

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМНИКА С РАЗДЕЛЕНИЕМ БОКОВЫХ ПОЛОС ДЛЯ ДИАПАЗОНА 211...275 ГГц

© 2023 г. И. В. Третьяков^{a, b, *}, А. В. Худченко^{a, c}, Р. А. Черный^a, С. Ф. Лихачев^a

^a Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117810 Российская Федерация

^b Московский педагогический государственный университет,
ул. Малая Пироговская, 1/1, Москва, 119435 Российская Федерация

^c Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр.7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: tretyakov@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Описаны СВЧ-свойства составных частей волноводной структуры гетеродинного приемника диапазона 211...275 ГГц с разделением боковых полос на основе пары туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС). Исследованы следующие элементы волноводной структуры: гибридный четырехпортовый делитель, направленный ответвитель, Т-образный делитель и волноводный поглотитель. Рассчитаны S параметры для всех элементов. Для гибридного делителя дополнительно приведен фазовый баланс, имеющий отклонения менее 0.4 град, и амплитудный баланс в пределах 1 дБ. Проанализирован ожидаемый уровень качества разделения полос в приемнике с разделением полос при использовании исследованных волноводных элементов, величина его составляет более –25 дБ. Волноводные элементы спроектированы с учетом того, что блок будет изготавливаться методом прецизионного фрезерования; минимальные размеры волноводной структуры ограничиваются диаметром используемой фрезы, в нашем случае выбрано 100 мкм. Все численные расчеты были выполнены методом конечных интервалов в пакете HFSS.

DOI: 10.31857/S0033849423090243, EDN: RHTEEX

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высококочувствительные когерентные приемниками с разделением боковых полос для диапазона 1.1...1.4 мм на основе смесителей на туннельном переходе сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) [1–4] позволяют проводить астрономические наблюдения с предельной чувствительностью. Наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых телескопах позволяют решать фундаментальные задачи по изучению Вселенной, связанные с вопросами образования и эволюции звезд и планетных систем, устройством окрестности черных дыр, происхождением воды и появлении жизни. Колоссальную научную значимость миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для астрономии подтверждают результаты наблюдений на существующих в мире обсерваториях, наиболее известные из которых ALMA (<https://www.eso.org/public/teles-instr/alma/>), NOEMA (<https://iram-institute.org/observatories/noema/>), SMA (<https://lweb.cfa.harvard.edu/sma/>),

APEX (<http://www.apex-telescope.org/ns/>), IRAM, SPT и др. В частности, приборы с высоким частотным разрешением позволяют наблюдать огромное количество спектральных линий, дающих уникальную информацию о химическом составе и физических параметрах межзвездной среды [5], и делать открытия в области образования и эволюции звезд, а также планетных систем. Венцом развития таких обсерваторий стало недавнее объединение большей их части в единый интерферометр – телескоп горизонта событий (Event Horizon Telescope, EHT) (<https://eventhorizontelescope.org>), дающий сверхвысокое угловое разрешение, позволяющее провести наблюдение окружения сверхмассивных черных дыр вблизи горизонта событий. Эти измерения проводились на длине волны 1.3 мм. Космическая пыль, искажающая оптические и инфракрасные сигналы, и плазма, рассеивающая длинноволновое и радиоизлучение, прозрачны в миллиметрах.

Космический телескоп “Миллиметрон” (<https://millimetron.ru/>) будет работать в режиме интерферометра Земля–космос. Данные со спутника будут коррелированы с данными с наземных телескопов, полученными с помощью приемников с разделением боковых полос [6, 7]. Такой приемник в два раза снижает вклад шумов атмосферы, а также влияние флуктуаций атмосферы, поэтому именно этот тип приемника установлен на наземных телескопах. В таком случае использование на борту “Миллиметрона” приемника с разделением боковых полос даст итоговую чувствительность интерферометра в 1.41 раза больше, чем в случае применения двухполосного приемника. Отметим также, что упомянутый приемник идеален для применения в перспективных проектах субтерагерцовой радиоастрономии [8].

Создание сверхчувствительных приемников является сложной научно-технической задачей и требует следующих шагов: развития и отработки технологии проектирования и изготовления волноводных структур для криогенного применения; разработки и изучения специализированных сверхпроводниковых туннельных наноструктур, СИС-смесителей; системного моделирования всего комплексного приемника с разделением боковых полос.

Цель данной статьи — представить электромагнитный и механический дизайн волноводного блока, обеспечивающего разделение полос с параметрами SRR лучше -25 дБ, отражением по входу лучше -25 дБ, балансом амплитуды сигнала лучше 1 дБ, балансом фазы сигнала лучше 0.4 град.

2. ВОЛНОВОДНЫЙ БЛОК ПРИЕМНИКА С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПОЛОС ДИАПАЗОНА 211...275 ГГц

За основу был выбран дизайн элементов волноводного блока приемника с разделением полос диапазона 600...720 ГГц [14] (ALMA Band 9). Однако размерное масштабирование этого дизайна на частоты 211...275 ГГц ожидаемо не обеспечило требуемую полосу частот гибридного делителя. Для решения этой задачи было увеличено количество щелей в гибридном делителе с 5 до 7.

На рис. 1 представлен общий вид сборки приемника с разделением полос. На волноводных камерах установлены SMA-разъемы. По ним будут выходить ПЧ-сигналы с одиночных СИС-смесителей в диапазоне 4...12 ГГц. Сигнал и опорный сигнал генератора гетеродина подаются в СИС-смесители по волноводам сечением 1×0.5 мм со входами на фланцах волноводного блока. Магнитное поле концентрируется на СИС-смесителях с помощью магнитопроводов.

На рис. 2 приведен чертеж, детально отображающий геометрию волноводной структуры сплит-

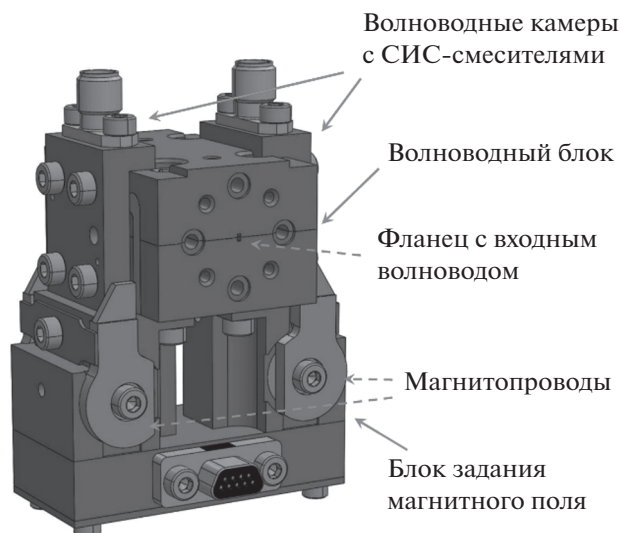


Рис. 1. Приемник диапазона 211...275 ГГц с разделением боковых полос на основе пары СИС-смесителей.

блока. Через порт 1 задается внешний сигнал. Далее он разделяется на две части, которые направляются к одиночным (СИС-смесителям СИС-1 и СИС-2 (порты 3 и 4 соответственно). При этом фаза сигнала, идущего на смеситель СИС-2, повернута на $+90^\circ$ относительно фазы сигнала, идущего на СИС-1. Частично сигналы будут отражаться, и поэтому для подавления основной части этих отражений используется волноводный поглотитель, (порт 2). С противоположной от порта 1 стороны блока, через порт 7, подается сигнал опорного генератора (гетеродина). Далее он делится пополам в делителе мощности. Малые доли сигнала опорного генератора проходят через направленные ответвители и следуют к одиночным СИС-смесителям, основная же мощность проходит к нагрузкам (порты 5 и 6), и большей частью поглощается в них.

Ключевыми функциональными элементами волноводного блока являются следующие.

1. Волноводный гибридный делитель мощности осуществляет разделение сигнала на две равные части с поворотом фазы для одной части на 90° относительно второй.

2. Волноводные направленные ответвители используются для введения сигнала опорного генератора на одиночные СИС-смесители.

3. Делитель мощности опорного генератора разделяет сигнал опорного генератора на две равные части, которые далее подаются через направленные ответвители на одиночные СИС-смесители.

4. Поглотители. В блоке используется три таких элемента. Их функция заключается в поглощении приходящих сигналов для минимизации

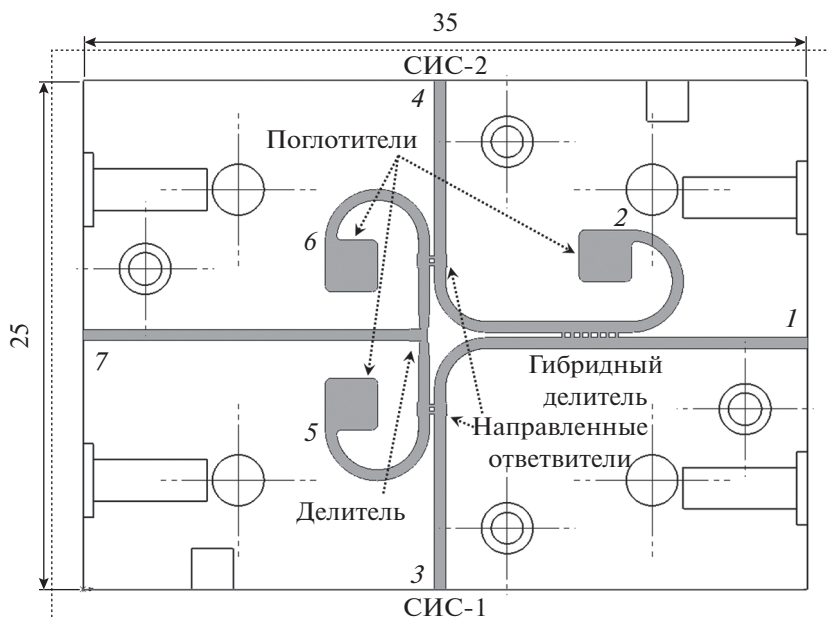


Рис. 2. Волноводный сплит-блок диапазона 211...275 ГГц с разделением боковых полос на основе пары СИС-смесителей: серым выделена волноводная структура, 1–7 – номера портов, СИС-1 и СИС-2 – выходы, на которых будут размещаться волноводные камеры с СИС-смесителями).

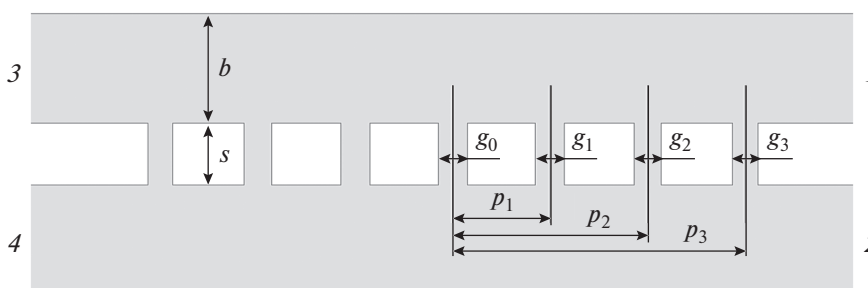


Рис. 3. Схема волноводного гибридного делителя: 1...4 – порты гибрида; $g_0 = 124$, $g_1 = 124$, $g_2 = 116$, $g_3 = 108$ – ширины щелей; $p_1 = 428$, $p_2 = 856$, $p_3 = 1284$, обозначают положение щелей относительно середины центральной щели g_0 ; $s = 290$ – расстояние между волноводами гибрида; $b = 500$ – высота волновода. Все размеры – приведены в мкм.

влияния стоячих волн на работу всего смесителя. Один из поглотителей соединен волноводом с соответствующим выходом гибридного разделителя и используется для поглощения утечек, попадающих на этот выход. Основная задача двух других поглотителей заключается в поглощении сигнала опорного генератора, попадающего на выход направленных ответвителей.

При проектировании волноводных элементов предполагалось, что углубления под волновод будут сделаны с помощью фрезерования. Размер волновода определен и имеет ширину $a = 1000$ мкм и высоту $b = 500$ мкм. Изготовление блока предполагается по стандартной технологии разделения на две половины, так что волновод составляется из двух частей, соединяющихся вдоль линий электрического поля в середине волновода. Это значит, что глубина погружения фрезы при изготовлении будет 0.5 мм. Данный размер накладывает

ограничение на минимальный допустимый диаметр фрезы и, как следствие, на минимальный размер при изготовлении волноводных щелей в гибридном разделителе и в направленных ответвителях. С учетом технической возможности было принято решение, что минимальный диаметр фрезы, используемой при изготовлении, будет 0.1 мм. На скруглениях внутренних углов в волноводных элементах используется диаметр величиной также не меньше 0.1 мм.

2.1. Гибридный четырехпортовый делитель

Геометрическая модель волноводной структуры гибридного делителя мощности представлена на рис. 3. Он обладает осевой симметрией относительно центра и обеспечивает связь двух волноводов посредством семи щелевых соединений. Щели имеют различную ширину и расположены

с нерегулярным шагом. Минимальная ширина щели (величина g_3) составляет 108 мкм, поэтому структура может быть изготовлена фрезой диаметром 100 мкм. Число щелей было подобрано так, чтобы обеспечить широкую полосу рабочих частот. Сигнал протекает через щели и синфазно складывается таким образом, что на выходах 3 и 4 мы имеем два сигнала почти одинаковой амплитуды и с разностью фаз, близкой к 90° .

Рассчитанное согласование между портами гибрида приведено на рис. 4. Уровень S_{31} и S_{41} , близок к -3 дБ. Уровень отражения S_{11} и утечки S_{21} (этот параметр также называют изоляцией) доведен до значений ниже -25 дБ. Это сделано специально для минимизации отражений во всей волноводной структуре, отражение негативно влияет на работу всего приемника.

С использованием S -параметров были рассчитаны фазовый и амплитудный баланс гибридного делителя. Амплитудный баланс показывает отношение мощностей разделенных сигналов и обычно выражается в дБ. На рис. 5 представлен баланс амплитуды в диапазоне 211...275 ГГц, который не превышает 1 дБ. Разность фаз этих же выходных сигналов рассчитана как разность аргументов комплексных величин S_{31} и S_{41} : $\arg S_{31} - \arg S_{41}$. Зависимость этой величины от частоты показана на рис. 6. Как видно из рисунка, фазовый баланс остается в пределах 0.4° .

Фазовый и амплитудный баланс показывают качество работы волноводного делителя, однако не отображают напрямую, насколько качественно он будет осуществлять разделение полос. Для этого наиболее показательным является расчет качества разделения полос SRR (Sideband Rejection Ratio) с предпосылкой, что нарушение баланса происходит только в самом делителе. В этом случае зависимость SRR может быть рассчитана по формуле

$$SRR = 20 \lg \left| \frac{S_{41} + iS_{31}}{S_{41} - iS_{31}} \right|.$$

График зависимости представлен на рис. 7. Уровень SRR не превышает -25 дБ в рабочем диапазоне.

2.2. Направленный ответвитель

Геометрическая модель направленного ответвителя представлена на рис. 8. Ответвитель имеет две щели, кроме того, ширина b волновода увеличена для расширения рабочей полосы.

Частотные характеристики ответвителя представлены на рис. 9. Коэффициент ответвления мощности составляет порядка -16 дБ. Данный уровень согласования позволяет доставить доста-

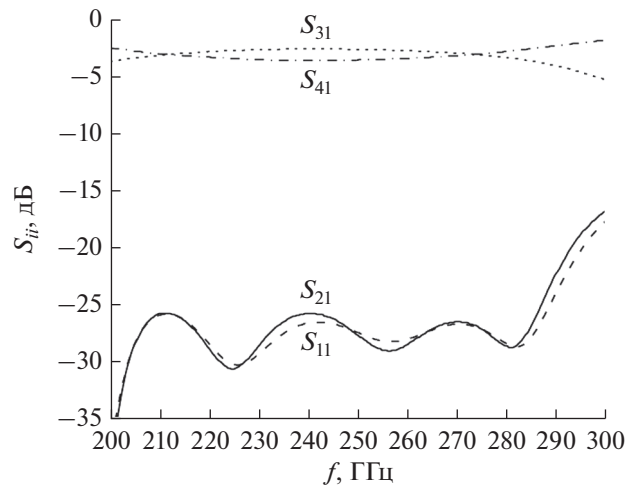


Рис. 4. S -параметры гибридного делителя.

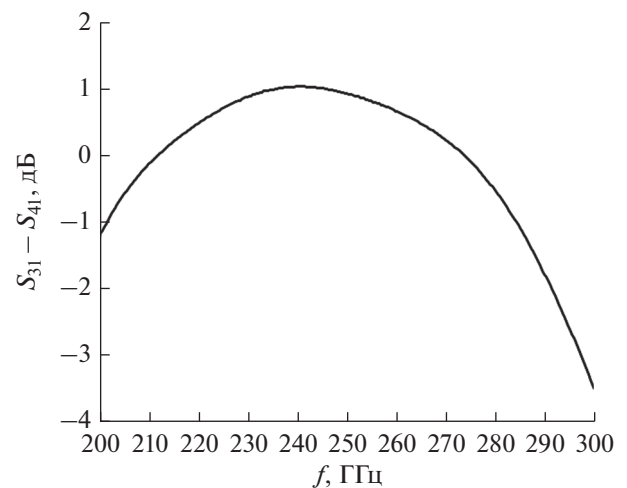


Рис. 5. Амплитудный баланс гибридного делителя.

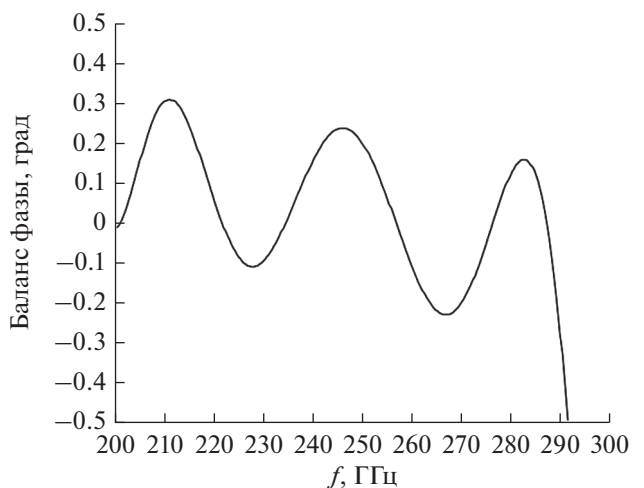


Рис. 6. Фазовый баланс гибридного делителя.

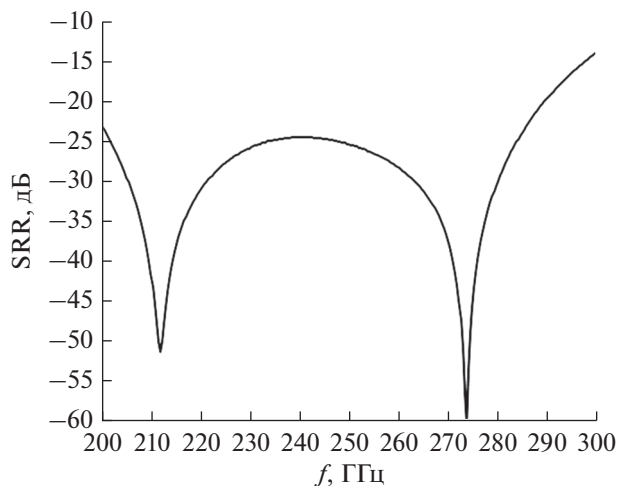


Рис. 7. Зависимость уровня разделения полос SRR от частоты, построенная на основе баланса одного волноводного гибридного делителя.

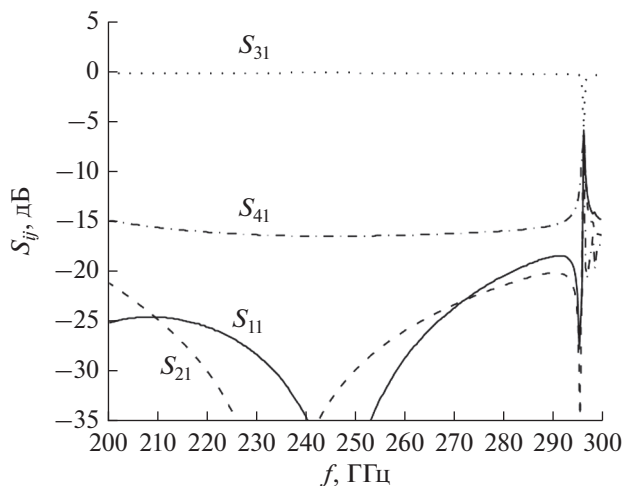


Рис. 9. Частотные характеристики волноводного ответвителя.

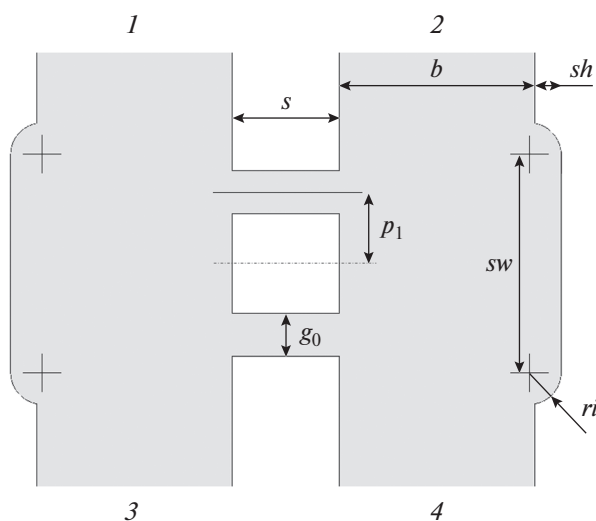


Рис. 8. Волноводный направленный ответвитель: 1–4 – порты, $b = 500$, $s = 276$, $g_0 = 108$, $p_1 = 183$, $sw = 560$, $sh = 67$, $ri = 80$. Все размеры даны в мкм.

точную мощность на СИС-смесители, при этом потери принимаемого сигнала будут около 2.5%, или 0.1 дБ, а тепловые шумы генератора будут подавляться в 40 раз.

2.3. Делитель мощности

Делитель мощности изображен на рис. 10. Он реализован в виде Т-образного разветвителя, т.е. имеет один вход и два симметричных выхода. Для обеспечения равномерного широкополосного согласования во всех трех волноводах сделаны до-

полнительные секции. Так как делитель выполнен по трехпортовой бездиссипативной схеме, он имеет достаточно малый уровень изоляции и высокий уровень отражений по выходам 2 и 3, однако возникающие от этого стоячие волны не являются большой проблемой для работы приемника, поскольку со стороны генератора схема симметричная и вклад этих стоячих волн будет одинаковым для обоих СИС-смесителей.

В волноводном блоке предполагается использование трех поглотителей излучения, так называемых согласованных нагрузок. Их задача, эффективно поглощать проходящее, чтобы уровень отражения был не более -20 дБ. Существует несколько вариантов конструирования таких нагрузок [9–11]. В текущем дизайне предварительно заложены квадратные углубления, где можно разместить тот или иной поглотитель.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен электромагнитный и механический дизайн волноводного блока, обеспечивающего разделение полос с параметрами SRR лучше -25 дБ, отражением по входу лучше -25 дБ, балансом амплитуды сигнала лучше 1 дБ, балансом фазы сигнала лучше 0.4 град. В дальнейшем авторы предполагают промоделировать работу цельного волноводного блока в реальных условиях для различного уровня отражений СИС-смесителей и коэффициентов отражения волноводных нагрузок.

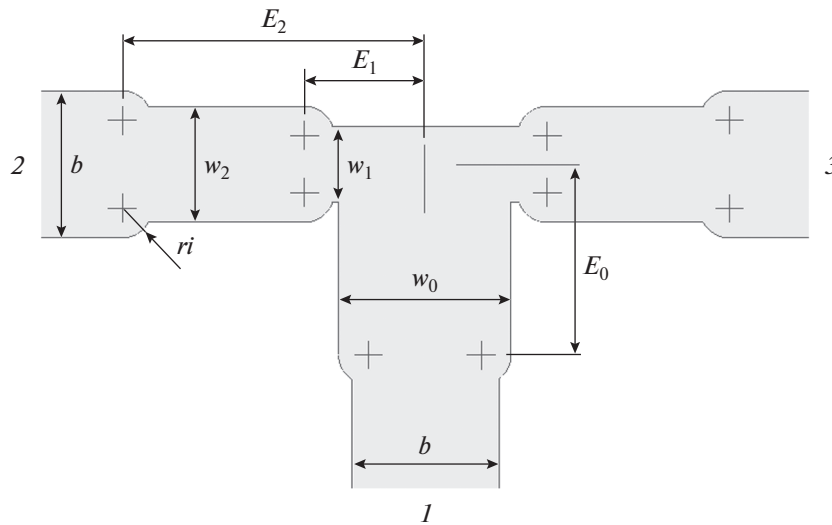


Рис. 10. Делитель мощности опорного генератора, $b = 500$, $w_0 = 587$, $w_1 = 259$, $w_2 = 394$, $E_0 = 649$, $E_1 = 415$, $E_2 = 1039$, $r_i = 80$. Все размеры даны в мкм.

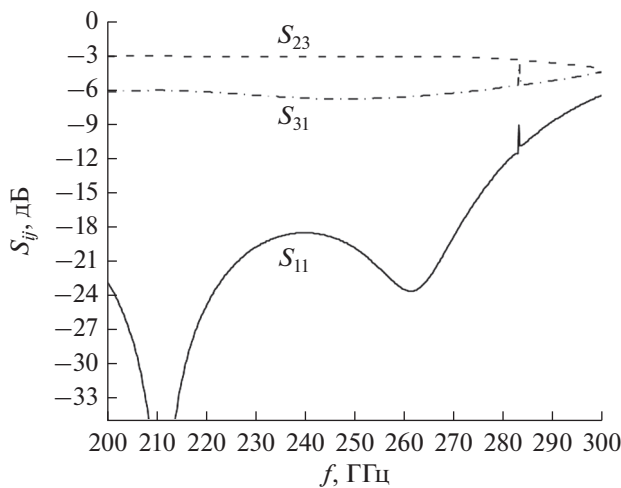


Рис. 11. Частотные характеристики делителя мощности опорного генератора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Расчет электромагнитных моделей волноводных структур и анализ результатов расчетов выполнен за счет гранта РФФИ № 23-79-00061, <https://rscf.ru/project/23-79-00061/>. Аналитический обзор существующих терагерцовых приемников и наблюдательных инструментов на их основе выполнен за счет гранта РФФИ № 23-12-00187, <https://www.rscf.ru/project/23-12-00187/>. При выполнении работ использовано оборудование Уникальной научной установки № 352529 “Криоинтеграл”, которая поддержана Министерством науки и

высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-667).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kerr A.R., Feldman M.J., Pan S.-K.* // Proc. Eighth Int. Symp. on Space Terahertz Technology. Cambridge MA. 25–27 Mar. 1997. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 1997. P. 101.
2. *Rudakov K.I., Khudchenko A.V., Filippenko L.V. et al.* // Appl. Sci. 2021. V. 11. № 21. P. 10087.
3. *Balega Yu.Yu., Baryshev A.M., Bubnov G.M. et al.* // Radiophysics and Quantum Electronics. 2020. V. 63. № 7. P.479.
4. *Рудаков К.И., Дмитриев П.Н., Барышев А.М. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 7. С. 613.
5. *Pickett H.M., Poynter R.L., Cohen E.A. et al.* // J. Quantum Spectroscopy Radiative Transfer. 1998. V. 60. P. 883.
6. *Новиков И.Д., Лихачев С.Ф., Шекинов Ю.А. и др.* // Успехи физ. наук. 2021. Т. 191. № 4. С. 404.
7. *Лихачёв С.Ф., Рудницкий А.Г., Андрианов А.С. и др.* // Космич. исслед. 2024. № 1. С. 78.
8. *Hesper R., Khudchenko A., Baryshev A.M.* // IEEE Trans. 2017. V. TST-7. № 6, P. 686.
9. *Kerr A.R., Moseley H., Wollack E. et al.* MF-112 and MF-116: Compact Waveguide Loads and fts Measurements at Room Temperature and 5 K. ALMA memo 494, 2004.
10. *Mena F.P., Baryshev A.M.* Design and Simulation of a Waveguide Load for ALMA-band 9. ALMA memo 513, 2005.
11. *Hesper R., Khudchenko A., Baryshev A.M. et al.* // Proc. SPIE. 2016. V. 9914. Article No. 9914G.