

# Широкополосные и сверхширокополосные фильтры на поверхностных акустических волнах

Валерий ШВЕЦ  
Сергей КИСЕЛЕВ  
Илья ТУРКИН  
Виктор ОРЛОВ  
stor007@bk.ru

*Для обработки возрастающего потока информации современные системы связи используют все более сложные сигналы и все более высокие скорости их передачи. Подобные системы нуждаются в частотно-избирательных устройствах, обладающих широкой полосой пропускания (более 15–20%) и обеспечивающих минимальные амплитудные и фазовые искажения обрабатываемого сигнала при максимально возможной избирательности.*

## Введение

### Условная классификация фильтров на ПАВ

Одним из наиболее перспективных типов таких частотно-избирательных устройств являются фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ), обычно работающие в интервале частот 10–3000 МГц, имеющие малые габариты, высокую температурную стабильность и надежность.

Фильтры на ПАВ можно условно разделить на два класса:

- резонаторные;
- трансверсальные.

Резонаторные фильтры являются минимально-фазовыми и могут быть описаны в первом приближении на основе классической теории четырехполюсников, в соответствии с которой амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики (АЧХ и ФЧХ) фильтра однозначно связаны между собой. Например, с уменьшением полосы пропускания при фиксированной прямоугольности АЧХ или, наоборот, с улучшением прямоугольности АЧХ при фиксированной полосе, отклонение фазы резонаторного фильтра от линейной резко увеличивается, а характеристика группового времени запаздывания (ГВЗ) становится близкой к крутой параболе. К резонаторным устройствам на ПАВ относятся одно-

входные и двухвходные резонаторы, полосовые лестничные и мостовые фильтры, полосовые фильтры на резонаторах с электрической или акустической связью, режекторные фильтры, фильтры верхних и нижних частот. Преимуществом резонаторных фильтров являются малые вносимые потери до 0,8–1,2 дБ. Реализуемые при этом типичные полосы пропускания  $BW=0,05\text{--}5\%$  ограничивают возможности применения резонаторных фильтров в широкополосных системах связи.

Трансверсальные устройства на ПАВ являются неминимально-фазовыми и позволяют при проектировании независимо задавать АЧХ и ФЧХ сложной формы, например, симметричную АЧХ и линейную фазу или несимметричную АЧХ и нелинейную фазу. К трансверсальным устройствам на ПАВ относятся: полосовые фильтры, взвешивающие фильтры, согласованные фильтры ЛЧМ, ФМ и ММС сигналов, линии задержки, дисперсионные линии задержки, дифференциаторы, частотные дискриминаторы, преобразователи Гильберта и т. д. Модель, описывающая в первом приближении трансверсальное устройство на ПАВ, близка к модели цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой. Преимущества трансверсальных фильтров — широкий интервал реализуемых полос пропускания от 2 до 80%, высокая избирательность до 70 дБ, линейная характеристика группового времени запаздывания (ГВЗ) с малыми пульсациями до 5–6 нс. Главным недостатком считаются высокие вносимые потери от 6 до 35 дБ в зависимости от полосы пропускания. Основные параметры трансверсальных фильтров на ПАВ, разработанных в ОАО «Московский НИИ Радиосвязи — МНИИРС», приведены в таблице.

В статье описываются особенности конструкций и частотных характеристик широкополосных (15–30%) и сверхширокополосных (30–75%) трансверсальных фильтров на ПАВ.

Т а б л и ц а . Основные параметры трансверсальных полосовых фильтров на ПАВ

Параметр	Един.	Двунаправленные преобразователи	Однонаправленные преобразователи		Квазиверные слаборазвернутые
			Однофазные	Квазиверные	
Центральная частота, F0	МГц	20-600	70-500	50-500	50-500
Вносимые потери, IL	дБ	15-35	6-14	7-18	20-32
Полоса пропускания, BW3	%	3-75	0,5-10	3-30	30-75
Коэффициент прямоугольности АЧХ, КП (40/3 дБ)	-	1,15-2,5	1,8-3,5	1,3-2,5	1,1-1,5
Пульсации амплитуды, (п-п)	дБ	0,1-0,7	0,3-0,8	0,3-0,8	0,3-0,8
Пульсации ГВЗ, (п-п)	нс	8-40	40-150	20-80	20-80
Гарантированное затухание, UR	дБ	30-60	40-50	40-50	40-50

### Широкополосные фильтры на двунаправленных встречно-штыревых преобразователях

#### Базовая конструкция фильтров с многополосковым ответвителем

Как известно [1], избирательность фильтров на ПАВ определяется, главным образом, частотно-зависимыми процессами преобразования электрического сигнала в ПАВ входным встречно-штыревым преобразователем (ВШП) и обратным преобразованием ПАВ в электрический сигнал выходным ВШП. Основными эффектами второго порядка (ЭВП), ограничивающими избирательность фильтров на ПАВ в широком интервале частот, являются электромагнитная наводка с входа на выход фильтра, паразитные объемные акустические волны (ОАВ), возбуждаемые преобразователями фильтра, и дифракция акустического пучка, особенно сильная в фильтрах с аподизованными преобразователями.

Эффективным способом ослабления влияния паразитных ОАВ является использование многополоскового ответвителя (МПО). Регулярный МПО, предложенный Р. Marshall и др. [2], представляет собой решетку изолированных полосковых электродов, расположенных эквидистантно на пьезоэлектрической подложке из материала с высоким коэффициентом электромеханической связи. Регулярный МПО размещается между входным и выходным встречно-штыревыми преобразователями фильтра (ВШП 1 и ВШП 2) и служит для передачи энергии ПАВ из канала 1 в канал 2 (рис. 1, 2). МПО теоретически не взаимодействует с объемными волнами. Поэтому предполагается, что эти волны не переизлучаются МПО в канал 2, и пучок ОАВ, возбужденный входным ВШП 1, не попадает на выходной ВШП 2. В результате электрический сигнал на выходе фильтра определяется в основном сигналом ПАВ, что способствует улучшению избирательности фильтра. Важная особенность работы МПО в том, что фронт ПАВ, переизлученный в канал 2, — плоский, это позволяет использовать два аподизованных ВШП в одном фильтре с целью улучшения избирательности. Хотя процесс передачи энергии ПАВ из канала 1 в канал 2 является частотно-зависимым, полоса пропускания регулярного МПО [2] очень широка, ее диапазон составляет  $0 \sim 2 F_0$ , где  $F_0$  — средняя частота фильтра [2]. В результате МПО практически не оказывает негативного влияния

на частотные характеристики фильтров с полосой пропускания до  $BW3=40-50\%$ . С другой стороны, в составе структуры фильтра на ПАВ с жесткими требованиями к избирательности (более 50-55 дБ) в широкой полосе частот и к коэффициенту прямоугольности АЧХ  $|S_{21}|$  (КП  $40/3=1,1-1,2$ ) целесообразно иметь частотно-селективный элемент акустического тракта дополнительно ко входному и выходно-

му ВШП. Таким акустическим элементом может быть частотно-избирательный или селективный МПО (СМПО). Известно несколько типов селективных МПО, но в настоящей статье будет рассматриваться только секционированный СМПО с амплитудно-фазовым взвешиванием секций электродов в канале 2, обладающий наибольшей гибкостью при формировании частотных характеристик [3].

Основными преимуществами селективного МПО по сравнению с регулярными МПО являются:

- улучшение коэффициента прямоугольности АЧХ  $|S_{21}|$  фильтра за счет формирования дополнительных полюсов затухания вблизи переходной области  $|S_{21}|$  или непосредственно на скатах АЧХ фильтра  $|S_{21}|$ ; улучшение избирательности в широкой полосе частот, особенно на частотах ангармоник или гармоник преобразователей фильтра;
- ослабление требований к избирательности преобразователей фильтра до 25-35 дБ вместо обычных 40-50 дБ, что позволяет увеличить перекрытия электродов в преобразователях и в результате снизить дифракционные искажения и повысить устойчивость фильтра к технологическим погрешностям.

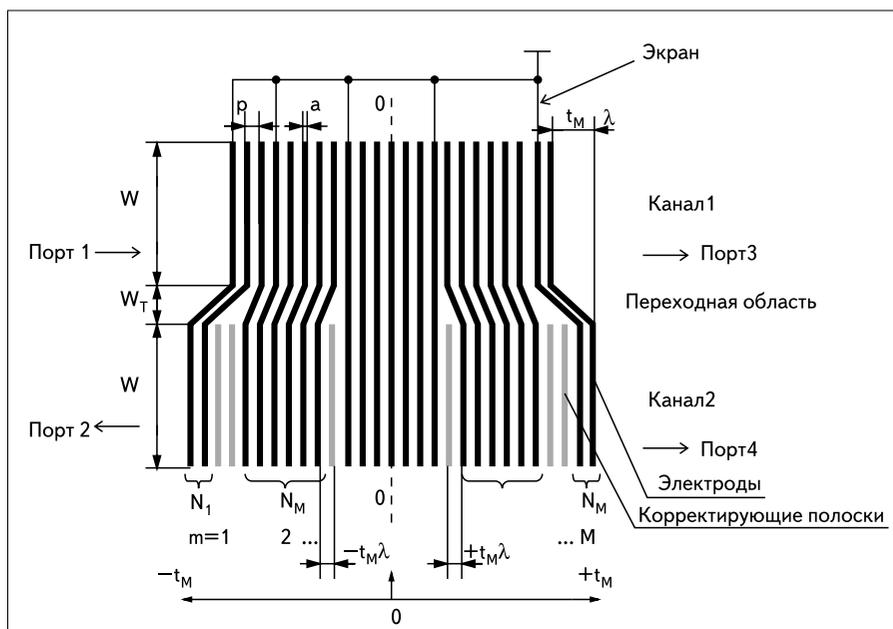


Рис. 1. Структура секционированного СМПО и его параметры

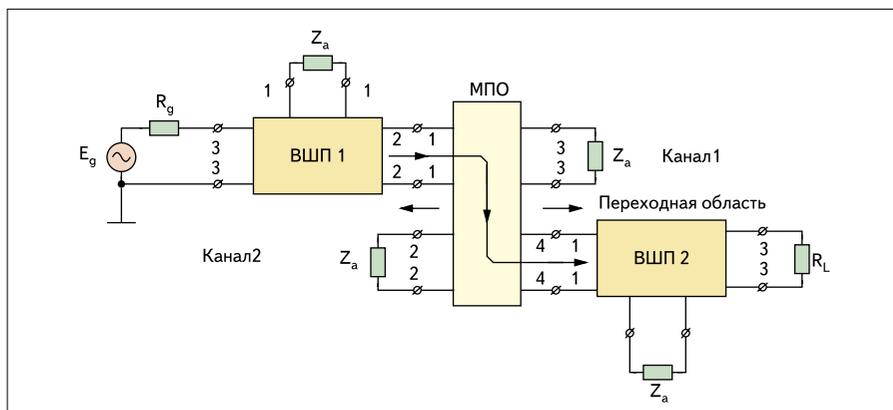


Рис. 2. Структура фильтра для расчета передаточной функции:

Передаточная функция фильтра  $S_F = S_2^{ВШП1} \times S_4^{МПО} \times S_B^{ВШП2}$

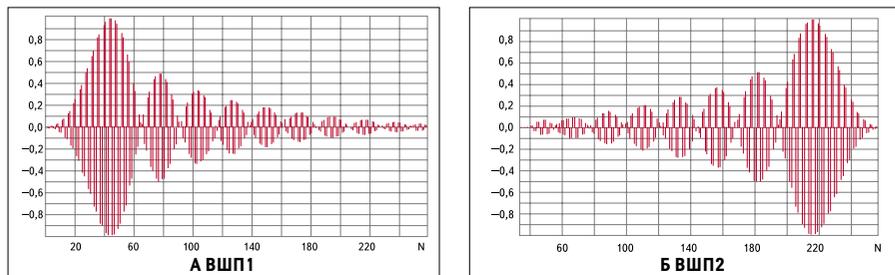


Рис. 3. Весовые коэффициенты несимметричных ВШП

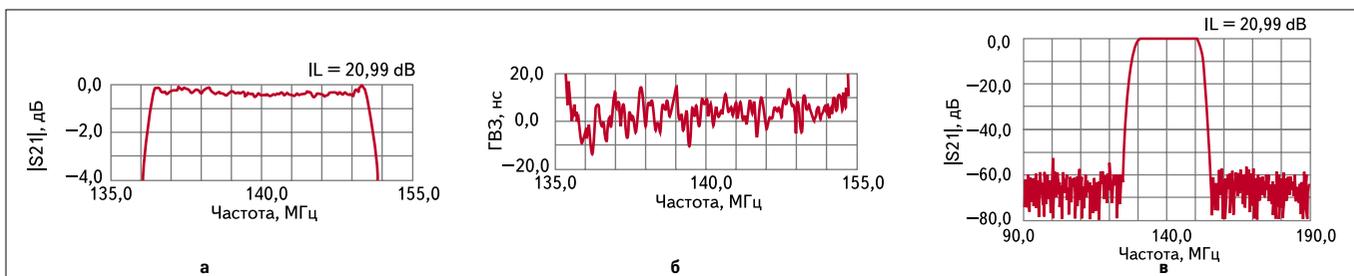


Рис. 4. Частотные характеристики фильтра ФП-478 (140В20 МГц)

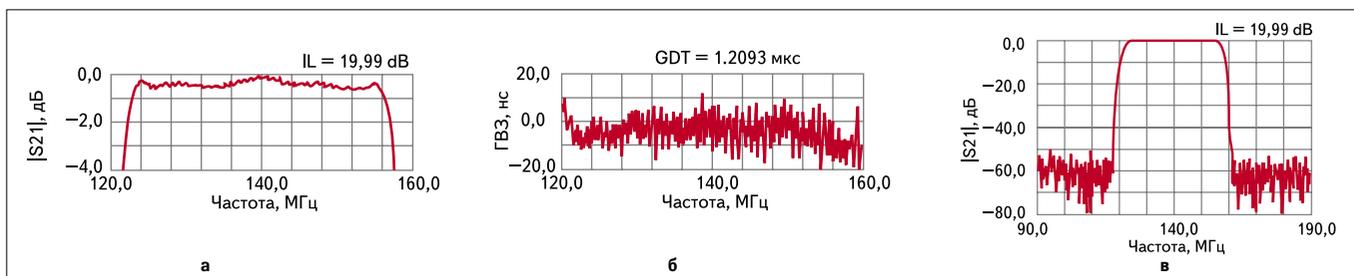


Рис. 5. Частотные характеристики фильтра ФП-320 (140В30 МГц)

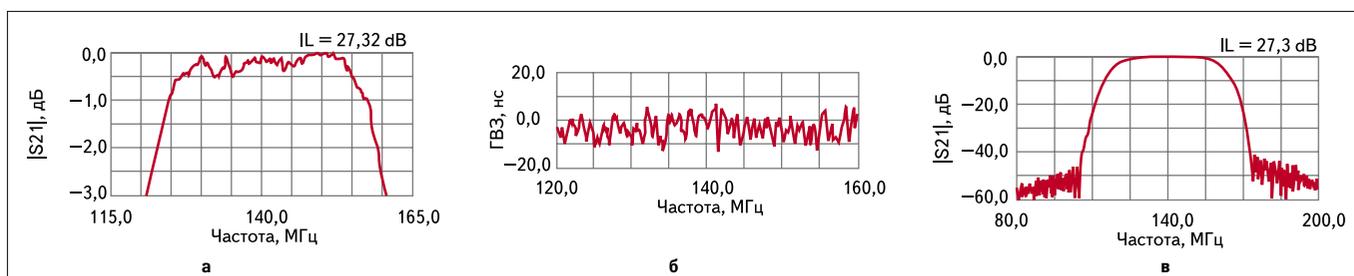


Рис. 6. Частотные характеристики фильтра ФП-447 (140В40 МГц)

Особенности расчета секционированных СМПО с амплитудно-фазовым взвешиванием секций описаны в работе [4].

Таким образом, структуры типа ВШП1-МПО-ВШП2 или ВШП1-СМПО-ВШП2 могут использоваться в качестве базовых для широкополосных фильтров на ПАВ.

### Примеры конструкций фильтров с многополосковыми ответвителями

Фильтр ФП-478 (140В20) имел среднюю частоту 140 МГц, полосу пропускания  $BW1=20$  МГц и коэффициент прямоугольности менее  $K40/1=1,5$ . В фильтре 140В20 использовались два аподизованных ВШП и секционированный СМПО. Весовые коэффициенты несимметричных аподизованных ВШП рассчитывались по методике с использованием минимально-фазового прототипа [5]. Это позволило максимально приблизить друг к другу электроды с малыми перекрытиями в преобразователях (рис. 3) и, как следствие, частично снизить влияние дифракционных искажений. С целью улучшения коэффициента прямоугольности АЧХ | | фильтра и формирования полюсов

затухания вблизи главного ее лепестка, секционированный СМПО содержал 14 секций с весами в соответствии с функцией  $\text{Func}=4$ , имеющей вид косинусного ряда [5].

Частотные характеристики фильтра 140В20 приведены на рис. 4. Вносимые потери фильтра 140В20 составляют  $IL=20,3$  дБ (рис. 4а). Пульсации амплитуды в полосе пропускания фильтра составляют 0,5 дБ, а неравномерность ГВЗ не превышает 50 нс (рис. 4б). Благодаря описанным выше мерам по уменьшению дифракционных искажений фильтр 140В20 имеет хорошее подавление боковых лепестков как в низкочастотной полосе заграждения  $F0-50$  МГц (58–62 дБ), так и в высокочастотной полосе заграждения (56 дБ) вместо типичных 45–50 дБ для обычных структур трансверсальных фильтров. В широкой полосе  $F0\pm 100$  МГц фильтр 140В20 имеет избирательность 60–64 дБ (рис. 4в). Последнее важно в фильтрах, предназначенных для телевизионной аппаратуры и базовых станций сотовых систем связи, где необходимо значительное затухание на несущих частотах соседних каналов.

Фильтр 140В20 разрабатывался под планарный корпус SMD  $13,3\times 6,5\times 1,8$  мм и не требует дополнительных цепей согласования с 50-омным трактом.

Следует отметить, что с расширением требуемой полосы пропускания эффективность взвешенных СМПО падает, что приводит к росту потерь, вносимых таким СМПО, и к ограничению их достижимой избирательности. Поэтому в фильтрах с полосой пропускания 20–25% и более целесообразно

использование классических регулярных МПО. Ниже приведены примеры частотных характеристик фильтров с базовой конструкцией «Аподизованный ВШП1-МПО-Аподизованный ВШП2».

На рис. 5 представлены частотные характеристики фильтра ФП-320 (140В30 МГц) с полосой пропускания  $BW1=21\%$ . Вносимые потери фильтра составляют  $IL=20$  дБ (рис. 5а), пульсации амплитуды и ГВЗ в полосе пропускания  $AR=0,6$  дБ и  $GDV=18$  нс (рис. 5б), гарантированное затухание в полосе заграждения  $UR=50$  дБ (рис. 5в).

На рис. 6 представлены частотные характеристики фильтра ФП-447 (140В40 МГц) с полосой пропускания  $BW1=28\%$ . Вносимые потери фильтра составляют  $IL=27,3$  дБ (рис. 6а), пульсации амплитуды и ГВЗ в полосе пропускания  $AR=1$  дБ и  $GDV=19$  нс (рис. 6б), гарантированное затухание в полосе заграждения  $UR=40$  дБ (рис. 6в).

На рис. 7 показаны частотные характеристики сверхширокополосного фильтра ФП-60 (160В86 МГц) с полосой пропускания  $BW3=55\%$ . Вносимые потери фильтра составляют  $IL=32$  дБ

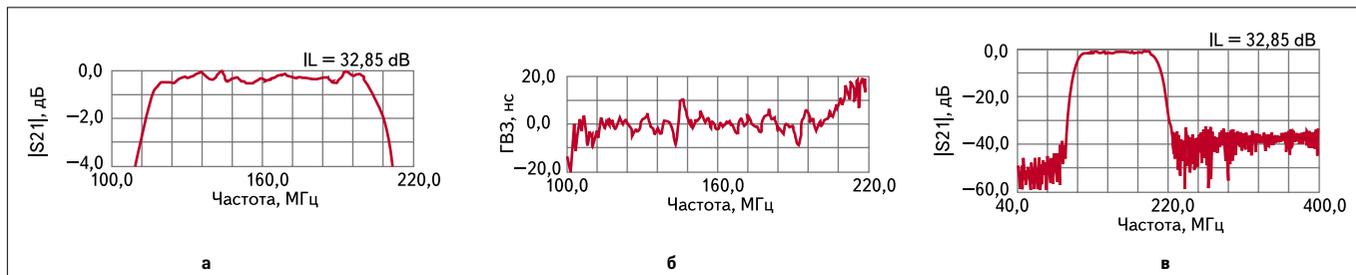


Рис. 7. Частотные характеристики фильтра ФП-60 (160В86 МГц)

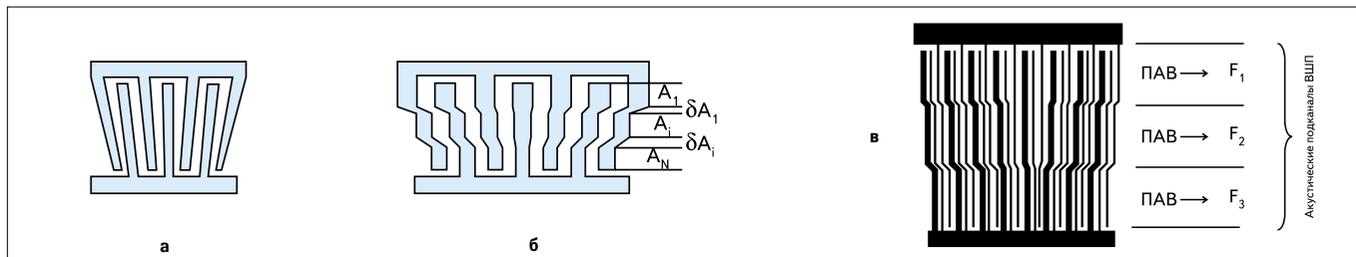


Рис. 8. Преобразователи с изменением периода электродов вдоль апертуры

а – веерный,  
б – квазивеерный,  
в – квазивеерный однонаправленный

(рис. 7а), пульсации амплитуды и ГВЗ в полосе пропускания  $AR = 1$  дБ и  $GDV = 20$  нс (рис. 7б), гарантированное затухание в полосе заграждения  $UR = 35$  дБ (рис. 7в).

Перечисленные фильтры в качестве материала подложек использовали ниобат лития среза  $yx1/128$  с  $TKЧ = -78$  ppm/°C (ФП-320, ФП-60, ФП-478) и среза  $YZ$  с  $TKЧ = -90$  ppm/°C (ФП-447). Чипы фильтров размещены в планарных корпусах SMD  $13,3 \times 6,5 \times 1,8$  мм. Для согласования фильтров с трактом 50 Ом использовались Г-образные цепи L1C1 и L2C2. Поскольку перечисленные фильтры (кроме ФП-60) разрабатывались под SMD-корпус одного типоразмера, апертуры их преобразователей также примерно одинаковы. С расширением относительной полосы пропускания входные и выходные импедансы фильтра увеличивались, что приводило к росту потерь на рассогласование с 50-омным трактом. Кроме того, с расширением полосы пропускания увеличивались потери в МПО. Как следствие, результирующие вносимые потери фильтров росли с расширением полосы от  $IL = 20,3$  дБ (фильтр ФП-320 с полосой  $BW1 = 14\%$ ) до  $IL = 32$  дБ (фильтр ФП-60 с полосой  $BW3 = 55\%$ ).

Снизить вносимые потери широкополосных фильтров можно при использовании сравнительно новых конструкций так называемых квазивеерных и квазивеерных однонаправленных преобразователей.

## Широкополосные и сверхширокополосные фильтры на квази-веерных преобразователях

### Базовая конструкция фильтров на квазивеерных преобразователях

Одним из способов взвешивания импульсных характеристик двунаправленных ВШП с целью формирования прямоугольной АЧХ и уменьшения уровня ее боковых лепестков является наклон электродов на угол  $\pm \Phi$  симметрично относительно вертикальной оси ВШП, перпендикулярной

направлению распространения ПАВ [5, 6]. В этом случае период электродов ВШП изменяется вдоль его апертуры (рис. 8а), а его импульсная характеристика оказывается взвешенной аналогично сигналу с частотно-фазовой модуляцией. Такие ВШП с наклонными электродами получили название веерных и применяются для реализации фильтров с полосами пропускания  $BW3 = \Delta F3/F0 = 5-30\%$  [1]. Использование различных типов однонаправленных однофазных преобразователей (SPUDT) [7] с наклонными электродами (или веерных SPUDT) позволяет уменьшить вносимые потери до  $IL = 7-16$  дБ и снизить уровень паразитного сигнала тройного прохождения (СТП) до  $-(40-50)$  дБ в полосе пропускания  $BW3 = (2-20\%)$  [6]. С ростом полосы пропускания фильтра более  $BW3 = (25-30\%)$  эффективность однонаправленных преобразователей существенно снижается и фактически не приводит к снижению вносимых потерь. Однако применение преобразователей даже со слабой направленностью излучения способствует снижению уровня СТП и связанных с ним пульсаций амплитуды и фазы фильтра. Поэтому применение веерных SPUDT целесообразно и для сверхширокополосных фильтров.

При анализе веерных преобразователей обычно предполагается, что каждый из них образован совокупностью 100–200 виртуальных акустических каналов, которые параллельны направлению распространения ПАВ. Полагается, что в пределах каждого канала электроды перпендикулярны направлению распространения ПАВ, а периоды электродов остаются неизменными. Кроме того, полагается, что эти виртуальные акустические каналы или парциальные фильтры работают независимо друг от друга.

В действительности частотные характеристики фильтров на основе веерных преобразователей подвержены сильному влиянию перекрестных искажений из-за излучения части энергии ПАВ наклонными электродами одного акустического канала в направлении соседнего акустического канала и из-за дифракционного расхождения пучка ПАВ. Перекрестные искажения увеличиваются с расширением полосы пропускания,

требующим увеличения угла наклона электродов.

Для устранения перечисленных недостатков были предложены квазивеерные преобразователи, представляющие собой совокупность из  $M_c = 10-30$  реальных акустических каналов [5]. Каждый акустический канал имеет параллельные электроды с одинаковой шириной, периодом и апертурой. Электроды в каждом канале размещены перпендикулярно направлению распространения ПАВ. Однофазные электроды объединены перемычками с электродами прилегающих каналов в один эквипотенциальный электрод ступенчатой формы (рис. 8б).

Базовая конструкция фильтра на основе квазивеерных преобразователей приведена на рис. 9. В первом приближении передаточная функция такого фильтра является векторной суммой передаточных функций совокупности парциальных акустических каналов со смещенными относительно друг друга средними частотами  $F_i$  и различными фазами из-за отличающихся расстояний между центрами преобразователей.

При проектировании фильтров на базе квазивеерных преобразователей можно одновременно использовать несколько видов взвешивания, например, взвешивание удалением электродов или емкостное взвешивание секций электродов для обеспечения заданного затухания в полосе заграждения, взвешивание апертур каналов для уменьшения пульсаций амплитуды в полосе пропускания фильтров и взвешивание расстояний  $D_i$  между центрами преобразова-

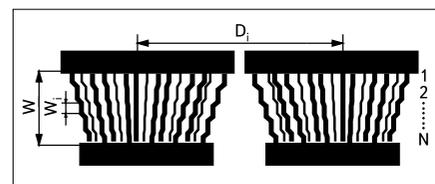


Рис. 9. Базовая структура фильтра на основе квазивеерных однонаправленных преобразователей

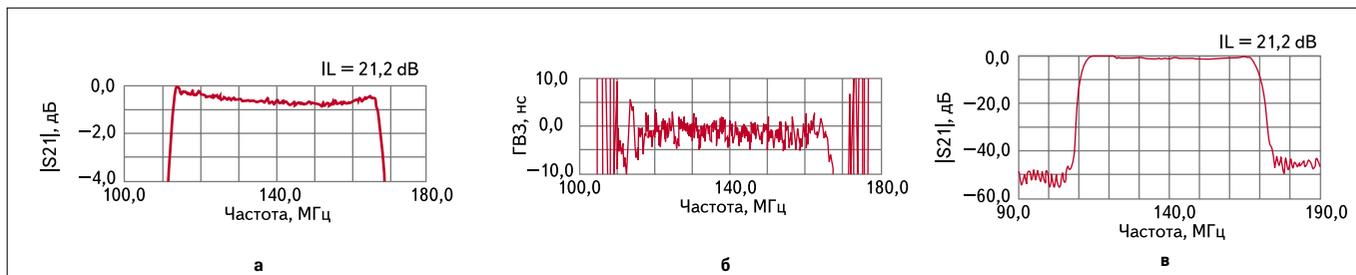


Рис. 10. Частотные характеристики фильтра ФП-160 (140В55 МГц)

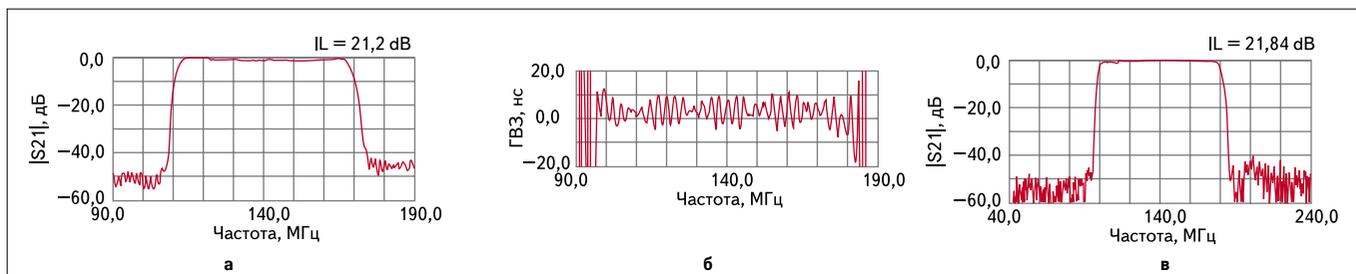


Рис. 11. Частотные характеристики фильтра ФП-59 (140В80 МГц)

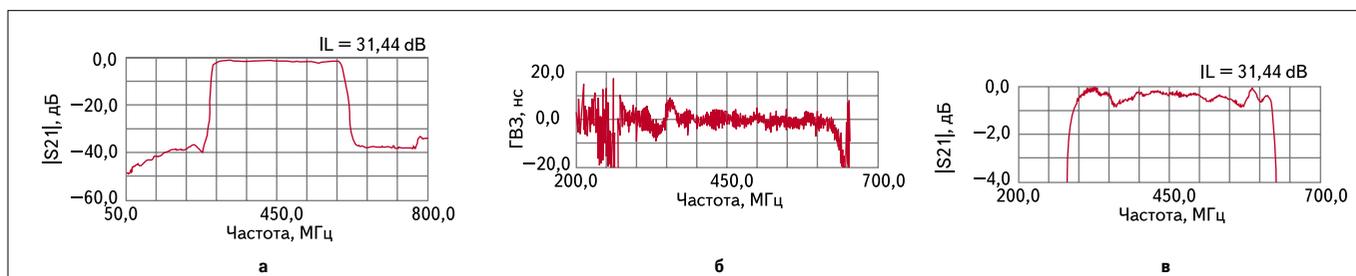


Рис. 12. Частотные характеристики фильтра ФП-482 (450В350 МГц)

телей для формирования заданной фазовой характеристики фильтра [5]. Если необходимо, в фильтрах на основе квазиверных преобразователей могут быть применены отличающиеся весовые функции для источников и отражателей ПАВ в каждом акустическом канале и дополнительное взвешивание длины электродов вдоль направления распространения ПАВ. Для оптимального согласования с нагрузками и уменьшения вносимых потерь при ограниченных апертурах преобразователей возможно использование многосекционных структур с последовательным или параллельным включением сопротивлений секций и т. д.

Поэтому гибкость управления частотными характеристиками и потерями является одним из главных преимуществ квазиверных фильтров.

Из-за использования параллельных электродов в акустических каналах квазиверные фильтры меньше подвержены влиянию дифракционных и перекрестных искажений. И наконец, изготовление фотомасок для квазиверных фильтров существенно проще, чем фильтров с наклонными электродами.

Благодаря перечисленным преимуществам квазиверные фильтры являются одним из наиболее перспективных типов фильтров на ПАВ для полос пропускания  $BW3=2-75\%$  [5, 6].

### Примеры конструкций фильтров на квазиверных преобразователях

На рис. 10 представлены частотные характеристики фильтра ФП-160 (140В55 МГц) с полосой пропускания  $BW1=39\%$ . Вносимые потери фильтра составляют  $IL=21,3$  дБ (рис. 10а), пульсации амплитуды и ГВЗ в полосе пропускания  $AR=0,8$  дБ

и  $GDV=15$  нс (рис. 10б), гарантированное затухание в полосе заграждения  $UR=40$  дБ (рис. 10в).

На рис. 11 изображены частотные характеристики фильтра ФП-59 (140В80 МГц) с полосой пропускания  $BW1=57\%$ . Вносимые потери фильтра составляют  $IL=21,8$  дБ (рис. 11а), пульсации амплитуды и ГВЗ в полосе пропускания  $AR=0,5$  дБ и  $GDV=15$  нс (рис. 11б), гарантированное затухание в полосе заграждения  $UR=45$  дБ (рис. 11в).

На рис. 12 показаны частотные характеристики фильтра ФП-482 (450В350 МГц) с полосой пропускания  $BW3=77\%$ . Вносимые потери фильтра составляют  $IL=31,4$  дБ (рис. 12а), пульсации амплитуды и ГВЗ в полосе пропускания  $AR=0,7$  дБ и  $GDV=20$  нс (рис. 12б), гарантированное затухание в полосе заграждения  $UR=38$  дБ (рис. 12в). В перечисленных фильтрах в качестве материала подложки использовался ниобат лития срез  $YX1/128$  с  $TKЧ=-78$  ppm/°C (ФП-59, ФП-160) и срез  $YZ$  с  $TKЧ=-90$  ppm/°C (ФП-163). Фильтры размещались в планарных корпусах SMD  $13,3 \times 6,5 \times 1,8$  мм (ФП-59) и SMD  $7 \times 5 \times 1,4$  мм (ФП-160, ФП-163). В фильтре ФП-482 применялись Г-образные цепи  $L1C1$  и  $L2C2$  для согласования с трактом 50 Ом. Фильтры ФП-59 и ФП-160 не требуют дополнительных цепей согласования.

### Заключение

Трансверсальные фильтры на ПАВ являются одной из перспективных реализаций широкополосных и сверхширокополосных частотно-избирательных устройств для современных систем передачи информации.

В зависимости от относительной полосы пропускания могут быть рекомендованы следующие базовые конструкции таких фильтров:

- аподизованный ВШП-селективный МПО-аподизованный ВШП для полос 15–20%;
- аподизованный ВШП-регулярный МПО-аподизованный ВШП для полос 25–40%;
- два квазиверных преобразователя со слабой направленностью излучения для полос 15–80%. [1]

### Литература

1. Орлов В. С., Бондаренко В. С. Фильтры на ПАВ. М.: Радио и связь. 1981.
2. Marshall P. G., Newton C. O. and Paige E. G. S. Theory and Design of the Surface Acoustic Wave Multistrip Coupler. // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-20. 1973.
3. Murrey R., Schofield J. The Use of Frequency-Selective Multistrip Coupler in Surface Acoustic Wave Transversal Filters. Ultrasonics Symposium Proceedings. 1980.
4. Киселев С. В., Федоров Е. И., Орлов В. С. Применение секционированных многополосковых ответвителей для улучшения избирательности фильтров на ПАВ. Труды VIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2002). Харьков. 2002.
5. Chvets V. B., Ivanov P. G., Makarov V. M., Orlov V. S. Low-Loss Slanted SAW Filters With Low Shape-Factor // IEEE, Ultrasonics Symposium Proc. 1999.
6. Chvets V. B., Orlov V. S., Rusakov A. N. Development of Low-Loss SAW Filters Based on Quasi-Slanted SPUDTs // IEEE Ultrasonics Symposium Proc. 2000.
7. Chvets V. B., Ivanov P. G., Makarov V. M., Orlov V. S. Low-Loss Filters Using New SPUDT Structures // IEEE Ultrason. Symp. Proc. 1997.