

ИМПЕДАНСНЫЕ ПАВ-ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ РОССИЙСКИЙ ПРИОРИТЕТ

А.Багдасарян^{1,2}, академик НАН РА, С.Багдасарян³, к.т.н., Г.Карпетьян^{4,5}, к.т.н.,
О.Машинин⁶, к.т.н., Т.Синицына⁶, к.т.н.

Российские ученые предложили новый класс фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) – импедансные фильтры на ПАВ. Впервые удалось совместить преимущества LC-фильтров (малое вносимое затухание, малые пульсации АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания, большая рассеиваемая мощность) с преимуществами ПАВ-фильтров (высокой технологичностью, использованием возможностей планарной микро- и наноэлектроники, воспроизводимостью, малыми массогабаритными характеристиками, низкой стоимостью). Импедансные фильтры находят применение в подвижных и сотовых системах связи, мобильных телефонах, цифровом телевидении, телевидении высокой четкости, системах радиочастотной идентификации и др. Авторами получены патенты РФ на изобретения, ряд свидетельств на топологии интегральных схем и патенты на полезные модели для различных применений.

Создание массовых недорогих приемных телекоммуникационных систем (ТКС) на основе унифицированного ряда функциональных устройств селекции частоты на поверхностных акустических волнах (ПАВ) – ключевая задача, оптимальное решение которой даст возможность обеспечить выигрыш в информационной войне (насуточная необходимость сегодня) и своевременное информирование национальных и зарубежных аудиторий о реальном положении дел как в политической, так и в экономической области [1].

Решается задача путем создания унифицированной технологической платформы типа "система в корпусе" как базовой конструкции

функциональных устройств селекции частоты, усиления и обработки сигналов для разрабатываемых и модернизируемых радиоэлектронных систем и комплексов управления, телевидения и связи (см. таблицу). Особое внимание обращает на себя стремительно развивающаяся технология поверхностных акустических волн и систем на ее основе. ПАВ рассматриваются как уникальная технология с неоспоримыми преимуществами, предоставляющая большие возможности по сравнению с аналогами [2–8].

ТИПЫ ИМПЕДАНСНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Применение импедансных фильтров на ПАВ в составе приемопередающих узлов и блоков обеспечивает достижение предельных характеристик аппаратных функций ТКС (в некоторых случаях на 1–2 порядка лучше) и поэтому эти фильтры успешно конкурируют как с отечественными, так и с зарубежными разработками.

Отличие предложенных импедансных фильтров от известных заключается в том, что в них

¹ ФГУП "Научно-исследовательский институт Радио".

² Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН.

³ ООО "НПП "ТРИИС".

⁴ ООО "Пьезотрон".

⁵ ЮФУ.

⁶ ООО "БУТИС".

содержатся только встречно-штыревые преобразователи (ВШП), отсутствуют отражатели ПАВ, что несколько упрощает конструкцию [10-14].

Из теории линейных электрических цепей [9] известно, что полосовые и режекторные LC-фильтры содержат последовательные и параллельные LC-контуры, объединенные в Г-, П-, Т- и мостовые схемы (рис.1). Как было показано [10-14], импедансные фильтры на ПАВ имеют эквивалентные схемы, тождественные LC-аналогам. Поэтому схемам, изображенным на рис.1а и б (последовательный и параллельный LC-контуры), соответствуют топологии импедансных фильтров на ПАВ (рис.2а, б).

Аналогично можно построить импедансные фильтры на ПАВ, соответствующие П- и LC-схемам (рис.1в, г). В этих случаях полосовой импедансный фильтр будет содержать три ВШП, причем один из них, включенный последовательно, с малой апертурой, а два, включенных параллельно, – с большой (рис.3а). В режекторном фильтре на ПАВ, наоборот, один ВШП с большой апертурой, включенный параллельно, и два – с малой апертурой, включенные последовательно (рис.3б).

Полосовой импедансный фильтр на ПАВ, собранный по Т-схеме (рис.1д), содержит, как и фильтр,

собранный по П-образной схеме, три ВШП. При этом преобразователей с малой апертурой – два, а с большой – один (рис.4а). Так же как и в Г-, П-образных фильтрах, в этих фильтрах в полосе пропускания импедансы ВШП с большой апертурой велики и не шунтируют генератор и нагрузку. Импедансы ВШП с малой апертурой намного меньше и вносят небольшое затухание при прохождении сигнала от генератора к нагрузке.

Вне полосы пропускания импедансы ВШП с большой апертурой имеют малое значение, а импедансы ВШП с малой апертурой – большое, что обеспечивает шунтирование генератора и нагрузки ВШП с большой апертурой, а также значительное затухание сигнала при его прохождении через ВШП с малой апертурой.

Режекторные импедансные фильтры на ПАВ, собранные по Т-схемам (рис.1г), показаны на рис.4б. Как и в случае Г- и П-образных фильтров, ВШП, включенные последовательно, имеют большую апертуру, а включенные параллельно – малую. ВШП с большой апертурой будет шунтировать генератор и нагрузку, а ВШП с малой апертурой – вносить большое затухание в сигнал при его прохождении от генератора к нагрузке только в полосе режекции.

Устройства на ПАВ, реализующие достижение предельных характеристик аппаратных функций в составе ТКС

Типы ТКС	Аппаратные функции, реализуемые устройствами на ПАВ	Устройства на ПАВ
Радиолокация. Навигационные средства и системы. Сотовая связь. Мобильные телефоны	Вносимое затухание, частотная селекция, рассеиваемая мощность, надежность, габариты, стоимость	Полосовые фильтры, фильтры с емкостным взвешиванием, ЛЗ, ДЛЗ, ФП. Импедансные полосовые фильтры, многоканальные импедансные фильтры для параллельных ФП
Спутниковые, тропосферные и радиорелейные линии связи. Подвижные системы связи	Частотная селекция, БФП, ШПС, ППРЧ, надежность, массогабариты	Полосовые фильтры, фильтры с емкостным взвешиванием, ЛЗ, ДЛЗ, ФП. Импедансные полосовые фильтры, многоканальные импедансные фильтры для параллельных ФП
Автоматизированные средства радиотехнического контроля, РИА	Частотная селекция, БФП, надежность, массогабариты	Полосовые фильтры, фильтры с емкостным взвешиванием, ЛЗ, ДЛЗ, ФП. Импедансные полосовые фильтры, многоканальные фильтры
Спутниковое, цифровое, кабельное ТВ, ТВЧ	Вносимое затухание, частотная селекция, межсимвольная интерференция, рассеиваемая мощность, надежность, габариты, стоимость	Полосовые фильтры для ТВ-приемников, передатчиков, ретрансляторов, СКТ, ТВЧ, спутникового ТВ, мобильного ТВ, фильтры с ЕВ. Импедансные полосовые и режекторные фильтры ТВ, в т.ч. для цифрового ТВ

Примечание. БФП – быстрое Фурье-преобразование; ШПС – шумоподобный сигнал; ППРЧ – псевдослучайный поиск рабочих частот; ЛЗ – линии задержки; ДЛЗ – дисперсионные линии задержки; СКТ – сеть кабельного телевидения; ЕВ – емкостное взвешивание; ТВ – телевидение; ФП – Фурье-процессор; ТВЧ – телевидение высокой четкости и т.д.

Еще одна разновидность LC-фильтров – мостовые фильтры (рис.1ж, з). Соответствующий полосовой мостовой фильтр на ПАВ показан на рис.5а, причем апертуры всех ВШП, в отличие от фильтров, собранных по Г-, П- и Т-схемам, для полосовых

фильтров могут быть близки или даже одинаковы. В этом случае (при близком или равном числе пар электродов) во всех ВШП вдали от f_0 (центральная частота, частота акустического синхронизма), где импеданс преобразователей имеет емкостный

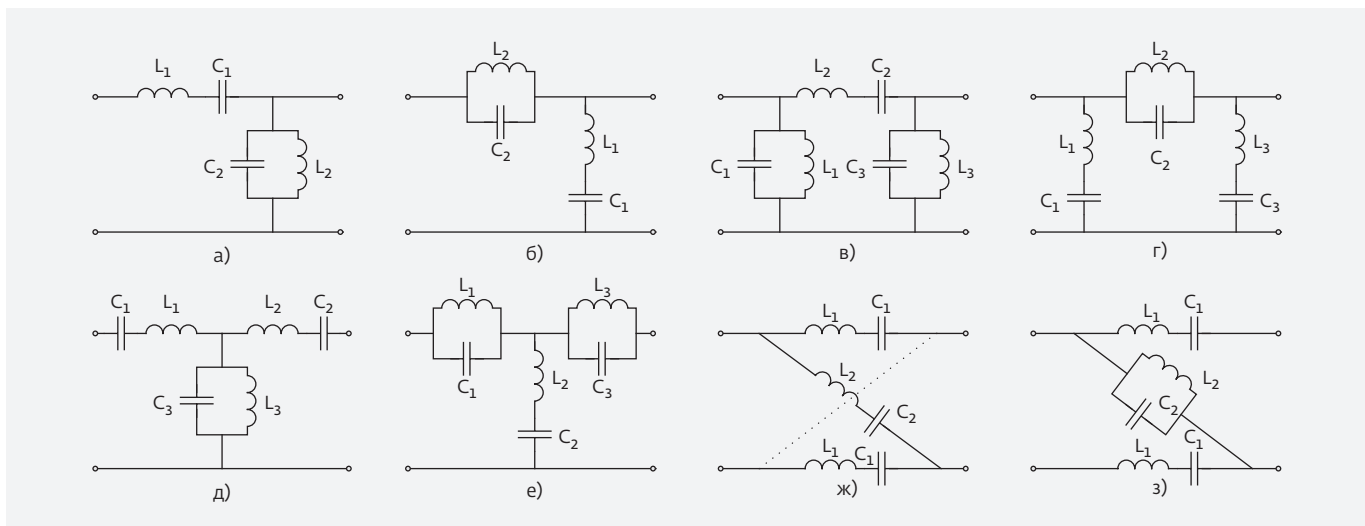


Рис.1. Схемы полосовых и режекторных LC-фильтров: Г-образные (а, б); П-образные (в, г); Т-образные (д, е); мостовые (ж, з)

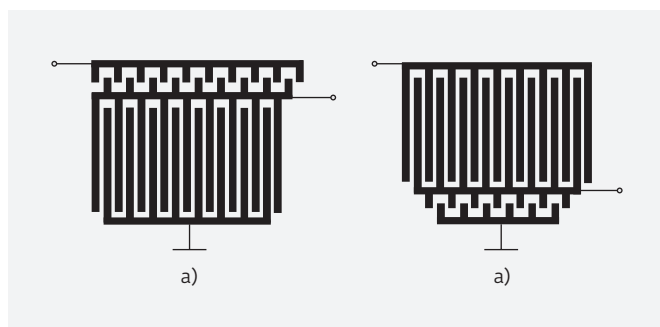


Рис.2. Импедансные ПАВ-фильтры, собранные по Г-схемам: полосовой (а) и режекторный (б)

характер, легко получить баланс моста и, следовательно, большое вносимое затухание.

Схема содержит четыре ВШП, соединенные по мостовой схеме. Частоты акустического синхронизма ВШП1 и ВШП2 выбираются одинаковыми, но отличными от частот акустического синхронизма ВШП3 и ВШП4, которые также одинаковые. Соотношение между периодами ВШП1,

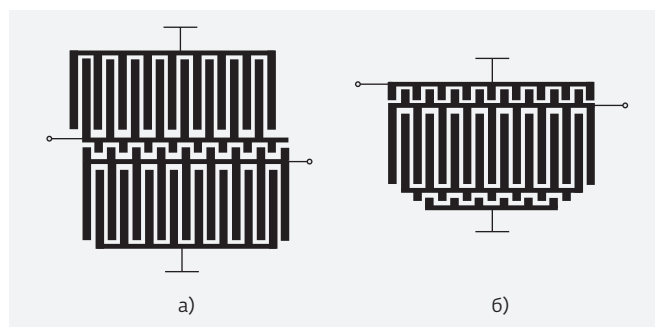


Рис.3. Импедансные ПАВ-фильтры, собранные по П-схемам: полосовой (а) и режекторный (б)

ВШП2 и ВШП3, ВШП4 зависит от полосы пропускания фильтра. В полосе пропускания фильтра импедансы ВШП, находящихся в разных плечах моста (ВШП1, ВШП2 и ВШП3, ВШП4), будут сильно различаться, мост разбалансируется, и потери в фильтрах значительно уменьшатся.

Таким образом, в таких фильтрах, как и в Г-, П- и Т-схемах, используются протяженные ВШП, для

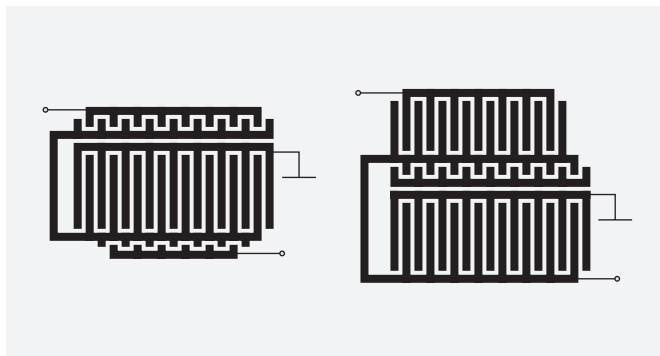


Рис.4. Импедансные ПАВ-фильтры, собранные по Т-схемам: полосовой (а) и режекторный (б)

которых $Nk^2 \gg 1$ (количество электродов N настолько велико, что ПАВ не выходит за пределы ВШП [12]). Для режекторных фильтров (рис.5б) апертуры ВШП1 и ВШП2 должны сильно отличаться от апертур ВШП3 и ВШП4, причем период ВШП с большой апертурой выбирается таким образом, чтобы $Y_{ВШП1,2} = Y_{ВШП3,4}$ ($Y_{ВШП1,2}$ и $Y_{ВШП3,4}$ – проводимости ВШП1,2 и ВШП3,4 соответственно) на частоте режекции. Тогда мост будет разбалансирован на всех частотах, кроме небольшой полосы частот в районе частоты режекции.

Количество ВШП в мостовой схеме можно уменьшить, используя симметричный трансформатор (рис.6а). В этом случае схема импедансного фильтра будет содержать всего два ВШП с вдвое меньшей апертурой (рис.6б).

Импедансные фильтры содержат только эквидистантные ВШП, в которых ширина электродов

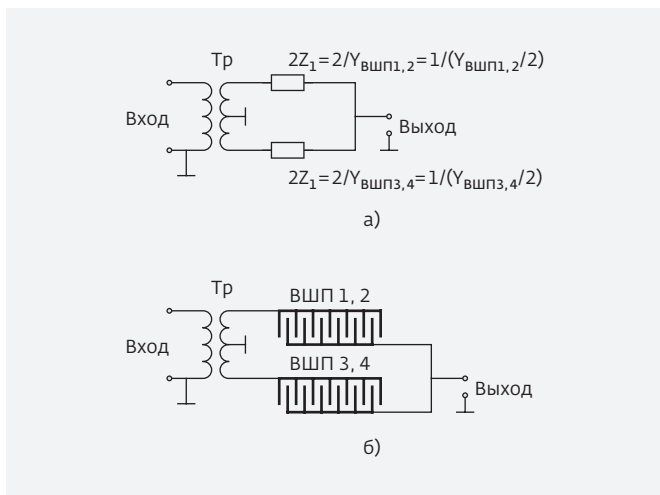


Рис.6. Мостовой фильтр на ПАВ с симметричным трансформатором: дифференциально-мостовая схема (а); импедансный фильтр с трансформатором (б)

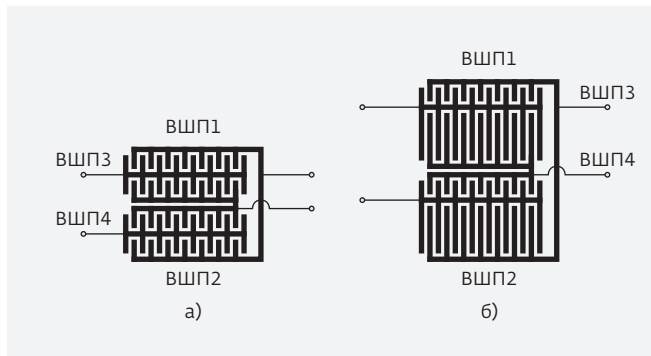


Рис.5. Импедансные фильтры, собранные по мостовой схеме: полосовые (а) и режекторные (б)

и зазоров одинакова и равна четверти периода ВШП. Дополнительные элементы эти фильтры не содержат, в отличие от ПАВ-фильтров с малыми потерями других типов (отражатели, ответвители, фазосдвигающие цепи, ВШП с внутренними отражателями), и, следовательно, являются ПАВ-фильтрами с малыми потерями наиболее простой конструкции. Это позволяет минимизировать размеры пьезоподложки, повысить воспроизводимость электрических параметров, а значит, уменьшить издержки производства таких фильтров, что важно при их серийном выпуске.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСНЫХ ФИЛЬТРОВ

Режекторные импедансные фильтры на ПАВ для закрытия телевизионных каналов. Для предотвращения несанкционированного просмотра телевизионных каналов применяют различные системы закрытия каналов [15]. Наиболее простой и надежной считается система, основанная на подавлении на входе телевизионного приемника помехи, которая содержится в сигнале, передаваемом из телевизионной студии. Помеха представляет собой узкополосный сигнал, промодулированный сигналом звуковой частоты (несущая частота находится достаточно близко от несущей частоты изображения телевизионного сигнала) [12]. Попадая во входные каскады телевизионного приемника, этот сигнал смешивается с основным телевизионным сигналом, что приводит к искажению звукового и видеосигнала и, следовательно, к невозможности просмотра телевизионных программ [12]. Если на вход телевизионного приемника поставить режекторный фильтр [11], который пропускает сигналы всех телевизионных каналов и не пропускает сигнал помехи, то она (помеха) не попадет во входные цепи телевизионного приемника. В этом случае видео- и звуковой сигналы не будут

искажены, и просмотр телевизионной программы станет возможным.

Важно отметить, что частота режекции (а значит, и помехи) не может быть выбрана произвольно в пределах одного телевизионного канала (8 МГц), а должна быть расположена в том месте телевизионного канала, где частотные составляющие сигнала минимальны [12]. В противном случае режекторный фильтр вырежет значительную часть сигнала, что приведет к искажению изображения. И чем ближе к несущей частоте находится полоса режекции, тем сильнее искажается изображение.

Как показали измерения, искажения изображения становятся малозаметными, если режекция происходит на частотах, смещенных в диапазон больших частот на 2,8–3 МГц от несущей частоты изображения. В этом случае изображение очень слабо искажается при просмотре видеоматериалов (полоса сигнала 2 МГц), незначительно ухудшается его четкость при передаче полного телевизионного сигнала (6 МГц). Чтобы влияние помехи не сказывалось на изображении, режекция должна быть не менее 30 дБ. Таким образом, режекторный фильтр должен обеспечить одновременно режекцию не менее 30 дБ на частоте, отстоящей на 2,8–3 МГц от несущей частоты изображения, и потери на

несущей частоте – не более 3 дБ, что практически не ухудшит качество приема изображения.

Из-за колебаний температуры в помещении (10–15°C) режекторный фильтр должен быть либо температурно-стабильным, либо обеспечивать такую полосу режекции, при которой частота помехи не выходила бы за ее пределы.

Первую возможность трудно реализовать из-за малой величины коэффициента электромеханической связи термостабильного ST-среза кварца, используемого для этих целей в ПАВ-устройствах. Действительно, для выполнения условия $4k^2N/\pi^2 \gg 1$ для кварцевой подложки число пар электродов должно достигать 1000 и более. Для уменьшения количества электродов можно использовать дополнительные LC-цепи [9]. Однако это усложняет конструкцию фильтра и повышает его стоимость при серийном производстве [12].

Вторая возможность, очевидно, может быть реализована на подложках с высоким значением квадрата коэффициента электромеханической связи. Так, для подложек из YX/128°-среза ниобата лития условие $4k^2N/\pi^2 \gg 1$ легко выполняется при $N=200-250$, и режекцию не менее 30 дБ можно получить, используя лишь одно T-звено в конструкции импедансного фильтра, что вполне приемлемо.

В то же время температурный коэффициент данного среза ниобата лития равен $80 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Поскольку температура в помещении, как правило, находится в пределах 15–30°C, то относительный температурный уход частоты режекции равен $1,2 \cdot 10^{-3}$. Например, на восьмом телевизионном канале частота помехи должна равняться 198,25 МГц. Тогда при изменении температуры от 15°C до 30°C частота режекции сдвинется примерно на 200 кГц, то есть полоса режекции должна превышать 200 кГц.

Скорость ПАВ в подложках ниобата лития YX/128°-среза находится в пределах от 3960 до 4000 м/с на свободной поверхности. Тогда при $k^2=0,058$ скорость ПАВ под ВШП $V_{ПАВ}$ будет равна 3924 м/с при $V_{ПАВ}=3980$ м/с, период ВШП с малой апертурой будет равен $3924/196,25=19,99$ мкм. Апертуры ВШП будут равны 40 и 400 мкм соответственно, а период ВШП с большой апертурой составит $19,99(1+4 \cdot 0,058/3,14^2)=21,47$ мкм [12]. Для ниобата лития емкость одноволновой секции ВШП $C_s=450$ пФ/м. Как показывают расчеты [12], при использовании Т-звена удается получить режекцию более 30 дБ в полосе режекции, при числе пар электродов в ВШП с большой апертурой $N_1=250$ и числе пар в ВШП с малой апертурой $N_2=200$.

При небольшом изменении числа электродов ВШП также должна немного сдвинуться частота антирезонанса [12]. Это обстоятельство использовалось для подстройки режекторных фильтров путем подрезки электродов ВШП, так как при их массовом производстве вследствие различных технологических погрешностей (разрывов электродов ВШП, разброса скоростей ПАВ под ВШП, разброса скоростей ПАВ на поверхности диска) сдвигается частота режекции.

Фильтры изготавливались групповым методом на диске ниобата лития YX/128°-среза. После резки диска на отдельные фильтры они помещались в корпуса, представляющие собой металлическую трубку, внутри которой на пластмассовом основании прикрепляется подложка (рис.7).

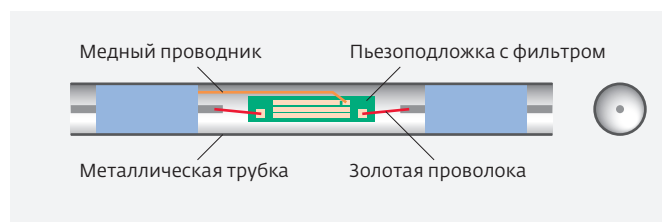


Рис.7. Режекторный импедансный фильтр в корпусе антенного разъема [12]

На концах трубки сформированы разъемы, с помощью которых корпусированный фильтр вставляется в антенный разъем телевизора, а в него, в свою очередь, вставляется антенна. Чтобы ВШП с малой апертурой был соединен с корпусом (трубкой) в пластмассовом корпусе, в пластмассовом основании предусмотрен специальный медный проводник (см. рис.7), который выводится наружу из трубки и приваривается к ней точечной сваркой. На высоких частотах индуктивность этого проводника оказывается достаточной, чтобы сместить частоту режекции, как показывают расчеты, более чем на 200 кГц в сторону меньших частот. Для компенсации этого сдвига периоды ВШП изменяют таким образом, чтобы частота режекции увеличилась на 200 кГц.

Измеренная частотная зависимость вносимых потерь режекторного фильтра восьмого телевизионного канала в диапазоне восьмого канала показана на рис.8. Как видно, потери фильтра на частоте, несущей изображения, не более 2 дБ, на частоте, отстоящей на 2 МГц от несущей, – не превышают 4 дБ. Таким образом, фильтр обеспечивает режекцию выше 30 дБ в полосе более 200 кГц. Вносимое затухание фильтра на остальных телевизионных каналах не превышает 3,5 дБ. Все ВШП имеют одинаковую ширину электродов и зазоров, равную четверти длины ПАВ на частоте акустического синхронизма ВШП. В ООО "БУТИС" и ООО "Пьезотрон" был налажен серийный выпуск режекторных фильтров на 1, 2, 3, 4, 7 и 8-й телевизионные каналы, а также система закрытия телевизионных каналов к ним. Было изготовлено более 700 тыс. режекторных фильтров.

Телевизионные каналные фильтры для систем вещательного телевидения. Телевизионные каналные фильтры предназначены для выделения

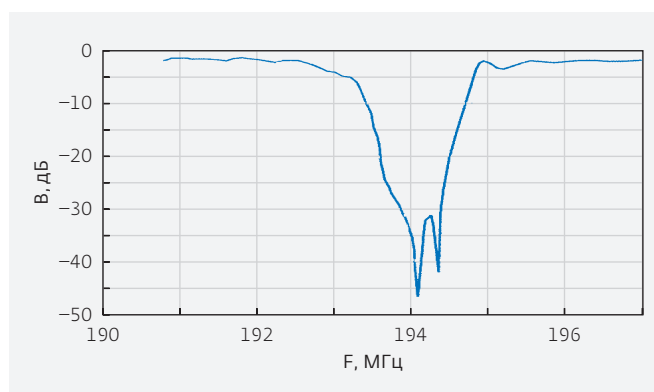


Рис.8. Частотная зависимость вносимого затухания режекторного фильтра на 8-й телевизионный канал

сигнала одного телевизионного канала и подавления сигналов остальных каналов [17]. Исходя из этого задаются их характеристики: полоса пропускания 8 МГц, потери в полосе пропускания не более 3,5 дБ, неравномерность АЧХ в полосе пропускания не более 1 дБ, подавление на несущей частоте изображения соседних не смежных каналов не менее 20 дБ, подавление вдали от полосы пропускания не менее 40 дБ. Номенклатура набора канальных фильтров зависит от каналов, на которых осуществляется вещание в данной местности. Особое внимание при проектировании и производстве телевизионных канальных фильтров уделяется обеспечению малой неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания. К сожалению, в применяемых типах фильтров на ПАВ трудно совместить малые потери в полосе пропускания и малую неравномерность АЧХ. Но в импедансных фильтрах, основанных на изменении импедансов ВШП с частотой, легко получить малые вносимые потери, необходимое внеполосное подавление и малую неравномерность в полосе пропускания.

Как пример рассмотрим канальный фильтр, построенный по дифференциально-мостовой схеме (рис.9). Такая схема позволяет вдвое сократить количество ВШП (по сравнению с мостовой схемой) при наличии симметричного трансформатора. В качестве пьезоподложки был выбран УХ/128°-срез ниобата лития, для уменьшения неравномерности в полосе пропускания использовались ВШП, аподизованные по функции Хемминга с пьедесталом 0,1. Для увеличения крутизны фронтов АЧХ применялись расширительные индуктивности [9, 12]. Последнее позволило расширить полосу пропускания до требуемой величины 8 МГц и обеспечить необходимую крутизну фронтов АЧХ. Расчетное вносимое затухание было не более 2 дБ. Один из ВШП рассчитывался на частоту $f_{01}=118$ МГц, а второй на частоту $f_{02}=126$ МГц. Первый ВШП имел апертуру 80 мкм, период, равный 32,95 мкм, и число пар электродов $N1=250$, а второй ВШП – ту же апертуру и то же число электродов, что и первый ВШП,

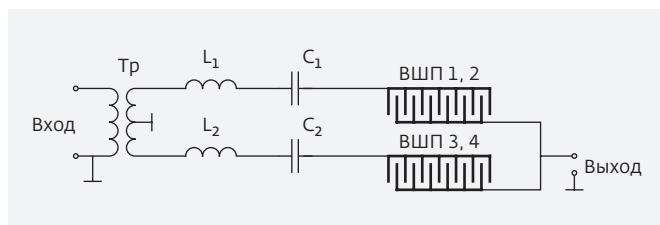


Рис.9. Схема канального фильтра на 2-й спецканал

но его период равнялся 30,86 мкм. Емкости составляют $C_1=C_2=9$ пФ, индуктивности – $L_1=L_2=20$ мкГн. Подложка с нанесенным на нее ВШП помещалась в герметичный корпус, который, в свою очередь, помещался в другой корпус с 75-омными разъемами для подсоединения кабелей. Измеренная и расчетная частотная зависимость вносимых потерь канального фильтра показана на рис.10. Вносимые потери фильтра равны 3 дБ.

Аналогично рассчитывались фильтры на другие телевизионные каналы. При этом емкости и индуктивности подбирались таким образом, чтобы при необходимой крутизне фронтов АЧХ обеспечивалась бы и необходимая относительная полоса (вместе с расширительными индуктивностями). Такие канальные фильтры и усилители на их основе (крупносерийный выпуск) применяются для кабельного ТВ [16–20].

Другие применения импедансных фильтров. Хорошо известно, что ПАВ-устройства широко используются в автогенераторах в качестве частотно задающих стабилизирующих элементов, узкополосных и сверхузкополосных фильтров, широкополосных фильтров в составе телекоммуникационных систем (ТКС), дисперсионных линий задержки для быстрого Фурье-преобразования (БФП) и псевдослучайного поиска рабочих частот (ППРЧ). Импедансные фильтры также можно успешно использовать в автогенераторах [12, 21], в оконечных каскадах приема-передающих устройств ТКС, в том числе для сотовых систем связи [12, 22], узкополосных и сверхузкополосных фильтров, широкополосной фильтрации [12, 23], в многоканальных фильтрах для параллельных Фурье-преобразователей (ФП) и других устройствах, узлах и блоках различной ТКС (см. таблицу).

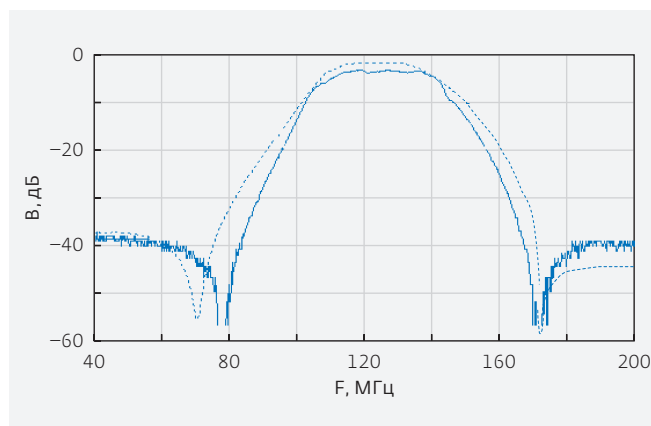


Рис.10. АЧХ канального ТВ-фильтра на 2-й спецканал, пунктир – расчет, сплошная – эксперимент

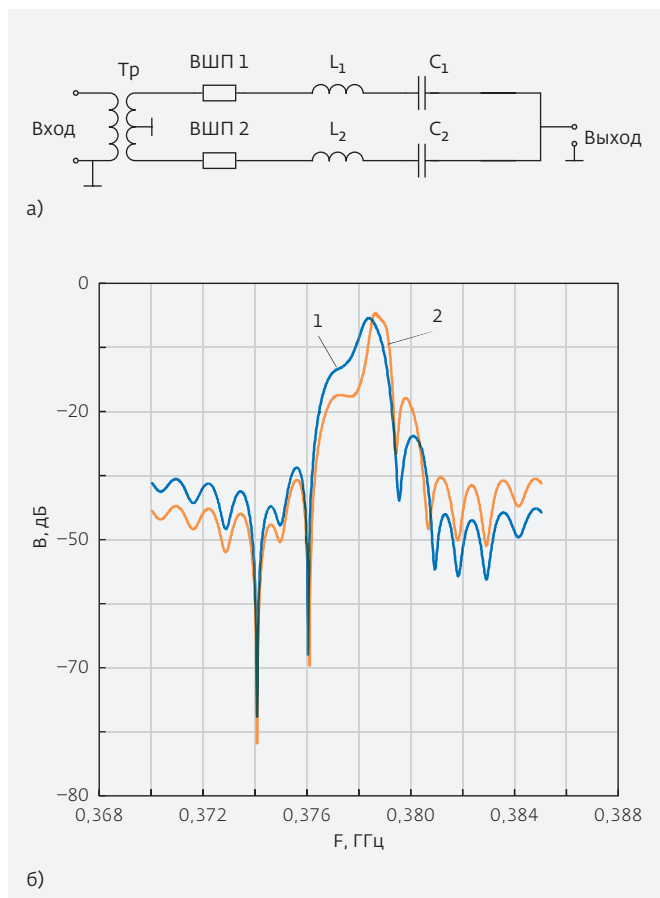


Рис.11. Сверхзаклопосный дифференциально-мостовой фильтр. Схема с подстроечными элементами (а) и зависимость АЧХ от внешних цепей (б): без подстроечных элементов (кривая 1), с подстроечными элементами (кривая 2)

При этом можно реализовать предельные характеристики таких аппаратных функций в составе ТКС, как вносимое затухание, частотная селекция, ШПС, ППРЧ, БФП, рассеиваемая мощность, межсимвольная интерференция, неравномерность ГВЗ, надежность, габариты, стоимость, добиться, например, существенного уменьшения вносимого затухания (по крайней мере, на 1-2 порядка) и массогабаритных характеристик (примерно вдвое). Покажем это на примере автогенератора.

Действительно, линия задержки на ПАВ на подложке ST-среза кварца с относительной полосой пропускания 0,1% при $f_0 = 380$ МГц имеет размеры подложки 10 мм (с учетом акустических поглотителей на ее торцах), в то время как импедансный мостовой фильтр с симметричным трансформатором может быть выполнен на кварцевой подложке ST-среза длиной всего 3 мм [21]. Кроме того, не требуется места для акустических поглотителей,

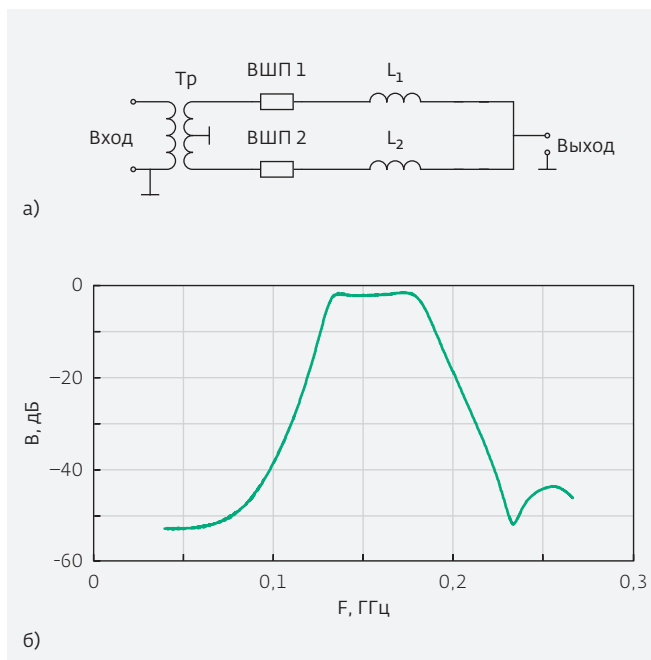


Рис.12. Широкополосный фильтр: дифференциально-мостовая схема (а) и частотная зависимость вносимых потерь (б)

так как в данном фильтре нет режима бегущих волн [12].

Для изготовления автогенератора в качестве частотно задающего стабилизирующего элемента был разработан сверхзаклопосный импедансный фильтр (рис.11а). Такая схема позволяет с помощью внешних индуктивностей и емкостей производить подстройку в пределах полосы пропускания. Например, удастся сдвинуть частоту вверх на полполосы пропускания (рис.11б, кривая 2).

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) данного фильтра подобна ФЧХ LC-фильтра, то есть проходит через ноль (удовлетворяет балансу фаз) лишь один раз в пределах основного лепестка АЧХ. Поэтому генератор с импедансным фильтром будет работать только на одной частоте, если коэффициент усиления усилителя не превысит величины подавления боковых лепестков АЧХ.

Применение расширительных индуктивностей позволяет с помощью мостовой схемы получать широкополосные фильтры [12]. На рис.12а, б показаны схема и АЧХ данного фильтра. Фильтр имеет центральную частоту 160 МГц и полосу пропускания 50 МГц, то есть относительную полосу пропускания 31,25%, при вносимых потерях 3 дБ и неравномерности в полосе пропускания не более 1 дБ.

Использование подложек, в которых возбуждаются приповерхностные волны, позволяет

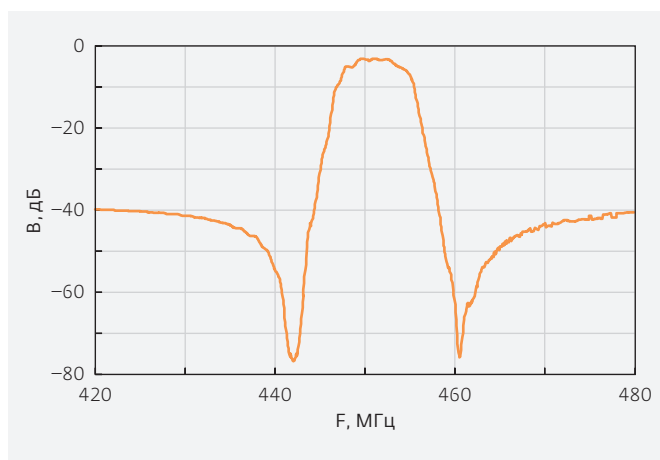


Рис.13. Частотная зависимость вносимых потерь фильтра на танталате лития YX/42°-среза

получать АЧХ с малой неравномерностью в полосе пропускания из-за того, что нули активной и реактивной составляющих проводимости излучения "заплывают". На рис.13 показана АЧХ фильтра на ПАВ, выполненного на подложке из танталата лития YX/42°-среза ($k^2=0,064$). Фильтр состоит из двух одинаковых последовательно соединенных Г-схем. ВШП с малой апертурой имеет апертуру, равную 10 мкм, и число пар электродов, равное 250, а ВШП с большой апертурой имеет апертуру, равную 260 мкм, и 250 пар электродов.

Размеры подложки 2,4×4,4 мм. Центральная частота фильтра равна 451 МГц, полоса пропускания – 5 МГц, неравномерность в полосе пропускания не более 2 дБ при вносимых потерях на центральной частоте – 3,5 дБ. Фильтр расположен в SMD-корпусе для поверхностного монтажа и рассчитан для работы в 50-омном тракте. Все ВШП имеют одинаковую ширину электродов и зазоров, равную четверти длины ПАВ на частоте акустического синхронизма ВШП.

Таким образом, разработаны оригинальные конструкции и опытные образцы импедансных устройств на ПАВ [10–26] в составе современных ТКС. При этом использовались разработанные ранее технологии [27–29], в том числе многослойная технология монтажа кристаллов устройств на ПАВ в керамике LTCC [29], на специальном технологическом оборудовании [30], расширяющие и дополняющие возможности в части достижения предельных аппаратных характеристик ТКС. Разработанные методы используются в учебном процессе [31].

В заключение следует отметить, что ВШП с малой апертурой подобен последовательному LC-контур, но с мнимыми индуктивностью и емкостью, а ВШП

с большой апертурой – параллельному LC-контур. На основе Г-, Т-, П- и мостовых схем были сформированы режекторные фильтры для системы закрытия телевизионных каналов метрового диапазона и полосовые каналные фильтры для системы кабельного телевидения метрового диапазона. Разработаны широкополосные (более 20%) импедансные фильтры с применением расширительных индуктивностей, а на основе подложек, в которых возбуждаются поверхностные волны, изготовлены импедансные фильтры СВЧ-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуляев Ю.В., Багдасарян А.С.** Акустоэлектронные аппаратно-образующие устройства систем связи. – Сборник трудов международной научно-технической конференции "Информационные технологии и моделирование приборов и техпроцессов в целях обеспечения качества и надежности". – М.: МГУПИ, 2006, т. I, с. 3–5, ISBN 5-8068-0344-9.
2. **Гуляев Ю.В., Багдасарян А.С.** Фильтры на ПАВ. Состояние и перспективы развития. – Радиотехника, 2003, № 8, с. 15.
3. **Bagdasaryan A.S., Bagdasaryan S.A., Dneprovski V.G., Karapetyan G.Y.** To Issue of Surface Acoustic Wave Piezoelectric Devices Development 180 с. // Piezoelectric and Related Materials: Research and Applications. – New York: Nova Science Publishers Inc., 2012.
4. **Багдасарян А.С., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Багдасарян С.А., Сеницына Т.В., Бутенко В.В., Машинин О.В., Прапорщикова В.В.** Узкополосные фильтры на поверхностных акустических волнах в системах радиочастотной идентификации. – Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, № 7, с. 887–896.
5. **Багдасарян А.С., Сеницына Т.В.** Селективные акустоэлектронные приборы на основе однонаправленных структур поверхностных акустических волн. – М.: Издательство "Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова", 2004, 104 с. ISBN 5-7781-0033-7.
6. **Кукк К.И., Багдасарян А.С., Зайцев В.Е., Злотникова Е.А., Локшин М.Г., Неретина С.П., Сабитов Р.А., Самойлов А.И., Севастьянов Д.И., Сергеев В.И., Таубе Л.М., Хазарчиев Ю.Д., Хлебников В.И., Шестаков С.П.** Разработка и внедрение научных, технических и организационных решений построения государственной телевизионной сети нового поколения. – Наука и технологии в промышленности, 2005, № 2, с. 31–35.
7. **Sinitsyna T.V., Praporchtshikov V.V., Bagdasarian A.S.** Saw resonator filters for communications systems. В сборнике: 4th International Crimean Conference 2004: Microwave

- and Telecommunication Technology. – Conference Proceedings, CriMiCo'04 sponsors: Sevastopol National Technical University, Ukraine, FSUE, SCRRTI, Moscow, Russia, Interface-MFG Co. Moscow, Russia, OJS SPE, Staurn, Kiev, Ukraine, NTUU KPI, SRI of Telecommunications, Kiev, Ukraine. Sevastopol, 2004.
8. **Бутенко В.В., Багдасарян А.С.** Радиочастотные идентификационные метки на поверхностных акустических волнах и системы на их основе. Патентный обзор. – Труды Научно-исследовательского института радио, 2014, № 3, с. 2–11.
 9. **Бессонов Л.А.** Линейные электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1974, 523 с.
 10. Заявка на изобретение № 5066042/22/039877 от 24.08.92. Положительное решение № 139 от 27.07.1993. Устройство на поверхностных акустических волнах / Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я., Кондратьев С.Н.
 11. Заявка на изобретение № 5066037/22/039878 от 24.08.1992. Положительное решение № 140 от 27.07.1993. Режекторный фильтр на поверхностных акустических волнах / Багдасарян А.С., Кондратьев С.Н., Семенов В.В.
 12. **Багдасарян А.С. Карапетьян Г.Я.** Импедансные фильтры на поверхностных акустических волнах. – М.: МПО, 1998, 79 с.
 13. Патент РФ 2242838, 20.12.2004. Фильтр на поверхностных акустических волнах / Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я., Машинин О.В., Семенов В.В. – Оpubл. в бюл. № 35, 2004.
 14. Патент РФ 2195071, 20.12.2002. Режекторный фильтр на поверхностных акустических волнах / Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я., Кондратьев С.Н., Семенов В.В. – Оpubл. в бюл. № 35, 2002.
 15. **Cook A.M., Farmer J.O., West L.E.** A new option in Subscriber Control. – Communications engineering and design, August, 1987, p. 35–49.
 16. **Карапетьян Г.Я., Багдасарян С.А., Машинин О.В.** Импедансные ПАВ-фильтры в системах телевидения коллективного пользования. – Труды конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Саратов, 2003, с. 67–69.
 17. **Машинин О., Багдасарян А., Львов В., Прапорщиков В., Сеницына Т., Багдасарян С.** Модульные канальные эквалайзеры на ПАВ-фильтрах. – Электроника: Наука, технология, бизнес, 2008, № 2, с. 74–81.
 18. Патент РФ на полезную модель № 120533 RUS, 20.09.2012. Головная станция / Багдасарян А.С., Сигов А.С.
 19. **Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я.** Импедансные ПАВ-фильтры для спутникового телевидения и телевидения высокой четкости. – Электросвязь, 1998, № 6, с. 21–22.
 20. **Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я.** Импедансные ПАВ-фильтры для спутникового ТВ и ТВЧ. – Труды 43-й научной сессии, посвященной дню Радио. – М., 1998, с. 17.
 21. **Карапетьян Г.Я., Багдасарян С.А.** Двухзвенные импедансные мостовые ПАВ-фильтры повышенной надежности. – Труды конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". – Саратов, 2003, с. 70–72.
 22. **Багдасарян А.С. Карапетьян Г.Я.** Импедансные ПАВ-фильтры для сотовых систем связи. – Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, вып.1, 1999, с. 59–62.
 23. **Багдасарян А.С. Карапетьян Г.Я.** Широкополосный импедансный фильтр. – Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, вып.1, 1998, с. 34–37.
 24. **Багдасарян А.С. Карапетьян Г.Я.** Использование импедансных ПАВ-фильтров в широкополосных Фурье-процессорах. – Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, вып.1, 1999, с. 56–58.
 25. **Багдасарян А.С., Машинин О.В., Сеницына Т.В.** ПАВ-фильтры с малыми потерями на основе U-образного ответвителя. – Электросвязь, 2004, № 2, с. 32–33.
 26. **Гуляев Ю.В., Багдасарян А.С., Сеницына Т.В., Машинин О.В., Прапорщиков В.В., Орлов М.М., Егоров Р.В.** ПАВ-фильтры во входных каскадах приемо-передающих устройств. – Наука и технологии в промышленности, 2006, № 4, с. 82–88.
 27. **Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Житковский В.Д., Багдасарян А.С.** Наноструктурные углеродные материалы в тонкопленочной технологии. – Инженерная физика, 2004, № 1, 33 с.
 28. **Багдасарян А., Багдасарян С., Бутенко В., Карапетьян Г.** Радиочастотные метки на ПАВ: особенности конструкции и технологии. – Электроника: Наука, технология, бизнес, 2012, № 7, с. 76–82.
 29. **Бутенко В.В., Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Карапетьян Г.Я., Николаева С.О.** Акустоэлектронные идентификационные метки в керамике LTCC. – Труды Научно-исследовательского института радио, 2013, № 1, с. 16–23.
 30. **Белянин А.Ф., Гуляев Ю.В., Самойлович М.И., Багдасарян А.С.** Оборудование для формирования пленок алмаза и алмазоподобных материалов для акустоэлектроники. – Наука и технологии в промышленности, 2006, № 4, с. 19.
 31. **Багдасарян А.С., Львович Г.А., Кашенко Г.А., Кузванов А.Л., Николаев О.В.** Автоматизация проектирования акустоэлектронных устройств обработки и защиты информации. Учебное пособие. – Воронеж: Изд-во Воронежского государственного технического университета, 2007, 230 с.