

## ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННО-ФИДЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Е.Ю. Гайнулина

okatrin@list.ru

В.Н. Иконников

ikonnikov-vn@yandex.ru

Н.С. Корнев

korneff15@rambler.ru

А.В. Назаров

nazarov52@mail.ru

ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская обл.,  
Российская Федерация

---

### Аннотация

Для решения задач ближней радиолокации при исследовании быстропротекающих газодинамических процессов широко применяются микроволновые радиоинтерферометры, позволяющие исследовать динамику движения и восстанавливать картину деформации фронта движущейся поверхности. Учитывая специфику газодинамических взрывных процессов, радиоинтерферометры необходимо размещать на расстояниях в единицы метров от объекта диагностики, а излучатели его фидерной линии — в непосредственной близости к объекту. Для минимизации потерь в фидерной линии субмиллиметрового диапазона при расстоянии 1...1,5 мм от радиоинтерферометра до объекта предложено два варианта систем канализации зондирующего излучения. Первый вариант антенно-фидерной системы радиоинтерферометра основан на уникальном свойстве сверхразмерных металлических волноводов — при резком уменьшении погонных потерь увеличивается отношение поперечного размера волновода к длине волны. Предложена фидерная линия, содержащая протяженные участки сверхразмерных металлических волноводов и короткие гибкие участки диэлектрического волновода. Второй вариант антенно-фидерной системы радиоинтерферометра основан на формировании в свободном пространстве сфокусированного волнового

### Ключевые слова

*Субмиллиметровый диапазон, сверхразмерный металлический волновод, диэлектрический волновод, квазиоптическая антенна, КВЧ-интерферометр*

пучка двухзеркальной длиннофокусной антенной с расщепленным фокусом. Рассмотрен вариант конструктивного исполнения антенно-фидерной системы с фокусировкой пучка на расстоянии 1 м от раскрыва антенны. На основании результатов численного моделирования выбран оптимальный рупорный облучатель, обеспечивающий требуемую диаграмму направленности и соотношение между фокусами двух зеркал и рупорного облучателя. Применение предложенной квазиоптической антенно-фидерной системы в составе радиоинтерферометра позволит получить минимально возможные потери в измерительном тракте, что расширит возможности диагностики в субмиллиметровом диапазоне

Поступила 01.08.2023

Принята 30.01.2024

© Автор(ы), 2024

---

**Введение.** При исследовании быстропротекающих газодинамических процессов широкое распространение получил метод микроволновой радиоинтерферометрии, основанный на зондировании объекта направленным излучением электромагнитных волн и его взаимодействии с объектом исследования в процессе движения [1–7].

Одной из первых работ, в которой рассмотрены преимущества радиоинтерферометрии при диагностике быстропротекающих процессов, была работа Б. Коха [8]. Радиоинтерферометрический метод основан на фазовой трактовке эффекта Доплера — измерение фазы отраженного сигнала в соответствии с изменением расстояния до цели. Указанный метод является бесконтактным, не вносящим возмущение в исследуемый процесс и обеспечивающим практически непрерывное во времени прямое измерение параметров движения.

Специфика задач дистанционного зондирования газодинамических взрывных процессов состоит в том, что объект исследования находится в непосредственной близости к источнику зондирующего излучения, одновременно существует вероятность уничтожения измерительной аппаратуры в условиях взрывного эксперимента [1, 2]. Это требует, с одной стороны, размещения радиоинтерферометра (РИ) во взрывозащищенной зоне, например, во взрывозащитном контейнере в нескольких метрах от объекта диагностики, с другой стороны, — размещения излучателя фидерной линии (ФЛ) РИ в непосредственной близости к объекту.

В миллиметровом диапазоне в качестве ФЛ оптимально использовать гибкие диэлектрические волноводы (ДВ), получившие широкое распро-

странение в измерительной технике [9]. Так, в трехмиллиметровом диапазоне применяется ДВ прямоугольного сечения из фторопласта или полиэтилена сечением  $2 \times 1$  мм в одномодовом режиме распространения основной волны  $HE_{11}$ . Погонные потери ДВ составляют 2...2,5 дБ/м, что при потенциале РИ (разработан в НИИИС им. Н.Ю. Седакова, Н. Новгород) позволит выполнять измерения при длинах ДВ до 10 м. При этом обеспечиваются гибкость волноводного тракта, допускающая радиусы изгибов не менее  $10\lambda$  без фазовой ошибки, простота изготовления и низкая стоимость, что важно в условиях уничтожения части фидера при взрывных экспериментах [2, 9–11].

Перспективным направлением развития радиоинтерферометрического метода исследования быстропротекающих процессов является переход в субмиллиметровый диапазон длин волн зондирующего излучения, который обеспечивает значительное улучшение пространственного разрешения и увеличение точности измерения перемещений исследуемого объекта. Однако в субмиллиметровом диапазоне проблемным вопросом является создание гибкой антенно-фидерной системы (АФС) длиной не менее 1,5 м с приемлемыми потерями для связи РИ с объектом исследования.

В диапазоне частот  $\sim 300$  ГГц тангенс угла потерь фторопласта Ф-4 увеличивается до значения  $\operatorname{tg} \delta \approx 4 \cdot 10^{-4}$  [12]. Погонный коэффициент ослабления волновода сечением  $0,9 \times 0,45$  мм составляет  $\sim 12$  дБ/м.

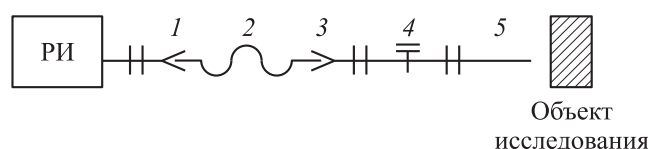
При необходимой длине тракта не менее 1 м применение ФЛ из фторопласта Ф-4 в субмиллиметровом диапазоне становится невозможным. Согласно [12], из доступных полимеров лучшие свойства у полиэтилена низкого давления с  $\operatorname{tg} \delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$ . В результате численного моделирования в программе CST Microwave Studio выявлено, что применение этого материала позволяет снизить погонные потери ДВ до 8 дБ/м, что также недостаточно для создания протяженных трактов на ДВ. Таким образом, в указанном диапазоне практически невозможно применять одномодовые ДВ указанной длины. Использование ДВ также ограничено короткими участками, обеспечивающими гибкость ФЛ и ее разрыв при воздействии ударной волны.

В субмиллиметровом и терагерцовом диапазонах активно развиваются линии передач на сверхразмерных металлодиэлектрических и металлических волноводах (МВ), обеспечивающих погонные потери менее 1 дБ/м в диапазоне  $\lambda = 0,8 \dots 1,0$  мм в прямоугольном МВ сечением  $7,2 \times 3,4$  мм [13, 14]. Кроме того, активно развивается направление формирования зондирующего излучения с помощью фокусирующих антенных систем [15].

*Цель настоящей работы* — исследование возможности создания вариантов построения АФС для задач радиоинтерферометрических измерений в субмиллиметровом диапазоне. В основу первого варианта канализации зондирующего излучения положено уникальное свойство сверхразмерных МВ (СРМВ) — резкое уменьшение погонных потерь с увеличением поперечного размера ДВ относительно длины волны. В связи с этим задачей исследования является построение комбинированной волноводной ФЛ, содержащей протяженные участки СРМВ, обеспечивающие приемлемые потери, и короткие участки ДВ, обеспечивающие гибкость тракта.

Второй вариант построения АФС РИ основан на формировании в свободном пространстве сфокусированного волнового пучка двухзеркальной длиннофокусной антенной с расщепленным фокусом. Рассматривается конструктивное исполнение АФС с фокусировкой пучка на расстоянии 1 м от раскрытия антенны и на основании результатов численного моделирования в программе CST Microwave Studio выбирается оптимальный рупорный облучатель (РО), обеспечивающий требуемые диаграмму направленности (ДН) и соотношение между фокусами двух зеркал и РО.

**Материалы и методы решения задачи создания волноводной ФЛ. Результаты моделирования.** Структурная схема комбинированной ФЛ субмиллиметрового диапазона (первый вариант АФС) приведена на рис. 1. На протяженном прямолинейном участке комбинированной ФЛ субмиллиметрового диапазона предлагается использовать прямоугольный СРМВ 5 длиной 1 м со стандартным сечением волноводного канала  $7,2 \times 3,4$  мм.

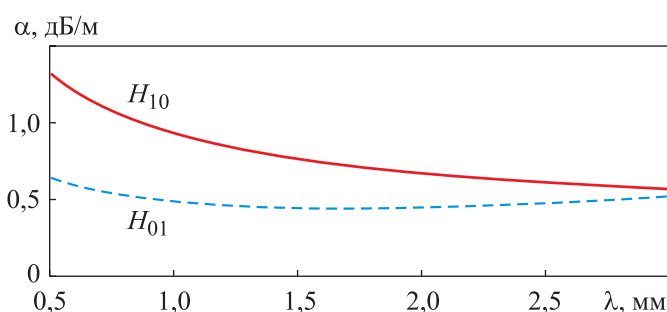


**Рис. 1.** Структурная схема комбинированной ФЛ (первый вариант АФС):  
1, 3 — конические рупорные переходы; 2 — ДВ; 4 — пирамидальный рупорный переход;  
5 — СРМВ

Расчетные зависимости погонного затухания  $\alpha$  на прямом отрезке ДВ от длины волны  $\lambda$  для двух мод  $H_{10}$  и  $H_{01}$  приведены на рис. 2. Видно, что при  $\lambda \approx 1$  мм расчетные потери в СРМВ составляют 0,8 дБ/м для моды  $H_{10}$  и 0,5 дБ/м для моды  $H_{01}$ . В качестве рабочей моды ДВ выбрана мода  $H_{01}$ .

В целях обеспечения гибкости фидерного тракта в состав ФЛ введен отрезок одномодового ДВ сечением  $0,9 \times 0,5$  мм и минимально возможной длиной 30 см. Разработанные переходы с МВ стандартного и сверхразмер-

ного сечений на ДВ обеспечивают эффективное преобразование волны  $HE_{11}$  в волну  $H_{01}$ , и наоборот. Потери составляют не более 0,5 дБ [16]. Связь СРМВ с волноводным выходом РИ осуществляется отрезком ДВ, возбуждаемым коническими рупорными переходами [16, 17]. Для наилучшего согласования возбуждение рабочей моды в СРМВ осуществляется пирамидальным рупорным переходом длиной не менее  $100\lambda$ . Общие потери ФЛ (см. рис. 1), с учетом потерь на всех участках и волноводных переходах, составляют 4,4 дБ.



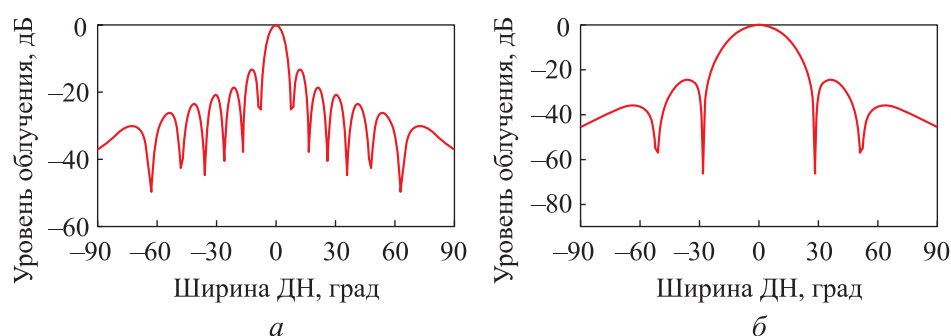
**Рис. 2.** Расчетные зависимости погонного затухания  $\alpha$  на прямом отрезке ДВ сечением  $7,2 \times 3,4$  мм от длины волны  $\lambda$  для двух мод

Участок СРМВ 5 (см. рис. 1) может быть реализован с плавным изгибом, обеспечивая расположение ФЛ под углом  $90^\circ$  к вектору разрушений ударной волны. Это решение позволит исключить участки 1–3 и неизбежные высокие потери на них, особенно при изгибах ДВ. Однако потребует разработки разъемного фланца на СРМВ на выходе ФЛ из взрывозащитного контейнера РИ для обеспечения разрыва при воздействии ударной волны.

Здесь и далее численное моделирование составных частей РИ и характеристик облучателей проводилось в программе трехмерного электромагнитного моделирования СВЧ-структур CST Microwave Studio. Используемый метод расчета во временной области позволяет возбуждать волноводную структуру широкополосным сигналом (гауссовым импульсом) и рассчитывать переходные процессы в заданном частотном диапазоне, используя дискретное преобразование Фурье, а также вычислять дальнейшее поле антенн и их характеристики излучения. Основу решения трехмерных задач электродинамики временным вычислителем составляет моделирование электромагнитного поля с использованием метода конечных элементов, основанного на дискретизации пространства. Метод остается устойчивым, когда шаг не превышает определенного предела, при этом

находят компромисс между желаемой точностью расчета (числом элементов разбиения) и доступными вычислительными ресурсами либо используют адаптивную сетку. Это особенно актуально при расчете поля в дальней зоне и дискретизации большой области пространства [18].

В качестве РО в комбинированном варианте построения АФС рассмотрены открытый конец СРМВ, а также открытый конец СРМВ с диэлектрическими вставками. Диаграммы направленности открытого конца СРМВ в  $E$ - и  $H$ -плоскостях приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Диаграммы направленности открытого конца СРМВ в  $E$ - (а) и  $H$ -плоскостях (б)

В результате моделирования выявлено, что в  $E$ -плоскости ширина ДН РО составляет  $7,4^\circ$ , уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН —  $-13,2$  дБ. В  $H$ -плоскости ширина ДН равна  $20,9^\circ$ , УБЛ —  $-24,7$  дБ.

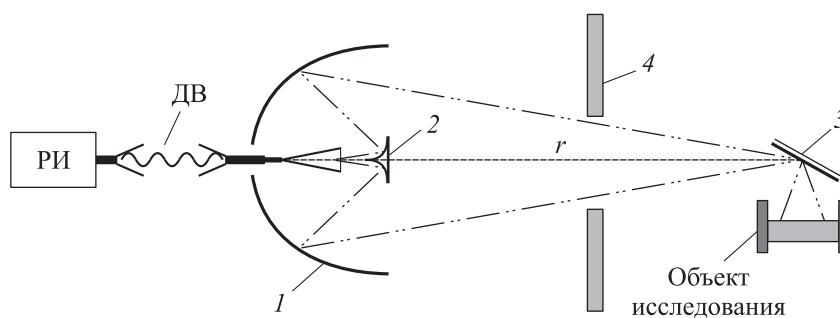
Для РИ трехмиллиметрового диапазона в НИИИС им. Н.Ю. Седакова разработаны и применяются излучатели с такими диэлектрическими выступающими вставками, как пирамида, усеченное острие и др. [19, 20]. При моделировании РО с диэлектрическими вставками в СРМВ на рабочей длине волны 1 мм вне зависимости от формы стержня значительно увеличивается УБЛ в обеих плоскостях, что является следствием неэффективного преобразования моды  $H_{01}$  СРМВ в моду  $HE_{11}$  диэлектрической вставки. Таким образом, в качестве РО АФС предлагается использовать открытый конец СРМВ как наиболее простой в реализации и имеющий приемлемые характеристики излучения.

**Материалы и методы решения задачи построения АФС на основе двухзеркальной антенны. Принятые допущения.** Такой вариант построения АФС основан на формировании в свободном пространстве осесимметричной двухзеркальной длиннофокусной антенной с эллиптической образующей малого зеркала волнового пучка [21].

К системам канализации излучения от РИ до исследуемого объекта предъявляются требования высокого пространственного разрешения, высокой концентрации излучения вдоль линии визирования объекта (низкий уровень фонового излучения), согласования с входом приемопередатчика РИ и объектом исследования. При этом система должна обеспечить минимально возможные потери в измерительном тракте. Затухание энергии электромагнитных волн в виде направленного сфокусированного волнового пучка в свободном пространстве определяется поглощением в воздухе, которое увеличивается с ростом частоты, однако на расстояниях в несколько метров затухание даже в субмиллиметровом диапазоне пренебрежимо мало. Так, на частоте 300 ГГц затухание не превышает 0,02 дБ/м.

Предъявленным требованиям оптимально удовлетворяет квазиоптическая двухзеркальная антенна с расщепленным фокусом. Рассмотрим возможность создания квазиоптической антенны в субмиллиметровом диапазоне.

Специфика применения АФС в радиоинтерферометрии заключается в необходимости совпадения линии визирования исследуемых объектов с траекторией их движения. В связи с этим для защиты зеркальной антенны от разрушения при газодинамических экспериментах в АФС вводится разрушаемое плоское зеркало, разделяющее в пространстве оптическую ось антенны и вектор разрушений, совпадающий с направлением движения объекта. Схема измерений приведена на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема измерений при использовании квазиоптической АФС:

1–3 — большое, малое и плоское зеркала; 4 — взрывозащита антенны;  
 $r$  — расстояние от апертуры до фокуса

Антенна возбуждает квазиоптическую направляющую систему с плоским зеркалом, которое позволяет в зависимости от размеров и дальности нахождения исследуемого объекта перенаправить падающий пучок и сфо-

кусировать его на объекте. Взрывозащита обеспечивает защиту антенны от ударной волны и осколков, возникающих при взрыве. В качестве демпфера связи РИ с антенной может использоваться отрезок ДВ длиной 40...60 мм.

При анализе работы антенны можно пользоваться геометрооптическим представлением (лучевой трактовкой распространения волн), поскольку выполняются условия ближней и промежуточных зон:  $r < 2D^2/\lambda$ , где  $D$  — апертура антенны. Ширина формируемого фокального пятна  $l$  на уровне половины максимальной интенсивности излучения определяется формулой Рэлея:  $l = 1,21\lambda r/D$ ,

а глубина резкости по уровню 0,9 максимума, соответствующего фокусу, для длиннофокусных антенн составляет примерно  $(30-50)\lambda$ . Фокусное расстояние равно  $3D$  апертуры и для фокусировки на расстоянии 1 м достаточно, чтобы  $D \approx 30$  см.

Схема рассматриваемой двухзеркальной антенны с расщепленным фокусом приведена на рис. 5.

Малая фокальная ось  $B-B'$  большого зеркала, выполненного в виде осесимметричной вырезки из эллипсоида вращения, смещена относительно оси антенны, и внутренний фокус зеркала  $F_n$  в пространстве образует фокальное кольцо, так называемый расщепленный фокус. След этого кольца в плоскости сечения антенны обозначен как  $F_n-F'_n$ . Диаметр малого зеркала  $d$  определяется из условия равенства расстояний между

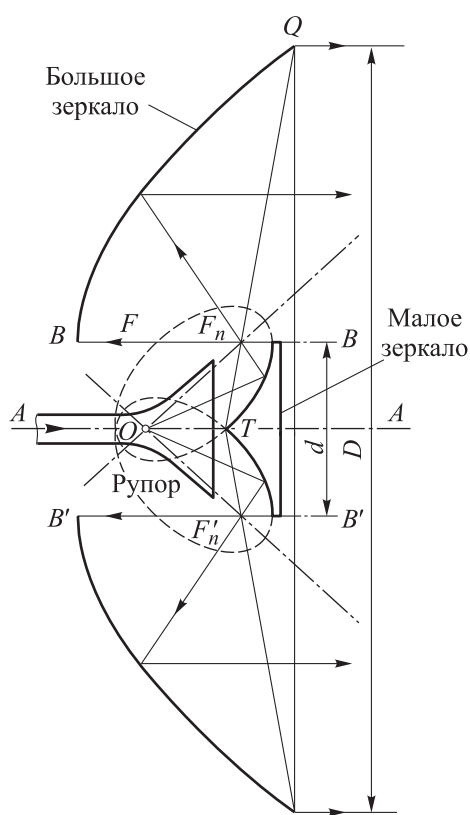


Рис. 5. Схема двухзеркальной антенны с расщепленным фокусом

фокусами  $F_n$  и  $F'_n$ . Малое зеркало выполняется в виде цилиндра, у которого обращенный к РО торец профилирован как осесимметричная вырезка из эллипсоида вращения. Один из фокусов (т.  $O$ ) лежит на оптической оси антенны и должен совпадать с фазовым центром РО.

В качестве второго фокуса эллипса выбирается фокус  $F_n$  (и симметричный фокус  $F'_n$ ). При этом точка пересечения эллипсов малого зеркала



с осью симметрии должна лежать на одной прямой с фокусом  $F_n$  и краем зеркала  $Q$ . В этом случае фокус  $F_n$  может рассматриваться как точечный источник, облучающий большое зеркало.

Малое зеркало на оси симметрии имеет коническое острие. Отсутствие отраженной энергии от острия в раскрыв РО позволяет располагать малое зеркало непосредственно перед его раскрывом.

Характеристики всей антенны во многом определяют ДН первичного источника — РО. При этом важны форма основного лепестка в секторе облучения малого зеркала, крутизна ДН и УБЛ вне сектора. К РО для создания оптимального распределения поля на апертуре антенны предъявляются следующие требования:

- четко выраженный фазовый центр РО, который должен совпадать с фокусом малого зеркала по оси антенны;
- осесимметричная ДН в  $E$ - и  $H$ -плоскостях;
- уровень облучения внешней кромки малого зеркала должен быть не более  $-15...-13$  дБ от максимального значения главного лепестка ДН во избежание утечки энергии за пределы малого зеркала и для минимизации дифракционных эффектов на кромке.

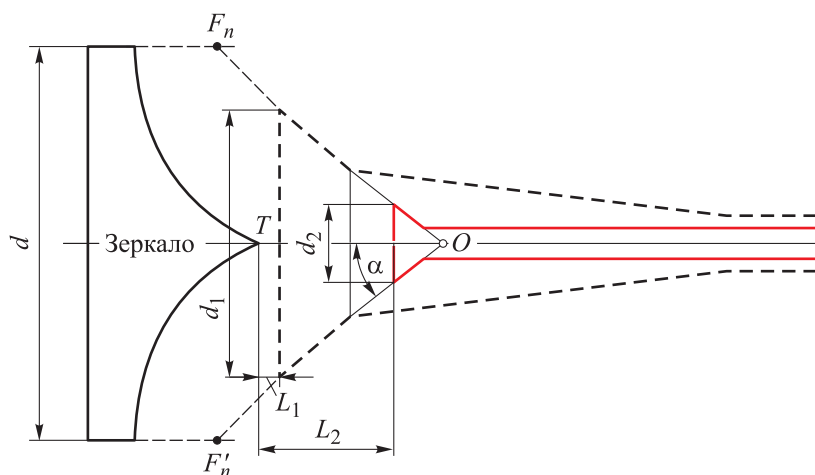
Этим требованиям удовлетворяет расфазированный конический РО с изломом конической образующей с углом  $40...50^\circ$  между образующей и осью симметрии. Фазовый центр у таких РО лежит у устья рупора.

В квазиоптической антенне, разработанной для конкретной частоты миллиметрового диапазона, система зеркал может быть использована также на любой другой, более высокой частоте. Это справедливо при обеспечении РО заданных соотношений фокусов ( $F_n$  и т.  $O$ ), а также требований к РО, приведенных ранее.

В работе [22] дано описание разработанной квазиоптической антенны трехмиллиметрового диапазона для радиоинтерферометрической диагностики газодинамических взрывных процессов. Диаметры  $D$  и  $d$  большого и малого зеркал составляют 320 и 20 мм. Антенна фокусирует излучение на расстоянии 984 мм от апертуры с разрешающей способностью по поперечной координате 10,5 мм и глубиной резкости (по уровню 0,9) 100 мм. В связи с широкополосностью система зеркал антенны может работать и в субмиллиметровом диапазоне, в частности на длине волны  $\lambda = 1$  мм, однако требует разработки соответствующего РО, эквивалентного облучателю трехмиллиметрового диапазона по электрическим характеристикам и конструктивному исполнению.

**Обсуждение полученных результатов.** Выполнена оценка размеров РО субмиллиметрового диапазона. Рупорные облучатели миллиметрового

и субмиллиметрового диапазонов и их взаимное расположение относительно малого зеркала приведены на рис. 6.

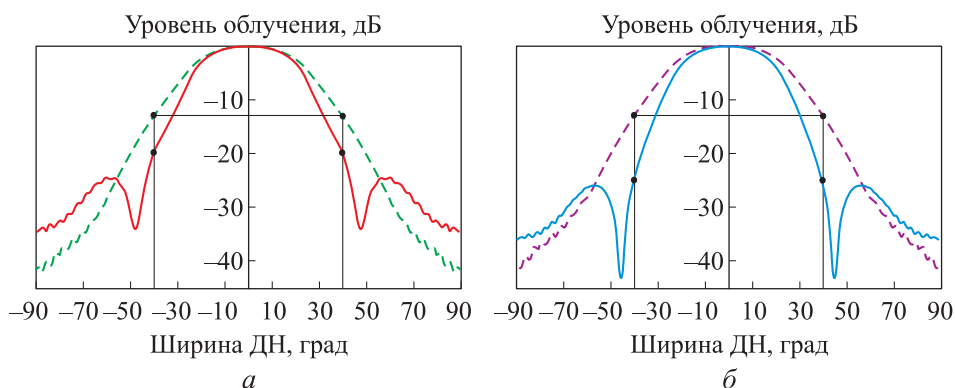


**Рис. 6.** Рупорные облучатели миллиметрового  $\lambda_1 = 3,2$  мм (штриховая) и субмиллиметрового  $\lambda_2 = 1$  мм (сплошная) диапазонов и их взаимное расположение относительно малого зеркала

Параметры РО трехмиллиметрового диапазона взаимосвязаны с фокусами большого и малого зеркал. Угол  $\alpha$  полуоткрыва излучающего расфазированного РО равен  $45^\circ$  и совпадает с углом отрезка  $OF_n$  относительно оси симметрии. Диаметр фокального кольца  $F_n - F'_n$  равен диаметру малого зеркала ( $d = 20$  мм). Требуемое соотношение фазового центра РО и фокусов зеркал выполняется при расстоянии  $OT = 9,1$  мм. Близкая к симметричной ДН РО с уровнем облучения внешней кромки малого зеркала не более  $-13$  дБ от максимума ДН обеспечивается при  $d_1 = 13,5$  мм.

Для достижения взаимосвязи фокусов зеркал и геометрических размеров РО, работающего на длине волны  $\lambda_2 = 1$  мм, необходимо сохранить угол  $\alpha$ , расстояние  $OT$  от фазового центра  $O$  до конического острия  $T$  малого зеркала и диаметр фокального кольца  $F_n - F'_n$ . Чтобы получить на  $\lambda_2 = 1$  мм ДН, идентичную ДН трехмиллиметрового РО, диаметр апертуры  $d_2$  должен быть равен  $4,45$  мм и выбран из соотношения  $d_1 / \lambda_1 = d_2 / \lambda_2$ . Расстояние  $L_2$  от апертуры РО до острия малого зеркала увеличивается от  $2,35$  до  $6,85$  мм.

Результаты численного моделирования в программе CST Microwave Studio характеристик излучения обоих РО на рабочей длине волны  $\lambda = 3,2$  мм приведены на рис. 7, а.



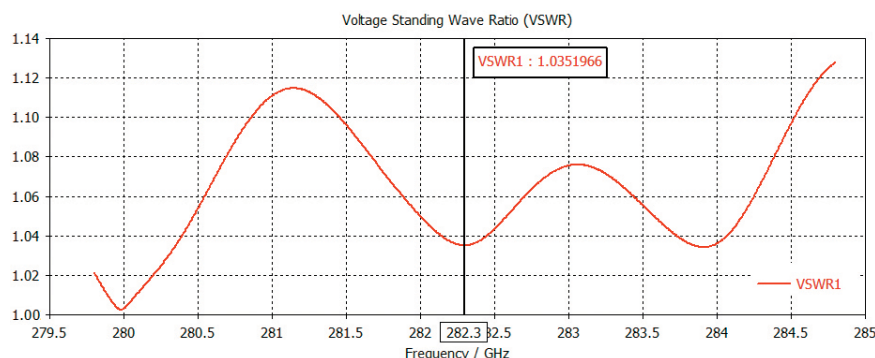
**Рис. 7.** Диаграммы направленности РО миллиметрового диапазона на рабочей длине волны  $\lambda = 3,2$  мм (а) и предлагаемого однорупорного облучателя субмиллиметрового диапазона на рабочей длине волны  $\lambda = 1$  мм (б) в  $E$ - и  $H$ -плоскостях

Рупорный облучатель формирует практически симметричную ДН шириной 39 и 42,5° в  $E$ - и  $H$ -плоскостях. Уровень облучения кромки малого зеркала не более -20 дБ ( $E$ -плоскость) и -13 дБ ( $H$ -плоскость). Эти уровни на ДН отмечены точками.

Результаты моделирования ДН предлагаемого РО, работающего на частоте  $\lambda_2 = 1$  мм, приведены на рис. 7, б. Конструкция РО была оптимизирована вследствие исключения синфазного рупора с меньшим диаметром раскрыва и соединения излучающего расфазированного рупора непосредственно с круглым МВ диаметром 1,77 мм. Применение такого решения упростило технологию изготовления и улучшило характеристики (даже УБЛ) РО.

Сравнение ДН двух рассмотренных РО показывает практически полное их совпадение. Ширина ДН предлагаемого РО составила 37,3 и 44,4° в  $E$ - и  $H$ -плоскостях. Уровень облучения кромки малого зеркала не более -25 и -13 дБ в соответствующих плоскостях. Обеспечена идентичность характеристик излучения двух РО, что позволит применять предложенную конструкцию на длине волны  $\lambda = 1$  мм для облучения трехмиллиметровой двухзеркальной АФС без перерасчета конструкций эллиптических поверхностей.

Частотная зависимость коэффициента стоячей волны (КСВН) предлагаемого РО, полученная по результатам численного моделирования в программе CST Microwave Studio, приведена на рис. 8. Метод расчета во временной области заключается в расчете параметров в широком диапазоне частот по единственному расчету переходного процесса с использованием преобразования Фурье.



**Рис. 8.** Частотная зависимость КСВН предлагаемого РО, полученная в программе CST Microwave Studio по результатам численного моделирования

На рабочей длине волны РИ  $\lambda_2 = 1$  мм значение КСВН составляет 1,035, что подтверждает высокое качество предлагаемого РО.

**Заключение.** Предложены два варианта построения АФС для РИ субмиллиметрового диапазона длин волн.

Первый вариант, основанный на применении СРМВ, несмотря на достаточно высокие потери в тракте, технологически достаточно прост. Он пригоден для однократного использования в постановках разрушающего эксперимента, когда защита АФС нецелесообразна или невозможна.

Второй вариант применим при наличии защиты антенны от воздействия ударной волны и осколочного поражения. Квазиоптическая АФС, хотя технологически более сложна, позволяет реализовать пространственное разрешение порядка длины волны и получить минимальные потери в измерительном тракте, что расширяет возможности диагностики и увеличивает точность измерений параметров газодинамических процессов в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Михайлов А.Л., Костюков В.Е., Орехов Ю.И. и др. Некоторые результаты применения в ИФВ РФЯЦ — ВНИИЭФ радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн для изучения газодинамических процессов. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Тр. Междунар. конф. «XV Харионовские тематические научные чтения»*. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2013, с. 649–654.

[2] Канаков В.А., Катин С.В., Корнев Н.С. и др. Состояние и перспективы развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов. *Антенны*, 2016, № 1, с. 49–54.

- [3] Михайлов А.Л., ред. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2015.
- [4] Ильяев Р.И., Михайлов А.Л., Жерноклетов М.В., ред. Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества. М., РАН, 2021.
- [5] Mays R.O., Tringe J.W., Souers P.C., et al. Experimental and computational investigation of microwave interferometry for detonation front characterization. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 1979, art. 160016. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5045015>
- [6] Zhai Z.-H., Sun C.-L., Liu Q., et al. Design of terahertz-wave Doppler interferometric velocimetry for detonation physics. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, vol. 116, no. 16, art. 161102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5142415>
- [7] McCall G.H., Bongiani W.L., Miranda G.A. Microwave interferometer for shock wave, detonation and material motion measurements. *Rev. Sc. Instrum.*, 1985, vol. 56, no. 8, pp. 1612–1618. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1138110>
- [8] Взятыхшев В.Ф. Диэлектрические волноводы. М., Советское радио, 1970.
- [9] Кох Б. Радиоэлектронные методы исследования быстропротекающих процессов. В: *Физика быстропротекающих процессов*. Т. 1. М., Мир, 1971, с. 382–462.
- [10] Панкратов А.Г., Чуркин С.С. Зондирующие устройства микроволновой РИ на диэлектрических волноводах для исследования объектов на значительных расстояниях. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Тр. Междунар. конф. «XV Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2013, с. 360–361.
- [11] Гайнулина Е.Ю., Минеев К.В., Орехов Ю.И. и др. Волноводный тракт со сверхмалыми потерями для микроволновой диагностики объектов на больших расстояниях. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Тр. Междунар. конф. «XIX Харитоновские тематические научные чтения»*. Т. 2. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2018, с. 342–347.
- [12] Паршин В.В., Серов Е.А., Николенко А.С. и др. Современные полимеры для мм и субмм волн. *Матер. 28-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*. Севастополь, СевГУ, 2018, с. 831–837.
- [13] Валитов Р.А., ред. Техника субмиллиметровых волн. М., Советское радио, 1969.
- [14] Айвазян М.Ц. Направляющие системы терагерцового диапазона. *Вестник НПУА. Информационные технологии, электроника, радиотехника*, 2019, № 2, с. 9–27.
- [15] Костенко А.А. Квазиоптика: исторические предпосылки и современные тенденции развития. *Радиофизика и радиоастрономия*, 2000, т. 5, № 3, с. 221–246.
- [16] Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Минеев К.В. и др. Гибкий волновод для связи металлических волноводов стандартного и сверхразмерного сечений. Патент РФ 2657318. Заявл. 06.03.2017, опубл. 13.06.2018.

- [17] Взятыйшев В.Ф., Орехов Ю.И., Панкратов А.Г. и др. Волноводный переход от металлического волновода к диэлектрическому. Патент РФ 2557472. Заявл. 21.01.2014, опубл. 20.07.2015.
- [18] Курушин А.А. Школа проектирования СВЧ-устройств в CST Studio Suite. М., Сам Полиграфист, 2014.
- [19] Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Назаров А.В. Исследование возможности создания малогабаритной антенно-фидерной системы КВЧ-радиоинтерферометра. *Матер. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные системы и технологии»*. Н. Новгород, НГТУ, 2017, с. 1062–1067.
- [20] Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Назаров А.В. и др. Диэлектрические излучатели для малогабаритной антенно-фидерной системы КВЧ диагностики в замкнутых объемах. *Матер. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные системы и технологии»*. Н. Новгород, НГТУ, 2018, с. 33–39.
- [21] Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. Ч. 2. М., Связь. 1977.
- [22] Канаков В.А., Орехов Ю.И., Пелюшенко С.А. и др. Антенны КВЧ-диапазона для систем радиовидения. *Антенны*, 2006, № 5, с. 13–16.

**Гайнулина Екатерина Юрьевна** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела разработки КВЧ измерительных систем ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ» (Российская Федерация, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр-т Мира, д. 37).

**Иконников Владимир Николаевич** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела разработки КВЧ измерительных систем ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ» (Российская Федерация, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр-т Мира, д. 37).

**Корнев Николай Сергеевич** — начальник научно-исследовательской группы разработки комплексов измерительных систем ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ» (Российская Федерация, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр-т Мира, д. 37).

**Назаров Андрей Викторович** — канд. техн. наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения, начальник научно-исследовательского отдела разработки КВЧ измерительных систем ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ» (Российская Федерация, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр-т Мира, д. 37).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Гайнулина Е.Ю., Иконников В.Н., Корнев Н.С. и др. Варианты построения антенно-фидерной системы для задач радиоинтерферометрических измерений в субмиллиметровом диапазоне. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 2 (147), с. 37–54. EDN: HHUNKE

## OPTIONS IN CONSTRUCTING AN ANTENNA-FEEDER SYSTEM FOR THE RADIO INTERFEROMETRIC MEASUREMENTS IN THE SUB-MM RANGE

**E.Yu. Gaynulina**

okatrin@list.ru

**V.N. Ikonnikov**

ikonnikov-vn@yandex.ru

**N.S. Kornev**

korneff15@rambler.ru

**A.V. Nazarov**

nazarov52@mail.ru

**Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics”, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation**

---

### Abstract

Microwave radio interferometers are widely used to solve the short-range radar problems in studying the fast gas-dynamic processes; they make it possible to analyze the motion dynamics and reconstruct the deformation picture of the moving surface front. Taking into account specifics of the gas-dynamic explosive processes, radio interferometers should be placed at distances of several meters from the diagnostics object, and its feed line emitters should be positioned in close proximity to the object. To minimize losses in the submillimeter range feeder line at distances of 1–1.5 mm from the radio interferometer to the object, the paper proposes two options for testing the radiation channeling systems. The first option is based on the unique property of the supersized metal waveguides, i.e., sharp decrease in linear losses with the increasing ratio of the waveguide transverse size to the wavelength. A feeder line is proposed that contains extended sections of the supersized metal waveguides and short flexible sections of the dielectric waveguide. The second option of the radio interferometer antenna-feeder system is based on formation of the focused wave beam in free space by a two-mirror long-focus antenna with the split focus. Design option for the antenna-feeder system with beam focusing at the distance of 1 m from the antenna opening is considered. Based on the numerical simulation results, the optimal horn feed was selected providing the required radiation pattern and the ratio be-

### Keywords

*Submillimeter range, supersized metal waveguide, dielectric waveguide, quasi-optical antenna, EHF interferometer*

tween the two mirrors foci and the feed. Introduction of the proposed quasi-optical antenna-feeder system as part of the radio interferometer makes it possible to obtain minimum possible losses in the measuring path and expand diagnostics capabilities in the submillimeter range

Received 01.08.2023

Accepted 30.01.2024

© Author(s), 2024

## REFERENCES

- [1] Mikhaylov A.L., Kostyukov V.E., Orekhov Yu.I., et al. [Some results of application of millimetre wavelength range radio interferometers for study of gas dynamic processes at the Institute of Physics and Technology of RFNC — VNIIEF]. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Tr. Mezhdunar. konf. "XV Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya"* [Extreme States of Substance. Detonation. Shock Waves. Proc. Int. Conf. XV Kharitonov Thematic Scientific Readings]. Sarov, RFNC — VNIIEF Publ., 2013, pp. 649–654 (in Russ.).
- [2] Kanakov V.A., Katin S.V., Kornev N.S., et al. State and prospects of development of microwave radio interferometry for gas-dynamic processes diagnostics. *Antenny* [Antennas], 2016, no. 1, pp. 49–54 (in Russ.).
- [3] Mikhaylov A.L., ed. *Nevozmushchayushchie metody diagnostiki bystroprotekayushchikh protsessov* [Non-perturbing methods of diagnostics of fast processes]. Sarov, RFNC — VNIIEF Publ., 2015.
- [4] Ilkaev R.I., Mikhaylov A.L., Zhernokletov M.V., eds. *Eksperimentalnye metody i sredstva v fizike ekstremalnykh sostoyaniy veshchestva* [Experimental methods and tools in physics of extreme states of matter]. Moscow, RAS, 2021.
- [5] Mays R.O., Tringe J.W., Souers P.C., et al. Experimental and computational investigation of microwave interferometry for detonation front characterization. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 1979, art. 160016. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5045015>
- [6] Zhai Z.-H., Sun C.-L., Liu Q., et al. Design of terahertz-wave Doppler interferometric velocimetry for detonation physics. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, vol. 116, no. 16, art. 161102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5142415>
- [7] McCall G.H., Bongianini W.L., Miranda G.A. Microwave interferometer for shock wave, detonation, and material motion measurements. *Rev. Sc. Instrum.*, 1985, vol. 56, no. 8, pp. 1612–1618. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1138110>
- [8] Vzyatyshev V.F. *Dielektricheskie volnovody* [Dielectric waveguides]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970.
- [9] Kokh B. Radioelektronnye metody issledovaniya bystroprotekayushchikh protsessov [Radio-electronic methods of investigation of fast processes]. V: *Fizika bystroprotekeyushchikh protsessov*. T. 1 [In: Physics of fast processes. Vol. 1]. Moscow, Mir Publ., 1971, pp. 382–462 (in Russ.).
- [10] Pankratov A.G., Churkin S.S. [Probing devices of microwave RI on dielectric waveguides for investigation of objects at considerable distances]. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Tr. Mezhdunar. konf. "XV Kharitonovskie*



*tematicheskie nauchnye chteniya*". [Extreme States of Substance. Detonation. Shock Waves. Proc. Int. Conf. XV Kharitonov Thematic Scientific Readings]. Sarov, RFNC — VNIIEF Publ., 2013, pp. 360–361 (in Russ.).

[11] Gaynulina E.Yu., Mineev K.V., Orekhov Yu.I., et al. [Ultra-low-loss waveguide path for microwave diagnostics of objects at long distances]. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Tr. Mezhdunar. konf. "XIX Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya"*. Т. 2 [Extreme States of Substance. Detonation. Shock Waves. Proc. Int. Conf. XIX Kharitonov Thematic Scientific Readings. Vol. 2]. Sarov, RFNC — VNIIEF Publ., 2018, pp. 342–347 (in Russ.).

[12] Parshin V.V., Serov E.A., Nikolenko A.S., et al. [Modern polymers for mm and submmw]. *Mater. 28-y Mezhdunar. Krymskoy konf. "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii"* [Proc. 28nd Int. Crimean Conf. Microwave Equipment and Telecommunication Technologies]. Sevastopol, SevSU Publ., 2018, pp. 831–837 (in Russ.).

[13] Valitov R.A., ed. *Tekhnika submillimetrovykh voln* [Submillimetre wave technique]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1969.

[14] Ayvazyan M.Ts. Guiding systems for the terahertz range. *Vestnik NPUA. Informatsionnye tekhnologii, elektronika, radiotekhnika* [Proceedings. Information Technologies, Electronics, Radio Engineering], 2019, no. 2, pp. 9–27 (in Russ.).

[15] Kostenko A.A. Quasi-optics: historical background and current development trends. *Radiofizika i radioastronomiya*, 2000, vol. 5, no. 3, pp. 221–246 (in Russ.).

[16] Gaynulina E.Yu., Kornev N.S., Mineev K.V., et al. *Gibkiy volnovod dlya svyazi metallicheskih volnovodov standartnogo i sverkhrazmernogo secheniy* [Flexible waveguide for coupling metal waveguides of standard and super-dimensional cross sections]. Patent RU 2657318. Appl. 06.03.2017, publ. 13.06.2018 (in Russ.).

[17] Vzyatyshev V.F., Orekhov Yu.I., Pankratov A.G., et al. *Volnovodnyy perekhod ot metallicheskogo volnovoda k dielektricheskomu* [Waveguide adapter from metal waveguide to dielectric waveguide]. Patent RU 2557472. Appl. 21.01.2014, publ. 20.07.2015 (in Russ.).

[18] Kurushin A.A. *Shkola proektirovaniya SVCh ustroystv v CST Studio Suite* [Micro-wave device design school in CST Studio Suite]. Moscow, Sam Poligrafist Publ., 2014.

[19] Gaynulina E.Yu., Kornev N.S., Nazarov A.V. [Investigation on the possibility of developing compact antenna-feeder system for uhf radiointerferometer]. *Mater. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. "Informatsionnye sistemy i tekhnologii"* [Proc. Int. Sc.-Tech. Conf. Information Systems and Technologies]. Nizhniy Novgorod, NSTU Publ., 2017, pp. 1062–1067 (in Russ.).

[20] Gaynulina E.Yu., Kornev N.S., Nazarov A.V., et al. [Dielectric radiators for compact antenna-feeder system for uhf diagnostics in closed volumes]. *Tez. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. "Informatsionnye sistemy i tekhnologii"* [Proc. Int. Sc.-Tech. Conf. Information Systems and Technologies]. Nizhniy Novgorod, NSTU, 2018, pp. 33–39 (in Russ.).

[21] Ayzenberg G.Z., Yampolskiy V.G., Tereshin O.N. *Antenny UKV. Ch. 2. [Antennas VHF]*, Moscow, Svyaz Publ., 1977.

[22] Kanakov V.A., Orekhov Yu.I., Pelyushenko S.A., et al. Antennas for EHF-band radiovision systems. *Antenny [Antennas]*, 2006, no. 5, pp. 13–16 (in Russ.).

**Gaynulina E.Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Department of Scientific Research for the EHF Measuring Systems Development, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics” (Mira prospekt 37, Sarov, Nizhniy Novgorod Region, 607188 Russian Federation).

**Ikonnikov V.N.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Department of Scientific Research for the EHF Measuring Systems Development, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics” (Mira prospekt 37, Sarov, Nizhniy Novgorod Region, 607188 Russian Federation).

**Kornev N.S.** — Head of the Research Group for Development of the Measuring System Complexes, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics” (Mira prospekt 37, Sarov, Nizhniy Novgorod Region, 607188 Russian Federation).

**Nazarov A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Research Department, Head of the Research Department for the EHF Measuring Systems Development, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics” (Mira prospekt 37, Sarov, Nizhniy Novgorod Region, 607188 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Gaynulina E.Yu., Ikonnikov V.N., Kornev N.S., et al. Options in constructing an antenna-feeder system for the radio interferometric measurements in the sub-mm range. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 2 (147), pp. 37–54 (in Russ.). EDN: HHUNKE