РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 4, с. 56–62

РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.396.679 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.4.56.62

Особенности построения приемо-передающего антенно-волноводного устройства *K*-, *Ka*-диапазонов систем связи

С. И. Бойчук, *rniirs@rniirs.ru*
ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
В. И. Демченко, *к. т. н., rniirs@rniirs.ru*
ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
А. Е. Коровкин, *rniirs@rniirs.ru*
ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
А. В. Шипулин, *rniirs@rniirs.ru*
ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
Ю. И. Полтавец, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Приведены результаты разработки антенно-волноводного тракта, обеспечивающего прием и передачу сигналов в расширенном диапазоне *K-, Ka-* с режимом автосопровождения, реализованном на возбуждении высших типов волн. Определены показатели эффективности облучателя, параметры волноводного устройства выделения сигналов ошибки, частотного дуплексера, фазосдвигающих секций и устройств поляризационного преобразования.

Ключевые слова: антенно-волноводный тракт, диаграмма направленности, гофрированный рупор

Construction Features of the Transceiver Antenna-Waveguide Device of *K/Ka*-Band Communication Systems

S. I. Boychuk, *rniirs@rniirs.ru*
FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russian Federation
V. I. Demchenko, *Cand. Sci. (Engineering), rniirs@rniirs.ru*
FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russian Federation
A. E. Korovkin, *rniirs@rniirs.ru*
FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russian Federation
A. V. Shipulin, *rniirs@rniirs.ru*
FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russian Federation
Yu. I. Poltavets, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of the development of an antenna and waveguide transmission line providing reception and transmission of signals in the extended *K/Ka*-band with an autotracking mode implemented on the excitation of higher types of waves. The indicators efficiency of the feed, parameters of the waveguide device for extracting error signals, frequency duplexer, phase-shifting sections, and polarization conversion devices were determined.

Keywords: antenna and waveguide transmission line, radiation pattern, corrugated horn

Загруженность линий систем связи в *Ka*-диапазоне с каналами приема и передачи на частотах 19 ГГц и 30 ГГц приводит к необходимости переходить к более высоким значениям частот при создании перспективных систем связи, что позволит увеличить объем передаваемой информации по каналам земных станций спутниковой связи. Для увеличения качества передачи широко используются сигналы ортогональных круговых поляризаций. Применение поляризационного уплотнения в таких системах предполагает обеспечение многодиапазонной зеркальной антенны (МЗА) уровня кроссполяризационной развязки в рабочих диапазонах частот не менее −30 дБ [1]. Для работы в миллиметровом диапазоне частот МЗА должна иметь высокие показатели эффективности, обеспечивающие прием и передачу сигналов в различных погодных условиях [2, 3]. При этом выбор требуемых значений показателей эффективности должен проводиться с учетом возможности обеспечения повышенной точности наведения и удержания максимума диаграммы направленности (ДН), которая с ростом частоты приводит к значительному уменьшению ее ширины.

Очевидно, решение задачи создания высокоэффективного МЗА связано прежде всего с разработкой первичного антенно-волноводного устройства (АВУ). В соответствии с этим в статье исследуются частотные характеристики составных частей АВУ для двухдиапазонной антенны спутниковой связи *K*-, *Ka*-диапазонов.

Цель статьи — оценка возможности разработки АВУ *K*-, *Ka*-диапазонов с кроссполяризационной развязкой не менее 30 дБ и возможностью построения режима автосопровождения на едином рупорном излучателе.

Решаются следующие задачи.

1. Анализ возможности создания совмещенных приемо-передающих АВУ *K*-, *Ka*-диапазонов с характеристиками кроссполяризационной развязки не менее 30 дБ и возможностью построения режима автосопровождения на едином рупорном излучателе.

2. Выбор варианта построения разрабатываемого АВУ, показателей эффективности излучателя, параметров волноводного устройства выделения сигнала ошибки (ВУ ВСО), частотного дуплексера, фазосдвигающих секций и устройств поляризационного преобразования, обеспечивающих максимальную эффективность МЗА.

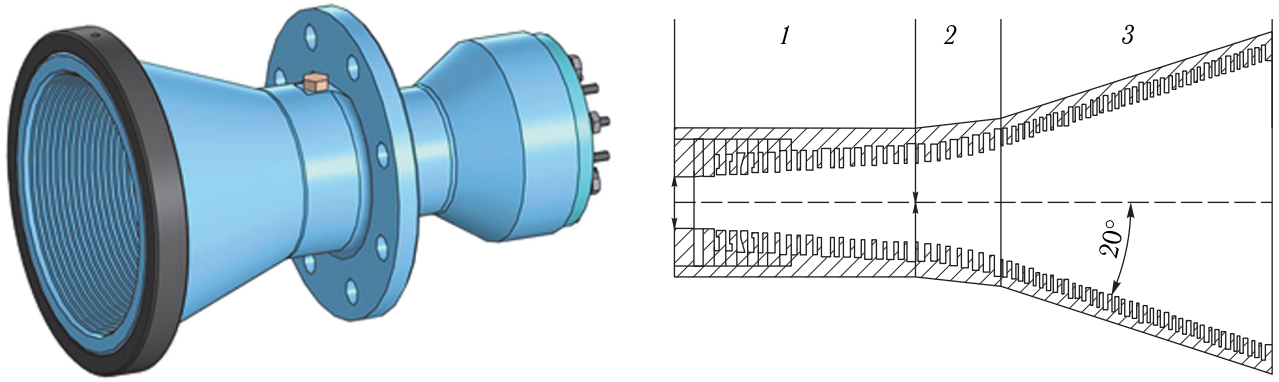
3. Исследование частотных характеристик разработанного приемо-передающего антенно-волноводного тракта.

С целью обеспечения автоматического сопровождения КА, как правило, применяется моноимпульсный метод, основанный на одновременном использовании формируемых зеркальной антенной суммарной и разностной ДН [4]. Для получения суммарно-разностных ДН в основном применяют единый многомодовый гофрированный конический рупор, в котором для возбуждения суммарной ДН используется основной тип волны H_{11}, а для разностных ДН — высшие типы волн E_{01}, H_{01}, H_{21}.

Зеркальные антенны должны содержать в своем составе совмещенный приемо-передающий антенно-волноводный тракт (АВТ), состоящий из последовательно соединенного широкополосного гофрированного рупора, формирующего ДН суммарного и разностного каналов, волноводного устройства для выделения волны высшего типа H_{21} на основе ответвителя моды, а также устройства частотной селекции сигналов премного и передающего каналов (частотный дуплексер) с устройствами поляризационного преобразования круговых поляризаций [5, 6].

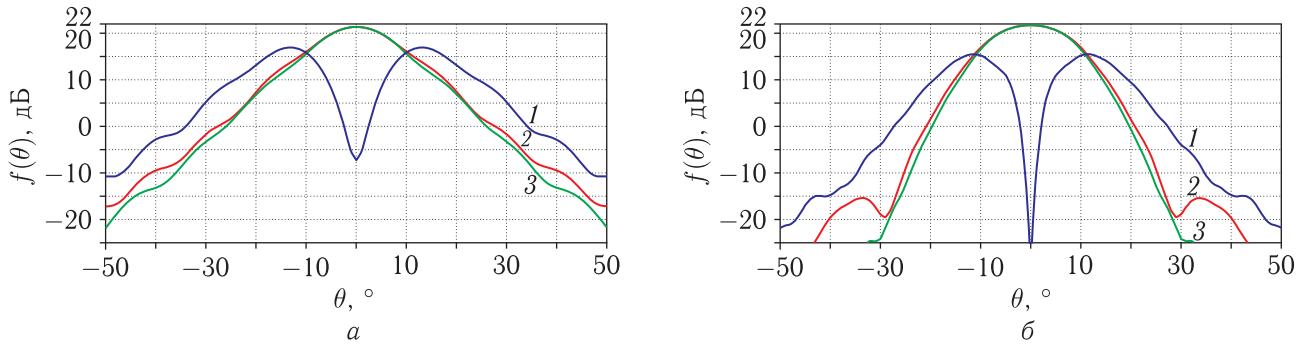
Известные технические решения не обеспечивают выполнения всей совокупности требований, предъявляемых к зеркальным антеннам *K*- и *Ka*-диапазонов земных станций спутниковой связи, в том числе автосопровождения на едином рупорном излучателе.

Для поддержания связи с сопровождаемыми КА станции должны содержать совмещенный приемо-передающий антенно-волноводный тракт с режимом автосопровождения. Представленное АВУ содержит: последовательно соединенные приемо-передающий облучатель с гофрированной внутренней структурой, волноводное устройство ВУ ВСО на основе ответвителя моды H_{21} и устройства сложения, частотный разветвитель и сумматор, устройства поляризационного преобразования — поляризаторы, поляризационные селектора; а также в приемных (суммарном и разностном) каналах расположены полосовые фильтры, предотвращающие попадание передаваемых сигналов в приемный канал.



а *б*

Рис. 1. Облучатель: *а*) общий вид; *б*) внутренняя структура, где *1* — модовый преобразователь, *2* — радиальный переход, *3* — коническая секция



а *б*

Рис. 2. Диаграмма направленности облучателя: *а*) канал приема; *б*) канал передачи, где *1* — разностная ДН, *2* — суммарная ДН в Е-плоскости, *3* — суммарная ДН в *H*-плоскости

В ходе создания АВУ были разработаны все входящие в него волноводные устройства. Оптимизация геометрических параметров внутренней структуры устройств проводилась исходя из обеспечения высоких электрических характеристик МЗА.

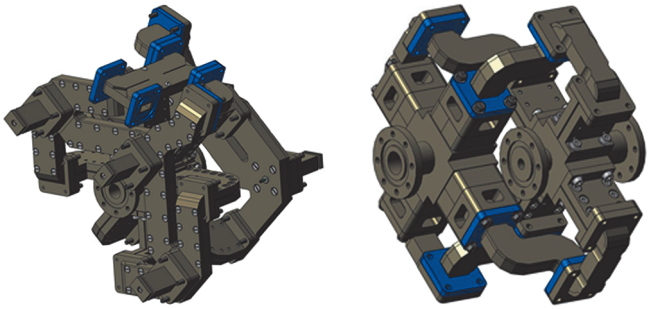
Возбуждение основного и высшего типов волн (H_{11} и H_{21}), а также формирование соответствующей суммарной и разностной ДН достигается исполнением облучателя с волноводным выходом сечения диаметром $1{,}1K\{\lambda_0\}$ и гофрированной внутренней структурой рупорной части облучателя [7]. Общий вид облучателя показан на рис. 1, *а*.

Облучатель представляет собой конический рупор с ребристой внутренней поверхностью, образованной периодической структурой кольцевых канавок, и функционально состоит из модового преобразователя длиной $5K\{\lambda_0\}$ *1*, радиального перехода длиной $1{,}6K\{\lambda_0\}$ *2* и конической секции длиной $4K\{\lambda_0\}$ *3*, образующей его раскрыв. Фазовый центр рупора отстоит на $5K\{\lambda_0\}$ от его раскрыва и меняется с ростом частоты в пределах $4K\{\lambda_0\}$–$6K\{\lambda_0\}$. Внутренняя структура облучателя показана на рис. 1, *б*.

Полученные ДН облучателя на центральных частотах рабочих диапазонов частот представлены на рис. 2.

Полученные ДН облучателя обеспечивают оптимальные характеристики облучения контррефлектора в *K*- и *Ka*-диапазонах частот с углом облучения 18° и в целом позволят добиться высоких энергетических характеристик антенной системы. Наличие разностной ДН с явно выраженным провалом (нулем ДН) в направлении максимума суммарной ДН позволит обеспечить режим автоматического сопровождения АВУ.

Для выделения сигналов ошибки и формирования разностного канала используется ВУ ВСО на основе ответвителя высшей моды H_{21}. Ответвитель моды H_{21} имеет повышенное сечение, что обеспечивает распространение высших типов волн в круглом волноводе и выделение сигналов ошибки на его боковых выходах. Содержит в каждой линии связи прямоугольные щели и не вносит возмущений в суммарный канал. При приеме и передаче сигналов в круглом волноводе ВУ ВСО, наряду с волной высшего типа H_{21}, возбуждается и волна основного типа H_{11}, что обеспечивает формирование разностной и суммарной ДН. Ответвитель моды выполнен на основе круглого волновода сечения $1{,}1K\{\lambda_0\}$ с восемью диаметрально расположенными щелями, формирующими волноводные каналы. Общий вид разработанного ВУ ВСО показан на рис. 3, *а*.



а *б*

Рис. 3. Общие виды: *а*) волноводное устройство выделения сигнала ошибки; *б*) частотный дуплексер

Разветвитель выполнен из последовательно соединенного круглого волновода $0{,}86K\{\lambda_0\}$, конического гладкого перехода с диаметрально расположенными продольными щелями и круглого волновода $0{,}41K\{\lambda_0\}$. Фильтры нижних частот вафельного типа выполнены на основе прямоугольного волновода сечением 11 × 5,5 мм. Сумматор представляет собой конический переход с диаметрально расположенными продольными щелями на круглый волновод $0{,}73K\{\lambda_0\}$.

Общий вид разработанного частотного дуплексера представлен на рис. 3, *б*.

Полученные после проведения моделирования внутренней структуры и отработки изготовленного образца значения коэффициента стоячей волны в *K*-и *Ka*-диапазонах представлены на рис. 4.

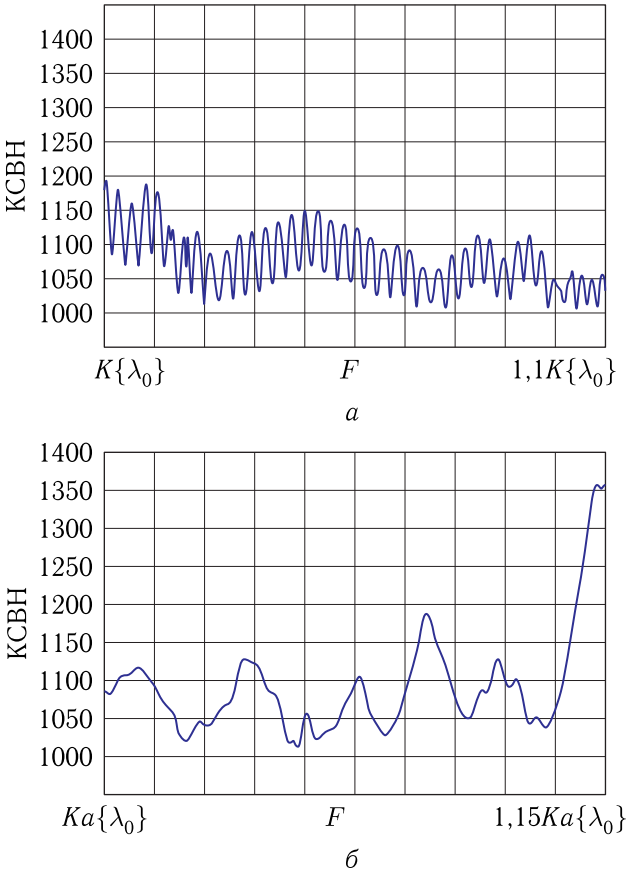


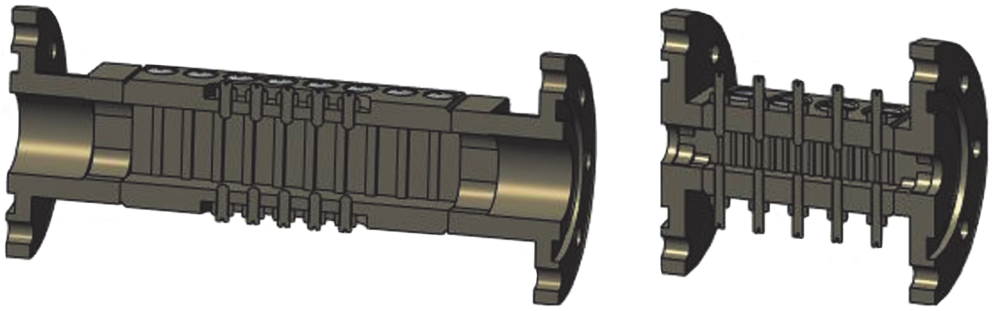
Рис. 4. Коэффициент стоячей волны частотного дуплексера: *а*) *K*-диапазон; *б*) *Ka*-диапазон

Поляризаторы приемного и передающего каналов выполнены с использованием 90-градусных фазосдвигающих секций, состоящих из отрезка квадратного волновода, на двух противоположных стенках которого выполнены периодические гофрированные структуры, а также переходов на цилиндрический волновод диаметром $0{,}73K\{\lambda_0\}$ и $0{,}41K\{\lambda_0\}$ соответственно.

Для осуществления поляризационного преобразования сигналов круговых поляризаций секции поляризаторов устанавливают под 45° к выходам ортомодовых преобразователей. Общие виды поляризаторов представлены на рис. 5.

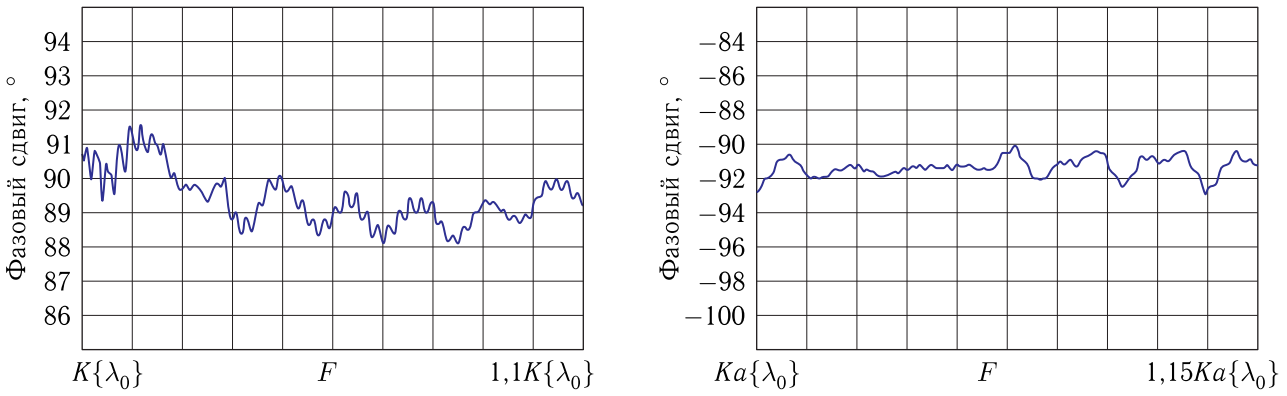
Полученные зависимости дифференциального фазового сдвига от частоты поляризаторов приемного и передающего каналов приведены на рис. 6.

Отклонение значений дифференциального фазового сдвига поляризаторов каналов приема и передачи от 90° составляет не более 1,8° и 2,9°



а *б*

Рис. 5. Общий вид поляризаторов канала приема (*а*) и передачи (*б*)



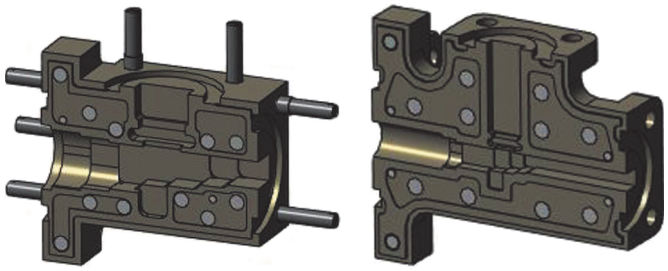
а *б*

Рис. 6. Зависимость дифференциального фазового сдвига поляризаторов приемного (*а*) и передающего (*б*) каналов от частоты

соответственно. Это позволяет добиться требуемых значений кроссполяризационной развязки.

Поляризационные селекторы приемного и передающего каналов выполнены в виде тройников, состоящих конструктивно из двух деталей. Внутренняя структура образована на основе квадратного волновода сечением 11×11 мм в приемном канале и $4{,}3 \times 4{,}3$ мм в передающем каналах, содержит ступенчатый переход на прямоугольный волновод стандартного сечения $11 \times 5{,}5$ мм в приемном канале и $6{,}2 \times 3{,}1$ мм в передающем каналах соответственно. Общие виды селекторов представлены на рис. 7.

По завершению разработки топологии и конструкции входящих устройств был сформирован приемо-передающий антенно-волноводный тракт, обеспечивающий прием и передачу сигналов в *K*-, *Ka*-диапазонах частот с режимом автосопровождения для размещения в МЗА. На рис. 8 представлен общий вид опытного образца АВУ.



а *б*

Рис. 7. Общий вид селекторов приема (*а*) и передачи (*б*)

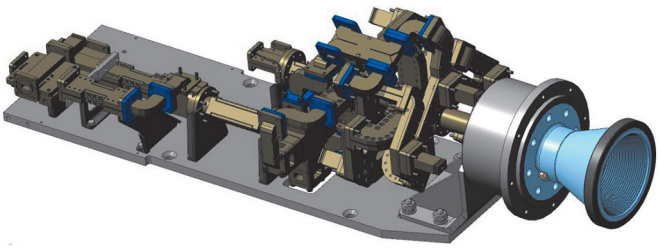
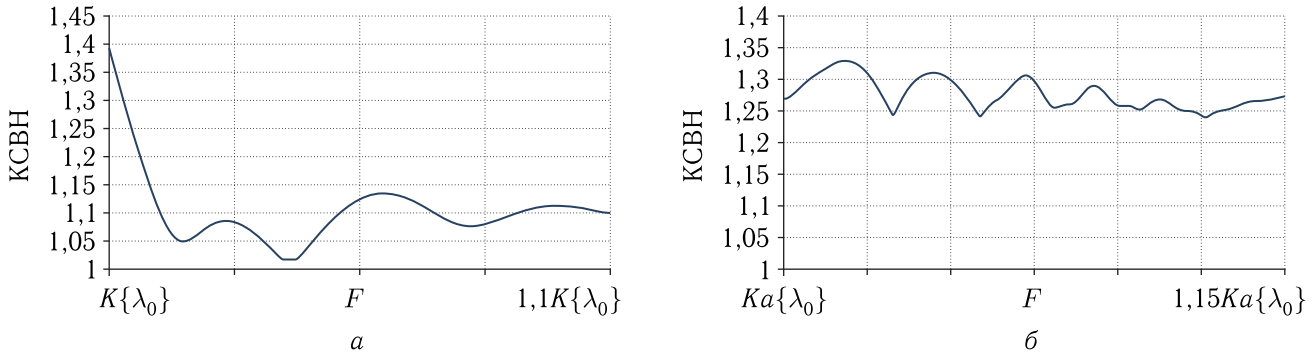
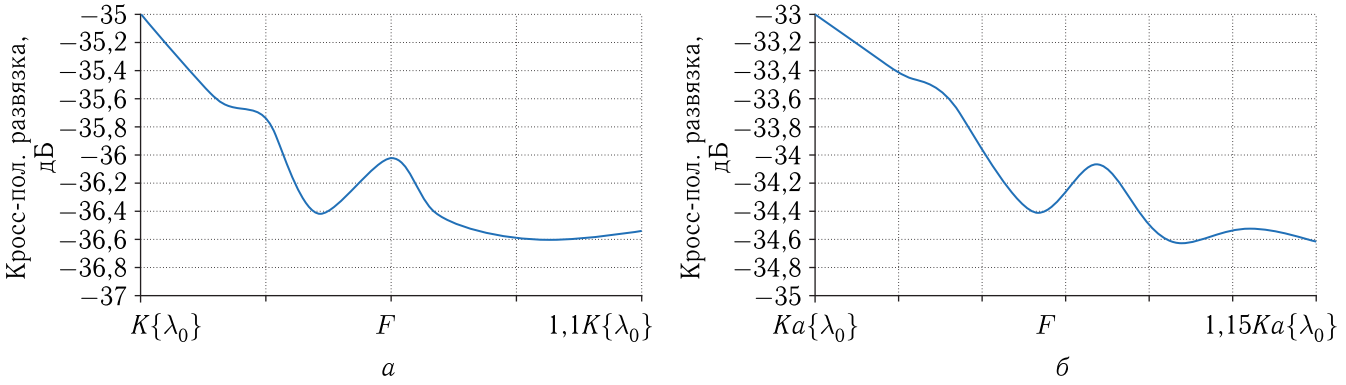


Рис. 8. Общий вид приемо-передающего антенно-волноводного тракта



а *б*

Рис. 9. Коэффициент стоячей волны антенно-волноводного тракта: *а*) по каналу приема; *б*) по каналу передачи



а *б*

Рис. 10. Кроссполяризационная развязка антенно-волноводного тракта: *а*) по каналу приема; *б*) по каналу передачи

Полученные при моделировании высокие характеристики всех устройств, а также технологичная конструкция по результатам изготовления позволили добиться по выходам антенно-волноводного тракта требуемых значений кроссполяризационной развязки и КСВН в режиме приема и передачи ортогональных сигналов круговых поляризациях в *K*-, *Ka*-диапазонах.

На рис. 9 показан уровень согласования изготовленного образца АВУ по каналу приема и передачи. КСВН не превышает значения 1,4.

На рис. 10 приведены графики зависимости измеренных кроссполяризационных развязок АВУ по каналу приема и передачи.

Графики, приведенные на рис. 10, показывают, что кроссполяризационная развязка в канале приема не превышает −35 дБ, а в канале передачи — −33 дБ.

Таким образом, предложенная конфигурация антенно-волноводного тракта *K*-, *Ka*-диапазонов частот с единым рупорным излучателем обеспечивает прием и передачу сигналов ортогональных круговых поляризаций с возможностью автоматического сопровождения КА моноимпульсным методом при работе в составе приемо-передающей МЗА.

Выводы

1. Анализ возможности создания совмещенных приемо-передающих АВУ *K*-, *Ka*-диапазонов с характеристиками кроссполяризационной развязки не менее 30 дБ и возможностью построения режима автосопровожнения на едином рупорном излучателе показал необходимость использования гофрированного рупорного излучателя на повышенном сечении, имеющего сложный преобразователь различных типов волн.

2. Выбор варианта построения разрабатываемого АВУ и входящих в него различных волноводных устройств, в том числе гофрированного рупорного излучателя, должен обеспечивать оптимальный выбор параметров при совокупности заданных требований — полосы частот, кроссполяризационной развязки, потерь по каналам приема

и передачи, возможности формирования суммарно-разностных ДН.

3. Исследование частотных характеристик разработанного приемо-передающего антенно-волноводного устройства показало, что выбранный вариант построения АВУ обеспечивает прием и передачу сигналов *K*-, *Ka*-диапазонов частот, кроссполяризационную развязку 35 дБ и 33 дБ и обеспечивает формирование суммарно-разностных ДН.

Список литературы

1. *Крылов Ю. В.*, *Тайгин В. Б.* Проектирование облучателя в *Ka/Q*-диапазоне на основе «восстанавливающей» схемы // Вестник СибГАУ, 2015, т. 16, № 2. С. 417–422.

2. *Габриэльян Д. Д.*, *Демченко В. И.*, *Коровкин А. Е. и др.* Показатели и критерии эффективности облучающей системы многодиапазонной зеркальной антенны радиоэлектронных комплексов // Вестник воздушно-космической обороны, 2018, вып. 4 (20). С. 24–33.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019666288. Расчет затухания в атмосферных газах, гидрометеорах / С. И. Бойчук, Л. Н. Козлова, А. Е. Коровкин и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «РНИИРС». № 2019612895; заявл. 21.11.2019; опубл. 06.12.2019.

4. *Коровкин А. Е.*, *Раздоркин Д. Я.*, *Шипулин А. В.* Моноимпульсный облучатель зеркальных антенн на высших типах волн // Антенны, 2012, вып. 9(184). С. 14–18.

5. *Демченко В. И.*, *Косогор А. А.*, *Раздоркин Д. Я.* Методология разработки многодиапазонных зеркальных антенн // Антенны, 2012., вып. 9(184). С. 4–13.

6. *Бойчук С. И.*, *Коровкин А. Е.*, *Раздоркин Д. Я.* Антенно-волноводные устройства с единым рупором для многодиапазонных антенных систем // Радиотехника, 2019, т. 83, № 7 (9). С. 202–208.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018611281. Программа исследования диаграммы направленности гофрированного рупора / С. И. Бойчук, Д. Д. Габриэльян, А. Е. Коровкин и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «РНИИРС». № 2017662418; заявл. 30.11.2017; опубл. 29.01.2018.