

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ
ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Համբարձումյան Նարեկ Հակոբի

**ՌՕԴ-54/2.6 ՌԱԴԻՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ԴԻՏԱԿԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ԱՊԱԿՈՆՍԵՐՎԱՑՄԱՆ
ԵՆ ԱՆԽՆԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐՄԱՆ ՈՒ ԿԱՐԳԱԲԵՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒՃՈՒՄԸ**

Ե.12.01 - «Բաղիտունիկա, ժաղիռհանախականային սարքավորումներ, համակարգեր,
տեխնոլոգիաներ» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2026

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА РЕСПУБЛИКИ
АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Амбарцумян Нарек Акопович

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ РАСКОНСЕРВАЦИИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЮСТИРОВКИ И
КАЛИБРОВКИ АНТЕННЫ РАДИООПТИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА РОТ-54/2.6**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.12.01 “Радиотехника, радиочастотные устройства, системы, технологии”

ЕРЕВАН 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում:

Գլխավորական դեկանը՝

ա.գ.թ. Արևիկ Սերգեյի Սարգսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆ.-մ. գ. դ. Արսեն Ալեքսանդրի Հախումյան

ա.գ.դ. Վահան Հենրիկի Ավետիսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

ՀՀ ԳԱԱ «Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ»

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2026թ. օգոստոսի 28-ին, ժամը 14:00-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն 0009, Երևան, Տերյան փ., 105): Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում: Սեղմագիրն առավելագույնը է 10.07.2026թ.:

046 Մասնագիտական խորհրդի

գլխավորական քարտուղար, ա.գ.թ.

Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении.

Научный руководитель:

к.т.н. Аревик Сергеевна Саргсян

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н. Арсен Александрович Ахумян

д.т.н. Ваан Генрихович Аветисян

Ведущая организация:

“Институт радиофизики и электроники” НАН РА

Защита диссертации состоится 28 августа 2026г. в 14:00, на заседании Специализированного совета - 046 “Радиотехники и электроники”, действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА) (адрес: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА. Автореферат разослан 10.07.2026 г.

Ученый секретарь Специализированного

Совета 046, к.т.н.

Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования Крупные радиотелескопы миллиметрового и сантиметрового диапазонов предъявляют исключительно высокие требования к геометрической точности отражающих поверхностей, пространственному согласованию оптических и радиотехнических узлов, а также к метрологическому обеспечению их настройки и эксплуатации. Для двухзеркальных систем со сферическим главным отражателем эти требования приобретают принципиальное значение, поскольку отклонения формы отражателя и нарушения взаимного положения основных узлов непосредственно приводят к фазовым искажениям в апертуре, снижению коэффициента усиления и ухудшению рабочих характеристик антенны.

Радиооптический телескоп POT-54/2.6, созданный под руководством академика П. М. Геруни, представляет собой уникальную крупноапертурную двухзеркальную сферическую систему, имеющую значительную научно-техническую ценность. Длительное нахождение этого инструмента в законсервированном состоянии, отсутствие полноценного регламентного обслуживания и воздействие внешних факторов обуславливают необходимость научно-обоснованного подхода к восстановлению антенны и ввода в строй радиооптического телескопа Геруни. Предварительная юстировка и калибровка антенны являются обязательным этапом возобновления эксплуатации радиотелескопа. Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью формирования целостной научно-методической базы предварительной юстировки и калибровки антенны POT-54/2.6, а также возможностью применения разработанных подходов при модернизации других крупных антенных систем и их интеграции в современные распределенные наблюдательные программы, включая VLBI.

Предмет исследования Предметом исследования являются научно-методические и инженерные основы предварительной юстировки и калибровки антенны радиооптического телескопа POT-54/2.6, включая оценку реального геометрического состояния большого сферического отражателя, цифрового моделирования конструкции, а также разработку решений по мониторингу и коррекции положения панелей большого зеркала.

Методы исследования В работе использованы: анализ мировой практики юстировки и калибровки крупных радиотелескопов; анализ архивных материалов по проектированию, изготовлению и первоначальной настройке POT-54/2.6; методы геометрического и электродинамического моделирования; методы теории допусков и статистического накопления ошибок; трехмерное моделирование в среде SOLIDWORKS; имитационное моделирование измерительных процедур в среде C++; методы угломерных и дальномерных измерений; методы оценки влияния геометрических отклонений поверхности на фазовую структуру поля в апертуре и коэффициент усиления антенны; методы инженерного синтеза автоматизированных систем мониторинга и коррекции, также вспомогательные нейросетевые инструменты.

Цель и задачи работы Целью диссертационной работы является формирование научной основы предварительной юстировки и калибровки антенны радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 в условиях его длительной консервации и подготовки к последующему восстановлению и повторному вводу в эксплуатацию.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Обобщены научные представления о юстировке и калибровке крупных радиотелескопов, в том числе двухзеркальных систем со сферическим главным отражателем.
2. Исследован мировой опыт восстановления, юстировки и метрологического сопровождения крупных антенных систем.
3. Проанализированы конструктивные и технологические особенности РОТ-54/2.6 и архивные данные по методам изготовления, монтажа и контроля его большого зеркала.
4. Дано методическое толкование понятий «юстировка» и «калибровка» применительно к крупным сферическим антеннам.
5. Выполнена оценка текущего технического состояния телескопа и определены основные предпосылки его восстановления.
6. Создана трехмерная модель антенны и сформирована ее цифровая геометрическая репрезентация.
7. Разработаны подходы к определению реального геометрического центра большого зеркала и к проверке согласования с ним пространственного положения системы подвеса малого зеркала.
8. Установлена количественная связь между геометрическими отклонениями панелей большого зеркала, фазовыми искажениями в апертуре и потерями в коэффициенте усиления антенны.
9. Предложены технические решения по автоматизированному мониторингу, гибридной коррекции и эксплуатационной стабилизации состояния большого зеркала.
10. Аналитически обоснована целесообразность внедрения тепловизионного сканирования поверхности главного зеркала для выявления и прогнозирования погрешностей, обусловленных прямым солнечным облучением, а также экранирующим влиянием треноги и хобота.
11. Предложено техническое решение по организации системы снегоотвода, направленное на снижение эксплуатационных рисков и предотвращение дополнительных деформационных воздействий на элементы антенной системы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- цифровая система мониторинга, расчета погрешностей поверхности главного сферического зеркала антенны РОТ-54/2.6 и их коррекции для сопровождения

калибровочных измерений, проводимых на предварительном этапе повторного ввода антенны в эксплуатацию, а также в процессе ее функционирования;

- разработка механизма использования дополнительного тепловизионного сканирования в рамках непрерывного мониторинга радиального положения панелей большого зеркала антенны POT-54/2.6, проводимого на основе лазерного сканирования;
- разработка автоматической системы коррекции возможных позиционных отклонений панелей главного зеркала антенны POT-54/2.6 с применением пьезоэлектрических элементов;
- разработка централизованной системы управления снегоотвода с поверхности главного сферического зеркала антенны.

Практическая ценность работы заключается в том, что ее результаты могут быть непосредственно использованы при расконсервации, предварительной юстировке и последующей калибровке антенны радиотелескопа POT-54/2.6. Созданная трехмерная модель антенны и разработанные программные средства позволяют виртуализировать наиболее трудоемкие этапы измерений и обработки данных. Предложенные методы определения геометрического центра и оценки пространственного положения несущих узлов системы подвеса малого зеркала на треногу антенны могут быть использованы на начальном этапе восстановления телескопа. Разработанные подходы к количественной оценке влияния деформаций поверхности на фазовые характеристики антенны создают основу для выбора корректирующих воздействий. Предложенные решения по автоматизированному мониторингу, гибридной коррекции и снегоотводу могут быть использованы при дальнейшей модернизации POT-54/2.6 и аналогичных крупных антенных систем.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием классических положений теории антенн, теории допусков и метрологического обеспечения измерений, опорой на архивные материалы по проектированию и первоначальной настройке POT-54/2.6, применением современных средств трехмерного и программного моделирования, а также согласованностью расчетных выводов с результатами инспекционных обследований, тестовых регистраций и отчетом по научной экспертизе, подтвердивших принципиальную восстанавливаемость телескопа.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для сокращения продолжительности работ, направленных на поддержание точности поверхности большого зеркала антенны POT-54/2.6, не менее чем в 11,6 раза было предложено применение автоматизированной системы непрерывного мониторинга положения панелей большого зеркала и коррекции возникающих отклонений.
2. Для ускорения обработки результатов выполняемых измерений не менее чем в 5,9 раза были применены трехмерная цифровая модель антенны и программные средства моделирования.

3. Для снижения вероятности ошибок, обусловленных влиянием человеческого фактора, не менее чем в 3,3 раза были использованы трехмерная цифровая модель и программные симуляции.

Публикации

Основные положения диссертации представлены в семи научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объём работы — Диссертация написана на армянском языке, состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. Объём работы составляет 124 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены предпосылки становления радиоастрономии как самостоятельного направления астрономии, обусловленного расширением наблюдений за пределы видимого диапазона. Отмечено, что развитие радиоастрономии потребовало создания крупных высокочувствительных антенных систем. В этой связи представлен радиооптический телескоп РОТ-54/2.6, созданный под руководством академика П. М. Геруни в 1980–87 гг. в Оргове (Армения), как уникальная двухзеркальная сферическая система. Показано, что после длительной консервации повторный ввод телескопа в эксплуатацию требует решения комплекса задач, связанных с предварительной юстировкой, калибровкой и модернизацией антенны. Указано, что в рамках проекта «Национальный космический центр Геруни» выполнена оценка текущего технического состояния телескопа и сформирован план его восстановления.

В первой главе сформирована научно-методическая основа задач предварительной юстировки и калибровки крупных радиотелескопов, прежде всего двухзеркальных систем со сферическим главным отражателем. Показано, что точность их функционирования определяется геометрической точностью отражающей поверхности, взаимным положением отражающих и фокальных узлов, а также стабильностью этих параметров во времени. На основе анализа международного опыта эксплуатации и модернизации крупных радиотелескопов, включая Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope в Китае (FAST), Green Bank Telescope в США (GBT) и Arecibo в Пуэрто-Рико. Установлено, что восстановление и поддержание расчетных характеристик таких систем требует комплексного подхода, включающего контроль формы отражателя, учет температурных и конструктивных деформаций, точное позиционирование рабочих узлов и мониторинг состояния несущих элементов. Тем самым обосновано, что задачи юстировки и калибровки крупных антенных систем носят системный характер.

В главе исследованы конструктивные и метрологические особенности РОТ-54/2.6 (рис. 1) как крупной двухзеркальной сферической системы. Показано, что большое зеркало диаметром 54 м при эффективной апертуре 32 м образовано 3738 литыми алюминиевыми панелями со средней размерностью порядка 1.1×1.1 м и массой 60–70 кг каждая; технологическая точность изготовления их отражающей поверхности составляет

0.1–0.2 мм. Каждая панель допускает корректировку в радиальном направлении в пределах ± 15 мм, а в касательной плоскости — в пределах ± 3 мм, что формирует необходимую конструктивную основу для высокоточной настройки поверхности. Установлено также, что примененная в конструкции РОТ-54/2.6 система независимых опор, кольцевого ригеля, карданного подвеса малого зеркала и компенсационно-стабилизирующих механизмов изначально ориентирована на обеспечение высокой геометрической точности и воспроизводимости параметров.

На основе архивных материалов 1985–87 гг. проанализированы технологические методы изготовления, монтажа и контроля панелей большого зеркала. Показано, что для рабочего режима $\lambda = 5$ мм были заданы допустимые радиальные отклонения $\Delta R = \pm 0.92$ мм при расчетном среднеквадратическом отклонении $\sigma_R \approx 0.31$ мм. При $n = 37$ монтажных рядах ожидаемое суммарное значение составило $\sigma_{R, \text{сж}} \approx 0.308$ мм, что соответствует $\Delta R \approx \pm 0.924$ мм и практически совпадает с требованием для режима $\lambda = 5$ мм. Контроль профиля панелей выполнялся классическим методом инварного троса по 20 точкам с 5 измерениями в каждой, то есть по 100 измерениям на панель; по первым 352 панелям фактическая погрешность составила порядка 0.0105 мм, а практическая технологическая ошибка обработки одной панели была оценена величиной около ± 0.05 мм. Тем самым в первой главе не только обобщены научные представления о юстировке и калибровке крупных радиотелескопов, но и количественно подтверждено, что примененная при создании РОТ-54/2.6 технологическая схема расчетно обеспечивала точность отражающей поверхности, соответствующую рабочему режиму до $\lambda = 5$ мм.



Рис. 1. РОТ-54/2.6 (см. https://moya-planeta.ru/reports/view/zerkalnyj_radioteleskop_geruni_rot5426_chast_1)

Во второй главе сформированы научно-методические основы программы восстановления РОТ-54/2.6 через уточнение содержания понятий «юстировка» и «калибровка» применительно к крупным сферическим антеннам. Показано, что сферический радиотелескоп должен рассматриваться как единый измерительный комплекс, в котором геометрическая конфигурация антенны, поле в апертуре, приемно-измерительный тракт и цифровая обработка образуют единую цепь формирования научного результата. В этой связи юстировка интерпретирована как приведение реального геометрического и кинематического состояния антенны к расчетной конфигурации, а калибровка — как установление связи между измеренным сигналом и определяемой физической величиной с оценкой параметров преобразования, неопределенностей и устойчивости результатов. Показано, что для сферических антенн эти процессы взаимосвязаны, поскольку геометрические отклонения поверхности, позиционные ошибки узлов, а также температурные и конструктивные деформации непосредственно влияют на фазовую структуру поля в апертуре, диаграмму направленности и энергетическую эффективность системы. В качестве расчетной базы использованы общая модель измерения, least-squares-подход к задачам геометрического согласования и зависимость Руза, связывающая RMS-ошибку поверхности с потерями эффективности антенны. Тем самым обосновано, что юстировка и калибровка крупных сферических антенн должны осуществляться как единый метрологический и технический процесс.

Во второй части главы выполнена развернутая оценка текущего технического состояния радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 и определены реальные предпосылки его повторного ввода в эксплуатацию. Комплекс был сооружен в 1975–85 гг. и введен в эксплуатацию в 1987 г. На основе исследования ряда инспекционных работ и изучения результатов научной экспертизы, сделанных силами проекта «Национальный космический центр Геруни» в течение 2019–22 гг., выполнена оценка текущего технического состояния РОТ-54/2.6. Установлено, что после перехода в режим длительной консервации наиболее уязвимыми стали подвижные механические узлы, элементы карданной системы, кабельная инфраструктура, антикоррозионная защита и средства управления, тогда как основная несущая схема и конструктивная основа большого сферического зеркала сохранили функциональную пригодность. Инспекционные осмотры 2020 г. выявили локализованные и ремонтпригодные дефекты: коррозионные повреждения, необходимость переварки отдельных связей, повреждение рычага по оси Восток–Запад и трещину в одном из сварных соединений опоры вторичного отражателя, однако не обнаружили признаков катастрофического разрушения базовой конструкции. При этом подтверждена работоспособность двигателей постоянного тока по основным осям, что свидетельствует о сохранности энергомеханической основы системы наведения.

Ключевым результатом главы является подтверждение принципиальной восстановимости телескопа экспериментальными данными. В условиях обездвиженной оси Восток–Запад в фокусе вторичного отражателя была установлена патч-антенна и выполнены тестовые регистрации на частоте 4.5 ГГц: проведена 24-часовая запись небесного сигнала, затем регистрации во время прохождения источника Лебедь X и

дополнительная 48-часовая запись, в которой была выявлена существенная структурная согласованность результатов. Эти измерения еще не соответствуют штатной направленной работе полностью восстановленного инструмента, однако они доказали, что приемный тракт и общая радиофизическая схема не утратили принципиальной способности к регистрации радиоастрономических сигналов. На основании осмотров, испытаний и экспертных заключений, в которых автор принимал непосредственное участие, все выявленные проблемы сведены к четырем основным направлениям восстановительных работ: механические узлы и карданная система; антикоррозионная защита; кабельная и электротехническая инфраструктура; система управления, датчиков и цифрового измерительного тракта. Тем самым во второй главе не только дано методическое обоснование понятий юстировки и калибровки, но и показано, что основные ограничения РОТ-54/2.6 обусловлены длительным неиспользованием, а не принципиальной непригодностью системы, что формирует инженерную и методическую базу для последующих этапов восстановления, юстировки, калибровки и модернизации телескопа.

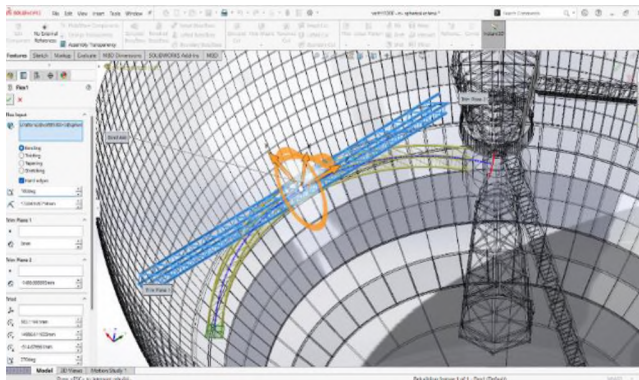


Рис.2. Процесс создания трехмерной модели РОТ-54/2.6 (ист. DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.2-160.)

В третьей главе сформулированы основные научные задачи, решение которых необходимо для повторного ввода в эксплуатацию, предварительной юстировки и калибровки радиооптического телескопа РОТ-54/2.6. Показано, что для крупной двухзеркальной сферической антенны такого масштаба восстановление не может сводиться к локальным ремонтным операциям, а требует формирования единой геометрической, метрологической и расчетной среды. В качестве обязательной предпосылки такой среды обосновано создание точного цифрового описания антенны и ее трехмерной модели. В среде SOLIDWORKS построена точная 3D-модель РОТ-54/2.6, в которой воспроизведены главный сферический отражатель, вторичный отражатель, несущая система и серийная структура большого зеркала из 3738 панелей (рис. 2). Для цифрового описания рядной структуры отражателя использованы зависимости $l_i = 2\pi r_i$ и $W_i = 2\pi r_i / Q_i$, показавшие, что панели различных кольцевых зон не могут быть заменены

единым «средним» элементом, а требуют индивидуального геометрического описания по рядам. Тем самым 3D-модель рассматривается не как иллюстрация, а как рабочий инструмент формулирования задач юстировки, виртуализации измерений, количественной оценки отклонений и предварительной проверки технических решений.

Следующий блок главы посвящен методологии предварительных измерений. Показано, что на первом этапе принципиальное значение имеют определение реального геометрического центра большого зеркала и проверка совпадения с ним центра вращения системы подвеса малого зеркала, поскольку именно эти параметры задают исходную метрологическую базу для всех последующих корректирующих воздействий. Для этой цели разработана методика, основанная на применении теодолита, лазерных дальномерных измерений, известной линейной базы $b = 600 \text{ мм}$ и обработке данных в единой расчетной схеме. Определение расстояний выполняется по зависимости $D = b/[2\tan(\varphi/2)]$, статистическая обработка повторных измерений — по формулам среднего значения, среднеквадратического отклонения и ошибки среднего, а уточнение положения центра большого зеркала и кольцевого ригеля — с использованием геометрии хорд $h_k = \sqrt{R^2 - (c_k/2)^2}$ и least-squares-постановки задачи для оценки координат центра и номинального радиуса. Кроме того, в главе разработано математическое представление данных лазерных измерений и 3D-сканирования: координаты точек поверхности записаны через $(\rho_i, \alpha_i, \beta_i)$, а отклонения от номинальной сферической поверхности — через Δ_i интегральный показатель $\sigma = \sqrt{N^{-1} \sum \Delta_i^2}$. Тем самым построена методическая база, позволяющая перейти от разрозненных измерений к количественной реконструкции реальной геометрии антенны.

Завершающая часть главы образует расчетное ядро предварительной юстировки РОТ-54/2.6 и посвящена оценке влияния геометрических отклонений панелей большого зеркала на фазовую структуру поля в апертуре и на коэффициент усиления антенны (Таблица 1). Для описания фазового распределения использована модель $\Phi(\rho, \varphi)$, учитывающая геометрию главного зеркала, корректирующее действие малого отражателя и позиционные смещения.

M (число отклоненных панелей)	$\sigma_{\text{групп}}$	η
1	0.032 см	0.983 ($\approx 98.3\%$)
10	1.0 мм	0.839 ($\approx 83.9\%$)
50	2.24 мм	0.416 ($\approx 41.6\%$)
100	3.16 мм	0.173 ($\approx 17.3\%$)
500	7.07 мм	1.5×10^{-4} ($\approx 0.015\%$)
1000	10 мм	2.4×10^{-8} ($\approx 2.4 \times 10^{-6}\%$)

Таблица 1. Расчетная зависимость относительного коэффициента усиления антенны от числа деформированных панелей (модель Рузэ).

Для отдельной панели введены отклонения $\Delta r_{j,i} = r_{j,i} - R_0$ и RMS-показатель σ_j , а для всей поверхности — эквивалентное среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{пан}} \sqrt{M/P}$, где $P = 3738$ — полное число панелей. Показано, что локальное отклонение поверхности вызывает фазовую ошибку $\Delta \varphi_i = (4\pi/\lambda) \delta z_i$, а интегральное влияние ошибок на энергетическую эффективность антенны описывается формулой Рузэ $\eta = \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2]$. Приведенный в главе расчетный пример показывает, что при смещении панели на 2 см и рабочей длине волны $\lambda = 3\text{ см}$ локальная фазовая ошибка достигает $\Delta \varphi \approx 8.38 \text{ рад}$ ($\approx 480^\circ$), а накопление даже сравнительно небольшого числа таких дефектных панелей приводит к резкому падению эффективности: при 10 деформированных панелях $\eta \approx 83.9\%$, при 50 — $\approx 41.6\%$, при 100 — $\approx 17.3\%$, а при 500 панелях эффективность практически исчезает. Тем самым в третьей главе количественно доказано, что геометрические отклонения большого зеркала должны оцениваться не только механически, но и через их прямое влияние на апертурное поле и усилительные характеристики системы. В итоге глава формирует геометрические, метрологические и расчетные предпосылки, на которых могут быть построены последующие этапы панельной юстировки большого зеркала, позиционного согласования малого зеркала и окончательной калибровки телескопа.

В четвертой главе разработаны технические решения и предложения по модернизации, относящиеся к предварительной юстировке и последующей эксплуатационной стабилизации большого зеркала РОТ-54/2.6. Показано, что исходным этапом всей программы восстановления должна быть не локальная подстройка отдельных узлов, а точное определение реального геометрического центра большого зеркала, оценка возможных деформаций кольцевого ригеля и внешнего контура, а также проверка согласования с этим центром центра вращения конструкции, несущей малое зеркало. Тем самым обосновано, что последующая юстировка и калибровка двухзеркальной системы не могут считаться надежными без предварительного уточнения ее реального пространственного состояния. Для решения этой задачи предложены два взаимодополняющих метода. Первый основан на применении измерительной базы и теодолита; для него использована база длиной 600 мм, а расстояние до нее определялось по угловой величине по зависимости $l = \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}$. В среде C++ создана имитационная модель измерений с использованием генератора МТ19937, позволившая оценить чувствительность метода к случайным и систематическим ошибкам; при относительной вероятной погрешности $\pm 0.5\%$ получено, что даже небольшие систематические наклоны измерительной схемы способны вызывать смещение оцененного центра, причем в модельном эксперименте оно достигало порядка 7.75 см. Второй метод основан на контроле кольцевого ригеля и геометрии хорд; он позволяет уточнить первоначальную оценку центра, выявить деформации несущего контура и проверить совпадение центра вращения ригеля с фактическим центром большого зеркала. Совместное применение этих методов формирует практическую метрологическую основу пространственной проверки несущей схемы антенны.

Следующий блок главы посвящен методике определения локальных радиальных отклонений панелей большого зеркала. Показано, что каждая панель должна рассматриваться как элемент сферической поверхности, положение которого контролируется по характерным точкам, а ее отклонение от номинальной геометрии непосредственно связано с локальной фазовой ошибкой $\Delta\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta_i$. Для практической реализации предложена методика лазерных дальномерных измерений, в которой идеальные расстояния до контрольных точек рассчитываются не из центра зеркала, а из фактического положения прибора; это особенно важно, поскольку геометрический центр зеркала недоступен по причине перекрытия центральной несущей конструкцией. На этой основе сформирована цифровая координатная карта большого зеркала и рассчитаны идеальные расстояния до контрольных точек по формулам пространственной геометрии. Поскольку из одной позиции не просматривается вся поверхность, предложена секторная схема измерений с последовательной установкой прибора в четырех рабочих положениях. Показано, что при числе панелей 3738, контроле по 5 точкам на панель и необходимости многократного повторения измерений общий объем операций достигает порядка 10^5 , вследствие чего чисто ручная юстировка оказывается методически допустимой лишь как начальный этап, но становится чрезмерно трудоемкой и практически ограниченной при длительной эксплуатации.

Отдельно рассмотрено влияние прямого солнечного облучения на тепловое состояние и возможные термомеханические отклонения панелей большого зеркала РОТ-54/2.6. Для фиксированного положения главного зеркала с южным наклоном оси на 15° рассчитаны условия фронтального солнечного освещения и показано, что в 2026 г. суммарная продолжительность прямого фронтального облучения составляет 4275,93 ч, при этом максимальная продолжительность достигается 22 июня и равна 13,58 ч, а минимальная — 22 декабря и равна 9,29 ч (рис. 3).

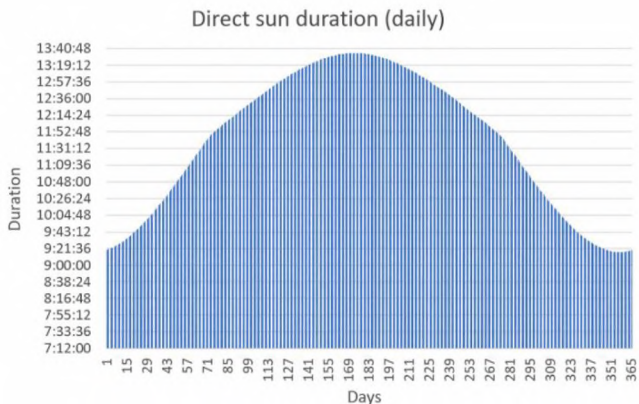


Рис. 3. Расчетная годовая зависимость продолжительности прямого фронтального солнечного облучения большого зеркала РОТ-54/2.6 в 2026 г.

С учетом затенения малым зеркалом, треногой, центральной несущей конструкцией, оптическим отражателем и другими элементами внутренней конструкции были получены расчетные тепловые карты для трех характерных сезонных случаев — летнего солнцестояния, периода равноденствия и зимнего солнцестояния (рис. 4). Эти карты показывают, что определяющим фактором является не равномерный нагрев поверхности, а пространственно локализованные температурные неоднородности, способные формировать зоны повышенного термомеханического риска.

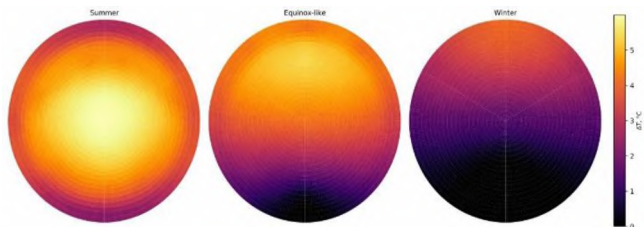


Рис. 4. Расчетные тепловые карты поверхности большого зеркала POT-54/2.6 для летнего солнцестояния, периода равноденствия и зимнего солнцестояния.

На основе полученных тепловых полей выполнена оценка эквивалентной локальной термомеханической реакции панелей и дополнительного вклада солнечно-индуцированных деформаций в RMS-погрешность поверхности. Показано, что при учете ветрового охлаждения $v = 5$ м/с дополнительный RMS-вклад составляет около 0,078 мм для равноденствия, 0,098 мм для летнего солнцестояния и 0,050 мм для зимнего солнцестояния; при совместном учете исходной точности поверхности $\sigma_0 = 0,08$ мм суммарная эксплуатационная RMS-погрешность достигает 0,127 мм в наиболее неблагоприятном летнем сценарии (рис. 5).

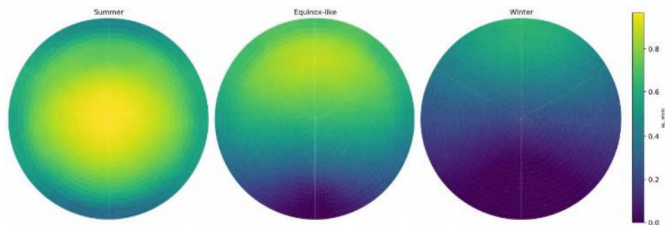


Рис. 5. Расчетные карты эквивалентной локальной термомеханической реакции панелей большого зеркала POT-54/2.6 для летнего солнцестояния, периода равноденствия и зимнего солнцестояния.

Полученные результаты показывают, что инфракрасный контроль в составе системы мониторинга должен рассматриваться не как замена высокоточной лазерной метрологии, а как быстрый вспомогательный скрининг для выявления участков с

повышенной вероятностью локальных термомеханических отклонений и последующего целевого лазерного контроля. Именно это служит прямым обоснованием перехода к автоматизированному мониторингу и коррекции.

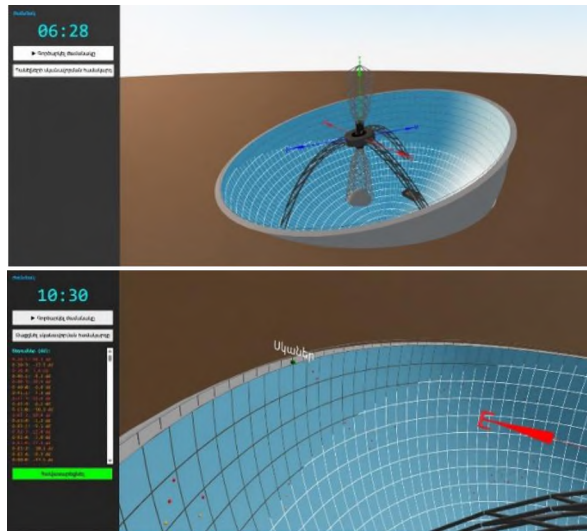


Рис. 6. Симуляционные измерения отклонений панелей большого зеркала антенны радиотелескопа POT-54/2.6 на трехмерной модели (ист. DOI: 10.53297/0002306X-2025.v78.1-64.)

Последняя часть главы содержит концептуальное предложение интегрированной цифровой системы автоматизированного мониторинга, гибридной коррекции и снегосброса. Предлагаемая архитектура включает три взаимосвязанные подсистемы: подсистему мониторинга, подсистему анализа данных и принятия решений, а также исполнительную подсистему (рис. 6). Мониторинг предлагается строить по двухуровневому принципу: на первом уровне используются инфракрасные датчики для быстрого выявления аномальных участков поверхности, на втором — лазерные средства точного позиционного контроля. В качестве наиболее предпочтительного промышленного лазерного средства по совокупности дальности, точности и эксплуатационных характеристик выделен SICK DT50-2 Pro. Центральный вычислительный контур системы выполняет сопоставление измеренных данных с цифровой моделью, фильтрацию шумов, оценку отклонений и расчет корректирующих воздействий; для сглаживания предложено использовать гауссов фильтр, а направление коррекции связывать с градиентом поля отклонений. Исполнительная часть системы построена по гибриднему принципу: крупные отклонения устраняются штатными механическими регулировочными узлами, а остаточные смещения компенсируются высокоточными приводами. Для этой цели

рассмотрено применение пьезоисполнительных элементов, в том числе серии PI NEXLINE N-216, что позволяет реализовать схему, в которой положение опоры определяется как сумма грубой механической и точной автоматической коррекции. Дополнительно система расширена подсистемой секторного снегосброса, где климатические воздействия учитываются в общей цифровой модели через распределенную снеговую нагрузку $q_s = \rho_s g h_s$, нагрузку на панель $F_s = q_s A_p$, тепловой баланс плавления и контроль теплового удлинения $\Delta l = \alpha l \Delta T$. Тем самым в четвертой главе задача поддержания точности большого зеркала переведена из режима периодических ручных операций в режим непрерывного цифрового сопровождения, объединяющего геометрический контроль, автоматизированную коррекцию и учет внешних эксплуатационных воздействий. Это и составляет практическую технологическую основу дальнейшей модернизации и долговременной эксплуатации РОТ-54/2.6.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Сформирована целостная научно-методическая основа предварительной юстировки и калибровки радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 как крупной двухзеркальной антенной системы со сферическим главным отражателем, объединяющая геометрические, метрологические, расчетные и эксплуатационные аспекты его последующего восстановления и ввода в рабочий режим.
2. На основе данных научной экспертизы, проделанной в рамках деятельности проекта «Национальный космический центр Геруни», научно обоснована принципиальная возможность восстановления и повторного ввода в эксплуатацию телескопа РОТ-54/2.6, при этом установлено, что определяющие ограничения его текущего состояния обусловлены преимущественно длительной консервацией, воздействием внешней среды и отсутствием регламентного технического обслуживания, а не исходной несостоятельностью базовой конструктивной схемы.
3. Разработана точная трехмерная цифровая модель антенны РОТ-54/2.6, предназначенная для геометрической репрезентации конструкции, виртуализации измерительных процедур, количественной оценки отклонений и предварительной верификации технических решений, принимаемых на этапах юстировки, калибровки и модернизации системы.
4. Разработаны методические подходы к определению реального геометрического центра большого зеркала и к оценке пространственного согласования с ним системы подвеса малого зеркала, что формирует необходимую метрологическую основу для восстановления расчетной пространственной конфигурации телескопа и обеспечения корректности последующих юстировочных процедур.

5. Установлена количественная взаимосвязь между геометрическими отклонениями панелей большого зеркала, фазовыми искажениями поля в апертуре и снижением коэффициента усиления антенны, что позволяет рассматривать состояние отражающей поверхности не только как механическую характеристику, но и как определяющий фактор радиотехнической эффективности всей антенной системы.
6. Теоретически и инженерно обоснована необходимость перехода от исключительно ручной настройки панелей к автоматизированному лазерному и тепловизионному мониторингу и гибридной коррекции их положения, что обусловлено масштабом антенной системы, высокой трудоемкостью ручных процедур и требованиями к длительному поддержанию точностных характеристик большого зеркала в эксплуатационных условиях.
7. Предложена концепция интегрированной цифровой системы контроля, автоматизированного мониторинга, гибридной коррекции и снегоотвода, ориентированной на поддержание геометрической точности поверхности большого зеркала в процессе эксплуатации и объединяющей измерительные средства, расчетно-аналитическую обработку данных, выработку корректирующих воздействий и исполнительные механизмы в едином технологическом контуре.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Sargsyan A. S., Hambardzumyan N. H., Margaryan L. M. Design of a three-dimensional model of the ROT-54/2.6 radio-optical telescope // Proceedings of the NAS RA and NPUA: Technical Sciences 2024. Vol. 77. No. 2. P. 160–170. DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.2-160.
2. Sargsyan A. S., Hambardzumyan N. H. Solving first scientific problems on preliminary adjustment of the antenna of the ROT-54/2.6 radio-optical telescope // Proceedings of NPUA. Information Technologies, Electronics, Radio Engineering. 2024. Vol. 1. P. 89–98. DOI: 10.53297/18293336-2024.1-89.
3. Hambardzumyan N. H. The second stage of solving priority scientific problems on preliminary adjustment of the radio-optical telescope ROT-54/2.6 // Proceedings of NPUA. Information Technologies, Electronics, Radio Engineering. 2024. Vol. 2. P. 137–144. DOI: 10.53297/18293336-2024.2-137.
4. Hambardzumyan N. H. Program simulation of measuring positioning inaccuracies of the large reflector panels of the ROT-54/2.6 radio-optical telescope antenna using a laser rangefinder // Proceedings of NPUA. Information Technologies, Electronics, Radio Engineering. 2025. Vol. 1. P. 110–119.. DOI: 10.53297/18293336-2025.1-110.

5. Sargsyan A. S., Hambardzumyan N. H. Engineering Aspects of the ROT-54/2.6 Radio-Optical Telescope Revitalizing // The Proceedings of the 42nd ESA Antenna Workshop. 2024. P. 1–7.
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/389249704_ENGINEERING_ASPECTS_OF_THE_ROT-5426_RADIO-OPTICAL_TELESCOPE_REVITALIZING
6. Саргсян А. С., Амбарцумян Н. А. Моделирование процесса измерения отклонений положения панелей поверхности большого зеркала антенны для предварительного этапа юстировки ROT-54/2.6 // Известия НАН РА и НПАУ. Технические науки. 2025. Т. 78. № 1. С. 64–78. DOI: 10.53297/0002306X-2025.v78.1-64.
7. Sargsyan, A., & Hambardzumyan, N. Effects of Deformation of Main Reflector of Double Reflector Spherical Antenna on Its Aperture Field - ROT-54/2.6 Antenna Case. Journal of Telecommunications and Information Technology, 104(2), 1–5. DOI: 10.26636/jtit.2026.2.2528.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ռադիոաստղագիտության ժամանակակից խնդիրների լուծումը պահանջում է մեծ բացվածքով և բարձր ճշգրտությամբ անտենաներ, որոնց արդյունավետությունը որոշվում է անդրադարձնող մակերևույթի երկրաչափական ճշտությամբ, կիզակետային հանգույցների փոխադարձ դիրքով, չափումների վերարտադրելիությամբ և շահագործման ընթացքում կառուցվածքի կայունությամբ: Այդ պատճառով խոշոր ռադիոդիտակների վերականգնումը, համալարումը և կարգաբերումը պետք է դիտարկել որպես միասնական երկրաչափական, չափագիտական, հաշվարկային և ինժեներական գործընթաց: Սույն աշխատանքը նվիրված է ՌՕԴ-54/2.6 ռադիոսպտիկական դիտակի ապակոնսերվացման, նախնական համալարման և կարգաբերման գիտամեթոդական ու տեխնիկական հիմքերի մշակմանը:

Աշխատանքում հաստատվել է, որ 54 մ տրամագծով հիմնական սֆերիկ հայելի, 32 մ էֆեկտիվ բացվածք, 5 մ երկրորդային հայելի և 2.6 մ օպտիկական դիտակ ունեցող ՌՕԴ-54/2.6 համակարգի ներկայիս հիմնական խնդիրները պայմանավորված են երկարատև կոնսերվացիայով, տեխնիկական սպասարկման բացակայությամբ, կոռոզիոն ազդեցություններով, շարժական հանգույցների տեղային խափանումներով և կառավարման ենթահամակարգերի արդիականացման անհրաժեշտությամբ: Միաժամանակ 4.5 ԳՀց հաճախականության տիրույթում կատարված փորձնական չափումները հաստատել

են ռադիոազդանշանների ընդունման սկզբունքային ունակության պահպանումը, ինչը հիմնավորում է դիտակի աշխատունակությունը:

Արխիվային նյութերի վերլուծությունը ցույց է տվել, որ 1985–1987 թթ. մեծ հայելու պատրաստման, մոնտաժման և նախնական համալարման համար կիրառված մեթոդները հիմնված էին սխալների նորմավորման, փուլային վերահսկման, ձևանմուշային և սֆերոմետրական չափումների, ինչպես նաև ջերմային և ժամանակային ազդեցությունների հաշվառման վրա: Այդ մոտեցումները հաշվարկային առումով ապահովում էին մակերևութային այնպիսի ճշտություն, որը համապատասխանում էր մինչև $\lambda = 5$ մմ աշխատանքային ռեժիմին: Դրանով հիմնավորվել է, որ ներկայիս խնդիրը վերաբերում է ոչ թե նոր անտենային համակարգի ստեղծմանը, այլ նախկինում ձեռք բերված բարձր ճշտության վերականգնմանը և ժամանակակից թվային վերահսկման միջոցներով դրա պահպանմանը:

Վերագործարկման գիտական խնդիրների լուծման համար ստեղծվել է դիտակի ճշգրիտ թվային երկվորյակը և SOLIDWORKS միջավայրում կառուցվել է եռաչափ մոդել՝ մեծ հայելու պանելների ամբողջական վերարտադրությամբ: Մշակվել են մեծ հայելու իրական երկրաչափական կենտրոնի որոշման և փոքր հայելին կրող կառուցվածքի պտտման կենտրոնի համապատասխանության ստուգման երկու փոխլրացնող մեթոդներ: Դրանցից մեկը հիմնված է 600 մմ աշխատանքային բազայի և թեոդոլիտային չափումների վրա, իսկ մյուսը՝ օդակաձև դիգեյի լարային վերահսկման և երկրաչափական առանցքների վերլուծության վրա: C++ ծրագրային միջավայրում իրականացված սիմուլյացիոն մոդելավորումը ցույց է տվել, որ փոքր համակարգված շեղումները կարող են առաջացնել կենտրոնի դիրքի մինչև 7.75 սմ կարգի տեղաշարժ, ինչը հաստատում է չափման սխեմայի ճշգրիտ կազմակերպման անհրաժեշտությունը:

Սահմանվել է քանակական կապ մեծ հայելու պանելների երկրաչափական շեղումների, բացվածքում առաջացող փուլային սխալների և անտենայի ուժեղացման գործակցի նվազման միջև: Այդ կապը հնարավորություն է տալիս չափված շառավղային շեղումները վերածել փուլային աղավաղումների գնահատականի և դրանց հիման վրա որոշել պանելային համալարման առաջնահերթությունները: Մշակվել է մեծ հայելու պանելների տեղային շառավղային շեղումների որոշման մեթոդաբանություն՝ հիմնված լազերային հեռաչափով չափումների, թվային կոորդինատային քարտեզավորման և իդեալական հեռավորությունների նախնական հաշվարկի վրա: Ցույց է տրվել, որ 3738 պանելի, յուրաքանչյուր պանելի 5 վերահսկիչ կետի և յուրաքանչյուր կետում 5 չափման դեպքում առաջնային չափումների

նվազագույն ծավալը կազմում է 93 450, իսկ հետագա կրկնակի ստուգումների դեպքում աշխատանքների ընդհանուր ծավալը հասնում է 10^5 -ի կարգի: Սա քանակապես հիմնավորում է զուտ ձեռքով համալարումից դեպի ավտոմատացված մոնիթորինգի և շտկման համակարգերի անցման անհրաժեշտությունը:

Աշխատանքում մշակվել են մեծ հայելու պանելների դիրքի ավտոմատացված մոնիթորինգի, ջերմատեսիլ սկանավորման, լազերային վավերացման, հիբրիդային շտկման և ձնահեռացման ինտեգրված թվային համակարգի հայեցակարգերը: Առաջարկվող համակարգում ինֆրակարմիր մոնիթորինգը դիտարկվում է ոչ թե որպես մեծ հայելու երկրաչափության վերջնական չափման միջոց, այլ որպես արագ սկանավորման շերտ, որը բացահայտում է ջերմային դիսկի գոտիները և դրանք փոխանցում բարձր ճշգրտության լազերային ստուգման: Գործադիր շտկման համար առաջարկվել է հիբրիդային մոտեցում, որի դեպքում խոշոր շեղումները վերացվում են ստանդարտ մեխանիկական կարգավորիչներով, իսկ մնացորդային փոքր շեղումները փոխհատուցվում են բարձր ճշգրտության պիեզոշարժիչային կամ համարժեք գործադիր հանգույցներով:

Առանձին վերլուծվել է ուղիղ արևային ճառագայթման, կառուցվածքային ստվերման, քամու սառեցնող ազդեցության և սեզոնային պայմանների հետևանքով մեծ հայելու վրա առաջացող ոչ համասեռ ջերմային դաշտերի ազդեցությունը: Ցույց է տրվել, որ հաշվարկային ջերմային քարտեզները և դրանցից ստացվող տեղային ջերմամեխանիկական դեֆորմացիոն դիսկի քարտեզները կարող են ծառայել որպես ավտոմատացված մոնիթորինգի առաջնահերթությունների որոշման գործիք: Դրանք թույլ են տալիս ամբողջ մակերևույթի ծավալուն ստուգումը փոխարինել ավելի հասցեական վերահսկման ռեժիմով՝ պահպանելով լազերային չափագիտության որոշիչ դերը: Այս մոտեցումը համահունչ է ատենախոսության 4.2 ենթաբաժնում ձևակերպված ինտեգրված համակարգի տրամաբանությանը, որտեղ երկրաչափական, ջերմային և կլիմայական ազդեցությունները դիտարկվում են մեկ միասնական ալգորիթմական շրջանակում :

Շահագործման ընթացքում անտենայի վիճակի կայունության ապահովման նպատակով առաջարկվել է նաև մեծ հայելու սեկտորային ձնահեռացման և հակասառցակալման ենթահամակարգ, որտեղ ձյան ծանրաբեռնվածությունը, հալեցման համար պահանջվող ջերմային հզորությունը և ջերմային երկարացումը դիտարկվում են նույն թվային մոդելի շրջանակում: Այսպիսով, մեծ հայելու ճշգրտության պահպանումը տեղափոխվում է պարբերական ձեռքով գործողությունների ռեժիմից դեպի շարունակական թվային ապահովման ռեժիմ, որը միավորում է երկրաչափական վերահսկումը, ջերմային դիսկերի հայտնաբերումը,

լազերային վավերացումը, հիբրիդային շտկումը և արտաքին շահագործական ազդեցությունների կառավարումը:

Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ ՌՕԴ-54/2.6 անտենայի մեծ հայելու պանելների դիրքի անընդհատ մոնիթորինգի և առաջացող շեղումների ավտոմատ շտկման համակարգի կիրառումը հնարավորություն է տալիս մեծ հայելու մակերևույթի ճշգրտության պահպանմանն ուղղված աշխատանքների տևողությունը կրճատել 11.6 անգամ: Անտենայի եռաչափ թվային մոդելի և ծրագրային մոդելավորման միջոցների կիրառումը ապահովում է կատարվող չափումների արդյունքների մշակման արագացում 5.9 անգամ, իսկ եռաչափ թվային մոդելի և ծրագրային սիմուլյացիաների օգտագործումը թույլ է տալիս մարդկային գործոնի ազդեցությամբ պայմանավորված սխալների հավանականությունը նվազեցնել 3.3 անգամ: Ստացված արդյունքները ձևավորում են ՌՕԴ-54/2.6-ի ապակոնսերվացման, նախնական համալարման, կարգաբերման, ընթացիկ ճշգրտության պահպանման և երկարաժամկետ կայուն շահագործման գիտատեխնիկական հիմքը:

NAREK HAKOB HAMBARDZUMYAN

**SOLVING THE PROBLEMS OF RECOMMISSIONING, PRELIMINARY
ALIGNMENT, AND CALIBRATION OF THE ANTENNA OF THE ROT-54/2.6 RADIO-
OPTICAL TELESCOPE**

SUMMARY

Solving modern problems of radio astronomy requires large-aperture, high-precision antenna systems whose performance is determined by the geometric accuracy of the reflecting surface, the mutual positioning of focal units, the reproducibility of measurements, and the structural stability of the system during operation. Therefore, the restoration, alignment, and calibration of large radio telescopes should be considered as a unified geometric, metrological, computational, and engineering process. This work is devoted to the development of the scientific, methodological, and technical basis for the de-conservation, preliminary alignment, and calibration of the ROT-54/2.6 radio-optical telescope.

The study confirms that the main current problems of the ROT-54/2.6 system, which includes a 54 m spherical main reflector, a 32 m effective aperture, a 5 m secondary reflector, and a 2.6 m optical telescope, are caused by long-term conservation, lack of regular technical maintenance, corrosion effects, local failures of movable units, and the need to modernize the control subsystems. At the same time, test measurements performed in the 4.5 GHz band confirmed that the telescope has retained its basic capability to receive radio signals, thereby proving the practical feasibility of its reactivation.

The analysis of archival materials showed that the methods used in 1985–1987 for manufacturing, installing, and initially aligning the main reflector were based on error normalization, stage-by-stage control, template and spherometric measurements, as well as consideration of thermal and time-dependent effects. These methods provided, in computational terms, a surface accuracy corresponding to an operating regime up to $\lambda = 5\text{mm}$. This proves that the present task is not the creation of a fundamentally new antenna system, but the restoration, modern confirmation, and digital maintenance of a previously achieved high-precision state.

To solve the scientific problems of reactivation, a precise digital description of the telescope was created, and a 3D model was built in the SOLIDWORKS environment with full reconstruction of the main reflector surface consisting of 3,738 panels. Two complementary methods were developed for determining the actual geometric center of the main reflector and checking the agreement of the rotation center of the structure carrying the secondary reflector with this center. One method is based on a 600 mm working baseline and theodolite measurements, while the other is based on wire control of the annular girder and geometric chord analysis. Simulation modeling performed in C++ showed that even small systematic deviations may lead to an estimated displacement of the center by up to approximately 7.75 cm, which confirms the need for precise organization of the measurement procedure.

A quantitative relationship was established between geometric deviations of the main reflector panels, phase errors in the aperture field, and the reduction of antenna gain. This relationship makes it possible to convert measured radial deviations into an estimate of phase distortion and to determine the priorities of panel alignment. A methodology was developed for determining local radial deviations of the main reflector panels based on laser rangefinder measurements, digital coordinate mapping, and preliminary calculation of ideal distances. It was shown that for 3,738 panels, with 5 control points per panel and 5 measurements at each point, the minimum primary measurement volume is 93,450, while the total amount of work, including repeated verification cycles, reaches the order of 10^5 . This quantitatively justifies the transition from purely manual alignment to automated monitoring and correction systems.

The work proposes an integrated digital concept for automated monitoring of panel positions, thermographic scanning, laser verification, hybrid correction, and snow removal from the main reflector. In the proposed system, infrared monitoring is treated not as a final method for measuring the reflector geometry, but as a rapid screening layer that identifies thermally risky zones and transfers them to high-precision laser verification. For the correction subsystem, a hybrid approach is proposed: large deviations are eliminated by standard mechanical adjustment units, while small residual deviations are compensated by high-precision piezoelectric or equivalent actuator units.

The effect of direct solar irradiation, structural shadowing, wind cooling, and seasonal conditions on the formation of non-uniform thermal fields on the main reflector was also analyzed. It was shown that calculated thermal maps and the corresponding local thermomechanical deformation-risk maps can be used as a tool for prioritizing automated monitoring. They make it possible to replace continuous full-surface inspection with a more targeted control mode while preserving the decisive role of laser metrology. This is consistent

with the integrated system logic developed in Section 4.2 of the dissertation, where geometric, thermal, and climatic effects are considered within a single algorithmic framework .

To ensure operational stability, a sectoral snow-removal and anti-icing subsystem was also proposed. In this subsystem, snow load, the heat power required for melting, and thermal expansion are considered within the same digital model. Thus, maintaining the accuracy of the main reflector is transferred from periodic manual operations to a continuous digital-support mode that combines geometric control, thermal-risk detection, laser verification, hybrid correction, and management of external operational effects.

The obtained results show that the use of a continuous monitoring and automatic correction system for the positions of the main reflector panels of the ROT-54/2.6 antenna can reduce the duration of work aimed at maintaining the accuracy of the main reflector surface by at least 11.6 times. The use of the antenna's 3D digital model and software simulation tools accelerates the processing of measurement results by at least 5.9 times, while the use of the 3D digital model and software simulations reduces the probability of errors caused by the human factor by at least 3.3 times. The obtained results form the scientific and technical basis for the de-conservation, preliminary alignment, calibration, maintenance of current accuracy, and long-term stable operation of the ROT-54/2.6 telescope.