

ФИЛЬТРЫ НА ПАВ. КРАТКИЙ ОБЗОР И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

В статье анализируются различные конструкции фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Фильтры на ПАВ разделены на группы однотипных по конструктивному исполнению и материалу звукопровода устройств, обеспечивающих оптимальную совокупность параметров в определенном диапазоне частот и полос пропускания. Описываются такие конструкции, как трансверсальные фильтры, веерные фильтры, сверхузкополосные резонаторные фильтры, резонаторные фильтры с продольной акустической связью и балансные фильтры на ПАВ.

Интенсивное применение радиоэлектронных систем и устройств как в быту, так и в технике специального назначения делает все более актуальной задачу оптимизации взаимного распределения и функционирования различных приборов и систем в ограниченных диапазонах

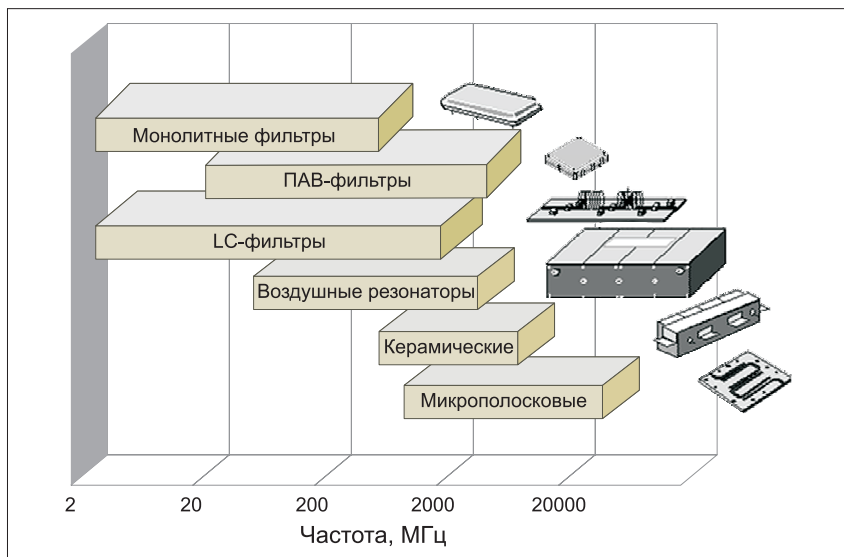
выделенного радиочастотного спектра. При этом основными требованиями к таким системам связи являются высокое быстродействие, отсутствие искажений при обработке входного сигнала, малая энергоемкость, которые в значительной степени определяются параметрами

используемых полосно-пропускающих радиочастотных фильтров. Обеспечение высокой избирательности, малого вносимого затухания и возможности обработки сигналов с высокой входной мощностью позволит улучшить такие эксплуатационные параметры современной аппаратуры связи, радиолокации и телекоммуникации, как помехозащищенность, дальность и точность действия, стабильность.

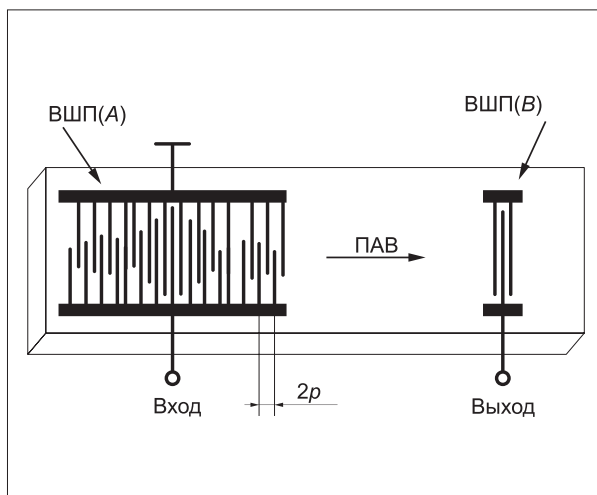
В зависимости от принципа действия в радиоэлектронике распространены различные типы частотно-селективных устройств, которые работают в различных частотных диапазонах (рис. 1).

ТРАНСВЕРСАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПАВ

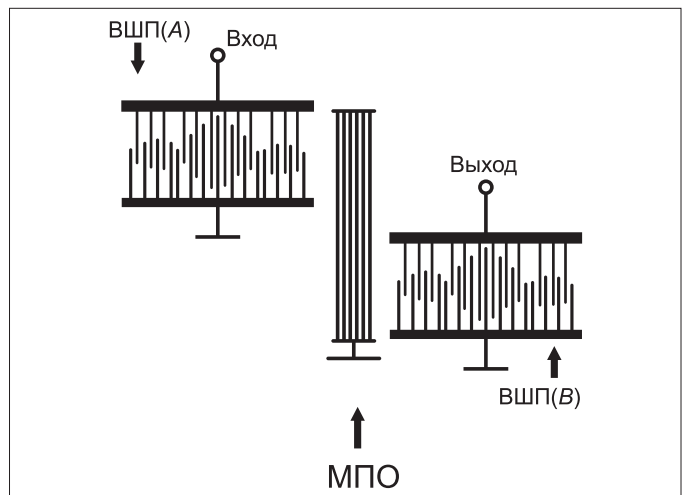
До 1990-х годов основным принципом построения приборов на ПАВ было использование трансверсальных конструкций, обеспечивающих уровень вносимого затухания порядка 15–25 дБ, что ограничивало область их применения трактами промежуточной частоты (ПЧ). Тем не менее в технике средств связи такие устройства широко применяются



▲ Рис. 1. Типы частотно-селективных устройств по частотным диапазонам



▲ Рис. 2. Структура одноканального трансверсального фильтра



▲ Рис. 3. Структура трансверсального фильтра на основе МПО

и сегодня благодаря возможности сложной частотно-селективной обработки сигналов [1].

С конструктивной точки зрения трансверсальные фильтры делятся на одноканальные (рис. 2) и двухканальные с использованием многополоскового ответвителя (МПО) (рис. 3).

Первый тип конструкции предназначен для разработки узкополосных термостабильных фильтров на основе пьезоподложек кварца и лангсита, либо в случаях, когда требуется обеспечить малые габаритные размеры устройства. Фильтр содержит два встречно-штыревых преобразователя (ВШП), определяющих его частотные характеристики [2], и электромагнитный экран в виде заземленной металлизированной полосы между ВШП. Как правило, один из ВШП реализован с амплитудной аподизацией электродов [3], а второй выполнен неаподизованным, то есть длина электродов равна апертуре фильтра.

Импульсная характеристика фильтра определяется как функция свертки импульсного отклика отдельных преобразователей, а его частотная характеристика $H_{\phi}(\omega)$ вычисляется как произведение: $H_{\phi}(\omega) = H_1(\omega) \times H_2(\omega)$, где $H_1(\omega)$ и $H_2(\omega)$ — частотные характеристики входного и выходного ВШП. Таким образом, оба ВШП в равной степени участвуют в синтезе требуемой характеристики фильтра. Однако в силу ограничений на второй ВШП возможности формирования его характеристики при постоянной длине его электродов значительно меньше, чем для аподизованного ВШП. Поэтому в качестве выходного ВШП, как правило, используется или неаподизованный ВШП, или преобразователь, взвешенный удалением электродов (ПВУЭ). Поскольку точность воспроизведения частотной характеристики ПВУЭ зависит от степени дискре-

тизации, такие структуры применяются в первую очередь при разработке узкополосных и среднечастотных фильтров, в которых для реализации требуемой частотной характеристики нужны преобразователи с достаточно большим количеством электродов в основном лепестке функции $\text{sinc}(t)$. Пример расчета одноканального фильтра с использованием ПВУЭ показан на рис. 4.

Второй тип конструкции применяется для реализации широкополосных фильтров на основе пьезоэлектриков с большим коэффициентом электромеханической связи, таких как ниобат лития. Основным отличием данной конструкции является наличие многополоскового ответвителя между входным и выходным ВШП.

В технике ПАВ МПО используются достаточно широко [4]. Это связано, во-первых, с возможностью передачи энергии ПАВ из канала в канал. При этом излучение ПАВ во втором канале однородно в пределах апертуры выходного ВШП, то есть энергия падающей на МПО ПАВ распределяется по всей ширине канала независимо от ширины падающего пучка ПАВ. Это позволяет использовать универсальность, которую дает аподизация двух преобразователей, и существенно уменьшает искажения частотной характеристики, обусловленные объемными волнами, распространяющимися преимущественно в пределах канала генерации ПАВ. Кроме того, применение МПО обеспечивает дополнительную фильтрацию, поскольку частотная характеристика фильтра определяется как характеристиками ВШП, так и МПО:

$$H_{\phi}(\omega) = H_1(\omega) \times H_2(\omega) \times H_{\text{мп}}(\omega).$$

В составе трансверсальных фильтров обычно используется простейший вариант конструкции МПО, представля-

ющий собой периодическую систему проводящих электродов, связывающих два параллельных акустических канала. Передача энергии от первого канала ко второму является циклической функцией, зависящей от длины МПО, — другими словами, существует некоторая длина ответвителя L_T , при которой амплитуда волны во втором канале достигает максимума. В первом приближении:

$$L_T = \lambda \times (v/2\Delta v) \sim \lambda/k^2,$$

где Δv — разность скоростей ПАВ для свободной и металлизированной поверхностей.

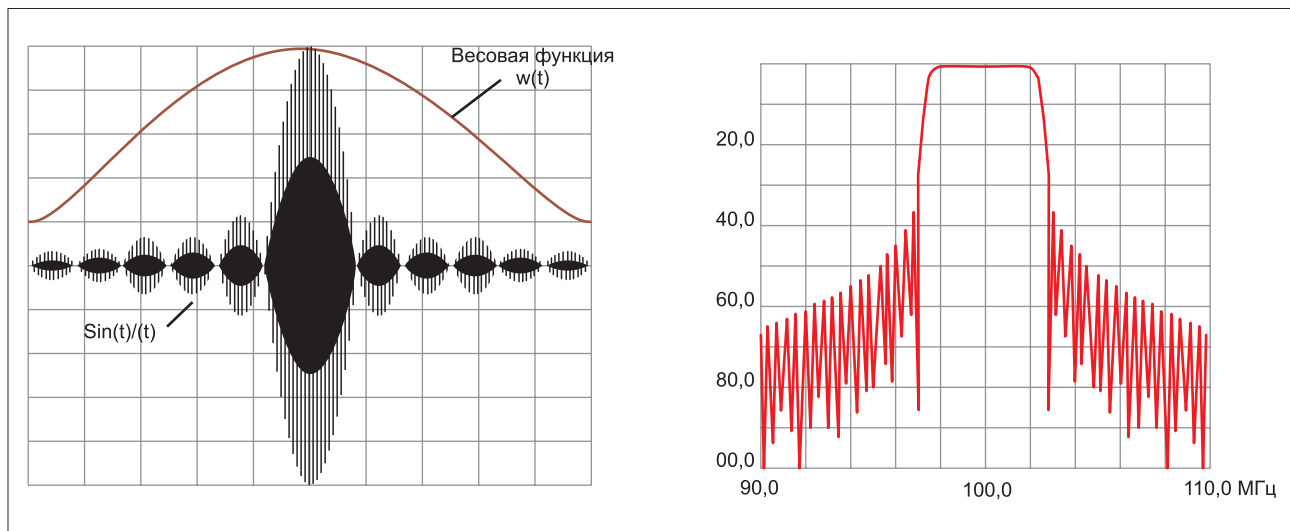
Что касается количества полос МПО, оно зависит от частоты синхронизма, на которой достигается максимальное отражение ПАВ. Обычно эта частота составляет 1,3–1,6 от центральной частоты фильтра. Например, для 128°YX-l -среза ниобата лития оптимальное число полос, обеспечивающее полную перекачку энергии из канала в канал, составляет 80–100.

Данный тип конструкции позволяет реализовать среднечастотные и широкополосные фильтры с предельной избирательностью, обеспечивая коэффициент прямоуглоуности (K_p) амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) по уровням 40/3 дБ порядка 1,1 и гарантированное затухание в полосах заграждения до 60 дБ.

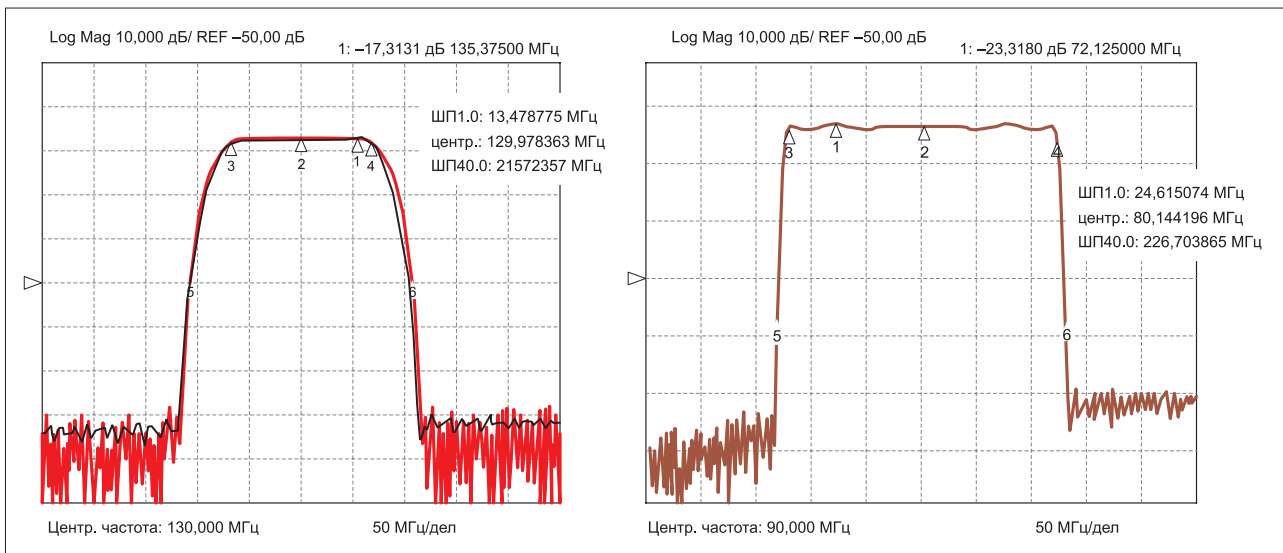
На рис. 5 приведены экспериментальные характеристики фильтра с МПО: на 112-танталате лития ($\Delta F/F = 10\%$) $K_p = 1,6$ и двухканального фильтра на номинальную частоту 80 МГц ($\Delta F/F = 30\%$) $K_p = 1,07$.

ВЕРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

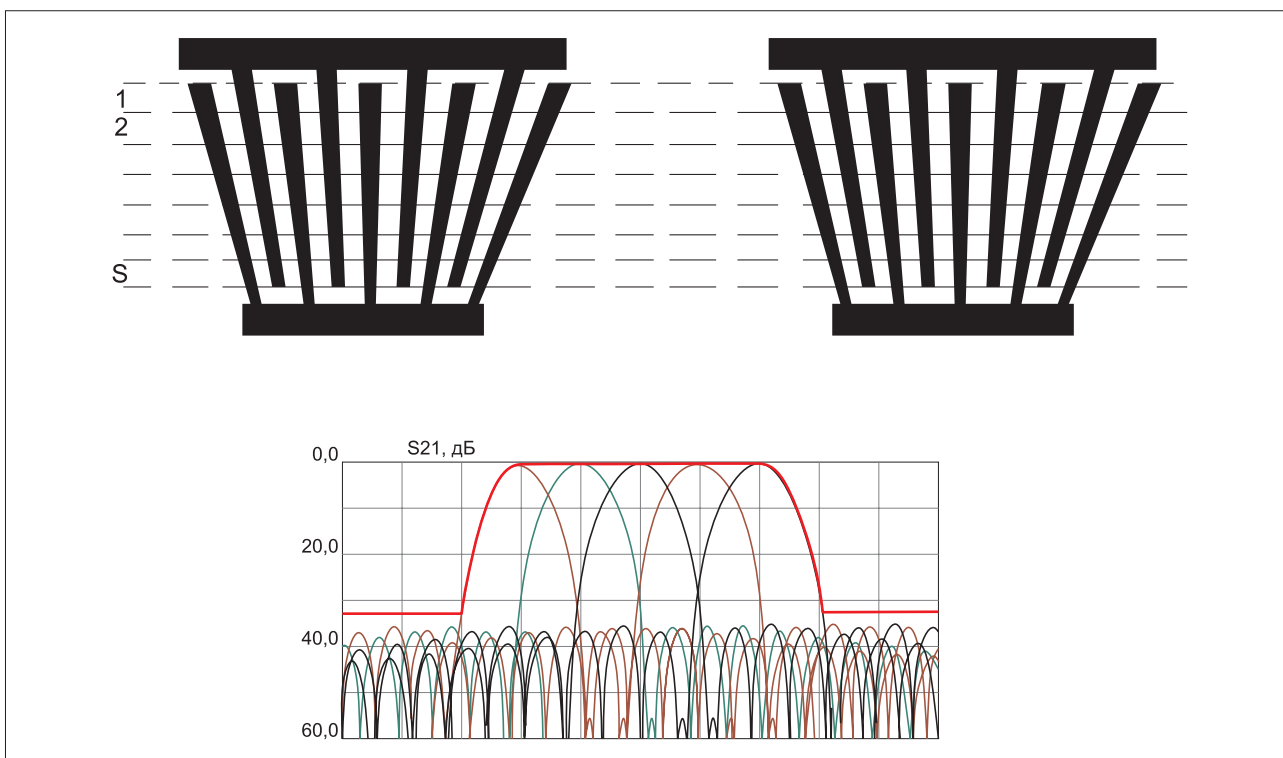
Одним из наиболее перспективных типов конструкций для создания широкополосных и сверхширокополосных



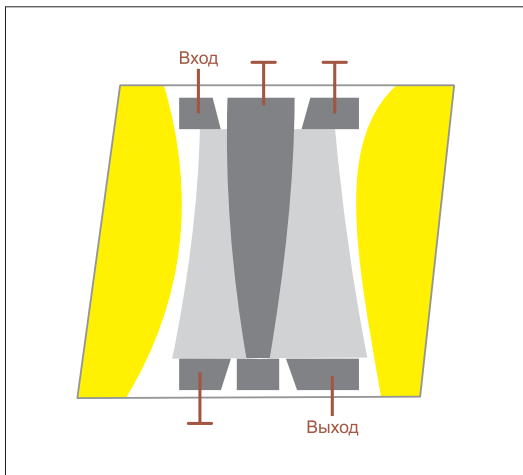
▲ Рис. 4. Расчет трансверсального фильтра с применением ПВУЭ



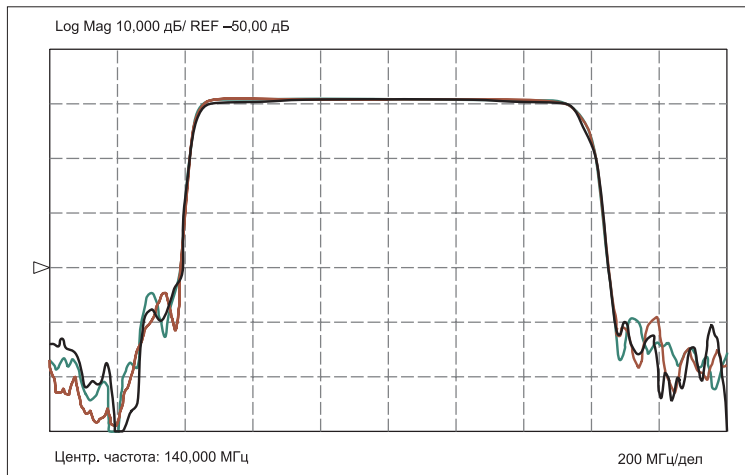
▲ Рис. 5. Типовые характеристики трансверсальных фильтров



▲ Рис. 6. Структурная схема и принцип действия веерного фильтра



▲ Рис. 7. Структура трехсекционного веерного фильтра



▲ Рис. 8. Типовая характеристика сверхширокополосного веерного фильтра

фильтров является веерная конструкция [5]. Структурная схема и принцип действия веерного фильтра показаны на рис. 6.

Преобразователи в данном фильтре выполняются с переменным шагом по апертуре таким образом, что генерация и прием волн с близкими частотами осуществляется в пределах акустического канала, в котором период ВШП соответствует длине волны ПАВ, распространяющейся в этом канале. Распределение акустических волн по различным пространственным каналам позволяет передавать больше энергии с входа на выход фильтра в более широком частотном диапазоне и тем самым уменьшить вносимое затухание фильтра по сравнению с трансверсальными фильтрами с той же шириной полосы пропускания.

При моделировании веерный фильтр представляют в виде параллельных каналов с эквидистантными электродными структурами, то есть с фиксированной центральной частотой в каждом канале. Апертуры таких парциальных фильтров определяют амплитудно-частотную характеристику, а изменяя

задержку в каналах, можно варьировать фазочастотную характеристику фильтра. Суммарная характеристика фильтра определяется как сумма характеристик фильтров отдельных каналов $H_n(\omega)$:

$$H(\omega) = \sum_{n=1}^N H_n(\omega),$$

где N — число каналов, на которое делится фильтр по апертуре.

Для улучшения согласования фильтра широко применяется секционирование ВШП — преобразователь делится на последовательно включенные две или три секции. При этом импедансы преобразователей для идентичных секций увеличиваются примерно в 4 и 9 раз соответственно. Структура типового трехсекционного веерного фильтра показана на рис. 7.

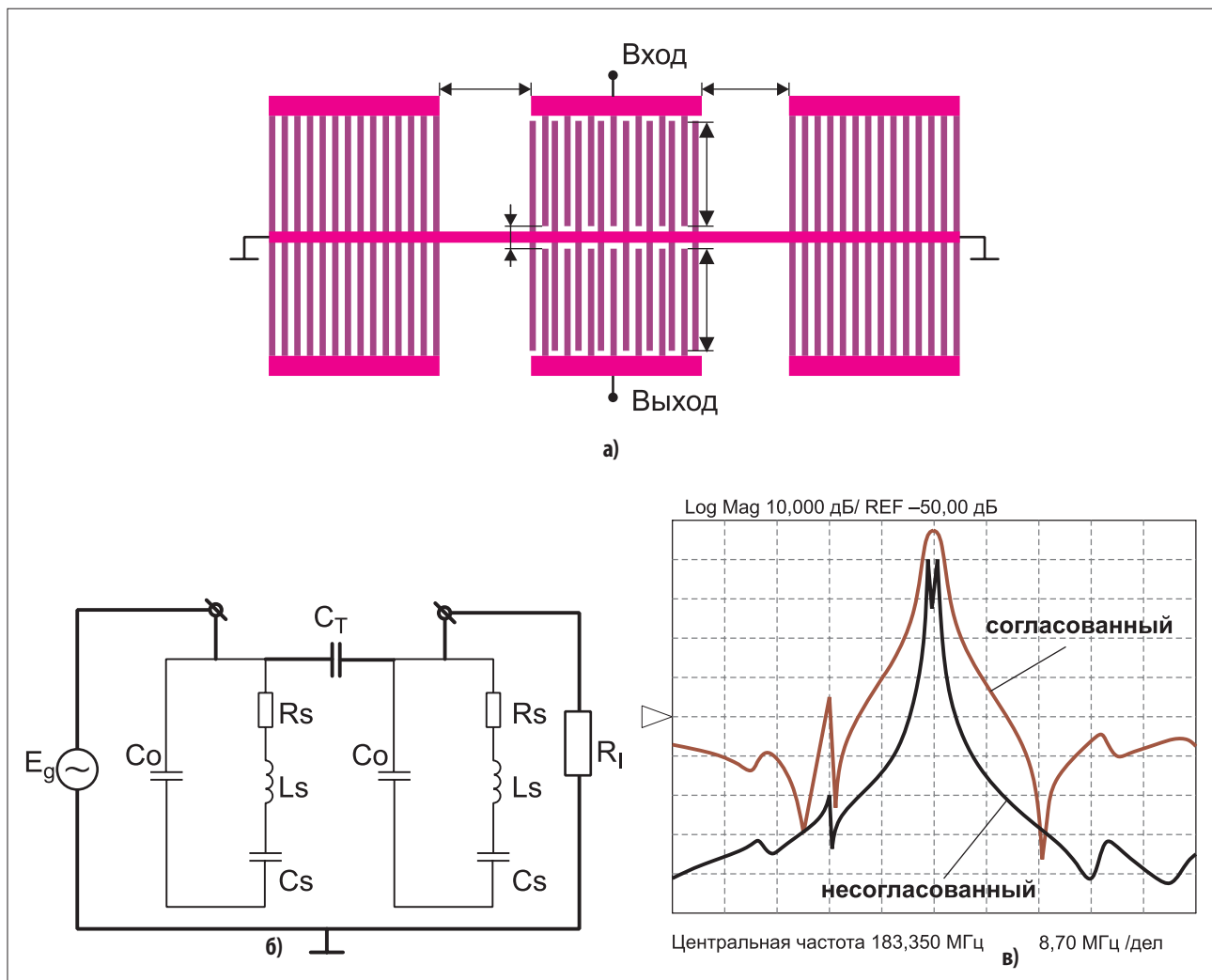
При реализации веерных конструкций на пьезоэлектриках с большим коэффициентом электромеханической связи [6] можно получить ширину полосы пропускания фильтра порядка 75% с приемлемым уровнем вносимого затухания и высокой прямоугольностью АЧХ (рис. 8).

РЕЗОНАТОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

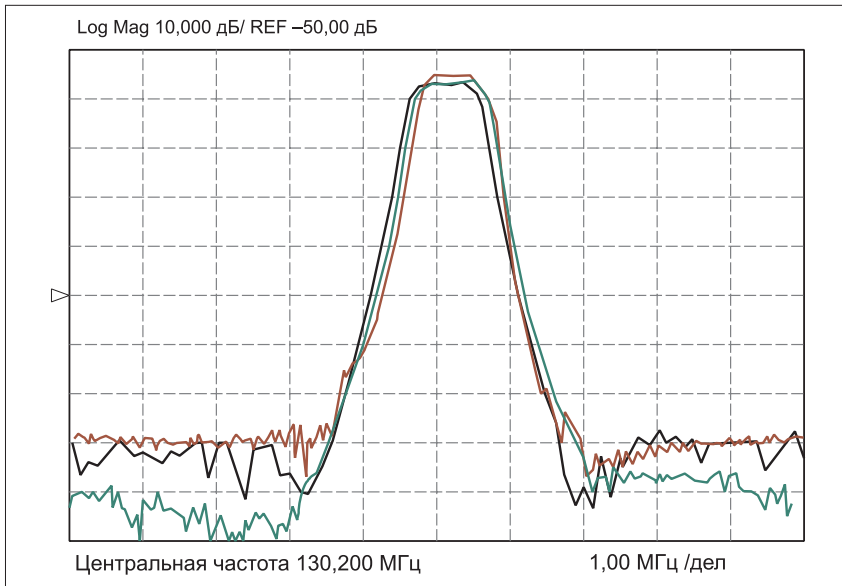
К числу новых типов ПАВ-фильтров относятся такие устройства, как резонаторы ПАВ и различные фильтры на основе резонаторов, использующие резонансные свойства волн и особенности их возбуждения и распространения (волноводность, возбуждение различных мод и гармоник и другие). К ним относятся многополюсные фильтры с продольной и поперечной акустической связью, а также фильтры лестничного типа, основанные на формировании из отдельных ПАВ резонаторов сложных цепочечных структур для достижения требуемых частотных характеристик.

СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫЕ РЕЗОНАТОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Резонатор на ПАВ представляет собой наиболее узкополосный элемент среди ПАВ-устройств. Добротность ненагруженного кварцевого резонатора достигает $(20-25) \times 10^3$, что позволяет применять его не только в качестве частотно-задающего элемента, но и для создания на его основе сверхузкополосных фильтров, в частности резонаторных фильтров



▲ Рис. 9. а) Структура; б) эквивалентная схема и в) типовые характеристики резонаторного фильтра с поперечной акустической связью



▲ Рис. 10. Типовая характеристика сверхзаклопосных резонаторных фильтров

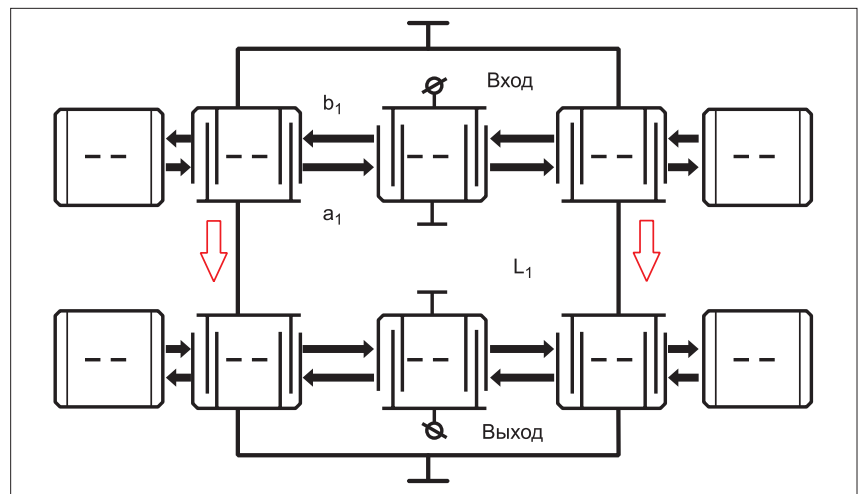
с поперечной акустической связью с полосами пропускания 0,05–0,2% [7, 8].

Принцип работы заключается в эффекте волноводного распространения ПАВ в полосковых волноводах [9]. При распространении ПАВ в некоторых материалах акустическая энергия волны канализируется в областях с меньшими, чем на свободной поверхности, скоростями ПАВ. При этом распределение энергии по апертуре волновода неоднородно. Часть энергии ПАВ вытекает за пределы апертуры. На основе рассмотренного эффекта реализуются резонаторные фильтры с поперечной акустической связью. Если в качестве волновода используется одноходовый резонатор и в непосредственной близости от него размещен аналогичный элемент, то на резонансной частоте при достаточной длине области взаимодействия в параллельном канале подкачка энергии ПАВ приводит к возбуждению резонансных колебаний на частоте, близкой к частоте исходного резонатора. Взаимная связь между волноводами задается в виде емкости C_t между отдельными резонаторами. Структурная схема, эквивалентная схема и типовые АЧХ для согласованного и несогласованного режимов включения фильтра такого типа показаны на рис. 9.

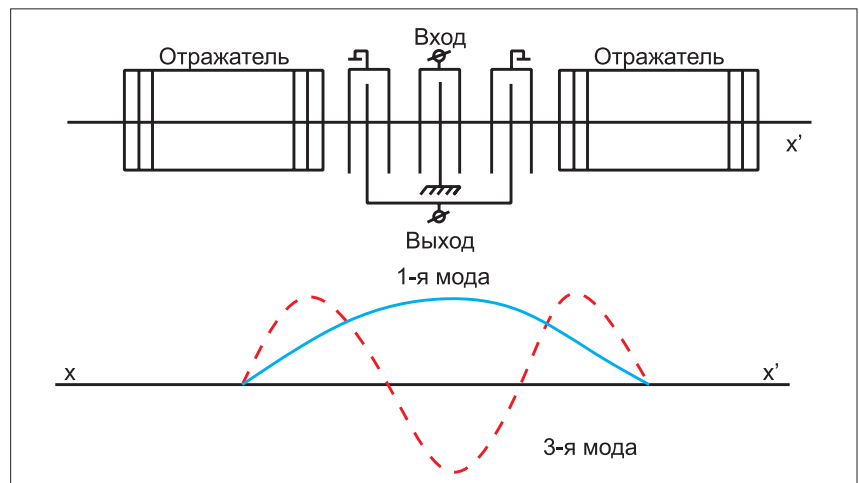
Очевидно, что на параметры фильтра, и в первую очередь на ширину полосы пропускания, влияет расстояние между волноводными каналами: чем ближе расположены параллельные каналы, тем большая акустическая связь создается между волноводами и тем шире полоса пропускания фильтра. На рис. 10 показаны расчетные характеристики фильтров с различным расстоянием между каналами (параметр D задан в длинах волн на частоте резонанса). Как видно на приведенных графиках, при увеличении рас-

стояния между каналами полоса пропускания фильтра сужается и достигает 0,05% при $D = 1,3$.

На рис. 10 представлена типовая характеристика сверхзаклопосных резонаторных фильтров.



▲ Рис. 11. Конструкция ПАВ-устройства на основе продольно-связанных резонаторов



▲ Рис. 12. Конструкция двухкаскадного фильтра 1–3 мод на основе продольно-связанных резонаторов

РЕЗОНАТОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПРОДОЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

Использование резонаторных продольно-связанных структур (LCRF) при разработке фильтров с малым вносимым затуханием, выполненных по ПАВ-технологии, позволяет реализовать широкий спектр параметров, отвечающих современным требованиям к системам связи [10].

Принцип действия данной структуры основан на исключении потерь, связанных с двунаправленностью излучения поверхностных акустических волн встречно-штыревым преобразователем. С конструктивной точки зрения это достигается применением двустороннего приема (используются два выходных преобразователя, включенных параллельно) и введением дополнительных отражателей по краям структуры.

На рис. 11 приведена конструкция устройства на основе продольно-связанной резонаторной структуры и распределение амплитуды волны вдоль его длины по оси X .

В данной конструкции генерируются две резонансные моды: первого и тре-

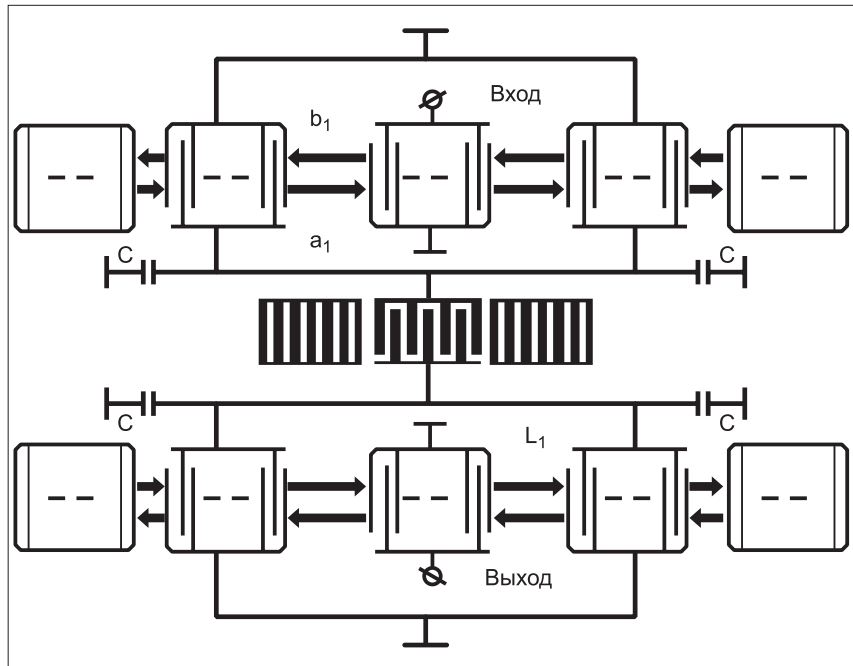
тьего порядка. Причем мода первого порядка возбуждается синфазно для входного и выходного ВШП, в то время как мода третьего порядка — противофазно. Кроме того, при определенных соотношениях числа электродов в преобразователях и отражателях, а также расстояний между ними частотный диапазон между резонансными частотами первой и третьей моды может определить полосу пропускания устройства.

Следует отметить, что уровень вносимого затухания в такой конструкции не превышает 1 дБ, однако уровень режекции в высокочастотном диапазоне вблизи полосы пропускания при этом составляет 10–15 дБ. Такая форма обусловлена характером передаточной проводимости Y_{21} . Для увеличения уровня внеполосной режекции до 25 дБ обычно используется каскадное соединение таких структур через боковые преобразователи в режиме самосогласования (то есть боковые преобразователи в каналах имеют идентичную конструкцию) (рис. 12), при этом обеспечивается уровень вносимого затухания менее 2 дБ, но величина K_p обычно превышает 2,0.

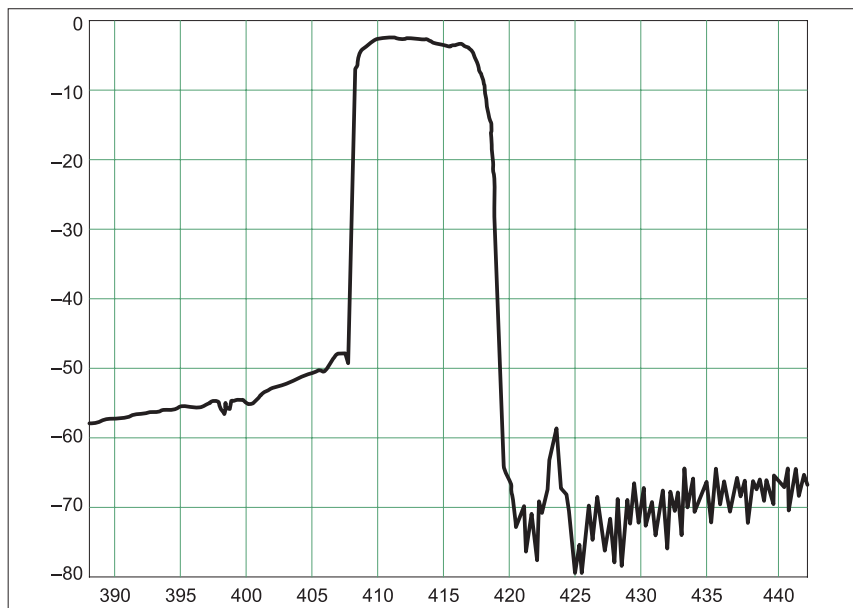
Для улучшения избирательности фильтров такого типа, помимо резонаторных звеньев, в структуру фильтра могут вводиться дополнительные элементы в виде планарных емкостей, выполняемых в едином технологическом процессе с фильтром ПАВ, дополнительных решеток между преобразователями, режекторных элементов в виде резонаторов. Такие фильтры или отдельные элементы могут совмещаться по импедансам с лестничными звеньями, что существенно расширит возможности формирования требуемых характеристик фильтров (рис. 13). На рис. 14 приведена характеристика фильтра на частоту 412 МГц, обеспечивающая уникальный для фильтров с малым вносимым затуханием коэффициент прямоугольности 1,3.

БАЛАНСНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПАВ

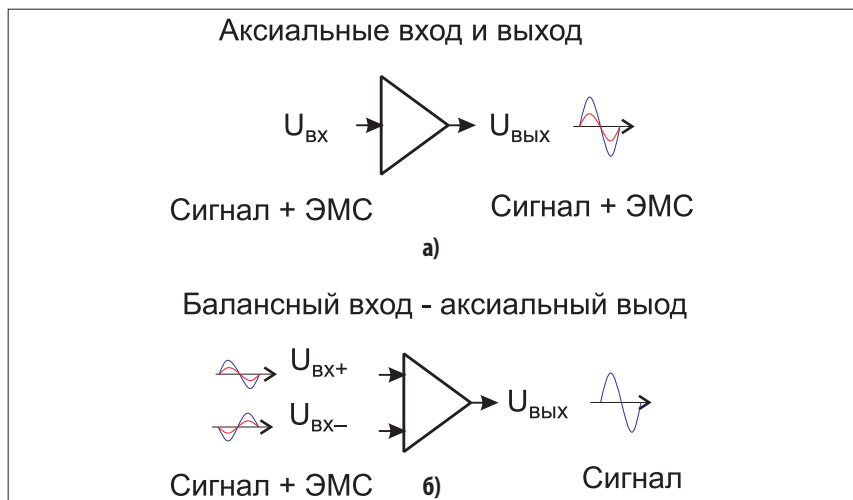
СВЧ-фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) являются ключевыми компонентами аппаратуры многих систем связи, радиолокации, навигации и т. д., определяя такие их тактико-технические характеристики, как избирательность, помехозащищенность, неискаженная селекция сложных сигналов, динамический диапазон и другие. До недавнего времени в подавляющем большинстве случаев СВЧ-фильтры на ПАВ проектировались для работы на несимметричные (аксиальные) нагрузки (рис. 15а). При этом один из главных параметров фильтров — избирательность — ограничивается электромагнитным сигналом (ЭМС) прямого



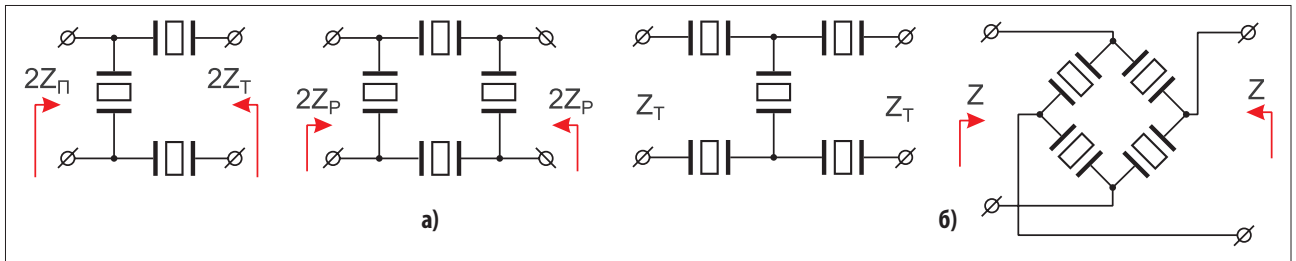
▲ Рис. 13. Структура комбинированного фильтра с продольной акустической связью



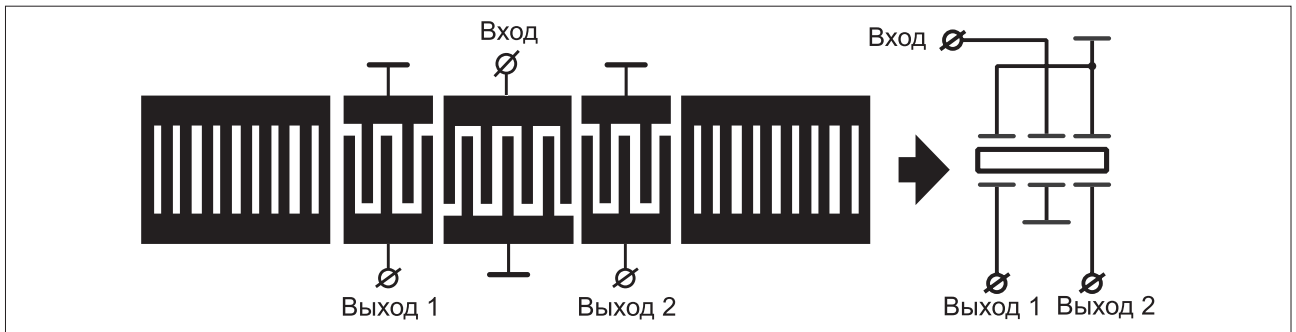
▲ Рис. 14. Экспериментальная характеристика комбинированного фильтра на номинальную частоту 412 МГц с коэффициентом прямоугольности 1,3



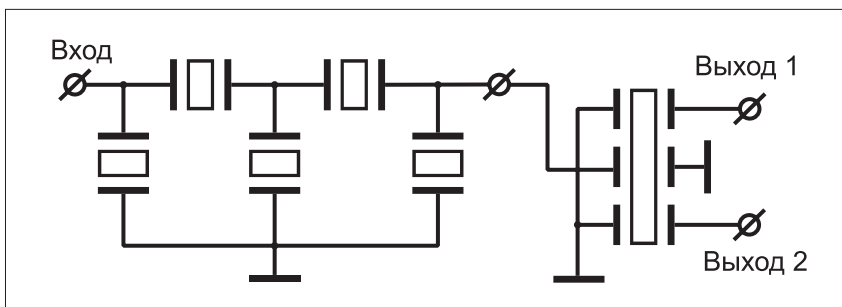
▲ Рис. 15. Различие между сигналами: а) аксиального; б) балансного усилителей



▲ Рис. 16. Схемы симметричных балансных звеньев фильтров на ПАВ с электрической связью резонаторов : а) лестничные Г-, П- и Т-образные; б) мостовая



▲ Рис. 17. Балансное звено фильтра на ПАВ с продольной акустической связью резонаторов



▲ Рис. 18. Балансный фильтр на ПАВ с комбинированной связью резонаторов

прохождения с входа на выход фильтра и печатной платы аппаратуры, на которой фильтр установлен, и составляет обычно 40–50 дБ в широком диапазоне частот до 3–4 ГГц.

Однако расширение функций современной аппаратуры, например применение в смартфонах нескольких стандартов связи GSM, EGSM, CDMA, PHN и стандартов навигации GPS, GLONASS, BeiDou, а также Интернета, приема радиостанций и т. д., привело к резкому уплотнению размещения компонентов

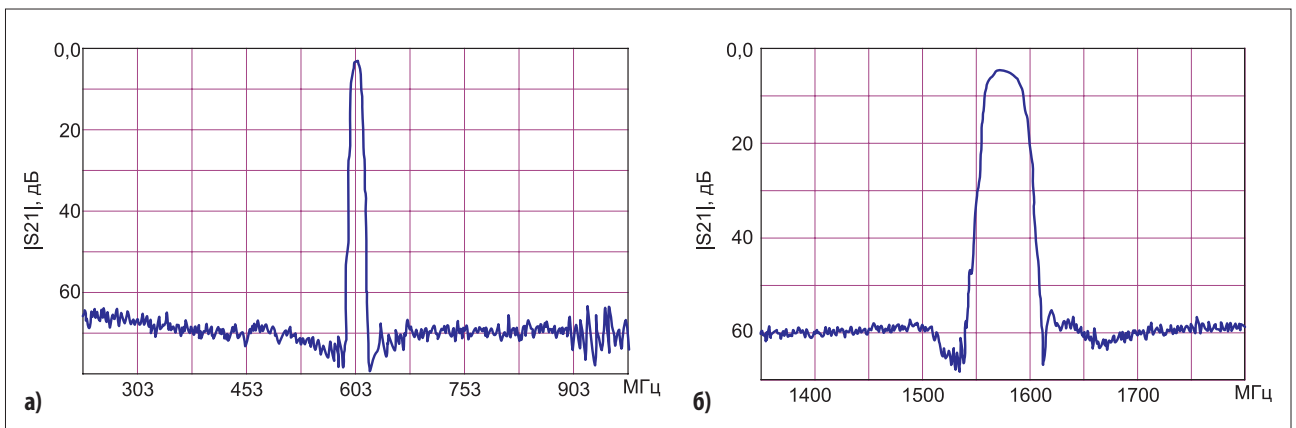
на плате и, как следствие, к катастрофическому росту уровня ЭМС до $-(20-25)$ дБ. Выйти из положения здесь помогают балансные компоненты: усилители, смесители, фильтры и другие устройства, позволяющие полностью или частично компенсировать как ЭМС, так и возможные помехи (рис. 15б). Если схемотехнические решения балансных усилителей и смесителей уже хорошо освоены, то схемотехнические и конструкционные решения высокоизбирательных балансных

фильтров на ПАВ продолжают обрабатываться.

Балансные резонаторные фильтры на ПАВ могут быть построены по схемам с электрической связью резонаторов (лестничной на рис. 16а или мостовой на рис. 16б), с акустической связью (продольной или поперечной) или с комбинированной связью резонаторов.

Чаще других используются схемы СВЧ балансных фильтров на ПАВ с продольной акустической связью первой и третьей рабочих мод благодаря своей относительной простоте и дополнительной возможности трансформации входных и выходных сопротивлений для работы на несимметричные нагрузки по входу и выходу, например 50-Ом антенны и 200-Ом усилители (рис. 17).

При необходимости работы между несимметричными нагрузками наиболее удобно использовать схемы фильтров из звеньев с комбинированием электрической и акустической связи резонаторов (рис. 18).



▲ Рис. 19. Экспериментальные характеристики балансных фильтров: а) из симметричных звеньев с электрической связью резонаторов; б) из звеньев с комбинированной связью резонаторов по схеме рис. 18

Благодаря компенсации ЭМС на выходе, балансные фильтры демонстрируют на 10–20 дБ более высокую избирательность в широкой полосе частот по сравнению с фильтрами аналогичной структуры, но с аксиальными звеньями. В качестве примеров на рис. 19а показана частотная характеристика балансного фильтра на ПАВ на частоту 603 МГц из трех симметричных П-образных звеньев с электрической связью резонаторов, а на рис. 19б — фильтра на ПАВ на частоту 1575 МГц и из несимметричного лестничного звена с электрической связью пяти резонаторов и балансного звена с акустической связью резонаторов. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Машинин О. В., Никитов С. А., Прапорщиков В. В., Шермагина Е. Ю. Фильтры на поверхностных акустических волнах нового поколения для гибридных аналого-цифровых телевизионных приемников//Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 9.
2. Багдасарян А. С., Сеницына Т. В. Анализ ВПП методом связанных мод//Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2003. № 1, 2.
3. Машинин О. В., Прапорщиков В. В., Сеницына Т. В., Шермагина Е. Ю. Устройство на поверхностных акустических волнах. Патент на изобретение № 2295193 от 10.03.2007.
4. Багдасарян А. С., Сеницына Т. В., Машинин О. В. ПАВ-фильтры с малыми потерями на основе U-образного ответвителя//Электросвязь. 2004. № 2.
5. Багдасарян А. С., Сеницына Т. В., Иванов П. Г., Швец В. Б. Частотно-селективные СВЧ-модули на основе преобразователей веерного типа//Электроника: Наука. Технологии. Бизнес. 2012. № 2.
6. Сеницына Т. В., Орлов М. М. Исследование влияния электродной структуры на параметры акустической волны в сильных пьезоэлектриках//Известия вузов. Сер. Материалы электронной техники. 2004. № 1.
7. Сеницына Т. В., Багдасарян А. С., Орлов М. М., Узкополосные ПАВ-фильтры с малыми потерями на основе поперечно-связанной структуры//Электронная промышленность. Наука. Технологии. Изделия. 2004, № 1.
8. Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Багдасарян С. А., Сеницына Т. В. Узкополосные фильтры на поверхностных акустических волнах в системах радиочастотной идентификации//Радиотехника и электроника. 2008. № 7.
9. Машинин О. В., Прапорщиков В. В., Сеницына Т. В., Шермагина Е. Ю. Фильтр на поверхностных акустических волнах. Патент на изобретение № 2308799 от 20.10.2007.
10. Сеницына Т. В., Багдасарян А. С., Егоров Р. В. ПАВ-фильтры на основе продольно-связанных структур//Электронная промышленность. Наука. Технологии. Изделия. 2004. № 4.