

11

Входной мультиплексор спутниковой связи Ku-диапазона на волноводных полосно-пропускающих фильтрах двенадцатого порядка

© Б.А. Беляев^{1,2}, А.А. Лексиков³, А.А. Александровский³, Я.Ф. Бальва³, А.М. Сержантов^{1,2}, С.Д. Креков³, И.Е. Бурлаков³

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2025 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2025 г.

Принято к публикации 17 апреля 2025 г.

Разработан четырехканальный мультиплексор Ku-диапазона спутниковой системы связи, выполненный на отечественной элементной базе. Центральные частоты полос пропускания каналов 12.70, 12.74, 12.78 и 12.83 GHz, а их относительные ширины $\sim 0.29\%$ по уровню -1 dB от уровня минимальных потерь. Высокая частотная селективность каналов в мультиплексоре достигается использованием волноводных полосно-пропускающих фильтров двенадцатого порядка, в которых для увеличения избирательности сформированы по два полюса затухания справа и слева от полосы пропускания. Миниатюрный входной фильтр мультиплексора с полосой пропускания 11.8–13.7 GHz, изготовленный на коаксиальных резонаторах, обеспечивает протяженную (свыше 35 GHz) высокочастотную полосу заграждения с уровнем подавления не менее 60 dB. Результаты механических и климатических испытаний созданного мультиплексора подтверждают его соответствие требованиям, предъявляемым к бортовым устройствам спутниковой связи.

Ключевые слова: мультиплексор, полосно-пропускающий фильтр, коаксиальный резонатор, циркулятор, вентиль.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.14.60764.20314

В настоящее время одним из важнейших типов полезной нагрузки космических аппаратов являются бортовые ретрансляционные комплексы. Они представляют собой радиотехническое оборудование, устанавливаемое на спутниках и предназначенное для приема сигналов от передающих земных станций систем спутниковой связи, их усиления и последующей передачи в направлении приемных земных станций. Как правило, современные бортовые ретрансляционные комплексы являются многоканальными. При этом под каналами понимают совокупность приемного и передающего оборудования, осуществляющего ретрансляцию сигналов в заданных полосах частот, формируемых канальными полосно-пропускающими фильтрами (ППФ), на которых строятся входные и выходные мультиплексоры [1–4]. Как известно, при передаче информации посредством узкополосных каналов требования к линейности характеристик мощных выходных усилителей существенно снижаются, что позволяет ретрансляторам работать с относительно высоким коэффициентом полезного действия. Очевидно, что в таком случае снижаются требования и к характеристикам выходных мультиплексоров. Однако к избирательности канальных фильтров входных мультиплексоров, как и к линейности их фазочастотных характеристик, предъявляются особенно высокие тре-

бования. В настоящей работе представлены результаты исследований входного четырехканального мультиплексора Ku-диапазона, реализованного на отечественной компонентной базе. Особенностью разработанного мультиплексора является использование в нем высокоизбирательных канальных ППФ двенадцатого порядка [5] и миниатюрного входного фильтра гармоник четвертого порядка оригинальной конструкции [6]. В металлическом корпусе фильтра гармоник располагаются металлические стержни резонаторов, замкнутые одним концом на корпус. При этом разомкнутые концы металлических стержней вставлены с небольшим зазором в соосные стержням глухие отверстия, выполненные на противоположной стороне корпуса.

Структурная схема разработанного мультиплексора показана на рис. 1. Принятый групповой сигнал после входного вентилья поступает на входной ППФ (его фотография показана на вставке *a*), который обеспечивает прохождение сигнала с минимальными потерями 0.16 dB в рабочей полосе частот 12.6–12.9 GHz. При этом он обеспечивает подавление высокочастотных помех до частоты выше 35 GHz с уровнем затухания не менее 60 dB. Затем сигнал разделяется разработанным двухсекционным мостовым делителем мощности (его фотография приведена на вставке *b*) на две равные части и поступает

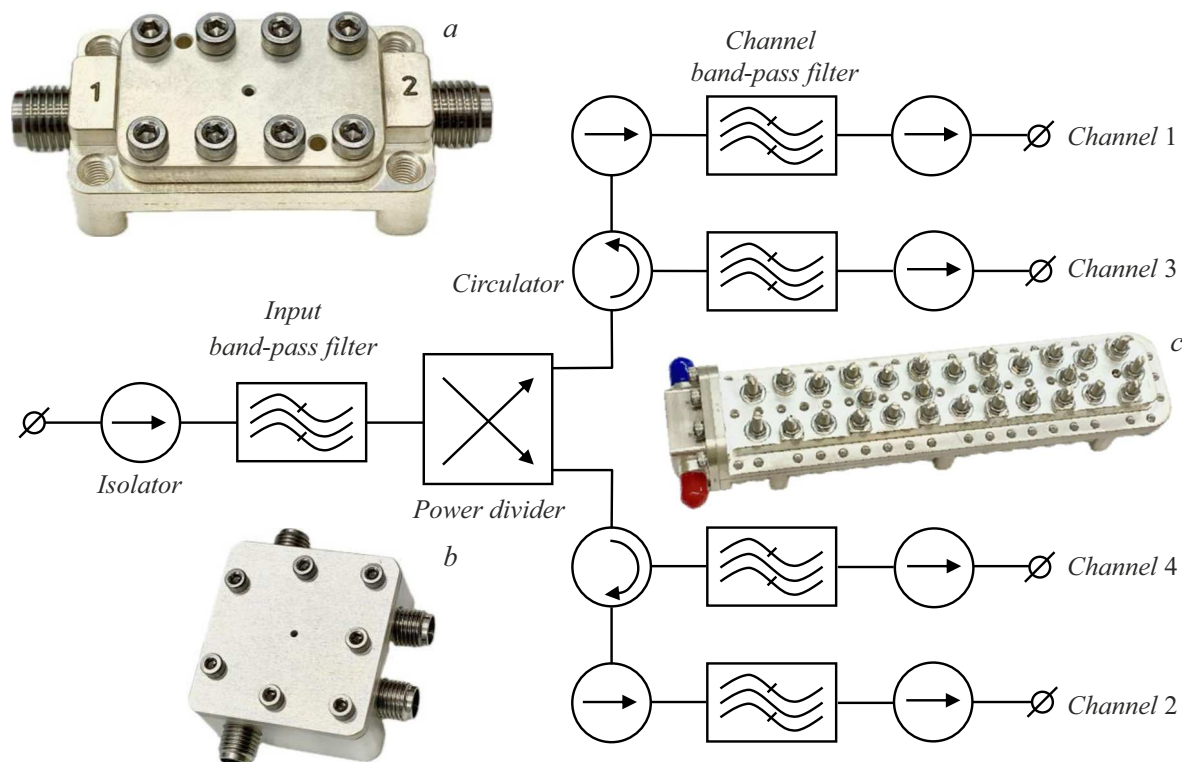


Рис. 1. Структурная схема четырехканального мультиплексора спутниковой связи. На вставке *a* — фотография входного фильтра четвертого порядка; на вставке *b* — двухсекционного мостового делителя; на вставке *c* — канального фильтра двенадцатого порядка.

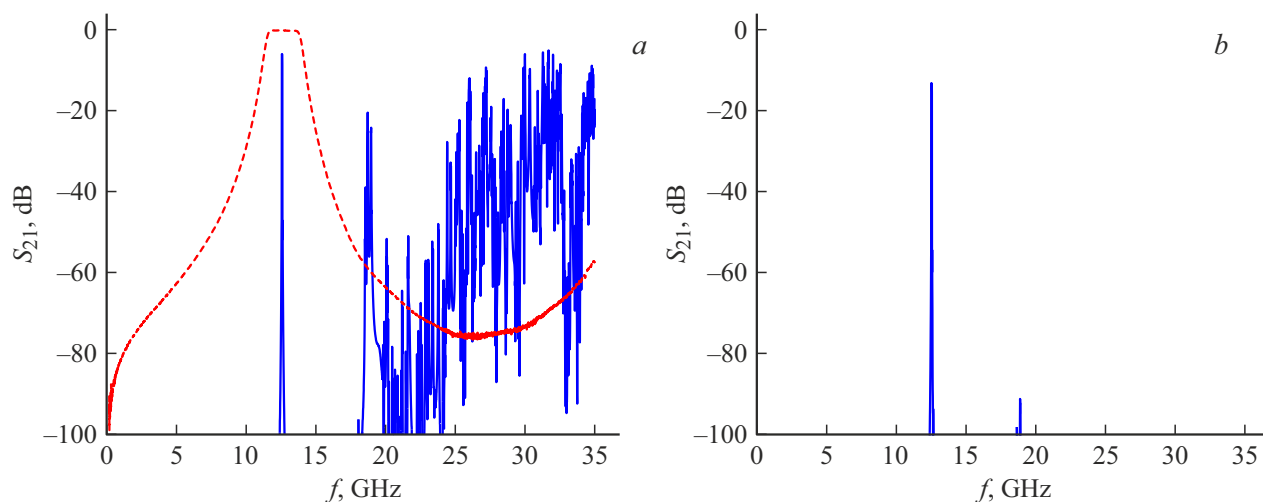


Рис. 2. *a* — измеренные АЧХ канального (сплошная линия) и входного (штриховая линия) ППФ; *b* — измеренная АЧХ первого канала мультиплексора.

в верхнее и нижнее плечи схемы (рис. 1). Заметим, что к четвертому разъему, который виден на фотографии делителя, подключается согласованная нагрузка. Далее с помощью циркуляторов и канальных полосовых фильтров (фотография одного из них приведена на вставке *c*) из верхнего плеча выделяются нечетные каналы, а из нижнего — четные. Отметим, что циркуляторы марки

ФКВН2-71 и вентили на их основе изготовлены компанией Феррит-Домен (Санкт-Петербург, Россия).

Основное назначение канальных ППФ заключается в максимальном подавлении близко расположенных смежных каналов, что достигается высокой крутизной склонов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров. При этом у канальных фильтров должна быть минимальная неравномерность АЧХ в рабочей

полосе частот и высокая линейность фазочастотной характеристики, т.е. должна обеспечиваться минимальная неравномерность группового времени запаздывания (ГВЗ). Как правило, при построении входного мультиплексора к характеристикам канальных фильтров приоритет отдается не величине затухания сигнала в рабочей полосе частот, а указанным выше характеристикам. В результате суммарные активные потери в каналах могут достигать величины более 10 dB. Они складываются из потерь входного фильтра, в мостовом делителе (≥ 3 dB), потерь в циркуляторах (0.4 dB), в вентильях (0.4 dB), в канальных фильтрах (~ 6 dB) и в соединительных коаксиальных линиях. Однако с учетом того, что входной мультиплексор располагается после малошумящего усилителя, его тепловые шумы не вносят существенного вклада в общую шумовую температуру устройства.

Одной из серьезных проблем, требующих решения при разработке входных мультиплексоров, является необходимость подавления паразитных полос пропускания канальных фильтров, у которых в случае их построения на волноводных резонаторах они располагаются, как известно, сравнительно близко к полосе пропускания. На рис. 2, *a* в широком диапазоне частот показана измеренная АЧХ отдельного канального фильтра (сплошная линия). Видно, что первая паразитная полоса пропускания наблюдается на частоте примерно 18 GHz при центральной частоте рабочей полосы пропускания выбранного фильтра 12.7 GHz. Однако к высокочастотной полосе заграждения каналов разрабатываемого мультиплексора предъявляются достаточно жесткие требования: она должна простираться до частоты 35 GHz с уровнем затухания в ней более 60 dB относительно затухания в полосе пропускания каналов мультиплексора.

Для решения этой проблемы была разработана оригинальная конструкция четырехзвенного ППФ на коаксиальных резонаторах [6], которая устанавливается на входе мультиплексора. На рис. 2, *a* штриховой линией показана измеренная АЧХ разработанного входного фильтра, который имеет относительную ширину полосы пропускания $\Delta f / f_0 = 18\%$ при ее центральной частоте $f_0 = 12.7$ GHz. Минимальные вносимые потери в полосе пропускания фильтра всего 0.16 dB, при этом КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению) < 1.2 . Входной ППФ был изготовлен из алюминия с последующим гальваническим покрытием поверхности слоем серебра толщиной 6 μm . Размеры фильтра составили $30 \times 15 \times 15$ mm, а его масса всего 15 g.

На рис. 2, *b* представлена измеренная после сборки мультиплексора АЧХ первого канала. Видно, что применение входного ППФ с указанными выше характеристиками обеспечивает в высокочастотной полосе заграждения для выбранного канала уровень затухания более 80 dB вплоть до частоты, превышающей 35 GHz. Отметим, что такие же характеристики высокочастотной полосы заграждения наблюдаются у всех четырех

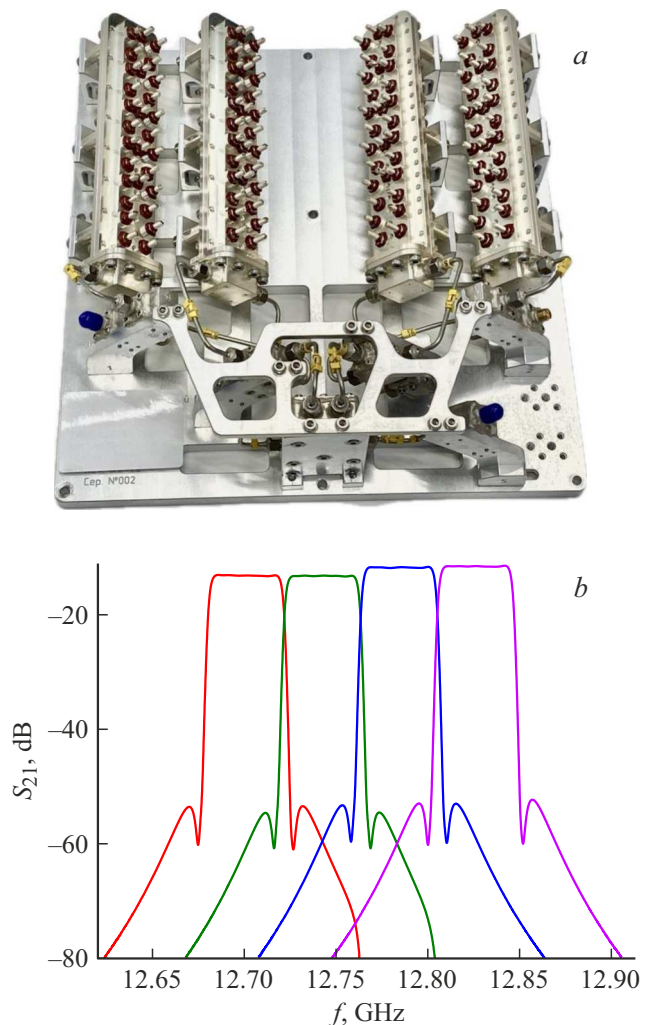


Рис. 3. *a* — фотография изготовленного четырехканального спутникового мультиплексора; *b* — измеренные в узком диапазоне частот АЧХ каналов.

каналов мультиплексора. Важно также заметить, что подавлению помех в высокочастотной полосе заграждения способствует затухание, вносимое циркуляторами и вентильями за пределами полосы их рабочих частот 12.6–13.3 GHz.

На рис. 3, *a* представлена фотография изготовленного мультиплексора, а на рис. 3, *b* в узком диапазоне частот показаны измеренные АЧХ его каналов. Высокая избирательность каналов достигается не только использованием волноводных ППФ двенадцатого порядка, но и сформированными на АЧХ двумя парами полюсов затухания, расположенными симметрично относительно центра полосы пропускания [5]. Симметричность расположения полюсов обеспечивается четырьмя дополнительными связями между парами несоседних резонаторов, две из которых являются емкостными, а две другие индуктивными.

При синтезе АЧХ канальных фильтров был использован особый подход [4,5,7], заключающийся в опреде-

ленном увеличении потерь на отражение в полосе пропускания устройства, который в зарубежной литературе получил название „метод внесения предсказаний“. Это позволяет добиться малых неравномерностей АЧХ и ГВЗ ($\Delta\tau = 40$ ns) в полосе пропускания при сравнительно невысокой собственной добротности прямоугольных волноводных резонаторов $Q_0 \sim 7 \cdot 10^3$ на рабочей моде колебаний H_{011} . Для обеспечения стабильности характеристик мультиплексора в рабочем интервале температур каналные фильтры были выполнены из суперинвара (сталь 32НХД) с гальванически нанесенным слоем серебра толщиной $6 \mu\text{m}$. Фотография изготовленного канального фильтра показана на вставке с к рис. 1.

Заметим, что в случае использования классического фильтра двенадцатого порядка с чебышевской формой АЧХ для достижения требуемых значений неравномерности коэффициента передачи в полосе пропускания и заданных уровней подавления помех в полосах заграждения собственная добротность резонаторов должна составлять $Q_0 > 3 \cdot 10^4$.

Для соединения всех элементов мультиплексора между собой использовались отрезки полужесткого коаксиального кабеля с разъемами SMA на концах. Основанием мультиплексора служит алюминиевая плита толщиной 8 mm , обеспечивающая необходимую прочность конструкции при ударных и вибрационных воздействиях в составе полезной нагрузки космического аппарата. Габариты изготовленного мультиплексора составили $255 \times 250 \times 90 \text{ mm}$, а его масса — 3.5 kg .

Таким образом, разработана и изготовлена конструкция четырехканального спутникового мультиплексора Ku-диапазона, которая успешно прошла электрические, климатические, вибрационные и ударные испытания. Требуемые высокие частотно-селективные характеристики каналов мультиплексора получены применением волноводных полосно-пропускающих фильтров двенадцатого порядка, в которых для повышения избирательности на склонах полосы пропускания сформированы по два полюса затухания. Протяженная высокочастотная полоса заграждения обеспечена подключением на входе мультиплексора миниатюрного полосно-пропускающего фильтра оригинальной конструкции на коаксиальных резонаторах. Результаты полного цикла электрических, вибрационных, ударных и климатических испытаний созданного мультиплексора подтверждают его полное соответствие требованиям, предъявляемым к бортовым устройствам полезной нагрузки спутника связи.

Благодарности

При проведении работ использовано оборудование Учебного центра коллективного прототипирования пассивной электроники антенно-фидерного тракта ФИЦ КНЦ СО РАН.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание FWES-2024-0042).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R.J. Cameron, C.M. Kudsia, R.R. Mansour, in *Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications* (Wiley, 2018), p. 569–608. DOI: 10.1002/9781119292371.ch18
- [2] R.V. Snyder, A. Mortazawi, I. Hunter, S. Bastioli, G. Macchiarella, K. Wu, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **63** (10), 3324 (2015). DOI: 10.1109/TMTT.2015.2475245
- [3] C. Kudsia, R. Cameron, W. Tang, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **40**, 1133 (1992). DOI: 10.1109/22.141345
- [4] M. Yu, W.C. Tang, A. Malarky, V. Dokas, R. Cameron, Y. Wang, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **51** (12), 2505 (2003). DOI: 10.1109/TMTT.2003.820172
- [5] Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, И.Е. Бурлаков, Ан.А. Лексиков, Я.Ф. Бальва, А.А. Александровский, С.Д. Крёков, С.А. Ходенков, *Письма в ЖТФ*, **50** (15), 6 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58432.19927 [B.A. Belyaev, A.M. Serzhantov, I.E. Burlakov, A.A. Leksikov, Ya.F. Bal'va, A.A. Alexandrovsky, S.D. Krekov, S.A. Khodenkov, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (8), 4 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.08.58906.19927].
- [6] Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, Н.М. Боев, А.А. Александровский, Я.Ф. Бальва, С.Д. Крёков, И.Е. Бурлаков, *СВЧ-фильтр гармоник*, патент России № 2818666 (заявл. 01.12.2023; опубл. 03.05.2024), БИ № 13.
- [7] A.E. Williams, W.G. Bush, R.R. Bonetti, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **33**, 402 (1985). DOI: 10.1109/TMTT.1985.1133018