

Двухдиапазонный облучатель зеркальной антенны для станции спутниковой связи Ka/Q-диапазонов частот

Д. Д. Дмитриев¹, А. Б. Гладышев¹, О. Б. Грицан²✉

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²ООО «НПЦ "Малые космические аппараты"», Железногорск, Россия

✉ gritsan@npc-mka.ru

Аннотация

Введение. В связи с исчерпанием частотного ресурса в Ku-диапазоне частот активно разрабатываются спутниковые системы связи в более высокочастотных диапазонах Ka и Q. Для земных станций спутниковой связи этих диапазонов характерна работа на прием и передачу на сильно разнесенных частотах (в 1.5 и более раз). Зеркальные антенны, применяемые в станциях связи, должны обеспечивать формирование диаграмм направленности (ДН) с необходимыми параметрами в двух разнесенных диапазонах. Поэтому при разработке облучателей таких антенн существует ряд неразрешенных на сегодняшний день трудностей, обусловленных высокими требованиями к их техническим характеристикам.

Цель работы. Разработка моделей и макетирование двухдиапазонного облучателя на основе коаксиальной схемы и фидерного тракта с использованием узкополосного перехода с прямоугольного волновода на круглый.

Материалы и методы. Расчет и исследование разработанной конструкции двухдиапазонной облучающей системы проводились с применением программного обеспечения CST Studio Suite и специально разработанных программ-дополнений, которые существенно упрощают и ускоряют работу.

Результаты. Разработан макет двухдиапазонного облучателя ЭИФ5.468587.001, обеспечивающий формирование ДН зеркальной антенны в диапазоне частот приема (19.172...19.792 ГГц) с коэффициентом направленного действия (КНД) не менее 46 дБи и уровнем первого бокового лепестка не более 20.1 дБ; в диапазоне частот передачи (43.924...44.524 ГГц) с КНД не менее 52.7 дБи и уровнем первого бокового лепестка не более 16.7 дБи. Проведен сравнительный анализ разработанного макета облучающей системы с серийным образцом облучателя в составе антенны 08150.6220-0 земной станции спутниковой связи.

Заключение. Изготовленный облучатель ЭИФ5.468587.001 позволяет формировать осесимметричную ДН зеркальной антенны с более высоким КНД (на 0.7 дБи в режиме приема и на 1.4 дБи в режиме передачи) и с более низким уровнем внеосевых излучений по сравнению с серийным облучателем, изготовленным АО "РЕШЕТНЕВ" в составе антенны 08150.6220-0 и используемым в настоящее время в составе земной станции спутниковой связи.

Ключевые слова: двухдиапазонный облучатель; облучатель Ka/Q-диапазонов; двухзеркальная антенна, станция спутниковой связи

Для цитирования: Дмитриев Д. Д., Гладышев А. Б., Грицан О. Б. Двухдиапазонный облучатель зеркальной антенны для станции спутниковой связи Ka/Q-диапазонов частот // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 38–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-38-51

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; принята к публикации после рецензирования 12.08.2024; опубликована онлайн 27.09.2024

Dual-Band Irradiation System of Ka/Q Band for Satellite Communication Station

Dmitry D. Dmitriev¹, Andrey B. Gladyshev¹, Oleg B. Gritsan^{2✉}

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²LLC «RPC "Small Spacecraft"», Zheleznogorsk, Russia

✉ gritsan@npc-mka.ru

Abstract

Introduction. Due to the depletion of the frequency resource in the Ku frequency range, satellite communication systems are being actively developed in higher frequency ranges, i.e., Ka and Q. Satellite communication earth stations in these ranges are characterized by receiving and transmitting at widely spaced frequencies (1.5 times or greater). Mirror antennas used in communication stations must ensure the formation of appropriate radiation patterns in two separated ranges. Therefore, due to the high requirements for their technical characteristics, the development of feeds for such antennas is associated with a number of currently unresolved difficulties.

Aim. Development of models and prototyping of a dual-band feed based on a coaxial circuit and a feeder path using a narrow-band transition from a rectangular waveguide to a round one.

Materials and methods. Calculation and research of the developed design of a dual-band irradiation system was carried out using the CST Studio Suite software and specially developed add-on programs that significantly simplify and speed up the work.

Results. A prototype of the dual-band feed EIF5.468587.001 was developed, which ensures the formation of the radiation pattern of a mirror antenna in the receiving range (19.172...19.792 GHz) with an efficiency of no less than 46 dBi and the level of the first side lobe of no more than 20.1 dB, and in the transmitting range (43.924...44.524 GHz) with an efficiency of no less than 52.7 dBi and a first side lobe level of no more than 16.7 dBi. A comparative analysis of the developed feed model with a serial sample as part of the 08150.6220-0 antenna of a satellite communications earth station was carried out.

Conclusion. The EIF5.468587.001 feed produced as a result of the work makes it possible to form an axisymmetric pattern of a mirror antenna with a higher efficiency (by 0.7 dBi in the receiving mode and 1.4 dBi in the transmitting mode) and with the lowest level of off-axis radiation compared to the feed manufactured by JSC ISS as part of the 08150.6220-0 antenna and currently used as part of a satellite communication station.

Keywords: dual-band feed, Ka/Q-band feed, dual-mirror antenna, satellite communication station

For citation: Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Gritsan O. B. Dual-Band Irradiation System of Ka/Q Band for Satellite Communication Station. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 38–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-38-51

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 13.11.2023; accepted 12.08.2024; published online 27.09.2024

Введение. В последние годы бурно развиваются космические системы связи и широкополосного доступа к сети Интернет. Кроме того, в условиях современной геополитической обстановки создание отечественной системы спутниковой связи приобретает самый актуальный характер. В настоящее время корпорация "Роскосмос" активно приступила к запуску первых спутников связи и широкополосного доступа к сети Интернет, реализуя спутниковую группировку для проекта "Сфера". Цель

Двухдиапазонный облучатель зеркальной антенны для станции спутниковой связи Ka/Q-диапазонов частот

Dual-Band Irradiation System of Ka/Q Band for Satellite Communication Station

указанного проекта – создание комплексной услуги подвижной связи, интернета и мониторинга на базе отечественных космических информационных технологий в интересах цифровой трансформации экономики для обеспечения суверенитета, связанности и пространственного развития территорий РФ [1].

Для перспективных систем спутниковой связи АО "РЕШЕТНЕВ" разработана земная станция спутниковой связи (ЗССС) [2], обеспечивающая излучение и прием сигналов в Ka/Q-



Рис. 1. Внешний вид зеркальной антенны 08150.6220-0, разработанной АО ИСС для ЗССС Ka/Q-диапазонов

Fig. 1. Appearance of the 08150.6220-0 mirror antenna developed by ISS JSC for the Ka/Q band communication station

диапазонах частот (диапазон частот приема – 19.172...19.792 ГГц, диапазон частот передачи – 43.924...44.524 ГГц) [3]. В качестве антенной системы в ЗССС используется специально разработанная АО "РЕШЕТНЕВ" антенна с двухдиапазонной облучающей системой 08150.6220-0. Антенна представляет собой двухзеркальную конструкцию схемы Кассегрена с параболическим рефлектором диаметром 1.2 м и контррефлектором, имеющим специальный профиль центрального сечения отражающей поверхности (рис. 1) [4]. Экспериментальные исследования показали, что при использовании указанной антенны в прямом канале ЗССС энергетики радиолинии достаточно для использования сигнала с шириной спектра 12 МГц при организации связи с космическим аппаратом "Благовест". Обратный канал связи имеет дефицит энергетики в 1.2 дБ. Одной из причин недостаточного значения мощности сигнала на входе приемного канала является несовершенная конструкция антенны.

Устранить дефицит энергетики радиолинии в обратном канале за счет изменения параметров бортового ретрансляционного комплекса (мощности и коэффициента усиления (КУ) антенны) при наличии введенной в эксплуатацию группировки невозможно, поэтому требуется менять конструкцию приемной антенны ЗССС.

Для режима приема основной характеристикой ЗССС является ее добротность:

$$Q = G_{\text{пр}} / T_{\text{ш}},$$

где $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления антенны ЗССС на прием; $T_{\text{ш}}$ – шумовая температура входной части канала приема.

Именно этот параметр определяет отношение сигнал/шум на входе приемного канала ЗССС. Поэтому для стабильного функционирования обратного канала связи необходимо применять антенну с большим коэффициентом усиления, чем у используемой на данный момент. Кроме того, использование двухзеркальной антенны вносит в ее характеристики недостаток в виде повышенного уровня боковых лепестков, который для используемой антенны 08150.6220-0 имеет значение –10.9 дБ, что является пороговым уровнем по требованиям Международного консультативного комитета по радио.

В настоящей статье представлена новая двухдиапазонная облучающая система, которая в составе антенной системы ЗССС позволит получить требуемые энергетические характеристики обратного канала радиолинии и низкий уровень боковых лепестков.

Выбор схемы построения двухдиапазонной облучающей системы. Проектируемая антенна ЗССС строится по схеме с обратным излучением, т. е. поток электромагнитной энергии облучателя направляется на контррефлектор, который переотражает излучение на основной рефлектор.

Двухдиапазонный облучатель Ka/Q-диапазонов вместе с контррефлектором должен обеспечивать близкое к равномерному амплитудное и синфазное фазовое распределения в раскрыве основного рефлектора в диапазонах частот:

- приема (RX): 19.172...19.792 ГГц;
- передачи (TX): 43.924...44.524 ГГц.

Относительная ширина полос рабочих частот приема и передачи составляет 3.18 и 1.36 % соответственно, а соотношение центральных частот передачи и приема – 2.25.

Облучатель можно условно разделить на две части – собственно излучающую часть и фидерный тракт, в котором формируются волны требуемых поляризаций, осуществляется согласование, а в некоторых случаях – частотная и поляризационная селекция. Выбор способа реализации этих частей осуществляется исходя из выбранной схемы построения облучателя.

Существуют две основные схемы построения двухдиапазонных облучателей – с совмещением излучающих раскрывов двух диапазонов (совмещенная) и с коаксиальным располо-

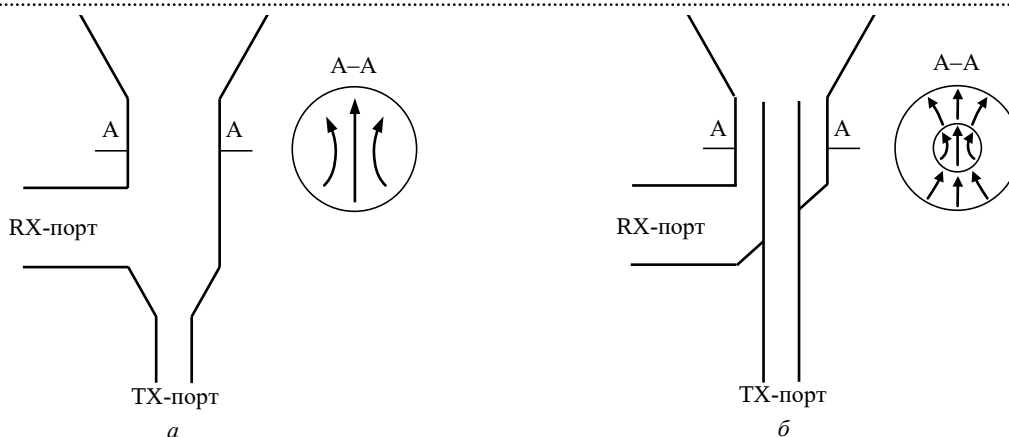


Рис. 2. Схемы построения двухдиапазонных облучателей: а – совмещенная; б – коаксиальная

Fig. 2. Schemes for dual band irradiators constructing: а – combined; б – coaxial

жением излучающих раскрывов (коаксиальная) [5–8] (рис. 2).

Совмещенная схема (рис. 2, а) предполагает распространение волн ТХ- и RX-диапазонов в одном круглом волноводе и излучение их одним рупором. Рабочей модой (типом волны) круглого волновода является волна типа Н11 (распределение электрического поля показано на рис. 2, а). При этом в случае большого разнеса частот приема и передачи, в круглом волноводе для более высокочастотной ТХ-волны может создаваться многомодовый режим распространения, если в тракте присутствуют неоднородности, на которых полем рабочей моды могут возбуждаться высшие моды. Поля высших мод при излучении могут искажать амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН) облучателя, поэтому их возбуждение нежелательно. Из набора высших мод круглого волновода модой Н11 наиболее сильно возбуждается мода Е11, имеющая структуру поля, близкую к структуре поля моды Н11. Соотношение частот отсечки мод Е11 и Н11 в круглом волноводе составляет 2.09, поэтому при соотношении частот передачи и приема более 1.5...2 (с учетом того, что рабочие частоты лежат выше частоты отсечки волны Н11) применение совмещенной схемы затруднительно из-за возможности возбуждения моды Е11.

В коаксиальной схеме (рис. 2, б) фидерные тракты и излучающие раскрывы для RX и ТХ отдельные, но расположены соосно. При этом передача мощности для ТХ-части происходит по круглому волноводу, который одновременно является центральным проводником коакси-

альной линии, по которой распространяется RX-волна. И в RX-, и в ТХ-волноводах рабочей модой является Н11 (распределение электрических полей показано на рис. 2, б). Волна ТХ-диапазона в коаксиальной схеме излучается открытым концом круглого волновода или диэлектрической антенной, установленной на конце круглого волновода, а волна RX-диапазона излучается рупорной антенной.

Коаксиальная схема позволяет избежать многомодового режима распространения в ТХ-диапазоне при большом разнес частот RX- и ТХ-диапазонов, так как каждая линия (коаксиальная на RX и круглый волновод на ТХ) работает в одномодовом режиме. Однако применима такая схема только при достаточно большом разнес частот приема и передачи (соотношение частот передачи и приема составляет 1.5 и более). В противном случае не удастся обеспечить одномодовый режим распространения в коаксиальном низкочастотном тракте. Следует при этом заметить, что для коаксиальной линии основным типом волны является не Н11, а ТЕМ. Тем не менее, из-за различной структуры поля при распространении волны Н11 существенного возбуждения волны ТЕМ не происходит, поэтому режим распространения волны Н11 в коаксиальном волноводе будет одномодовым.

Таким образом, для двухдиапазонных облучателей с соотношением частот передачи и приема менее 1.5...2 применима совмещенная схема, а при соотношении более 1.5 – коаксиальная схема. Отсюда следует, что для облучателя Ka/Q-диапазонов должна применяться коаксиальная схема.

Выбор облучающей части двухдиапазонной облучающей системы. ДН облучателя и форма контррефлектора должны быть подобраны так, чтобы обеспечивать максимальный коэффициент использования поверхности (КИП) основного рефлектора и равномерное распределение поля на нем. Зеркальная антенна, применяемая в ЗССС, имеет диаметр $d = 1200$ мм и фокусное расстояние $F = 420$ мм ($F/d = 0.35$) и является короткофокусной. Для получения максимального КИП такой антенны требуется облучающая система (облучатель и контррефлектор) с осесимметричной ДН с шириной по уровню -10 дБ, равной 120° .

Геометрия гиперболического контррефлектора в антенне Кассегрена задается расстоянием между двумя его фокусами и эксцентриситетом. Один из фокусов контррефлектора должен совпадать с фокусом основного зеркала, другой фокус – с фазовым центром облучателя. Расстояние между фокусами контррефлектора должно быть достаточно большим для того, чтобы контррефлектор находился в дальней зоне облучателя. Диаметр контррефлектора обычно составляет около 10 % диаметра основного зеркала, что является компромиссом между достаточно большим электрическим размером и минимизацией затенения раскрыва. Ширина ДН облучателя выбирается исходя из условия облучения края контррефлектора по уровню $-15...-20$ дБ от облучения центра контррефлектора.

Исходя из перечисленных условий было рассчитано, что облучатель должен иметь в обоих рабочих диапазонах амплитудную ДН осесимметричной формы с шириной по уровню -15 дБ, равной 80° . Требования к фазовым ДН облучателя сводятся к тому, чтобы у него существовал близкий к точечному фазовый центр, причем положения фазовых центров в обоих рабочих диапазонах совпадали.

Рупор, используемый в коаксиальной схеме для излучения волн РХ-диапазона, может быть выполнен плоским или гофрированным. Гофрированный рупор обладает, по сравнению с плоским, лучшим уровнем кроссполяризации и более осесимметричной ДН, так как в нем распределение полей рабочей волны Н₁₁ искажается таким образом, что амплитудное распределение в раскрыве рупора становится более

осесимметричным, а кроссполяризационные компоненты поля уменьшаются [9]. Это объясняется модификацией за счет гофрирования поверхностного импеданса стенок рупора в диапазоне частот, для которого глубина канавок гофра близка к $\lambda/4$. Гофрированные рупоры также имеют более точечный и стабильный по частоте фазовый центр. В связи с этим для проектируемого облучателя использован гофрированный рупор. Площадь раскрыва рупора должна быть подобрана так, чтобы получить необходимую ширину ДН.

Для ТХ-диапазона в коаксиальной схеме обычно применяется антенна в виде открытого конца круглого волновода. При необходимости сужения ДН в коаксиальную схему встраивают диэлектрическую антенну, возбуждаемую открытым концом круглого волновода. Для получения ширины ДН 80° по уровню -15 дБ применение диэлектрической антенны необходимо. Диэлектрическая антенна согласуется с круглым волноводом клиновидным переходом от полого волновода к волноводу с диэлектрическим заполнением, а затем к диэлектрической антенне [10].

На рис. 3 показан общий вид спроектированного коаксиального излучателя. Рупор вы-

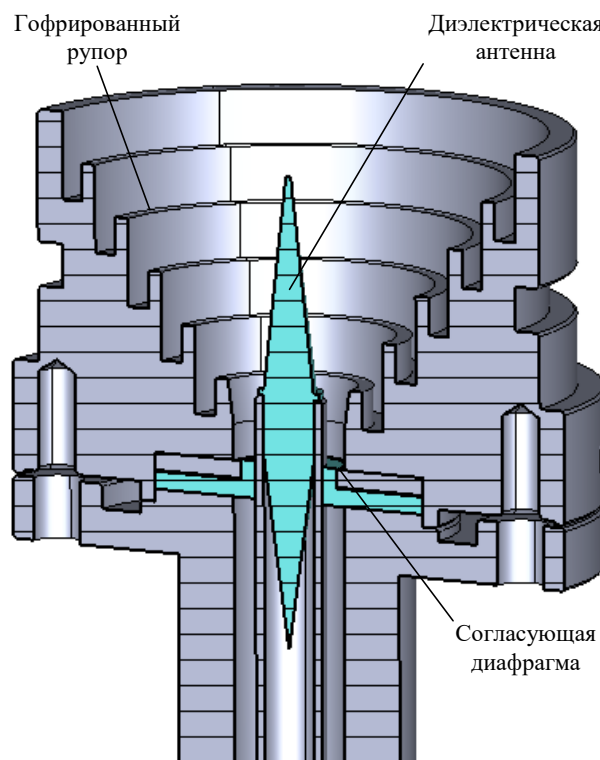


Рис. 3. Излучающая часть коаксиального облучателя Ка/Q-диапазонов (показана в разрезе)

Fig. 3. Radiating part of the Ka/Q band coaxial feed (shown in section)

полнен с продольным гофрированием, что упрощает производство. Глубина канавок на рабочей частоте RX-диапазона равна $\lambda/4$. Диэлектрическая антенна ТХ-диапазона выполнена из фторопласта.

При переходе от коаксиальной линии к рупорному излучателю в месте их сочленения возникает скачок волнового сопротивления, поэтому согласование коаксиального волновода с гофрированным рупором осуществляется в узкой полосе частот с помощью кольцевой металлической диафрагмы и паза, расположенных на расстоянии около четверти длины волны от перехода волновод–рупор (рис. 3). Для центровки диафрагма и паз дополнены фторопластовой втулкой специальной формы [11].

Выбор конструкции фидерного тракта.

Облучающая система должна обеспечивать работу в диапазонах приема и передачи на круговых ортогональных поляризациях (правой или левой). Работа одновременно на двух поляризациях в каждом диапазоне не требуется, поэтому в фидерном тракте не применяются ортомоды (устройства для разделения поляризаций). Фидерные тракты состоят только из переходников с прямоугольных волноводов стандартных сечений на соответствующую линию (коаксиальную или круглый волновод) и поляризаторов. Устройства частотной селекции (фильтры), обеспечивающие необходимую развязку трактов приема и передачи, проектиру-

ются отдельно от облучателя. Как указывалось ранее, относительная ширина полос приема и передачи облучателя не превышает 3.2 %. Следовательно, переходы с прямоугольного волновода могут выполняться узкополосными (с шириной полосы рабочих частот менее 5 %).

Поляризатор формирует из волны линейной поляризации волну с круговой поляризацией (или наоборот). Принцип работы поляризатора заключается во внесении разности фаз 90° между двумя синфазными ортогональными компонентами, которыми может быть представлена линейно-поляризованная волна на входе в поляризатор. Известно несколько видов поляризаторов, которые могут применяться в круглом или коаксиальном (с рабочей модой Н11) волноводе. Это поляризаторы в виде диэлектрических пластин, металлических ребер, пазов, расположенных под углом 45° к направлению поляризации волны на входе поляризатора [12]. Поляризаторы в облучателе Ka/Q-диапазонов, как и переходы, могут выполняться узкополосными, так как тракты приема и передачи в коаксиальной схеме облучателя отдельные.

Конструкция фидерного тракта. Узкополосный переход с прямоугольного волновода на круглый может быть выполнен ступенчатым – между прямоугольной и круглой секциями помещаются 2 отрезка определенной длины со специально подобранными сечениями (рис. 4, а). Переход с прямоугольного волновода на коак-

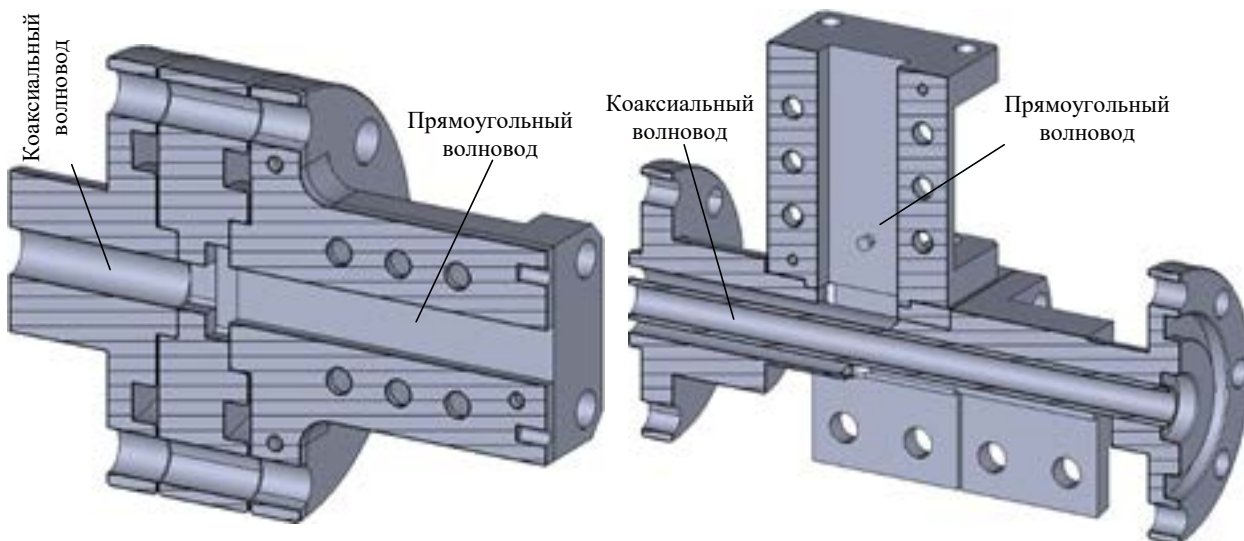


Рис. 4. Переходы: а – с прямоугольного волновода на круглый; б – с прямоугольного волновода на коаксиальный (показаны в разрезе)

Fig. 4. Transitions: а – from a rectangular waveguide to a round one; б – from a rectangular waveguide to a coaxial one (shown in section)

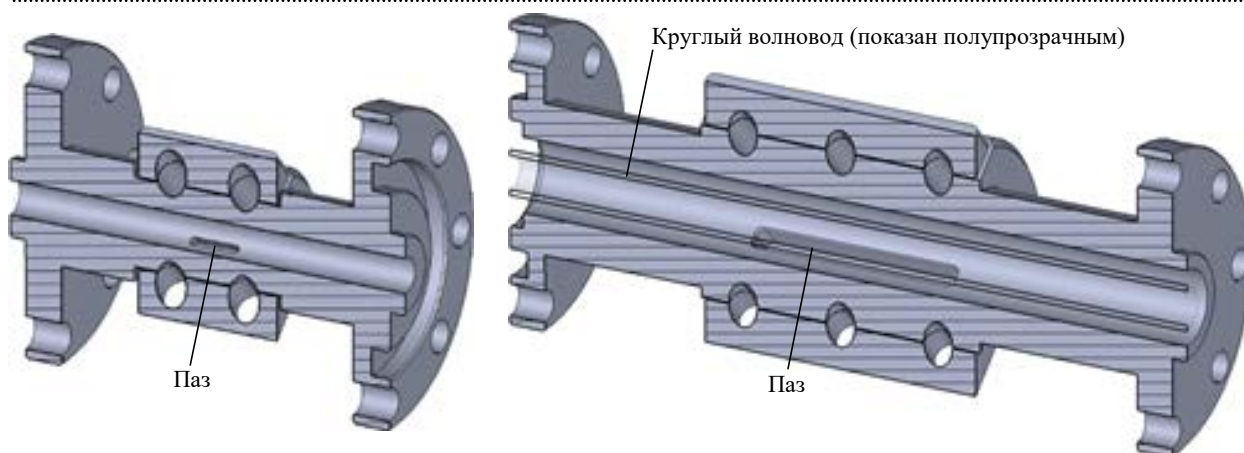


Рис. 5. Поляризаторы на пазах: а – в круглом волноводе; б – в коаксиальном волноводе (показаны в разрезе, виден один из пазов поляризатора)

Fig. 5. Polarizers on slots: а – in a round waveguide; б – in a coaxial waveguide (shown in section, one of the polarizer slots is visible)

сиальный с возбуждением моды Н11 выполняется в виде Г-образного сочленения (рис. 4, б). Из-за разницы волновых сопротивлений в таком соединении необходима согласующая емкостная диафрагма в прямоугольном волноводе на расстоянии около четверти длины волны от места сочленения, которая может быть выполнена в виде подстроечного винта. В узкой полосе такие переходы обеспечивают при должной настройке уровень отражений не более -30 дБ.

В представленной в настоящей статье конструкции облучателя Ka/Q-диапазонов применены поляризаторы на основе пазов (рис. 5), так как в верхней части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах длин волн они наиболее технологичны в производстве и одновременно обладают хорошими характеристиками. Такие поляризаторы одинаково хорошо работают как в круглом, так и в коаксиальном волноводах (с волной Н11) и позволяют получить коэффициент отражения не хуже -30 дБ и коэффициент эллиптичности не хуже 0.9 в полосе частот 5 %.

При диаметре параболического рефлектора 1.2 м длина фидерного тракта от порта ТХ до фазового центра облучателя (внутреннего волновода) составляет примерно 0.5 м.

В облучателе, выполненном по коаксиальной схеме, необходимо поддерживать соосность внутреннего волновода коаксиала с внешней трубой по всей длине. При указанной длине внутреннего волновода для этого предложено применить фторопластовые втулки. Однако наличие втулки в волноводном тракте

повышает коэффициент отражения от входа тракта. В ходе исследований установлено, что негативное влияние фторопластовых втулок на коэффициент отражения в рабочей полосе частот можно устранить, если выполнить втулки определенной длины и разместить их на соответствующем расстоянии друг от друга. В этом случае втулки и пространство между ними действуют как резонаторы, настроенные на заданную частоту, и их расположение можно настроить таким образом, чтобы сформировать характеристику передачи, подобную характеристике полосно-пропускающего фильтра. На рис. 6 показан отрезок коаксиальной линии со втулками, расположенный между фидерной и излучающей частями облучателя.

В результате экспериментов с макетами облучателей установлено, что для поддержания соосности коаксиальной линии достаточно одной втулки, располагающейся в центральной части облучателя. Поэтому в итоговой версии облучателя оставлена одна втулка, расположе-

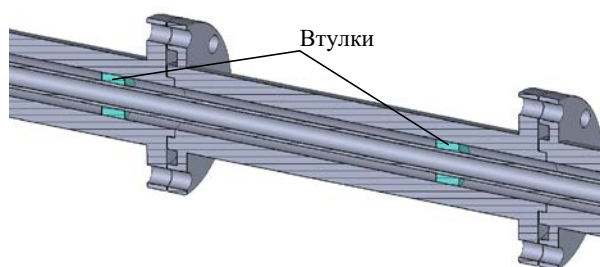


Рис. 6. Отрезок коаксиальной линии с центрирующими втулками (показан в разрезе)

Fig. 6. A section of a coaxial line with centering bushings (shown in section)

ние которой выбрано также с учетом формирования необходимой характеристики передачи.

Конструкция двухдиапазонной облучающей системы. В соответствии с приведенным описанием для реализации двухдиапазонного облучателя Ka/Q-диапазонов выбрана коаксиальная схема с гофрированным рупором и поляризаторами на основе пазов. В конструкции также предусмотрены возможность крепления контррефлектора, узел крепления облучателей к основному рефлектору и герметизация фланцевых соединений [13].

Разработанная конструкция облучателя Ka/Q-диапазонов представлена на рис. 7 [14]. Материал диэлектрических центрирующих втулок, диэлектрической антенны и диэлектрической шайбы согласующего узла – фторопласт. Основной материал облучателя – алюминий марки Д16 с покрытием Хим. Н12. М6. Ср6 (серебряное толщиной 6 мкм, с подслоем меди 6 мкм и никеля 12 мкм).

Методы исследования. Исследование разработанной конструкции двухдиапазонной облучающей системы проводилось с применением программного обеспечения CST Studio Suite и специально разработанных программ-дополнений, которые существенно упрощают и ускоряют работу. При моделировании исполь-

зованы классические методы анализа электродинамических структур на основе полного набора уравнений Максвелла.

Одной из основных проблем при разработке антенн и элементов фидерного и СВЧ-тракта является выбор методов расчета и подбор решающей программы. В программе CST Studio Suite, вычислительное ядро которой использовалось при моделировании, содержится целый ряд вычислителей. В моделировании облучателя, выполнявшемся при проектировании описанной антенны, использовались вычислитель во временной области, вычислитель в частотной области и асимптотический вычислитель.

Вычислитель во временной области основан на методе конечного интегрирования (FIT), описывающем уравнения Максвелла в пространстве временных сеток, тогда как вычислитель в частотной области основан на методе конечных элементов (FEM).

Моделирование во временной области больше подходит для вычислений в широком частотном диапазоне, поскольку требуется только одна итерация моделирования. Указанный вычислитель может быть применен для моделирования во всем частотном диапазоне, от постоянного тока до высоких частот, и позволяет моделировать электрически сложные

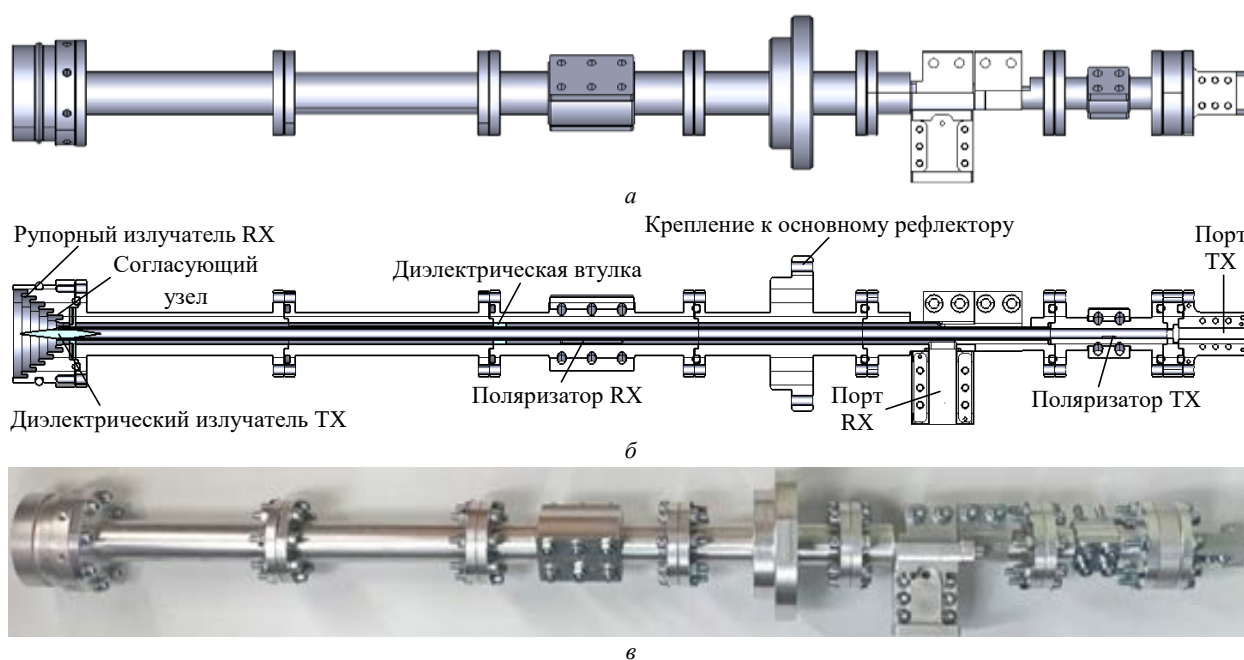


Рис. 7. Общий вид облучателя Ka/Q-диапазонов: а – модель; б – модель в разрезе; в – макет

Fig. 7. General view of the Ka/Q range irradiator: а – model, б – model cross-section; в – layout

конструкции, а расчет частотных характеристик осуществляется посредством быстрого преобразования Фурье (FFT). Поэтому указанный вычислитель больше подходит для моделирования электрически больших структур [15]. Однако при анализе сложных структур с использованием этого вычислителя для улучшения точности моделирования необходимо уменьшать шаг сетки временных отсчетов, что приводит к увеличению их количества и к росту времени расчета для этого вычислителя. Главным недостатком метода является сложность дискретизации изогнутых структур [16].

Вычислитель с использованием матрицы линий передач (Transmission Line Matrix – TLM) также выполняет анализ во временной области. Для этого в CST используется метод сетки с шестигранной матрицей линий передачи. Особенностью TLM-вычислителя является использование заранее рассчитанных специальных компактных моделей щелей, зазоров, стыков, отверстий и т. д. Достоинство данного метода – гибкость и простота математической формулировки и программной реализации. Метод более вычислительно затратен по сравнению с другими методами.

При использовании метода анализа в частотной области (FEM-вычислителя) моделирование выполняется на дискретных частотах, следующих с заданным шагом и перекрывающих рабочую полосу частот. Для снижения операционного времени может использоваться адаптивное уточнение сетки на каждой частоте. Моделирование в частотной области прекращается, когда S -параметры будут сходиться. Однократное моделирование может обеспечить в одном расчете результаты для всех портов,

поэтому вычислитель в частотной области применяется при моделировании узкополосных и электрически небольших структур. В CST этот вычислитель использует либо гексаэдральную, либо тетраэдрическую сетку [17]. Достоинством FEM-вычислителя является легкость расчета комбинированных конструкций, содержащих элементы различной размерности.

Анализ работоспособности облучателя в составе антенны проводился в приближении геометрической оптики. Анализ реализован с использованием асимптотического вычислителя, основная задача которого – определение эффективной площади рассеяния электрически крупных объектов методами геометрической теории дифракции и физической оптики. Описание антенны с помощью асимптотического вычислителя выполнялось с использованием моделей источников ближнего или дальнего поля, что значительно упрощает процесс моделирования объекта с размерами, существенно превышающими длину волны. Вычислитель применим для случаев, когда другие методы численного моделирования не способны обработать рассчитываемый объект.

Результаты исследования. Расчеты основных характеристик облучающей системы проведены с помощью программного обеспечения CST Studio Suite.

На рис. 8 представлены расчетные ДН разработанной облучающей системы в диапазонах приема (рис. 8, а) и передачи сигналов (рис. 8, б) в горизонтальной и вертикальной плоскостях, где φ – угол между плоскостью сечения ДН и плоскостью Земли. Из них следует, что облучающая система имеет амплитудную ДН осесимметричной формы с шириной по уровню -15 дБ в диапазоне приема 75° , в диапазоне передачи 62° .

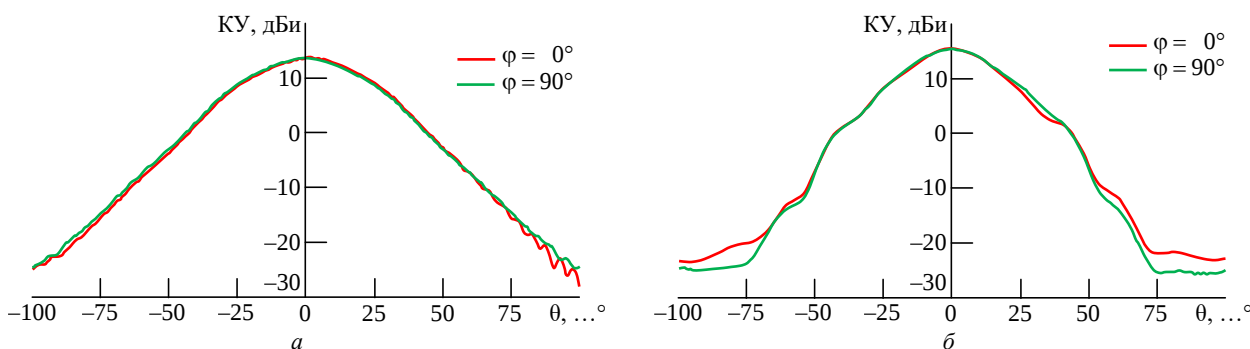


Рис. 8. ДН облучателя на центральных частотах диапазонов приема (а) и передачи (б)

Fig. 8. Feed pattern at the central frequencies of the receiving (a) and transmitting ranges (b)

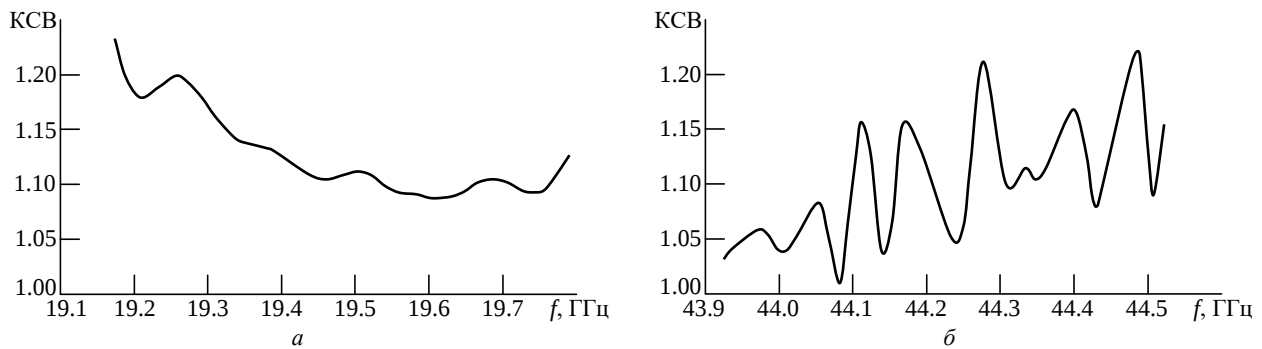


Рис. 9. KCB облучающей системы в диапазоне приема (а) и в диапазоне передачи (б)

Fig. 9. SWR of the irradiating system in the receiving range (a) and in the transmitting range (b)

На рис. 9 показаны результаты расчета коэффициента стоячей волны (КСВ) облучателя Ka/Q-диапазонов в диапазонах приема (RX) и передачи (TX). В диапазоне приема КСВ ≤ 1.24 , а в диапазоне передачи КСВ ≤ 1.23 .

Согласно расчету развязка между каналами приема и передачи в диапазоне частот приема составляет более 200 дБ, т. е. практически бесконечна, благодаря отсечке частот RX-диапазона в TX-волноводе. В диапазоне частот передачи развязка составляет около 20 дБ. Для работы ЗССС требуемое значение развязки в диапазоне частот передачи должно быть не менее 90 дБ. Одним из решений для реализации заданной развязки является применение внешнего полосно-пропускающего фильтра приемного тракта на порту RX-облучателя.

Ввиду того, что расчет характеристик направленности весьма ресурсоемок, он проводился только по пяти частотным точкам, равномерно расположенным в каждом рабочем диапазоне.

Результаты расчета кроссполяризационной развязки (КПР) и коэффициента эллиптичности (КЭ) облучателя в осевом направлении, а также КУ в составе зеркальной антенны в диапазонах приема и передачи сведены в табл. 1. КУ определен при использовании облучателя в составе двухзеркальной антенны Кассегрена с основным зеркалом диаметром $d = 1200$ мм, имеющим фокусное расстояние $d = 420$ мм. В соответствии с техническими требованиями станции спутниковой связи, для которой разрабатывалась антенна, поляризация поля излучения облучателя в диапазоне приема – левая круговая, в диапазоне передачи – правая круговая.

Табл. 1. Параметры двухдиапазонного облучателя

Tab. 1. Dual-band irradiator parameters

Диапазон	f , ГГц	Параметр		
		КПР, дБ	КЭ	КУ, дБ, антенна Кассегрена
RX	19.172	23.1	0.87	45.00
	19.327	21.8	0.85	45.31
	19.482	24.7	0.89	45.20
	19.637	26.5	0.91	45.15
	19.792	23.9	0.88	45.91
TX	43.924	26.6	0.91	51.60
	44.074	25.6	0.90	51.62
	44.224	28.9	0.93	51.70
	44.374	24.0	0.88	51.65
	44.524	27.7	0.92	51.70

Из приведенных данных следует, что в диапазоне частот приема КПР превышает 21.8 дБ, в диапазоне частот передачи развязка превышает 24 дБ. Согласно требованиям к ЗССС кроссполяризационная развязка должна в обоих диапазонах составлять не менее 19 дБ.

В диапазоне приема КЭ превышает 0.85, а КУ превышает 44.9 дБи. В диапазоне передачи КЭ превышает 0.88, КУ превышает 51.6 дБи.

Для оценки технических показателей проведено сравнение ожидаемых параметров представленной в настоящей статье конструкции облучателя Ka/Q-диапазонов ЭИФ5.468587.001 (далее – облучатель ЭИФ5.468587.001) и конструкции облучателя Ka/Q-диапазонов разработки АО "РЕШЕТНЕВ" в составе антенны 08150.6220-0 (см. рис. 1).

Из-за ограничений вычислительных мощностей при расчетах не учитывались тепловые потери, поэтому вычислялось значение коэффициента направленного действия (КНД), а не КУ. По оценке, тепловые потери в зеркальной антенне составят 0.2...1.0 дБ в зависимости от особенностей конструкции и диапазона частот.

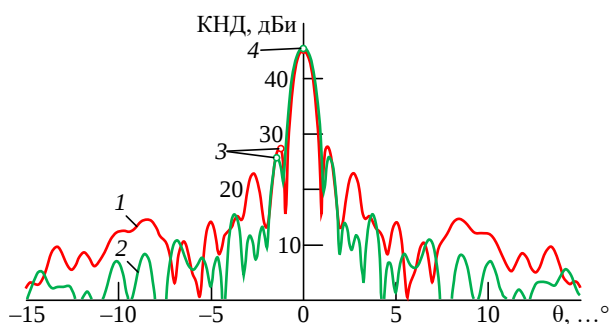


Рис. 10. Диаграмма направленности антенны на частоте 19.172 ГГц: 1 – с облучателем 08150.6220-0; 2 – с облучателем ЭИФ5.468587.001; 3 – главный максимум; 4 – первый боковой лепесток

Fig. 10. Antenna radiation pattern at a frequency of 19.172 GHz: 1 – with 08150.6220-0 feed; 2 – with ЭИФ 5.468587.001 feed; 3 – main maximum; 4 – first side lobe

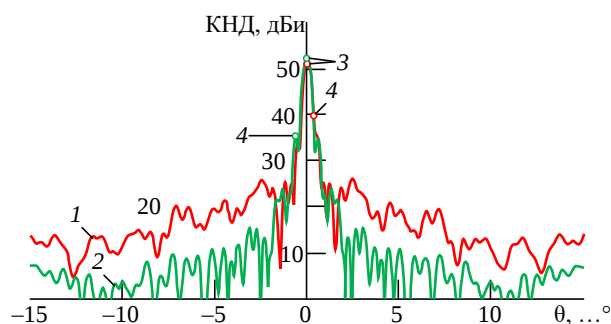


Рис. 11. Диаграмма направленности антенны на частоте 43.924 ГГц: 1 – с облучателем 08150.6220-0; 2 – с облучателем ЭИФ5.468587.001; 3 – главный максимум; 4 – первый боковой лепесток

Fig. 11. Antenna radiation pattern at a frequency of 43.924 GHz: 1 – with 08150.6220-0 feed; 2 – with ЭИФ 5.468587.001 feed; 3 – main maximum; 4 – first side lobe

Табл. 2. Параметры сравниваемых облучателей в составе зеркальной антенны диаметром 12 м

Tab. 2. Parameters of compared feeds as part of a reflector antenna with a diameter of 12 m

f, ГГц	КНД _{max} , дБи		УБЛ, дБ	
	С обл. 08150.6220-0	С обл. ЭИФ5.468587.001	С обл. 08150.6220-0	С обл. ЭИФ5.468587.001
19.172	45.3	46	-17.9	-20.1
19.792	45.7	45.9	-16.7	-21.3
43.924	51.3	52.7	-12.0	-16.7
44.542	51.5	52.7	-10.9	-17.4

На рис. 10 приведены результаты расчета КНД двухзеркальной антенны с облучателем 08150.6220-0 (рис. 10, а) и облучателем ЭИФ5.468587.001 (рис. 10, б) на нижней частоте приема, а на рис. 11 – на нижней частоте передачи. ДН приведены для сечения $\varphi = 0$. В диапазоне приема приведены ДН для правой круговой поляризации, в диапазоне передачи – для левой круговой поляризации.

На рис. 10, 11 цифрами 3, 4 обозначены уровень главного максимума и первого бокового лепестка соответственно.

В табл. 2 приведены основные результаты расчетов параметров сравниваемых облучателей в составе зеркальной антенны диаметром 12 м.

Заключение. Результаты электродинамических расчетов показали эффективность использования разработанной двухдиапазонной облучающей системы Ka/Q-диапазонов. Описанный в настоящей статье облучатель ЭИФ5.468587.001 позволяет формировать осесимметричную ДН зеркальной антенны с более

высоким КНД (на 0.7 дБи в режиме приема и на 1.4 дБи в режиме передачи) и с более низким уровнем внеосевых излучений по сравнению с облучателем 08150.6220-0, используемым в настоящее время в составе ЗССС производства АО "РЕШЕТНЕВ". Уровень боковых лепестков ДН антенны при использовании облучающей системы ЭИФ5.468587.001 на 2.2 дБ в режиме приема и на 4.7 дБ в режиме передачи меньше, чем в зеркальной антенне 08150.6220-0.

Недостатком описанного облучателя является малое значение развязки между каналами приема и передачи в диапазоне частот передачи, которое составило 20 дБ. Согласно требованиям Международного консультативного комитета по радио, значение развязки для работы ЗССС в диапазоне частот передачи должно быть не менее 90 дБ. Для увеличения значения развязки поставлена задача по разработке внешнего полосно-пропускающего фильтра приемного тракта на порту RX-облучателя.

Список литературы

1. Урличич Ю., Прохоров С. Цели и задачи программы "Сфера" // Технологии и средства связи. 2019. № S1. С. 26–32.

2. Satellite communication station for Ka and Q-bands / D. D. Dmitriev, A. B. Gladyshev, V. N. Ratuschnyak, V. N. Tyapkin // J. of Physics: Conf. Ser. 2021. Vol. 1889, iss. 4. P. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042014

3. Гладышев А. Б., Дмитриев Д. Д., Тяпкин И. В. Экспериментальные исследования антенны земной станции перспективной системы спутниковой связи // Антенны и распространение радиоволн: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. 24–26 нояб. 2021 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2021. С. 80–83.

4. Исследование направленных характеристик антенны земной станции спутниковой связи методом спирального сканирования / А. Б. Гладышев, Д. Д. Дмитриев, В. Н. Ратушняк, О. Б. Грицан // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер. Техника и технологии. 2021. Т. 14, № 7. С. 830–839. doi: 10.17516/1999-494X-0349

5. Галкина Э. В., Кирпанев А. В., Михайлов А. Н. Двухдиапазонные антенны с поляризационными рефлекторами // СВЧ-электроника. 2019. Т. 8, № 1. С. 40–43.

6. Многодиапазонные антенны / Е. В. Овчинникова, М. А. Соков, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин, Нгуен Динь То // Вопр. электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2021. Т. 180, № 1. С. 33–39.

7. Yasin A., Yang J., Ostling T. A Compact Dual-Band Feed for Reflector Antennas Based on Choke Horn and Circular Eleven Antenna // IEEE Trans. Antennas Propag. 2009. Vol. 57, iss 10. P. 3300–3302. doi: 10.1109/TAP.2009.2029385

8. Multifeed EBG Dual Band Antenna to Feed a Reflector Antenna / A. Kanso, R. Chantalat, M. Thevenot, U. Naeem, S. Bila, T. Monediere // 41st Europ. Microwave Conf. (EuMC). Manchester, UK, 10–13 Oct. 2011. P. 866–869. doi: 10.23919/EuMC.2011.6101849

9. Quad band X/Ka horn antenna and feed chain designs / J. Teniente, I. Gómez-López, R. Caballero-Nagore, G. Crespo-López, A. Martínez-Agoñes // 11th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France, 19–24 March 2017. P. 3432–3436. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928428

10. 3D Printing of a Monolithic K/Ka-Band Dual-Circular Polarization Antenna-Feeding Network / G. Addamo, M. Lumia, F. Calignano, F. Paonessa, G. Virone, D. Manfredi, L. Iuliano, O. A. Peverini // IEEE Access.

2021. Vol. 9. P. 88243–88255. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3089826.

11. Ridge-Waveguide Stub Filters for Earth Observation Dual-Band Antenna-Feed Systems / O. A. Peverini, G. Addamo, G. Virone, M. Lumia, M. Grilli, B. Fiorelli // IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Limoges, France, 06–08 July 2022. P. 1–3. doi: 10.1109/NEMO51452.2022.10038952

12. Корчемкин Ю. Б., Кочетков О. С. Поляризатор для систем спутниковой связи с поляризационным уплотнением // Тр. МАИ. 2013. № 65. С. 33.

13. Demountable K/Q Band Coaxial Feed for Cassegrain Antenna / K. V. Lemberg, N. M. Boev, A. V. Kantyshev, O. B. Grican, D. A. Shabanov // IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, 11–13 Nov. 2022. P. 1150–1153.

14. Пат. RU 2777698 C1. МПК H01Q 13/02 (2006/01), H01Q 5/30 (2015/01). Двухчастотный облучатель зеркальной антенны / К. В. Лемберг, Б. А. Беляев, И. В. Говорун, А. А. Лексиков, Н. М. Боев, И. В. Подшивалов, О. Б. Грицан, А. В. Кантышев. Опубл. 08.08.2022. Бюл. № 22.

15. Качественная оценка вычислительных методов электродинамики на примере программных продуктов для высокочастотного моделирования микрополосковых антенн / А. Васильченко, И. Схольц, Де Раад Вальтер, Г. Ванденбош // Технологии в электронной промышленности. 2008. Т. 23, № 3. С. 52–56. URL: https://tech-e.ru/wp-content/uploads/2008_03_52.pdf (дата обращения 15.01.2024).

16. Куксенко С. П. Электромагнитная совместимость: моделирование / под ред. Т. Р. Газизова. Томск: В-Спектр, 2018. 188 с.

17. Габбазова Р. Н. Обзор программных пакетов для моделирования антенн и антенных устройств СВЧ // Лучшая студенческая статья 2018: сб. ст. XVII Междунар. науч.-исслед. конкурса: в 3 ч., Пенза, 25 нояб. 2018 г. Пенза: МЦНС "Наука и просвещение", 2018. Ч. 1. С. 119–122.

Информация об авторах

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич – доктор технических наук (2023), доцент (2015), профессор кафедры автоматизированных систем управления Воздушно-космических сил военного учебного центра Сибирского федерального университета. Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая связь; спутниковая радионавигация; радиолокация.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: M_E_Shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru

E-mail: dmitriev121074@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6438-6094>

Гладышев Андрей Борисович – кандидат технических наук (2020), доцент (2022), начальник кафедры радиоэлектронной борьбы военного учебного центра Сибирского федерального университета. Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая связь; спутниковая радионавигация; радиолокация.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: a-ghonass@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-0903-6960>

Грицан Олег Борисович – генеральный конструктор ООО «НПЦ "Малые космические аппараты"». Автор 17 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая связь, спутниковая радионавигация.
Адрес: ООО «НПЦ "МКА"», ул. Транзитная, д. 7, корп. 1, Железногорск, Красноярский край, 662970, Россия
E-mail: gritsan@npc-mka.ru

References

1. Urlichich Yu., Prokhorov S. Goals and Objectives of Sphere Program. Technologies and Communications. 2019, no. S1, pp. 26–32. (In Russ.)
2. Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratuschniyak V. N., Tyapkin V. N. Satellite Communication Station for Ka and Q-Bands. J. of Physics: Conf. Ser. 2021, vol. 1889, iss. 4, pp. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042014
3. Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Tyapkin I. V. Experimental Studies of the Earth Station Antenna of a Promising Satellite Communication System. Antennas and Radio Wave Propagation: Reports of the All-Russ. Sci. and Tech. Conf. 24–26 Nov. 2021. St Petersburg, Izd-vo SPbSETU "LETI", 2021, pp. 80–83. (In Russ.)
4. Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Ratushniak V. N., Gritsan O. B. Investigation of the Directional Characteristics of the Antenna of the Satellite Earth Station Using the Spiral Scanning Method. J. Of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2021, vol. 14, no. 7, pp. 830–839. doi: 10.17516/1999-494X-0349. (In Russ.)
5. Galkina E. V., Kirpanev A. V., Mikhailov A. N. Dual-Band Antennas with Polarizing Reflectors. Microwave Electronics. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 40–43. (In Russ.)
6. Ovchinnikova E. V., Sokov M. A., Kondratyeva S. G., Shmachilin P. A., Nguyen Dinh Tho. Multi-Band Antennas. Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies. 2021, vol. 180, no. 1, pp. 33–39. (In Russ.)
7. Yasin A., Yang J., Ostling T. A Compact Dual-Band Feed for Reflector Antennas Based on Choke Horn and Circular Eleven Antenna. IEEE Trans. Antennas Propag. 2009, vol. 57, iss 10, pp. 3300–3302. doi: 10.1109/TAP.2009.2029385
8. Kansa A., Chantalat R., Thevenot M., Naeem U., Bila S., Monediere T. Multifeed EBG Dual Band Antenna to Feed a Reflector Antenna. 41st Europ. Microwave Conf. (EuMC), Manchester, UK, 10–13 Oct. 2011, pp. 866–869. doi: 10.23919/EuMC.2011.6101849
9. Teniente J., Gómez-López I., Caballero-Nagore R., Crespo-López G., Martínez-Agoñes A. Quad Band X/Ka Horn Antenna and Feed Chain Designs. 11th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France, 19–24 March 2017, pp. 3432–3436. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928428
10. Addamo G., Lumia M., Calignano F., Paonessa F., Virone G., Manfredi D., Iuliano L., Peverini O. A. 3D Printing of a Monolithic K/Ka- Band Dual-Circular Polarization Antenna-Feeding Network. IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 88243–88255. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3089826
11. Peverini O. A., Addamo G., Virone G., Lumia M., Grilli M., Fiorelli B. Ridge-Waveguide Stub Filters for Earth Observation Dual-Band Antenna-Feed Systems. IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Limoges, France, 06–08 July 2022, pp. 1–3. doi: 10.1109/NEMO51452.2022.10038952
12. Korchemkin Yu. B., Kochetkov O. S. Polarizer for Satellite Communication Systems with Polarization Multiplexing. Proc. of MAI. 2013, no. 65, p. 33. (In Russ.)
13. Lemberg K. V., Boev N. M., Kantyshev A. V., Grican O. B., Shabanov D. A. Demountable K/Q Band Coaxial Feed for Cassegrain Antenna. IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, 11–13 Nov. 2022, pp. 1150–1153.
14. Lemberg K. V., Belyaev B. A., Govorun I. V., Leksikov A. A., Boev N. M., Podshivalov I. V., Gritsan O. B., Kantyshev A. V. Dual-Frequency Reflector Antenna Feed. Pat. RU 2777698 C1. МПК H01Q 13/02 (2006/01), H01Q 5/30 (2015/01). Publ. 08.08.2022. Bull. no. 22. (In Russ.)
15. Vasil'chenko A., Skhol'ts I., Val'ter De Raad, Vandenbosh G. Qualitative Assessment of Computational Methods of Electrodynamics Using the Example of Software Products for High-Frequency Modeling of Microstrip Antennas. Technologies in the Electronics Industry. 2008, vol. 23, no. 3, pp. 52–56. Available at: https://tech-e.ru/wp-content/uploads/2008_03_52.pdf (accessed 15.01.2024).
16. Kuksenko S. P. *Elektromagnitnaya sovместimost': modelirovanie* [Electromagnetic Compatibility: Modeling]. Ed. by T. R. Gazizov. Tomsk, V-Spectr, 2018, 188 p. (In Russ.)
17. Gabbazova R. N. Review of Software Packages for Modeling Antennas and Microwave Antenna Devices. Best student article 2018: articles of the XVII Intern. Research Competition. Pt. 1. Penza, 25 Nov. 2018. Penza, MTsNS "Nauka i prosveshchenie", 2018, pp. 119–122. (In Russ.)

Information about the authors

Dmitry D. Dmitriev, Dr Sci. (Eng.) (2023), Associate Professor (2015), Professor of the Department Automated Control Systems of Siberian Federal University. Author of more than 170 scientific papers. Area of expertise: satellite communications; satellite radio navigation; radar.
Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: dmitriev121074@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6438-6094>

Andrey B. Gladyshev, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Associate Professor (2022), Head of the Electronic Warfare Department of Siberian Federal University. Author of more than 80 scientific papers. Area of expertise: satellite communications; satellite radio navigation; radar.

Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: a-glonass@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-0903-6960>

Oleg B. Gritsan, general designer of "Research and Production Center "Small Spacecraft". Author of 17 scientific papers. Area of expertise: satellite communications; satellite radio navigation.

Address: LLC «Research and Production Center "Small Spacecraft"», 7, bld. 1, Transitnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region 662970, Russia

E-mail: gritsan@npc-mka.ru
