.224)^2 = 0.8484$ . Это приводит к переоценке  $A_{eff}$ :  $A_{eff} = 682.32$  м<sup>2</sup>. Этот результат совпадает с оценками, полученными из наблюдений Кассиопеи А. Наша оценка КИП, в первом приближении, является рабочей на частоте 5 ГГц. В дальнейшем точные оценки

эффективной площади и КИП для РТ-32 будут получены по наблюдениям более представительной выборки источников, которая будет включать и точечные источники.

Уровень первых боковых лепестков диаграммы направленности антенны, по данным радиоастрономических наблюдений, составляет  $-12.67$  дБ (рис. 21, б). Это немного хуже, чем было оговорено в технической документации для золоченой антенны MARK-4В японской фирмой NEC, но вполне достаточно для использования антенны в качестве как отдельного радиотелескопа, так и радиотелескопа в составе РСДБ сети.

В то же время мы провели оценку ширины и формы диаграммы направленности РТ-32 при наблюдении 3С405 на часовых углах  $-4^h$  (рис. 22). Видно, что первые боковые лепестки диаграммы направленности при таких углах не являются симметричными. Мы исследовали этот же объект в момент кульминации (часовой угол  $0^h$ ) и после кульминации (часовой угол  $+0.5^h$ ). При наблюдении вблизи кульминации боковые лепестки диаграммы направленности антенны становятся почти симметричными (см. рис. 21, б). После кульминации их симметрия нарушается. Форма диаграммы направленности после кульминации, по сравнению с изображенной на рис. 22, имеет перекося в другую сторону.

Из этих исследований можно сделать вывод, что зеркало рефлектора совместно с субрефлектором РТ-32 являются гравитационно уравновешенными только при наблюдении объекта вблизи

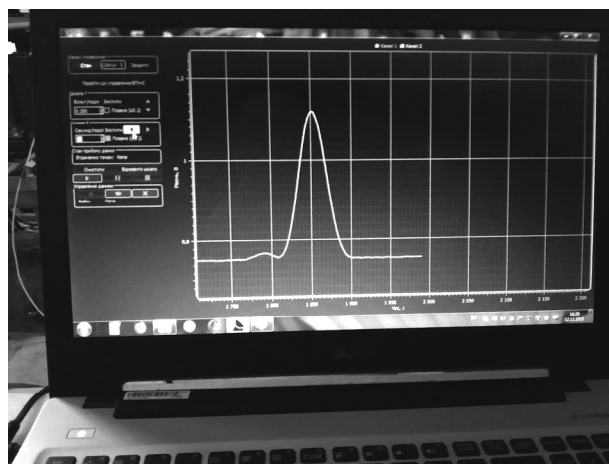


Рис. 22. Несимметричная форма диаграммы направленности РТ-32 в ходе наблюдений радиоисточника 3С405 на больших часовых углах в С диапазоне

локального меридиана. В других секторах наблюдения балансировка антенны немного нарушается. Возможно, это связано с тем, что MARK-4В была связанной антенной, которая долгое время использовалась для наблюдений в секторе углов вблизи нулевого азимута для приема сигналов от геостационарных спутников. Аналогичную деформацию подобной антенны наблюдали в Новой Зеландии.

Учитывая, что была обнаружена несимметричная форма азимутального сечения диаграммы направленности РТ-32, в ходе наблюдений 3С405 было сделано угломерное сечение этой диаграммы направленности. На рис. 23 приведены результаты этого эксперимента. Из них следует, что форма диаграммы направленности несимметрична и в угломерной плоскости, т. е. РТ-32 вместе с лучеводом требуют дополнительной юстировки. К аналогичным выводам пришли и наши новозеландские коллеги при модернизации своей 30-метровой антенны [1].

Мы полагаем, что в ходе дальнейшей модернизации следует тщательно рассмотреть возможность управления положением субрефлектора. Если появится возможность управлять субрефлектором с тремя степенями свободы (осуществлять перемещения вдоль главной оптической оси радиотелескопа и небольшие повороты по азимуту и углу места), тогда КИП РТ-32 можно будет увеличить.

Мощность, о. е.

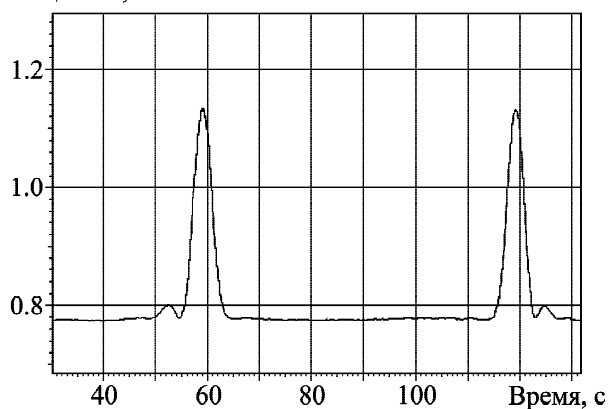


Рис. 23. Несимметричная форма диаграммы направленности РТ-32 в меридиональной плоскости, т. е. в плоскости угла места: два быстрых скана диаграммы направленности РТ-32 на частоте 5 ГГц сделаны последовательно снизу вверх и сверху вниз при наблюдении за радиоисточником 3С405

Влияние зарегистрированных деформационных изменений формы основного зеркала на результаты наблюдений, вероятно, можно будет уменьшить, если ввести управление субрефлектором по трем координатам (высота, азимут, угол места). При этом форма диаграммы направленности РТ-32 станет слабо зависимой от влияния гравитационных нагрузок.

#### 4.5. Широкополосные измерения КСВН приемного тракта РТ-32

При планировании дальнейших этапов модернизации необходимо знать основные параметры приемного тракта. Одним из таких параметров является КСВН. Для приемного тракта РТ-32 этот параметр был измерен в декабре 2018 г. При измерениях септум-поляризатор был исключен из системы приема, т. к. его дальнейшее использование на РТ-32 не предполагалось. Результаты проведенных измерений представлены на рис. 24.

Как и предполагалось при разработке проекта модернизации антенной системы MARK-4В, гофрированный облучатель имеет сложную частотную характеристику КСВН. Если задаться допустимым интервалом значений  $КСВН < 1.5$ , то области “хороших” частот лежат в диапазонах  $4.5 \div 7.8$  ГГц и  $18.2 \div 26$  ГГц. Именно в этих диапазонах проектируются криогенные маломощные приемные системы. Имеется область частот с несколько худшими параметрами КСВН в X диапазоне,  $9.5 \div 12$  ГГц. В этом окне РТ-32 можно использовать для работы с сигналами искусственных спутников Земли или аппаратами дальних космических миссий. В S и Ku диапазонах,  $2 \div 4$  ГГц и  $12 \div 18$  ГГц, измерения КСВН пока не проводились.

#### 4.6. Тестовые наблюдения спокойного Солнца в С диапазоне

Интересным объектом исследований в С диапазоне является Солнце. В этом диапазоне можно наблюдать нижние слои его короны. Именно в этих слоях происходит трансформация теплового излучения фотосферы в нетепловое излучение короны Солнца. Поэтому наиболее интересными будут многочастотные или широкополосные наблюдения Солнца с использованием РТ-32 и украинских радиотелескопов УТР-2, УРАН и ГУРТ. В проведенном нами тестовом наблюдении спокойного

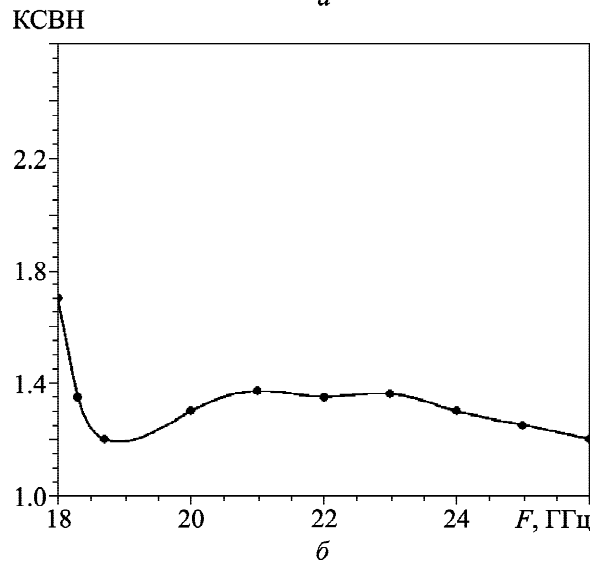
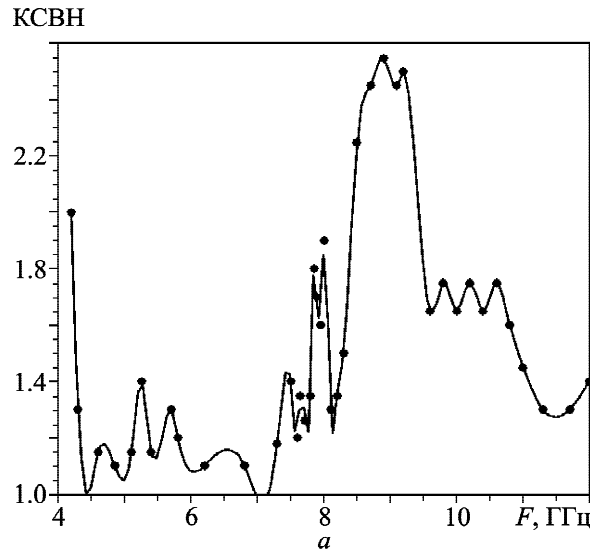


Рис. 24. Результаты измерения КСВН в С, X (а) и К (б) диапазонах: точками отмечены измеренные значения КСВН. При построении графиков использована сплайн-интерполяция

Солнца ставилась задача оценить угловые размеры короны Солнца на частоте 5 ГГц и проследить, наблюдаются ли флуктуационные особенности в распределении яркостной температуры на лимбе Солнца или в видимой области его короны.

Эффективная площадь радиотелескопа РТ-32 в С диапазоне приблизительно в 4 раза меньше чем у РТ-70 (Евпатория, АР Крым). Кроме этого, система основного зеркала, субрефлектора и лучевода РТ-32 имеет относительно большие СКО от формы квазипараболической поверхности в сопоставлении с аналогичными параметрами для РТ-70 (Евпатория). Поэтому без точного юстирования и модернизации поверхности реф-



лектора, субрефлектора и лучевода радиотелескопа РТ-32 вряд ли будет использоваться для наблюдений в миллиметровом диапазоне. Но имеющиеся особенности (по сути недостатки ВВГ антенн) дают возможность рассеивать коротковолновое излучение Солнца и уменьшать поглощение солнечного тепла элементами антенны. Поэтому РТ-32 можно использовать для исследований Солнца. Он может наводиться непосредственно на диск Солнца. Радиотелескоп РТ-70 не имеет такой возможности. Основной луч его диаграммы направленности не может приближаться к диску Солнца ближе чем  $0.5^\circ$ . Соответственно, для РТ-32 спокойное Солнце может использоваться как своеобразный калибратор, который является источником постоянной температуры в дальней зоне наблюдений.

Ниже (рис. 25) приведен пример регистрации отклика теплового радиоизлучения Солнца и нетеплового радиоизлучения его короны в С диапазоне ( $4.6 \div 5.1$  ГГц). Поскольку во время наблюдений (15 марта 2019 г.) Солнце находилось вблизи точки весеннего равноденствия, его склонение было приблизительно равно  $0^\circ$ . Это означает, что пересчет видимых угловых размеров ( $\theta_{viz}$ ) короны Солнца и угловых размеров всех вспышек, которые были зарегистрированы во время наблюдений, проводится простым умножением характерных временных интервалов на число 15. Мы сделали скан спокойного Солнца, когда антенна выводилась в опережающую точку его эфемериды и затем останавливалась. Само сканирование обеспечивалось вращением

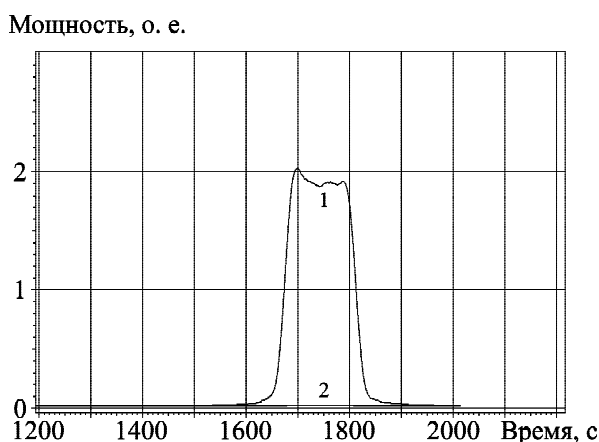
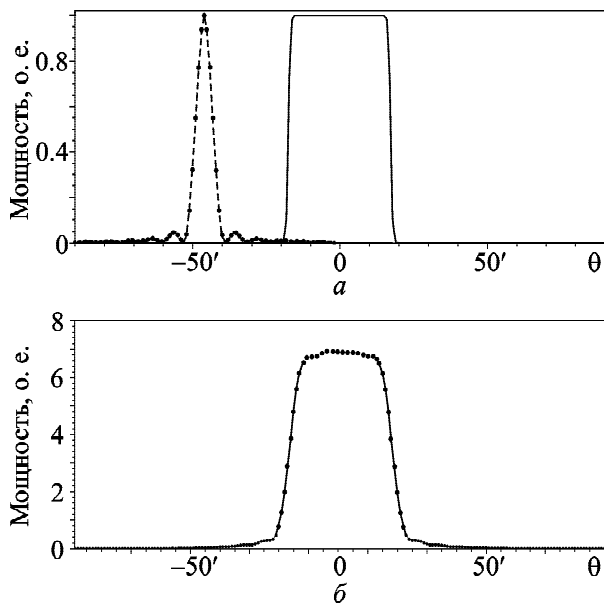


Рис. 25. Результаты сканирования диска Солнца в диапазоне  $4.6 \div 5.1$  ГГц с использованием 16 дБ аттенюатора и “теплого” радиометрического приемника 15 марта 2019 г.

Земли. Полученный отклик “теплого” радиометра приведен на рис. 25. Из зарегистрированных данных мы получаем, что временной интервал между двумя локальными максимумами (западным левым и восточным правым) на диске Солнца примерно равен 90 с. Это значение соответствует  $1350''$ , или  $22'30''$ . Ширина источника излучения по уровню двух минимальных откликов на диске Солнца (эти отклики, с нашей точки зрения, соответствуют температуре невозмущенной короны Солнца) равна 105 с. Это значение соответствует  $1575''$ , или  $26'15''$ . Ширина источника излучения по уровню половинной мощности составляет примерно 133 с, что соответствует  $33'15''$  (угловые размеры фотосферы Солнца составляют  $\approx 27'30''$ ). Ширина короны Солнца, которую мы регистрируем в этом диапазоне, составляет 170 с по уровню 10 % мощности. Это соответствует  $42.5'$ , или  $0.708^\circ$ . Для низкого уровня 2.5 % мощности, на котором, тем не менее, радиоизлучение Солнца уверенно регистрируется, временной интервал составляет 230 с, что соответствует  $57.5'$  или  $0.958^\circ$  (почти градус!).

Мы провели моделирование отклика спокойной короны Солнца, которая имеет практически постоянное распределение яркостной температуры по своему диску, на сканирование диаграммой направленности с эквивалентной шириной, совпадающей с шириной диаграммы направленности РТ-32 (рис. 26). Результаты, наиболее близкие к наблюдательным, были получены в модели, в которой угловой размер короны Солнца  $\theta_{viz}$  по уровню 50 % мощности составлял  $36.5'$ . Это значение хорошо соответствует угловым размерам внутренней части короны, которые оказались лишь немногим больше размеров оптического диска Солнца. Наблюдаемые и модельные угловые размеры короны Солнца, на различных уровнях мощности, приведены в табл. 5.

Полученные оценки ширины короны Солнца на этих уровнях в первом приближении объясняются сверткой распределения яркостной температуры короны спокойного Солнца с диаграммой направленности РТ-32 по мощности. Широкие края короны, которые видны на низких уровнях, объясняются наличием боковых лепестков в диаграмме направленности радиотелескопа. Эти края присутствуют как на реальном, так и на модельном откликах.



**Рис. 26.** Моделирование сканирования короны спокойного Солнца в диапазоне 5 ГГц: *а* – форма модельной диаграммы направленности по мощности РТ-32 (слева) и модельное распределение яркостной температуры по диску короны спокойного Солнца (справа); *б* – форма модельного отклика РТ-32 при сканировании короны спокойного Солнца

**Таблица 5.** Зависимость наблюдаемых и модельных угловых размеров короны спокойного Солнца в С диапазоне (4.6 ÷ 5.1 ГГц)

Уровень мощности $P$ , %	Видимый размер $\theta_{viz}$	Модельный размер $\theta_{mod}$
100.0	26.25'	23'
50.0	33.25'	35'
10.0	42.5'	42.5'
2.5	57.5'	55'

Оценить ширину локальных максимумов на диске Солнца можно только с использованием более сложных модельных представлений. Вероятно, что она соответствует свертке диаграммы направленности РТ-32 с более тонким процессом нетепловой природы. Сопоставление наших данных и оптических данных спутника STEREO A (коронोगраф COR2) (<http://spaceweather.gmu.edu/seeds/monthly.php?a=2019&b=03&cor2>) показывает, что с 1 по 20 марта 2019 г. произошло несколько выбросов корональных масс. 5 марта эти выбросы происходили в юго-восточном направлении, ближе к экваториальной плоскости Солнца, 8 марта – в северо-западном направлении, ближе к экваториальной плоскости Солнца, 10 марта –

примерно в том же направлении, 12 марта – в западном направлении. 13 марта почти одновременно в восточном и западном направлениях произошло два небольших выброса корональных масс, и 20 марта – мощный выброс в западном направлении в экваториальной плоскости. Этот мощный выброс корональных масс был зарегистрирован и космической обсерваторией SOHO (коронोगраф LASCO C2) ([http://spaceweather.gmu.edu/seeds/dailymkmovie\\_ql.php?cme=20190320](http://spaceweather.gmu.edu/seeds/dailymkmovie_ql.php?cme=20190320)). В период с 1 по 20 марта 2019 г. оба спутника наблюдали восточный и западный потоки повышенной оптической яркости в короне Солнца вблизи его экваториальной плоскости. Из области этих потоков и проходили вышеуказанные выбросы корональных масс. Вероятно, предвестники (или “следы”) указанной активности Солнца нам удалось наблюдать в С диапазоне 15 марта 2019 г. Если это так, то использование С диапазона весьма перспективно для мониторинга космической погоды, т. к. позволяет наблюдать зоны повышенной активности не только на лимбе (как в оптическом диапазоне), но и на фоне диска Солнца.

Грубую оценку яркостной температуры диска Солнца можно сделать из следующих соображений. В соответствии с данными табл. 3 при выбранном уровне аттенюатора (–16 дБ) и оценочных потерях (–0.4 дБ) в системе приема РТ-32 эквивалентная температура шумов всей системы приема составляет  $T_{SYS} \approx 300$  К. Уверенная регистрация радиоизлучения солнечной короны на уровне 2.5 % мощности означает, что зарегистрировано приращение антенной температуры,  $\Delta T_{RT-32} \approx 300$  К, того же порядка, что и эквивалентная температура собственных шумов всей антенны. Отсюда получаем грубую оценку яркостной температуры в диске спокойного Солнца на частоте 5 ГГц,  $T_{QS} \approx 12000$  К, и оценку приращения видимой температуры западной (левой) вспышки на диске Солнца,  $\Delta T \approx 973$  К.

Все данные, которые приведены выше, говорят о том, что Солнце является весьма перспективным объектом исследований в С диапазоне. Большую полноту этих исследований можно и нужно обеспечить с помощью синхронных наблюдений во многих частотных диапазонах, в том числе в декаметровом и метровом диапазонах волн. Перспективными являются интерферометрические наблюдения Солнечной короны в этом диапазоне волн.

## 5. Выводы

Сделан обзор мировых аналогов антенной системы MARK-4В. Показано, что в мире существует много программ модернизации связанных антенных систем с лучеводами. Общей целью таких программ, как правило, есть трансформация связанной BWG антенны в радиотелескоп, который может работать последовательно или параллельно в S, C, X и K диапазонах.

Определены основные технические и эксплуатационные параметры антенной системы MARK-4В. В частности, определена полоса ее рабочих частот, которая пригодна для использования в радиоастрономии, в том числе в программе РСДБ экспериментов.

Сформулированы требования к основным техническим характеристикам будущего радиотелескопа РТ-32 в Золочеве (системной температуре во всех диапазонах, собственной температуре шумов криогенных приемников, поляризационной развязке и т. д.).

С помощью радиоастрономических наблюдений радиоисточников 3C405, 3C461 и 3C454.3 проведено первичное тестирование эквивалентной шумовой температуры РТ-32 в С диапазоне. Это тестирование проведено как для всей приемной системы, так и для отдельных ее составляющих: лучевода и “теплого” радиометра.

Измерены параметры антенны и основных систем радиотелескопа РТ-32. В частности, в С диапазоне были определены ширина диаграммы направленности, КИП и эффективная площадь РТ-32, а также предварительные значения ошибки наведения и скорости наведения.

Показано, что система приема РТ-32 требует дальнейшего изучения, модернизации и более тщательной калибровки с помощью поглотителей.

Показана необходимость юстировки зеркала рефлектора и лучевода РТ-32.

В С диапазоне с помощью наблюдений и их моделирования получены угловые размеры солнечной короны на различных уровнях мощности ее радиоизлучения.

Основной вывод заключается в том, что антенную BWG систему MARK-4В можно и целесообразно модернизировать до радиотелескопа мирового уровня.

Авторы признательны за возможность использования в этом исследовании внегалактической базы данных НАСА / IPAC (NED), которая находится в ведении Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. Petrov L., Natusch T., Weston S., McCallum J., Ellingsen S., and Gulyaev S. First scientific VLBI observations using New Zealand 30 meter radio telescope WARK30M. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2015. Vol. 127, No. 952. P. 516–522. DOI: 10.1086/681965
3. 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., Ohya 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
4. 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
5. Imbriale W. A. Evolution of the Deep Space Network 34-m diameter antennas. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. (March 21–28, 1998. Snowmass). Snowmass, CO, USA, 1998. Vol. 3. P. 403–430 DOI: 10.1109/AERO.1998.685847
6. Imbriale W. A. *Large Antennas of the Deep Space Network*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 320 p.
7. Mizusawa M. and Kitsuregawa T. A Beam-waveguide Feed Having a Symmetric Beam for Cassegrain Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1973. Vol. 21, Is. 6. P. 884–886. DOI: 10.1109/TAP.1973.1140628
8. Korolev A. M., Zakharenko V. V., and Ulyanov O. M. Radio astronomy ultra-low-noise amplifier for operation at 91 cm wavelength in high RFI environment. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 41, Is. 1-2. P. 215–221. DOI: 10.1007/s10686-015-9466-x
9. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchen-

- ko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
10. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskyi Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
- REFERENCES**
1. 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
  2. PETROV, L., NATUSCH, T., WESTON, S., MCCALLUM, J., ELLINGSEN, S. and GULYAEV, S., 2015. First scientific VLBI observations using New Zealand 30 meter radio telescope WARK30M. *Publ. Astron. Soc. Pac.* vol. 127, no. 952, pp. 516–522. DOI: 10.1086/681965
  3. 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
  4. 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
  5. IMBRIALE, W. A., 1998. Evolution of the Deep, Space Network 34-m diameter antennas. In: *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. Snowmass, CO, USA, March 21–28, 1998. vol. 3, pp. 403–430. DOI: 10.1109/AERO.1998.685847
  6. IMBRIALE, W. A. 2003. *Large Antennas of the Deep Space Network*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
  7. MIZUSAWA, M. and KITSUREGAWA, T., 1973. A Beam-waveguide Feed Having a Symmetric Beam for Cassegrain Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 21, is. 6, pp. 884–886. DOI: 10.1109/TAP.1973.1140628
  8. KOROLEV, A. M., ZAKHARENKO, V. V. and ULYANOV, O. M., 2016. Radio astronomy ultra-low-noise amplifier for operation at 91 cm wavelength in high RFI environment. *Exp. Astron.* vol. 41, is. 1-2, pp. 215–221. DOI: 10.1007/s10686-015-9466-x
  9. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KHRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
  10. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., KOLIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes

UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

O. M. Ulyanov<sup>1</sup>, O. M. Reznichenko<sup>1</sup>, V. V. Zakharenko<sup>1,2</sup>,  
A. V. Antyufeyev<sup>1</sup>, A. M. Korolev<sup>1</sup>, O. M. Patoka<sup>1</sup>,  
V. I. Prisiazhnii<sup>3</sup>, A. V. Poichalo<sup>3</sup>, V. V. Voityuk<sup>3</sup>,  
V. N. Mamarev<sup>3</sup>, V. V. Ozhinskii<sup>3</sup>, V. P. Vlasenko<sup>3</sup>, V. M. Cmil<sup>4</sup>,  
V. I. Lebed<sup>4</sup>, M. I. Palamar<sup>5</sup>, A. V. Chaikovskii<sup>5</sup>,  
Yu. V. Pasternak<sup>5</sup>, M. A. Strembitskii<sup>5</sup>, M. P. Natarov<sup>6</sup>,  
S. O. Steshenko<sup>6</sup>, V. V. Glamazdyn<sup>6</sup>, A. S. Shubny<sup>6</sup>,  
A. A. Kirilenko<sup>6</sup>, D. Y. Kulik<sup>6</sup>, A. A. Konovalenko<sup>1</sup>,  
L. M. Lytvynenko<sup>1,2</sup>, Ya. S. Yatskiv<sup>7</sup>

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

<sup>2</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

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

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

<sup>5</sup>Ternopil Ivan Puluj National Technical University,  
56, Ruska St., Ternopil, 46001, Ukraine

<sup>6</sup>O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
12, Ak. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

<sup>7</sup>Main Astronomical Observatory,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
27, Akademik Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine

## CREATING THE RT-32 RADIO TELESCOPE ON THE BASIC OF MARK-4B ANTENNA SYSTEM 1. MODERNIZATION PROJECT AND FIRST RESULTS

*Purpose:* Creating a radio telescope based on the MARK-4B antenna system being developed for telecommunication applications, determining the possibilities of using the broadband multi range operation of a beam wave-guided antenna system and to evaluate the antenna characteristics using the radioastronomical measurements.

*Design/methodology/approach:* A comprehensive analysis of all the MARK-4B systems allows to select the blocks and nodes to be replaced or upgraded. The analysis of the reflector and subreflector design, beam wave-guide, corrugated horn, and feeder system allows determining the possible frequency ranges of the radio telescope being created. Installing a broadband receiver with the stipulated calibration capabilities using cooled and uncooled load attenuators allows to determine the antenna system temperature. Guiding the antenna to the calibration sources and recording scans due to the Earth rotation eliminates the systematic errors or errors of the pointing system. In this way the width of the radiation pattern and the effective area of the radio telescope are determined.

*Findings:* An analysis of the antenna design was made and the priority stages of the reconstruction of the MARK-4B antenna system were determined. The narrow-band transmitter and the C-band receiver were dismantled and a wide-band receiver (range

4.6–5.1 GHz) with a detector and the possibility of changing the signal integration time were installed. The observed results have allowed to initially estimate the system temperature measurements which allow us to hope that the RT-32 radio telescope (Zolotchiv, Lviv region, Ukraine) together with the cooled receiver will have low self noise. A new antenna pointing system has been calculated and installed which using in the C-band has allowed astronomical tests of the radiation pattern width ( $\approx 7.2'$ ) and the level of its side lobes ( $-12.5$  dB), effective area ( $\approx 680$  m<sup>2</sup>) and surface utilization factor ( $\approx 0.84$ ).

*Conclusions:* The completed measurements and calculations show that the MARK-4B antenna system allows to create a highly efficient radio astronomy instrument. The developed for now receiving and pointing systems for the RT-32 radio telescope testify to the high potential of Ukrainian science. Further cooperation between scientific research and high technologies will lead to the creation of an effective Ukrainian radio telescope of the centimeter wavelength range.

*Key words:* antenna, feed, interferometry, polarization, radio astronomy, radio source, radio telescope, server, frequency standard

O. M. Ульянов<sup>1</sup>, O. M. Резніченко<sup>1</sup>, В. В. Захаренко<sup>1,2</sup>,  
O. B. Антюфеев<sup>1</sup>, O. M. Корольов<sup>1</sup>, O. M. Патока<sup>1</sup>,  
B. I. Присяжний<sup>3</sup>, A. B. Поїхало<sup>3</sup>, B. B. Войтюк<sup>3</sup>,  
B. H. Мамарев<sup>3</sup>, B. B. Ожинський<sup>3</sup>, B. П. Власенко<sup>3</sup>,  
B. M. Чміль<sup>4</sup>, B. I. Лебідь<sup>4</sup>, M. I. Паламар<sup>5</sup>,  
A. B. Чайковський<sup>5</sup>, Ю. В. Пастернак<sup>5</sup>,  
M. A. Стрембицький<sup>5</sup>, M. П. Натаров<sup>6</sup>, C. O. Стешенко<sup>6</sup>,  
B. B. Гламаздин<sup>6</sup>, O. I. Шубний<sup>6</sup>, A. O. Кириленко<sup>6</sup>,  
Д. Ю. Кулик<sup>6</sup>, O. O. Коноваленко<sup>1</sup>,  
Л. М. Литвиненко<sup>1,2</sup>, Я. С. Яцків<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

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

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

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

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

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

<sup>7</sup>Головна астрономічна обсерваторія НАН України,  
вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143, Україна

## СТВОРЕННЯ РАДІОТЕЛЕСКОПУ RT-32 НА ОСНОВІ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ MARK-4B 1. ПРОЕКТ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТА ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ

*Предмет і мета роботи:* Створення радіотелескопу на базі антенної системи MARK-4B, яка була розроблена для телекомунікаційних потреб, визначення можливостей викорис-

тання променеводної антенної системи в широкосмуговому багатодіапазонному режимі роботи та оцінка характеристик антени за допомогою радіоастрономічних вимірювань.

*Методи і методологія:* Комплексний аналіз усіх систем MARK-4В надає можливість виділити блоки та вузли, що підлягають заміні або модернізації. Аналіз конструкції рефлектора та субрефлектора, променеводу, гофрованого рупору та хвилеводної системи дозволяє визначити можливі частотні діапазони роботи радіотелескопа, що створюється. Встановлення широкосмугового приймача з передбаченою можливістю калібрування за охолодженням або неохолодженням навантаженням дозволяє визначити температуру антенної системи. Наведення антени на калібрувальні джерела та запис сканів за рахунок обертання Землі виключає систематичні похибки системи наведення. Таким чином визначається ширина діаграми спрямованості та ефективна площа радіотелескопу.

*Результати:* Виконано аналіз конструкції антени та визначені першочергові етапи реконструкції антенної системи MARK-4В. Демонтовано вузькосмугові передавач і приймач діапазону С і встановлено широкосмуговий приймач (діапазон 4.6 ÷ 5.1 ГГц) з детектором і можливістю зміни часу інтегрування сигналу. За результатами спостережень вико-

нано попередні оцінки температури шумів системи, які дозволяють сподіватися на те, що радіотелескоп РТ-32 (м. Золочів, Львівська обл., Україна) разом з охолоджуваним приймачем матиме низькі власні шуми. Розраховано та встановлено нову систему наведення антени за допомогою якої в С діапазоні виконано астрономічні тести ширини діаграми спрямованості ( $\approx 7.2'$ ) та рівня її бічних пелюсток ( $-12.5$  дБ), ефективної площі ( $\approx 680$  м<sup>2</sup>) а також коефіцієнту використання поверхні ( $\approx 0.84$ ).

*Висновок:* Виконані вимірювання та розрахунки демонструють, що на базі антенної системи MARK-4В можливо створити високоефективний радіоастрономічний інструмент. Розроблені наразі системи приймання та наведення для радіотелескопа РТ-32 свідчать про високий потенціал української науки. Подальша кооперація наукових досліджень і високих технологій призведе до створення ефективного українського радіотелескопу сантиметрового діапазону.

*Ключові слова:* антена, випромінювач, інтерферометрія, поляризація, радіоастрономія, радіоджерело, радіотелескоп, сервер, стандарт частоти

*Стаття постуила в редакцію 11.03.2019*