

ФИЛЬТРЫ НА ПАВ – УСКОРЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Полосовые фильтры на ПАВ наиболее часто используются в современных системах связи и устройствах беспроводной передачи данных благодаря своей миниатюрности, надежности, термостабильности и способности реализовать сложные частотные характеристики. Более эффективное использование существующих и поиск новых методов снижения трудозатрат и временных затрат являются одной из приоритетных задач в области проектирования фильтров на ПАВ. В статье рассказывается о некоторых методах работы с топологией фильтров, которые позволяют на основе предыдущих разработок существенно упростить разработку новых ПАВ-фильтров.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Современный полосовой фильтр на ПАВ представляет собой акустоэлектронное устройство, служащее для выделения определенного диапазона частот из всего частотного спектра. Принцип работы этого устройства основан на частотно-зависимом преобразовании входного электромагнитного сигнала в акустический в передающем встречно-штырьевом преобразователе (ВШП) и его обратном преобразовании в электромагнитный сигнал на выходе (в принимающем ВШП) [1] (рис.1).

Скорость распространения ПАВ в кристалле на несколько порядков меньше скорости электромагнитной волны (~3–4 км/с против $3 \cdot 10^5$ км/с). Соответственно, длина ПАВ во столько же раз меньше длины электромагнитной волны (при той же частоте) и обычно составляет от единиц до десятков микрон, в зависимости от частоты. Период ВШП (длина его элементарной повторяющейся секции) равен длине волны, то есть элементы преобразователей очень компактны – в этом одно из основных преимуществ фильтров на ПАВ.

Основными параметрами полосового фильтра являются: центральная частота, полоса пропускания по определенному уровню, пульсации группового времени запаздывания (ГВЗ) сигнала в полосе пропускания, вносимые потери, неравномерность в полосе пропускания и затухание сигнала в полосе заграждения (или избирательность).

И.Туркин,
stor007@bk.ru

В настоящий момент ПАВ-технология позволяет реализовать фильтры с центральными частотами от десятков мегагерц до нескольких гигагерц, вносимыми потерями от 20 до 2 дБ и менее (в зависимости от относительной полосы пропускания и типа фильтра), избирательностью 40–60 дБ и более, неравномерностью АЧХ в полосе пропускания менее 0,5 дБ и пульсациями группового времени запаздывания сигнала в полосе менее 10 нс (в зависимости от частоты и относительной полосы). Размеры элементов топологии новейших ПАВ-фильтров на частоты 1,5–2 ГГц могут составлять 0,5 мкм и менее. Основными материалами, на базе которых реализуются фильтры на ПАВ, обычно служат ориентированные пьезоэлектрические монокристаллы танталата и ниобата лития, кварца, лантаногалиевого силиката (лангасита) и некоторые другие.

Проектирование современного фильтра на ПАВ – довольно сложная и трудоемкая задача [1–3], особенно если учесть, что за последние несколько лет требования к ним заметно возросли. Часто задача еще более усложняется, поскольку многие требования являются взаимоисключающими. Характерным примером может служить одновременное требование широкой полосы пропускания (>20%), малых потерь (<10 дБ) и пульсаций АЧХ в полосе (<1 дБ) при высоком уровне подавления сигнала за полосой (>40 дБ). Реализовать фильтр на ПАВ с подобными требованиями под силу далеко не каждому разработчику, так как это требует применения структур ВШП довольно сложной конфигурации [3].

Однако существуют некоторые простые методы модификации топологий, которые в ряде случаев позволяют избегать многократных итераций и разработок "с нуля", если уже имеются опробованные разработки фильтров на ПАВ.

МЕТОД ТРАНСЛЯЦИИ ТОПОЛОГИИ ВШП

Метод трансляции топологии ВШП известен давно. Он базируется на физических принципах распространения ПАВ и заключается в масштабировании исходной топологии пропорционально изменению частоты. Как известно, частота обратно пропорциональна длине волны:

$$\lambda = V_0 / f_0,$$

где V_0 – скорость распространения ПАВ в кристалле, f_0 – центральная частота.

Длина ПАВ, как отмечалось, соответствует периоду ВШП. Поэтому частота f_0 связана с периодом p выражением $f_0 = V_0 / p$. Следовательно, отмасштабировав размеры топологии фильтра, спроектированного на частоту f_1 , в k раз, мы получим фильтр с центральной частотой $f_2 = f_1 \cdot k$, который имеет сходную АЧХ на пропорционально изменившихся частотах.

Однако при таком масштабировании в соответствующее число раз уменьшается и расстояние между передающим и принимающим ВШП, а следовательно, возрастает и доля паразитного электромагнитного сигнала. Это происходит из-за того, что часть энергии входного сигнала передается принимающему ВШП без преобразования в ПАВ. В результате оба ВШП начинают частично работать как приемная и передающая антенна, что несколько ухудшает подавление сигнала за полосой. Также в соответствующее число раз изменяются требования к разрешающей способности фотолитографического оборудования, так как размеры модифицированной структуры ВШП изменяются в k раз.

Абсолютная полоса пропускания фильтра, оттранслированного с исходного, изменяется пропорционально изменению частоты:

$$\Delta f_2 = \Delta f_1 \cdot k,$$

где Δf_1 – абсолютная полоса пропускания исходного фильтра, Δf_2 – абсолютная полоса пропускания оттранслированного фильтра.

При этом данный метод не позволяет изменить относительную полосу пропускания оттранслированного фильтра ΔF :

$$\Delta F_2 = \Delta F_1.$$

Следует также помнить, что при использовании метода трансляции топологии необходимо проводить и масштабирование толщины металлизации в k раз.

Во многих случаях метод трансляции топологии позволяет получить хороший, предсказуемый результат и значитель-

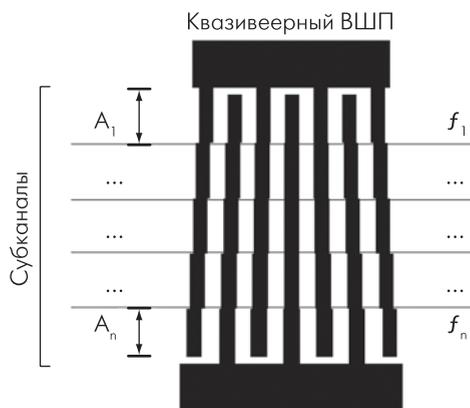


Рис.2. Условное разбиение квазиеверного ВШП на субканалы

но уменьшить трудоемкость при разработке фильтра на ПАВ при наличии соответствующих наработок. Однако нужно учитывать описанные ограничения метода.

МЕТОД ЭКСТРАПОЛЯЦИИ КВАЗИЕВЕРНЫХ ВШП

Совсем недавно нами был опробован сравнительно новый метод экстраполяции квазиеверных ВШП. Основное его достоинство в том, что с его помощью удалось изменить

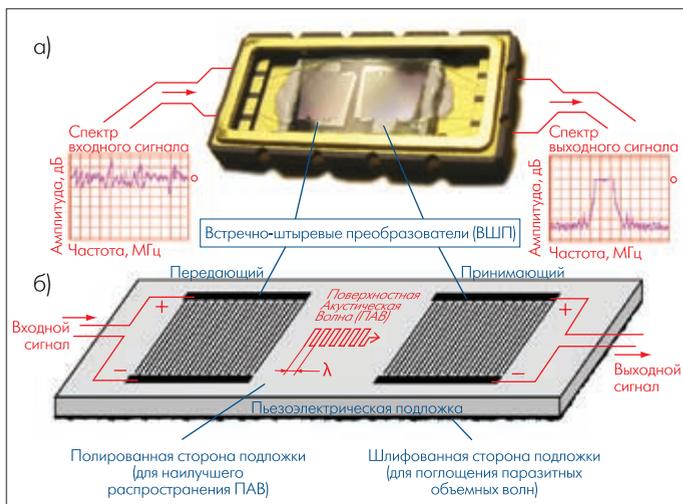


Рис. 1. Современный ПАВ-фильтр на 70 МГц в SMD-корпусе 13,3×6,5 мм: а – внешний вид (без крышки) и АЧХ сигналов, б – упрощенная схема работы

Параметры исходных и разработанных фильтров в согласованном режиме

Параметр	ФП-457	ФП-414	ФП-59	ФП-483
Центральная частота f_0 , МГц	70,0	70	140	37
Вносимые потери, дБ	9,4	11,5	22,5	22,1
Полоса пропускания по уровню -1 дБ, МГц	8,89	10,7	76,5	21,8
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	9,47	11,35	79,6	22,5
Полоса пропускания по уровню -40 дБ, МГц	13,0	14,4	90,0	25,1
Неравномерность АЧХ в полосе частот 70% от ВВЗ* ($f_0 \pm 4$ МГц), дБ	0,5	0,4	0,7	0,7
Неравномерность ГВЗ в полосе частот 70% от ВВЗ ($f_0 \pm 4$ МГц), нс	80	40	15	65
Время задержки, мкс	1,1	0,98	0,98	1,65
Затухание в полосе заграждения, дБ	45	45	40	40
Рабочая температура, °С	-55...85	-55...85	-55...85	-55...85
Сопротивление генератора/нагрузки, Ом	50/50	50/50	50/50	50/50
Относительная полоса пропускания по уровню -3 дБ, %	13,5	16,2	56,9	60,8

*ВВЗ (bandwidth 3) – полоса пропускания по уровню -3 дБ.

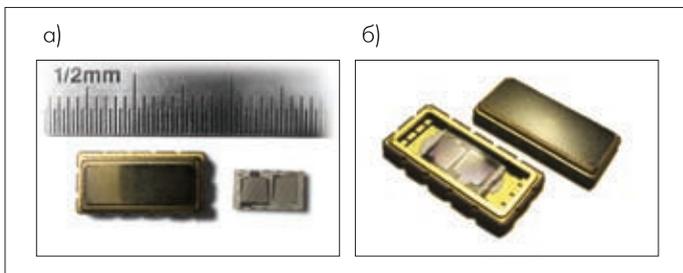


Рис.3. Фильтр ФП-457 в SMD-корпусе 13,3×6,5 мм: а – сравнительные размеры фильтра в корпусе и чипа, б – фильтр в корпусе без крышки

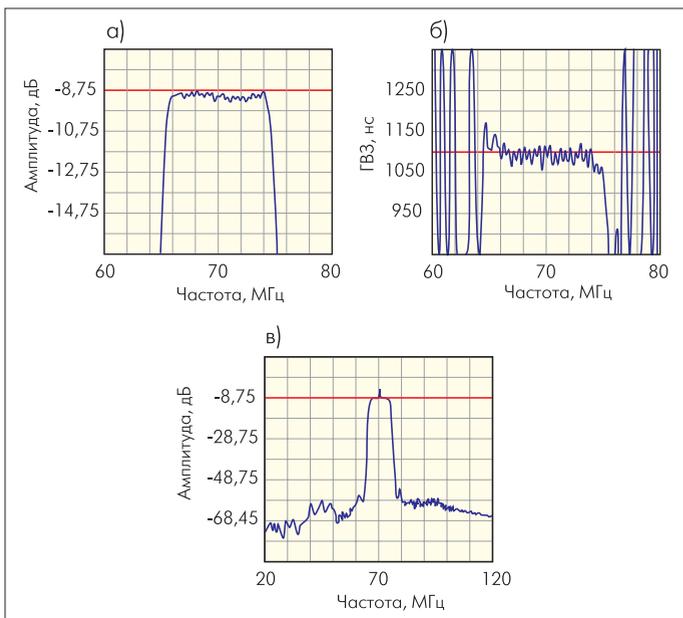


Рис.4. Характеристики фильтра ФП-457 в согласованном режиме: а – АЧХ в полосе пропускания, б – ГВЗ в полосе пропускания, в – АЧХ в широком диапазоне частот

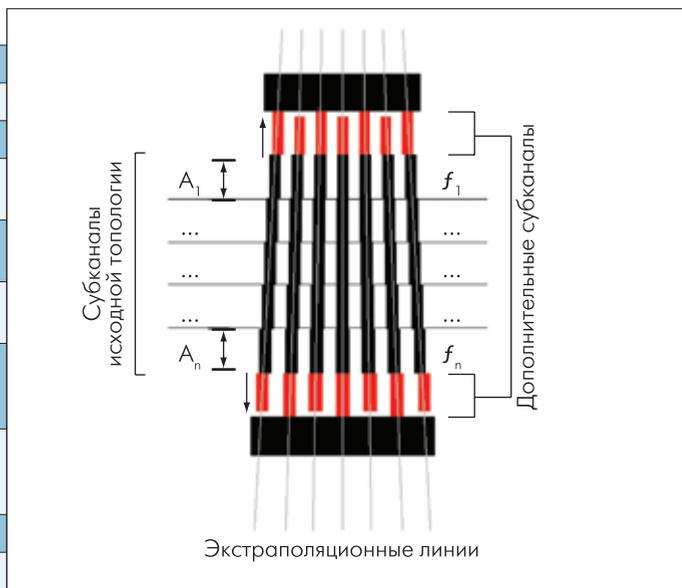


Рис.5. Квазивеерный ВШП, модифицированный методом экстраполяции

относительную полосу пропускания ПАВ-фильтров на базе квазивеерных ВШП. Квазивеерная структура представляет собой ВШП с электродами, направляющие линии которых расположены под малым углом по отношению друг к другу [4]. Они разбиваются на секции, что обусловлено особенностями фотолитографического оборудования (рис.2). Каждый ряд таких секций условно называют субканалом, который рассчитан на определенную длину ПАВ λ_n , соответствующую определенной частоте f_n . Каждый субканал помимо периода электродов (длины волны) характеризуется собственной апертурой A_n , определяющей ширину излучаемого им акустического потока. Число электродов во всех каналах одинаково, так как каждый следующий субканал является, по сути, продолжением предыдущего (см. рис.2).

Таким образом, квазивеерный ВШП представляет собой систему n субканалов, длина волны λ_n и апертура A_n каждого из которых отличается от предыдущего и изменяется по определенному закону (линейному или гиперболическому), заложенному при его разработке. Относительная полоса пропускания фильтра напрямую зависит от количества этих субканалов. Поэтому, если убрать или добавить субканалы сверху и снизу преобразователя в пределах 20–30% от их общего числа, продолжая заложенную закономерность изменения периода и апертуры (в случае добавления), то полоса пропускания фильтра изменится пропорционально изменению числа субканалов.

Для проверки этого простого метода были проведены эксперименты, в ходе которых предполагаемые результаты подтвердились с высокой точностью. В первом эксперименте в качестве базовой топологии был взят фильтр ФП-457 на частоту 70 МГц с полосой пропускания 9 МГц (70В9 МГц) (рис.3,4, таблица).

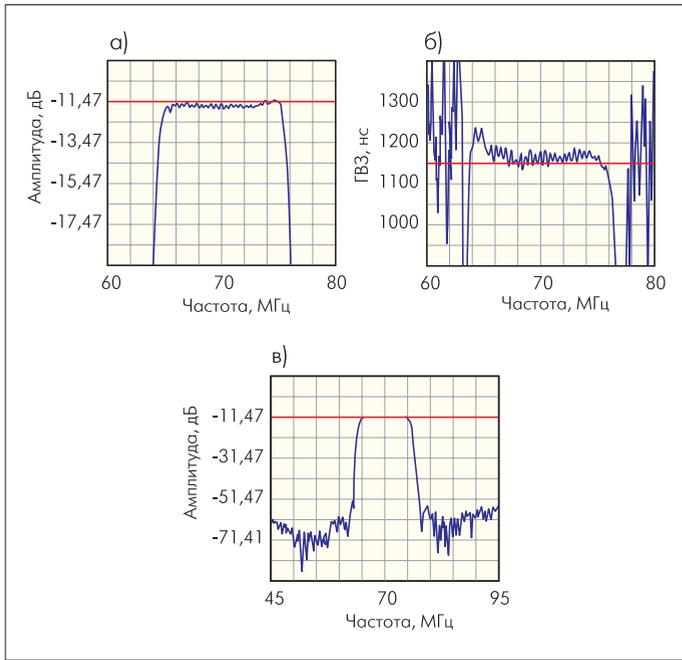


Рис.6. Характеристики фильтра ФП-414 в согласованном режиме: а – АЧХ в полосе пропускания, б – ГВЗ в полосе пропускания, в – АЧХ в широком диапазоне частот

Было решено увеличить относительную полосу пропускания фильтра ФП-457 на 20%, максимально сохранив при этом остальные его характеристики. Для этого в файле топологии исходного фильтра ФП-457 были построены дополнительные субканалы с учетом закона их изменения относительно уже существующих (рис.5). Используя топологию исходного преобразователя, были сформированы экстраполяционные линии вдоль всех его штырей, продолжающие их с учетом закономерности изменения их длины

волны λ_n и апертуры A_n . Вдоль этих экстраполяционных линий были размещены субканалы (20% от их исходного числа) с учетом закономерности изменения их длины волны λ_n и апертуры A_n . Это соответствует предполагаемому увеличению относительной полосы пропускания фильтра:

$$\Delta F_2 = \Delta F_1 \cdot (n_2/n_1),$$

где ΔF_1 – относительная полоса пропускания исходного фильтра, ΔF_2 – относительная полоса модифицированного фильтра, n_1, n_2 – исходное и конечное количество субканалов.

После модификации исходной топологии модифицированный фильтр (ФП-414) был запущен в производство и реализован на базе пластины ниобата лития LiNbO_3 среза YZ – так же, как и исходный фильтр. Полоса пропускания полученного фильтра увеличилась на 20,6% по уровню -1 дБ и на 19,8% по уровню -3 дБ (рис.6, см. таблицу). Остальные параметры практически не изменились. Незначительные отличия в неравномерности группового времени запаздывания и вносимых потерях на представленных характеристиках обусловлены влиянием согласующих цепей. При более тщательном согласовании можно добиться, что эти отличия будут незаметны. Ширина переходных полос на склонах АЧХ также осталась прежней.

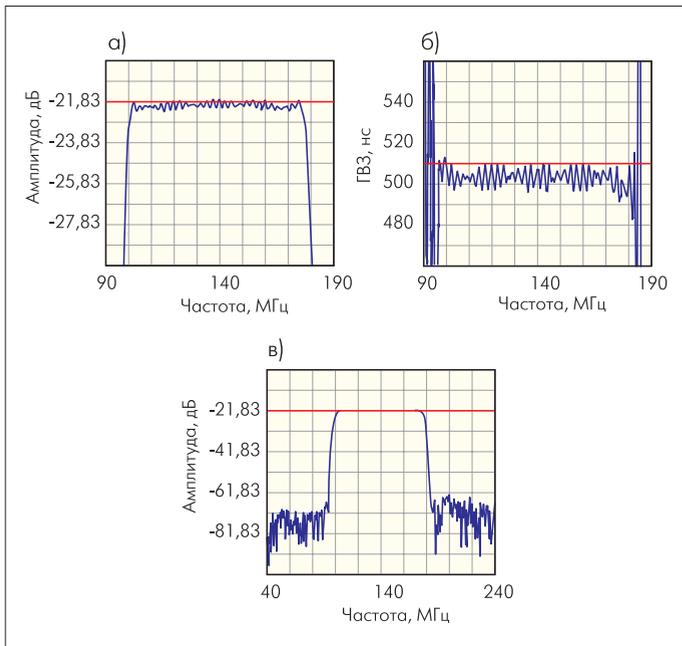


Рис.7. Характеристики сверхширокополосного фильтра ФП-59 в согласованном режиме: а – АЧХ в полосе пропускания, б – ГВЗ в полосе пропускания, в – АЧХ в широком диапазоне частот

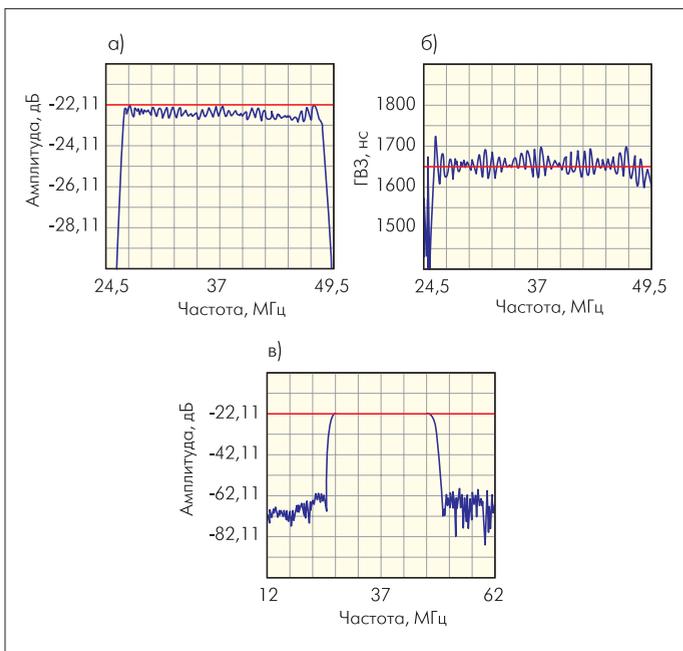


Рис.8. Характеристики фильтра ФП-483 в согласованном режиме:
а – АЧХ в полосе пропускания, б – ГВЗ в полосе пропускания,
в – АЧХ в широком диапазоне частот

Еще одним примером может служить фильтр ФП-483 (37В22 МГц), спроектированный с применением обоих методов – экстраполяции ВШП и трансляции топологии. В качестве исходного был взят сверхширокополосный фильтр ФП-59 (140В80 МГц) (рис.7, см. таблицу).

Исходная топология фильтра ФП-59 была отмасштабирована в 3,784 раза с целью переноса центральной частоты со 140 МГц на 37 МГц. Затем, чтобы расширить относительную полосу пропускания, были добавлены два субканала по алгоритму, описанному в предыдущем примере. Это соответствует увеличению полосы пропускания на 5% (исходное число субканалов в данном случае равнялось 40). Кроме того, было уменьшено расстояние между преобразователями с целью уменьшения габаритов чипа и влияния расхождения акустического пучка в квазивеерных ВШП.

При сравнении характеристик модифицированного (ФП-483) (рис.8, см. таблицу) и исходного фильтров можно наблюдать почти прямую корреляцию между числом субканалов n , построенных по заложенному при проектировании фильтра закону, и относительной полосой пропускания фильтра ΔF . Единственным существенным отличием здесь является увеличение пульсаций ГВЗ, что связано с увеличением размеров структуры и, как следствие, времени запаздывания.

Таким образом, можно говорить о хорошо предсказуемом смещении по частоте границ полосы пропускания на заданную дискретную величину, зависящую от числа субканалов фильтра. Смещаться могут как обе границы, так и одна из них. Такие смещения можно использовать для коррекции центральной частоты фильтра – в этом случае экс-

траполяцию квазивеерных ВШП следует проводить лишь с одной стороны.

Эксперименты подтвердили, что можно увеличивать или уменьшать (в этом случае лишние субканалы удаляются) относительную полосу пропускания квазивеерных фильтров на ПАВ в пределах 20–30% от исходной, без значительного ущерба для остальных характеристик. Теоретически, можно модифицировать топологию и в больших пределах, однако в этом случае дальнейшие модификации могут вызвать сильное рассогласование сопротивлений фильтра, генератора и нагрузки и, как следствие, плохо предсказуемые изменения характеристик фильтра.

МОДИФИКАЦИЯ АПЕРТУРЫ ВШП

Апертура преобразователей влияет главным образом на их емкость и, как следствие, на входное сопротивление всего фильтра. В квазивеерных ВШП, при прочих равных условиях, от апертуры также зависит угол расхождения между направляющими линиями электродов, а следовательно, и угол расхождения акустического потока, излучаемого передающим преобразователем.

К масштабированию апертуры ВШП обычно прибегают, когда требуется изменить его входное/выходное сопротивление для лучшего согласования фильтра с нагрузкой и генератором, а также в силу ограничений внутренних габаритов корпуса. Увеличение апертуры в квазивеерных фильтрах способствует уменьшению угла расхождения акустического потока и, как следствие, некоторому улучшению характеристики в целом (по вносимым потерям, пульсациям АЧХ в полосе, кривизне АЧХ в полосе и некоторым другим, в зависимости от структуры).

Используя метод экстраполяции ВШП, следует иметь в виду, что добавление или удаление субканалов для коррекции относительной полосы пропускания меняет и электрические параметры фильтра, например сопротивление преобразователя. Поэтому нужно учитывать это изменение и дополнительно масштабировать общую апертуру (сумму апертур всех субканалов) преобразователя с соответствующим коэффициентом:

$$K = \frac{A}{A \pm A_{\text{mod}}},$$

где K – коэффициент масштабирования апертуры, A – исходная апертура преобразователя, A_{mod} – суммарная апертура добавленных (+) или удаленных (-) электродов.

Такая процедура нужна для максимального сохранения (если это необходимо) остальных электрических параметров фильтра (помимо полосы пропускания). Также модификацию апертуры можно производить для отдельных субканалов, меняя их относительный вклад в акустический поток, чтобы более точно формировать АЧХ фильтра на определенных диапазонах частот.



ИЗМЕНЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Расстояние между преобразователями влияет главным образом на время задержки сигнала, пульсации ГВЗ и на АЧХ в полосе, что связано с расхождением акустического пучка в квазивеерных ВШП. После применения метода трансляции топологий или метода экстраполяции квазивеерных ВШП иногда имеет смысл уменьшить расстояние между преобразователями. Это позволяет в случае необходимости снизить влияние расхождения акустического пучка в квазивеерных ВШП, уменьшить пульсации ГВЗ, а также уменьшить габаритные размеры чипа, что часто является практической необходимостью.

Представленные несложные методы коррекции топологии ВШП с успехом используются на практике и дают возможность существенно снизить трудоемкость и временные затраты на разработку многих ПАВ-фильтров при наличии соответствующих исходных наработок. Наиболее эффективным и полезным является метод экстраполяции квазивеерных ВШП. Он существенно расширяет возможности разработчиков и является несложным в освоении, поскольку операции производятся непосредственно с топологией квази-веерных фильтров на ПАВ. Следует, однако, отметить, что такие методы не могут полностью заме-

нить собой традиционные сложные методы проектирования и моделирования ПАВ-фильтров, особенно на этапе, когда разработчик не обладает соответствующими исходными наработками.

Автор выражает благодарность сотрудникам технического Центра функциональной электроники ОАО "МНИИРС" за предоставление материалов по фильтрам на ПАВ и технологической базы для проведения экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yatsuda H.** Design Technique for SAW Filters Using Slanted Finger Interdigital Transducers. – IEEE Trans. on UFFC, V. 44, No. 2, March 1997.
2. **Орлов В.С., Бондаренко В.С.** Фильтры на ПАВ. – М.: Радио и связь, 1981.
3. **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.
4. **Chvets V.B., Ivanov P.G., Makarov V.M., Orlov V.S.** Low-Loss Filters Using New SPUDT Structures. – IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1997.