

Кац Б.М.¹, Воробьев А.В.², Мещанов В.П.¹

¹ ООО НПП «НИКА-СВЧ»

² Саратовский государственный технический

университет им. Ю.А. Гагарина

Синтез 3-канального волноводного мультиплексора X-диапазона с модифицированной структурой

Рассмотрена модифицированная структура мультиплексора с общим волноводом (Manifold). Синтез данной структуры возможен в некоторых частных случаях. По сравнению со стандартными методами, подход к синтезу предлагаемой структуры основан на принципе декомпозиции, который позволяет упростить и ускорить разработку сложных устройств. В качестве примера исследована структура и проведен синтез 3-канального волноводного мультиплексора X-диапазона с унифицированной конструкцией канальных фильтров. Представлено сравнение результатов расчета и эксперимента.

Ключевые слова: волновод, фильтр, мультиплексор, оптимизация, синтез.

Волноводные мультиплексоры широко применяются в системах космической и наземной связи [1]. В частности, волноводные выходные мультиплексоры (OMUX) применяются для согласованного суммирования сигналов, поступающих от выходов нескольких усилителей мощности, и передачи их на антенну. К данным устройствам предъявляются жесткие требования по электрическим параметрам, температурной стабильности, предельной мощности, массе и габаритам. Поэтому разработка волноводных мультиплексоров является сложной инженерно-технической задачей.

На сегодняшний день наибольшее распространение получила топология OMUX с непосредственной связью фильтров через общий волновод (manifold). По сравнению с другими топологиями, она обеспечивает хорошие массогабаритные характеристики и малое ослабление сигнала, что очень важно для систем космической связи. Структурная схема [2] manifold-мультиплексора показана на рис. 1. Каждый канал представлен полосно-пропускающим фильтром (ППФ). Сигнал из первого канала с центральной частотой f_1 проходит через фильтр ППФ 1 в тройник суммирующего волновода (T-junction), где делится пополам. Одна часть мощности проходит на выход устройства, а вторая часть мощности после отражений от остальных канальных ППФ и от короткозамыкателя (КЗ) на конце суммируется с первой частью сигнала на выходе устройства [3]. Для других каналов принцип действия аналогичный.

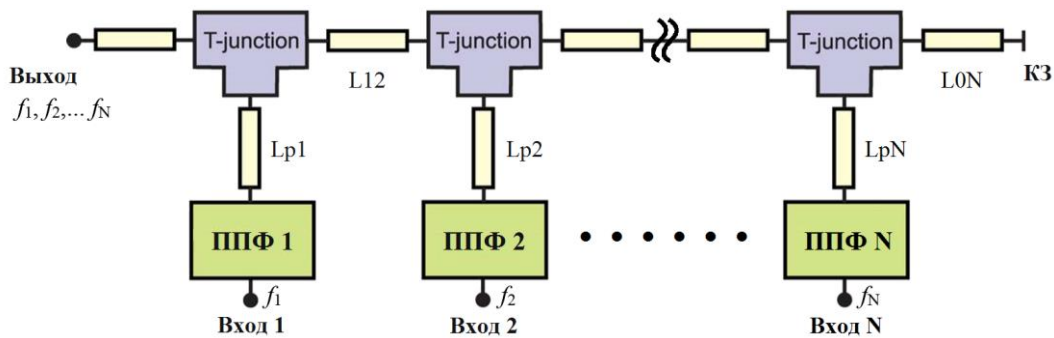


Рис. 1. Структурная схема manifold-мультиплексора.

Сложность разработки manifold-мультиплексоров состоит в том, что необходимо компенсировать взаимное влияние каналов друг на друга, из-за чего добавление в мультиплексор еще одного канала требует повторного проектирования всей конструкции.

Процедура синтеза начинается с расчета фильтров-прототипов [4] и создания на их основе схемных моделей ППФ на сосредоточенных или распределенных элементах. Удобным математическим представлением параметров ППФ является матрица связи (coupling matrix). Она описывает непосредственные и перекрестные связи между резонаторами [5]. Исходные характеристики каждой модели ППФ являются «идеальными» (рис. 2, пунктирная линия).

Затем эти модели включаются в схему manifold-мультиплексора. Получившаяся схемная модель содержит несколько десятков варьируемых параметров. Поскольку характеристики модели мультиплексора на данном этапе далеки от идеальных, требуется проводить параметрическую оптимизацию. Целью оптимизации является достижение заданного уровня обратных потерь общего выхода (Common Port Return Loss, CPRL) в полосах пропускания каждого из каналов. Параметрами оптимизации являются параметры резонаторов и связей ППФ и геометрические размеры суммирующего устройства (сумматора): длины отрезков волновода между каналами, длина отрезка волновода от короткозамыкателя (КЗ) до первого канала, расстояния от общего волновода до каждого ППФ. На начальном этапе вышеописанные длины отрезков задаются кратными половине длины волны в волноводе [2, 6]. После оптимизации характеристики схемной модели мультиплексора существенно улучшаются. Однако характеристики моделей канальных ППФ становятся «неидеальными» (рис. 2, сплошная линия). Это требуется для компенсации влияния ППФ друг на друга [7].

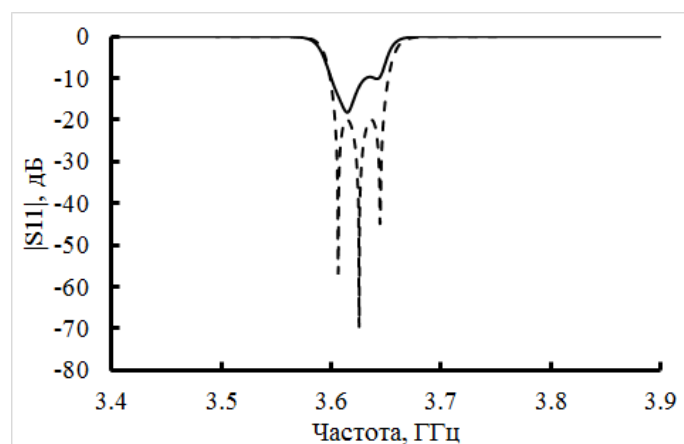


Рис. 2. «Идеальная» (пунктирная линия) и «неидеальная» (сплошная линия) характеристика обратных потерь ($|S_{11}|$) для 3-резонаторного чебышевского ППФ.

Следующий этап синтеза – построение электродинамической модели мультиплексора. При этом необходимо выбрать подходящую топологию ППФ и, используя полученные на предыдущем этапе данные, рассчитать геометрические размеры резонаторов и элементов связи. Кроме того, требуется уточнить длины отрезков волновода в сумматоре. Если характеристики электродинамической модели не удовлетворяют требованиям, процедуру синтеза следует повторить [6, 7].

Нетрудно видеть, что использование схемных моделей на начальном этапе синтеза позволяет эффективно и в разумные сроки проводить многопараметрическую оптимизацию. Вышеописанная процедура является универсальной и может применяться для разработки manifold-мультиплексоров с любым количеством каналов.

Итак, классический метод синтеза мультиплексора имеет следующие особенности:

1. После оптимизации характеристики канальных ППФ перестают быть «идеальными». Это означает, что при практической реализации канальных ППФ значительно усложняется процедура настройки.

2. Невозможно провести оптимизацию канальных ППФ и сумматора по отдельности.

Предлагаемый авторами метод синтеза не является универсальным, но позволяет упростить разработку manifold-мультиплексоров в некоторых частных случаях: когда число каналов мало и расстояния между полосами пропускания каналов достаточно большие (более 40% от ширины полосы пропускания, т.е. каналы не смежные).

Метод основан на принципе декомпозиции, т.е. разделении сложной задачи на несколько более простых. То есть, данный метод позволяет проводить оптимизацию всех канальных ППФ и суммирующего устройства по отдельности.

Разработка начинается с синтеза канальных ППФ при помощи расчета фильтров-прототипов и схемных моделей, как было описано ранее. Далее канальные ППФ с «идеальными» характеристиками встраиваются в схемную модель мультиплексора. Для компенсации влияния ППФ друг на друга в сумматоре используются согласующие трансформаторы. Затем проводится параметрическая оптимизация сумматора с целью достижения заданного уровня обратных потерь общего выхода (CPRL) в полосах пропускания каждого из каналов.

Для проверки метода был проведен синтез 3-канального manifold-мультиплексора X-диапазона в канале WR112, структура которого показана на рис. 3. Обозначения: L_{p1} , L_{p2} , L_{p3} , L_{p01} , L_{p02} , L_{p03} , L_{01} , L_{12} , L_{23} – длины отрезков волновода; T_{p1} , T_{p2} , T_{p3} – согласующие трансформаторы.

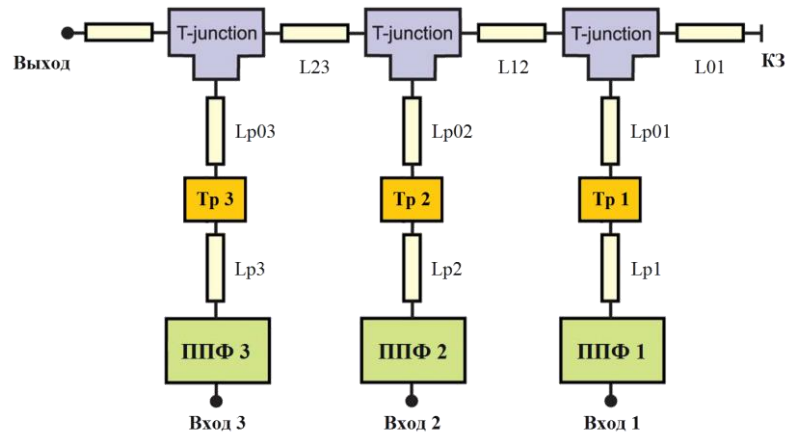


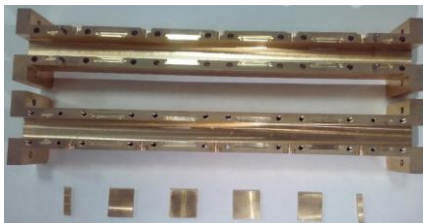
Рис. 3. Модифицированная структура 3-канального manifold-мультиплексора.

Для канальных ППФ была выбрана топология волноводного фильтра с Е-плоскостными вставками в прямоугольном волноводе [8]. Был разработан перестраиваемый 5-резонаторный волноводный ППФ, т.е. была создана унифицированная конструкция канальных ППФ, которая позволяет значительно упростить и удешевить производство (более подробно в статье [9]). Схемные и электродинамические модели трех канальных ППФ с «идеальными» характеристиками были настроены на рабочие полосы 7.33-7.3715 ГГц, 7.402-7.438 ГГц и 7.4945-7.535 ГГц. Обратные потери ($|S_{11}|$) для моделей ППФ в полосах пропускания превышают 19.5 дБ.

На следующем этапе была проведена параметрическая оптимизация схемной модели сумматора. Параметры оптимизации - длины отрезков волновода L_{p1} , L_{p2} , L_{p3} , L_{p01} , L_{p02} , L_{p03} , L_{01} , L_{12} , L_{23} , параметры согласующих трансформаторов Tr_1 , Tr_2 , Tr_3 . После оптимизации уровень обратных потерь общего выхода (CPRL) в рабочих полосах для схемной модели мультиплексора превышает 19 дБ.

Следующий шаг – получение геометрии сумматора, с последующим электродинамическим моделированием мультиплексора в целом. В качестве согласующих трансформаторов использованы симметричные индуктивные диафрагмы. Волноводные тройники – Н-плоскостные. После расчета уровень обратных потерь общего выхода (CPRL) электродинамической модели мультиплексора превышает 18 дБ.

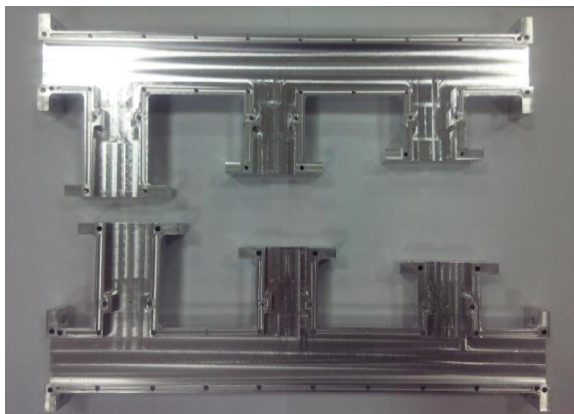
Для экспериментальной проверки были изготовлены 3 макета 5-резонаторных волноводных ППФ с Е-плоскостными вставками (рис. 4а, 4б). и макет сумматора (рис. 4в). Макеты ППФ были настроены на полосы пропускания 7.33-7.3715 ГГц, 7.402-7.438 ГГц и 7.4945-7.535 ГГц. Затем был собран макет мультиплексора (рис. 4г).



а



б



в



г

Рисунок 4. а – макет ППФ в разобранном виде, б – макет ППФ в собранном виде, в – макет сумматора в разобранном виде, г – макет мультиплексора в собранном виде.

После этого были проведены измерения макета мультиплексора, показавшие хорошее согласование расчетных и экспериментальных характеристик (рис. 5). Уровень обратных потерь общего выхода ($|S_{44}|$) в рабочих полосах более 17 дБ. Ослабление ($|S_{41}|$, $|S_{42}|$, $|S_{43}|$) в рабочих полосах менее 1.8 дБ.

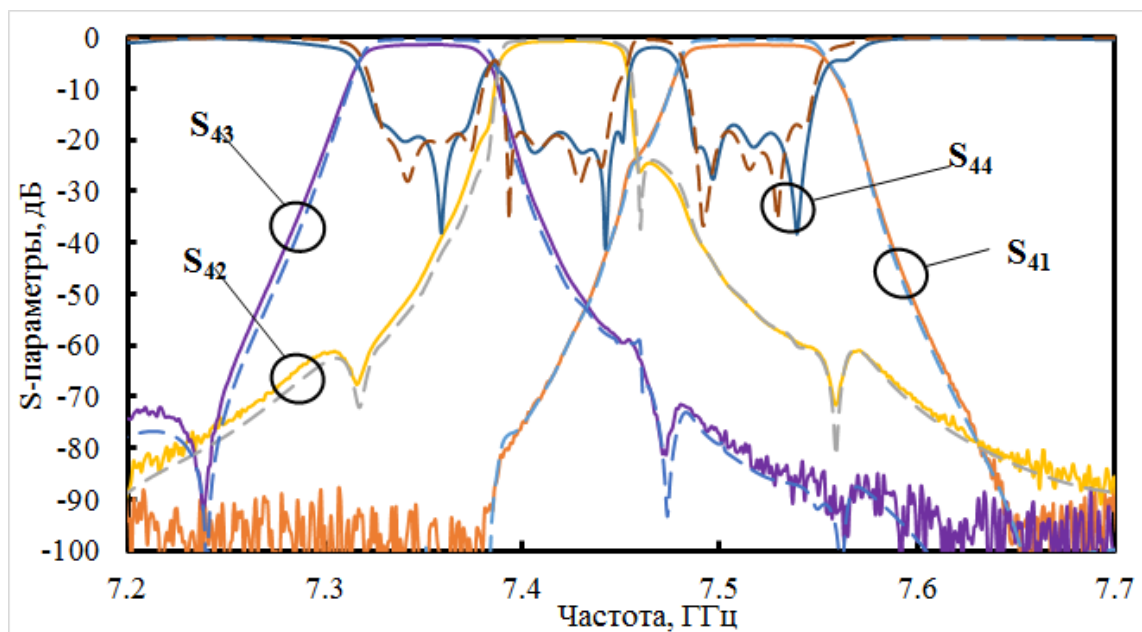


Рис. 5. Сравнение расчетных (пунктирные линии) и экспериментальных (сплошные линии) характеристик мультиплексора.

Библиографический список

1. Teresa M.B., Satellite Communications Payload and System, First Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
2. Cameron R.J., Yu M. Design of manifold-coupled multiplexers // IEEE Microwave Magazine. 2007. V.8. N. 5. P. 46-59.
3. Чехутский В.И. Трехканальный волноводный мультиплексор Ku-диапазона на основе полосовых фильтров с пластиной в Е-плоскости // Молодежный научно-технический вестник (электронный журнал). 2014. ФС77-51038. 10 с.
4. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. В 2-х томах. - М.: Связь, 1972: Т1 - 440 с, Т2 - 496 с.

5. Uhm M., Lee J., Yom I., Kim J. General coupling matrix synthesis method for microwave resonator filters of arbitrary topology // ETRI Journal. 2006. V. 28. N. 2. P. 223-226.
6. Cogollos S., Soto P., Boria V.E., et al. Efficient design of waveguide manifold multiplexers based on low-order EM distributed models // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 2015. V. 63. N 8. P. 2540-2549.
7. Brumos M., Cogollos S., Martinez M., et al. Design of waveguide manifold multiplexers with dual-mode filters using distributed models // IEEE Microwave Symposium Digest, June 2014. Tampa Bay. FL. USA. P. 1-4.
8. Design of waveguide E-plane filters with all-metal irises // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. V. 32. N. 7. P. 695-704.
9. Б. М. Кац, А. В. Воробьев, В. П. Мещанов. Унификация волноводных фильтров с инверторами в Е-плоскости // Радиотехника №10 – изд. Радиотехника, 2016. С. 195-198.