

Илья Туркин  
stor007@bk.ru

# Методы модификации структур фильтров на ПАВ

**ПАВ-фильтры являются одними из наиболее используемых в современных системах связи и устройствах беспроводной передачи данных в силу их миниатюрности, надежности и возможности реализации сложных частотных характеристик.**

Разработка современного фильтра на ПАВ сложный и трудоемкий процесс, занимающий много времени, поэтому использование существующих и поиск новых методов разработки, позволяющих снизить трудовые и временные затраты, является одной из приоритетных задач в области проектирования этих устройств. В этой статье рассказывается о некоторых простых методах, позволяющих существенно упростить разработку новых фильтров на ПАВ при наличии соответствующих наработок. Детально рассмотрены метод трансляции топологии и метод экстраполяции ВШП, а также представлены результаты измерений фильтров, разработанных с помощью этих методов.

Разработка современного фильтра на ПАВ, отвечающего высоким техническим требованиям, является довольно сложной и трудоемкой задачей, особенно если учесть, что эти требования за последние несколько лет существенно выросли. Зачастую задача еще осложняется тем, что многие требования являются взаимоисключающими. Характерным примером может служить одновременное требование заказчиком широкой полосы пропускания (>30%),

малых потерь (<15 дБ) и пульсаций в полосе (<1 дБ) при высоком уровне подавления сигнала за полосой (>40 дБ). Реализовать фильтр на ПАВ с подобными параметрами под силу далеко не каждому разработчику, так как это требует использования веерных однонаправленных структур ВШП довольно сложной конфигурации. Разработка топологических структур такого типа обычно предполагает не одну итерацию «разработка => производство => тестирование => коррекция разработки», что требует много времени и вынуждает изготовителя нести большие расходы, которые могут даже поставить под сомнение рентабельность разработки.

Однако существуют некоторые простые методы модификации топологий, позволяющие в ряде случаев избежать многократных итераций, если уже имеются в наличии опробованные разработки фильтров на ПАВ со сходными относительными параметрами. Поясняя сказанное на примере, приведем несколько довольно эффективных приемов, существенно упрощающих и ускоряющих проектирование фильтров на ПАВ.

## Метод трансляции топологии ВШП

Уже давно известен метод трансляции топологии ВШП. Он является прямым следствием физических принципов распространения ПАВ и заключается в масштабировании исходной топологии пропорционально изменению частоты. Как известно из основ физики, в общем случае частота обратно пропорциональна длине волны ( $f \sim 1/\lambda$ ):

$$\lambda = V_0/f_0,$$

где  $V_0$  — скорость распространения ПАВ в кристалле;  $f_0$  — центральная частота.

Следовательно, отмасштабировав структуру фильтра, спроектированного на частоту  $f_1$  в  $k$  раз, мы получим фильтр с центральной частотой  $f_2$ :

$$f_2 = f_1 \times k,$$

имеющий сходную АЧХ на пропорционально изменившихся частотах. Однако реально при таком масштабировании у нас в соответствующее число раз уменьшается и расстояние между передающим и принимающим ВШП, а следовательно, увеличивается и доля паразитного элек-

## Список использованных сокращений

**ПАВ** — поверхностная акустическая волна.  
**АЧХ** — амплитудно-частотная характеристика.  
**ГВЗ** — групповое время запаздывания.  
**ВШП** — встречно-штыревой преобразователь.  
**ВВШП** — веерный встречно-штыревой преобразователь.  
**ЭМ** — электромагнитный.  
**SMD (Surface Montage Device)** — устройство для поверхностного монтажа.

ромагнитного сигнала в силу того, что оба ВШП начинают работать как приемная и передающая антенна, что несколько ухудшает подавление сигнала за полосой. К тому же в соответствующее число раз изменяются требования к разрешающей способности фотолитографического оборудования, так как минимальные размеры модифицированной структуры ВШП изменяются в  $k$  раз. Абсолютная полоса пропускания фильтра, оттранслированного с исходного, тоже изменится пропорционально изменению частоты:

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

где  $\Delta f_1$  — абсолютная полоса пропускания исходного фильтра,  $\Delta f_2$  — абсолютная полоса пропускания оттранслированного фильтра. При этом относительная полоса пропускания оттранслированного фильтра  $\Delta F$  не изменится:

$$\Delta F_2 = \Delta F_1,$$

что является основным ограничением применимости данного метода.

Во многих случаях этот метод позволяет получить хороший, предсказуемый результат и значительно уменьшить трудоемкость при разработке фильтра на ПАВ при наличии соответствующих разработок, однако следует учитывать ограничения метода, о которых было сказано выше.

## Метод экстраполяции веерных ВШП

Совсем недавно автором был опробован сравнительно новый метод экстраполяции ВШП. С его помощью мы получили возможность расширения относительной полосы пропускания ПАВ-фильтров на базе ВШП. Это возможно путем добавления дополнительных акустических субканалов, построенных с учетом уже заложенной закономерности изменения их шага (апертуры) для достижения необходимой относительной полосы пропускания.

Веерная или, правильнее сказать, квазивеерная структура представляет собой ВШП с электродами, расположенными под некоторым малым углом по отношению друг к другу и разбитыми на секции (это связано с особенностями фотолитографического оборудования). Каждый ряд таких секций условно называют субканалом, который рассчитан на определенную длину волны  $\lambda_n$ , соответствующую определенной частоте  $f_n$ . Каждый субканал, помимо периода электродов (длины волны), еще характеризуется собственной апертурой  $A_n$ , определяющей ширину акустического потока, им излучаемого. Число электродов во всех каналах одинаково, так как каждый следующий субканал по сути является продолжением предыдущего (рис. 1).

Таким образом, ВШП представляет собой систему  $n$  субканалов, длина волны  $\lambda_n$  и апертура  $A_n$  каждого из которых отличается от предыдущего и изменяется по определенному закону (линейному или гиперболическому), заложенному при его разработке. Поскольку при прочих равных параметрах относительная полоса пропускания фильтра напрямую зависит от количества этих субканалов, и если убрать или добавить их ряды сверху и снизу, продол-

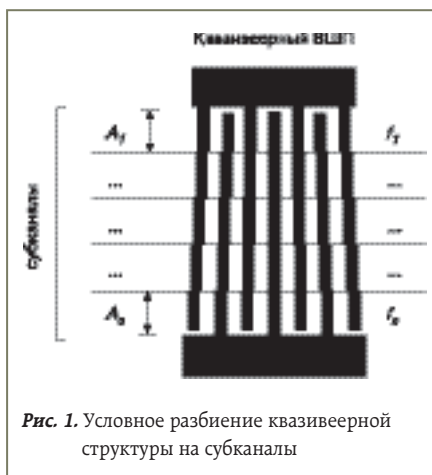


Рис. 1. Условное разбиение квазивеерной структуры на субканалы

жая заложенную закономерность изменения периода и апертуры, то полоса пропускания фильтра изменится пропорционально изменению их количества.

Для проверки этого простого метода были проведены эксперименты, в ходе которых предполагаемые результаты подтвердились с высокой точностью. За базовую топологию был взят фильтр ФП-457 на частоту 70 МГц с полосой пропускания 9 МГц (рис. 2).



Рис. 2. Фильтр ФП-457 в SMD-корпусе на частоту 70 МГц и его чип (сравнительные размеры)

Его характеристики в согласованном режиме приведены на рис. 3 и в таблице 1.

Для изучения степени предсказуемости вышеописанного простого метода было решено произвести попытку увеличить относительную полосу пропускания нашего фильтра на 20%, минимально затронув при этом остальные его характеристики.

Для этого в электронном носителе топологии исходного фильтра ФП-457 были достроены

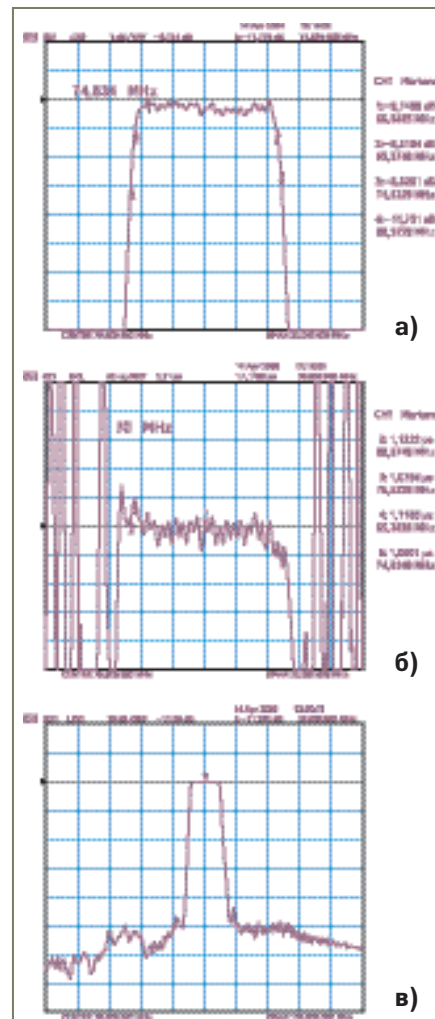


Рис. 3. Характеристики оригинального фильтра на частоту 70 МГц в согласованном режиме: а) АЧХ в полосе пропускания; б) ГВЗ в полосе пропускания; в) АЧХ в широком диапазоне частот

дополнительные субканалы с учетом закона их изменения относительно уже существующих. Это добавление каналов схематично показано на рис. 4.

На основе топологии исходного преобразователя были построены экстраполяционные линии вдоль всех его штырей, продолжающие их с учетом закономерности изменения их длины волны  $\lambda_n$  и апертуры  $A_n$ . После их построения стало

Т а б л и ц а 1. Параметры исходного фильтра (ФП-457)

Параметр	обознач.	ФП-457
Центральная частота, МГц	$F_0$	70,0
Вносимые потери, дБ	IL	9,4
Полоса пропускания по уровню -1 дБ, МГц	BW1	8,89
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	BW3	9,47
Полоса пропускания по уровню -40 дБ, МГц	BW40	13,0
Неравномерность АЧХ в полосе частот 70% от BW3 ( $F_0 \pm 4$ МГц), дБ	AR	0,5
Неравномерность ГВЗ в полосе частот 70% от BW3 ( $F_0 \pm 4$ МГц), нс	GDV	80
Время задержки, мкс		1,1
Затухание в полосе заграждения, дБ	UR	45
Рабочая температура, °C		25
Сопровождающие сопротивления генератора и нагрузки, Ом	$R_g/R_l$	50/50
Температурный коэффициент (YZ LiNbO <sub>3</sub> ), млн <sup>-1</sup> /°C	TCD	-90

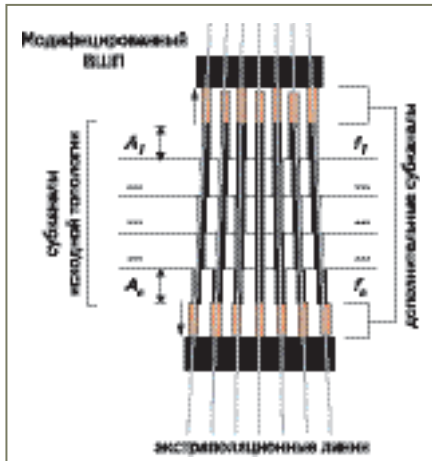


Рис. 4. Базовый квазиверный ВШП, модифицированный методом экстраполяции (красным цветом показаны добавленные субканалы)

понятно, что сопоставлять электроды добавленных субканалов достаточно только с двумя крайними, так как все остальные функции этих линий могут быть получены домножением одной из этих двух линий на соответствующий коэффициент, уменьшающийся к центру преобразователя. Такой вывод был сделан после машинного анализа координат элементов топологии, который показал, что экстраполяционные линии представляют собой функции гипербол, отличающихся только коэффициентом (фактически, в большинстве случаев эти гиперболы выражены настолько слабо, что в первом приближении их можно заменить прямыми). Вдоль этих экстраполяционных линий было добавлено некоторое количество субканалов с учетом закономерности изменения их длины волны  $\lambda_n$  и апертюры  $A_n$ , число которых составляет 20% от исходного их количества, что соответствует предполагаемому увеличению относительной полосы пропускания фильтра.

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

где  $\Delta F_1$  — относительная полоса пропускания исходного фильтра,  $\Delta F_2$  — относительная полоса модифицированного фильтра,  $n_1, 2$  — исходное и конечное количество субканалов. После модифицирования исходной топологии полученный фильтр был запущен в производство и реализован на базе пластины ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  (срезы YZ). Его характеристики

Т а б л и ц а 2. Параметры модифицированного фильтра (ФП-414)

Параметр	обознач.	ФП-414
Центральная частота, МГц	$F_0$	70
Вносимые потери, дБ	IL	11,5
Полоса пропускания по уровню -1 дБ, МГц	BW1	10,7
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	BW3	11,35
Полоса пропускания по уровню -40 дБ, МГц	BW40	14,4
Неравномерность АЧХ в полосе частот 70% от BW3 ( $F_0 \pm 4$ МГц), дБ	AR	0,4
Неравномерность ГВЗ в полосе частот 70% от BW3 ( $F_0 \pm 4$ МГц), Нс	GDV	40
Время задержки, мкс		0,98
Затухание в полосе заграждения, дБ	UR	45
Рабочая температура, °С		25
Сопротивления генератора и нагрузки, Ом	$R_s/R_L$	50/50
Температурный коэффициент (YZ $\text{LiNbO}_3$ ), $\text{млн}^{-1}/^\circ\text{C}$	TCD	-90

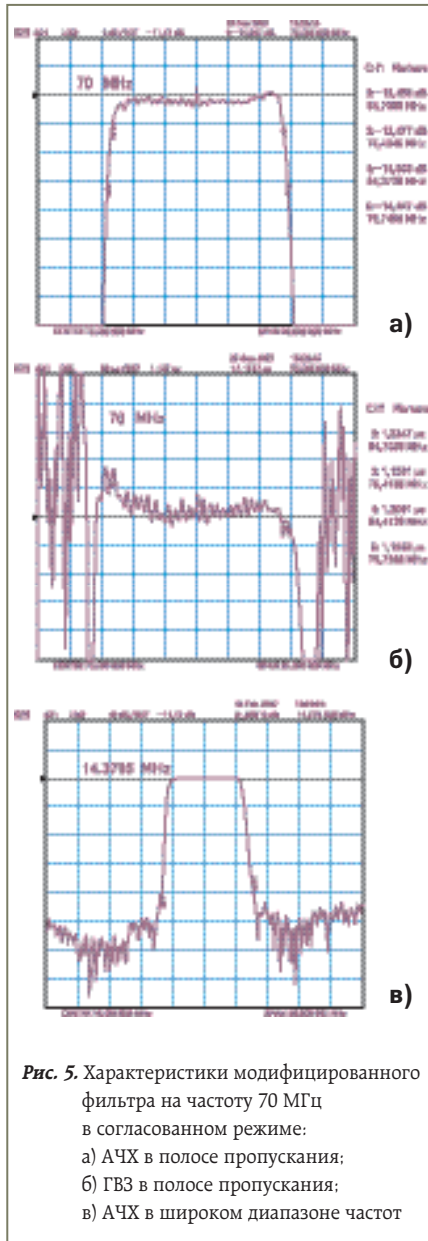


Рис. 5. Характеристики модифицированного фильтра на частоту 70 МГц в согласованном режиме:  
а) АЧХ в полосе пропускания;  
б) ГВЗ в полосе пропускания;  
в) АЧХ в широком диапазоне частот

в согласованном режиме приведены на рис. 5 и в таблице 2.

Представленные характеристики являются наиболее типичными для полученных фильтров (было испытано 10 образцов). Полоса пропускания фильтра увеличилась на 20,6% по уровню 1 дБ и на 19,8% по уровню 3 дБ, что можно видеть из рис. 3, 5 и таблиц 1, 2. Что касается остальных параметров, то они практически не изменились.

Отличия в неравномерности группового времени запаздывания (GDV) и вносимых потерях обусловлены в данном случае влиянием согласующих цепей, которые могут быть подобраны таким образом, что эти отличия перестанут быть видны. Коэффициент прямоугольности изменился именно в такой мере, в какой это обуславливает уширение полосы пропускания, то есть угол наклона и форма АЧХ на границах полосы пропускания в системе координат дБ/МГц остались прежними. Налицо прямая корреляция между количеством субканалов  $n$ , построенных по заложенному при проектировании фильтра закону, и относительной полосой пропускания фильтра  $\Delta F$ . Таким образом, можно говорить о хорошо предсказываемом смещении по частоте границ полосы пропускания на заданную величину, причем смещение может быть как обеих границ, так и отдельно взятой, что может использоваться для коррекции АЧХ фильтра, — в этом случае экстраполяцию ВШП следует проводить лишь с одной стороны.

## Модификация апертюры ВШП

Апертура любого ВШП влияет на множество характеристик фильтра, таких как эффективность преобразователя, его емкость, степень ЭМ наводки, входное сопротивление и некоторые другие. В ВШП, при прочих равных условиях, от нее также еще зависит угол расхождения между электродами, а следовательно, и влияние дифракции ПАВ на акустический поток, излучаемый передающим преобразователем.

К масштабированию апертюры ВШП обычно прибегают, когда требуется изменить его входное или выходное сопротивление для лучшего согласования фильтра с нагрузкой и генератором, а также в силу ограничений внутренних габаритов корпуса.

## Заключение

Представленные методы модификации топологии ВШП с успехом используются на практике и позволяют существенно снизить трудоемкость и временные затраты на разработку многих фильтров на ПАВ при наличии соответствующих исходных наборок. В особенности полезным и эффективным является метод экстраполяции ВШП, существенно расширяющий возможности разработок путем непосредственной работы с топологией веерных структур фильтров на ПАВ. □

## Литература

1. Yatsuda H. Design Technique for SAW Filters Using Slanted Finger Interdigital Transducers. IEEE Trans. on UFFC, Vol. 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.