

## Методы геодезического контроля зеркальных систем радиотелескопов РТ-32, РТ-13

© А. О. Шамо́в

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Зеркальные системы радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 состоят из двух основных элементов: главного зеркала (рефлектора) и вторичного (контррефлектора). От качества их исполнения не в последнюю очередь зависит точность получаемых данных в результате РСДБ-наблюдений. В связи с этим возникает необходимость в проведении работ по оценке геометрических показателей поверхности зеркальных систем радиотелескопов, входящих в состав радиоастрономических обсерваторий комплекса «Квазар-КВО».

В процессе проведения данных мероприятий применялись различные методы геодезического контроля. В рамках работ по модернизации отражающей поверхности контррефлектора РТ-32 применялись контактный метод и метод поэтапного сканирования поверхности. Далее для оценки точности отражающей поверхности контррефлектора РТ-32 применялся фотограмметрический метод исследования, который впоследствии использовался в измерениях зеркальной системы РТ-13.

В результате наиболее подходящим методом геодезического контроля зеркальных систем радиотелескопов РТ-32, РТ-13 стал фотограмметрический метод исследования. Данное обстоятельство в большей степени связано с высокой точностью получаемого результата в условиях работы на открытом воздухе. Однако стоит отметить, что в случае повышения точности безотражательных лазерных систем метод поэтапного сканирования станет наиболее приемлемым для выполнения данных видов работ. По итогу контрольных измерений было выяснено, что СКО геометрии отражающей поверхности контррефлектора РТ-32 обсерваторий «Светлое», «Зеленчукская», «Бадарь» составляет: 0.34, 0.38 и 0.31 мм соответственно, СКО геометрии отражающей поверхности РТ-13 обсерватории «Светлое» следующая: рефлектор — 0.19 мм, контррефлектор — 0.18 мм.

**Ключевые слова:** зеркальные системы радиотелескопов, контактный метод измерения, метод поэтапного сканирования, фотограмметрический метод измерения, СКО геометрии отражающей поверхности РТ, картограммы отклонений.

*Контакты для связи: Шамо́в Андрей Олегович (shamowao@mail.ru).*

**For citation:** Шамо́в А. О. Методы геодезического контроля зеркальных систем радиотелескопов РТ-32, РТ-13 // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 70. С. 13–18.  
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.13-18>

## Geodetic Control Methods of RT-32, RT-13 Radio Telescopes Mirror Systems

A. O. Shamov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

The mirror systems of the RT-32 and RT-13 radio telescopes consist of two main elements: the main mirror (reflector) and the secondary mirror (subreflector). It is the quality of their execution that to some extent determines the accuracy of VLBI observational data. Thus, there is a need to carry out research on the assessment of the surface geometric parameters of the radio telescopes (RT) mirror systems, which are part of the radio astronomy observatories of the Quasar-KVO complex.

While carrying out this task, various methods of geodetic control were applied as being part of the reflective surface modernization of the RT-32 subreflector, the contact method and the method of step-by-step surface scanning were utilized. Furthermore, to assess the accuracy of the reflecting RT-32 subreflector surface, a photogrammetric research method was employed, which was subsequently used in measurements of the RT-13 mirror system.

As a consequence, the most suitable method for geodetic control of RT-32, RT-13 radio telescopes turned to be the photogrammetric method of research, which, to a great extent, seems to be due to high accuracy of the result obtained in outdoor conditions. However, it is worth noting that in the case of increasing the accuracy of reflectorless laser systems, it is the step-by-step scanning method that becomes the most suitable for performing these types of work. The control measurements showed that the RMS of the geometry of the reflecting surface of the SR RT-32 in the observatories: “Svetloe”, “Zelenchukskaya”, “Badary” proved to be 0.34, 0.38 and 0.31 mm, respectively, while the RMS of the geometry of the reflecting surface of the RT-13 in the “Svetloe” observatory are 0.19 mm for reflector, 0.18 mm for subreflector.

**Keywords:** mirror systems of radio telescopes contact method of measurement, step-by-step scanning method, photogrammetric method of measurement, standard deviation of the geometry of the reflecting surface of the RT, cartograms of deviations.

*Contacts: Andrey O. Shamov (shamowao@mail.ru).*

**For citation:** Shamov A. O. Geodetic control methods of RT-32, RT-13 radio telescopes mirror systems // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 70. P. 13–18.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.13-18>

## Введение

Основными элементами обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» являются полноповоротные прецизионные радиотелескопы РТ-32 и РТ-13, созданные для проведения наблюдений с целью решения задач в области астрометрии и геодинамики (Финкельштейн и др., 2005; Finkelstein et al., 2008; Gayazov, Skurikhina, 2008).

Система облучения данных радиотелескопов выполнена по принципу телескопа французского астронома Лора Кассегрена, состоящего из двух отражающих зеркал. Главное зеркало — рефлектор РТ — перенаправляет полученные в процессе наблюдений радиоволны на поверхность вторичного зеркала — контррефлектора (КР) — которая, в свою очередь, фокусирует их на рупорные облучатели. Для уменьшения потерь в передаче радиоволн поверхность зеркал должна соответствовать математической модели выбранной системы облучения. В связи с этим возникает необходимость в контроле над состоянием данных элементов, при необходимости производятся работы по приведению их характеристик к заданным параметрам.

В период с 2020 по 2022 гг. в ИПА РАН были выполнены геодезические измерения по определению геометрических параметров зеркальных систем РТ-32 и РТ-13.

В процессе проведения данных мероприятий применялись различные методы геодезического контроля. Работа по модернизации отражающей поверхности КР РТ-32 была проведена с использованием контактного метода и метода поэтапного сканирования поверхности. Далее для оценки точности отражающей поверхности КР РТ-32 применялся фотограмметрический метод исследования, который впоследствии использовался в измерениях зеркальной системы РТ-13.

## Контактный метод

В ходе работ по модернизации отражающей поверхности КР РТ-32 проводились мероприятия по входному контролю новых щитов КР, которые впоследствии должны были заменить предшествующие.

Для оценки точности геометрии отражающей поверхности данных щитов применялся контакт-

ный метод (для реализации которого использовался абсолютный трекер АТ-401 Leica и сферический отражатель 1.5" (RRR) Leica). Особенностью данного метода является то, что измерительная марка устанавливается непосредственно на рабочую поверхность щита, а измерительное оборудование регистрирует ее положение в пространстве. Для равномерного покрытия рабочей области измерительными точками перед началом измерений на поверхности щита с определенным шагом отмечаются места установки измерительной марки. Полученные таким образом измерительные точки в процессе обработки накладываются на теоретическую модель щита КР. В данном случае СКО по совокупности отклонений координат измерительных точек от модели будет свидетельствовать о точности геометрии отражающей поверхности щитов КР.

В результате было определено, что СКО отражающей поверхности новых щитов КР находится в диапазоне от 0.21 до 0.23 мм.

На рис. 1 представлены картограммы отклонений отражающей поверхности новых щитов КР РТ-32 от теоретической модели.

К положительным аспектам контактного метода измерения поверхности можно отнести следующую особенность: при условии использования соответствующего оборудования точность получаемого результата может достигать 0.02 мм.

Отрицательные аспекты:

1. Высокая трудоемкость подготовительных и измерительных работ.

2. Необходимость проведения измерений в термостатированном помещении для исключения влияния атмосферных явлений в процессе всего времени проводимых измерений.

3. Невозможность применения данного метода в условиях проведения высотных работ. Для оценки геометрии всей поверхности КР необходимо производить измерения непосредственно на конструкции антенны РТ-32.

Исходя из вышесказанного, использование данного метода для решения подобных задач требует значительного количества времени при стабильном состоянии атмосферы, что в условиях проведения работ на открытом воздухе и на высоте невыполнимо.

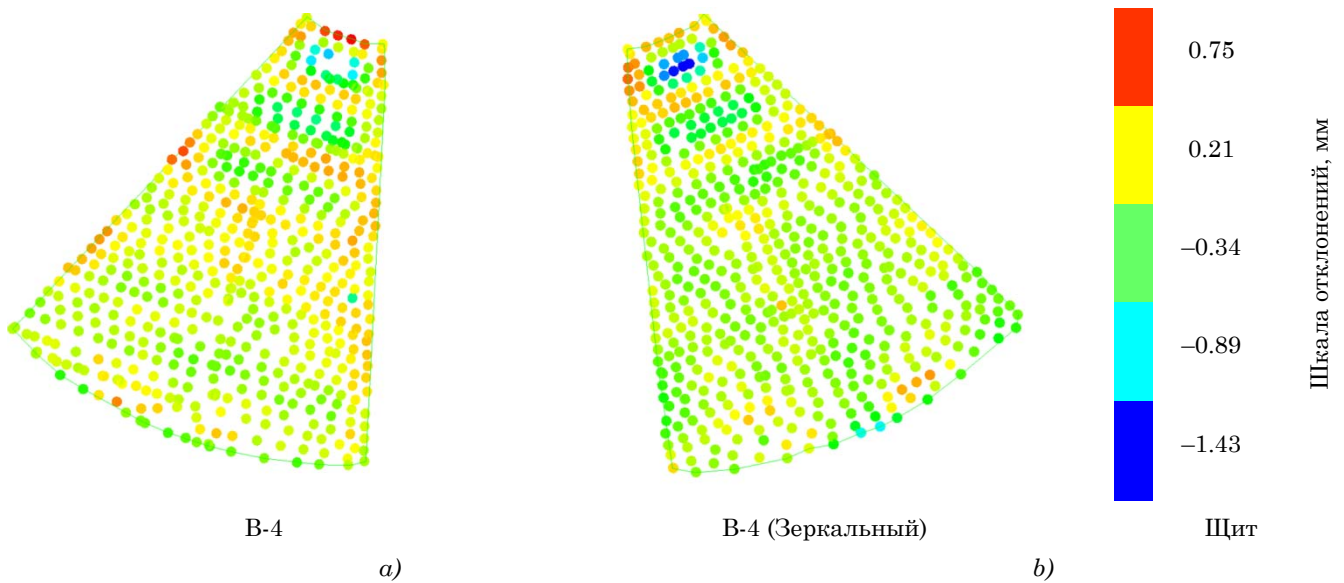


Рис. 1. Картограммы отклонений отражающей поверхности новых щитов КР РТ-32 от теоретической модели: а) щит В-4, б) щит В-4 (зеркальный); построены по результатам контактного метода измерений

### Метод поэтапного сканирования

На заключительном этапе модернизации зеркальной системы КР РТ-32, после юстировки взаимного положения новых щитов КР (Serzhanov et al., 2022), были проведены контрольные измерения на высокоточном геодезическом оборудовании (тахеометр TDRA 6000 Leica) методом поэтапного сканирования.

Особенность данного метода заключается в том, что для проведения измерений не требуется организации каких-либо подготовительных работ. Обозначается область на объекте, которую необходимо замерить, и запускается непосредственно сам процесс сканирования. Единственное, данные работы необходимо проводить в ночное время суток в сухую безветренную погоду, чтобы минимизировать влияние атмосферы на измерительное оборудование и объект измерения.

На рис. 2 представлены картограммы отклонений отражающей поверхности КР РТ-32 от проектной формы.

В табл. 1 приведены результаты контрольных измерений геометрии отражающей поверхности КР РТ-32.

К положительным особенностям данного метода измерения поверхности можно отнести следующие:

1. Высокая производительность. Длительность процесса сканирования поверхности КР, результаты которого представлены на рис. 2, не превысила 15 мин для каждого РТ-32.

2. Нет необходимости в проведении подготовительных работ перед началом наблюдений.

Отрицательной особенностью является: невысокая точность получаемого результата. На данный момент погрешность измерения положения точки в пространстве на расстоянии до 15 м в пределах 0.50–0.70 мм.

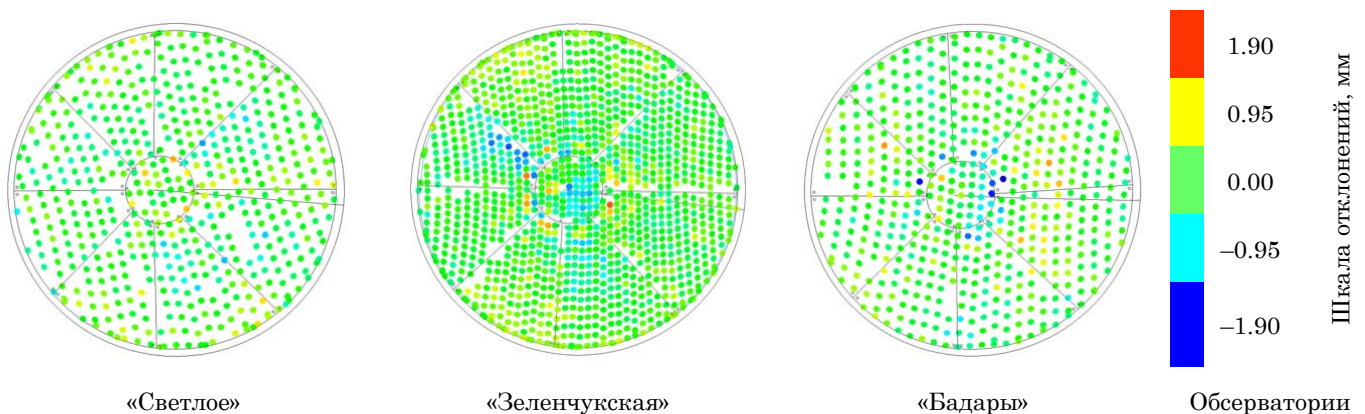


Рис. 2. Картограммы отклонений отражающей поверхности КР РТ-32 от проектной формы; построены по результатам метода поэтапного сканирования



Таблица 1

Результаты контрольных измерений геометрии отражающей поверхности КР РТ-32, полученные по методу поэтапного сканирования

Обсерватория	СКО отражающей поверхности КР, мм	Минимальное отклонение, мм	Максимальное отклонение, мм
«Светлое»	+0.42	-1.21	+1.30
«Зеленчукская»	+0.44	-1.59	+1.59
«Бадарь»	+0.42	-2.18	+1.21

### Фотограмметрический метод

После проведения контрольных измерений геометрии отражающей поверхности КР РТ-32 в течение года были произведены повторные измерения с применением фотограмметрического метода исследования (средством измерения являлась координатно-измерительная система AICON DPA INDUSTRIAL).

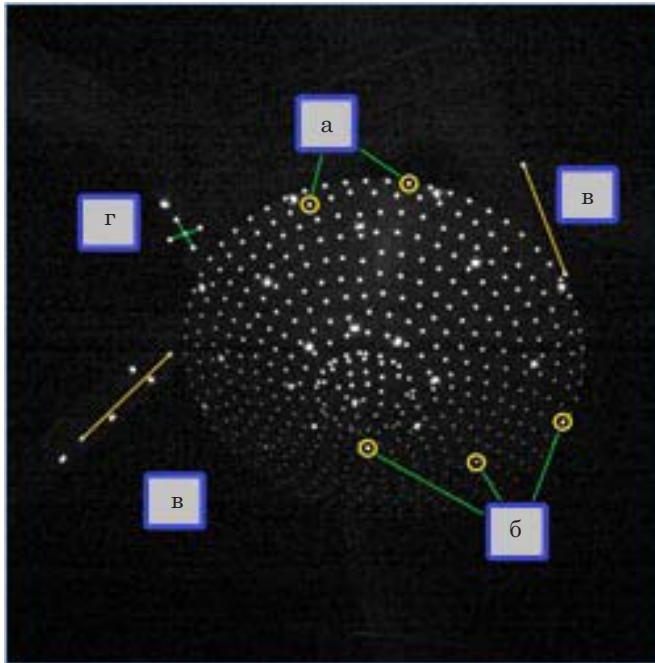


Рис. 3. Положение элементов фотограмметрического оборудования на конструкции КР РТ-32: а — измерительные марки; б — кодовые метки; в — масштабные жезлы; г — координатный «крест»

Особенность данного метода состоит в том, что координаты измерительных точек, характеризующие геометрию рабочей поверхности КР РТ-32, получаются в процессе фотограмметрической обработки фотоснимков. Измерительные марки, определяющие в результате обработки положение данных измерительных точек в пространстве, устанавливаются на искомой поверхности КР РТ-32 с заданным шагом. В связи с тем что фотоаппарат, который является средством сбора данных, в процессе работы не может уместить в одном кадре все измерительные марки, на искомой поверхности КР устанавливаются кодовые метки. Данные метки являются связующими элементами для объединения всего фотографического материала в рамках единой системы. Для определения взаимного положения измерительных марок в пространстве относительно заданной системы координат, на КР РТ-32 размещаются масштабные жезлы и координатный «крест», линейные параметры которых известны. Измерения, так же как при методе поэтапного сканирования, проводятся в ночное время суток в сухую безветренную погоду.

На рис. 3 показан фотоснимок, полученный в ходе проведения ночных измерений КР РТ-32, на котором обозначены положение измерительных марок, кодовых меток, масштабных жезлов и координатного «креста» на конструкции КР РТ-32.

В табл. 2 приведены результаты контрольных измерений геометрии отражающей поверхности КР РТ-32.

На рис. 4 представлены картограммы отклонений отражающей поверхности КР РТ-32 от проектной формы.

Таблица 2

Результаты контрольных измерений геометрии отражающей поверхности КР РТ-32, полученные фотограмметрическим методом

Обсерватория	СКО отражающей поверхности КР, мм	Минимальное отклонение, мм	Максимальное отклонение, мм
«Светлое»	+0.34	-0.92	+1.00
«Зеленчукская»	+0.38	-0.91	+1.64
«Бадарь»	+0.31	-1.10	+0.81

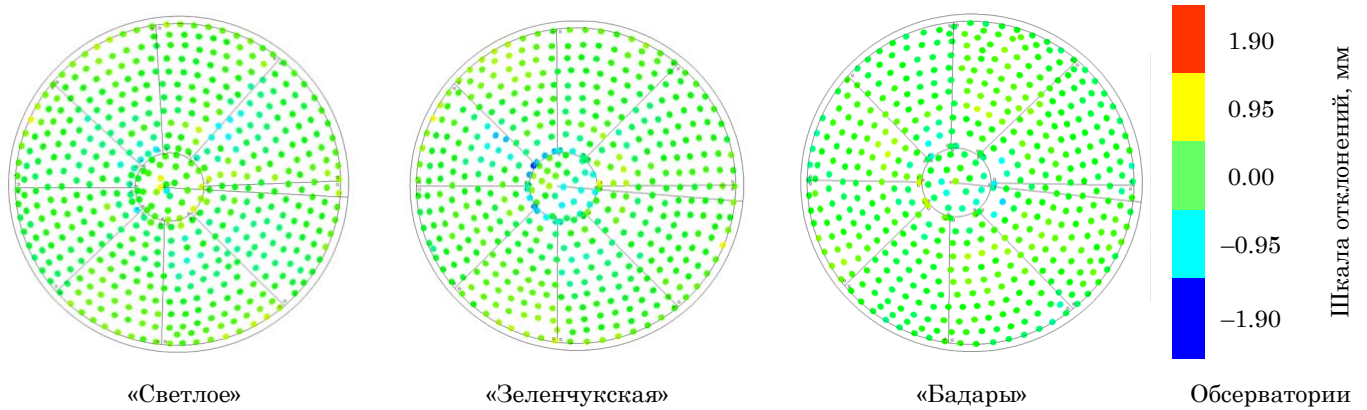


Рис. 4. Картограммы отклонений отражающей поверхности КР РТ-32 от проектной формы; построены по результатам фотограмметрического метода измерений

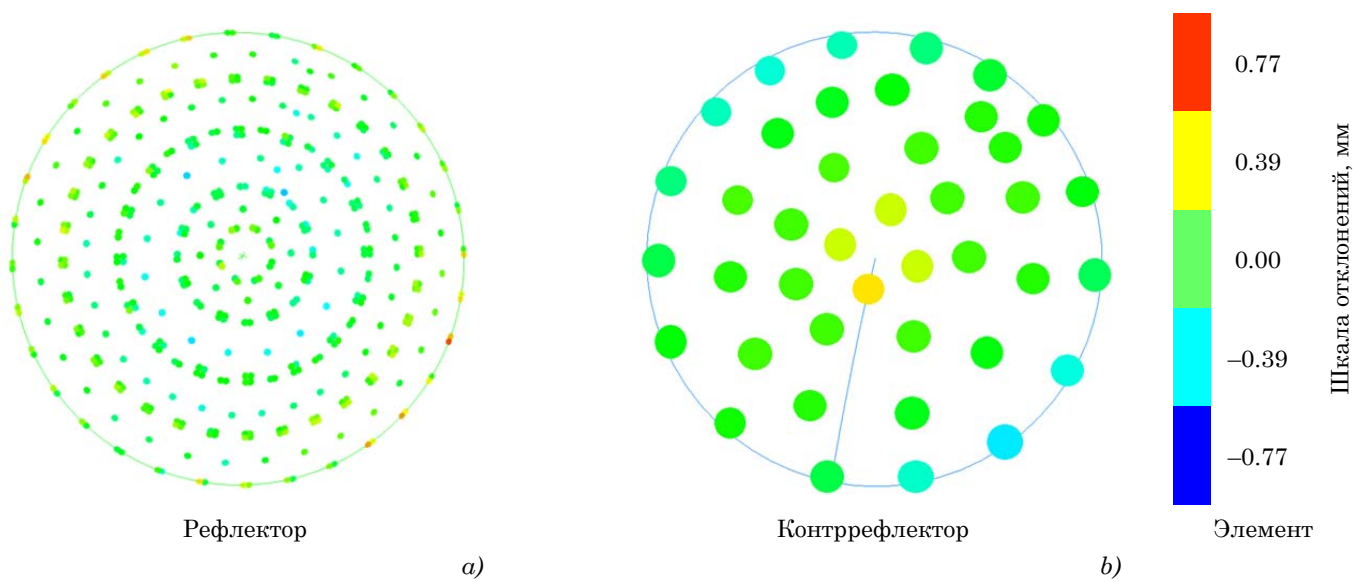


Рис. 5. Картограммы отклонений отражающей поверхности а) рефлектора и б) контррефлектора РТ-13 обсерватории «Светлое» от проектной формы; построены по результатам фотограмметрического метода измерений

В 2022 г. фотограмметрический метод исследования был применен для оценки точности геометрии зеркальной системы РТ-13 обсерватории «Светлое».

На рис. 5 представлены картограммы отклонений отражающей поверхности зеркальной системы РТ-13 обсерватории «Светлое» от проектной формы.

В табл. 3 приведены результаты контрольных измерений геометрии зеркальной системы РТ-13 обсерватории «Светлое».

В сравнении с методом поэтапного сканирования фотограмметрический метод обладает следующим преимуществом: высокая точность получаемого результата. На данный момент погрешность измерения положения точки в пространстве на дальности до 15 м не превышает 0.04 мм (в сравнении с 0.50–0.70 мм для метода поэтапного сканирования).

Таблица 3

Результаты контрольных измерений геометрии зеркальной системы РТ-13 обсерватории «Светлое», полученные фотограмметрическим методом

Элемент РТ-13	СКО отражающей поверхности КР, мм	Минимальное отклонение, мм	Максимальное отклонение, мм
Рефлектор	+0.19	-0.67	+0.47
Контррефлектор	+0.18	-0.42	+0.42

Однако фотограмметрический метод уступает методу поэтапного сканирования по следующим параметрам:

1. Высокая трудоемкость подготовительных работ. На измеряемом объекте до начала измерений необходимо установить различное оборудование: измерительные и кодовые марки, масштабные жезлы и координатный «крест».

2. Наличие у наблюдателя допуска к проведению работ на высоте. Данное обстоятельство связано с тем, что процесс фотографирования объекта должен производиться с разных углов и на разной высоте. По этой причине наблюдатель будет вынужден размещаться на различных средствах подмащивания: вышки передвижные, люльки подвесные и т. д., либо применение беспилотного летательного аппарата в качестве платформы для измерительного оборудования.

3. Ограниченное количество измеряемых точек. Число данных точек напрямую будет зависеть от количества размещенных на объекте измерительных марок.

### Заключение

По совокупности представленных данных можно сделать следующие выводы: на данный момент наиболее подходящим методом геодезического контроля зеркальных систем радиотелеско-

пов РТ-32 и РТ-13 является фотограмметрический метод. Данное обстоятельство в большей степени связано с высокой точностью получаемого результата в условиях работы на открытом воздухе. При этом стоит отметить, что в случае повышения точности безотражательных лазерных систем метод поэтапного сканирования станет наиболее приемлемым для выполнения данных видов работ.

### Литература

*Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Кайдановский М. Н. и др.* Радиointерферометрическая сеть «Квазар-КВО» — базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 13. С. 104–138.

*Finkelstein A., Ipatov A., Smolentsev S.* The Network «Quasar»: 2008–2011 // The 5th IVS General Meeting Proc., 2008. P. 39–46.

*Gayazov I., Skurikhina E.* Local ties between co-located space geodetic instruments at QUASAR network observatories // The 5th IVS General Meeting Proc. 2008. P. 82–86.

*Serzhanov S., Shamov A., Olifirov V.* Modernization of subreflector surface of radio telescopes RT-32. // The 12th IVS General Meeting Proc. 2022. P. 63–66. URL: <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2022/index.html> (дата обращения: 01.07.2024).