

А.С. САРГСЯН, Н.А. АМБАРЦУМЯН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ  
ПОЛОЖЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БОЛЬШОГО ЗЕРКАЛА  
АНТЕННЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭТАПА ЮСТИРОВКИ  
РОТ-54/2.6**

Радиооптический телескоп РОТ-54/2.6, находящийся в консервации более десяти лет, подвергся воздействию природных и антропогенных факторов, предположительно изменивших его физико-механические и радиотехнические характеристики. С 2018 года интернациональная группа проекта “Национальный космический центр Геруни” разработала план восстановления работоспособности телескопа, включая бизнес-план. Первоочередной задачей является юстировка антенны, предполагающая анализ текущих геометрических и радиотехнических параметров в сравнении с исходными значениями, зафиксированными при строительстве.

Для обеспечения высокой точности юстировки, минимизации фазовых искажений электромагнитного поля в раскрыве и создания основы для цифрового управления антенной без ручного вмешательства разработана автоматизированная система оценки и коррекции положения панелей поверхности главного зеркала. Система включает модули лазерной и инфракрасной диагностики для мониторинга положения панелей и пьезомоторные приводы для их точной корректировки. Разработана математическая модель фазовых искажений, подтвержденная результатами численного моделирования, демонстрирующими эффективность предложенного подхода в повышении точности и стабильности антенны.

Система обеспечивает корректировку положения панелей в реальном времени, поддерживая стабильность радиотехнических характеристик и минимизируя фазовые искажения. Предварительное моделирование и визуализация позволяют оптимизировать архитектуру системы юстировки до её физической реализации. Разработка создаёт технологическую основу для полной цифровизации управления антенной, включая возможность интеграции адаптивных алгоритмов, что повышает функциональность и исключает необходимость трудоёмкого ручного вмешательства.

**Ключевые слова:** радиооптический телескоп, антенна, РОТ-54/2.6, методы юстировки.

**Введени.** Радиооптический телескоп РОТ-54/2.6, построенный в 1980–1987 годах под руководством академика Париса Геруни, является выдающимся достижением в области проектирования крупных антенн для радиоастрономии

и телекоммуникаций [1-4]. Функционировавший до 2012 года, телескоп был передан ЗАО “Национальный орган по стандартизации и метрологии” Министерства экономики Армении и законсервирован. Длительное воздействие внешних факторов, вероятно, вызвало отклонения в механической конструкции антенны, в частности, в положении панелей главного зеркала, что требует точной оценки и коррекции. Проект “Национальный космический центр Геруни” направлен на восстановление радиооптического телескопа, параметры которого и по сей день являются непревзойденными, например, эффективность (коэффициент усиления) и чувствительность (отношение эффективной поверхности раскрыва к собственным шумам). Международная команда экспертов разработала пятилетний план перезапуска, включающий создание новой цифровой системы управления антенной и совершенствование методов юстировки. Юридические разногласия с ЗАО препятствуют проведению работ на месте. В настоящее время все научные задачи, связанные с расконсервацией и предварительной юстировкой РОТ-54/2.6, решаются в виртуальной среде [5,6].

Ключевым этапом проектирования антенны в конце 80-ых годов было размещение панелей главного зеркала для обеспечения сферической геометрии с использованием классического метода инварных тросов.

Для оптимизации юстировки предложено предварительное моделирование измерений и коррекции в виртуальной среде. Ранее были разработаны: 3D-модель антенны в SOLIDWORKS, метод определения центра главного зеркала, симуляционная модель в C++ и методика оценки и коррекции отклонений панелей. Настоящее исследование анализирует влияние позиционных отклонений панелей на радиотехнические параметры антенны и предлагает встроенную систему для мониторинга и автоматической коррекции положения панелей в реальном времени, исключаящую ручную юстировку. Математическая модель, реализованная в Python, оценивает влияние линейных и угловых смещений панелей на отражение электромагнитного излучения, повышая точность и эффективность дальнейшей работы телескопа [7-9].

**Методы исследования.** Построение модели осуществлялось с учётом последовательности нескольких этапов: в первую очередь необходимо определить положение каждой панели на сферической поверхности главного зеркала. Положение панели определяется следующим образом:

$$\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i). \quad (1)$$

Компоненты вектора выражаются через сферические координаты следующим образом:

$$x_i = R \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi),$$

$$y_i = R \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi),$$

$$z_i = R \cdot \cos(\theta),$$

где  $R$  - радиус большого зеркала ( $m$ );  $\theta, \phi$  - сферические полярный и азимутальный углы для любой точки  $i$ -й панели;  $r_i$  - вектор идеального положения любой точки  $i$ -й панели.

Отклонение точек поверхности панели представляется как смещение вдоль нормали к точке на идеальной сферической поверхности:

$$\delta z_i \in [-\delta_{\max}, +\delta_{\max}], \quad (2)$$

где  $\delta z_i$  - радиальное отклонение для любой точки  $i$ -й панели в метрах (например,  $\pm 0.005 m$ );  $\delta_{\max}$  - максимально допустимое отклонение.

Каждое позиционное отклонение панели приводит к фазовому сдвигу, который рассчитывается по формуле

$$\psi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta z_i, \quad (3)$$

где  $\psi_i$  - фазовый сдвиг, вызванный отклонением  $i$ -й панели (в радианах);  $\lambda$  - длина волны ( $m$ ).

Из-за фазовых сдвигов, вызванных отклонениями панелей, в антенне возникнет деструктивная интерференция, что приведет к снижению амплитуды суммарного поля в фокусе (в приемном режиме) [10] или в главном направлении излучения (в режиме передачи). В разработанной одним из авторов симуляционной модели интенсивность электромагнитного поля в фокальной области малого зеркала в данном направлении при наличии радиального отклонения одной из панелей большого зеркала в диапазоне  $5 \dots 20 mm$  составила лишь около 23% по сравнению со случаем идеальной сферической конфигурации большого зеркала. Это означает уменьшение коэффициента усиления антенны, что может привести к потере примерно  $\frac{3}{4}$  мощности излучения в данном направлении. Подобный результат в очередной раз подчёркивает критическую необходимость обеспечения идеальной сферической поверхности большого зеркала.

Метод определения возможных радиальных отклонений панелей поверхности большого зеркала антенны и их корректировки, предложенный в статье [11], основан на использовании лазерного дальномера для измерения положения панелей относительно центра главного зеркала и последующей корректировки отклонений. Несмотря на логическую обоснованность и реализуемость метода, его практическое применение сталкивается с рядом серьёзных трудностей.

Данный подход является крайне трудоёмким и длительным во времени. Процесс измерения с помощью лазерного дальномера требует индивидуального анализа каждой из панелей, что в реальных условиях приводит к необходимости выполнения порядка 100000 измерений. Поскольку каждая панель должна быть измерена как минимум в 5 точках (4 угла и центр) для получения полной информации о её положении, только для одной панели требуется не менее 5 измерений. Кроме того, с учётом вероятности наличия погрешностей в измерениях каждое из 5 измерений должно повторяться по 5 раз, чтобы по результатам можно было вычислить среднеквадратичную ошибку.

После получения данных об отклонениях панелей необходимо выполнить их механическую юстировку, что также представляет собой сложный и кропотливый процесс. Каждая панель закреплена с помощью четырех болтов регулирующего механизма (болт-гайка), которые с течением времени могут подвергнуться износу, что усложняет выполнение точных корректировок.

Учитывая, что механический процесс юстировки также должен контролироваться посредством повторных измерений, сначала производится корректировка, затем повторное измерение, при наличии остаточного отклонения — повторная юстировка.

Учитывая трудоёмкость метода и сложность механической настройки, предлагается внедрение автоматизированной системы управления, которая позволит в режиме реального времени обнаруживать и корректировать отклонения положения панелей без необходимости ручной регулировки.

Система должна состоять из трёх основных подсистем:

- подсистемы мониторинга положения панелей;
- исполнительного механизма корректировки;
- централизованной управляющей подсистемы.

В основе подсистемы контроля положения лежит сочетание инфракрасных (ИК) датчиков и лазерных систем позиционирования, что позволит получать высокоточные синхронные данные об отклонениях. Механизм корректировки будет построен на базе пьезомоторных приводов, способных с миллиметровой точностью регулировать положение панелей в ответ на сигналы датчиков.

Централизованная управляющая система может быть основана на адаптивных алгоритмах искусственного интеллекта (ИИ), способных анализировать входящие данные, прогнозировать отклонения и выполнять автоматические корректировки (см. рис. 1).



Рис.1. Общая схема автоматизированной системы управления

Исходя из вышеописанной архитектуры, можно выделить следующие ключевые преимущества предлагаемой системы:

- автоматический контроль – непрерывный мониторинг положения панелей в режиме реального времени;
- немедленная корректировка – пьезомоторные приводы позволяют осуществлять быструю юстировку без риска механического износа;
- адаптивное управление – система ИИ на основе статистических данных об условиях окружающей среды способна прогнозировать потенциальные отклонения и снижать потребность в частой корректировке.

Внедрение данного механизма призвано заменить традиционные методы механической юстировки, обеспечивая существенно более высокую точность, быструю реакцию, значительную экономию времени, человеческих и финансовых ресурсов, а также, что особенно важно, долгосрочную стабильность работы антенны радиооптического телескопа.

Первым компонентом автоматизированной системы управления является подсистема оценки положения панелей, предназначенная для максимально точного выявления отклонений. Она построена на сочетании ИК датчиков (IR sensors) и лазерных дальномеров (Laser Distance Sensors), что позволяет производить быстрое сканирование и высокоточное измерение.

В процессе исследования были рассмотрены различные модели оборудования, изучены их технические характеристики и проведён отбор на основе математического моделирования соответствия параметрам, необходимым для данной системы.

Функцией ИК датчиков является одновременное сканирование общих позиционных отклонений положений поверхности панелей. Температурные

отклонения могут возникнуть преимущественно из-за разницы в степени нагрева/освещенности различных участков поверхности главного зеркала Солнцем в течение дня. Если представить идеальное положение панели как функцию  $S(x,y)$ , а данные, полученные с помощью ИК датчиков, как  $M(x,y)$ , тогда отклонение рассчитывается как разность между ними.

$$\Delta T(x, y) = M(x, y) - S(x, y), \quad (4)$$

где  $\Delta T(x,y)$  - разность температур поверхности в данной точке панели.

ИК датчик измеряет интенсивность теплового излучения, отражённого от поверхности, которая зависит от температуры поверхности в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (5)$$

где  $I$  - интенсивность излучения;  $\varepsilon$  - коэффициент излучательной способности поверхности;  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана, а  $T$  - температура поверхности.

При смещении положения поверхности изменяется тепловое излучение, отражённое от неё, что позволяет обнаружить отклонение. Если чувствительность ИК датчика равна  $\delta T$ , то она должна удовлетворять следующему условию:

$$\frac{dI}{dT} \cdot \delta T \geq \frac{\sigma}{2} \cdot (T_{\max}^4 - T_{\min}^4), \quad (6)$$

где  $\delta T$  — минимально различимая температурная чувствительность датчика.

Например, при температурных колебаниях панели в пределах  $\pm 1^\circ\text{C}$  чувствительность датчика должна составлять не менее  $0.1^\circ\text{C}$ . Были выбраны три модели датчиков, соответствующие необходимым техническим параметрам:

- MLX90640,
- VL53L1X,
- OMRON D6T.

Наилучшее соответствие заданным техническим требованиям может обеспечить комбинация датчиков MLX90640 и VL53L1X.

Вторым компонентом подсистемы оценки положения в автоматизированной системе управления являются лазерные системы позиционирования. Их задача - обеспечить высокоточное точечное измерение положения панелей в тех участках, где ранее были зафиксированы отклонения с помощью ИК датчиков.

Лазерная система выступает в роли инструмента верификации, предоставляя данные с миллиметровой точностью на основе результатов предварительного сканирования. В случае идеальной поверхности точка панели должна располагаться точно на сферической поверхности с радиусом  $R$ . В этом случае идеальное расстояние  $d_{\text{ideal}}$  рассчитывается по формуле

$$d_{\text{ideal}} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (R - z_0)^2}, \quad (7)$$

Разность между двумя позициями - фактической и идеальной, а также среднеквадратическая погрешность при многократных измерениях учитываются для определения величины отклонения, которая рассчитывается по формуле

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_i^{\wedge})^2, \quad (8)$$

где  $z_i^{\wedge}$  - идеальное расстояние;  $z_i$  - фактическое расстояние.

Предлагаемые модели лазерных датчиков:

- Keyence LR-TB5000,
- SICK DT50-2 Pro,
- Baumer OADM 20,
- Turck BOD 24K.

Для целей лазерного позиционирования наиболее целесообразно использовать немецкую модель **SICK DT50-2 Pro**, которая работает на расстояниях до 30 м и обеспечивает точность до  $\pm 0.5$  мм. Устройство основано на технологии Time-of-Flight (ToF) и соответствует промышленным требованиям к условиям эксплуатации (класс защиты IP67, температурный диапазон  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ), что делает его надёжным и высокоточным решением для точечной оценки отклонений поверхности большого зеркала.

Следующая важная задача — размещение датчиков в таких точках, откуда они смогут сканировать поверхность большого зеркала, не создавая при этом дополнительных тепловых шумов за счёт собственного нагрева и не снижая коэффициент использования поверхности антенны.

Наиболее целесообразным является размещение датчиков в четырёх точках по внешнему контуру главного зеркала, откуда каждый из них сможет контролировать выделенный сектор его поверхности.

Подсистема анализа данных отвечает за обработку информации, поступающей от ИК и лазерных датчиков о положении панелей, за оценку погрешностей, а также за генерацию команд на корректировку.

Эта подсистема составляет основной “мозг” автоматизированной системы управления, в котором выполняются следующие функции:

- **ввод данных с датчиков (I/O)** - считывание данных с лазерных и ИК датчиков;
- **предварительная фильтрация** - подавление шумов с использованием гауссового или медианного фильтра;
- **оценка отклонений** - сравнение измеренных значений с моделью идеальной поверхности;

- **анализ** - расчёт среднеквадратичной погрешности, определение направления и величины необходимой корректировки;

- **генерация команды на калибровку** - автоматическая передача управляющего сигнала в подсистему калибровки.

Данные, получаемые с ИК и лазерных датчиков, содержат случайные шумовые составляющие, обусловленные микровибрациями конструкции, тепловыми флуктуациями и погрешностями оптических измерений. Эти шумы имеют, как правило, распределение, близкое к нормальному (гауссовскому). По этой причине процесс фильтрации данных осуществляется с применением гауссового фильтра, который выражается следующей формулой:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

где  $x$  — величина отклонения;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение.

Обработка конкретных данных осуществляется по следующей формуле:

$$d_i^{\text{filtered}} = \sum_{k=-r}^r G(k) \cdot d_{i+k}, \quad (10)$$

где  $d$  — данные измерений,  $r$  — радиус фильтра.

После применения гауссовой фильтрации формула (11) используется для определения направления корректирующего воздействия. Она описывает вычисление нормированного градиента фильтрованного поля отклонений  $\nabla(\Delta d_i^f)$ , который отражает направление максимального изменения поверхности. Вектор, противоположный этому градиенту, задаёт направление корректировки панели, обеспечивая смещение в сторону уменьшения локального отклонения:

$$C(x, y) = -\Delta(x, y), \quad (11)$$

Подсистему рекомендуется реализовать в программной среде C++ или Python, при этом обработку данных удобно выполнять с использованием библиотеки NumPy. Выбор этих языков программирования обусловлен совокупностью требований к системе: высокой вычислительной производительностью, точностью обработки данных и возможностью интеграции с современными библиотеками анализа и визуализации. Язык C++ обеспечивает низкоуровневый доступ к аппаратным средствам и высокую скорость исполнения кода, что критически важно для обработки сигналов и управления исполнительными механизмами в реальном времени. Python, в свою очередь, оптимален для реализации алгоритмов анализа и фильтрации данных, построения математических моделей и визуализации результатов благодаря широкому спектру научных

библиотек (NumPy, SciPy, Matplotlib, TensorFlow). Совместное использование этих языков позволяет объединить эффективность и аппаратную оптимизацию C++ с гибкостью и аналитическим потенциалом Python, обеспечивая баланс между производительностью и функциональной адаптивностью системы.

Для визуализации результатов можно использовать Matplotlib, Plotly или API SolidWorks, а при необходимости, в систему может быть добавлен функционал машинного обучения на базе Scikit-learn или TensorFlow.

Подсистема калибровки представляет собой активную исполнительную часть архитектуры автоматизированного управления, цель которой — обеспечить перемещение панелей в режиме реального времени с миллиметровой точностью. Она получает команды от подсистемы анализа данных и реагирует на них при помощи пьезомоторных или механических исполнительных механизмов.

Основным функциональным элементом подсистемы калибровки является пьезомоторный привод, посредством которого осуществляется автоматическая коррекция положения панели. На этапе выбора особое внимание уделяется таким параметрам, как скорость отклика системы, уровень точности, механическая устойчивость, а также удобство монтажа.

Пьезомоторный привод по своей конструкции обеспечивает управляемую деформацию в миллиметровом диапазоне с микрометровым шагом, что удовлетворяет требованиям коррекции отклонений панелей главного зеркала.

Требуемая точность была определена на основе моделирования с учётом того, что возможные отклонения панелей составляют до  $\pm 5$  мм, а целевая точность должна быть не менее 0,05 мм.

Исходя из среднего веса панели (65 кг), привод должен соответствовать следующим техническим характеристикам:

- диапазон перемещения:  $\geq \pm 5$  мм,
- шаговая точность:  $\leq 0.01$  мм,
- механическая нагрузочная способность:  $\geq 13$  кг,
- время отклика:  $\leq 10$  мс.

На основе ключевых технических характеристик проведён сравнительный анализ устройств. С учётом конструктивных и гидромеханических ограничений предлагаемой системы наиболее соответствующим вариантом признана модель длинноходных пьезомоторных приводов серии **PI NEXLINE N-216**. Она обеспечивает необходимый диапазон перемещений, достаточную точность и компактное размещение без риска перегрузки системы или энергетической нестабильности. Из-за ограниченного диапазона перемещений пьезоэлектрических актуаторов первичная юстировка должна производиться вручную — с помощью болто-гаечного механизма (см. рис. 2). Далее, все отклонения в пре-

делах до 1 см, выявленные в процессе постоянного мониторинга, могут быть автоматически скорректированы системой на базе актуаторов. В результате формируется *гибридная модель*, реализуемая по принципу параллельного подключения. Это означает следующее: пьезомоторный привод устанавливается рядом с винтовым механизмом или встраивается в его структуру и способен активно компенсировать остаточные отклонения с субмиллиметровой точностью.

Однако важно отметить, что из двух опорных точек, расположенных в одной и той же позиции панели, *только пьезоэлемент может выполнять динамическое перемещение*, тогда как основная геометрия панели предварительно выравнивается вручную. Это и служит обоснованием того, почему основная юстировка должна осуществляться вручную, а автоматическая коррекционная юстировка – уже в текущем режиме.

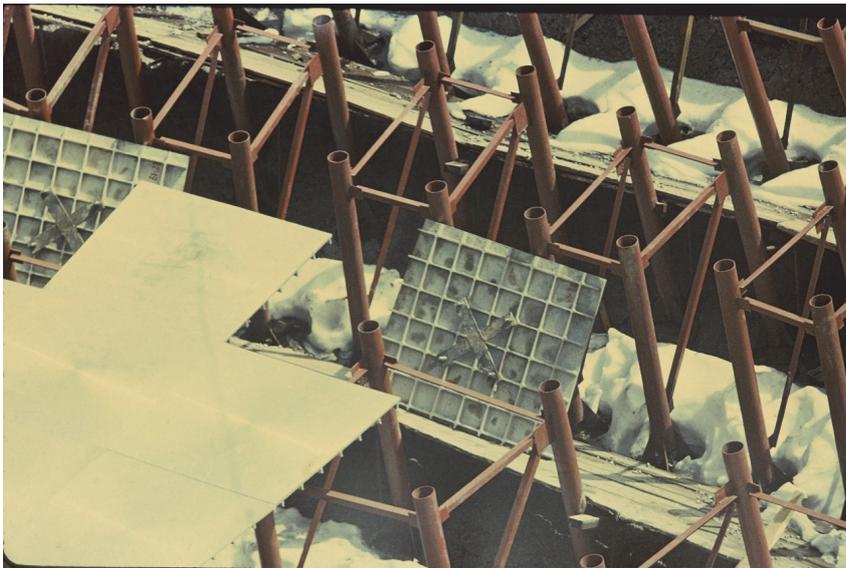


Рис. 2. Установка панелей POT-54/2.6

Положение панели в каждой угловой точке задаётся как результирующая (комбинированная) высота, определяемая двумя опорными механизмами.

$$H = \min(L_m, L_a), \quad (12)$$

Параметры  $L_m$  и  $L_a$  обозначают, соответственно, механическую и пьезомоторную составляющие суммарного перемещения панели. Величина  $L_m$  характеризует грубую регулировку, выполняемую вручную посредством винтового (болтового) механизма при первичной юстировке, тогда как  $L_a$  описывает высокоточное субмиллиметровое перемещение, обеспечиваемое пьезомоторным

приводом в автоматическом режиме. Таким образом, результирующая высота  $L = L_m + L_a$  определяет фактическое положение панели как сумму статической (механической) и динамической (автоматической) коррекции, что отражает гибридный принцип построения системы юстировки.

Положение панели в каждой угловой точке задаётся как результирующая (комбинированная) высота, определяемая двумя опорными механизмами – механическим (болтовым) и пьезомоторным. Такая схема обеспечивает как грубую начальную установку, так и точную динамическую коррекцию.

**Результаты исследования.** С целью наглядного представления работы системы и последующей автоматизации вычислений была создана виртуальная симуляционная модель с использованием инструментов программирования React и Three.js, которая точно воспроизводит конструкцию радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 (см. рис.3).

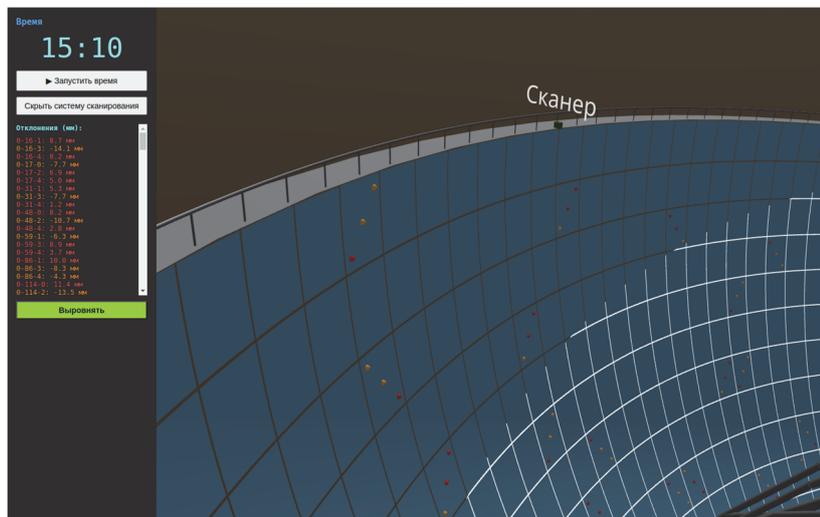


Рис. 3. Модель РОТ-54/2.6

На модели реализована временная анимация, отображающая движение Солнца и соответствующее изменение освещённости, а также принцип работы системы оценки и корректировки положения панелей.

В симуляции отображены расположение сканирующих механизмов, а также пять измеряемых точек каждой панели — четыре угловые и одна центральная.

Если в какой-либо из этих точек фиксируется отклонение, она окрашивается:

- в *красный цвет*, если расстояние от данной точки до геометрического центра зеркала превышает 27 м;

- в *оранжевый цвет*, если расстояние меньше 27 м.

Величина отклонения для каждой точки отображается в таблице (см. рис. 4). После выполнения команды на корректировку все точки становятся *зелеными*, что означает соответствие идеальному расстоянию - 27 м от центра зеркала.

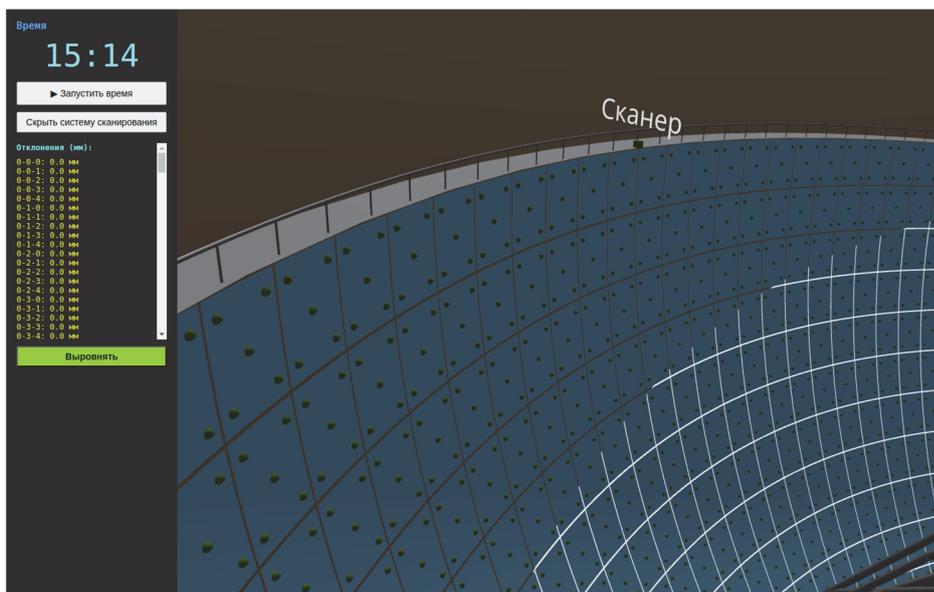


Рис. 4. Измеряемые точки панелей

**Заключение:** Представленная в данной работе автоматизированная система управления положением панелей главного зеркала радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 представляет собой комплексное инженерное решение, объединяющее современные сенсорные технологии, адаптивные алгоритмы и исполнительные механизмы высокой точности. Анализ результатов моделирования и оценка технической реализуемости подтверждают, что предложенная архитектура не только обеспечивает высокий уровень точности и надёжности, но и позволяет значительно сократить затраты времени, человеческих и финансовых ресурсов и снизить влияние человеческого фактора при текущей юстировке антенны.

Реализация гибридной системы, сочетающей механическую и пьезомоторную коррекции, делает возможной динамическую подстройку положения панелей в реальном времени, что особенно актуально для обеспечения стабильной работы антенны в условиях внешних возмущений. Использование предварительной симуляционной модели даёт возможность заранее оценить

эффективность корректировок и избежать дорогостоящих ошибок при практической реализации.

Таким образом, разработанная методология и предложенные технические средства могут служить технологической основой для полноценной цифровизации процессов юстировки антенны ROT-54/2.6 и, при необходимости, быть адаптированы для других аналогичных крупногабаритных антенных систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Herouni P.M.** The First Radio-Optical Telescope // Trans. of Sixth International Conference on Antennas and Propagation ICAP 89/ IEEE-URSI. – 1989. - Vol.1. – P. 540-546.
2. **Herouni P.M., Oskanian V.S.** Radio Flare at Eta Gemini Star // Proc. of Flare Stars IAU 137th Symposium. – Byurakan, 1989. - P. 145-146.
3. **Herouni P.M.** Construction and Operation of Radio-Optical Telescope ROT-32/54/2,6 // Trans. of the URSI International Meeting of Mirror Antenna Construction.- Riga, 1990. - P. 34-41.
4. **Геруни П.М.** Измерения характеристик ROT-54/2.6// ВКАИ-5. – 1990. - С. 22-26.
5. **Саргсян А.С.** Современное состояние и перспективы восстановления антенны зеркального радиотелескопа Геруни // Радиотехника. - 2023. - Т. 87, № 1. - С. 158–166. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202301-12>
6. **Саргсян А.С.** Методика предварительного этапа юстировочных работ по расконсервации антенны ROT-54/2.6 // Радиотехника. - 2023. - Т. 87, № 2. - С. 172–177. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202302-20>
7. **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. – 2024. – No.1. –P. 89-98. DOI: [https://innovative.polytechnic.am/files/publication\\_article/1/1727078830978.pdf](https://innovative.polytechnic.am/files/publication_article/1/1727078830978.pdf)
8. **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 NPUA and NPUA ser. of tech. sci.-2024 – Vol.77. No 2.-P. 160-170.
9. **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 2024. – Vol.2.-P. 137-144.
10. **Khachatryan A.R.** Spherical radiotelescope surface adjustment using arbitrary located laser rangefinder // Proceedings of NPUA and NPUA ser. of tech. sci. 2018 – Vol.71, No 2.-P. 181-187.
11. **Мужикян Н.С., Саргсян А.С.** Исследование электромагнитного поля в фокальной области двухзеркальной сферической антенны // Вестник НПУА. -2015. – No.2.-P. 83-89.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 19.09.2025.

Ա.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ն.Հ. ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ

**ՌՕԴ-54/2.6 ՌԱԴԻՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ԴԻՏԱԿԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ՄԵԾ ՀԱՅԵԼՈՒ  
ԹԻԹԵՂՆԵՐԻ ԴԻՐՔԱՅԻՆ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՍՈՂԵԼԱԿՈՐՈՒՄԸ  
ՆԱԽՆԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼԱՐՄԱՆ ՓՈՒԼԻ ՀԱՄԱՐ**

ՌՕԴ-54/2.6 ռադիոսպտիկական դիտակը, 10 տարուց ավելի կոնսերվացված վիճակում գտնվելով, բնականաբար, ենթարկվել է բնածին և մարդածին ազդեցությունների, որոնք հանգեցրել են ֆիզիկամեխանիկական և ռադիոտեխնիկական բնութագրերի վատթարացման: 2018 թվականից «Հերունու անվան ազգային տիեզերական կենտրոն» ծրագրի միջազգային թիմը մշակում է դիտակի վերականգնման ծրագիր՝ դրա հետ միասին մշակելով նաև համապարփակ բիզնես-պլան: Հիմնական խնդիրները անտենայի համալարումն ու կարգաբերումն են, որոնք ներառում են ընթացիկ երկրաչափական և ռադիոտեխնիկական պարամետրերի վերլուծություն՝ համեմատած շինարարության ժամանակ սահմանված բազային արժեքների հետ:

Մշակվել է մեծ հայելու մակերևույթի թիթեղների դիրքի գնահատման և շտկման ավտոմատացված համակարգ՝ ճշգրտման ճշտությունը բարձրացնելու, փուլային շեղումները նվազագույնի հասցնելու և ձեռքով միջամտությունը բացառելու, ամբողջությամբ թվային կառավարման հիմք ստեղծելու համար: Համակարգը ներառում է լազերային և ինֆրակարմիր տվիչներով մոդուլներ, որոնք կատարում են թիթեղների դիրքի անընդհատ համաժամանակյա մոնիթորինգ, և պիեզոշարժիչներ՝ դիրքային շեղումների ճշգրիտ շտկման համար: Փուլային շեղումների մաթեմատիկական մոդելը հաստատում է առաջարկված մոտեցման արդյունավետությունը՝ անտենայի ճշտությունն ու կայունությունը բարելավելու համար:

Համակարգը հնարավորություն է տալիս իրական ժամանակում կարգավորել թիթեղների դիրքը՝ ապահովելով ռադիոտեխնիկական պարամետրերի կայունություն և նվազեցնելով փուլային շեղումները: Մինչև համակարգի ներդրումը դրա աշխատանքի նախնական ծրագրային մոդելավորումն ու վիզուալացումը հեշտացնում են դրա ճարտարապետության օպտիմալացումը: Ծրագիրը ստեղծում է տեխնոլոգիական հիմք անտենայի կառավարման համակարգի ամբողջական թվայնացման համար՝ հնարավորություն տալով ինտեգրելու հարմարվողական ալգորիթմներ, բարձրացնելու ֆունկցիոնալությունը և բացառելու ձեռքով աշխատատար կարգավորումները:

**Առանցքային բառեր.** ռադիոսպտիկական դիտակ, անտենա, ՌՕԴ 54/2,6, համակարման մեթոդներ:

A.S. SARGSYAN, N.H. HAMBARDZUMYAN

**MODELING THE PROCESS OF PANEL POSITION DEVIATIONS  
MEASUREMENT ON THE SURFACE OF THE SPHERICAL REFLECTOR OF  
THE ROT-54/2.6 ANTENNA FOR THE PRELIMINARY STAGE OF ITS  
ALIGNMENT**

The ROT-54/2.6 radio-optical telescope mothballed for over a decade, has likely experienced degradation of its physico-mechanical and radiotechnical properties due to environmental and anthropogenic factors. Since 2018, the international team of the “Heruni National Space Center” project has developed a project to restore the telescope’s functionality supported by a comprehensive business plan. The primary task is the alignment of the antenna, which involves analyzing current geometric and radiotechnical parameters against baseline values established during construction.

An automated system for assessing and correcting the position of the main mirror’s surface panels has been developed to enhance the alignment accuracy, minimize the phase distortions, and establish a foundation for digital antenna control without a manual intervention. The system incorporates laser and infrared diagnostic modules for panel position monitoring and piezo-motor drives for precise adjustments. A mathematical model of phase distortions, validated through numerical simulations, confirms the efficiency of the proposed approach in improving the antenna accuracy and stability.

The system enables real-time panel position corrections, ensuring stable radio technical performance and minimizing phase distortions. Preliminary modeling and visualization facilitate the system architecture optimization prior to physical implementation. The development provides a technological basis for full digitization of antenna control, enabling integration of adaptive algorithms, enhancing functionality, and eliminating labor-intensive manual adjustments.

**Keywords:** radio-optical telescope, antenna, ROT-54/2.6, alignment methods.