

Метод настройки канальных фильтров СВЧ мультиплексов с общим суммирующим волноводом

© А.В. Воробьев,¹ Б.М. Кац,¹ А.И. Корчагин,² В.П. Мещанов¹

¹ Научно-производственное предприятие „НИКА-СВЧ“,
410050 Саратов, Россия

² Мытищинский научно-исследовательский институт радиоизмерительных приборов,
141002 Мытищи, Московская обл., Россия
e-mail: nika373@bk.ru

Поступило в Редакцию 2 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 4 сентября 2024 г.

Принято к публикации 15 сентября 2024 г.

Предложен метод, позволяющий проводить независимую оптимизацию экспериментальных характеристик (настройку) канальных фильтров, входящих в состав сверхвысокочастотных мультиплексов с общим суммирующим волноводом. Показано, что подключение к выходу канального фильтра оптимально подобранной трансформирующей цепи позволяет имитировать его работу в составе мультиплекса. Метод реализует программные возможности современных векторных анализаторов цепей, позволяющих в режиме реального времени выводить частотные характеристики соединения измеряемого фильтра с виртуальной трансформирующей цепью. Метод успешно апробирован при настройке канальных фильтров для опытного образца трехканального волноводного мультиплекса X-диапазона частот.

Ключевые слова: волновод, фильтр, мультиплексор, настройка.

DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59104.108-24

Введение

Волноводные сверхвысокочастотные (СВЧ) мультиплексы являются пассивными аналоговыми устройствами, находящими широкое применение в составе бортовых ретрансляционных комплексов систем космической и наземной связи. В частности, волноводный выходной мультиплексор выполняет сложение поступающих на его входы СВЧ сигналов высокой мощности, разнесенных по частоте, и передачу их на выход с минимальными потерями и искажениями. К данным устройствам предъявляются жесткие требования по электрическим параметрам, уровню рабочей мощности, температурной стабильности, стойкости к возникновению пробоя при пониженном атмосферном давлении, массе и габаритам [1].

Основными структурными элементами мультиплекса являются полосно-пропускающие фильтры (ППФ), рассчитанные на разные диапазоны частот. ППФ выполняют функцию формирования частотных каналов мультиплекса и во многом определяют его электрические характеристики. В настоящее время наибольшее распространение получила топология выходного мультиплекса с непосредственной связью ППФ через общий суммирующий волновод (ОСВ) (рис. 1). По сравнению с другими топологиями она обеспечивает малые потери сигнала и хорошие массогабаритные характеристики, что является критически важным для аппаратуры систем космической связи [2].

Особенностью мультиплекса на ОСВ является сильное взаимное влияние канальных ППФ друг на дру-

га [3–6]. Экспериментальная настройка ППФ в составе мультиплекса на ОСВ является нетривиальной многопараметрической оптимизационной задачей, решение которой требует больших усилий и временных затрат. Это связано с тем, что для получения оптимальных электрических характеристик одного канала необходимо манипулировать элементами подстройки сразу нескольких ППФ. В связи с этим желательно выполнять первоначальную настройку канальных ППФ отдельно от мультиплекса, а окончательную настройку производить в составе мультиплекса. К сожалению, данный подход связан с некоторыми затруднениями.

Обычный ППФ как самостоятельное устройство в подавляющем числе случаев должен иметь оптимальные чебышевские амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициента отражения $|S_{11}|$ и передачи $|S_{21}|$ (рис. 2, *a*). Главной целью настройки такого ППФ является достижение заданного уровня $|S_{11}|$ в полосе пропускания при сохранении чебышевской АЧХ. Для настройки можно воспользоваться одним из общеизвестных методов.

Однако уединенные канальные ППФ, входящие в состав мультиплекса на основе ОСВ, зачастую имеют оптимальные АЧХ коэффициента отражения $|S_{11}|$ сложной формы, сильно отличающейся от чебышевской (рис. 2, *b*), что делает конечную цель настройки труднодостижимой и значительно усложняет данный процесс. При этом попытки достичь максимального соответствия эталонной (расчетной) и измеряемой АЧХ при настройке ППФ не гарантируют получения требуемых АЧХ соответствующего канала мультиплекса.

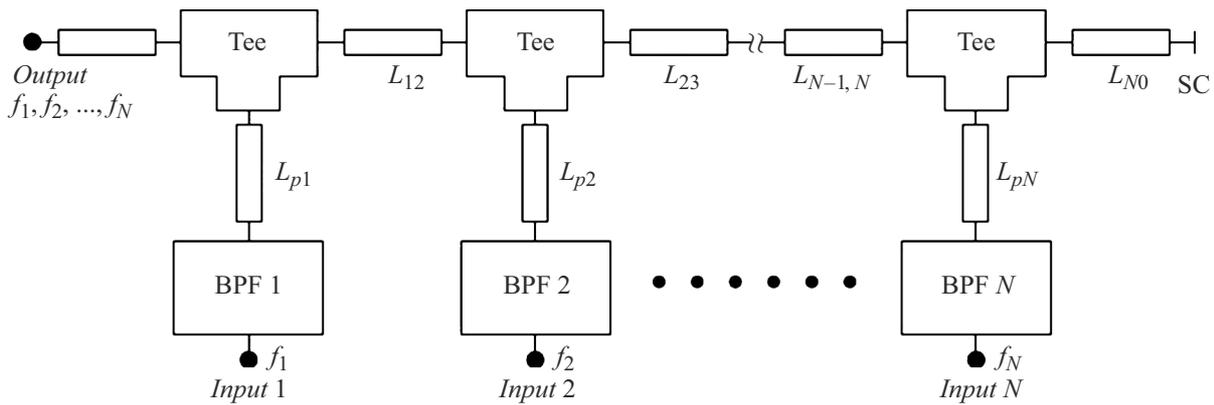


Рис. 1. Топология мультиплексора на основе общего суммирующего волновода.

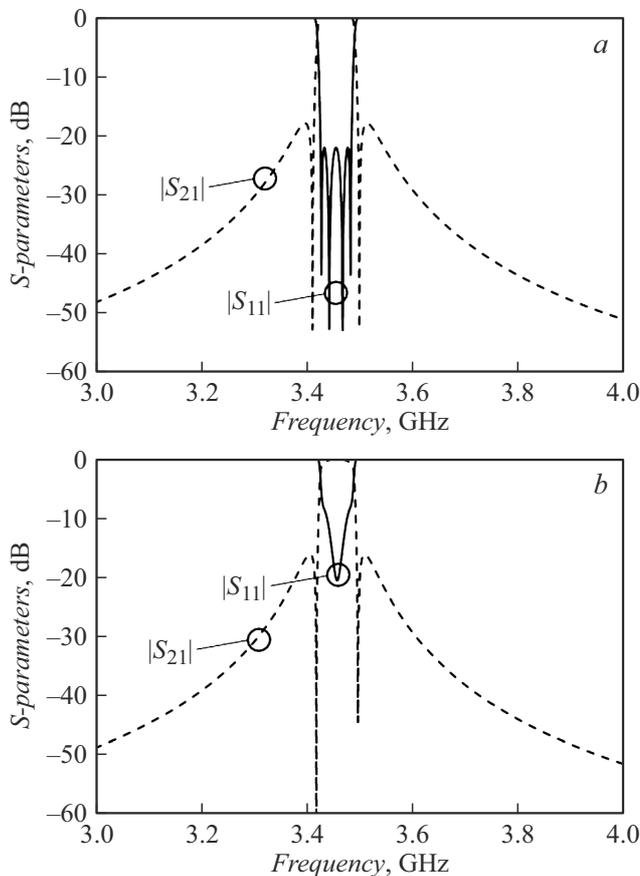


Рис. 2. Оптимальные АЧХ обычного ППФ (a) и уединенного канального ППФ (b).

Из всего этого следует необходимость разработки методов, позволяющих упростить и ускорить оптимизацию экспериментальных характеристик (настройку) канальных фильтров, входящих в состав мультиплексоров на ОСВ. В настоящей работе предложен такой метод, позволяющий производить независимую настройку каждого канального ППФ по отдельности путем имитации его работы в составе мультиплексора, что дает возмож-

ность с хорошей точностью воспроизводить АЧХ соответствующего канала мультиплексора. Для этого используется оптимально подобранная виртуальная трансформирующая цепь, которая с использованием программных возможностей векторного анализатора цепей подключается к измеряемому ППФ. Предлагаемый метод был успешно апробирован и показал высокую эффективность на примере настройки канальных ППФ, предназначенных для использования в опытном образце трехканального волноводного мультиплексора X-диапазона частот.

1. Современные методы настройки полосовых фильтров

Настройка является ответственным этапом производства СВЧ фильтров, в том числе узкополосных ППФ на связанных резонаторах. Для достижения требуемых АЧХ центральные частоты каждого из резонаторов, а также величина связей между ними должны быть очень точно настроены. Это довольно сложный процесс, зачастую требующий большого опыта, усилий и времени. Рассмотрим несколько наиболее распространенных методов настройки ППФ.

При измерениях характеристик фильтра в частотной области зачастую сложно отследить отклик каждого отдельного резонатора. Однако наблюдение характеристик фильтра во временной области позволяет определить отклик каждого резонатора. Этот факт лежит в основе эффективного метода настройки ППФ, основанного на измерении коэффициента отражения во временной области [7].

Для применения данного метода необходимо наличие векторного анализатора цепей (ВАЦ) с опцией измерения параметров матрицы рассеяния во временной области. Для того чтобы характеристика во временной области была корректной, центральная частота измеряемого диапазона ВАЦ должна соответствовать центральной частоте фильтра. Установку значений начального и конечного времени развертки на ВАЦ можно выполнить,

воспользовавшись выражениями:

$$t_1 = -\frac{2}{\pi} \cdot \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{(2N+1)}{\pi} \cdot \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (2)$$

где t_1 — время начала развертки; t_2 — время конца развертки; Δf — ширина полосы пропускания фильтра; f_0 — центральная частота полосы пропускания фильтра; N — количество резонаторов.

Временная развертка модуля коэффициента отражения настроенного фильтра имеет несколько откликов (провалов), каждый из которых соответствует своему резонатору. Процедура настройки фильтра выглядит следующим образом. Регулируя элемент подстройки первого резонатора, следует добиться, чтобы первый провал на характеристике достиг минимального значения. Аналогичным образом следует настроить второй, третий и все последующие резонаторы. Трудность заключается в том, что чем дальше от входа находится резонатор, тем слабее отклик от него, так как часть энергии отражается от предыдущих резонаторов. Таким образом, увеличивается вероятность того, что последние резонаторы будут настроены неправильно. Однако данную проблему удастся решить при одновременном измерении коэффициентов отражения от входа и выхода фильтра. По временной характеристике коэффициента отражения от входа производится настройка первого резонатора, а по характеристике коэффициента отражения от выхода — последнего. Далее выполняется настройка второго и предпоследнего резонаторов и т.д. В некоторых случаях для достижения требуемых электрических параметров фильтра можно провести процедуру настройки еще раз [7].

Другой метод настройки ППФ основан на измерении группового времени задержки (ГВЗ), связанного с коэффициентом отражения от входа. Известно, что ГВЗ описывает нелинейность фазочастотной характеристики:

$$\tau_{11} = -\frac{d\varphi_{11}}{d\omega}, \quad (3)$$

где φ_{11} — фаза коэффициента отражения от входа (S_{11}), ω — круговая частота.

Получив при помощи известных соотношений [8] значения параметров фильтра-прототипа нижних частот (g_i), можно рассчитать значения ГВЗ (τ_{11}^i) на центральной частоте ППФ для N связанных резонаторов. Для этого используют следующие выражения [9]:

$$\tau_{11}^1 = \frac{4g_0g_1}{2\pi\Delta f}, \quad (4)$$

$$\tau_{11}^2 = \frac{4g_2}{2\pi\Delta fg_0}, \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{11}^i = \frac{4g_0(g_1+g_3+\dots+g_i)}{2\pi\Delta f} \text{ for odd } i \text{ values,} \\ \tau_{11}^i = \frac{4(g_2+g_4+\dots+g_i)}{2\pi\Delta fg_0} \text{ for even } i \text{ values,} \end{array} \right. \quad (6)$$

где $i = 3 \dots N$.

Метод настройки включает следующие этапы:

— включение последнего резонатора ППФ по схеме короткого замыкания;

— подстройка первого резонатора таким образом, чтобы значение ГВЗ на центральной частоте соответствовало расчетному;

— подстройка второго резонатора так, чтобы значение ГВЗ на центральной частоте соответствовало расчетному, а характеристика ГВЗ была симметричной относительно центральной частоты;

— процесс повторяется для всех резонаторов, кроме последнего;

— настройка последнего резонатора по АЧХ модуля коэффициента отражения до достижения требуемых характеристик. Если число резонаторов нечетное, то последний резонатор следует разомкнуть, а если четное, то последний резонатор должен оставаться короткозамкнутым [9,10].

Еще один метод, предложенный авторами работы [11], позволяет выполнять настройку ППФ с двухмодовыми цилиндрическими объемными резонаторами [12–14]. Суть метода заключается в том, что процесс настройки ППФ с n элементами подстройки (винтами) можно разбить на этапы, на каждом из которых задействуется только один винт. При этом, если оптимальная геометрия ППФ уже известна, появляется возможность построить трехмерные численные электродинамические модели, соответствующие каждому этапу настройки и отличающиеся числом винтов:

— модель ППФ без винтов;

— модель ППФ с первым винтом, введенным на оптимальную глубину H_1 ;

— модель волноводного ППФ с первым винтом, введенным на оптимальную глубину H_1 , и вторым винтом, введенным на оптимальную глубину H_2 ;

— повторение данной процедуры до тех пор, пока в модель ППФ на оптимальную глубину H_1, H_2, \dots, H_n не будут введены все винты [11].

После анализа всех численных моделей получается набор из $n+1$ эталонных АЧХ. Затем эти характеристики можно загрузить в векторный анализатор цепей (ВАЦ) и использовать их при экспериментальной настройке соответствующего ППФ в том же порядке. На каждом этапе, вводя в ППФ новый винт и регулируя глубину входа, следует добиваться максимального соответствия измеряемой и эталонной АЧХ. После введения всех винтов в ППФ, как правило, требуется минимальная корректировка для получения требуемых АЧХ.

2. Метод оптимизации экспериментальных характеристик канальных фильтров

В настоящей работе предлагается эффективный метод оптимизации экспериментальных характеристик (на-

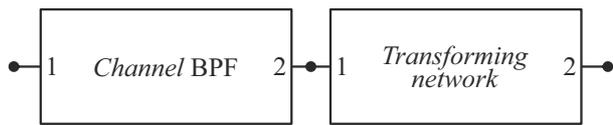


Рис. 3. Уединенный каналный ППФ, подключенный к трансформирующей цепи.

стройки) каналных ППФ отдельно от мультиплексора. Идея метода состоит в возможности при измерении уединенного каналного ППФ имитировать его работу в составе мультиплексора. С этой целью нужно подключить к ППФ оптимально подобранную трансформирующую цепь (ТЦ) (рис. 3).

Рассмотрим структуру мультиплексора на ОСВ (рис. 1). Если изъять из структуры мультиплексора каналный ППФ 1, а на входах остальных каналных ППФ создать режим холостого хода (ХХ), то структура превратится в двухпортовую ТЦ (рис. 4). Теперь, если к порту 2 каналного ППФ 1 присоединить порт 1 ТЦ (рис. 3), то АЧХ коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ получившегося соединения должны максимально точно воспроизвести АЧХ коэффициентов отражения от входа и выхода соответствующего канала мультиплексора. Следовательно, цель настройки уединенного каналного ППФ становится определенной — достижение требуемых значений $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ в полосе пропускания канала. Нетрудно видеть, что по сравнению с мультиплексором настройка отдельного каналного ППФ значительно проще, так как число одновременно варьлируемых параметров (элементов подстройки) в разы меньше.

Для каждого каналного ППФ мультиплексора следует аналогичным образом построить численную модель трансформирующей цепи. Полученные после анализа моделей частотные зависимости S-параметров ТЦ могут быть сохранены в файлы с целью их дальнейшего использования в векторном анализаторе цепей (ВАЦ). Современные ВАЦ имеют программные опции, позволяющие подключать одну или несколько виртуальных

трансформирующих цепей к порту (портам) измеряемого устройства и выводить частотные характеристики получившегося соединения в режиме реального времени. Следовательно, при подключении к порту 2 уединенного каналного ППФ порта 1 виртуальной ТЦ (рис. 3) можно будет выполнять настройку ППФ в режиме реального времени. Таким образом, предлагаемый метод настройки каналного ППФ подразумевает следующие этапы:

- грубая настройка ППФ при помощи общеизвестных методов;
- подключение виртуальной ТЦ к выходному порту ППФ путем включения программной опции ВАЦ и загрузки соответствующего файла с частотными зависимостями S-параметров;
- настройка ППФ по АЧХ коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$, выводимым на экран ВАЦ, с целью достижения заданного уровня $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ в полосе пропускания соответствующего канала мультиплексора.

После настройки всех каналных ППФ и сборки мультиплексора его частотные характеристики должны быть достаточно близки к оптимальным, вследствие чего дальнейшая настройка мультиплексора в целом значительно упрощается.

3. Экспериментальная апробация

Предлагаемый метод был успешно апробирован при экспериментальной настройке каналных ППФ с двухмодовыми цилиндрическими резонаторами, входящих в состав опытного образца трехканального волноводного мультиплексора на ОСВ X-диапазона частот (рис. 5). Полосы пропускания каналов мультиплексора: 7494.5–7535.0 МГц; 7402.0–7438.0 МГц; 7330.0–7371.5 МГц. Основные требования к электрическим параметрам: развязка между каналами более 20 дБ, прямые потери в полосах пропускания менее 0.6 дБ, обратные потери входов и выхода более 20 дБ.

Каждый каналный ППФ содержит два двухмодовых цилиндрических резонатора, что эквивалентно четырем звеньям классического фильтра, а также имеет шесть элементов настройки (винтов). Такая конфигурация яв-

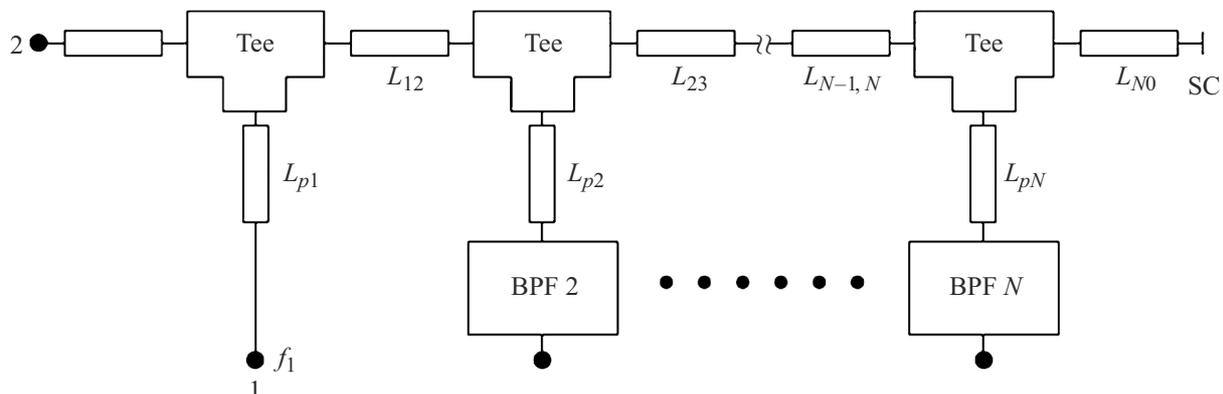


Рис. 4. Трансформирующая цепь для каналного ППФ 1.

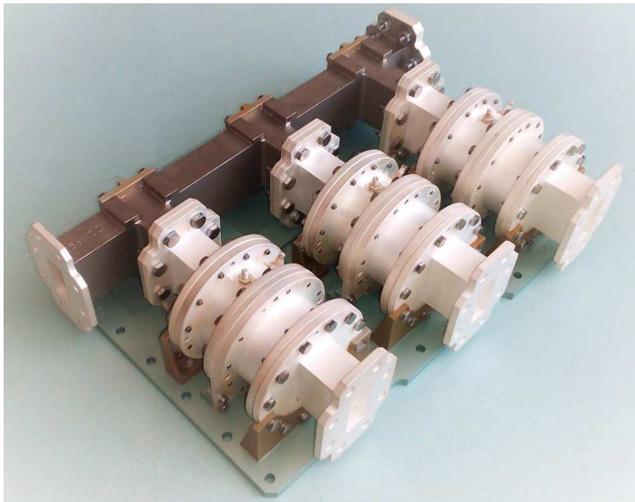


Рис. 5. Опытный образец трехканального волноводного мультиплексора X-диапазона частот.

ляется достаточной для получения требуемых электрических параметров мультиплексора, что было подтверждено в ходе его синтеза.

Полученные после численного моделирования S-параметры виртуальных ТЦ для всех трех канальных ППФ были сохранены в файлы формата Touchstone (*.s2p).

Измерения S-параметров и настройка ППФ выполнялись при помощи ВАЦ „Rohde&Schwarz“ ZVA40 с использованием коаксиально-волноводных переходов и волноводного калибровочного набора в канале WR112. Для обеспечения высокой точности измерений проводилась двухпортовая калибровка, использующая 10-компонентную модель SOLT [15].

В качестве примера рассмотрим настройку ППФ канала 2. Вначале была проведена грубая настройка уединенного канального ППФ при помощи метода, рассмотренного в разд. 1 [11]. Затем к измеряемому ППФ была подключена виртуальная ТЦ путем выбора в ВАЦ необходимой опции и загрузки соответствующего файла. После этого была выполнена тонкая настройка ППФ, целью которой являлось достижение заданного уровня (менее -20 dB) частотных характеристик $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ в полосе пропускания соответствующего канала (7399.0–7441.0 MHz, что обеспечивает запас по полосе 6 MHz). Снимки экрана ВАЦ с частотными характеристиками $|S_{11}|$, $|S_{22}|$ и $|S_{21}|$ на разных этапах настройки уединенного ППФ канала 2 представлены на рис. 6, а–с.

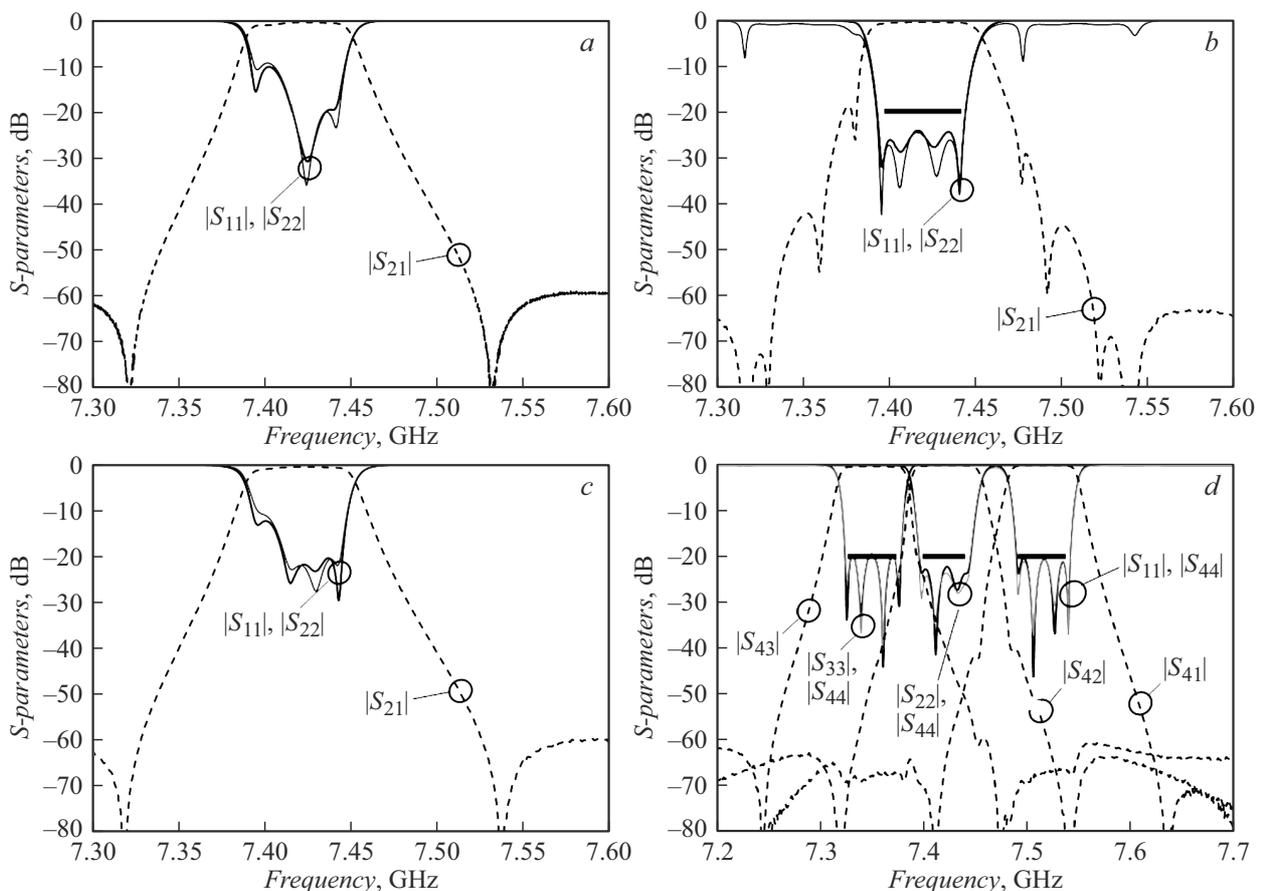


Рис. 6. Снимки экрана векторного анализатора цепей с АЧХ: после выполнения грубой настройки ППФ (а); после подключения виртуальной трансформирующей цепи и тонкой настройки ППФ (б); после отключения виртуальной трансформирующей цепи (с); мультиплексора в сборе (д).

Время настройки одного ППФ при помощи данного метода составляло 35–40 min. После настройки всех канальных ППФ был собран опытный образец мультиплексора и проведены измерения АЧХ прямых потерь, обратных потерь входов и общего выхода (рис. 6, d). Наиболее важные электрические параметры, полученные при измерениях опытного образца: развязка между каналами более 25.0 dB, прямые потери в полосах пропускания ($|S_{41}|$, $|S_{42}|$, $|S_{43}|$) менее 0.4 dB, обратные потери входов ($|S_{11}|$, $|S_{22}|$, $|S_{33}|$) и выхода ($|S_{44}|$) более 19.4 dB. Для обеспечения высокой точности измерений S-параметров мультиплексора выполнялась четырехпортовая SOLT-калибровка ВАЦ. Дополнительная настройка мультиплексора не потребовалась.

Заключение

Рассмотрены современные методы настройки ППФ. Предложенный в работе метод дает возможность ускорить настройку канальных фильтров и мультиплексоров с общим суммирующим волноводом. Метод позволяет получить электрические характеристики мультиплексора, близкие к оптимальным, при этом каждый канальный фильтр настраивается отдельно от мультиплексора. Таким образом, сложная задача настройки мультиплексора разделяется на несколько более простых. Метод показал высокую эффективность при настройке канальных ППФ для опытного образца трехканального волноводного мультиплексора X-диапазона частот. Время настройки одного канального фильтра составляло 35–40 min.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-29-00879.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.B. Teresa. *Satellite Communications Payload and System*, First Edition (John Wiley & Sons, Inc., 2012)
- [2] R.J. Cameron, M. Yu. IEEE Microwave Magazine, **8** (5), 46 (2007). DOI: 10.1109/MMM.2007.904715
- [3] M. Brumos, S. Cogollos, M. Martinez, P. Soto, V.E. Boria, M. Guglielmi. IEEE Microwave Symposium Digest (Tampa Bay, FL, USA, June 2014), p. 76–90. DOI: 10.1109/MWSYM.2014.6848422
- [4] S. Cogollos, P. Soto, V.E. Boria, M. Guglielmi, M. Brumos, B. Gimeno, D. Raboso. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **63** (8), 2540 (2015). DOI: 10.1109/TMTT.2015.2442990
- [5] A.A. Kirilenko, S.L. Senkevich, V.I. Tkachenko, B.G. Tysik. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **42** (7), 1393 (1994). DOI: 10.1109/22.299734
- [6] E. Ofli, R. Vahldieck, S. Amari. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **53** (3), 843 (2005). DOI: 10.1109/TMTT.2004.842506
- [7] J.P. Dunsmore. *The Time Domain Response of Coupled-Resonator Filters with Application to Tuning* (Ph.D Dissertation, University of Leeds. UK, 2004), p. 84–95. DOI: 10.1109/MWSYM.1999.779638
- [8] Г.Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. *Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи*. В 2-х томах (Связь, М., 1972)
- [9] J.B. Ness. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **46** (4), 343 (1998) DOI: 10.1109/22.664135
- [10] F.C. Chen, Q.X. Chu, J.S. Yang. Int. *Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology* (China, 2007), p. 1–4.
- [11] А.В. Воробьев, Б.М. Кац, А.И. Корчагин, А.Ю. Купцов. Радиотехника, **8**, 106 (2018). DOI: 10.18127/j00338486-201808-21
- [12] J. Cameron, J.D. Rhodes. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **29** (1), 51 (1981). DOI: 10.1109/TMTT.1981.1130570
- [13] S. Amari. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **57** (2), 51 (2009).
- [14] H. Hu, K.-L. Wu, R.J. Cameron. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **61** (1), 139 (2013). DOI: 10.1109/TMTT.2008.2011194
- [15] M. Hiebel. *Fundamentals of Vector Network Analysis*, 5th ed. (Rohde & Schwarz GmbH & Co., Germany, 2008)