

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.272.22

**НОВЫЙ РАДИОТЕЛЕСКОП ПЕРЕДВИЖНОЙ РСДБ-СТАНЦИИ
КОМПЛЕКСА “КВАЗАР-КВО”**

©2026 г. М. Б. Зотов*, Д. В. Иванов, Е. Ю. Хвостов**

*Институт прикладной астрономии Российской академии наук
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10*

**e-mail:zmb@iaaras.ru*

***e-mail:dvi@iaaras.ru*

Поступила в редакцию 01.12.2025 г.

После доработки 18.12.2025 г.

Принята к публикации 12.01. 2026 г.

Сформулированы основные требования к новому радиотелескопу передвижной станции для радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Представлено несколько вариантов реализации антенной системы радиотелескопа. Рассмотрены основные принципы работы и особенности конструкций двухдиапазонной и широкополосной приемных систем для передвижной РСДБ-станции. Приведены расчетные характеристики приемной системы и нового радиотелескопа передвижной РСДБ-станции.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) обеспечивает максимально доступное угловое разрешение, но для построения изображения радиоисточников, повышения эффективности наблюдений и решения астрометрических задач необходимы наблюдения на базах различных длин и взаимного расположения. Эта задача может быть решена применением передвижных РСДБ-станций (ПС-РСДБ).

Применение ПС-РСДБ позволит дополнительно расширить возможности существующей РСДБ-сети в решении задач астрофизики и космической геодезии. Кроме того, в настоящее время актуальной проблемой совершенствования наземной поддержки отечественной навигационной системы ГЛОНАСС является уточнение опорной системы геоцентрических координат, опирающейся на пункты космической геодезической сети. Одним из наиболее эффективных способов решения этой задачи является определение координат

пунктов этой сети относительно пунктов РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” (являющихся опорными пунктами международной системы отсчета ITRF) с помощью передвижных РСДБ-станций.

В первую очередь, передвижная РСДБ-станция предназначена для совместной работы со стационарными РСДБ-радиотелескопами радиоинтерферометрического комплекса “Квазар-КВО”, в состав которого входят радиотелескопы РТ-13 и РТ-32 [1]. При разработке нового радиотелескопа для ПС-РСДБ целесообразно ориентироваться на скоростные характеристики имеющихся радиотелескопов.

Анализ, проведенный ранее [2], а также накопленный опыт показывают, что радиотелескоп ПС-РСДБ должен оснащаться антенной системой с основным зеркалом диаметром около 4 м. С одной стороны, мы ограничены чувствительностью радиотелескопа, а с другой, радиотелескоп должен быть транспортабельным. Кроме того, радиотелескоп должен включать в себя антенно-фидерное устройство, способное обеспечить значение SEFD(эквивалентная плотность потока системы) радиотелескопа ПС-РСДБ менее 20000 Ян.

2. ПРОТОТИП ПЕРЕДВИЖНОЙ РСДБ-СТАНЦИИ

В 2018 году в ИПА РАН был разработан прототип передвижной РСДБ-станции на базе антенной системы наземной спутниковой станции (НСС) TESLA с диаметром основного зеркала 4.3 м. Конструктивные особенности данной антенной системы позволяли ей работать только в X-диапазоне частот. Кроме того, существенным ограничением для ее использования являлась малая скорость и, как следствие, длительное время переброса от одного источника к другому ($3'/c$), а также ограниченный диапазон перемещения по азимуту ($\pm 40^\circ$).

Несмотря на перечисленные ограничения, на разработанном прототипе радиотелескопа с четырехметровым зеркалом были проведены успешные наблюдения, в том числе в режиме РСДБ. Характеристики прототипа, полученные при испытаниях в обсерватории “Светлое”, представлены в табл. 1. Структура приемной системы прототипа и ее характеристики подробно изложены в работе [3].

Таблица 1. Результаты радиометрических измерений прототипа радиотелескопа РТ-4

Характеристика	RCP	LCP
T_k	5.5 К	5.1 К
$T_{\text{сис}}$	59 К	57 К
SEFD	17000 Ян	16000 Ян
КИП	0.65	0.65

Характеристика	RCP	LCP
Ширина ДН по уровню -3 дБ	УМ-0.56° АЗ-0.58°	УМ-0.56° АЗ-0.58°

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения: T_k – значение амплитудной калибровки, $T_{\text{сис}}$ – шумовая температура системы, SEFD – эквивалентная плотность потока системы, КИП – коэффициент использования поверхности, ДН – диаграмма направленности, RCP и LCP – правая и левая круговые поляризации, АЗ – азимут, УМ – угол места.

В рамках проведения первых РСДБ-наблюдений с участием радиотелескопа РТ-4 – прототипа ПС-РСДБ – были задействованы радиотелескопы РТ-13 и РТ-32 комплекса “Квазар-КВО” [1].

Одной из целей наблюдений было уточнение координат прототипа. Полученные по геодезическим измерениям и уточненные в результате совместного уравнивания по РСДБ-сеансам координаты (с формальными ошибками) приведены в табл.2. Следует учесть, что длительность проведенных РСДБ-наблюдений составляла единицы часов, а сам прототип имел ограниченный сектор вращения антенны и низкую скорость движения антенны. Это значительно ограничило список источников и сильно сократило количество наблюдаемых источников за сеанс. Таким образом, при выборе антенных систем следует избегать монтаровок с ограниченным сектором наведения. Стоит также отметить, что для учета вклада ионосферы на новом радиотелескопе следует принимать сигналы в двух разнесенных по частоте диапазонах, например в S-и X-диапазонах частот, при этом требования к шумовой температуре системы в S-диапазоне могут быть ниже.

Табл. 2. Координаты прототипа РТ-4, определенные по РСДБ-наблюдениям

Координата	Значение, м	Формальная ошибка, м
X	2730187.56	0.08
Y	1562518.72	0.03
Z	5529916.09	0.06

Полученные результаты позволили говорить об успешном применении передвижных РСДБ-станций и о возможности применения передвижных РСДБ-станций в ограниченных и труднодоступных регионах совместно с только одной фундаментальной станцией комплекса “Квазар-КВО”. Таким образом, мы выявили основные ограничения прототипа, связанные с характеристиками антенной и приемной систем. Далее будут рассмотрены возможности улучшения этих характеристик для нового радиотелескопа ПС-РСДБ.

3. АНТЕННАЯ СИСТЕМА НОВОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА ПС-РСДБ

С учетом изложенных выше рассуждений и описанных свойств при выборе антенной системы (АС) нового радиотелескопа ПС-РСДБ стоит обратить внимание на следующие характеристики:

- скорость привода радиотелескопа должна обеспечивать проведение непрерывных наблюдений с интенсивностью до 1000 перестановок в сутки;
- точность поверхности должна обеспечивать прием сигналов в диапазоне 2–18 ГГц, чтобы охватить наиболее распространенные на данный момент в мировой и отечественной практиках РСДБ-диапазоны частот;
- жесткость конструкции должна позволить разместить в фокусе радиотелескопа фокальный модуль с криогенным приемным блоком массой до 200 кг с выносом центра масс на расстояние не менее 700 мм от центра основания основного рефлектора;
- размер основного зеркала должен быть в пределах 4–6 м;
- пределы поворота по азимуту не менее $\pm 270^\circ$, по углу места не менее $0-90^\circ$ позволяют принимать участие во всех РСДБ-сеансах.

Полная разработка нового радиотелескопа с перечисленными характеристиками весьма дорогая и займет много времени. Поэтому мы рассмотрели несколько готовых проектов систем спутниковой связи, подходящих под требуемые геометрические характеристики. Основных недостатки готовых проектов – цена и ограниченные характеристики для радиоастрономических целей. В итоге оптимальным сочетанием является разработка новой антенной системы под заявленные требования при использовании готовых опорно-поворотных устройств.

Были рассмотрены два варианта геометрии антенной системы, наиболее подходящие под поставленные требования.

1. АС с параболическим главным зеркалом со смещением оси параболы относительно фокальной оси. Данная АС использует кольцевое облучение и конструктивно аналогична радиотелескопу РТ-13 РСДБ-комплекса “Квазар-КВО”. Данная АС моделировалась с главным зеркалом диаметром 4.8 м, диаметр контррефлектора, равный 750 мм, обеспечит возможность работы на частотах от 2 ГГц. Геометрия данной АС представлена на рис. 1. Основным преимуществом данной АС является кольцевое облучение, устраняющее затенение от надзеркальной конструкции и позволяющее разместить всю приемную систему в фокальной области без потери эффективной площади АС. Использование кольцевого облучения приводит к усложнению геометрии всей антенной системы и поддерживающей конструкции

контррефлектора. К тому же, такая АС является короткофокусной, а это накладывает значительные ограничения на размеры, форму и частотные характеристики облучателя.

Рис. 1. Геометрия антенной системы с кольцевым облучением для ПС-РСДБ

2. Классическая антенная система с параболическим главным зеркалом, построенная по схеме Кассегрена с гиперболическим вторичным зеркалом представлена на рис. 2. Данная АС имеет главное зеркало диаметром 4.23 м и вторичное зеркало диаметром 0.8 м. Размеры вторичного зеркала позволяют работать на частотах от 2 ГГц при угле облучения 90° . Главное преимущество данной АС – простота конструкции. В качестве главного зеркала данной АС предлагается главный рефлектор НСС TESLA. Конструкция рефлектора НСС TESLA была разработана с учетом возможности разборки для обеспечения транспортировки. В данном случае необходимо только доработать конструкцию АС для установки вторичного гиперболического зеркала и приемной системы. Единственный недостаток такой антенной системы – затенение от вторичного зеркала, но для данной АС затенение главного зеркала от опор и вторичного зеркала составит менее 4%.

Рис. 2. Геометрия антенной системы Кассегрена для ПС-РСДБ

Точность поверхности главного зеркала НСС TESLA позволяет работать на частотах до 18 ГГц, а размеры укладываются в заложенные технические характеристики. Ограничения по скорости и диапазонам углов наведения обходятся модернизацией опорно-поворотного устройства. Таким образом, вариант доработки существующих АС НСС выглядит предпочтительнее с учетом стоимости доработок, времени и получаемых характеристик. Мы можем перейти к рассмотрению приемной системы и системы облучения, опираясь на геометрию данной антенной системы.

4. ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА

При разработке приемной системы для нового радиотелескопа ПС-РСДБ в первую очередь нужно ориентироваться на совместную работу в радиоинтерферометрическом режиме со станциями РСДБ-комплекса “Квазар-КВО”. Соответственно, приемная система должна быть совместима по частотным диапазонам с приемными системами других радиотелескопов, работающих в РСДБ-сети [4–6].

Компактные размеры антенной системы ограничивают пространство для приемных систем. Необходимо разместить аппаратуру приемной системы в небольшом объеме фокальной области или максимально близко к ней. При этом чувствительность приемной системы должна обеспечивать возможность наблюдения эталонных радиоисточников в радиометрическом режиме для фокусировки и измерения параметров радиотелескопа ПС-

РСДБ. Применение криогенного охлаждения позволит значительно уменьшить шумовую температуру системы. Ширину полосы промежуточных частот для разрабатываемой приемной системы для обеспечения необходимой чувствительности следует выбрать не менее 1 ГГц. Кроме того, в приемной системе должны быть предусмотрены возможности амплитудной и фазовой калибровок приемного тракта и обеспечение когерентности частотных преобразований сигналов. С целью уменьшения потерь и увеличения чувствительности приемной системы в фокальном пространстве радиотелескопа в первую очередь необходимо разместить фокальный модуль с облучателем и основными усилительными и преобразовательными блоками.

На данный момент в ходе развития технологий в мировом РСДБ-сообществе сформировалось два основных вида приемных систем, обеспечивающих многодиапазонный или широкополосный прием сигналов. Рассмотрим возможность реализации таких приемных систем для передвижной РСДБ-станции.

Принцип работы широкополосной приемной системы был подробно описан в работе [7]. Выбор рабочего частотного диапазона широкополосного облучателя для ПС-РСДБ – это компромисс требуемой рабочей полосы и возможности его размещения на компактном радиотелескопе.

Для компактного радиотелескопа был рассмотрен вариант четырехгребневого рупора [8], пересчитанный на работу в диапазоне 4–16 ГГц, что обеспечит совместимость с РТ-13 в режиме работы с широкополосной приемной системой [7]. Его геометрические размеры оптимальны для компактного радиотелескопа. Данный облучатель работает на двух линейных поляризациях. Вместе с тем, для работы с радиотелескопом РТ-32 комплекса “Квазар-КВО” в двухчастотном режиме требуется реализовать частотный диапазон не хуже, чем 2–14 ГГц. Сделать столь широкополосный облучатель под предложенные антенные системы в заданных геометрических размерах практически невозможно.

Основным преимуществом широкополосной приемной системы является ее простота, вытекающая из небольшого количества элементов, входящих в нее: всего один широкополосный криогенный приемный фокальный блок с двумя охлаждаемыми маломощными усилителями, разделение по поддиапазнам может быть реализовано в блоке делителей по аналогии с широкополосной приемной системой [7]. Из простоты такой системы следует и дешевизна производства. Также широкий частотный диапазон даст большую чувствительность системы при наблюдении в режиме частотного синтеза и расширит диапазон решаемых задач.

При этом широкополосная приемная система обладает рядом недостатков. Первый недостаток – это отсутствие S-диапазона частот, применяемого на других радиотелескопах комплекса “Квазар-КВО” для учета ионосферы. А расширение рабочей полосы до 2 ГГц существенно увеличит раскрыв облучателя, что ухудшает согласование с АС и увеличивает габариты. Сверхширокополосный облучатель работает только с линейными поляризациями. Применение охлаждаемого гибридного моста позволит решить эту проблему, однако это приведет к усложнению конструкции и незначительному увеличению шумов. Следующий недостаток этой системы – плохое согласование. Эта особенность следует из невозможности использовать согласующие ферритовые вентили в широкой полосе, она не может быть устранена. Кроме того, данная система будет более подвержена воздействию помех, а возникновение интермодуляционных паразитных составляющих может перегрузить всю приемную систему.

Другая ветвь развития приемных РСДБ-систем – многодиапазонная приемная система. Ее главной особенностью является возможность одновременного приема шумовых сигналов космического происхождения в разнесенных диапазонах частот, к примеру S (2.2–2.6 ГГц) и X (8.0–9.0 ГГц), в обеих круговых поляризациях с помощью охлаждаемого до криогенных температур совмещенного облучателя. Наблюдения в S- и X-диапазонах частот позволяют использовать существующую международную опорную систему небесных координат ICRF и обеспечивают совместимость с существующими РСДБ-сетями.

На рис. 3 представлены схема S/X-приемной системы и предполагаемое размещение блоков на антенной системе. В криогенном приемном блоке (КПБ) размещается совмещенный двухдиапазонный облучатель. В качестве прототипа такого облучателя можно рассматривать облучатель, описанный в работе [9]. Здесь же обеспечиваются преобразование поляризации сигнала, первичное усиление сигнала и ввод сигнала калибровки. Для обеспечения охлаждения основных элементов КПБ до водородного уровня температуры (15 К) используется криогенно-вакуумная система.

Рис. 3. Функциональная схема S/X-приемной системы ПС-РСДБ...

Сигналы калибровок формируются в блоке генераторов шума (БГШ) и генераторе пикосекундных импульсов (ГПИ). Источником сигнала амплитудной калибровки в БГШ служит малогабаритный широкополосный полупроводниковый генератор шума на лавинно-пролетном диоде (ЛПД). С выходов КПБ сигналы поступают в двухдиапазонные блоки преобразования частоты (БПЧ), по одному для каждой поляризации. В них высокочастотный сигнал усиливается и переносится в диапазон промежуточных частот. Блоки преобразования частоты включают в себя микросборку широкополосного преобразовательного канала (ШПК),

микросборку гетеродина, систему термостабилизации и платы вторичных источников питания. Сигналы с выходов соответствующих БПЧ по радиочастотным кабелям поступают на соответствующие входы широкополосной системы преобразования и регистрации сигналов (ШСПС) [10].

Основным преимуществом предложенной S/X-приемной системы является надежная и относительно недорогая элементная база, зарекомендовавшая себя на других радиотелескопах комплекса “Квазар-КВО”. Конструкция двухдиапазонного облучателя позволяет получить лучшую развязку между портами (уровень кросс-поляризации). Использование относительно узких диапазонов позволит применять СВЧ-вентили в криогенном блоке – это улучшит согласование и, следовательно, позволит уменьшить собственные шумы приемной системы. Другим немаловажным преимуществом S/X-приемной системы будет прием круговых поляризацій. Однако такая приемная система весьма сложна в конструировании, разработке и эксплуатации. Облучатель представляет собой гофрированный конический рупор, весьма массивный и сложный в изготовлении. Наличие двух каналов в двух диапазонах частот повышает надежность, но значительно увеличивает массу приемной системы, а реализация входных каскадов обоих диапазонов в едином блоке делает ее весьма сложной точки зрения изготовления, обеспечения охлаждения, а также дальнейшего обслуживания. Два диапазона частот потребуют 4 охлаждаемых малошумящих усилителя (по одному для сигнала каждой поляризации) – следовательно, возрастет стоимость.

Если в основе нового радиотелескопа передвижной РСДБ-станции использовать главное зеркало НСС TESLA, то S/X-приемная система выглядит предпочтительнее для реализации. С учетом криогенного охлаждения облучателя и входных усилительных каскадов можно добиться шумовой температуры приемной системы менее 30 К, в таком случае SEFD нового радиотелескопа будет менее 15000 Ян при коэффициенте использования поверхности (КИП), равном 0.6, в обоих частотных диапазонах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена концепция нового радиотелескопа передвижной РСДБ-станции комплекса “Квазар-КВО”. На основе характеристик первого прототипа ПС-РСДБ сформированы основные требования для антенной системы нового радиотелескопа. Рассмотрены две антенные системы и варианты их облучения.

Представлены два варианта реализации приемной системы нового радиотелескопа: широкополосный и двухдиапазонный. Каждый из рассмотренных вариантов обладает рядом

преимуществ. Шумовая температура приемной системы при криогенном охлаждении входных каскадов по оценкам составляет менее 30 К.

Предложенные АС диаметром 4–5 м, оснащенные описанными приемными системами, позволят добиться значения SEFD для нового радиотелескопа ПС-РСДБ менее 15000 Ян.

Таким образом, для создания ПС-РСДБ в будущем предстоит решить такие задачи, как разработка и создание полноповоротного радиотелескопа с диаметром зеркала не менее 4 м, построенного по схеме Кассегрена с контррефлектором 0.8 м, а также разработка двухдиапазонной приемной системы с облучателем, оптимизированным для работы с предложенной антенной системой. А для увеличения чувствительности предлагается реализовать схему охлаждения данного облучателя с входными усилительными каскадами.

Координатно-временное и навигационное обеспечение играет огромное значение в народном хозяйстве, создавая условия и предпосылки для инновационного развития практически всех отраслей промышленности, транспорта, разведки полезных ископаемых, мониторинга плотин, зданий и крупных сооружений, предотвращения естественных и техногенных катастроф.

Передвижные РСДБ-станции могут с успехом применяться в фундаментальных научных исследованиях сейсмоактивных районов Камчатки и Дальнего Востока, а также для оперативного контроля тектонических движений и обнаружения предвестников землетрясений и цунами. Картографирование внегалактических радиоисточников на базе динамически формируемых РСДБ-сетей станций может стать одним из перспективных методов исследования нашей Вселенной.

Создание ПС-РСДБ с новым радиотелескопом и включение ее в состав комплекса “Квazar-КВО” позволят:

- определять координаты в Международной земной системе ITRF с точностью не хуже 10 мм за сутки;
- улучшить точность координат и временную привязку станции наземной поддержки отечественной навигационной системы ГЛОНАСС исключительно национальными средствами без использования конкурирующих навигационных систем (GPS, Galileo и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A. et al. // Geod. Geodyn. 2019. V.10. № 2. P.150. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.09.008>*

2. *Зотов М.Б.* Приемная система для компактной антенны передвижной РСДБ-станции. Дис. ... канд. техн. наук. Институт прикладной астрономии Российской академии наук. Санкт-Петербург, 2021. 20 с.
3. *Зотов М.Б., Иванов Д.В., Быков В.Ю.* // ПТЭ. 2020. № 6. С. 76.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220060178>
[*Zotov M.B., Ivanov D.V., Bikov V.Yu. et al.* // ИЕТ. 2020. V. 63. № 6. P. 864.]
4. *Иванов Д. В., Ипатов А. В., Ипатова И. А. и др.* // Труды ИПА РАН. 1997. № 2. С. 242.
5. *Ипатов А.В.* // УФН. 2013. Т. 183. № 7. С. 769. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0183.201307i.0769>
[*Ipatov A.V.* // Phys.-Usp. 2013. V. 56. № 7. P. 729.]
6. *Ipatov A., Ipatova I., Mardyshkin V. et al.* Tri-band system for the Russian interferometer.VGOS: IVS 2014 General Meeting Proceedings. Science Press, Beijing, China, 2014. P. 118.
7. *Векшин Ю.В., Зотов М.Б., Лавров А.С., Поздняков И.А., Хвостов Е.Ю., Чернов В.К.* // ПТЭ. 2023. № 3. С. 98. <https://doi.org/10.31857/S0032816223020283>
8. *Akgiray A.* New Technologies Driving Decade-Bandwidth Radio Astronomy: Quad-Ridged Flared Horn & Compound-Semiconductor LNAs. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2013.
9. *Иванов Д.В., Мардышкин В.В., Лавров А.С., Евстигнеев А.А.* // Труды ИПА РАН. 2013. № 27. С. 197. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21511723>
10. *Носов Е.В., Федотов Л.В.* // Труды ИПА РАН. 2018. № 45. С. 72.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=36479842>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Геометрия антенной системы с кольцевым облучением для ПС-РСДБ.

Рис. 2. Геометрия антенной системы Кассегрена для ПС-РСДБ.

Рис. 3. Функциональная схема S/X-приемной системы ПС-РСДБ: КПБ – криогенный приемный блок, БГШ – блок генераторов шума, БПЧ – блок преобразования частоты, ШСПС – широкополосная система преобразования сигналов, СЧВС – система частотно-временной синхронизации, ШПК – широкополосный преобразовательный канал, ЛПД – лавинно-пролетный диод, ГПИ – генератор пикосекундных импульсов; RCP и LCP – правая и левая круговые поляризации.

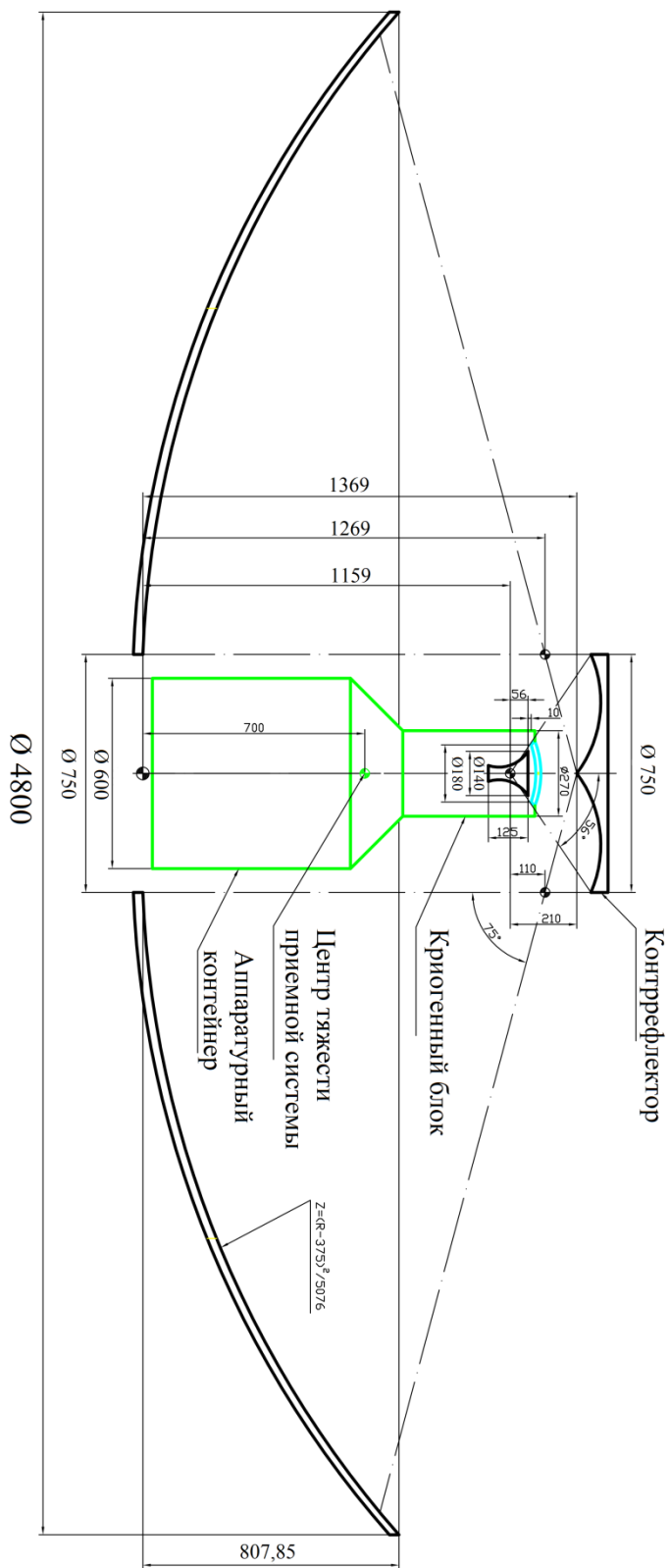


Рис. 1.

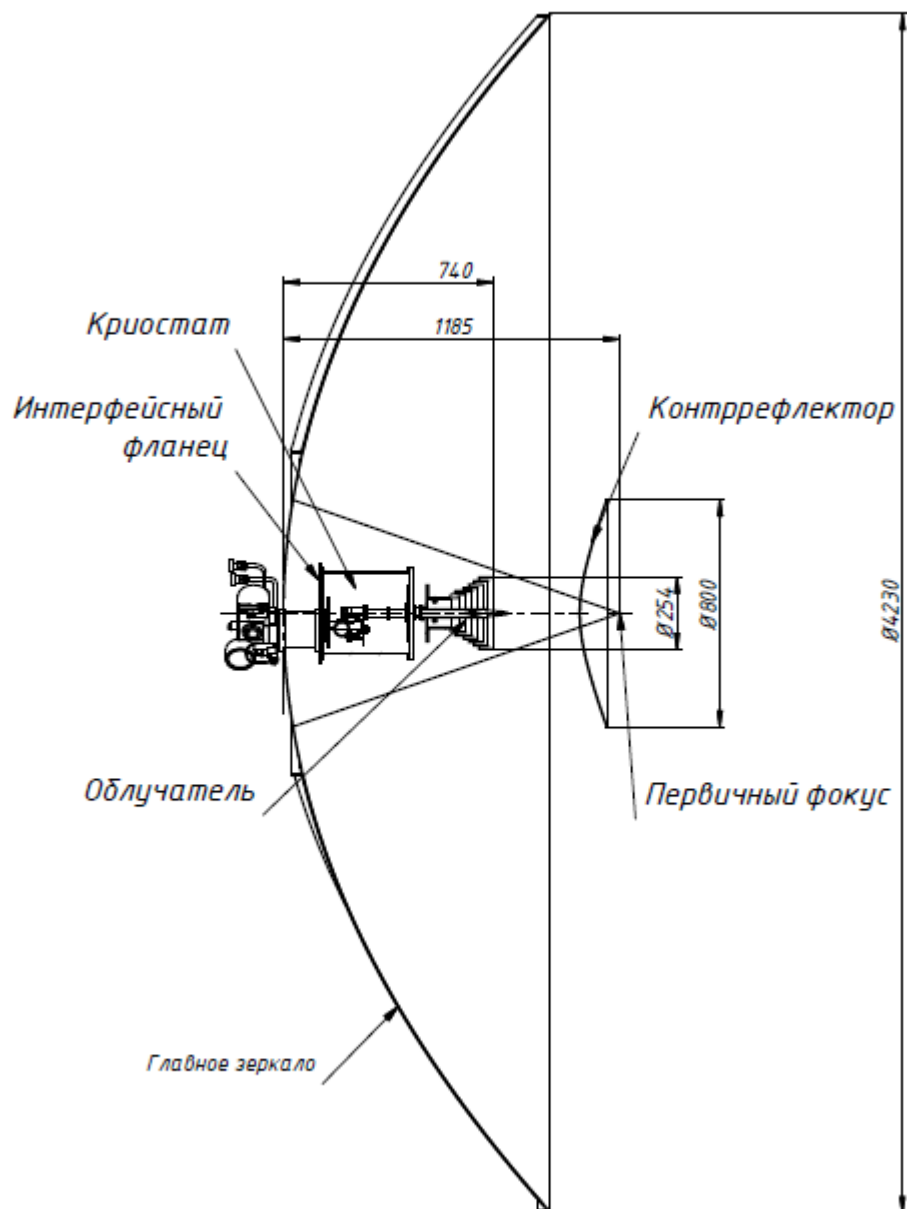


Рис. 2.

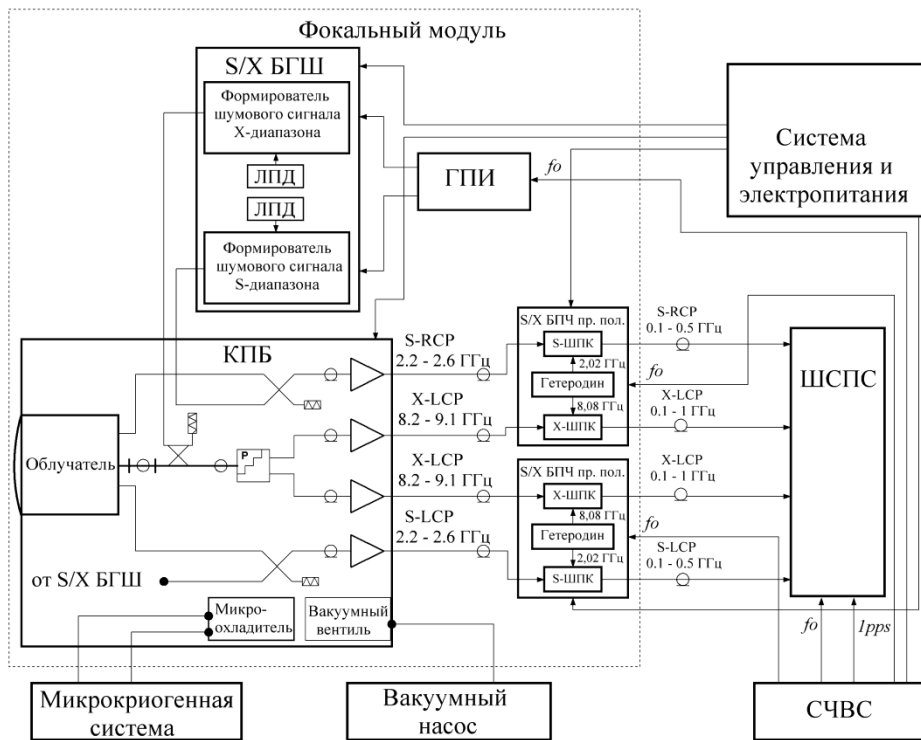


Рис. 3