

УДК 621.396.677 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.3.82.91 EDN HTUZDV

Способы построения антенно-волноводных трактов с частотно-поляризационным разделением сигналов и их сравнительный анализ

С. И. Бойчук, rniirs@rniirs.ru

ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. Проанализированы способы построения антенно-волноводного тракта (АВТ) многодиапазонной зеркальной антенны. Рассмотрены два способа построения антенно-волноводного тракта: разделение по частоте — разделение по поляризации, разделение по поляризации — разделение по частоте. Проанализированы достоинства и недостатки каждого способа построения. Показано, что построение антенно-волноводного тракта многодиапазонной зеркальной антенны с разнесенными совмещаемыми частотными диапазонами возможно только на основе способа разделение по частоте — разделение по поляризации. При перекрывающихся рабочих полосах совмещаемых частотных диапазонов с относительным перекрытием 1 : 1,6 предпочтительным при разработке АВТ МЗА является способ разделение по поляризации — разделение по частоте.

Ключевые слова: многодиапазонная зеркальная антенна, антенно-волноводный тракт, поляризатор, устройство ответвления высшей моды

Methods for Constructing Antenna Waveguides with Frequency-Polarization Separation of Signals and Their Comparative Analysis

S. I. Boychuk, rniirs@rniirs.ru

FSUE “Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications”, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. The methods of constructing a waveguide for a multi-band reflector antenna are analyzed. Two ways of constructing waveguides are considered: frequency separation — polarization separation, polarization separation — frequency separation. The advantages and disadvantages of each construction method are analyzed. It is shown that the construction of multi-band reflector with spaced combined frequency ranges is possible only on the basis of the frequency separation — polarization separation method. In the case of overlapping operating bands of combined frequency ranges with a relative overlapping of 1 : 1.6, the polarization separation — frequency separation method is preferable for constructing the waveguides.

Keywords: multi-band reflector antenna, antenna waveguide, polarizer, high-mode coupler

Введение

Особенности построения антенн наземного сегмента систем спутниковой связи (ССС) и станций командно-измерительных систем (КИС) космических аппаратов (КА) определяются целым рядом факторов, к основным из которых можно отнести [1–4]:

- использование, наряду с КА на геостационарных орбитах, КА на низких круговых орбитах;
- использование для приема и передачи информации в каналах ССС и КИС нескольких частотных диапазонов.

Указанные особенности определяют разнообразие технических решений по построению антенн наземного сегмента и в первую очередь антенн центра управления системой, центра управления связью и шлюзовых станций. В качестве перечисленных антенн с учетом отмеченных выше факторов, как правило, используются многодиапазонные зеркальные антенны (МЗА) с высоким коэффициентом усиления.

Наведение и удержание главного луча диаграммы направленности (ДН) в направлении на КА, находящемся на геостационарной орбите, осуществляется с учетом детерминированности и малой угловой скорости движения КА относительно антенны методом программного наведения [1, 2, 4–6]. Прием сигналов от КА на низких круговых орбитах возможен только при реализации функции автосопровождения КА по направлению.

Одним из высокоточных методов автосопровождения является моноимпульсный метод, при котором требуется формирование суммарной и разностной ДН [1, 2, 4–6]. Формирование таких ДН в МЗА происходит в антенно-волноводном тракте (АВТ) с использованием высших типов волн, например, волн типа H_{21} или волн типа E_{01} , на основе которых совместно с сигналом основной моды формируется сигнал рассогласования для управления антенной [7–11]. Однако необходимость обеспечения для МЗА автосопровождения в различных диапазонах частот, что связано с выделением высшей моды в каждом из диапазонов, приводит к значительному усложнению в построении АВТ.

В наиболее общем виде структурная схема АВТ МЗА, обеспечивающего выполнение указанных требований, может быть представлена, как показано на рис. 1.

Использование устройства сигнала ошибки позволяет не только выделить информационную составляющую в принимаемом ЗА сигнале, но и сформировать сигнал автосопровождения (АС) КА.

Реализация такой структуры МЗА в зависимости от параметров принимаемых сигналов (от соотношения центральных частот и ширины рабочих полос совмещаемых диапазонов, видов поляризации принимаемых сигналов), как правило, основывается на использовании одного из двух способов: разделение по частоте — разделение по поляризации и разделение по поляризации — разделение по частоте.

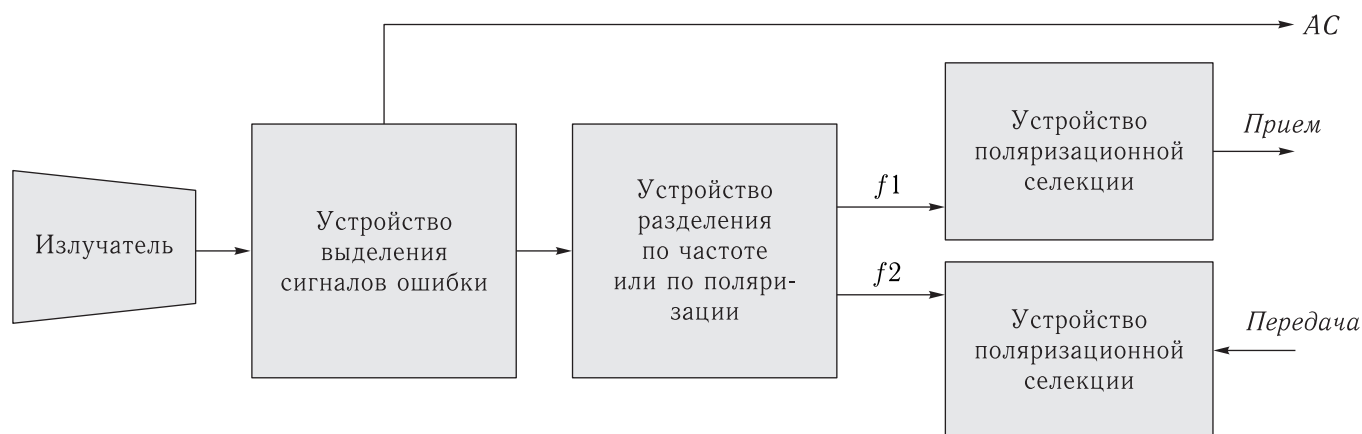


Рис. 1. Структурная схема АВТ МЗА

Выбор того или иного способа построения АВТ должен проводиться на основе сравнительного анализа достигаемых характеристик и сложности построения АВТ при использовании указанных методов.

Целью статьи является обоснование выбора способа построения АВТ МЗА с реализацией функции автосопровождения в ССС и КИС в зависимости от параметров принимаемых сигналов.

Решаемые задачи:

1. Анализ вариантов построения АВТ МЗА на основе двух способов.
2. Анализ амплитудно-частотных характеристик устройств АВТ МЗА.

Анализ вариантов построения АВТ МЗА на основе двух способов

Структурная схема АВТ МЗА с реализацией функции автосопровождения, построенного на основе способа разделение сигналов по частоте — разделение по поляризации, приведена на рис. 2. Рассмотрение случая совмещения трех диапазонов частот определяется ограничениями, связанными с условиями возбуждения высших мод в АВТ. При реализации АВТ МЗА, построенного на основе данного способа с реализацией автосопровождения на основе высшей моды, для каждого из совмещаемых диапазонов выполняется следующая последовательность операций:

- принимаемый сигнал с выхода облучателя поступает на вход ответвителя высшей моды, на первом выходе которого формируется сигнал, соответствующий высшей моде (сигнал разностного канала), на втором выходе — основной моде (сигнал суммарного канала) соответствующего частотного диапазона;

- сигнал с выхода, соответствующего разностному каналу ответвителя высшей моды, поступает на первый вход устройства преобразования и формирования сигнала ошибки (УПФСО) для реализации режима автосопровождения в соответствующем диапазоне частот;

- в каждом из частотных диплексеров последовательно отбирается сигнал нижнего диапазона (прямой канал), а сигналы более высоких диапазо-

нов частот проходят на вход следующего диплексера (боковой канал);

- сигнал с выхода прямого канала частотного диплексера поступает на вход устройства поляризационного преобразования и селекции соответствующего частотного диапазона, в котором происходит разделение сигналов одного частотного диапазона по поляризациям;

- сигнал с выхода устройства поляризационного преобразования и селекции поступает на второй вход УПФСО для реализации режима автосопровождения и параллельно на выход АВТ в устройство обработки принимаемой информации;

- на выходе УПФСО для частотного диапазона, в котором осуществляется прием и обработка сигнала, формируются команды управления антенной по углу места (АС-1) и углу азимута (АС-2).

В данном варианте построения многодиапазонными должны являться только частотные диплексеры, все остальные устройства являются однодиапазонными с рабочей полосой частот соответствующего диапазона.

Достоинством данного варианта построения АВТ являются возможность совмещения до трех-четырех диапазонов частот, типовое построение устройств поляризационного преобразования и селекции в каждом из частотных диапазонов. К недостаткам построения АВТ по данной схеме относится необходимость использования нескольких частотных диплексеров, ответвителей сигналов высшей моды, а также нескольких (по числу совмещаемых диапазонов частот) однодиапазонных устройств поляризационного преобразования и селекции.

Структурная схема АВТ МЗА, построенного на основе способа разделение по поляризации — разделение по частоте с режимом автосопровождения, приведена на рис. 3.

Достоинством данного варианта построения АВТ является отсутствие диплексеров для разделения сигналов совмещаемых диапазонов частот. Недостатком построения АВТ на основе данного способа является необходимость обеспечения рабочей полосы частот, определяемой нижней и верхней границами совмещаемых диапазонов частот. Последнее требование ограничивает возможность реализации устройств поляризационного преобразования и селекции, ответвителя моды H_{21} .

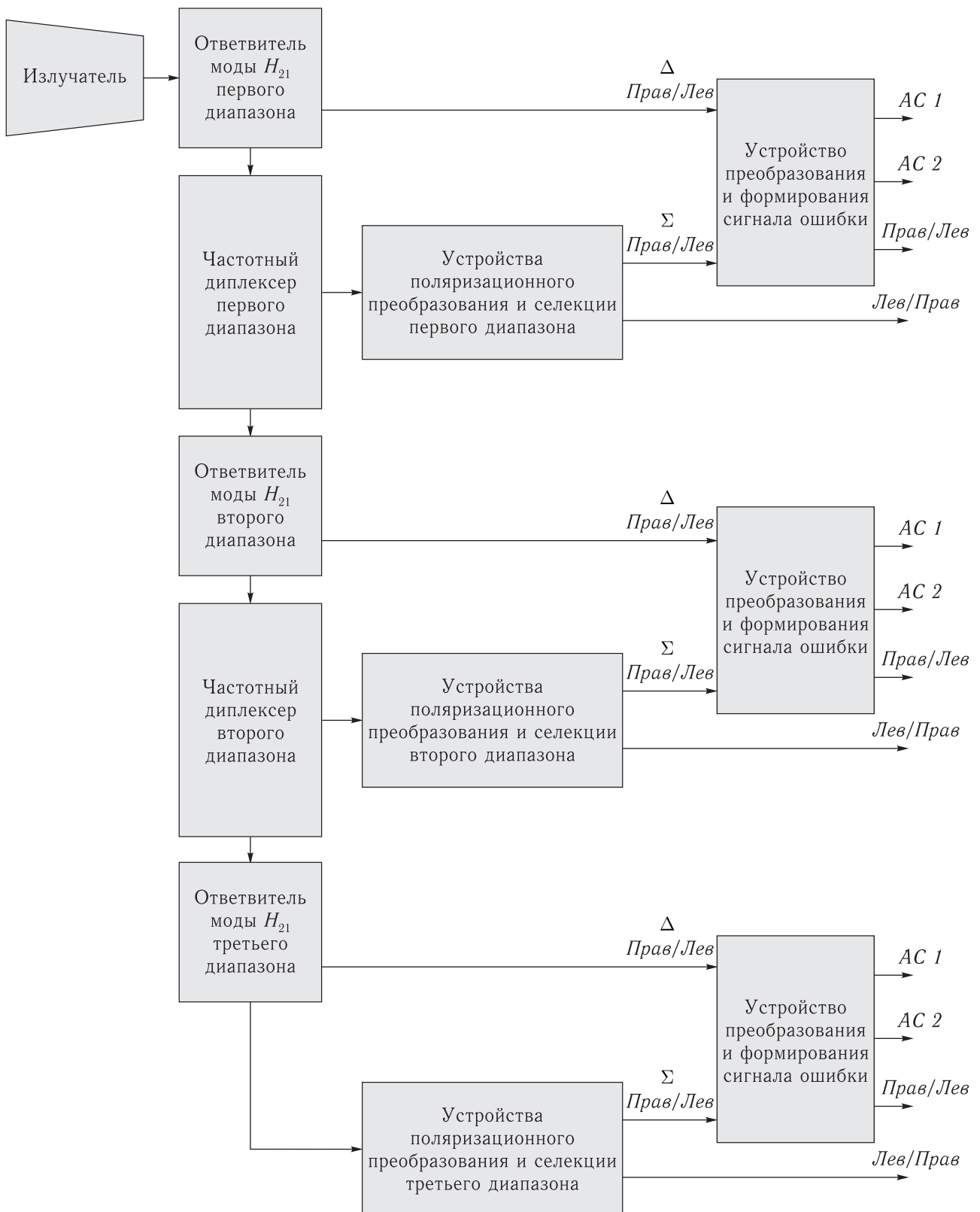


Рис. 2. Структурная схема АВТ трехдиапазонного АВТ МЗА с реализацией способа разделение по частоте-разделение по поляризации с режимом автосопровождения

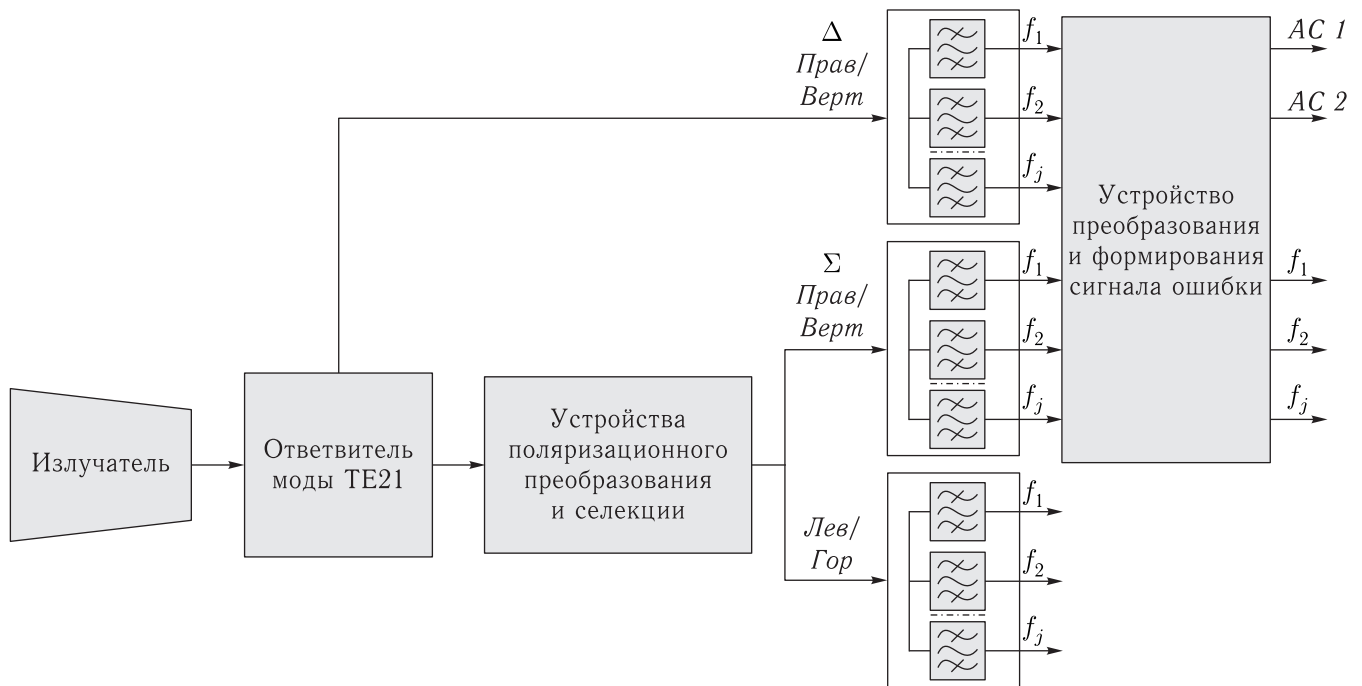


Рис. 3. Структурная схема многодиапазонного АВТ на основе способа разделения по поляризации — разделение по частоте с режимом автосопровождения

Анализ амплитудно-частотных характеристик устройств АВТ МЗА

Проанализируем возможности построения АВТ МЗА на основе указанных способов. В случае построения АВТ на основе способа разделение по частоте — разделение по поляризации принципиальную сложность построения имеют только диплексеры, которые обеспечивают отбор сигнала только одного частотного диапазона из принимаемой совокупности сигналов разных частотных диапазонов [7–12]. Все остальные устройства в АВТ, как отмечено выше, являются однодиапазонными. Варианты построения частотных диплексеров приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведены типовые АЧХ диплексеров.

При использовании второго способа построения АВТ МЗА принципиально многодиапазонными должны являться устройств отбора высшей моды H_{21} и устройства поляризационного преобразования и селекции. Формирование сигналов управления антенной в УПФСО может проводиться на промежуточной частоте при автосопровождении

в любом диапазоне частот. Это позволяет реализовать УПФСО как однодиапазонное устройство с использованием типового варианта построения.

В настоящее время широко используются различные технические решения по построению ответвителей высшей моды, в частности моды H_{21} [12–18], и устройств поляризационного преобразования и селекции [19–24]. Принцип построения устройств выделения и отбора высшей моды заключается в синфазном сложении колебаний моды H_{21} , выделяемых на щелевых отверстиях, выполненных в волноводной части канала распространения принимаемого сигнала. На рис. 6 приведены 3D-модели вариантов построения ответвителей моды H_{21} . Приведенные технические решения построения устройств отбора высшей моды H_{21} , как показано в работах [12–18], имеют рабочую полосу частот $f-1,6f$.

Наиболее характерные теоретические (штриховая линия) и экспериментальные (сплошная линия) АЧХ рассматриваемых устройств приведены на рис. 7. Приведенные зависимости определяют рабочую полосу частот ответвителя моды H_{21} как $f-1,6f$.

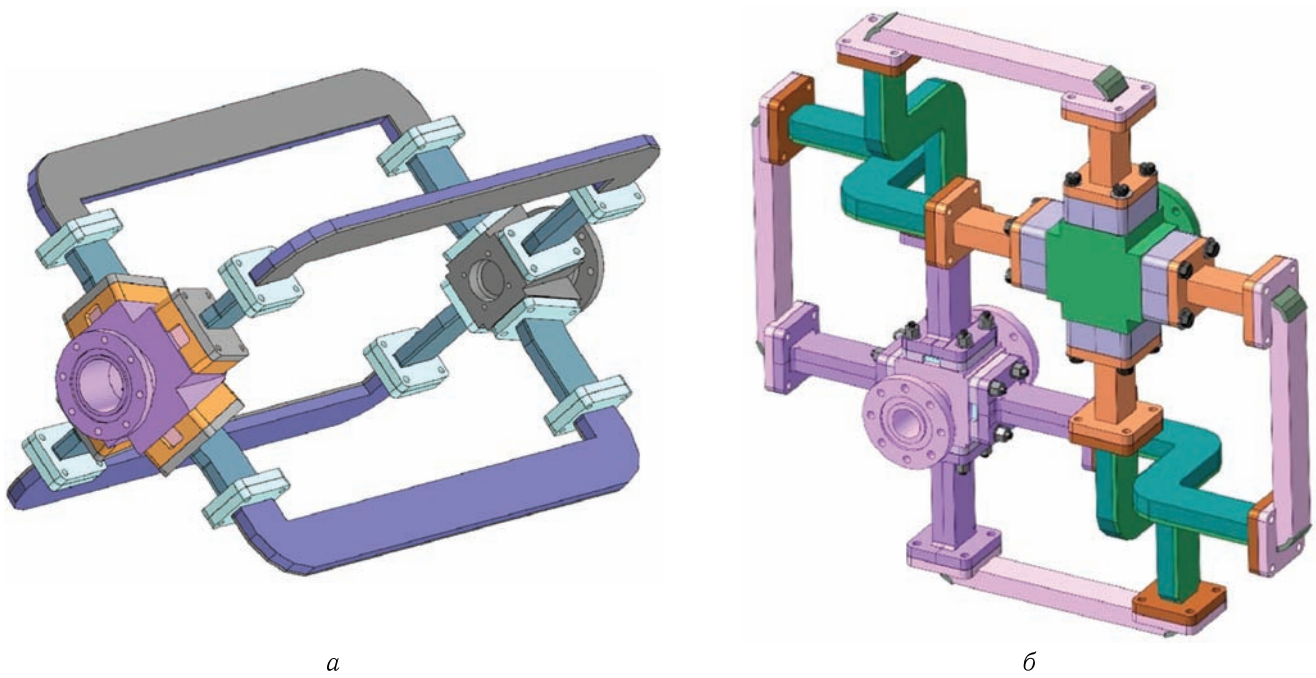


Рис. 4. 3D-модели частотных диплексов: *а* — с продольным расположением волноводного моста; *б* — с поперечным расположением волноводного моста

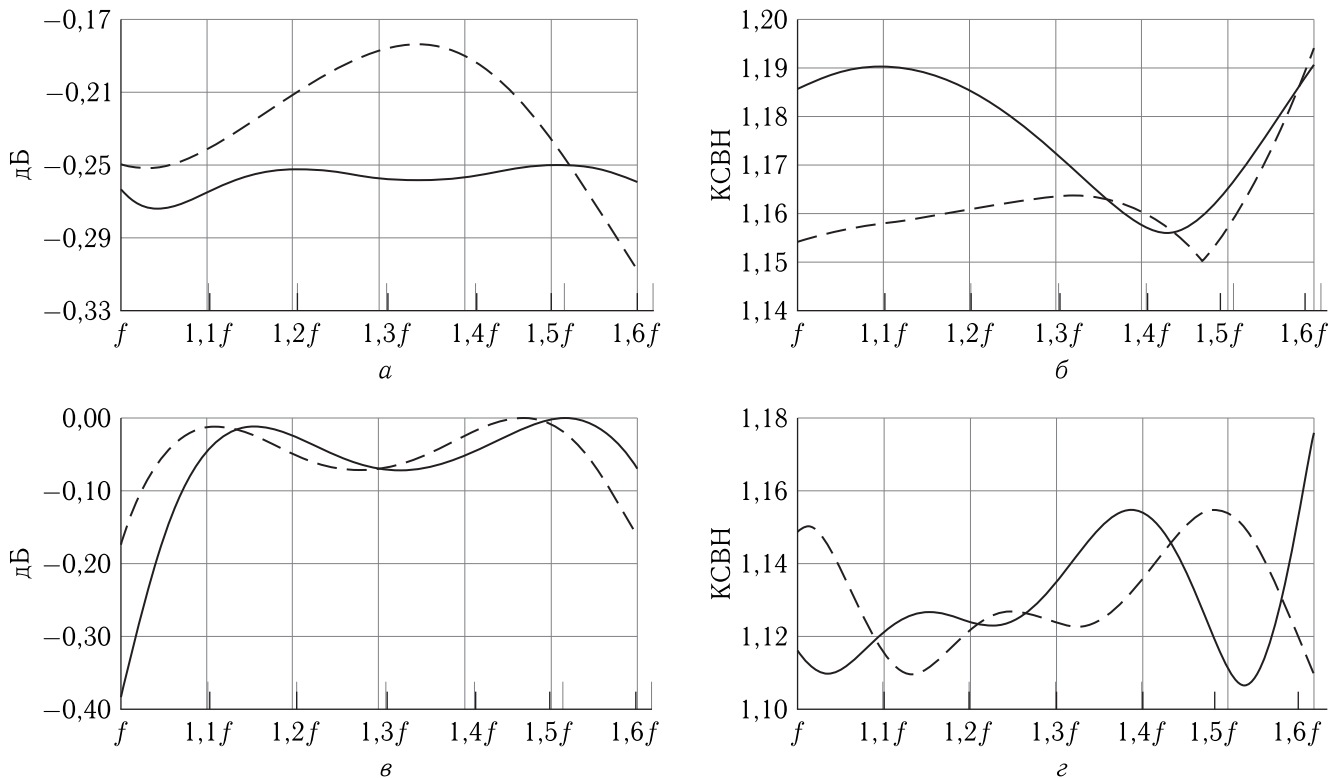
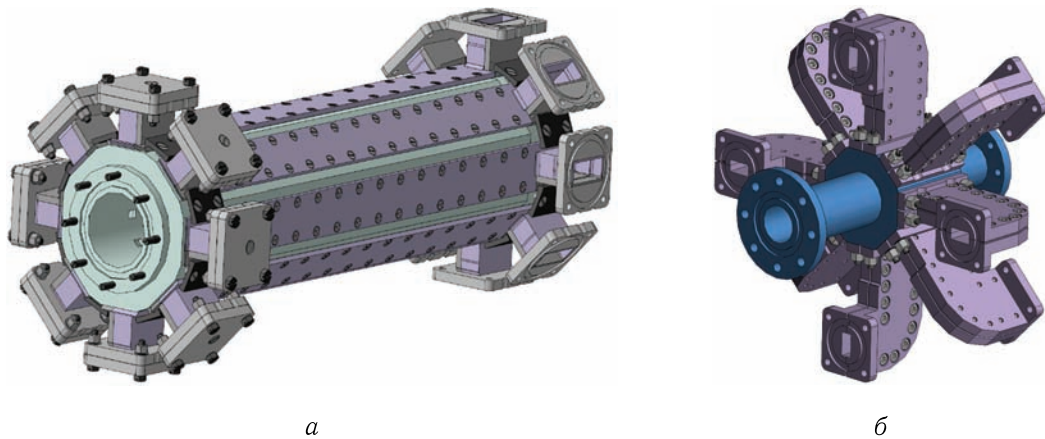
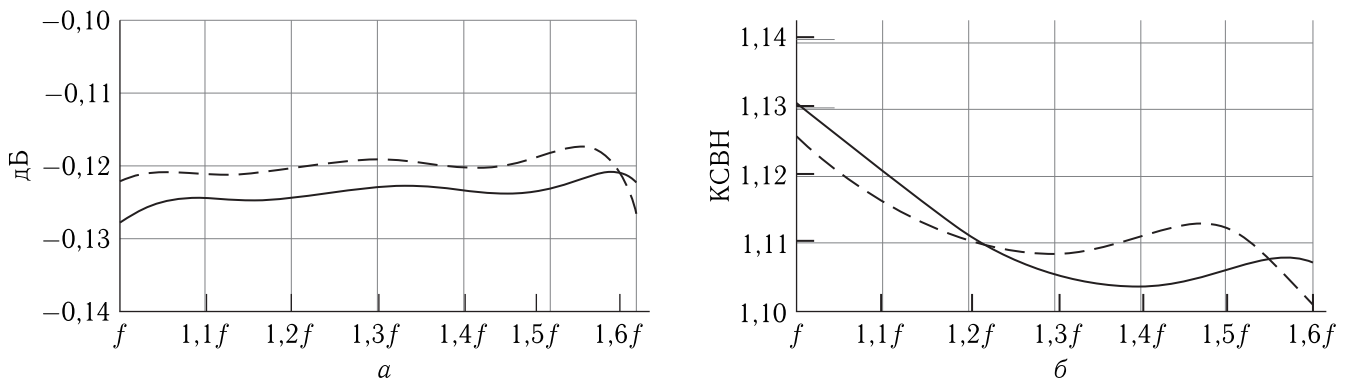


Рис. 5. АЧХ частотных диплексов: потери в прямом канале (*а*); КСВН в прямом канале (*б*); потери в боковом канале (*в*); КСВН в боковом канале (*г*)

Рис. 6. 3D-модели устройств отбора высшей моды H_{21} Рис. 7. АЧХ ответвителя моды H_{21} : потеря (а); КСВН (б)

Основой построения поляризационного преобразования и селекции является принцип различия фазовых скоростей распространения волн ортогональных поляризаций в указанных устройствах. Вид наиболее широко используемых на практике поляризаторов приведен на рис. 8.

Рассмотрены следующие типы поляризаторов:

- septum-поляризатор, в котором «встроенная неоднородность выполнена в виде четырехсекционной металлической пластины; высота которой скачком увеличивается от секции к секции, причем высота последней секции равна диаметру волновода (рис. 6, а);

- встроенная неоднородность выполнена в виде двух металлических пластин, высота которых скачком увеличивается, а потом уменьшается» [25] (рис. 6, б);

- встроенная неоднородность выполнена в виде наборов стержней постоянной длины, располо-

женных на диаметрально противоположных стенках волновода;

- встроенная «неоднородность выполнена в виде набора стержней, размещенных на противоположных стенках волновода, высота которых симметрично увеличивается от конца волновода к его центру» [25].

Приведенные технические решения построения поляризаторов обеспечивают, как отмечено в работах [19–24], рабочую полосу частот $f-1,7f$.

Наиболее характерные теоретические (штриховая линия) и экспериментальные (сплошная линия) АЧХ рассматриваемых вариантов построения поляризаторов приведены на рис. 9.

Таким образом, ответвители высшей моды H_{21} и поляризаторы имеют принципиальные ограничения полосы рабочих частот $f-1,6f$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при совмещении диапазонов частот, для ко-

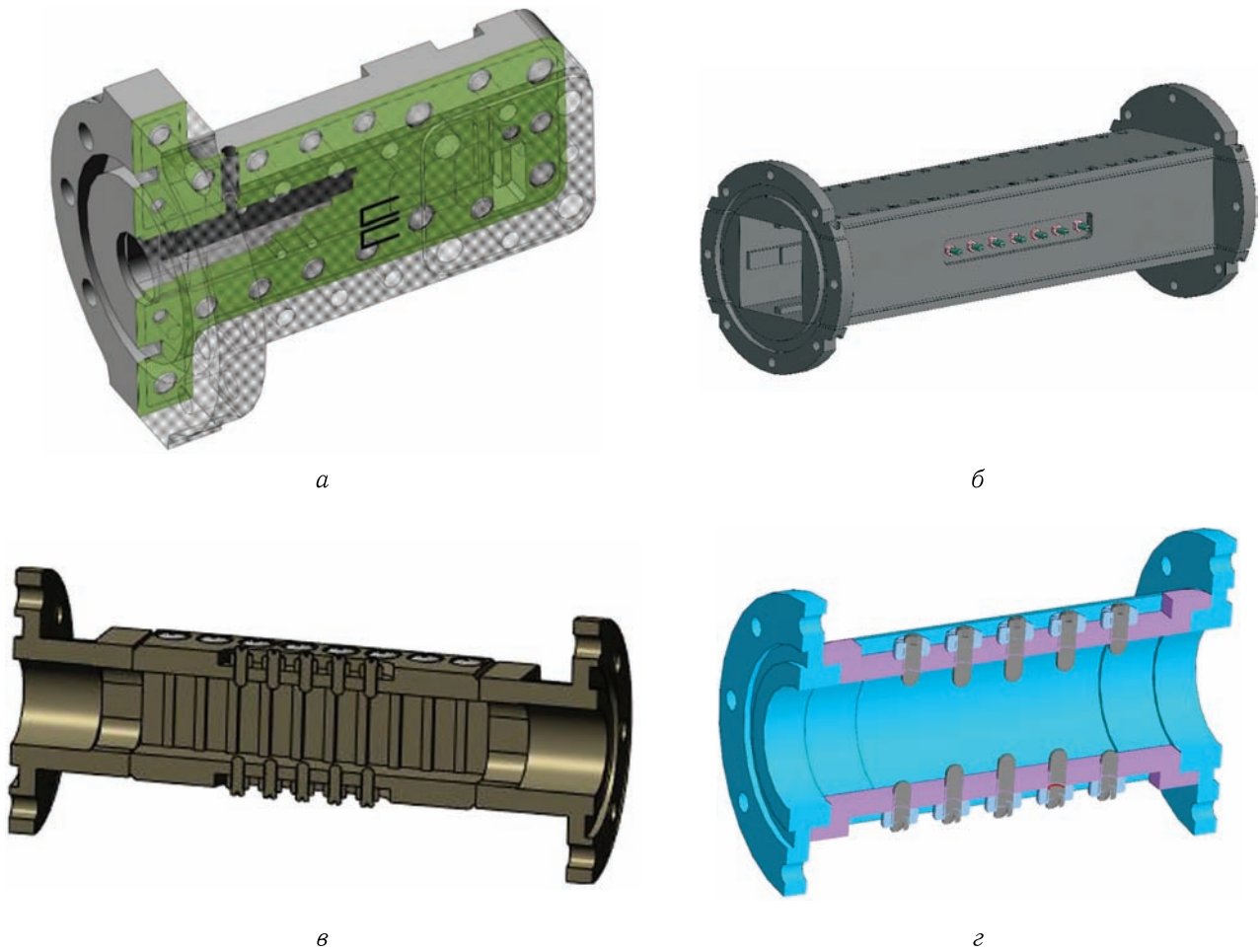


Рис. 8. 3D-модели поляризаторов

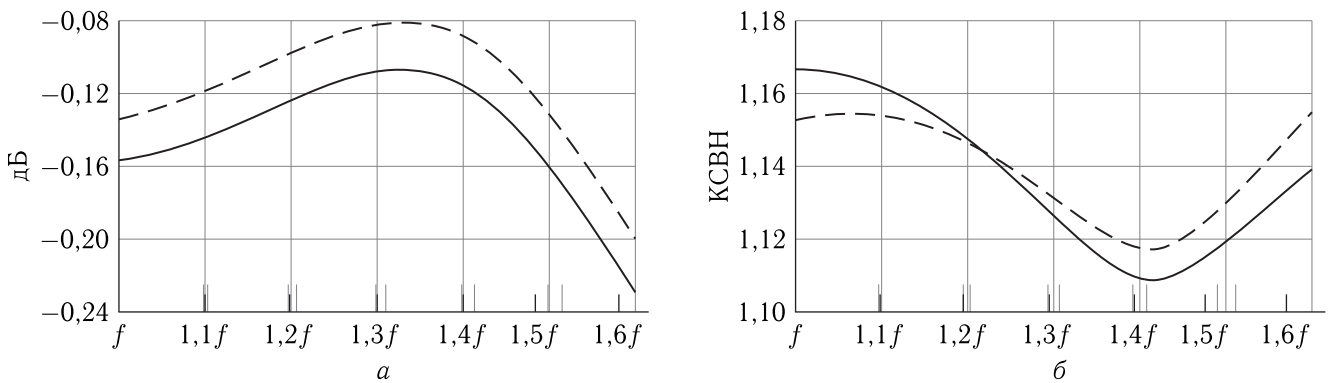


Рис. 9. АЧХ устройства поляризационного преобразования и селекции: потеря (а); КСВН (б)

торых отношение верхней границы наиболее высокого и нижней границы наиболее низкого из совмещаемых диапазонов частот меньше $f-1,6f$, построение АВТ МЗА с реализацией автосопровождения

возможно с использованием обоих способов. Однако с учетом сложности технической реализации предпочтительным является способ разделение по поляризации — разделение по частоте. При построении

АВТ МЗА с реализацией автосопровождения с совмещением диапазонов частот, для которых отношение верхней границы наиболее высокого и нижней границы наиболее низкого из совмещаемых диапазонов частот больше $f-1,6f$, построение АВТ МЗА с реализацией автосопровождения возможно только с использованием способа разделение по частоте — разделение по поляризации.

Выводы

1. Выполненный анализ построения АВТ МЗА на основе двух способов показывает:

– преимуществом варианта построения АВТ на основе способа разделение по частоте — разделение по поляризации является типовое построение устройств поляризационного преобразования и селекции в каждом из частотных диапазонов, недостатки указанного варианта построения связаны с необходимостью использования нескольких частотных диплексов (на один меньше числа совмещаемых диапазонов частоты), а также однодиапазонных устройств, включая ответвители высшей моды и поляризационного преобразования и селекции;

– достоинством варианта построения АВТ на основе способа разделение по поляризации — разделение по частоте является отсутствие диплексов совмещаемых диапазонов частот, недостатком — ограничения возможности реализации устройств поляризационного преобразования и селекции, ответвителя моды H_{21} , которые должны работать в полосе частот, определяемой совмещаемыми частотными диапазонами.

2. Анализ амплитудно-частотных характеристик устройств АВТ МЗА.

Проведенный анализ АЧХ показывает, что АВТ, построенные на основе способа разделение по частоте — разделение по поляризации, позволяют обеспечить совмещение до трех-четырёх диапазонов частот с относительной шириной рабочих полос до 25%. В то же время АВТ, построенные на основе способа разделение по поляризации — разделение по частоте, позволяют обеспечить совмещение диапазонов частот, для которых отношение нижней и верхней границ общего диапазона частот лежит в пределах $f-1,6f$.

Таким образом, построение АВТ МЗА с разнесенными совмещаемыми частотными диапазонами возможно только на основе способа разделение по частоте — разделение по поляризации, при перекрывающихся рабочих полосах совмещаемых частотных диапазонов предпочтительным является способ разделение по поляризации — разделение по частоте.

Список литературы

1. *Сомов А. М., Корнев С. Ф.* Спутниковые системы связи: Учеб. пособ. для вузов / Под ред. А. М. Сомова. М.: Горячая линия–Телеком, 2012. 244 с.
2. *Быховский М. А.* Развитие телекоммуникаций. На пути к информационному обществу. Развитие спутниковых телекоммуникационных систем: Учеб. пособ. для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 436 с.
3. *Кукк К. И.* Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее. М.: Горячая линия–Телеком, 2015. 256 с.
4. *Жодзишский А. И., Круглов А. В., Нагорных Д. Н.* Проблемы и направления развития отечественных наземных станций командно-измерительных систем космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021, т. 8, вып. 3. С. 81–88.
5. *Демченко В. И., Косогов А. А., Попов Ю. А. и др.* Антенные приемные и приемо-передающие комплексы для систем космического ДЗЗ // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» / Тезисы докладов. ОАО «Российские космические системы». Москва. 15–17 июня 2011 г.
6. *Демченко В. И., Катков Д. В., Корсун Р. Н., Кондрашов Ю. И., Куковский А. Н.* Расширение тактико-технических характеристик антенно-приемных комплексов на базе антенных установок типа ТНА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 4. С. 50–54.
7. *Габриэлян Д. Д., Демченко В. И., Коровкин А. Е. и др.* Приемно-передающий облучатель зеркальных антенн систем спутниковой связи // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2022, т. 9, вып. 1. С. 73–78.

8. *Бойчук С.И., Демченко В.И., Коровкин А.Е., Шипулин А.В., Полтавец Ю.И.* Особенности построения приемно-передающего антенно-волноводного устройства К-, Ка-диапазонов систем связи // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2020, т. 7, вып. 4. С. 56–62.
9. *Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Коровкин А.Е. и др.* Исследование частотных характеристик облучателя четырехдиапазонной антенны на основе гофрированного рупора // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2018, т. 5, вып. 1. С. 58–64.
10. *Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Коровкин А.Е. и др.* Построение облучателей многодиапазонных зеркальных антенн систем спутниковой связи // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, вып. 1. С. 40–45.
11. *Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Коровкин А.Е. и др.* Способы частотно-поляризационного разделения сигналов в зеркальных антеннах систем спутниковой связи // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 2022, т. 25, № 2. С. 83–90.
12. *Галимов Г.К.* Антенны радиотелескопов, систем космической связи и РЛС. Т. 4. М.: Адвансед Солюшнз, 2013. 392 с.
13. *Tao Shen, Kawthar A. Zaki.* Waveguide Branch Couplers for Tight Couplings // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, December 2000, vol. 48, № 12, P. 2432–2438.
14. *Fritz Arndt, Brandt J., Catina V., Ritter J. et al.* Fast CAD and Optimization of Waveguide Components and Aperture Antennas by Hybrid MM/FE/МоМ/FD Methods — State-of-the-Art and Recent Advances // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, January 2004, vol. 52, № 1. P. 292–305.
15. *Mohammadi M., Kashani F.H.* Planar Eight Port Waveguide Mono-pulse Comparator // *Progress In Electromagnetics Research C*, 2009, vol. 6. P. 103–113.
16. *Simone Bastioli, Luca Marcaccioli, Roberto Sorrentino.* An Original Resonant Y-Junction for Compact Waveguide Diplexers // *32nd European Microwave Conference Proceedings*, Oct. 2002. Milan, Italy. P. 242–248.
17. *Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R.* Waveguide Pseudoelliptic filters using slant and transverse rectangular ridge resonators // *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech*, Dec. 2008, vol. 56, № 12. P. 3129–3136.
18. *Bastioli S., Marcaccioli L., Sorrentino R.* A novel class of compact dual-mode rectangular waveguide filters using square ridge resonators. // *38th European Microwave Conference Proc.* Oct. 2008. Amsterdam, The Netherlands. P. 626–629.
19. *Филонов А.А., Фомин А.Н., Дмитриев Д.Д. и др.* Устройства СВЧ и антенны: Учебник / Под ред. А.А. Филонова. М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 492 с.
20. *Virone G., Tascone R., Peverini O.A. et al.* Optimum-Iris-Set Concept for Waveguide Polarizers // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, March 2007, vol. 17, № 3. P. 202–204.
21. *Yoneda N., Miyazaki M., Matsumura H. et al.* A Design of Novel Grooved Circular Waveguide Polarizers // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, December 2000, vol. 48, № 12. P. 2446–2452.
22. *Levy R.* The Relationship Between Dual Mode Cavity Cross-Coupling and Waveguide Polarizers // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, November 1995, vol. 43, № 11. P. 2614–2620.
23. *Bornemann J., Amari S., Uher J. et al.* Analysis and Design of Circular Ridged Waveguide Components // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, March 1999, vol. 47, № 3. P. 330–335.
24. *Bertin G., Piovano B., Accatino L. et al.* Full-Wave Design and Optimization of Circular Waveguide Polarizers With Elliptical Irises // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, April 2002, vol. 50, № 4. P. 1077–1083.
25. *Фролов О.П., Вальд В.П.* Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Горячая линия–Телеком, 2012. 496 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 29.06.2023
Дата принятия рукописи
в печать 28.08.2023