

УДК 53.087.2, 520.8.056, 520.272.2

Двухчастотная перекрестно-щелевая антенна с резонансными болометрами на холодных электронах для применения в космической миссии *COrE*

Кузьмин Л.С.^{1,2}, Чигинев А.В.^{1,3}

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

²Технологический университет Чалмерса,
Гетеборг 41296, Швеция

³Институт физики микроструктур Российской академии наук,
ГСП-105, Нижний Новгород 603950, Россия

Поступила 17.10.2016

Принята к печати 11.05.2017

Измерение характеристик реликтового излучения является актуальной задачей современной радиоастрономии. Целью настоящей работы является расчет планарной двухчастотной перекрестно-щелевой антенны, предназначенной для работы в составе приемной системы орбитального радиотелескопа *Cosmic Origins Explorer (COrE)*, разрабатываемого Европейским космическим агентством для измерения реликтового излучения.

Предлагаемая планарная антенна представляет собой металлический слой, нанесенный на диэлектрическую подложку и содержащий систему из четырех щелей, пересекающих друг друга под прямым углом. В состав антенны входит также система микрополосковых линий, предназначенных для передачи сигнала от щелей к резонансным болометрам на холодных электронах, и линза для формирования основного луча диаграммы направленности антенны. Расчет антенной системы проводился путем электродинамического моделирования в программном пакете *CST Microwave Studio*. В результате расчета получены диаграммы направленности антенны в двух частотных каналах, а также ее частотные характеристики.

В результате расчета получены следующие характеристики приемной системы на основе перекрестно-щелевой антенны: ширина основного луча диаграммы направленности – 24,3° и 19,5°, эллиптичность луча – 4,2 % и 0,3 %, ширина полосы частот – 14,9 ГГц и 19,0 ГГц, разрешение по поляризации – 23,4 дБ и 29,6 дБ, где всюду первое значение относится к каналу 75 ГГц, второе – к каналу 105 ГГц.

Предложено использование перекрестно-щелевой антенны в двухчастотном режиме совместно с резонансными болометрами на холодных электронах для работы в составе приемной системы орбитального радиотелескопа *COrE*. Сравнение рассчитанных характеристик антенны с требованиями, заданными Европейским космическим агентством, показало возможность использования антенны данного типа в составе миссии *COrE*.

Ключевые слова: планарная антенна, реликтовое излучение, болометр на холодных электронах.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-101-107

Адрес для переписки:

Чигинев А.В.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексева,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: chig@ipmras.ru

Address for correspondence:

Chiginev A.V.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: chig@ipmras.ru

Для цитирования:

Кузьмин Л.С., Чигинев А.В.
Двухчастотная перекрестно-щелевая антенна с резонансными болометрами на холодных электронах для применения в космической миссии *COrE*.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 101–107.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-101-107

For citation:

Kuzmin L.S., Chiginev A.V.
[Two-frequency cross-slot antenna with resonant cold electron bolometers for application in *COrE* space mission].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 101–107 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-101-107

Two-frequency cross-slot antenna with resonant cold electron bolometers for application in COrE space mission

Kuzmin L.S.^{1,2}, Chiginev A.V.^{1,3}

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

²Chalmers University of Technology,
Gothenburg 41296, Sweden

³Institute for Physics of Microstructures Russian Academy of Sciences,
GSP-105, Nizhny Novgorod 603950, Russia

Received 17.10.2016

Accepted for publication 11.05.2017

Abstract

Measurements of the CMB properties is an actual problem of modern astronomy. The aim of the present paper is the numerical modeling of the two-frequency planar cross-slot antenna designed for operation in the receiving system of the orbital telescope Cosmic Origins Explorer (COrE), developed by the European Space Agency to measure the CMB.

The proposed antenna is a planar metal layer on the dielectric substrate, and comprising a set of four slots intersecting each other at right angles. The composition also includes a set of microstrip lines for transmitting a signal from the resonant slots to cold-electron bolometers, and a lens for forming the main beam of the radiation diagram. Calculation of the antenna system is made by electrodynamic modeling software package CST Microwave Studio. As a result of the modeling, the radiation diagram of the antenna in two frequency channels as well as its frequency characteristics are obtained.

The calculation gives the following characteristics of the receiving system on the basis of cross-slot antenna: width of the main beam of the radiation diagram – 24.3° and 19.5°, the ellipticity of the beam – 4.2 % and 0.3 %, the bandwidth – 14.9 GHz and 19.0 GHz, polarization resolution – 23.4 dB and 29.6 dB, where the former value refers to the 75 GHz channel, and the latter refers to 105 GHz channel.

It is proposed to use a cross-slot antenna in dual-frequency mode together with resonant cold-electron bolometers to work in the receiving system of the orbital telescope COrE. Comparison of the calculated antenna characteristics with the requirements set by the European Space Agency, have shown the possibility of using this type of antenna as part COrE mission.

Keywords: planar antenna, cosmic microwave background, cold-electron bolometer.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-101-107

Адрес для переписки:

Чигинев А.В.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: chig@ipmras.ru

Address for correspondence:

Chiginev A.V.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: chig@ipmras.ru

Для цитирования:

Кузьмин Л.С., Чигинев А.В.
Двухчастотная перекрестно-щелевая антенна с резонансными болометрами на холодных электронах для применения в космической миссии COrE.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 101–107.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-101-107

For citation:

Kuzmin L.S., Chiginev A.V.
[Two-frequency cross-slot antenna with resonant cold electron bolometers for application in COrE space mission].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 101–107 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-101-107

Введение

Гравитационные волны, предсказанные в работах [1, 2], – это последний фрагмент общей теории относительности Эйнштейна, явление, которое было предсказано, но еще не наблюдалось до недавнего времени. По результатам американского эксперимента *BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization)*, было объявлено о детектировании гравитационных волн методом измерения поляризации вихревой В-моды реликтового излучения [3]. Однако для достоверности результатов, чтобы исключить влияние космической пыли, необходимо повторение экспериментов на разных частотах. И хотя вскоре гравитационные волны были обнаружены другим методом, в рамках проекта *LIGO* [4], задача наблюдения гравитационных волн космологическими методами остается по-прежнему актуальной.

Европейское космическое агентство (ЕКА) приняло амбициозную космическую программу для исследования поляризации реликтового излучения. Одной из целей ЕКА является организация космической миссии *COrE*. ЕКА сформулировало ряд требований к антенным системам для данной миссии. В частности, необходимо уменьшать размер части фокальной плоскости, занятой приемными элементами, путем размещения много-частотного массива детекторов. Это должно позволить решить проблемы, связанные с тем, что форма основного лепестка диаграммы направленности приемного элемента зависит от того, в каком месте фокальной плоскости расположен этот элемент. Эта зависимость приводит к искажениям формы основного лепестка диаграммы направленности приемной системы. Размещение приемных элементов, настроенных на разные частоты, в одном пикселе позволяет осуществить одновременное измерение сигналов на разных частотах, что исключительно важно для радиоастрономии [5]. К наиболее важным требованиям относятся следующие: ширина главного лепестка диаграммы направленности – 20° , эллиптичность основного лепестка диаграммы направленности $< 5\%$, ширина частотной полосы – 20% от рабочей частоты канала, коэффициент подавления кросс-поляризационной компоненты поля принимаемой волны – не хуже -30 дБ. Кроме того, антенна должна иметь хорошее согласование по импедансу с болометрами на холодных электронах (БХЭ) [6], которые предлагается использовать в качестве сверхчувствительных детекторов излучения.

Развитием концепции БХЭ является резонансный болометр на холодных электронах (РБХЭ) [7]. В конструкции РБХЭ есть полоска из сверхпроводника, имеющая кинетическую индуктивность и образующая последовательный колебательный контур совместно с емкостями *SIN*-переходов. Использование кинетической индуктивности позволяет уменьшить размер индуктивного элемента примерно в 300 раз по сравнению с элементом, использующим геометрическую индуктивность. Это позволяет сохранить одно из важнейших преимуществ БХЭ – его компактность.

Одним из возможных вариантов планарной антенны является перекрестно-щелевая антенна [8, 9]. В отличие от широкополосных антенн других типов, например от синусоидальной антенны [10], перекрестно-щелевая антенна отличается более простой конструкцией. Исходно данная антенна предназначалась для приема сигнала в одном частотном канале, центральная частота которого определяется длиной щели. Цель настоящей работы – расчет частотных характеристик и параметров диаграммы направленности перекрестно-щелевой антенны, работающей в двухчастотном режиме совместно с РБХЭ. В конце статьи проведено сравнение рассчитанных характеристик антенны с требованиями ЕКА и сделан вывод о ее применимости в составе приемной системы космической миссии *COrE*.

Основная часть

Внешний вид антенны показан на рисунке 1. Антенна состоит из металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую кремниевую подложку, и фактически представляет собой четыре взаимно перпендикулярные щели, пересекающиеся на расстоянии от края, равном четверти длины всей щели (рисунок 1а). С помощью микрополосковых линий сигнал с противоположных щелей антенны подается на два РБХЭ, настроенных каждый на свою частоту, при этом РБХЭ включается в разрыв микрополосковой линии. Такое включение обеспечивает синфазную работу противоположных щелей в правильной фазировке и, следовательно, формирование нужной диаграммы направленности. В качестве диэлектрика, отделяющего микрополосок от металлического слоя, выступает оксид кремния. На концах микрополосковых линий, обращенных к щелям антенны, расположены закорачивающие емкост-

ти, верхние обкладки которых представляют собой металлические прямоугольники. С помощью подстройки этих емкостей удается производить предварительную настройку частотных характе-

ристик антенны. С обратной стороны подложки расположена линза с просветляющим покрытием, ответственная за формирование диаграммы направленности антенны (рисунок 1b).

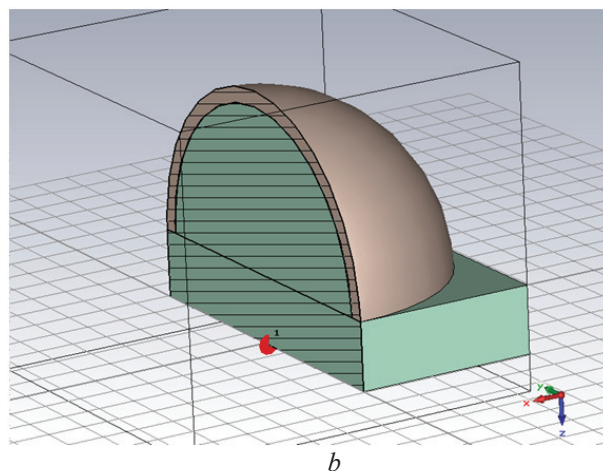
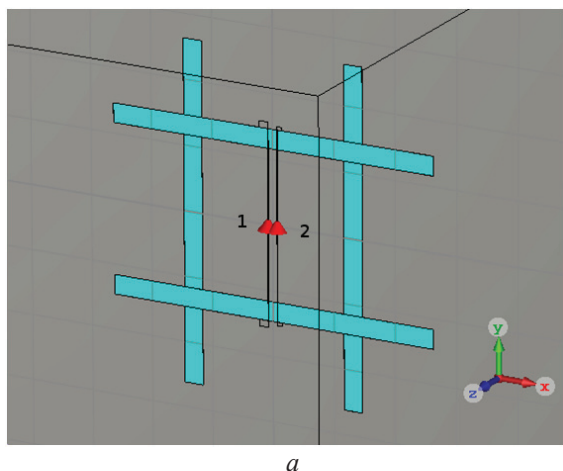


Рисунок 1 – Внешний вид перекрестно-щелевой антенны: *a* – центральная часть антенны; 1 и 2 – порты для каналов 75 ГГц и 105 ГГц соответственно; *b* – поперечный разрез антенны на подложке с линзой

Figure 1 – A sketch of the cross-slot antenna: *a* – the central part of the antenna; 1 and 2 – denote ports for 75 GHz and 105 GHz channels respectively; *b* – a cross cut of the antenna on the substrate with the lens

Далее будет приведен пример расчета диаграммы направленности и частотных характеристик такой антенны. Для численного моделирования использован программный пакет *CST Microwave Studio*. Вычисления проводились во временной области. Для возбуждения системы на каждом из частотных каналов были использованы два порта, включенные так же, как и РБХЭ, в разрывы микрополосков (рисунок 1a). Параметры антенны подобраны таким образом, чтобы обеспечивать приемлемые характеристики антенны на двух рабочих частотах, требуемых для проекта *CORÉ* – 75 и 105 ГГц. Порт 1 возбуждает частотный канал 75 ГГц, порт 2 возбуждает канал 105 ГГц. Для простоты и наглядности расчет всех характеристик антенны был проведен для одной из поляризаций.

Численное моделирование проводилось для структуры со следующими геометрическими размерами. Толщина металлического слоя выбиралась равной 0,15 мкм, длина щели антенны – 1050 мкм, ширина щели – 60 мкм. Параметры микрополосковой линии следующие. Ширина микрополоска – 2 мкм, длина – 290 мкм, толщина – 0,4 мкм, толщина диэлектрического слоя SiO_2 – 0,3 мкм. Размеры прямоугольников, образующих закорачивающие емкости, – 31×20 мкм² и 16×10 мкм², величины емкостей соответственно равны 71,3 фФ и 18,4 фФ. Толщина кремниевой

диэлектрической подложки – 1100 мкм, ее размеры в плане – 2×2 мм². Диаметр кремниевой фокусирующей линзы – 9 мм, толщина просветляющего покрытия из кварца – 430 мкм.

Рассчитанные диаграммы направленности антенны приведены на рисунке 2. На этом рисунке приведены сечения диаграммы направленности тремя разными плоскостями, проходящими через прямую, перпендикулярную плоскости антенны. Здесь E-plane – плоскость, в которой расположен вектор **E** электромагнитной волны, H-plane – плоскость, в которой расположен вектор **H** электромагнитной волны, D-plane – плоскость, расположенная под углом 45° к E-plane и H-plane.

Из рисунка 2 видно, что перекрестно-щелевая антенна обладает удовлетворительными характеристиками диаграммы направленности. В частности, следует отметить хорошее разрешение по поляризации в пределах угловой ширины основного лепестка, ограниченной мощностью – 3 дБ от максимума (половинная мощность). Здесь под разрешением по поляризации понимается соотношение основной и кросс-поляризационной компонент электромагнитной волны, где последняя рассматривается в базисе *Ludwig 3* [11]. Также следует отметить, что эллиптичность основного лепестка диаграммы направленности антенны, определяемая как $(W_{max} - W_{min}) / (W_{max} + W_{min})$, где W_{max} и W_{min} – соответственно максимальная и мини-

мальная ширины диаграммы направленности по уровню -3 дБ, удовлетворяет требованиям ЕКА.

Характеристики диаграммы направленности антенны приведены в таблице (см. ниже).

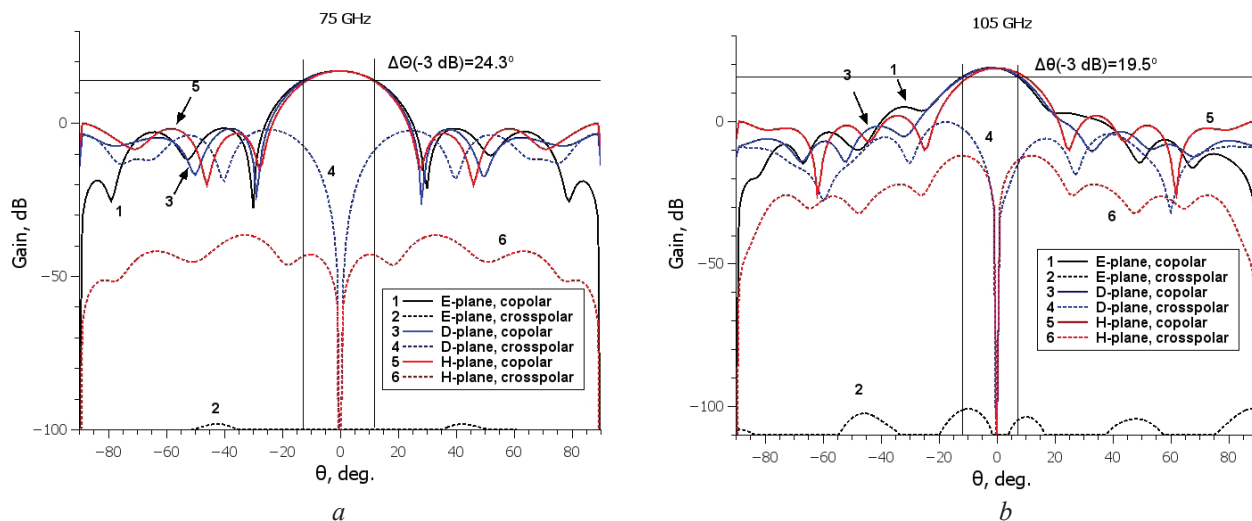


Рисунок 2 – Диаграммы направленности перекрестно-щелевой антенны для 75 ГГц (а) и для 105 ГГц (б). Показаны диаграммы для основной (сплошные линии) и кроссполаризационной (пунктирные линии) компонент полей. Использован базис Ludwig 3 [11]. Разными цветами и цифрами обозначены диаграммы направленности для разных сечений. Тонкими горизонтальными линиями обозначен уровень диаграммы направленности -3 дБ от максимума, тонкими вертикальными линиями – область углов, в пределах которой этот уровень превышен

Figure 2 – Radiation diagrams of the cross-slot antenna at 75 GHz (a) and 105 GHz (b). Diagrams for main (solid) and crosspolar (dashed) components of the fields are shown. A Ludwig 3 basis [11] is used. Different colours mark different cross-sections of the radiation diagrams. Thin horizontal lines denote radiation diagram level -3 dB of maximum, thin vertical lines denote the angular domain where this level is exceeded

На рисунке 3 приведены частотные характеристики рассматриваемой антенны. Они рассчитаны путем подключения портов с импедансом 20 Ом в разрывы полосковых линий, соединяющих противоположные щели (рисунок 1а). Характеристики имеют резонансный характер, и частоты соответствующих резонансов являются близкими к частотам, которые требуются для проекта CORE – 75 и 105 ГГц (рисунок 3а). Реальные части импеданса антенны составляют 3,5 Ом

для канала 75 ГГц и 34 Ом для канала 105 ГГц (рисунок 3б). Тем не менее, как мы увидим далее, данная антенна хорошо согласуется с РБХЭ и обеспечивает необходимые резонансные характеристики приемной системы. Из рисунка 3б видно, что ширины резонансных кривых превышают значения, задаваемые требованиями ЕКА. Поэтому для получения резонансных кривых нужной ширины нами предложено использовать резонансные свойства РБХЭ.

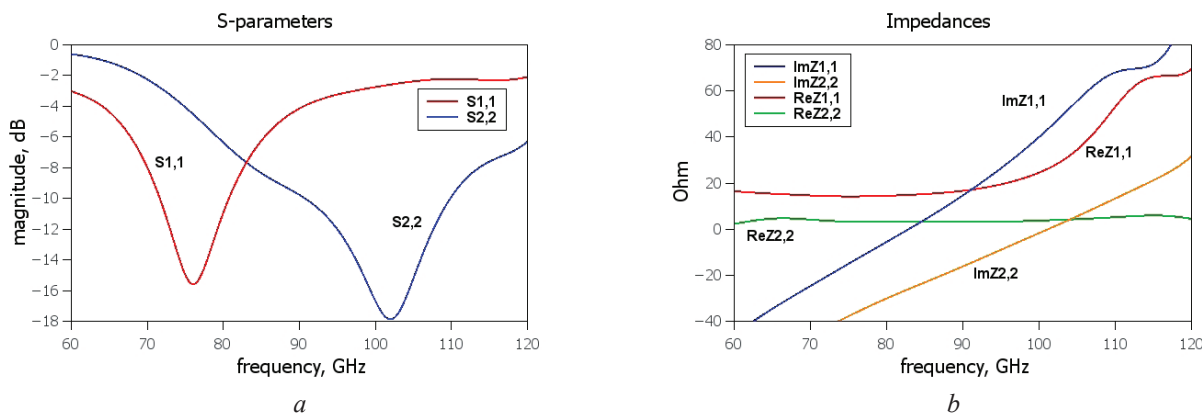


Рисунок 3 – Частотные характеристики перекрестно-щелевой антенны: а – S-параметры антенны; б – реальная и мнимая части импедансов антенны

Figure 3 – Frequency characteristics of the cross-slot antenna: а – S-parameters of the antenna; б – real and imaginary parts of the antenna impedances

Для моделирования РБХЭ использовалась эквивалентная схема в виде последовательного колебательного контура (рисунок 4а). Два таких контура, настроенные на частоты, близкие соответственно 75 и 105 ГГц, подключались к портам. В результате расчета получены частотные характеристики антенны с РБХЭ (рисунок 4б). В расчетах использовались следующие параметры дискретных элементов: индуктивности $L_{75} = 130$ пГн, $L_{105} = 120$ пГн, емкости $C_{75} = 41$ фФ, $C_{105} = 18,5$ фФ. Активные сопротивления обоих контуров равнялось 15 Ом, что соответствует сопротивлению абсорбера РБХЭ. Резонансные частоты контуров равны соответственно 68,9 ГГц и 106,8 ГГц. Сдвиг резонансных частот контуров связан с тем, что для получения нужных итоговых резонансных частот полной системы приходится компенсировать мнимые части соответствующих компонент матрицы импедансов системы на резонансных частотах (рисунок 3б).

Из рисунка 4б видно, что частотные характеристики приемной системы на основе перекрестно-щелевой антенны имеют вид резонансных кривых с частотами, соответствующими требуемым ЕКА – 75 и 105 ГГц. Также видно, что взаимное влияние двух частотных каналов ограничено уровнем –10 дБ.

Характеристики двухканальной приемной системы на основе перекрестно-щелевой антенны и РБХЭ приведены в таблице.

Характеристики приемной системы на основе перекрестно-щелевой антенны
The characteristics of the receiving system based on the cross-slot antenna

	Требования ЕКА ESA requirements	Канал 75 ГГц 75 GHz channel	Канал 105 ГГц 105 GHz channel
Резонансная частота, ГГц Resonance frequency, GHz	75, 105	75	105
Ширина полосы частот при –3 дБ, ГГц Bandwidth at –3 dB, GHz	20 % от резонансной частоты 20 % of resonance frequency	14,9	19,0
Ширина основного луча диаграммы направленности, град. Beam width, °	20	24,3	19,5
Эллиптичность основного лепестка, % Beam ellipticity, %	<5	4,2	0,3
Разрешение по поляризации, дБ Polarization resolution, dB	30	23,4	29,6

Из таблицы видно, что двухчастотная приемная система на основе перекрестно-щелевой антенны обладает хорошими параметрами диаграммы направленности и частотными характе-

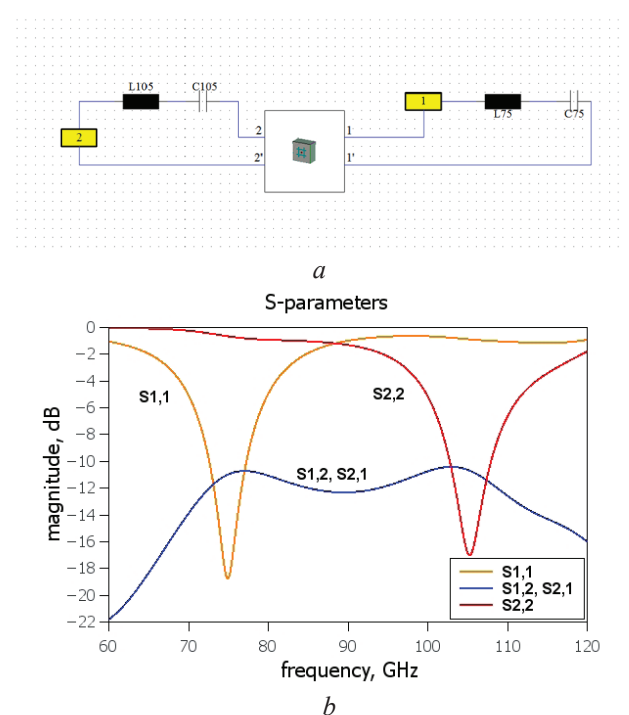


Рисунок 4 – Эквивалентная схема перекрестно-щелевой антенны с резонансным болометром на холодных электронах (а) и частотные характеристики перекрестно-щелевой антенны с последовательными колебательными контурами, моделирующими резонансный болометр на холодных электронах (б)

Figure 4 – Equivalent circuit of the cross-slot antenna with resonant cold-electron bolometers (RCEB) (a) and frequency characteristics of the cross-slot antenna with serial oscillatory circuits which model RCEBs (b)

Таблица/Table

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что планарная перекрестно-щелевая антенна способна функционировать в двухчастотном режиме и обеспечивать частотные характеристики и параметры диаграммы направленности, укладывающиеся в рамки требований ЕКА, предъявляемые к приемным системам для космической миссии *COrE*. В отличие от широкополосных антенн других типов перекрестно-щелевая антенна отличается более простой конструкцией. Количественные характеристики приемной системы на основе перекрестно-щелевой антенны с резонансным болометром на холодных электронах приведены в таблице (см. выше).

В данной работе мы ограничились одной поляризацией; более подробное исследование характеристик данной антенны в режиме двух поляризаций будет предметом последующих публикаций.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-10468).

The work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 16-19-10468).

References

1. Starobinskii A.A. Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1979, vol. 30, no. 11, pp. 682–685.
2. Linde A.D. A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity,

isotropy and primordial monopole problems. *Physics Letters B*, 1982, vol. 108, p. 389.

doi: 10.1016/0370-2693(82)91219-9

3. BICEP2 II: experiment and three-year data set. BICEP2 collaboration. P. Ade, et al., arXiv:1403.4302v1 [astro-ph.CO] 17 Mar 2014.

4. Abbot B.P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 2016, vol. 116, p. 061102.

doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

5. The ESA Tender ESTEC ITT AO/1-7256. Next Generation Sub-millimetre Wave Focal Plane Array Coupling Concepts, February 2013.

6. Kuzmin L. Optimization of the Hot-Electron Bolometer for Space Astronomy. *SNED Proc.*, 2001, pp. 145–154.

7. Kuzmin L.S. A Resonant Cold-Electron Bolometer With a Kinetic Inductance Nanofilter. *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 2014, vol. 4, pp. 314–320. **doi:** 10.1109/TTHZ.2014.2311321

8. Goutam Chattopadhyay, Jonas Zmuidzinis. A Dual Polarized Slot Antenna for Millimeter Waves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, vol. 46, no. 5, pp. 736–737. **doi:** 10.1109/8.668920

9. Goutam Chattopadhyay, David Miller, Henry G. LeDuc, Jonas Zmuidzinis. A dual-polarized quasi-optical SIS mixer at 550 GHz. *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 2000, vol. 48, no. 10, pp. 1680–1686. **doi:** 10.1109/22.873895

10. DuHamel R.H. Dual polarized sinuous antennas. Patent U.S. no. 4658262, 1987.

11. Arthur C. Ludwig. The Definition of Cross Polarization. *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 1973, vol. 21, issue 1, pp. 116–119.

doi: 10.1109/TAP.1973.1140406