

*Чуркин В.И., Федин Д.Н., Дубовой В.А.  
ОАО «Завод Магнетон»*

## **Двухканальные двухзвенные полосно-пропускающие фильтры на ферритовых резонаторах**

*Представлены двухканальные перестраиваемые фильтры на ферритовых резонаторах. Приведены параметры многооктавных двухканальных двухзвенных фильтров.*

**Ключевые слова:** полосно-пропускающий двухканальный фильтр ЖИГ, ферритовые резонаторы, перестройка центральной частоты, идентичность каналов.

Из-за миниатюрности сферических монокристаллических ферритовых резонаторов ( $\varnothing = 0,3 - 1,5$  мм) возможно создание в одном металлизированном пластмассовом корпусе, размещенном между двумя полюсными наконечниками электромагнита, кроме одноканальных многорезонаторных фильтров [1], также многоканальных фильтров, содержащих один или несколько ферритовых резонаторов (ФР) в каждом канале. При этом резонансные частоты ФР в этих каналах в зависимости от назначения фильтра должны быть близки либо разнесены на определенную величину, а развязка (заграждение) между каналами должна быть приближена к заграждению в каналах вне резонансной кривой.

Наибольшее применение в технике СВЧ и электронике связи получили двухканальные двухрезонаторные и двухканальные трехрезонаторные электрически перестраиваемые по частоте коаксиальные фильтры. В зарубежных каталогах ряда фирм [2,3], а также в отечественном каталоге [4] параметры двухканальных фильтров приводятся в основном для октавного диапазона перестройки. В данной работе приведены результаты исследования двух типов экспериментальных образцов двухканальных двухрезонаторных коаксиальных фильтров в диапазонах перестройки частоты, превышающих октаву. Измерение и обработка параметров фильтров проводились с помощью четырехпортового анализатора цепей «Rohde & Schwarz» ZVB-20, позволившего одновременно наблюдать и корректировать резонансные характеристики (АЧХ) в обоих каналах.

В двухканальном фильтре первого типа, выполненном в диапазоне частот 2 – 8 ГГц (две октавы), были использованы монокристаллические ФР марки 50КГ, имеющие параметры: намагниченность насыщения  $4\pi M_s = 620 \pm 20$  Гс, ширина линии ферромагнитного резонанса  $2\Delta H = 0,5 \div 0,8$  Э, диаметр  $\varnothing = 0,62 \pm 0,02$  мм. Ферритовые резонаторы были ориентированы на теплопроводящих керамических (окись бериллия) держателях в изотропных направлениях, то есть по “тепловым осям”, когда внутренние магнитные поля равны нулю. Для расширения интервала рабочих температур и повышения точности ориентации ФР в изотропном направлении, держатели проходили через радиаторы, снабженные позисторами, нагревающими ФР до температуры примерно 80 – 90 °С при подаче напряжения  $24 \pm 3$  В. Витковые элементы связи, охватывающие под прямым углом ФР в резонаторных камерах металлизированного пластмассового корпуса, были выполнены в виде петель  $\varnothing = 1,2$  мм с углом охвата 360 °С (крайние) и полупетель

$\varnothing = 1,2$  мм с углом охвата  $180^\circ$  (средние). Габариты магнитопровода фильтра равны  $35 \times 35 \times 40$  мм.

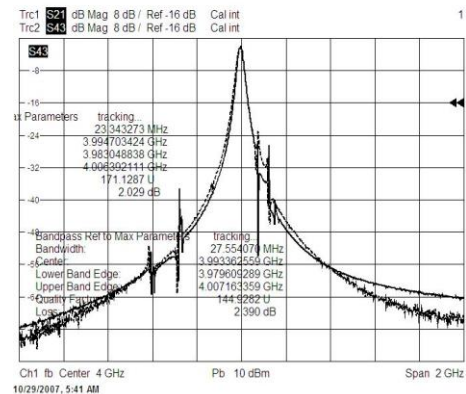
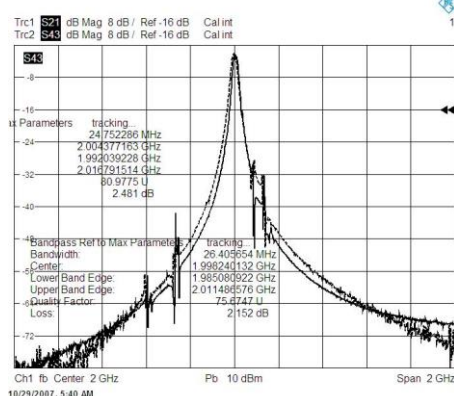
Параметры этого фильтра приведены в таблице 1, а также на рис. 1, где представлены резонансные характеристики передачи сигнала, измеренные при комнатной температуре  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  без включения позисторов.

Таблица 1

№	Параметры фильтра	Частота настройки фильтра, ГГц			
		2,0	4,0	6,0	8,0
1	Минимальные потери в полосе пропускания, $\alpha_{\min}$ , дБ канал №1	2,5	2,0	1,6	1,7
	канал №2	2,2	2,4	1,6	1,5
2	Ширина полосы пропускания по уровню минус 3 дБ, $\Delta f_3$ , МГц канал №1	25	23	25	30
	канал №2	26	27	27	31
3	Расстройка каналов по частоте, $f_1 - f_2$ , МГц	+6	+2	+2	-3
4	Уровень подавления паразитных резонансов, $\alpha_{\text{пар}}$ , дБ (максимальный для фильтра) слева от $f_p$	42	37	37	36
		справа от $f_p$	29	23	23
5	Заграждение вне резонансной кривой, $\beta$ , дБ (при $I=0$ ) канал №1	80	72	64	54
		канал №2	83	74	68
6	ток в катушках, I, А	0,13	0,26	0,37	0,52

Примечания 1. Просачивание сигнала из канала №1 в канал №2 и наоборот равно заграждению  
2. Входная мощность при измерениях равна 1 мВт

Из таблицы 1 и рис. 1 видно, что двухканальный фильтр имеет низкие потери пропускания в диапазоне перестройки 2 – 8 ГГц, при этом потери пропускания и ширина полосы пропускания практически совпадают в обоих каналах передачи сигнала. Неравномерность потерь  $\Delta\alpha$  в полосе пропускания, вызванная паразитным резонансом, пересекающим основной резонанс в диапазоне частот 2,2 – 2,5 ГГц, в обоих каналах не превышала 1,5 дБ. Паразитные резонансы, наблюдаемые на резонансных характеристиках на рис. 1, при перестройке частоты фильтра от 2 до 8 ГГц, находятся в обоих каналах на одном и том же удалении от основного резонанса. Это свидетельствует о том, что скорости перестройки частоты этих резонансов совпадают со скоростью перестройки частоты основного резонанса, то есть резонансной частоты  $f_p$  фильтра. Паразитные резонансы слева от  $f_p$  лежат дальше на склонах резонансных кривых от  $f_p$ , их уровень не превышает – 36 дБ, паразитные резонансы справа от  $f_p$  расположены ближе к  $f_p$  на склонах резонансных кривых и имеют максимальный уровень – 21 дБ. Другие паразитные резонансы, кроме представленных на рис. 1, в фильтре отсутствовали во всем диапазоне 2-8 ГГц.



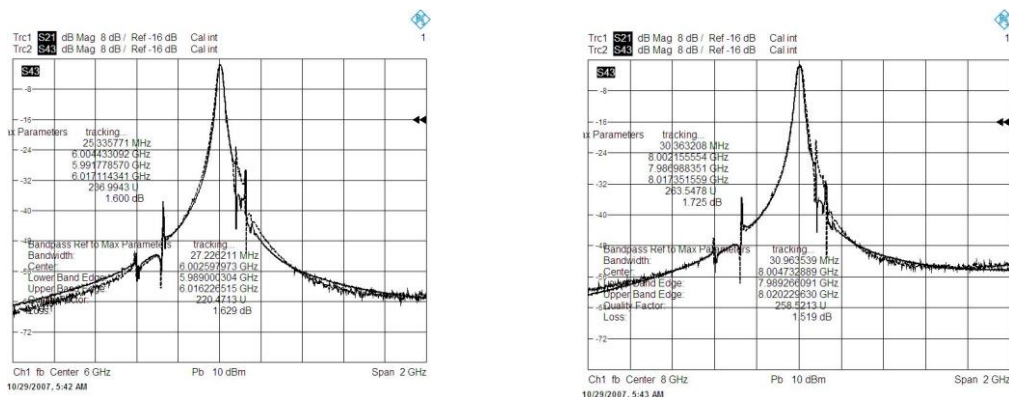


Рис. 1. Резонансные характеристики передачи сигнала двухканального двухрезонаторного фильтра диапазона частот 2 – 8 ГГц. Непрерывная линия (параметры сверху) – канал №1, пунктирная линия (параметры снизу) – канал №2.

Расстройка каналов по частоте не превышает + 6 МГц в диапазоне перестройки фильтра, что было обеспечено качественной настройкой. Заграждение фильтра вне резонансных кривых уменьшается с ростом частоты от 80 до 54 дБ в канале №1, от 83 до 53дБ в канале №2.

Двухканальный двухрезонаторный фильтр второго типа (диапазона 4 – 12 ГГц) имеет габариты 35×35×44 мм, в нем были использованы ориентированные по “тепловой оси” на теплопроводящих керамических (окись бериллия) держателях монокристаллические ФР марки 140 КГ, имеющие параметры:  $4\pi Ms = 1750 \pm 20$  Гс,  $2\Delta H = 0,5 \div 0,8$  Э,  $\varnothing = 0,52 \pm 0,02$  мм. Витковые элементы связи, охватывающие под прямым углом ФР в резонаторных камерах металлизированного пластмассового корпуса, были выполнены в виде полупетель  $\varnothing = 1,0$  мм с углом охвата  $\geq 180^\circ$ . Держатели проходили через радиаторы, снабженные позисторами, нагревающими ФР до температуры примерно 80 – 90 °С при подачи напряжения  $24 \pm 3$  В. Электромагнитные параметры и резонансные частотные характеристики передачи этого фильтра, измеренные в диапазоне частот 4,0 – 12,0 ГГц (1,5 октавы), приведены в таблице 2 и на рис. 2 при комнатной температуре без включения позисторов.

Таблица 2

№	Параметры фильтра	Частота настройки фильтра, ГГц				
		4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
1	Минимальные потери в полосе пропускания, $\alpha_{\min}$ , дБ					
	канал №1	2,6	2,3	1,7	1,6	1,7
	канал №2	2,4	2,2	1,6	1,6	1,9
2	Ширина полосы пропускания по уровню минус 3 дБ, $\Delta f_3$ , МГц					
	канал №1	23	25	27	31	35
	канал №2	19	20	22	25	29
3	Расстройка каналов по частоте, $f_1-f_2$ , МГц	-1	+2	+3	+6	+8
4	Уровень (подавление) паразитных резонансов, $\alpha_{\text{пар}}$ , дБ					
	(максимальный для фильтра)					
	слева от $f_p$	26	24	25	24	24
	справа от $f_p$	47	48	48	46	46
5	Заграждение вне резонансной кривой, $\beta$ , дБ (при $I=0$ )					
	канал №1	80	80	75	72	62
	канал №2	75	73	70	65	60
6	ток в катушках, I, А	0,33	0,50	0,67	0,82	1,03

Примечание 1. Просачивание сигнала из канала №1 в канал №2 и наоборот равно заграждению.

2. Входная мощность при измерениях 1мВт

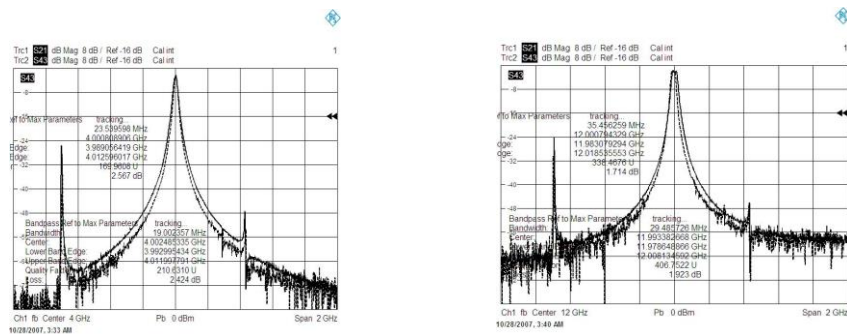


Рис. 2. Резонансные характеристики передачи сигнала двухканального двухрезонаторного фильтра диапазона частот 4 – 12 ГГц. Непрерывная линия (параметры сверху) – канал №1, пунктирная линия (параметры снизу) – канал №2.

Из таблицы 2 и рис. 2 видно, что двухканальный фильтр имеет низкие потери пропускания в диапазоне перестройки 4 – 12 ГГц, при этом  $\alpha_{\min}$  и  $\Delta f_3$  практически совпадают в обоих каналах передачи сигнала. Неравномерность потерь  $\Delta\alpha$  в полосе пропускания, вызванная паразитным резонансом, пересекающим основной резонанс в диапазонах частот 4,2 – 5,0 ГГц и 8,2 – 8,5 ГГц, в обоих каналах не превышала 1,5 дБ.

Паразитные резонансы, наблюдаемые на резонансных характеристиках на рис. 2 при перестройке частоты фильтра от 4 до 12 ГГц, находятся в обоих каналах на одном и том же удалении от основного резонанса, что свидетельствует о равенстве их скоростей перестройки со скоростью перестройки частоты основного резонанса. Паразитный резонанс слева от  $f_p$  лежит дальше на склоне резонансной кривой от  $f_p$  и его уровень больше (24 ÷ 26 дБ) уровня паразитного резонанса справа от  $f_p$  (46 ÷ 48 дБ). Другие паразитные резонансы, кроме представленных на рис. 2, в фильтре не наблюдались. Максимальная расстройка каналов по частоте не превышает +8 МГц в диапазоне 4 – 12 ГГц. Заграждение фильтра вне резонансных кривых уменьшается с ростом частоты от 80 до 62 дБ в канале №1, от 75 до 60 в канале №2. Развязка между каналами была равна заграждению.

При включении позисторов параметры обоих типов двухканальных фильтров ( $\alpha_{\min}$ ,  $\Delta f_3$ ,  $f_1$ - $f_2$ ,  $\alpha_{\text{пар}}$ ,  $\beta$ ) в рассмотренных диапазонах перестройки частоты. Это позволяет прогнозировать удовлетворительную работу фильтра в интервале температур от 0 до плюс 70°C без включения позисторов и в интервале от минус 10 до плюс 70°C с включением позисторов.

В заключении отметим, что трудоемкость настройки двухканальных фильтров существенно превышает трудоемкость настройки одноканальных фильтров, имеющих то же и даже большее количество резонаторов. Качественная настройка двухканальных фильтров возможна при обеспечении изготовления идентичных витковых элементов связи в резонаторных камерах обоих каналов, использования отобранных по параметрам идентичных ферритовых резонаторов, изготовления электромагнитов с высокой параллельностью и плоскостностью полюсных наконечников, отсутствия люфтов при ориентации ФР. При нарушении некоторых из этих требований возможно использование прокладок, помещаемых на стыки верхней и нижней частей в магнитопроводе [5]. В дальнейшем предполагается провести исследование и разработку двухканальных двухрезонаторных фильтров в диапазонах частот 0,5 – 2,0 ГГц, 8 – 18 ГГц, 18 – 26 ГГц.

#### Библиографический список

1. Электронный ресурс URL: <http://www.magneton.ru/cat.php?id=104> Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры // ОАО "Завод Магнетон": официальный сайт. СПб. (24.03.2016).
2. Электронный ресурс <http://www.teledynemicrowave.com/index.php/teledyne-microwave-products/teledyne-yig-products/microwave-solutions-yig-filters>
3. Электронный ресурс <http://www.microlambdawireless.com/YIG-filter/>
4. Электронный ресурс [http://www.domen.ru/images/stories/prod/pdf/catalog\\_part6\\_03.pdf](http://www.domen.ru/images/stories/prod/pdf/catalog_part6_03.pdf)
5. Патент на полезную модель №148202, Сверхвысокочастотный ферритовый фильтр, авторы: Чуркин В.И., Фирсенков А.И., Дубовой В.А., публикация патента: 27.10.2014 г.