

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТНОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНО-ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУР

© 2018 г. Г.М. АРИСТАРХОВ, О.В. АРИНИН, И.Н. КИРИЛЛОВ

Московский технический университет связи и информатики

Введение

Как известно, гребенчатые и встречно-стержневые структуры полосно-пропускающих фильтров на четвертьволновых резонаторах являются наиболее компактными в классе микрополосковых фильтров (МПФ) [1]. Повышение их частотной избирательности традиционно достигается введением дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами [2]. Однако число формируемых полюсов рабочего затухания в этих N резонаторных структурах равно $P=N-2$. Вместе с тем в работах [3, 4] показано, что этот предел в реализации ограниченного числа полюсов рабочего затухания может быть существенно расширен. Это достигается за счет применения многоступенчатых гребенчатых структур (число ступеней больше двух) с различной степенью электромагнитного взаимодействия между смежными резонаторами в каждой из ступеней, а также встречно-гребенчатых многоступенчатых структур с дополнительной гальванической связью между смежными гребенчатыми секциями. В этих планарных структурах МПФ формируется не менее N полюсов рабочего затухания, без введения дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами. Эти приемы особенно эффективны для МПФ с ограниченным числом резонаторов, так как в этом случае дополнительные полюсы рабочего затухания существенно повышают частотную избирательность фильтров.

В данной работе этот подход к проектированию компактных высокоизбирательных МПФ развивается применительно к четырех- и шестирезонаторным структурам, в которых возможно формирование $N+2$ полюса рабочего затухания на конечных частотах. Кроме того, приводится сравнительный анализ достижимых электрических параметров и конструктивно-технологических особенностей реализации рассматриваемых структур МПФ.

Четырехрезонаторные гребенчатые структуры МПФ

На рис. 1 и рис. 2 представлены трехступенчатые гребенчатые структуры без дополнительной емкостной связи между входным и выходным резонаторами (рис. 1) и с ней. Здесь и далее применяются подложки толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9,8$ (применение подложек с другим значением ϵ_r будет оговариваться отдельно). Заметим, что в структуре, представленной на рис. 1, возможно формирование четырех полюсов рабочего затухания только при очень сильной электромагнитной связи между резонаторами (минимальное расстояние между отдельными участками смежных резонаторов равно $S=0,05$ мм). Это предъявляет жесткие требования к точности изготовления структуры. Введение дополнительной связи между несмежными резонаторами (рис. 2, верхняя часть топологии) обуславливает формирование дополнительного полюса рабочего затухания, что в целом обеспечивает более высокую частотную избирательность этой структуры как в области нижних, так и верхних частот.

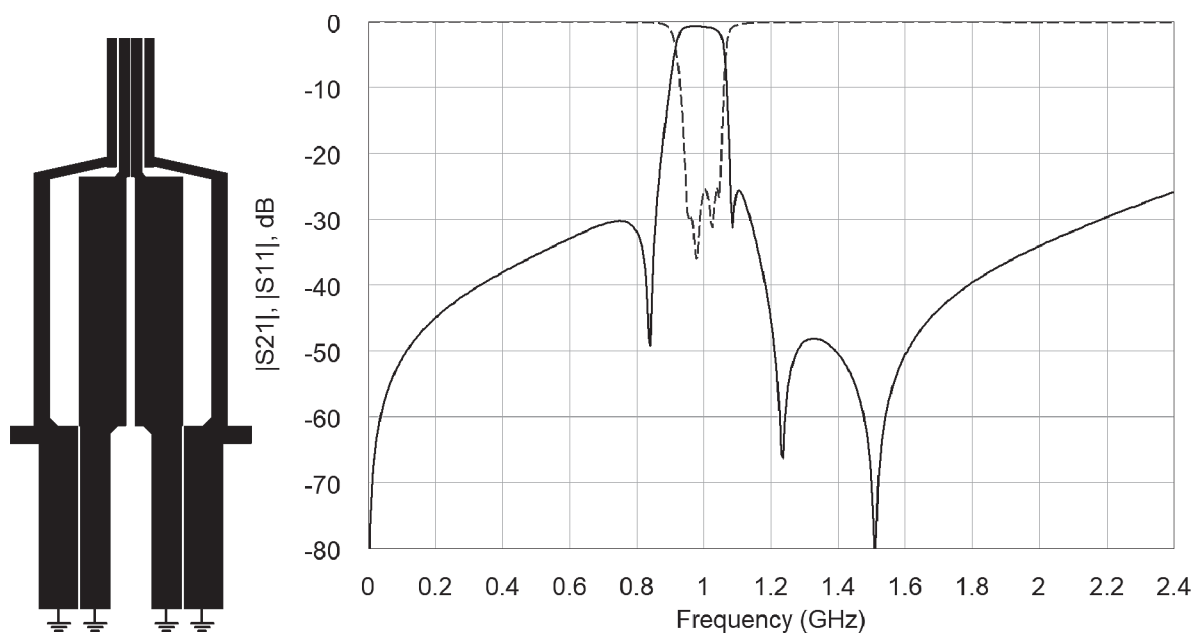


Рис. 1. Четырехрезонаторные гребенчатые структуры с неуравновешенными электромагнитными связями.

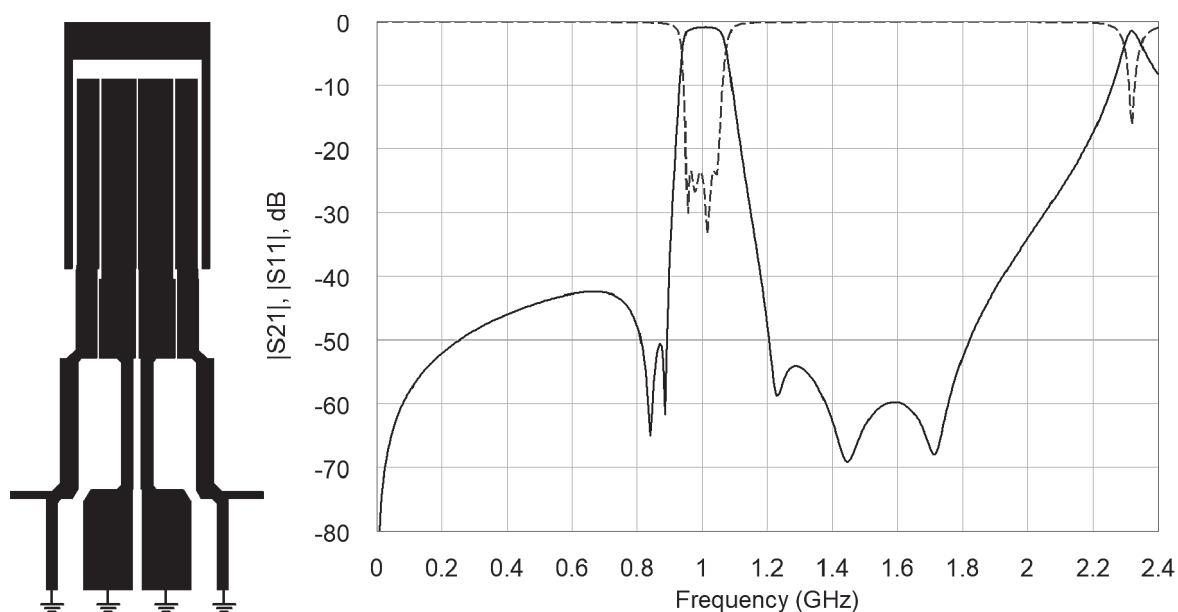


Рис. 2. Гребенчатая структура с дополнительной электрической связью.

Формирование и расщепление полюсов рабочего затухания в области нижних частот достигается за счет реализации в структуре преобладающей электрической связи между смежными резонаторами. Коэффициент прямоугольности рабочего затухания, определяемый по уровням минус 3 дБ и минус 40 дБ, составляет для этой структуры $K_{\text{н}3/40}=2,2$. Отметим, что при одной и той же относительной ширине полосы пропускания ($\Delta f_p=10\%$) минимальные расстояния между смежными резонаторами в этом случае составляют $S_{\text{min}}=0,1$ мм, что в два раза больше такого же параметра для гребенчатой структуры, представленной на рис. 1. Однако с расширением полосы пропускания расстояние между резонаторами будет уменьшаться, и мы снова столкнемся с проблемой физической осуществимости структуры и устойчивости ее электрических параметров к технологическому разбросу параметров элементов.

Встречно-гребенчатые структуры

Разрешить отмеченные выше противоречия возможно за счет применения встречно-гребенчатых структур [3, 4]. На рис. 3 представлена четырехрезонаторная структура МПФ с дополнительной гальванической связью между центральными резонаторами. В структуре также формируется четыре полюса рабочего затухания на конечных частотах ($P=N$), но при существенно большем расстоянии между участками смежных резонаторов ($S_{\min}/H=1$).

В этой компактной структуре сочетается два способа формирования МПФ высокого порядка: за счет электромагнитного взаимодействия между резонаторами и за счет каскадного соединения отдельных звеньев (секций).

Учитывая характер распределения напряжений и токов в гребенчатых структурах, можно выделить в связанных резонаторах области с преобладающей магнитной и электрической связями между ними. Так, первая ступень секции в области короткозамкнутых на экран резонаторов определяет магнитную связь между резонаторами, а третья ступень, где резонаторы находятся в режиме холостого хода, определяет электрическую связь. Такое пространственное разделение электромагнитных связей обеспечивает конструктивную простоту управления частотными свойствами гребенчатых секций. При этом коэффициент прямоугольности рабочего затухания $K_{\text{пз}/40}=2$.

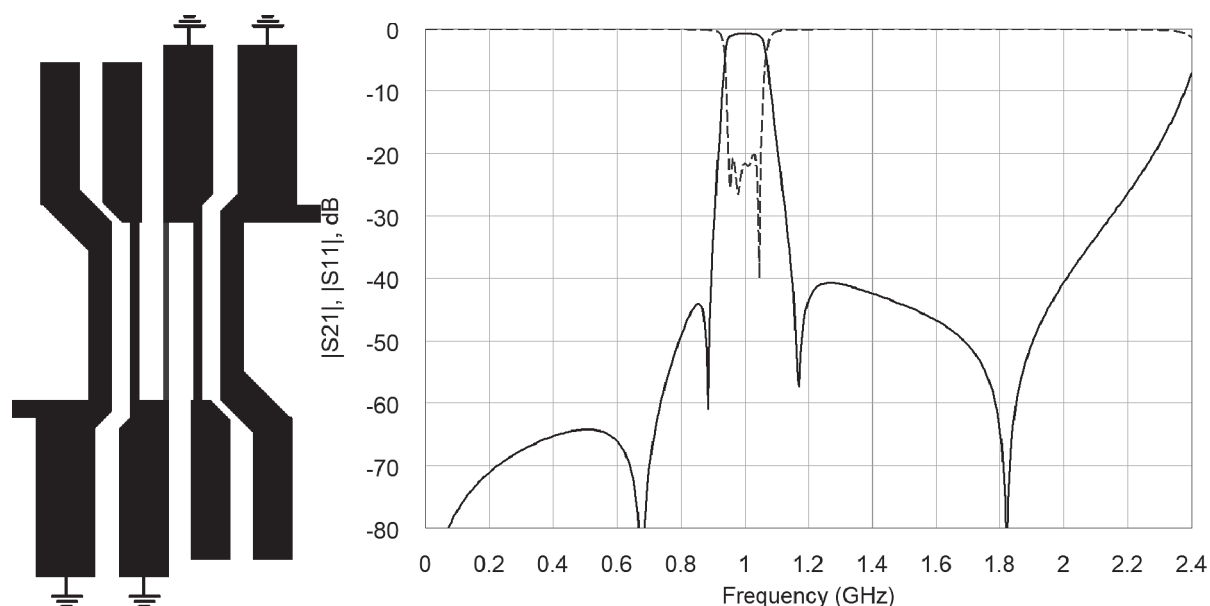


Рис. 3. Встречно-гребенчатая четырехрезонаторная структура с гальванической связью.

Наращивание числа резонаторов приводит к формированию дополнительных полюсов затухания и к существенному повышению частотной избирательности МПФ. На рис. 4 представлена шестирезонаторная встречно-гребенчатая структура с дополнительной гальванической связью, в которой формируется шесть полюсов рабочего затухания ($P=N$).

Следует отметить, что каждая из трехрезонаторных секций, образующих МПФ, формирует один полюс рабочего затухания в области нижних и два полюса рабочего затухания в области верхних частот [4]. Такое расположение полюсов рабочего затухания обеспечивается тем, что между первым и вторым резонаторами трехрезонаторной секции преобладающей является электрическая связь, а между вторым и третьим резонаторами – магнитная. При этом совместное электромагнитное взаимодействие и гальваническая связь между трехрезонаторными встречно-гребенчатыми секциями обуславливает расщепление этих полюсов рабочего затухания и обеспечивает коэффициент прямоугольности рабочего затухания, определяемый по уровням минус 3 дБ и минус 50 дБ, $K_{\text{пз}/50}=1,9$. Отметим, что нерациональный выбор

этих связей может привести к чрезмерному расщеплению полюсов рабочего затухания и их совмещению, что обусловит частичное или полное вырождение последних.

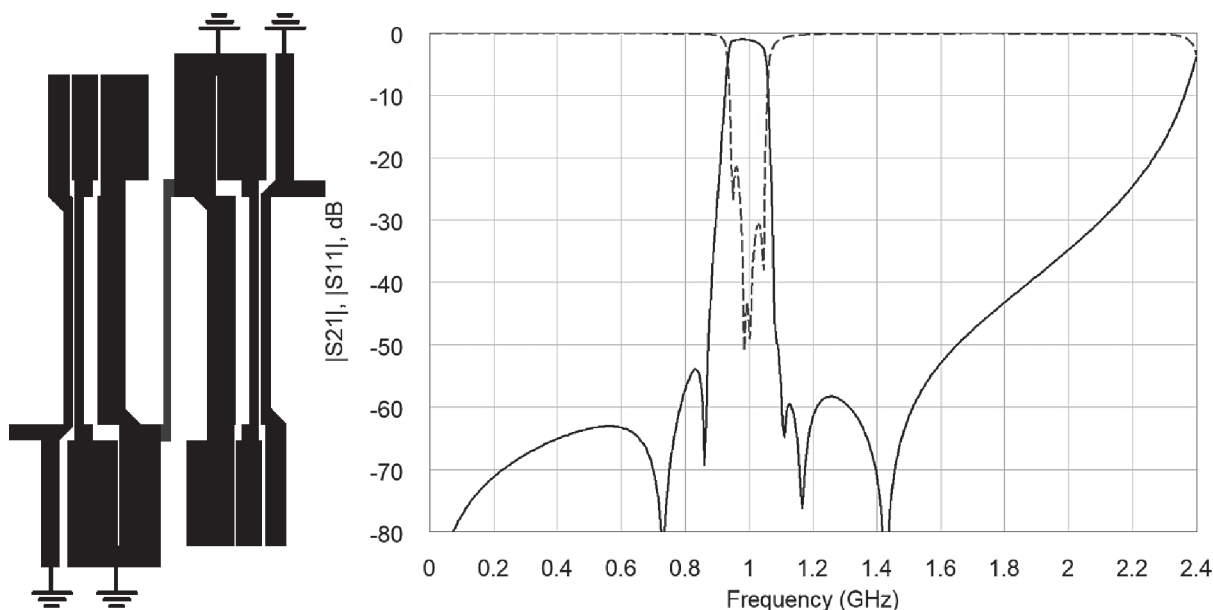


Рис. 4. Шестирезонаторная встречно-ребенчатая структура.

Встречно-ребенчатые структуры на основе шпилечных резонаторов

Как известно, уменьшение габаритов МПФ возможно за счет применения подложек с высоким значением ϵ_r и (или) исполнением резонаторов в виде свернутых элементов типа «спираль», «шпилька» и других конструктивных форм [5–7]. Распространим этот подход применительно к исследуемым в данной работе высокоизбирательным структурам с ограниченным числом резонаторов. Каждый четвертьволновый резонатор в структуре МПФ выполнен в виде шпильки (рис. 5). В каждой двухрезонаторной секции преобладающей связью между секциями является электрическая связь. Это обуславливает формирование основного полюса затухания секции в области нижних частот. Вспомогательный полюс затухания этой секции в области верхних частот формируется решетчатой секцией, образованной внутри звена за счет электромагнитного взаимодействия между плечами резонаторов. В свою очередь второй и третий резонаторы образуют звено с доминирующей магнитной связью между короткозамкнутыми четвертьволновыми резонаторами. Такой режим работы звена обуславливает формирование еще двух полюсов рабочего затухания в области верхних частот вблизи полосы пропускания МПФ.

На рис. 5 представлены результаты синтеза встречно-ребенчатой структуры на основе четвертьволновых шпилечных резонаторов, в которой рационально сочетаются два типа взаимодействия между ребенчатыми секциями.

В этой четырехрезонаторной структуре МПФ формируется шесть полюсов рабочего затухания ($N+2$), расщепление которых обеспечивается выбором баланса электромагнитных связей между МПЛ на разных участках их длины. Нарушение этого баланса обуславливает сужение полосы заграждения, а также частичное вырождение некоторых полюсов рабочего затухания за счет их совмещения или перемежения.

Важной особенностью рассматриваемых структур является высокое значение их характеристического сопротивления. Это обеспечивает возможность реализации структур на подложках с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r \approx 100$ без введения каких-либо дополнительных цепей согласования.

На рис. 6 представлена аналогичная структура МПФ, реализованная на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 80$. При тех же достижимых электрических параметрах обеспечивается уменьшение площади подложки в 3 раза. При этом значения коэффициенты прямоугольности рабочего затухания для обеих этих

структур несколько уступают коэффициентам прямоугольности рассмотренных выше четырехрезонаторных структур, но наряду с этим обеспечиваются более высокие уровни рабочего затухания в полосах заграждения как в области нижних (~14 дБ), так и в области верхних частот (~20 дБ).

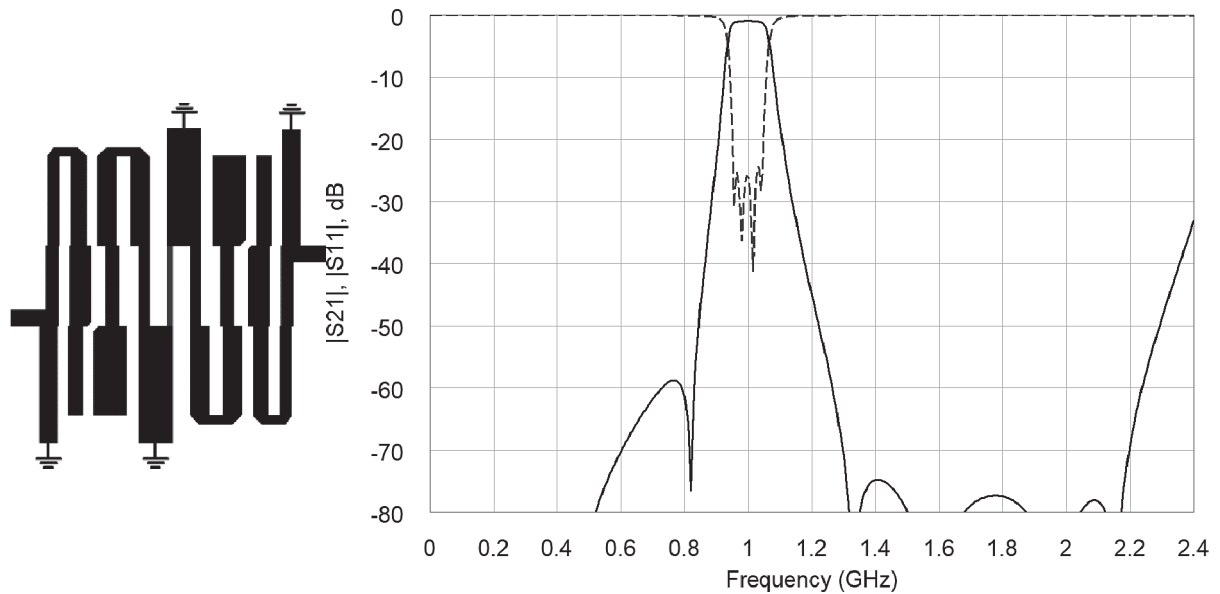


Рис. 5. Четырехрезонаторная структура на шпилечных резонаторах, $\epsilon_r=9,8$.

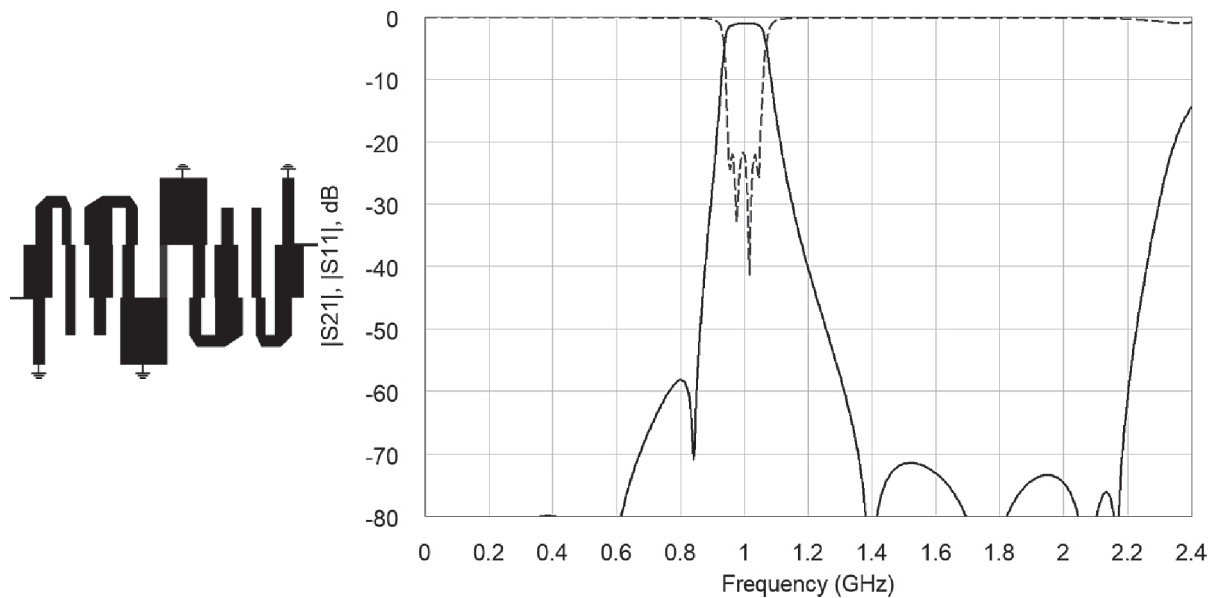


Рис. 6. Четырехрезонаторная структура на шпилечных резонаторах, $\epsilon_r=80$.

Обсуждение результатов

В табл. 1 представлены результаты моделирования структур МПФ с ограниченным числом резонаторов, рассмотренных в данной работе. Сравнительный анализ достижимых электрических параметров этих структур проводится по значениям коэффициентов прямоугольности рабочего затухания, определяемым по уровням минус 3 дБ, минус 40 дБ и минус 50 дБ, а также по уровням затухания в полосах заграждения в областях нижних и верхних частот. Конструктивно-технологические возможности реализации структур оцениваются по минимальному значению расстояния S между смежными МПЛ. Кроме того, в табл. 1 приведены значения площади подложки, занимаемой

каждой из структур. Анализ приведенных данных показывает, что встречно-гребенчатые структуры с ограниченным числом четвертьволновых шпилечных резонаторов сочетают компактность, высокую технологичность и повышенную частотную избирательность. Это обусловлено тем, что в этих структурах формируется N+2 полюса рабочего затухания на конечных частотах.

Таблица 1

Параметр	Тип структуры				
	Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 5	Рис. 6
Количество резонаторов	4	4	6	4	4
ϵ_r подложки	9,8	9,8	9,8	9,8	80
Число полюсов затухания	5	4	6	6	6
$K_{п3/40}$	2,2	2	1,7	2,55	2,51
$K_{п3/50}$	-	-	1,9	3,1	3,1
Уровень затухания в полосе заграждения, дБ: (в области нижних частот; / в области верхних частот)	42 / 54	44 / 41	54 / 58	58 / 74	58 / 71
Площадь подложки, мм (мм ²)	8,5x29 (247)	15,5x31,5 (489)	15,2x31 (472)	15x18 (270)	12x8 (96)
S_{min}/H	0,1	1	0,15	0,6	0,4
W_{min}/H	0,55	0,5	0,5	0,6	0,4
W_{max}/H	2,5	3,5	3	1,9	2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маттей Д.Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д.Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. - М.: Связь, 1971, 1972. Т.1,2. 451 с., 494 с.
2. Роудз Дж.Д. Теория электрических фильтров - М.: Сов. радио, 1980. -240 с.
3. Aristarkhov G.M., Arinin O.V., Kirillov I.N., "Compact highly-selective microstrip filters based on counter-comb structures," 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/SOSG.2018.8350569 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8350569&isnumber=8350560>
4. Aristarkhov G.M., Arinin O.V., Kirillov I.N., "Microstrip filters based on counter-comb structures with additional galvanic connection," 2018Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, Belarus, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456933 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8456933&isnumber=8456923>
5. Arinin O.V., Aristarkhov G.M., "Microwave filters with increased frequency selectivity based on quarter-wave hairpin resonators," 2018Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, Belarus, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456934 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8456934&isnumber=8456923>
6. Владимиров В.М., Марков В.В., Петров Д.В., Шелов В.Н. Трехдиапазонный малошумящий усилитель для активной антенны высокоточного позиционирования по сигналам ГЛОНАСС/GPS // Радиотехника. - 2013. - № 6. - С. 12-17
7. Николаев М.А. Компактные микрополосковые фильтры с повышенной селективностью / М. А. Николаев // Современная электроника. - 2008. - № 1. - С. 28-30.