

УСТРОЙСТВА ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКЦИИ НА ПАВ

В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ, РАДИОЛОКАЦИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ*

А.Багдасарян, д.т.н., Т.Синицына, к.т.н., О.Машинин, к.т.н., П.Иванов, к.т.н., Р.Егоров

Радиоэлектронные системы и устройства широко используются как в быту, так и в технике специального назначения, поэтому все более актуальной становится задача оптимизации взаимного распределения рабочих частот различных приборов и систем в ограниченных диапазонах выделенного радиочастотного спектра. Основными требованиями к таким системам являются высокое быстродействие, отсутствие искажений при обработке входного сигнала, малая энергоемкость. Выполнение этих требований в значительной степени зависит от параметров используемых полосно-пропускающих радиочастотных фильтров. Высокая избирательность, малые вносимые затухания и возможность обработки сигналов с высокой входной мощностью позволяют улучшить такие эксплуатационные характеристики современной аппаратуры связи, радиолокации и телекоммуникации, как помехозащищенность, дальность и точность действия, стабильность.

В зависимости от принципа действия, в радиоэлектронике используются различные типы частотно-селективных устройств, которые работают в различных частотных диапазонах (рис.1). Как видно из рисунка, один из наиболее перспективных классов радиочастотных фильтров в диапазоне частот до 3100 МГц – это частотно-избирательные фильтры, выполненные по технологии поверхностных акустических волн (ПАВ) [1]. Достоинствами таких устройств являются возможность совмещения процессов их изготовления с микро- и нанотехнологиями, широкий спектр

полос пропускания, высокая температурная стабильность, высокая надежность и малые массогабаритные характеристики.

Из-за целого ряда технологических и физических ограничений, универсальных конструкций фильтров для всего спектра полос пропускания не существует [2]. Поэтому для корректного анализа и классификации фильтры целесообразно разделить на группы однотипных по конструктивному исполнению и материалу звукопровода устройств, обеспечивающих оптимальную совокупность параметров в определенных диапазонах частот и полос пропускания (см. таблицу).

ФИЛЬТРЫ ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО ТИПА

До 1990-х годов основным принципом построения приборов на ПАВ было использование

* Результаты, представленные в статье, получены при выполнении государственного контракта №12411.1400099.11.076 от 15.06.2012 г.

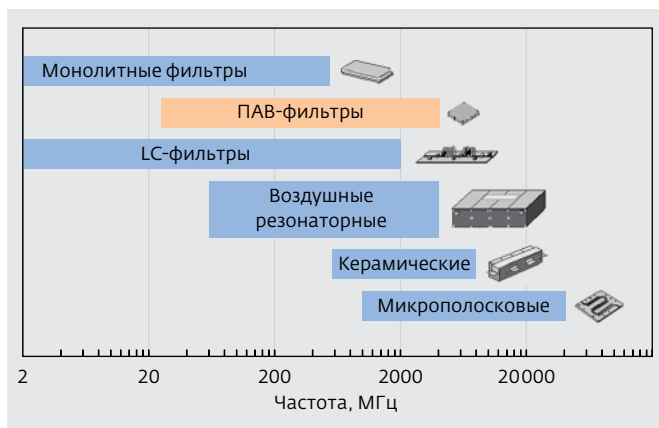


Рис.1. Типы и рабочие диапазоны частотно-селективных устройств

трансверсальных конструкций, обеспечивающих уровень вносимого затухания 15-25 дБ, что ограничивало область их применения трактами промежуточной частоты. Тем не менее, такие устройства широко применялись и продолжают применяться в технике средств связи благодаря возможности сложной частотно-селективной обработки сигналов [3]. Трансверсальные фильтры по конструкции делятся на одно- и двухканальные с использованием многополоскового ответвителя (МПО) (рис.2).

Первый тип конструкции применяется либо для создания узкополосных термостабильных фильтров на основе пьезоподложек кварца и лангасита, либо когда требуется обеспечить малые

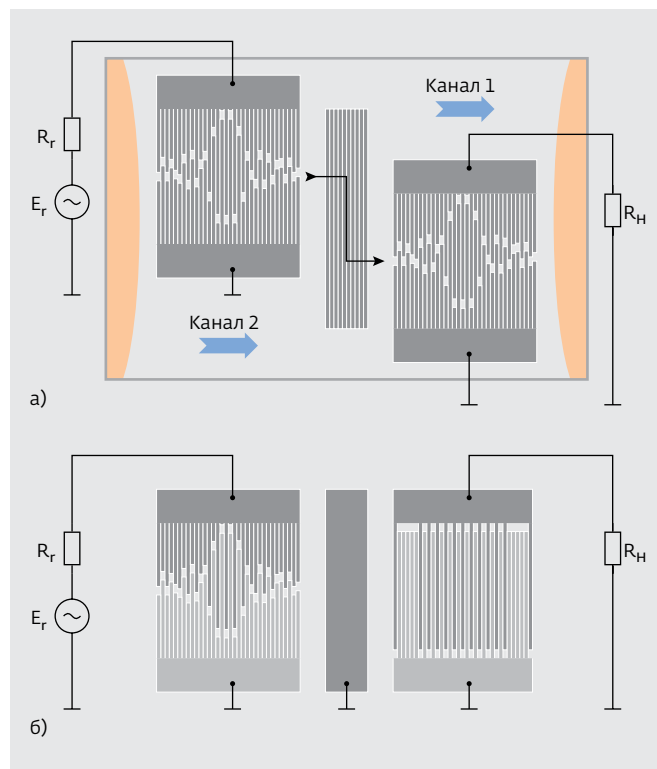


Рис.2. Типовые структуры трансверсальных фильтров на ПАВ: а) одноканальная; б) двухканальная на основе МПО

габариты устройства. Фильтр включает в себя два встречно-штыревых преобразователя (ВШП), определяющих его частотные характеристики [4], и электромагнитный экран в виде заземленной металлизированной полосы между ВШП. Как

Классификация фильтров на ПАВ

Категория	Полоса пропускания, %	Тип фильтра	Материал	Частота, МГц	Вносимое затухание, дБ	Коэффициент прямоугольности
Сверхузкополосные	0,05–0,3	Резонаторный	Кварц	50–1000	4–8	2,0–3,0
Узкополосные	0,3–5	Резонаторный	Кварц ТЛ НЛ	50–3000	3–15	1,3–2,5
		Лестничный	ТЛ НЛ	100–3000	1–5	1,5–2,5
		Трансверсальный	Кварц ТЛ	30–1000	12–25	1,2–2,0
Среднеполосные	5–15	Трансверсальный	ТЛ НЛ	30–1000	15–25	1,15–2,0
		Веерный			8–20	
Широкополосные	15–40	Трансверсальный Веерный	НЛ	30–1000	15–28	1,1–1,7
					10–20	1,15–1,7
Сверхширокополосные	40–80	Веерный	НЛ	50–700	20–30	1,1–1,5

правило, один из ВШП выполняется с амплитудной аподизацией электродов [5]. Второй – неаподизованный, т.е. 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

$$H_{\Phi}(\omega) = H_1(\omega)H_2(\omega),$$

где $H_1(\omega)$ и $H_2(\omega)$ – частотные характеристики входного и выходного ВШП соответственно.

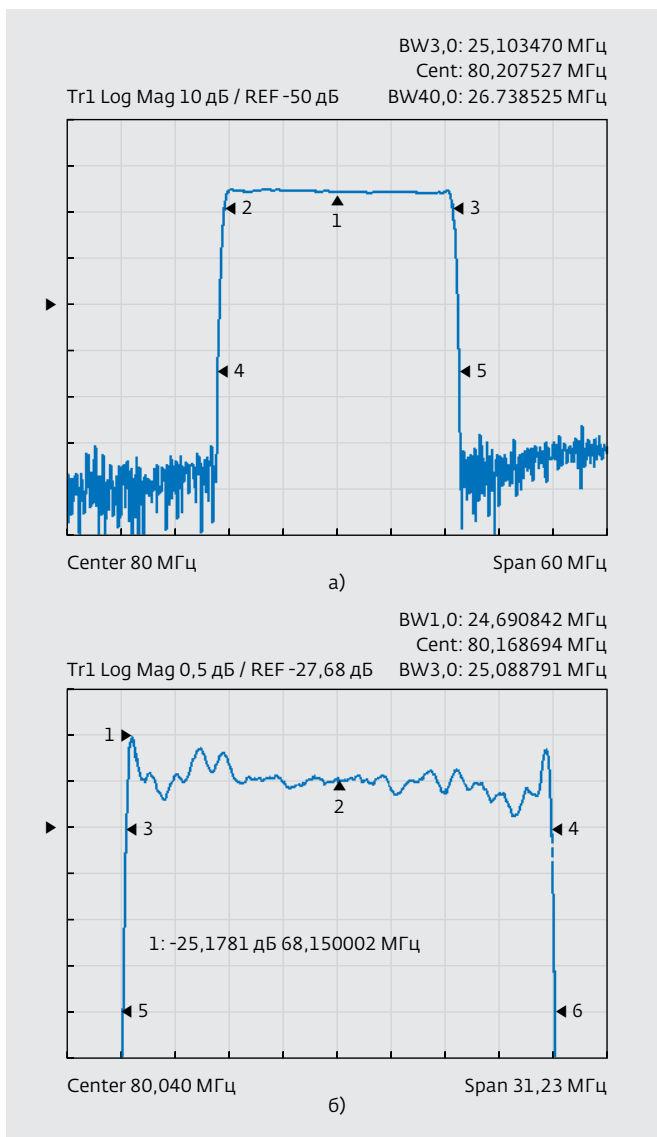


Рис.3. Экспериментальная характеристика двухканального трансверсального фильтра на номинальную частоту 80 МГц с полосой пропускания 30% и $K_n=1,065$

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 электродов значительно меньше, чем для аподизованного ВШП. Поэтому в качестве выходного ВШП, как правило, используются или неаподизованный ВШП, или преобразователь, взвешенный удалением электродов (ПВУЭ). Поскольку точность воспроизведения частотной характеристики ПВУЭ зависит от степени дискретизации, такие структуры применяются в первую очередь при разработке узкополосных и среднечастотных фильтров, в которых для реализации требуемой частотной характеристики требуются преобразователи с достаточно большим количеством электродов в основном лепестке функции $\text{sinc}(x)$.

Второй тип конструкции применяется для реализации широкополосных фильтров на основе пьезоэлектриков с большим коэффициентом электромеханической связи, таких как ниобат лития. Основная особенность этой конструкции – наличие многополоскового ответвителя между входным и выходным ВШП. В технике ПАВ МПО используются достаточно широко [6]. Это связано с возможностью передачи энергии ПАВ из канала в канал. При этом излучение ПАВ во втором канале однородно в пределах апертуры выходного ВШП, т.е. 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 характеристиками как ВШП, так и МПО:

$$H_{\Phi}(\omega) = H_1(\omega)H_2(\omega)H_{\text{МПО}}(\omega).$$

В трансверсальных фильтрах обычно используется простейший вариант конструкции МПО, представляющий собой периодическую систему электродов, связывающих два параллельных акустических канала. Функция передачи энергии от первого канала ко второму является циклической и зависит от длины МПО; т.е. существует

некоторая длина ответвителя L_T , при которой амплитуда волны во втором канале достигает максимума. В первом приближении:

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

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

Число полос МПО 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 УХ/Л-среза ниобата лития оптимальное число полос, обеспечивающее полную перекачку энергии из канала в канал, составляет 80-100.

Данный тип конструкции позволяет реализовать среднеполосные и широкополосные фильтры с предельной избирательностью, обеспечивая коэффициент прямоугольности (K_n) амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) по уровням 40/3 дБ менее 1,1 и гарантированное затухание в полосах заграждения до 60 дБ. На рис.3 приведена экспериментальная характеристика двухканального фильтра на номинальную частоту 80 МГц с полосой пропускания 30% и $K_n = 1,065$.

ВЕЕРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Одна из наиболее перспективных конструкций широкополосных и сверхширокополосных фильтров – веерная конструкция (рис.4) [7]. Преобразователи в этом фильтре выполняются с переменным шагом по апертуре, так чтобы генерация и прием волн с близкими частотами осуществлялась в пределах акустического канала, в котором период ВШП соответствует длине волны распространяющейся в нем ПАВ. Распределение акустических волн по различным пространственным каналам позволяет передавать больше

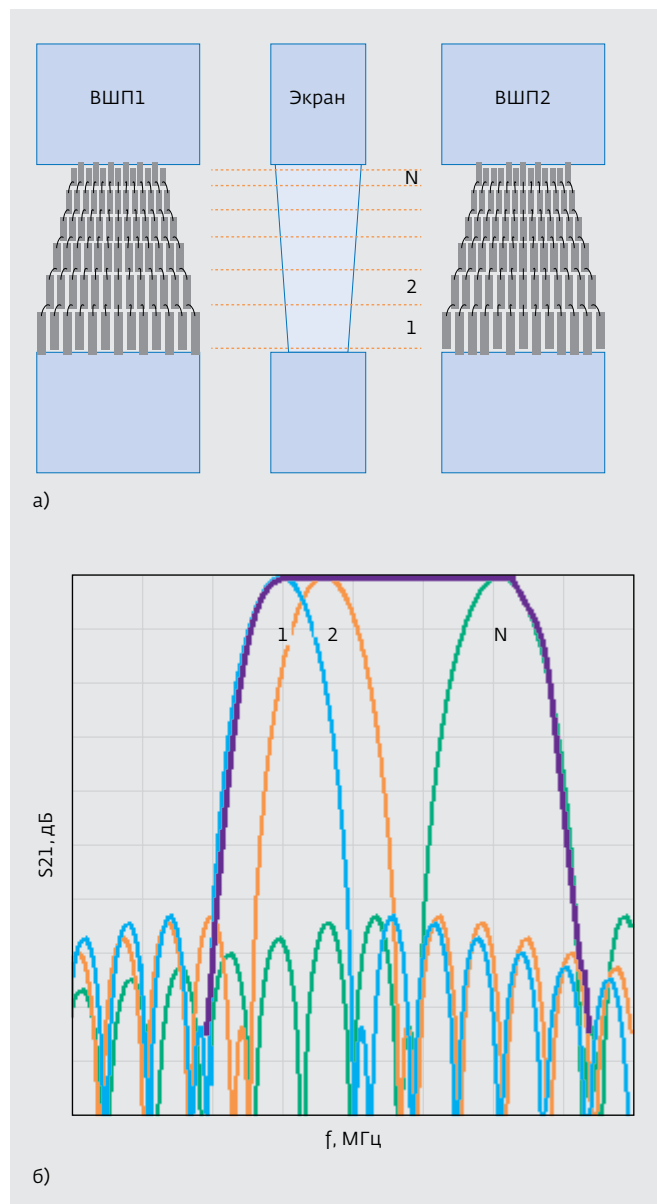


Рис.4. Структура веерного фильтра (а) и принцип его действия (б)

энергии со 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, т.е. с фиксированной центральной частотой в каждом канале. Апертуры таких парциальных фильтров определяют амплитудно-частотную характеристику фильтра, а путем изменения задержки в каналах можно варьировать его фазочастотную характеристику. 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, т.е. преобразователь делится на последовательно включенные две или три секции. При этом импедансы преобразователей для идентичных секций увеличиваются примерно в четыре и девять раз соответственно.

При реализации веерных конструкций на пьезоэлектриках с большим коэффициентом электро-механической связи [8] можно получить ширину полосы пропускания фильтра порядка 75% с приемлемым уровнем вносимого затухания и высокой прямоугольностью АЧХ (рис.5).

РЕЗОНАТОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

В 1990-е годы получили развитие новые классы приборов на ПАВ, использующих отражение акустических волн от неоднородностей (электродов) на поверхности звукопровода, в пределах как ВШП, так и дополнительных структурных элементов в виде отражательных решеток [9, 10]. В новый класс входят такие устройства, как резонаторы на ПАВ и различные фильтры на основе резонаторов, использующие резонансные свойства волн и особенности их возбуждения и распространения (волноводность, возбуждение различных мод и гармоник и др.). 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.

Сверхзаклополосные резонаторные фильтры

Резонатор на ПАВ – наиболее узкополосный элемент среди ПАВ-устройств. Добротность ненагруженного кварцевого резонатора достигает $(20-25) \cdot 10^3$, что позволяет применять его не только в качестве частотно-задающего элемента, но и для создания на его основе сверхзаклополосных фильтров, в частности резонаторных фильтров с поперечной акустической связью с полосами пропускания 0,05–0,2% [11, 12].

Принцип работы резонаторного фильтра основан на эффекте волноводного распространения

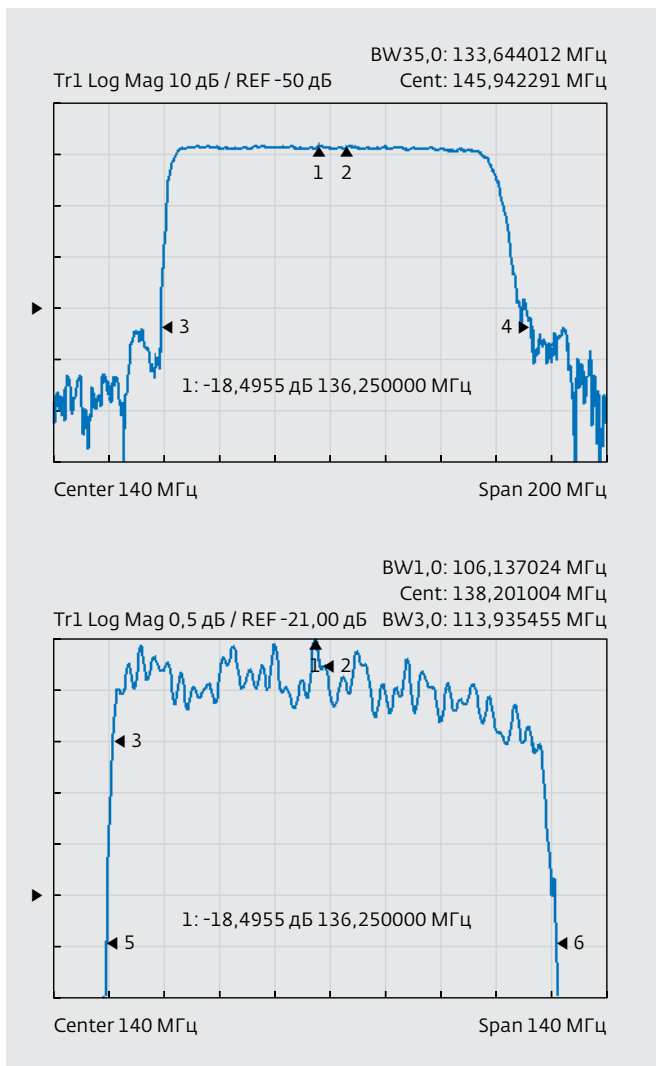


Рис.5. Экспериментальные характеристики сверхширокополосного веерного фильтра на номинальную частоту 140 МГц (ширина полосы пропускания 78%, $K_n(35/3) = 1,17$)

ПАВ в полосковых волноводах [13], при котором 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 выводит за пределы апертуры. Этот эффект и позволяет реализовать резонаторный фильтр с поперечной акустической связью. Если в качестве волновода

используется одноходовый резонатор и в непосредственной близости от него размещен аналогичный элемент, то 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 с помощью емкости C_T , включенной между отдельными резонаторами (рис.6).

Очевидно, что на параметры фильтра, и в первую очередь на ширину полосы пропускания влияет расстояние между волноводными каналами: чем ближе расположены параллельные каналы, тем более сильная акустическая связь создается между волноводами и тем шире полоса пропускания фильтра. При увеличении расстояния между каналами D с 0,6 до 1,3 длин волн на частоте резонанса ширина полосы пропускания фильтра уменьшается и достигает минимума 0,05% при $D=1,3$.

Из-за сравнительно узкой металлизированной шины между резонаторами одну из основных проблем, затрудняющих достижение максимального уровня подавления в полосе заграждения, вызывают сигналы прямого прохождения со входа на выход этого звена. Поэтому для улучшения гарантированного затухания сигнала входной и выходной ВШП, как правило, электрически изолированы. Используют также каскадное включение резонаторных звеньев (рис.7).

Резонаторные фильтры с продольной акустической связью

Использование резонаторных продольно-связанных структур при разработке фильтров с малым вносимым затуханием, выполненных по ПАВ-технологии, позволяет реализовать широкий спектр параметров, отвечающих современным требованиям к системам связи [14]. Принцип

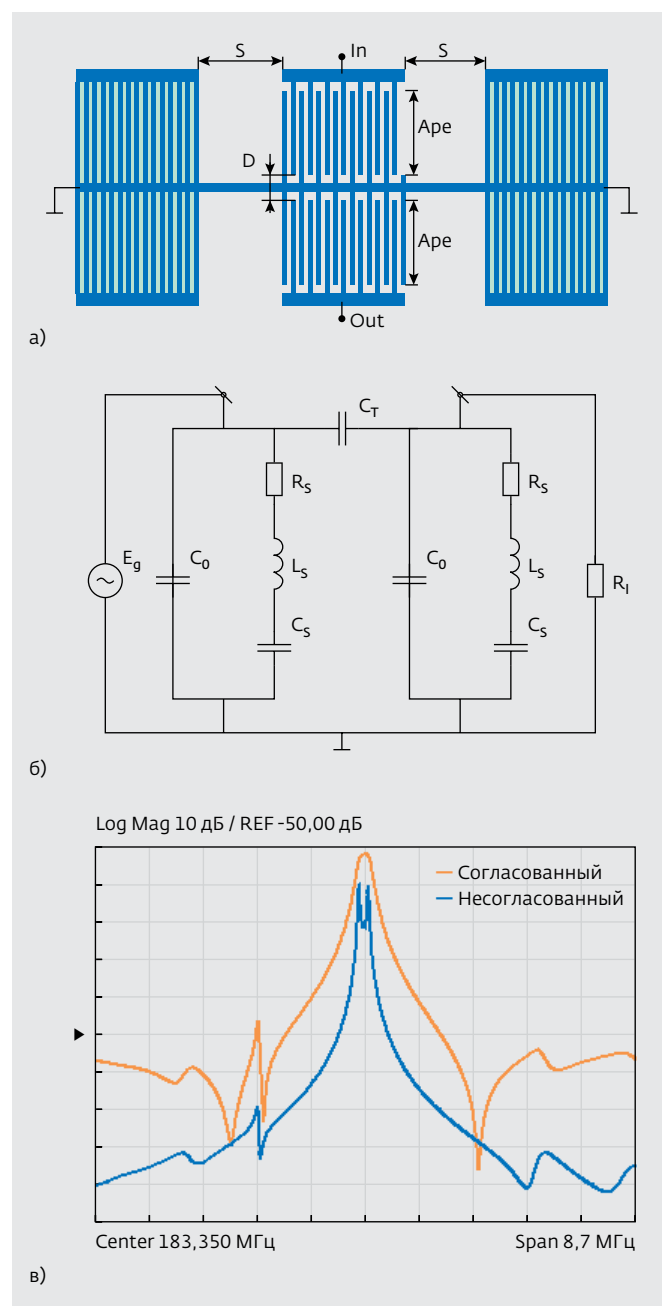


Рис.6. Структура резонаторного фильтра (а), эквивалентная схема (б) и типовые характеристики фильтра с поперечной акустической связью (в)

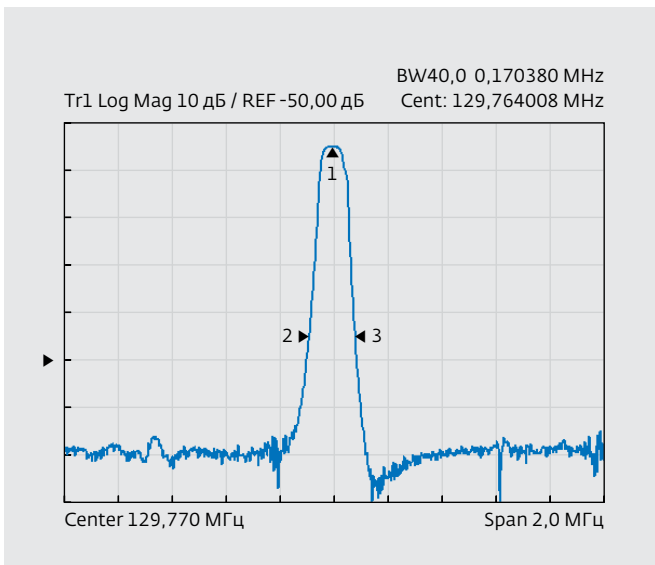


Рис.7. Экспериментальная характеристика трехзвенного сверхузкополосного (ширина полосы пропускания 0,05%) резонаторного фильтра на номинальную частоту 130 МГц, $K_n=2,1$, вносимое затухание 4,7 дБ

действия такой структуры основан на исключении потерь, связанных с двунаправленным излучением поверхностных акустических волн встречно-штыревым преобразователем. Это достигается за счет применения двустороннего приема (используются два включенных параллельно выходных преобразователя) и введения дополнительных отражателей по краям структуры.

В устройстве на основе продольно-связанной резонаторной структуры генерируются две

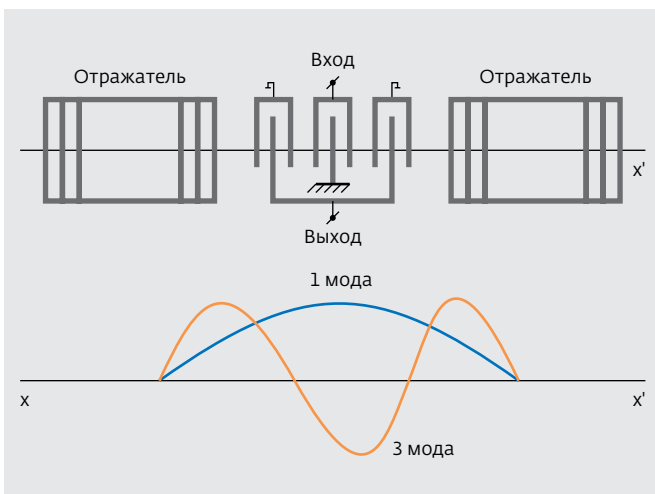


Рис.8. Конструкция ПАВ-устройства на основе продольно связанных резонаторов

резонансные моды: первого и третьего порядка (рис.8). 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 мод первого и третьего порядка может определить полосу пропускания устройства.

Следует отметить, что уровень вносимого затухания в такой конструкции не превышает 1 дБ, однако при этом уровень режекции в высокочастотном диапазоне вблизи полосы пропускания составляет 10–15 дБ. Такая форма обусловлена характером передаточной проводимости Y_{21} . Для увеличения уровня внеполосной режекции до 25 дБ такие структуры обычно соединяются каскадно через боковые преобразователи в режиме самосогласования (т.е. боковые преобразователи в каналах имеют идентичную конструкцию). При этом уровень вносимого затухания не превышает 2 дБ, но значение K_n обычно больше 2,0.

Для улучшения избирательности фильтров этого типа, помимо резонаторных звеньев, в структуру фильтра могут вводиться дополнительные планарные емкости, выполняемые в едином технологическом процессе с фильтром ПАВ, дополнительные решетки между преобразователями и режекторные элементы в виде резонаторов. Кроме того, такие фильтры или отдельные элементы можно совмещать по импедансам с лестничными звеньями, что существенно расширяет возможности формирования фильтров

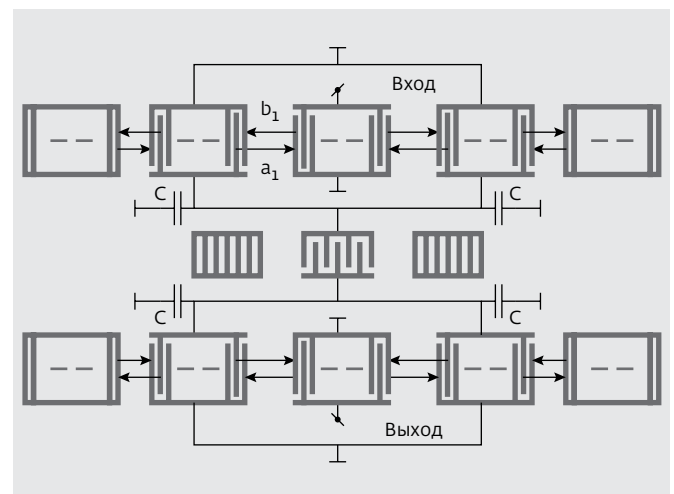


Рис.9. Структура комбинированного фильтра с продольной акустической связью

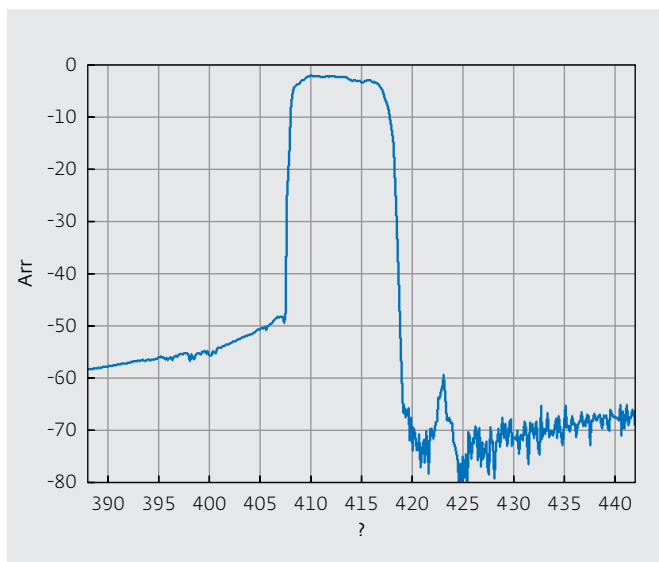


Рис.10. Характеристика комбинированного фильтра на номинальную частоту 412 МГц с коэффициентом прямоугольности 1,3

с требуемыми характеристиками (рис.9). Так, на рис.10 приведена характеристика фильтра на частоту 412 МГц с уникальным для фильтров с малым вносимым затуханием коэффициентом прямоугольности 1,3.

Лестничные фильтры

Основа лестничных фильтров – Г-образные элементарные звенья (рис.11). Полные сопротивления параллельных и последовательных ветвей звеньев Z_1 и Z_2 , соответствуют полным сопротивлениям резонаторов P_1 и P_2 . Со стороны входа и выхода звенья имеют различные сопротивления Z_T и $Z_{П}$:

$$Z_T = \sqrt{-Z_1 Z_2} \cdot \sqrt{1 + \frac{Z_1}{Z_2}}, \quad Z_{П} = \sqrt{-Z_1 Z_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Z_1}{Z_2}}}$$

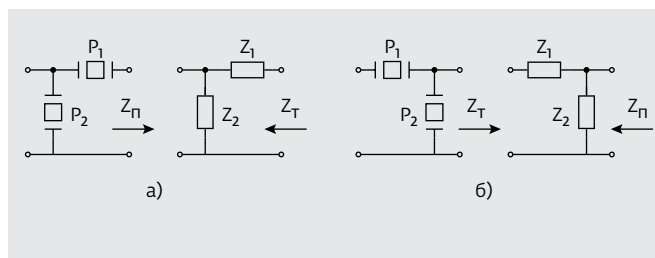


Рис.11. Г-образные элементарные звенья структур лестничного типа: а) прямое звено, б) обратное

Для получения характеристики устройства с симметричной полосой пропускания необходимо включить резонаторы в последовательную и параллельную ветви, соблюдая следующие соотношения:

$$f_{a2} = f_{p1} \text{ и } \Delta f_1 = \Delta f_2$$

С целью увеличения гарантированного затухания в полосах заграждения Г-образные звенья обычно соединяют в цепочечную схему, образуя Т- и П-образные звенья, сохраняющие такие параметры Г-образных звеньев, как коэффициент прямоугольности и полоса пропускания, но при увеличении значения затухания в полосе заграждения в два раза. Далее многозвенные фильтры компонуют в лестничную схему, позволяя реализовать фильтр с высокоизбирательной характеристикой и очень малым вносимым затуханием (менее 2 дБ) в полосе пропускания [15] (рис.12), что в свою очередь позволяет обрабатывать сигналы с высокой входной мощностью (до 1,2 Вт).

Таким образом, приведенные выше конструкции и методологические подходы позволяют реализовать устройства частотной селекции на диапазон

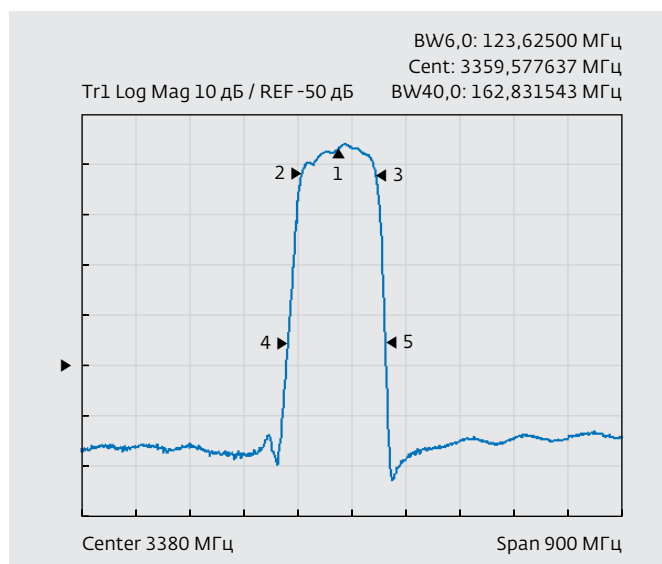


Рис.12. Характеристика лестничного фильтра на номинальную частоту 3325 МГц с коэффициентом прямоугольности 1,3

частот 30–3300 МГц с широким спектром полос пропускания (0,05–75%), учитывая современные системные требования к устройствам такого типа:

- высокая избирательность или улучшенный коэффициент прямоугольности;
- высокое подавление в полосах заграждения;
- допустимый уровень вносимого затухания в полосе пропускания;
- возможность обработки сигналов высокой мощности.

Это обеспечивает улучшение таких эксплуатационных параметров радиоэлектронной аппаратуры, как помехозащищенность, дальность и точность действия, стабильность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Багдасарян А.С., Гуляев Ю.В.** Фильтры на поверхностных акустических волнах: состояние и перспективы развития. – Н.-тех. журнал Радиотехника, №8, 2003, с.15–25.
2. **Багдасарян А.С., Сеницына Т.В.** Устройства селекции частоты на ПАВ. Физико-технические принципы построения. – Электроника: НТБ, 2011, №4, с.38–44.
3. **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, стр.1140–1149.
4. **Багдасарян А.С., Сеницына Т.В.** Анализ ВШП методом связанных мод. – Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, 2003, №1–2, с.11–14.
5. **Машинин О.В., Прапорщиков В.В., Сеницына Т.В., Шермагина Е.Ю.** Устройство на поверхностных акустических волнах. Патент на изобретение № 2295193 от 10.03.2007г.
6. **Багдасарян А.С., Сеницына Т.В., Машинин О.В.** ПАВ-фильтры с малыми потерями на основе U-образного ответвителя. – Электросвязь, 2004, №2, с.32–33.
7. **Багдасарян А.С., Сеницына Т.В., Иванов П.Г., Швец В.Б.** Частотно-селективные СВЧ-модули на основе преобразователей веерного типа. – Электроника: НТБ, 2012, №2, с.66–71.
8. **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, с.67–69.
9. **Багдасарян А.С., Сеницына Т.В.** Селективные акустоэлектронные приборы на основе однонаправленных структур поверхностных акустических волн. Москва, 2004.
10. **Багдасарян А.С., Гуляев Ю.В., Сеницына Т.В.** Резонаторные ПАВ-фильтры для современных телекоммуникационных систем. – Тезисы докладов V Международной н.-т. конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации", Владимир, 2003, стр.152–154.
11. **Сеницына Т.В., Багдасарян А.С., Орлов М.М.** Узкополосные ПАВ-фильтры с малыми потерями на основе поперечно-связанной структуры. – Электронная промышленность. Наука. Технологии. Издания, 2004, №1, с.19–25.
12. **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, т.53, №7, с.887–896.
13. **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.
14. **Сеницына Т.В., Багдасарян А.С., Егоров Р.В.** ПАВ-фильтры на основе продольно-связанных структур. – Электронная промышленность. Наука. Технологии. Издания, 2004, с.14–19.
15. **Сеницына Т.В., Прапорщиков В.В., Багдасарян А.С.** Резонаторные ПАВ-фильтры для систем связи. – Материалы 14-й Международной конференции КрыМиКо-2004 "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Украина, 2004, с.472–473.