

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.10>

УДК: 52-17:52-774

КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МНОГОДИАПАЗОННОГО РСДБ-ИНСТРУМЕНТА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

С.Ю. Турыгин¹, И.В. Белькович², Д.А. Сорокин²

¹АО «Конструкторское бюро радиотехники и электроники»,
141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. имени академика Б.А. Введенского, д. 4

²Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
119991, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Статья поступила в редакцию 14 мая 2026 г.

Аннотация. В статье представлена квазиоптическая система бортового криогенного многодиапазонного приемного устройства, работающего в диапазонах 7 мм, 3 мм, 1,3 мм и 0,8 мм, которая может использоваться в наземно-космическом радиоинтерферометре со сверхдлинной базой. Квазиоптическая система инструмента включает в себя цепочку отражающих зеркал, частотно-селективные зеркала и приемные рупоры. Синтез зеркальной системы проведен с использованием критерия Драгоне для компенсации искажений на несимметричных внеосевых зеркалах. Для анализа и расчетов помимо классического квазиоптического подхода используется численное трехмерное моделирование с расчетом методами интегральных уравнений и физической оптики. Для синтеза рупорных облучателей используется метод согласования мод. Финальный расчет квазиоптики с телескопом с оценкой коэффициента использования поверхности проведен методом физической оптики. Полученные расчетные величины КИП антенны составляют от 0,73 до 0,79, уровень кроссполяризационной составляющей не превосходит -28 дБ.

Ключевые слова: радиоастрономия, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, квазиоптика, рупоры, миллиметровые волны.

Автор для переписки: Белькович Игорь Викторович, belkovich@asc.rssi.ru

Введение

Развитие современной астрофизики неразрывно связано с прогрессом методов наблюдения, позволяющих достигать всё более высокого углового разрешения. Основной метод для получения изображений с разрешением порядка десятков микросекунд дуги – радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ). Ключевым направлением развития РСДБ в последнее десятилетие стало освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, где появляется принципиальная возможность исследования компактных астрофизических объектов, включая окрестности сверхмассивных чёрных дыр. Одними из основных проектов в развитии РСДБ-систем для задач астрофизики стали наземно-космический проект «Радиоастрон» (Спектр-Р), успешно функционировавший в 2011-2019 гг., а также действующий глобальный наземный Телескоп горизонта событий (Event Horizon Telescope, ЕНТ) [1-3]. Существуют перспективные проекты по развитию подобных систем – ngЕНТ, Black Hole Explorer (BHEx) и «Миллиметрон» (Спектр-М) – российский проект, в рамках которого предполагается реализовать наземно-космический интерферометр миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с недостижимыми ранее параметрами [4, 5].

Наземно-космический радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (Space-Earth Very Long Baseline Interferometry – S-E VLBI) проекта «Радиоастрон» с 2011 по 2019 г. продемонстрировал принципиальную возможность получения интерференционных откликов на базах, многократно превышающих диаметр Земли, получив важные научные результаты. В свою очередь, Телескоп горизонта событий, представляющий собой глобальную наземную РСДБ-сеть миллиметрового диапазона, в 2019 г. впервые получил изображение тени сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики M87 на длине

волны 1,3 мм (230 ГГц). В 2025 г. ЕНТ сообщили о первых успешных наблюдениях на частоте 345 ГГц (длина волны 0,87 мм), что позволило повысить угловое разрешение до 14-15 микросекунд дуги – почти на 50 % по сравнению с прежним уровнем. Однако дальнейшее повышение частоты и разрешения ограничено атмосферными эффектами – рост фазовых флуктуаций и поглощения существенно снижает чувствительность и эффективность наблюдений на частотах выше ~300-400 ГГц. Принципиально важным технологическим достижением стала демонстрация метода частотно-фазового переноса (Frequency Phase Transfer, FPT), который даёт возможность компенсировать фазовые искажения, вносимые земной атмосферой, путём переноса фазы корреляционного отклика с более низкой частоты на более высокую. Эта техника обеспечивает когерентное накопление сигнала на предельных частотах и одновременно открывает путь к многочастотным РСДБ-наблюдениям в реальном времени [6-8].

Проект «Миллиметрон» наследует и развивает технологическую базу «Радиоастрона» применительно к миллиметровому и субмиллиметровому диапазонам. Обсерватория будет оснащена охлаждаемым 10-метровым зеркалом (рис. 1) и размещена в точке Лагранжа L2 системы Солнце-Земля. В режиме наземно-космического интерферометра это позволит достичь углового разрешения, существенно превышающего возможности ЕНТ. Важной особенностью проекта является частотная совместимость с глобальной интерферометрической сетью телескопов, что требует создания многодиапазонных гетеродинных приёмников, охватывающих диапазоны от 7 мм до 0,8 мм, с разделением сигнала на уровне входной квазиоптики для одновременного наблюдения одной точки на небе с реализацией метода переноса фазы [9, 10].

Целью настоящей работы является разработка и анализ оптической схемы многодиапазонного РСДБ-инструмента для системы «Земля-космос», работающей в диапазоне длин волн от 7 мм до 0,8 мм. Такая система может использоваться в том числе в составе миссии «Миллиметрон» как бортовой сегмент приемной системы. РСДБ-инструмент состоит из четырех гетеродинных

приёмников, работающих в окнах прозрачности атмосферы: диапазон 1 (33-50 ГГц, длина волны 7 мм), диапазон 2 (84-116 ГГц, 3 мм), диапазон 3 (211-275 ГГц, 1,3 мм) и диапазон 4 (300-373 ГГц, 0,8 мм). Два низкочастотных канала (диапазоны 1 и 2) строятся на базе криогенных HEMT-усилителей, в то время как два высокочастотных канала (диапазоны 3 и 4) используют смесители на основе технологии сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (SIS), обеспечивающие чувствительность, близкую к квантовому пределу [11-13]. Все четыре приёмника размещаются внутри общего криостата с номинальными температурными ступенями 20 К и 4 К, что гарантирует низкий уровень шумов, необходимый для интерферометрии с сверхвысоким разрешением.

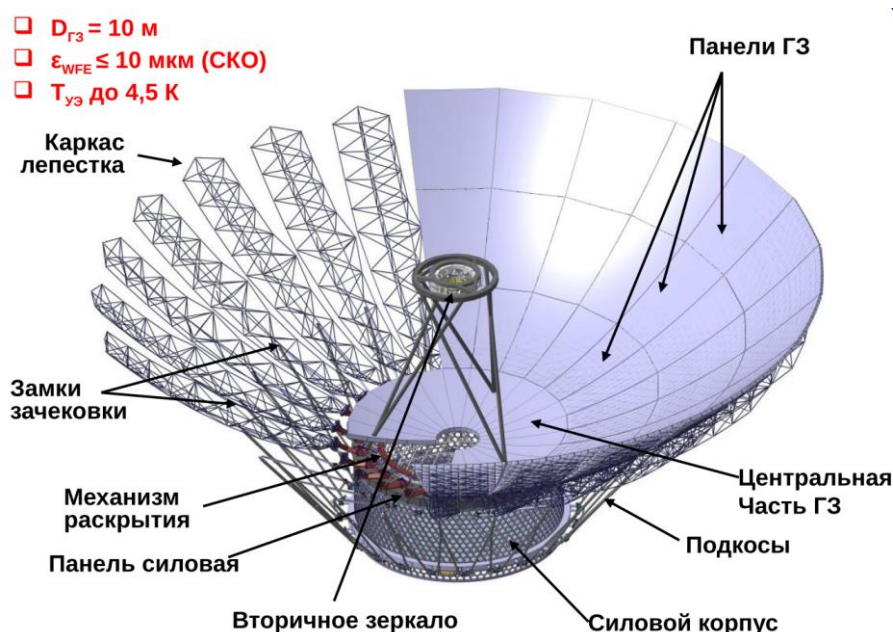


Рис. 1. Схематичное изображение телескопа с криогенным контейнером обсерватории «Миллиметрон».

В статье последовательно описан процесс квазиоптического проектирования и электромагнитного моделирования. Синтез системы осуществляется в геометрооптическом приближении с использованием критерия Драгоне с анализом распространения гауссовых пучков. Численное трехмерное электродинамическое моделирование проведено методами интегральных уравнений и физической оптики. Особое внимание уделено расчету всей системы включая рупоры, оптическую систему и зеркальную систему телескопа с оценкой суммарного КИП системы.

1. Проектирование оптической системы

Квазиоптика инструмента (в целях упрощения терминологии, далее будет использоваться широко распространенный в западной литературе термин «оптика» или «оптическая система») играет важную роль в системе, определяющую эффективность инструмента и всего телескопа в целом. Основные функции оптической системы:

- передача и согласование электромагнитного (ЭМ) поля, принимаемого телескопом (отраженного от контррефлектора), с ЭМ полем рупоров приемников (детекторов) и, следовательно, размещение приемников внутри криогенного контейнера;

- разделение частот с пространственным совмещением лучей суммарной диаграммы направленности (ДН) телескопа для обеспечения одновременного многочастотного наблюдения во всех диапазонах;

- минимизация искажений – сохранение симметрии диаграммы направленности и низкого уровня кроссполяризации.

Требуемые значения коэффициента использования поверхности (или эффективности) телескопа с оптической системой должны составлять не менее 0,7. Кроме того, оптическая система должна укладываться в ограниченный объем криоконтейнера. Для ориентира взят объем криоконтейнера обсерватории «Миллиметрон» диаметром 2500 мм, из которого на инструмент выделяется примерно треть.

Исходя из вышеуказанных требований, а также руководствуясь критерием Драгоне [14] и соображениями размещения частотно-селективных зеркал (дихроичных фильтров или дихроиков) в перетяжках гауссовых пучков с углами падения поля, близкими к нормали, определена исходная компоновка инструмента. Она включает в себя одно плоское зеркало, перехватывающее ЭМ поле от контррефлектора, 6 эллиптических зеркал, 3 дихроика и 4 рупора соответствующих диапазонов (рис. 2).

Особенностью компоновки научной аппаратуры на борту является размещение инструментов и входной оптики вне фокальной оси телескопа.

Это связано с тем, что, как правило, одновременно работают несколько инструментов. В зеркальной системе обсерватории «Миллиметрон» центральная область на оси телескопа используется для бортовой системы адаптации и контроля двухзеркальной системы. В целях достижения суммарного СКО порядка 10 мкм для работы на частотах до 2,7 ТГц используются актюаторы (по 3 штуки на каждой панели главного зеркала) и гексапод контррефлектора с двухступенчатой системой пространственного измерения положения и профилей зеркал, а также осуществляющей юстировку зеркальной системы [15-16]. Данный факт необходимо учитывать при проектировании и расчетах.

Основные этапы проектирования представлены в таблице 1.

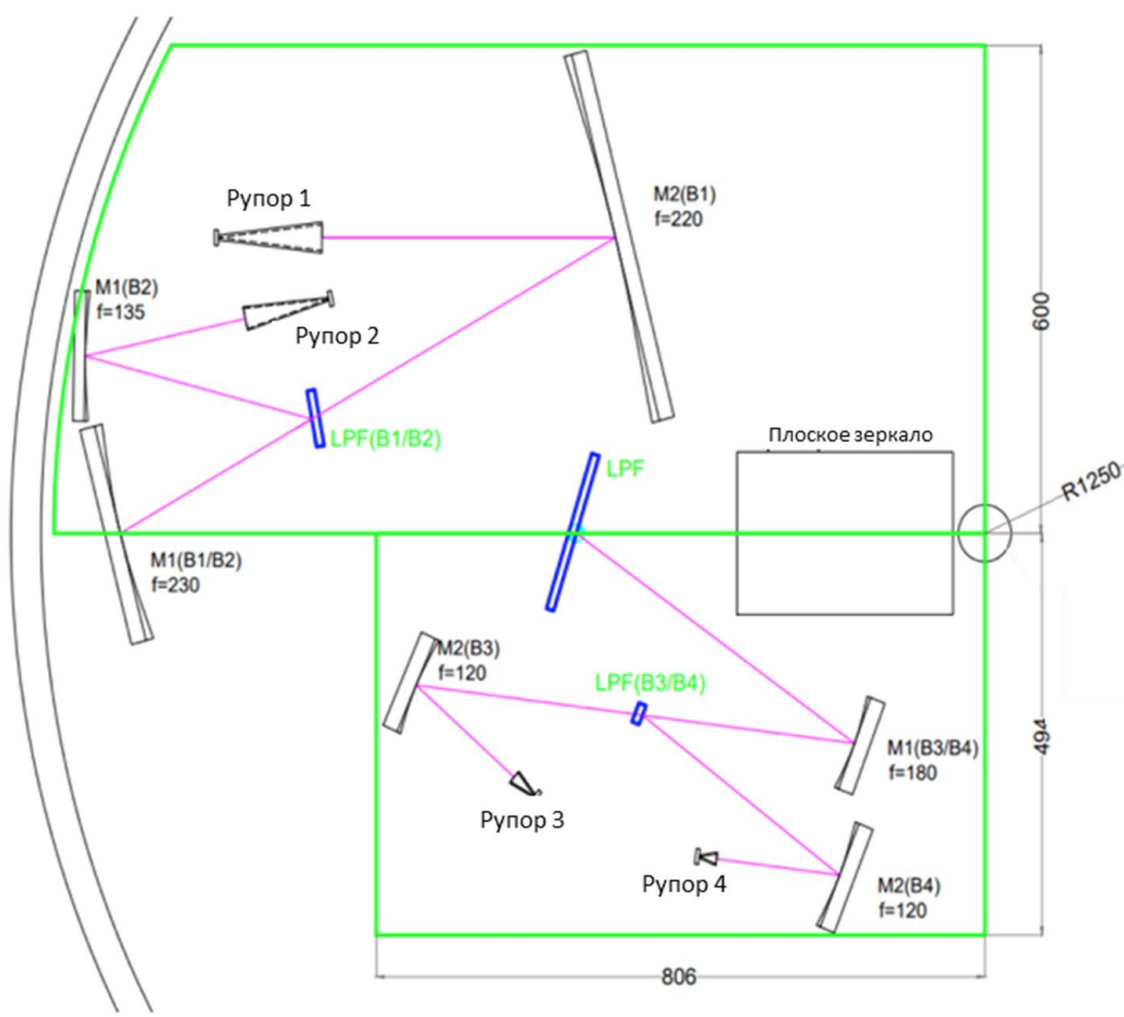


Рис. 2. Исходная компоновка приемников с рупорами (рупоры В1-В4) внутри криогенного контейнера.

Таблица 1. Основные этапы проектирования.

Этап	Процедура	Метод	Цели
1	Синтез зеркал с использованием критерия Драгоне	Геометрическая оптика и анализ мод гауссовых пучков (ГП)	Получение исходной геометрии
2	Полный анализ распространения ГП, определение оптимальных параметров рупоров	ГП	Проверка уровня искажений, оптимизация геометрии и получение исходных данных для рупоров
3	Электродинамическое моделирование оптики	Метод интегральных уравнений	Проверка результатов предыдущих этапов
4	Электродинамическое моделирование оптики с телескопом	Метод ФО	Оценка достижимого КИП
5	Синтез рупоров и электродинамическое моделирование	Метод согласования мод (метод собственных функций), метод ФО	Оценка КИП всей системы
6	Изготовление и измерения: - Точность поверхностей - Юстировка оптической системы - Параметры дихроиков - ЭМ измерения	Оборудование: - Координатно-измерительная машина - Установка для измерения ЭМ поля в ближней зоне	Наземная экспериментальная отработка

Указанные этапы проектирования позволят получить оценку эффективности всей системы, что в дальнейшем будет подтверждаться наземными испытаниями.

Спроектированная оптическая система в плоскости симметрии изображена на рис. 3. ЭМ волна каждого диапазона последовательно проходит через первый дихроичный фильтр, отражаясь или проходя через него, отражается от эллипса М4 или М7, далее через второй дихроик, отражаясь или проходя через него, и далее отражается от своего эллипса М5/М6/М8/М9. Таким образом, на пути распространения поля каждого диапазона присутствуют два дихроика и два эллиптических зеркала. Исходные перетяжки собираются в центре первого дихроика – эта точка соответствует фокальной плоскости Кассегрена, отклоненной относительно фокальной оси. В расчетах дихроик заменяется идеально пропускающим или идеально отражающим зеркалом. Каждая пара

эллиптических зеркал удовлетворяет критерию Драгоне замкнутости оптического пути центрального луча, что автоматически обеспечивает отсутствие искажений в геометрооптическом приближении.

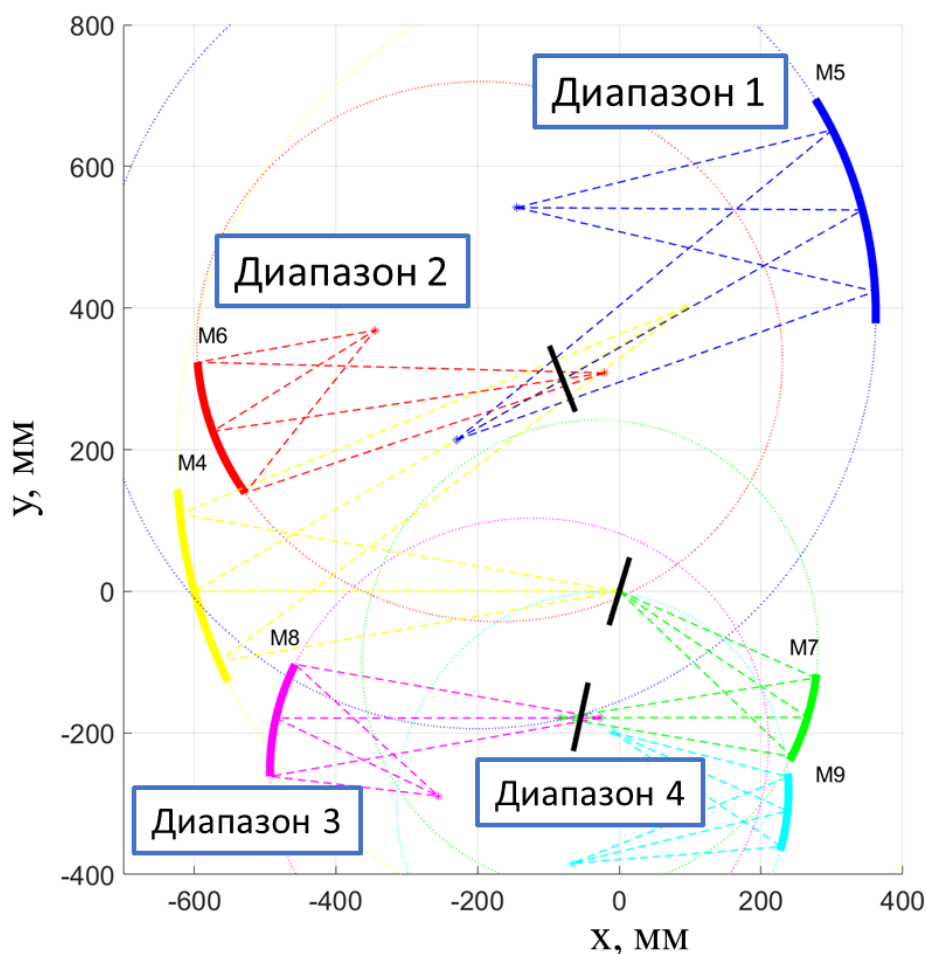


Рис. 3. Оптическая система с ходом геометрооптических лучей. Синим цветом изображены зеркала M4-M5 и лучи диапазона 1 (33-50 ГГц), красным – диапазона 2 (84-116 ГГц, зеркало M4 и M6), зеленым – диапазона 3 (211-275 ГГц, зеркала M7-M8), пурпурным – диапазона 4 (300-373 ГГц, зеркало M7 и M8). Черными цветами показаны дихроики. На рисунке также отмечены полные эллипсы (точками) и соответствующие фокусы эллипсов.

2. Квазиоптический анализ

Квазиоптический анализ проводится с помощью широко используемого аппарата гауссовых пучков – фундаментального решения параболического уравнения и матричной оптики.

Произвольное ЭМ поле можно представить в виде ряда мод Гаусса-Лагера или Гаусса-Эрмита $\psi_{m,n}(x, y, z)$ [17-19]:

$$E(x, y, z) = \sum_{m,n} C_{m,n} \psi_{m,n}(x, y, z) \quad (1)$$

где $C_{m,n}$ – коэффициенты разложения поля в ряд в соответствующем базисе.

Например, моды Гаусса-Эрмита:

$$\begin{aligned} \psi_{m,n}(x, y, z) &= \left(\frac{1}{\pi \omega_x \omega_y 2^{m+n+1} m! n!} \right)^{0,5} H_m \left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega_x} \right) H_n \left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega_y} \right) e^{-\frac{x^2}{\omega_x^2} - \frac{y^2}{\omega_y^2} - ikz + i\phi_{m,n}(x, y, z)}, \\ \phi_{m,n}(x, y, z) &= -\frac{\pi x^2}{\lambda R_x} - \frac{\pi y^2}{\lambda R_y} + \frac{(2m+1)\phi_{0x}}{2} + \frac{(2n+1)\phi_{0y}}{2}, \\ \phi_{0x,y} &= \arctan \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_{0x,y}} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (2) H_m – полиномы Эрмита, R – радиус кривизны фазового фронта и ω – ширина пучка в соответствующей плоскости. Для расчета преобразования пучков в оптических системах удобно рассчитывать преобразование их комплексных параметров q , описываемых выражением $1/q = 1/R - (i\lambda)/(\pi\omega^2)$. ABCD-матрицы – матрицы преобразования, описывающие преобразование фронта поля в виде набора гауссовых пучков. При распространении и отражении на зеркалах в приближении тонких линз матрица[^]

$$M_{распр} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; M_{отр} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где L – длина пути центрального луча, $1/f$ – фокальный параметр тонкой линзы.

Для оценки качества оптической системы (согласования) рассчитывается значение интеграла перекрытия:

$$c_{ab} = \iint u_a(x, y) u_b^*(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где $u_{a,b}(x, y)$ – распределения поля в разных сечениях оптической системы.

Например, в качестве критерия рассчитывается интеграл по площади апертуры.

Для правильного проектирования системы проводится анализ распространения гауссовых пучков от контррефлектора, далее определяются параметры наилучшего согласования с частотно-независимым фронтом пучка и далее проводится обратная трассировка найденных параметров пучка к контррефлектору для оценки согласования с исходным полем. Точка наилучшего согласования с частотно-независимым фронтом пучка подбирается для определения параметров рупора по критерию частотной независимости его параметров на апертуре [20-21].

В качестве начального приближения – «входного» пучка используется поле, распространяющееся от контррефлектора, при этом на контррефлекторе поле считается частотно-независимым:

$$\frac{\pi\omega_0}{\lambda} = \frac{1}{\operatorname{tg}\theta} = 2 \left[T_e(\text{dB}) \right]^{0.5} \text{ FM}, \quad (5)$$

где ширина пучка в фокальной плоскости телескопа ω_0 и угол расходимости θ выражены через уровень облучения контррефлектора T_e ; $M = (e - 1)/(e + 1)$ – «увеличение» телескопа, зависящее от эксцентриситета e контррефлектора, F – фокусное расстояние главного зеркала [20, 21]. Для получения наилучшего КИП уровень облучения контррефлектора традиционно выбирается -11 дБ. В качестве исходных данных использованы параметры зеркальной системы «Миллиметра».

Квазиоптические параметры спроектированных зеркал сведены в таблицу 2. В таблице R_1 , R_2 – фокальные радиусы зеркал, θ_i – двойной угол между центральными падающими и отраженными лучами, a , b – полуоси эллипсов.

Таблица 2. Параметры зеркал.

Зеркало	R_1 , мм	R_2 , мм	θ_i , °	a , мм	b , мм
М4	600	802,2	30	701,1	670,1
М5	660	487	29,78	573,5	547,9
М6	560	268,6	22,95	414,3	380,1
М7	320	348	34	334	319,1
М8	457,86	254,36	25,7	356,1	332,7
М9	270	313	37,87	291,5	275

Распространение гауссовых пучков от фокуса до областей детекторов изображено на рис. 4.

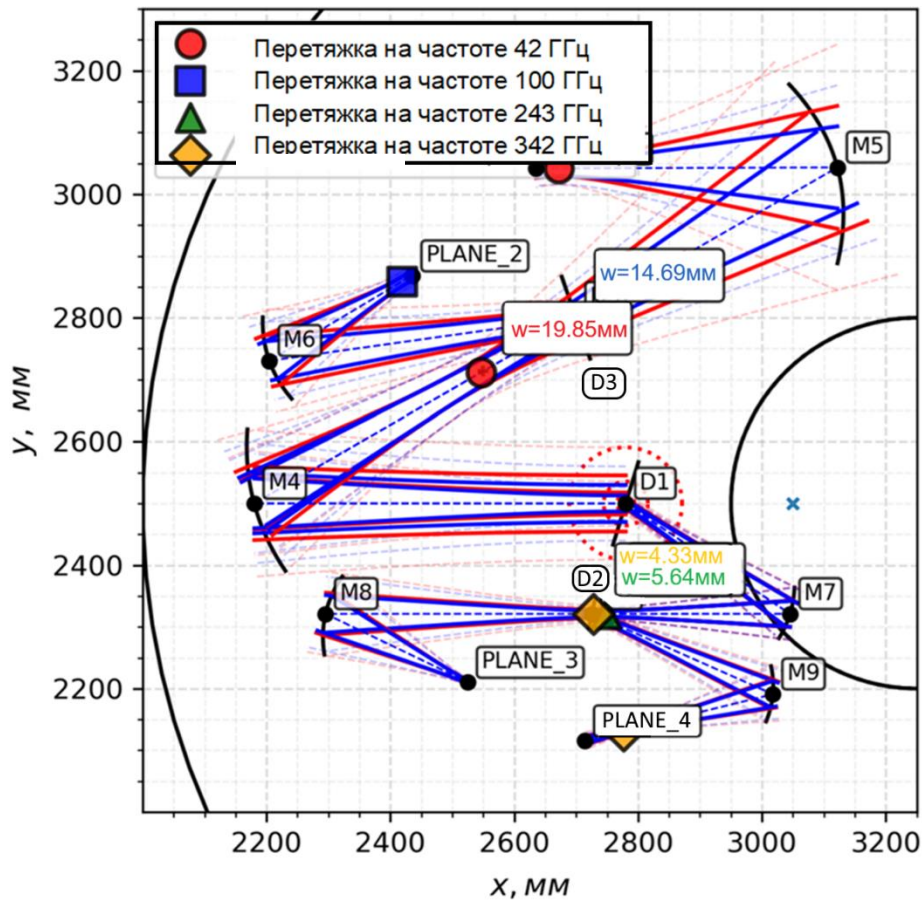


Рис. 4. Распространение гауссовых пучков от фокуса до областей, в которых размещаются приемники. Точками отмечены перетяжки соответствующих диапазонов, красными и синими линиями показаны линии поля по уровню « $2w$ » – e^{-1} , пунктирными линиями по уровню « $4w$ » – e^{-2} .

После расчета прямого распространения пучка от контррефлектора до области приемников, в целях определения параметров наилучшего согласования с частотно-независимым фронтом пучка, проводится параметрический поиск параметров пучка (ширина и радиус кривизны) и его положение относительно зеркала с критерием максимального согласования в полосе частот. Это обеспечивает равномерность характеристик в полосе частот после синтеза рупора.

Известно, что поле на апертуре гофрированного рупора с хорошей точностью также описывается гауссовым пучком, у которого ширина и радиус кривизны фазового фронта на апертуре обладают условной частотной независимостью: $\omega \approx 0,644r_a$, $R = R_h$, где r_a и R_h – радиус апертуры и длина

образующей соответственно [23]. Таким образом, определив параметры пучка, можно с уровнем согласования с этим пучком 96-97 % подобрать первичные параметры рупора. В последующих разделах использована более строгая методика проектирования рупора по известным параметрам пучка с помощью метода согласования мод.

Исходный гауссов пучок, рассчитанный по формуле (5) и обеспечивающий частотно-независимое облучение контррефлектора по уровню -11 дБ на краю, обеспечивает значения апертурного КИП с учетом переливания за края зеркал порядка 80 %. На рисунке 5 показаны результаты расчета прямого и обратного распространения пучков для каждого диапазона. Для всех диапазонов уровень согласования с гауссовым пучком составляет более 98 %. Доля мощности, приходящаяся на основную гауссову моду, составляет более 99 %. Спроектированная оптическая система обеспечивает «увеличение» – увеличение угловой ширины поля от системы Кассегрена.

Стоит отметить, что первоначально система проектировалась без учета условия частотной независимости, что привело к необходимости модификаций и нескольких итераций проектирования, включая электродинамическое моделирование.

В таблицу 3 сведены параметры пучков в фокальной и приемной плоскостях, и в плоскости наилучшей частотной независимости.

Таблица 3. Параметры пучков.

Диапазон	Перетяжка пучка в фокальной плоскости, мм	Перетяжка пучка в области приемников, мм	Параметры оптимального частотно-независимого пучка
1 (42 ГГц)	35,12	13,86	$\omega_a = 13,28$ мм; $R = 250$ мм
2 (100 ГГц)	14,75	7,26	$\omega_a = 7,264$ мм; $R = 136,1$ мм
3 (243 ГГц)	6,02	4,1	$\omega_a = 4,13$ мм; $R = 250$ мм
4 (343 ГГц)	4,29	4,05	$\omega_a = 4,1$ мм; $R = 60$ мм

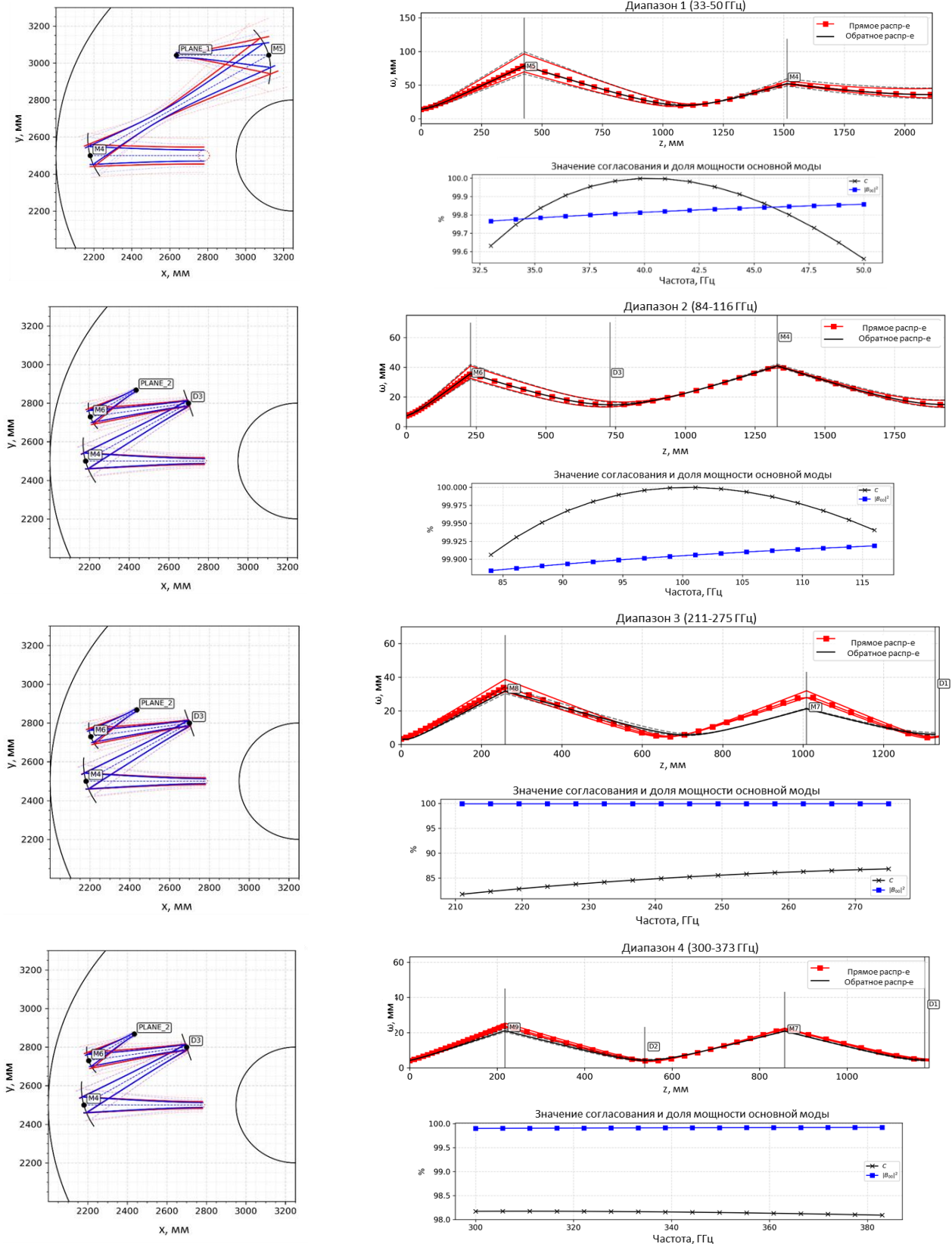


Рис. 5. Расчет распространения гауссовых пучков для диапазонов 1-4.

Слева изображены квазиоптические схемы с гауссовыми пучками, справа на верхнем графике изменение ширины пучка вдоль оптического пути, на графике снизу уровень согласования с оптимальным частотно-независимым пучком (черные кривые) и доля мощности, приходящаяся на основную гауссову моду (синие).

3. Электродинамическое моделирование

3.1. Расчет оптической системы методом интегральных уравнений

Цель расчета с помощью инструментов трехмерного электродинамического моделирования численными методами – верификация результатов квазиоптического анализа и уточнение параметров оптической системы. Расчетная модель оптической системы изображена на рисунке 6. Модель включает в себя эллиптические зеркала из идеального металла, дихроики заменяются идеально пропускающими либо отражающими зеркалами. В качестве источников – ближнее поле с гауссовым распределением.

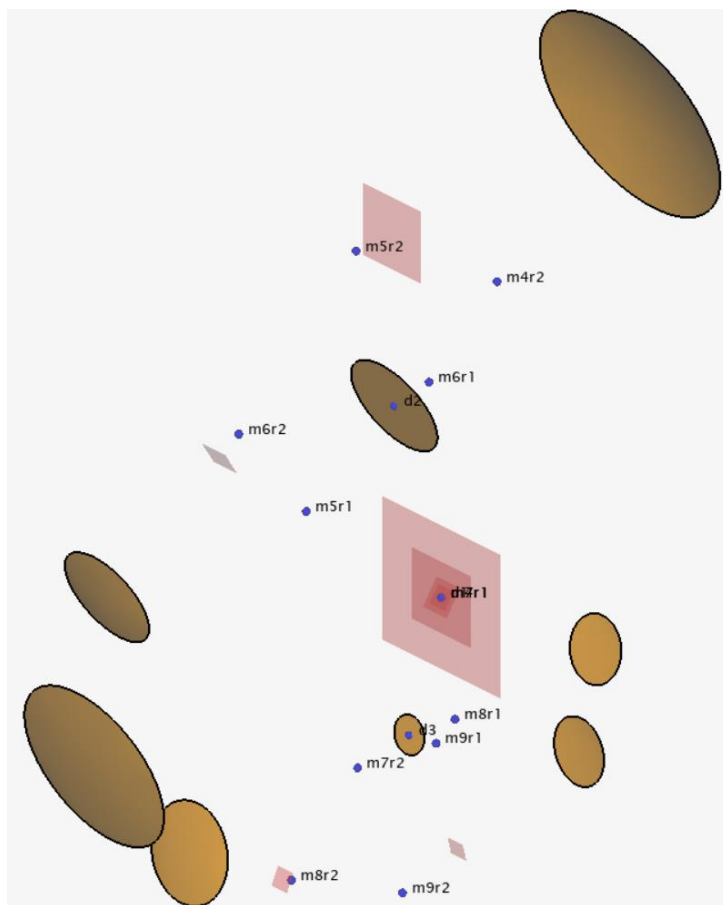
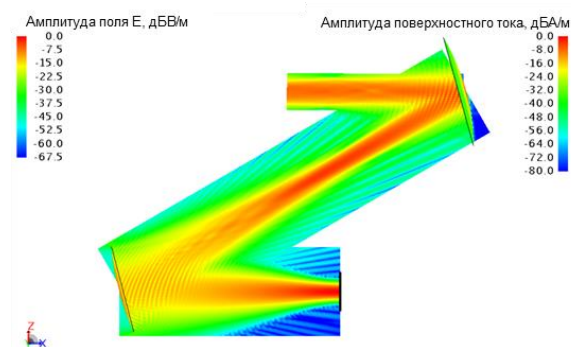


Рис. 6. Расчетная 3D-модель оптической системы.

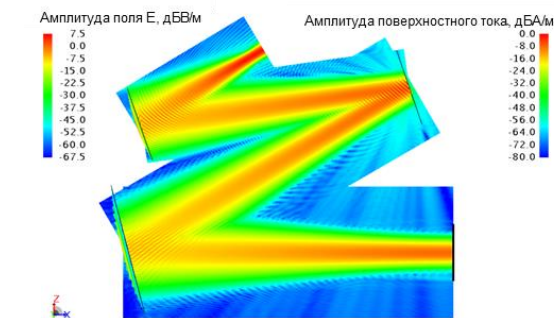
На рисунках 7 изображены расчетные распределения основной поляризационной составляющей поля в плоскости симметрии для центральной частоты каждого диапазона и уровень согласования – величина интеграла перекрытия между распределением поля, рассчитанным методом интегральных уравнений с подобранным ранее гауссовым пучком с параметрами из таблицы 3.

На рисунке 8 результаты расчета обратного распространения – гауссова пучка с параметрами из таблицы 3 через оптическую систему до фокальной плоскости. Слева показаны распределения амплитуд основной и кроссполяризационной составляющих, справа сравнение распределения поля в двух плоскостях – расчетное и исходное гауссово от контррефлектора по формуле (5), и значения интеграла перекрытия (согласование) этих двух полей.



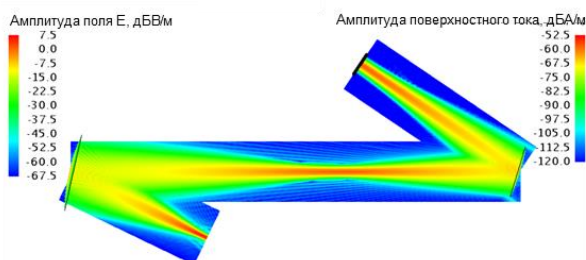
Диапазон 1

Частота	Согласование
33 ГГц	98.5%
42 ГГц	99.2%
50 ГГц	98.8%



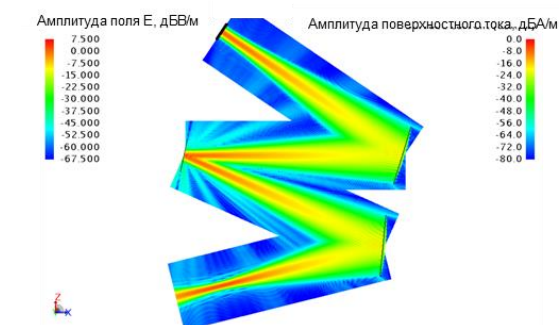
Диапазон 2

Частота	Согласование
84 ГГц	99.5%
100 ГГц	99.8%
116 ГГц	98.8%



Диапазон 3

Частота	Согласование
211 ГГц	99.2%
243 ГГц	99.3%
275 ГГц	99%

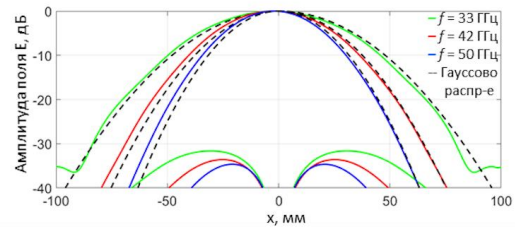
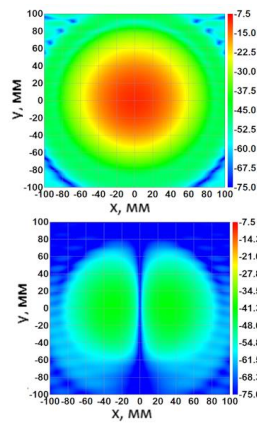


Диапазон 4

Частота	Согласование
300 ГГц	97.5%
342 ГГц	97.5%
373 ГГц	97.3%

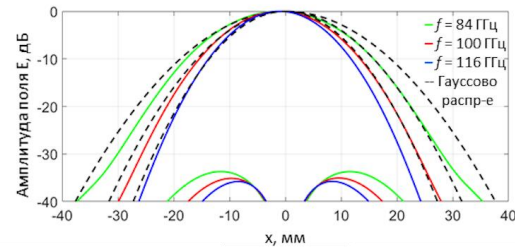
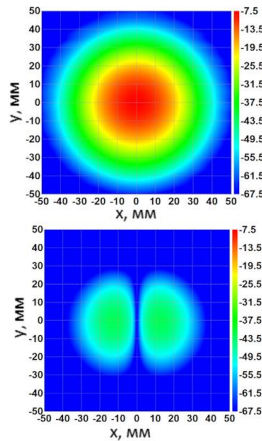
Рис. 7. Распределения амплитуды основной составляющей поля в плоскости симметрии для центральных частот диапазонов 1-4 и уровень согласования с частотно-независимым пучком на трех частотах.

Диапазон 1



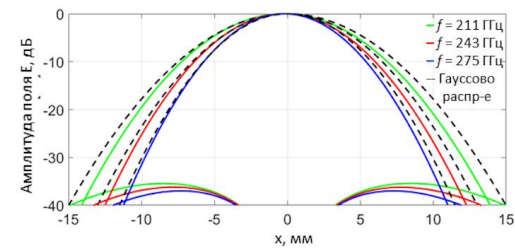
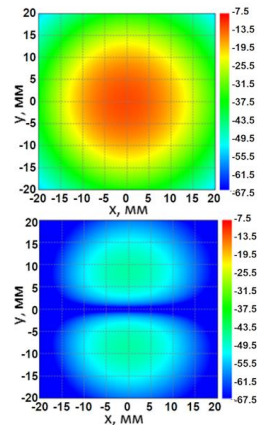
Частота	Согласование
33 ГГц	98.8%
42 ГГц	99.0%
50 ГГц	98.7%

Диапазон 2



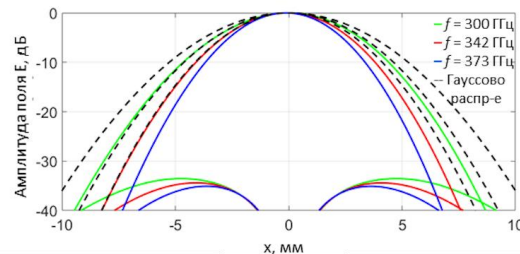
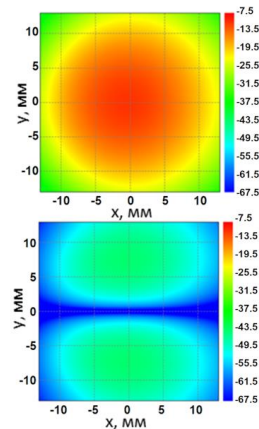
Частота	Согласование
84 ГГц	98.1%
100 ГГц	98.2%
116 ГГц	97.4%

Диапазон 3



Частота	Согласование
211 ГГц	97.4%
243 ГГц	97.5%
275 ГГц	97.3%

Диапазон 4



Частота	Согласование
300 ГГц	95.2%
342 ГГц	96.7%
373 ГГц	95.4%

Рис. 8. Результаты расчета обратного распространения. Распределения амплитуд основной и кроссполаризационной составляющих в фокальной плоскости, и уровень согласования с исходным пучком.

3.2. Расчет оптической системы с телескопом методом ФО

Финальный этап расчета квазиоптической схемы – расчет оптики с телескопом. Ввиду электрически больших размеров зеркальной системы телескопа наиболее подходящий метод расчета – физическая оптика. Электродинамическая модель изображена на рис. 9.

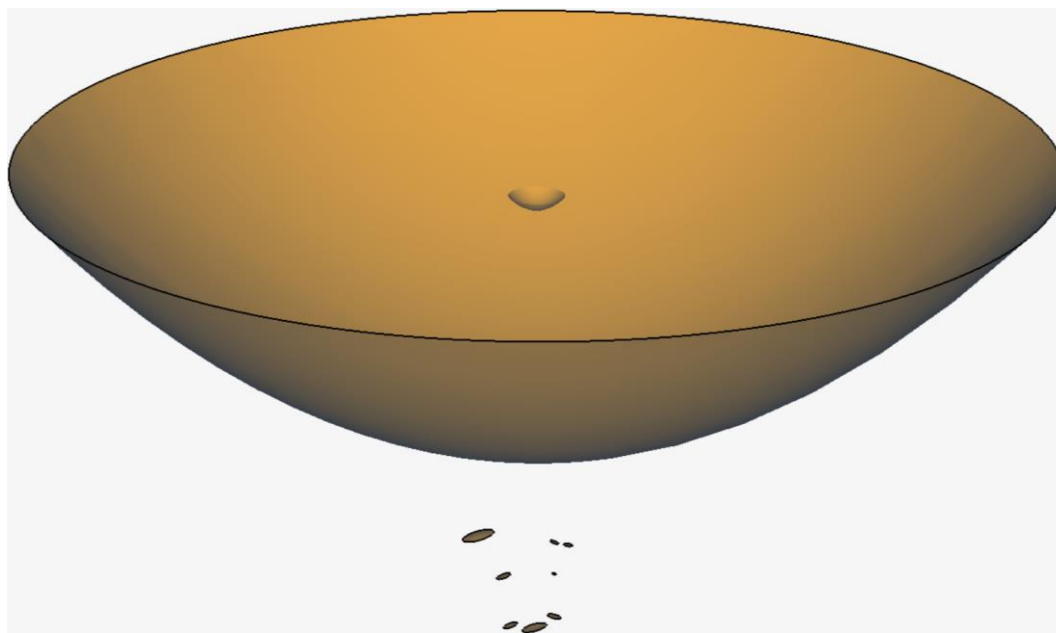


Рис. 9. Электродинамическая модель оптической системы с зеркальной системой телескопа.

Источник задается в виде гауссова пучка с соответствующими параметрами. Расчетные диаграммы направленности (ДН) приведены на рис. 10, значения K_u и КИП в таблице 4. В оценке K_u и КИП учтены составляющие – апертурный КИП, переливание, кроссполяризация и дифракция, а также учтено затенение от контррефлектора путем «вырезания» части поверхности главного зеркала, соответствующей затеняемой области. Не учтено влияние неточностей зеркальной системы и оптики, затенения поверхности рефлектора опорами контррефлектора. Учитываемые в оценке КИП составляющие позволяют оценить качество самой оптики и ее согласования с зеркальной системой телескопа без учета конструктивных параметров.

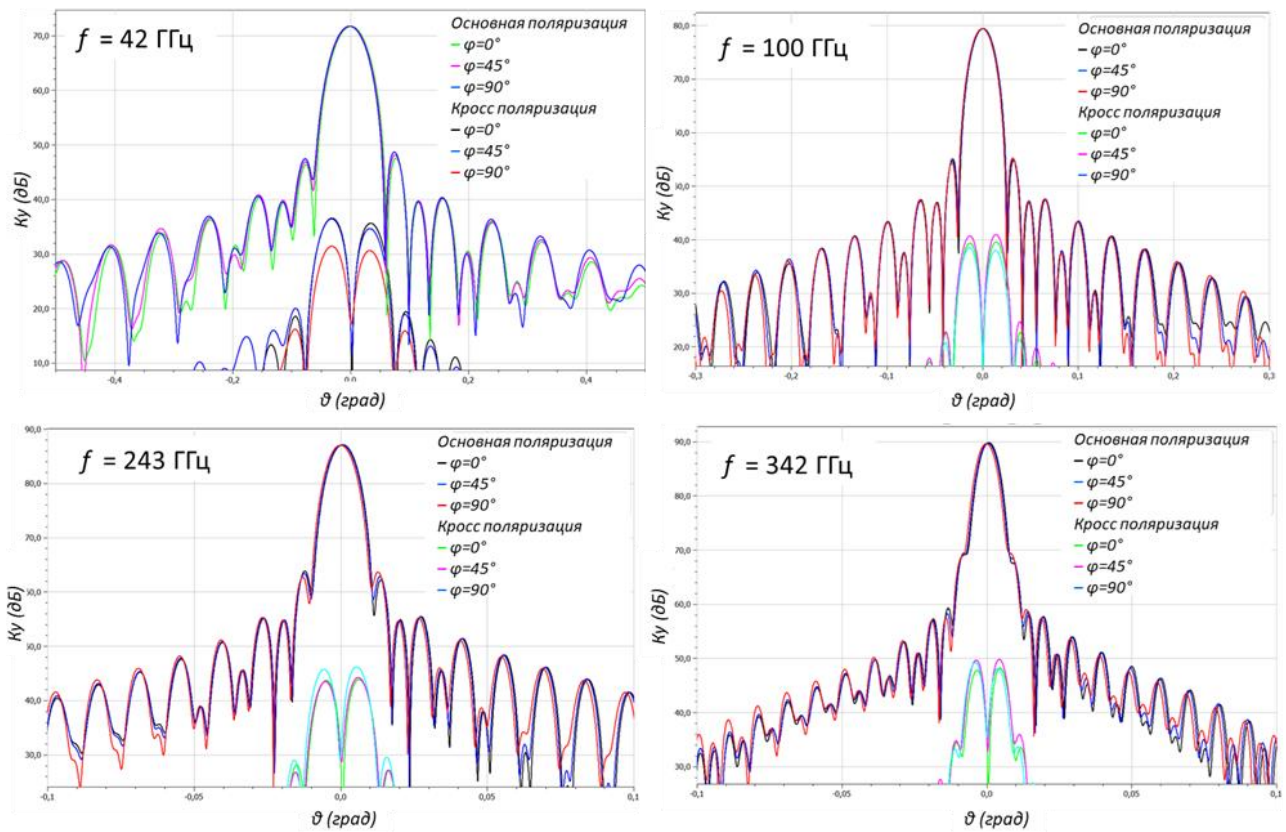


Рис. 10. Расчетные ДН системы с телескопом на центральных частотах.

Таблица 4. Расчетные значения Ку и КИП.

Диапазон	Частота, ГГц	Ку, дБ	КИП
1	33	69,41	73,0 %
	37	70,53	75,2 %
	42	71,71	76,5 %
	46	72,54	77,2 %
	50	73,27	77,3 %
2	84	77,9	79,6 %
	92	78,68	79,3 %
	100	79,39	79,2 %
	108	80,06	79,1 %
	116	80,68	79,2 %
3	211	85,85	78,7 %
	227	86,5	78,9 %
	243	87,1	79,0 %
	259	87,64	78,9 %
	275	88,16	78,8 %
4	300	88,69	74,8 %
	321	89,26	74,5 %
	342	89,79	74,2 %
	353	90,3	75,2 %
	373	90,74	74,6 %

Учитываемые в оценке КИП составляющие позволяют оценить качество самой оптики и ее согласования с зеркальной системой телескопа без учета конструктивных параметров. В целом значения КИП составляют от 0,73 до 0,79. Меньшие значения характерны на низких частотах, где сильно влияние дифракции с учетом короткофокусного главного зеркала телескопа. На верхних частотах значения порядка 75 % в связи с неоптимальным частотно-независимым согласованием исходного пучка.

4. Проектирование рупорных облучателей

4.1. Синтез

В спроектированной оптической системе с учетом свойства частотной независимости к рупорному облучателю каждого диапазона предъявляется требование формирования на всех частотах излучения с параметрами, максимально близкими к параметрам пучка в таблице 3. Рассчитывается поле на апертуре рупора, которое согласовывается с гауссовым распределением.

Наиболее широко распространенный тип рупора, используемый в подобных системах для формирования излучения, близкого к гауссовому – гофрированный рупор. Однако при хороших характеристиках изготовление таких рупоров на высоких частотах может быть проблематично. Поэтому кроме гофрированных как альтернатива рассматривается гладкий рупор с изломом конической образующей [22, 23]. В первую очередь спроектированы рупоры на диапазоны 2 и 3 как наиболее критичные для решения научных задач и наземной отработки. Проектирование осуществлялось с помощью алгоритмов численной оптимизации в среде MATLAB с расчетом поля рупора для каждой конфигурации методом согласования мод и вычислением интеграла перекрытия в качестве критерия оптимизации.

С помощью таких алгоритмов для диапазона 2 (84-116 ГГц) спроектировано два вида рупора – гофрированный и гладкий, для диапазона 3 (211-275 ГГц) гладкий рупор с числом секций $n = 10$, 3D модели рупоров (сечения в плоскости симметрии) и их расчетные диаграммы направленности на трех частотах в двух

плоскостях приведены на рис. 11. Значения согласования с гауссовыми пучками (уровень «гауссовости») приведены в таблице 5.

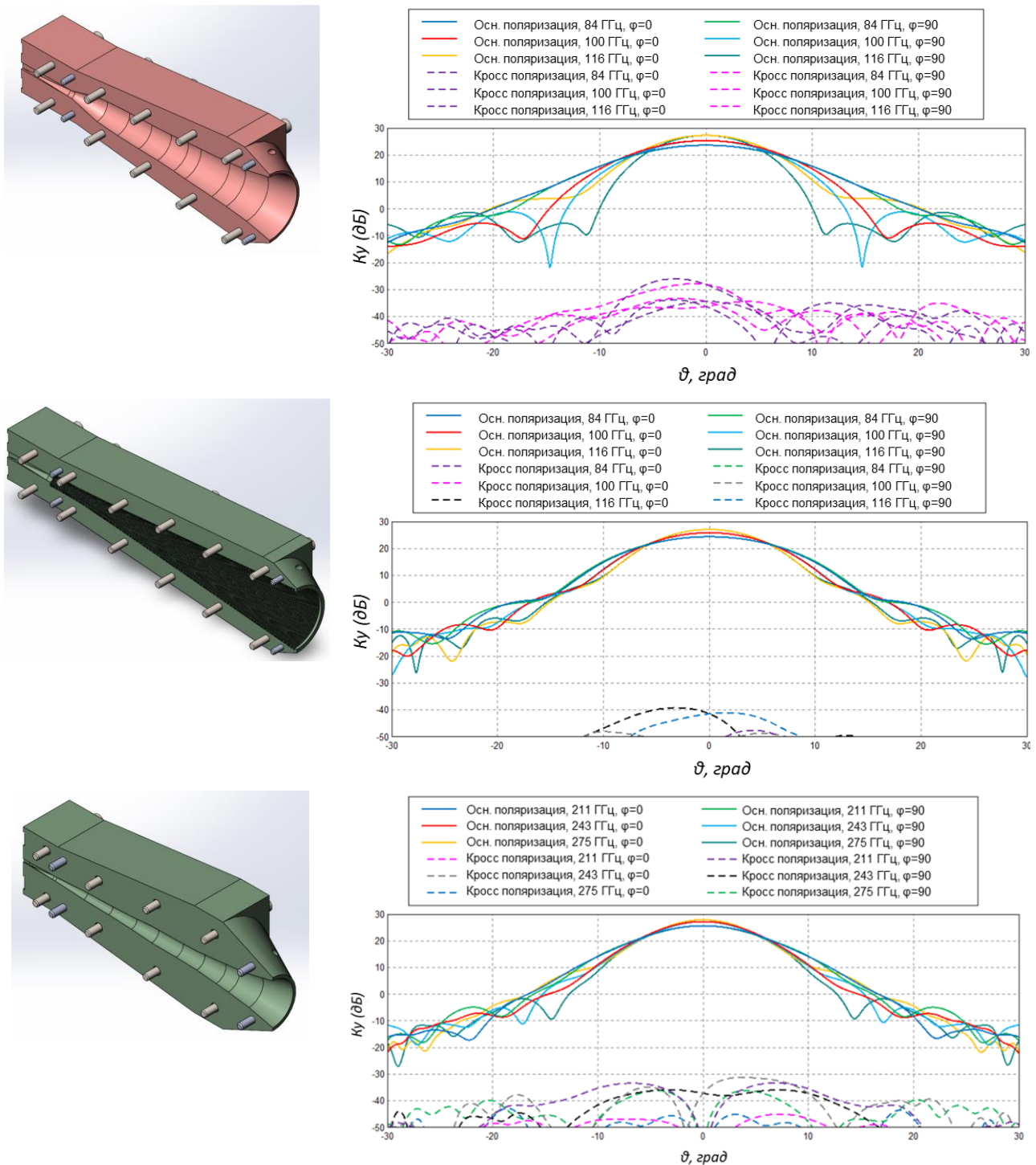


Рис. 11. 3D модели рупоров и расчетные диаграммы направленности:
 конический секционный рупор на диапазон 1;
 гофрированный рупор на диапазон 1;
 конический секционный рупор на диапазон 2.

Таблица 5. Значения согласования полей рупоров с гауссовыми пучками.

Диапазон	Частота, ГГц	Параметры пучка	Конический секционный рупор	Гофрированный рупор
1	84	$\omega_a = 7,264$ мм $R = 136,1$ мм	95,03 %	97,02 %
	92		97,71 %	97,21 %
	100		96,97 %	97,32 %
	108		97,03 %	97,26 %
	116		95,03 %	97,10 %
2	211	$\omega_a = 4,13$ мм $R = 250$ мм	96,32 %	
	227		97,43 %	
	243		97,92 %	
	259		97,60 %	
	275		97,44 %	

4.2. Моделирование телескопа с оптической системой и рупорами

Далее проведено моделирование всей системы с рупорным облучателями в диапазонах 2 и 3. Расчет проведен гибридным методом – рассчитывались коэффициенты разложения поля по сферическим гармоникам, далее по этим коэффициентам считались токи на зеркалах и диаграммы направленности методом ФО. Расчетная модель изображена на рис. 12, диаграммы направленности на частотах 100 ГГц и 243 ГГц на рис. 13-14. Расчетные значения КИП сведены в таблицу 6.

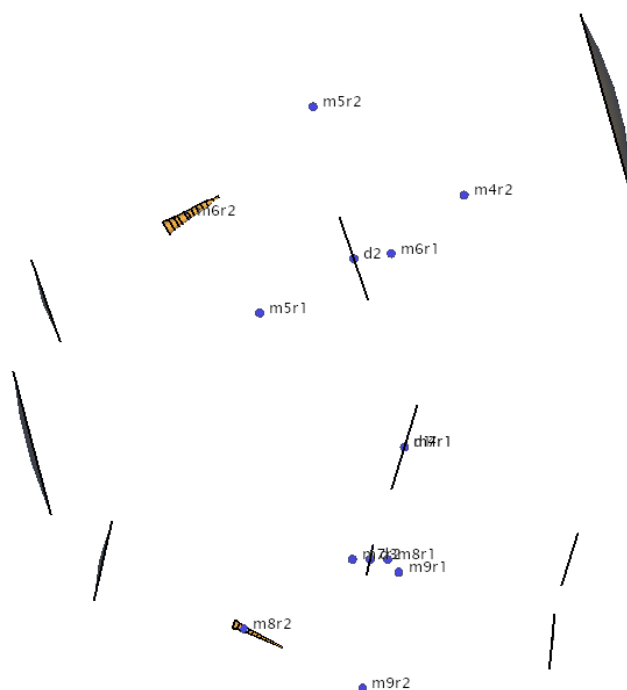


Рис. 12. 3D модели рупоров в оптической системе.

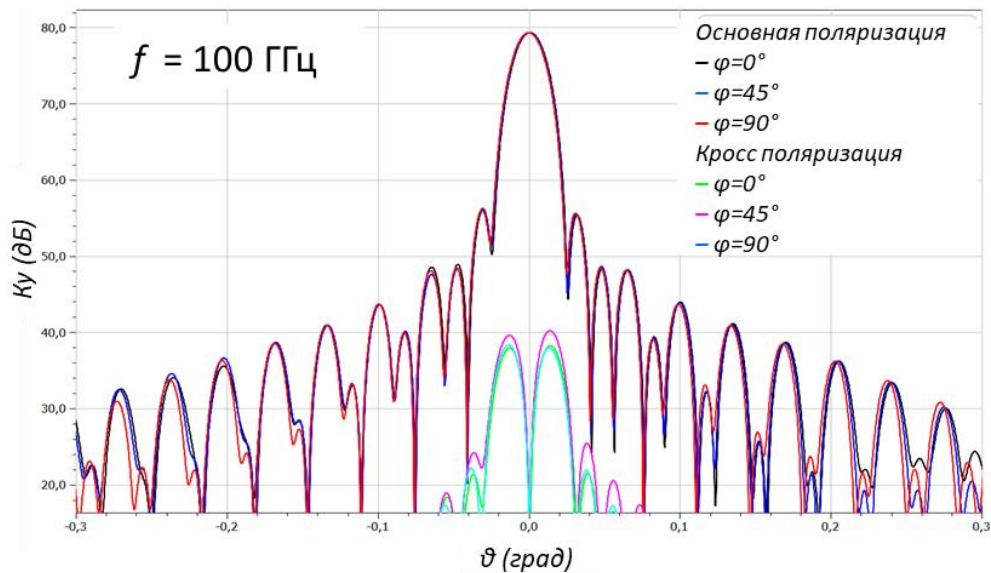


Рис. 13. Диаграмма направленности телескопа с оптической системой и рупорами на частоте 100 ГГц.

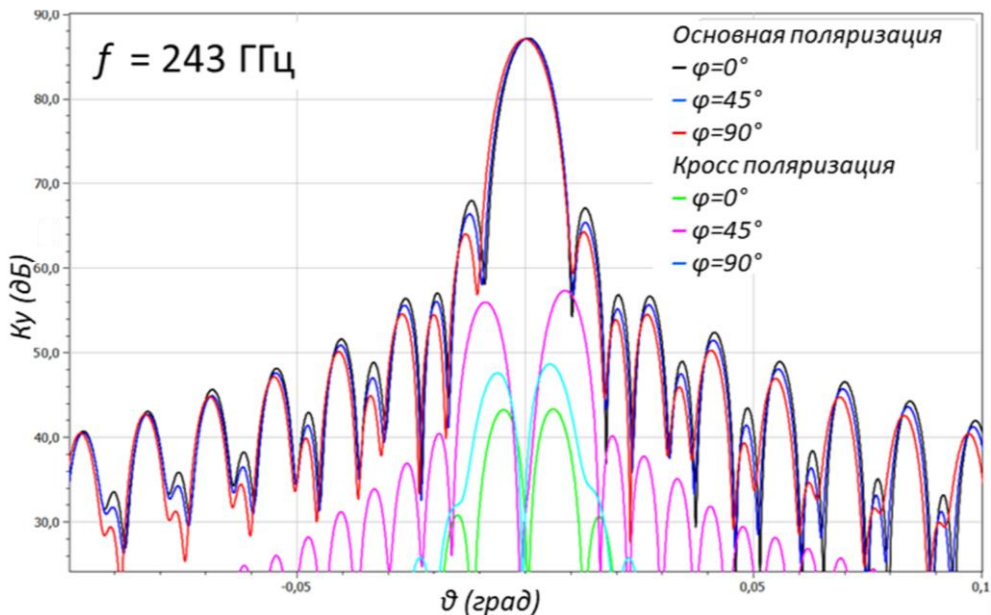


Рис. 14. Диаграмма направленности телескопа с оптической системой и рупорами на частоте 243 ГГц.

Исходя из результатов расчетов, можно сделать вывод о приемлемых значениях результирующей эффективности спроектированной системы. Гофрированный рупор обеспечивает лучшую частотную стабильность характеристик. Однако с точки зрения изготовления и реализации в системе более оптимальным может быть гладкий секционный рупор.

В настоящее время изготовлен макет, планируется проведение экспериментального определения характеристик путем измерения

распределений полей в ближней зоне. Измерительный стенд включает в себя векторный анализатор цепей, позиционер с зондами и цепочки умножителей частоты (рис. 15).

Таблица 6. Расчетные значения КИП телескопа с оптикой и рупорами.

Диапазон	Частота, ГГц	Конический секционный рупор	Гофрированный рупор
1	84	74,8 %	77,8 %
	92	76,6 %	77,8 %
	100	79,1 %	77,9 %
	108	80,4 %	77,1 %
	116	79,1 %	78,8 %
2	211	76,2 %	-
	227	77,5 %	-
	243	79,9 %	-
	259	79,1 %	-
	275	79,2 %	-

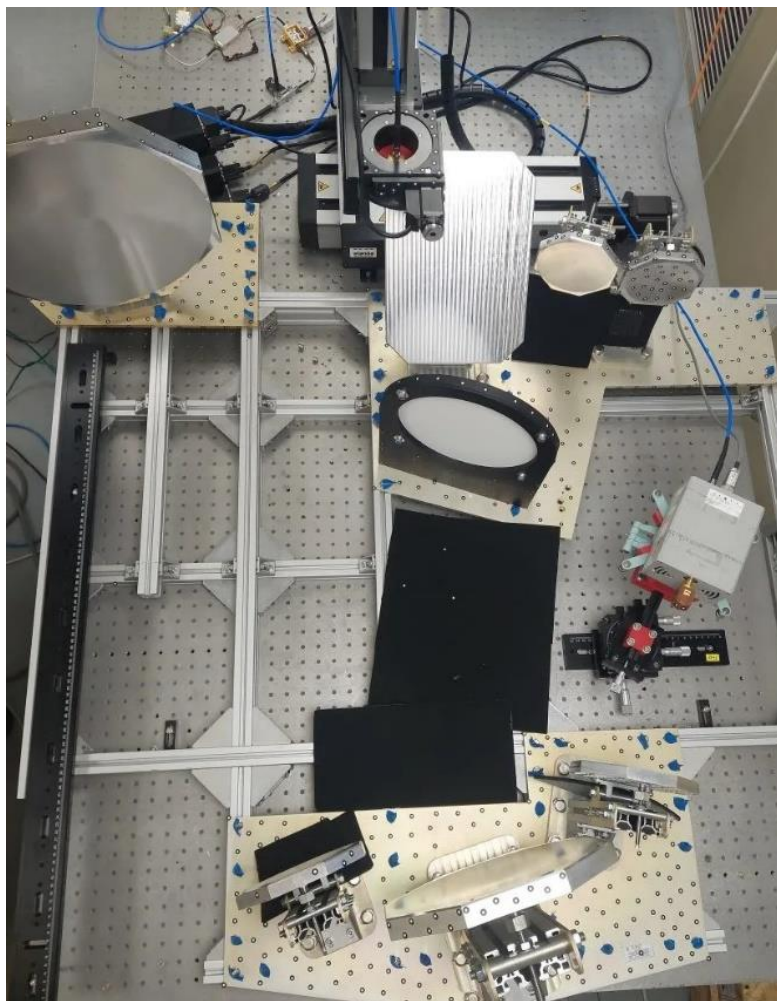


Рис. 15. Изготовленный макет квазиоптической системы на измерительном стенде.

Заключение

В статье рассмотрены результаты проектирования и расчета квазиоптической системы бортового криогенного многодиапазонного приемного устройства, работающего в диапазонах 7 мм, 3 мм, 1,3 мм и 0,8 мм. Поэтапно описан процесс проектирования с промежуточными и конечными результатами. Синтез зеркальной системы проведен с использованием критерия Драгоне для компенсации искажений на несимметричных зеркалах, расчеты проведены путем расчета распространения гауссовых пучков и численным трехмерным электродинамическим моделированием методом интегральных уравнений и физической оптики.

Спроектировано несколько видов рупорных облучателей – гофрированный и гладкий секционный рупоры. Окончательный выбор конструкции будет осуществляться исходя из критериев обеспечения механической точности производства и получения требуемых характеристик по результатам эксперимента.

Финальный расчет квазиоптики с телескопом с оценкой КИП проведен методом физической оптики. Расчетные значения коэффициента использования поверхности телескопа с оптикой и спроектированными рупорами без учета затенения опор контррефлектора и неточностей поверхностей зеркальной системы находятся в пределах от 0,73 до 0,79 при уровне кроссполяризационной составляющей не более минус 28. Оценка включает в себя апертурную составляющую, переливание, кроссполяризацию, дифракцию с учетом оптики и затенение от контррефлектора.

Дальнейшие этапы работ – изготовление и проведение измерений макета. После измерений будет проведена оценка КИП и потерь в системе расчетно-экспериментальным методом.

Благодарности:

Авторы выражают благодарность за консультации и научно-техническую помощь в получении результатов статьи коллегам: Jung-Won Lee, Taehyun Jung, Taeho Kang из Корейского института астрономии и космических наук (Korea Astronomy and Space Science Institute), Андрею Барышеву из Каптейнского астрономического института (Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen), Андрею Худченко из Астрокосмического центра ФИАН.

Литература

1. Kardashev N.S., Khartov V.V., Abramov V.V. et al. «RadioAstron» – a telescope with a size of 300 000 km: Main parameters and first observational results // *Astronomy Reports*. 2013. Vol. 57, no. 3. Pp. 153–194. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1303.5013>
2. Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama K., Alberdi A. et al. First M87 event horizon telescope results. II. Array and instrumentation // *The Astrophysical Journal Letters*. 2019. Vol. 875, no. 1. P. L2.
3. Raymond A.W., Palumbo D. et al. Evaluation of New Submillimeter VLBI Sites for the Event Horizon Telescope // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2021. Vol. 253. P. 5.
4. Likhachev S.F., Rudnitskiy A.G., Shchurov M.A. et al. High-resolution imaging of a black hole shadow with Millimetron orbit around Lagrange point L2 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. Vol. 511. Pp. 668–682.
5. Новиков И.Д., Лихачев С.Ф., Щекинов Ю.А. и др. Задачи научной программы космической обсерватории Миллиметрон и технические возможности её реализации // *Успехи физических наук*. 2021. Т. 191, № 4. С. 404–443. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.12.038898>
6. Khudchenko A., Smirnov A., Turygin S. et al. Overview of VLBI instrument for Millimetron space mission // *Proceedings of SPIE*. 2022. Vol. 12190. P. 121902W. <https://doi.org/10.1117/12.2630728>

7. Khudchenko A., Turygin S., Golubev E. et al. Millimetron Space-Earth VLBI instrument: recent updates. Rep. 01-2024. 2024.
8. Rudakov K.I., Khudchenko A.V., Filippenko L.V. et al. THz Range Low-Noise SIS Receivers for Space and Ground-Based Radio Astronomy // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 21. P. 10087. <https://doi.org/10.3390/app112110087>
9. Khudchenko A., Tretyakov I., Koshelets V.P. et al. Design and Analysis of a Waveguide Structure for 211–275 GHz 2SB SIS Mixer // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2023. Vol. THz-13, no. 6. Pp. 645–653. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2023.3307595>
10. Рудаков К.И., Худченко А.В., Кошелец В.П. Волноводный SIS-смеситель на частоту 345 ГГц // Журнал технической физики. 2024. Т. 69, № 7. С. 1111–1118. <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.07.58347.176-24>
11. Rioja M.J., Dodson R., Asaki Y. The transformational power of frequency phase transfer methods for ngEHT // Galaxies. 2023. Vol. 11. P. 16.
12. Zhao G.-Y. et al. The power of simultaneous multi-frequency observations for mm-VLBI: beyond frequency phase transfer // The Astronomical Journal. 2017. Vol. 155. P. 26.
13. Rioja M.J. et al. The power of simultaneous multi-frequency observations for mm-VLBI: Astrometry up to 130 GHz with the KVN // The Astronomical Journal. 2015. Vol. 150. P. 202.
14. Dragone C. Offset Multireflector Antennas with Perfect Pattern Symmetry and Polarization Discrimination // Bell System Technical Journal. 1978. Vol. 57, no. 7. Pp. 2663–2684.
15. Smirnov A., Golubev E., Filina E. et al. Development status of the Millimetron Space Observatory // Proceedings of SPIE. 2020. Vol. 11443. P. 114432H. <https://doi.org/10.1117/12.2562829>
16. Golubev E.S., Kotsur E.K., Arkhipov M.Yu., Smirnov A.V., Lyakhovets A.O., Pyshnov V.N. Primary mirror panels of the Millimetron Space Observatory // Proceedings of SPIE. 2020. Vol. 11451. P. 114510K. <https://doi.org/10.1117/12.2562838>

17. Goldsmith P.F. Quasioptical Systems. New York: IEEE Press, 1998. 412 p.
18. Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators // Applied Optics. 1966. Vol. 5, no. 10. Pp. 1550–1567. <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>
19. Lamb J.W. Quasioptical Coupling of Gaussian Beam Systems to Large Cassegrain Antennas // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1986. Vol. 7. Pp. 1511–1536. <https://doi.org/10.1007/BF01010755>
20. Chu T.-S. An imaging beam waveguide feed // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983. Vol. AP-31, no. 4. Pp. 614–619.
21. Goldsmith P.F. Quasi-optical techniques at millimeter and submillimeter wavelengths // Infrared and Millimeter Waves. Vol. 6 / ed. K.J. Button. New York: Academic Press, 1982.
22. Montofre D.A. et al. High-performance smooth-walled horn antennas for THz frequency range: Design and evaluation // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2019. Vol. 9, no. 6. Pp. 587–597.
23. Коган Б.Л. Электромагнитные поля круговой поляризации в теории зеркальных антенн: диссертация ... доктора технических наук: 05.12.07. — Москва, 2004. — 179 с. : ил.

Для цитирования:

Турыгин С.Ю., Белькович И.В., Сорокин Д.А. Квазиоптическая система многодиапазонного рсдб-инструмента миллиметрового диапазона. // Журнал радиоэлектроники. — 2026. — №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.10>