КВАЗИВЕЕРНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПАВ: ЧАСТОТЫ, ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ, КОРРЕКЦИЯ АЧХ

И.Туркин, к.т.н. stor007@bk.ru

Фильтры на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) давно и широко используются в различных типах электронных устройств. О принципах функционирования и характеристиках ПАВ-фильтров написано немало [1, 2]. В данной статье рассматривается один из важных подтипов ПАВ-фильтров – квазивеерные фильтры на базе однофазных однонаправленных преобразователей (ОФНП).

ОСОБЕННОСТИ КВАЗИВЕЕРНЫХ ПАВ-ФИЛЬТРОВ НА БАЗЕ ОДНОФАЗНЫХ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ВШП

За последние 15 лет в техническом центре функциональной электроники (ТЦФЭ) ОАО "МНИИРС", а впоследствии и в лаборатории "Акустоэлектронные устройства" ФГОБУ ВПО МТУСИ было разработано большое количество фильтров на ПАВ различного назначения и применения [3].

Их характеристики, параметры и типы были проанализированы и сведены в единую частотно-полосную диаграмму (рис.1). Для диаграммы был выбран логарифмический масштаб по обеим шкалам, чтобы наиболее равномерно разместить на координатном поле все точки (всего было обработано более 300 типов фильтров).

Особое место в этом ряду занимают квазивеерные фильтры на базе ОФНП [3–6, 7]. На диаграмме показана ориентировочная частотно-полосная область их применения (голубым цветом, см. рис.1). Как видно из диаграммы, квазивеерные ПАВ-фильтры на базе ОФНП применяются преимущественно в диапазоне частот 30–500 МГц и полос 4–60%. Они являются подвидом и развитием обычных трансверсальных фильтров на ПАВ и позволяют реализовать более широкую полосу пропускания при меньших вносимых потерях (на 5–15 дБ). Кроме того, в фильтрах этого типа достижимы малые пульсации АЧХ (<1 дБ) и группового времени запаздывания (в некоторых случаях <10 нс) в полосе пропускания при сохранении избирательности до 40 дБ и более.

Изготовление квазивеерных фильтров на ОФНП для более высоких частот затруднительно, так как требует повышения разрешающей способности фотолитографического оборудования и усложнения технологических процессов (в связи с использованием в элементарных секциях электродов шириной λ/8 и λ/16, где λ – длина волны, равная длине элементарной секции). На высоких частотах также увеличиваются сложность подбора согласующих цепей и их влияние на частотную характеристику.

Реализация на более низких частотах приводит к увеличению размеров подложки и, как следствие, повышению расхода материалов и использованию металлостеклянных DIP-корпусов, имеющих значительно большие габариты, вес, цену, и менее технологичных, чем стандартные SMD-корпуса.

Каждый встречно-штыревой преобразователь (ВШП) квазивеерного ПАВ-фильтра на базе ОФНП представляет собой каскадно соединенные каналы, с апертурами от A_1 до A_n и периодами (соответствующими длинам волн) от λ_1 до λ_n, рассчитанными на частоты от f_1 до f_n соответственно (рис.2) [4–6].

Вместе они образуют единый фильтр, полоса пропускания которого может быть во много раз шире полосы отдельного канала. В каждом канале поведение

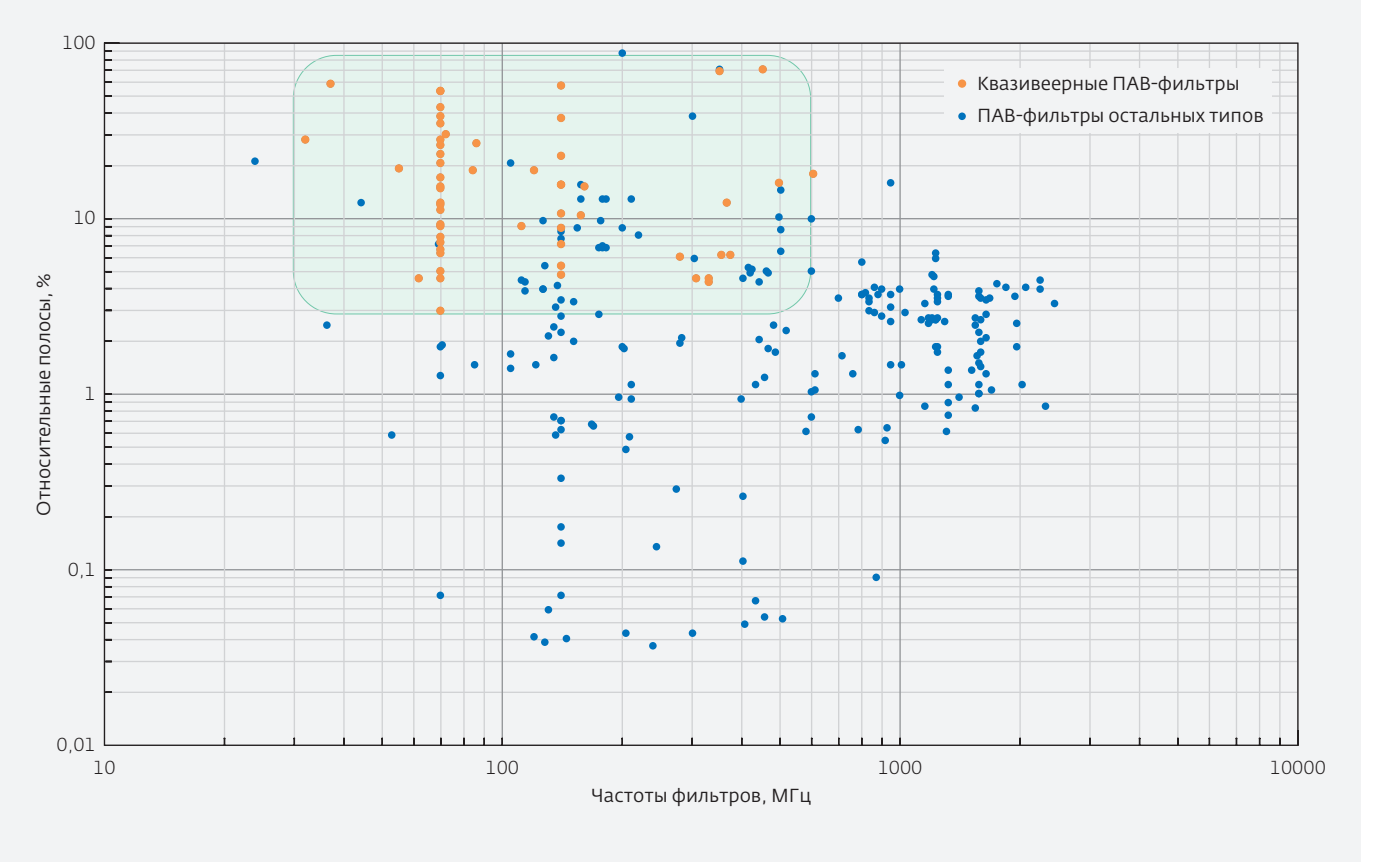

Рис.1. Диаграмма распределения по частотам и относительным полосам пропускания ПАВ-фильтров, разработанных в 2000–2015 годах в ТЦФЭ ОАО "МНИИРС" и в лаборатории "Акустоэлектронные устройства" ФГОБУ ВПО МТУСИ

квазивеерного фильтра может приближенно рассматриваться как поведение обычного ВШП с центральной частотой f_n, соответствующей этому каналу. Передаточная функция $H_i(f)$ i-го канала может быть описана выражением:

$$H_i(f) = HI_i(f) \cdot HO^*_i(f) \cdot e^{-j\beta Z_i},$$

где $HI_i(f)$ и $HO_i(f)$ – входные и выходные передаточные функции соответственно; $HO^*_i(f)$ комплексно сопряжено с $HO_i(f)$; Z_i – расстояние между центрами входного и выходного ВШП в каждом канале; $\beta = 2\pi/\lambda = 2\pi f/v$ (λ – длина ПАВ, соответствующая частоте f, v – скорость распространения ПАВ).

Суммарная передаточная функция фильтра $H_n(f)$ может быть представлена как:

$$H_n(f) = \sum_{i=1}^{n} HI_i(f) \cdot HO^*_i(f) \cdot e^{-j\beta Z_i},$$

где n – число каналов. Обычно n колеблется в диапазоне от 20 до 200 в зависимости от полосы пропускания, типа среза пьезокристаллической подложки, протяженности ВШП в длинах волн и других факторов.

В фазолинейных фильтрах (а их большинство) Z_i постоянно для каждого канала. В результате:

$$H_n(f) = e^{-j2\pi f t_0} \sum_{i=1}^{n} HI_i(f) \cdot HO^*_i(f),$$

где период распространения $t_0 = Z_0/v$ (Z_0 – расстояние между центрами входного и выходного ВШП).

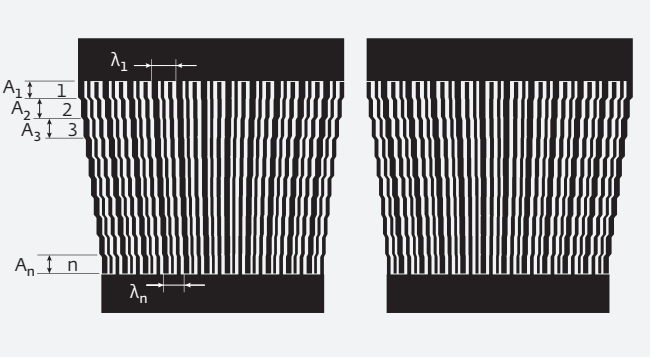

Рис.2. Пример топологии квазивеерного ПАВ-фильтра на базе ОФНП. Базовая структура – трехэлектродная секция (Three Electrode Section, TES)

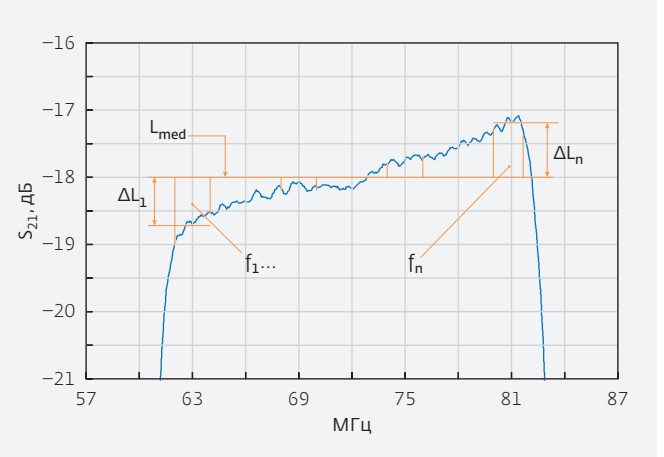

Рис.3. Исходная АЧХ фильтра ФП-494 в полосе пропускания. Центральная частота фильтра – 72 МГц, полоса пропускания – 21 МГц

ПОДКЛЮЧЕНИЕ БЕЗ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ В 50 Ом ТРАКТ

В последнее время на рынке увеличился спрос на широкополосные (полоса пропускания ~20–60% от центральной частоты фильтра f_0) фильтры на ПАВ, работающие в нижней части ОВЧ-диапазона (f_0~30–160 МГц), которые предназначены для применения в устройствах связи и радиолокации. При этом важнейшим требованием современной радиоаппаратуры к фильтру становится возможность его непосредственного включения в 50 Ом тракт без дополнительных цепей согласования. Это позволяет избавиться от их влияния на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) при воздействии различных внешних факторов (температуры, электромагнитных помех и др.), а также упростить разработку аппаратуры. Однако, данное требование сильно усложняет

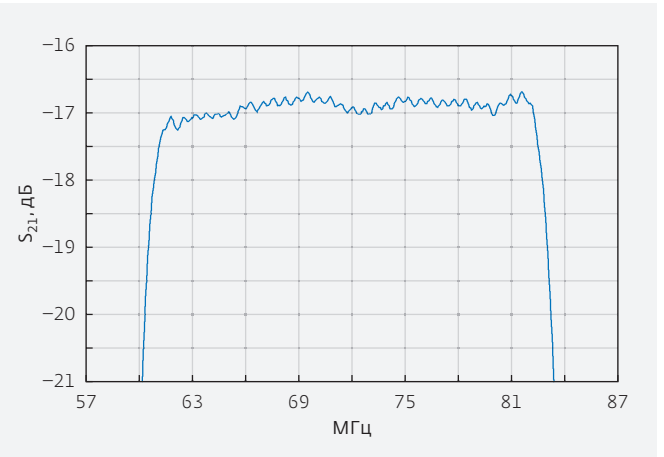

Рис.4. АЧХ фильтра ФП-494 в полосе пропускания после коррекции топологии (включение 50/50 Ом)

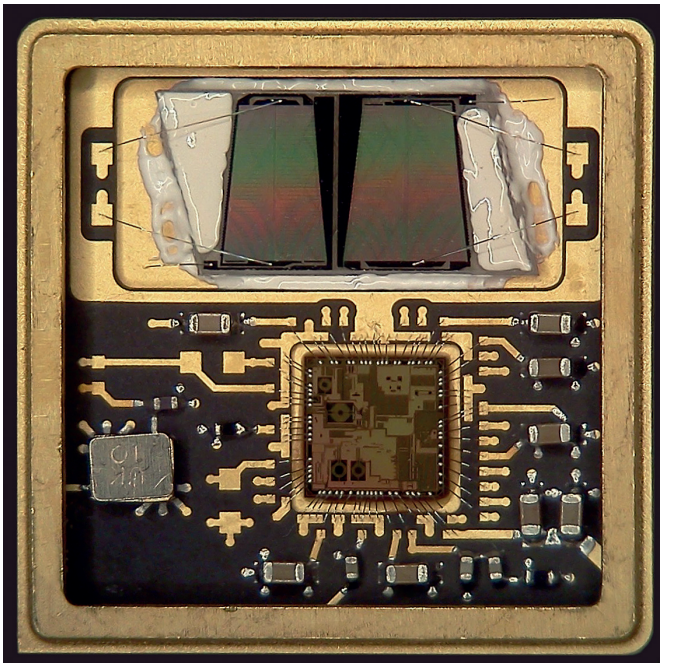

Рис.5. Пример применения фильтра (расположен в верхней части модуля) в интегральном навигационном модуле приемника ГЛОНАСС производства "КБ Навис"

проектирование квазивеерного фильтра на ОФНП. Подавляющее большинство фильтров этого типа при непосредственном включении в 50 Ом тракт имеет наклон или прогиб АЧХ в полосе на 1–2 дБ, который впоследствии выправляется цепями согласования.

Далее предлагается относительно несложный метод коррекции АЧХ в полосе пропускания посредством внесения дополнительных масштабирующих коэффициентов в топологию квазивеерного фильтра. Этот метод уже упоминался ранее [7, 8], однако здесь он будет рассмотрен более детально и подтвержден экспериментальными данными.

КОРРЕКЦИЯ АЧХ В ПОЛОСЕ ПРОПУСКАНИЯ

Имея исходные АЧХ и топологию (см. рис.2) широкополосного квазивеерного фильтра, можно провести достаточно точную (~0,1 дБ) коррекцию апертур каналов с целью придания АЧХ в полосе пропускания нужной формы (например, сделать вершину АЧХ плоской в 50/50 Ом режиме включения без использования дополнительных согласующих цепей).

Для этого вершина АЧХ исходного квазивеерного фильтра в полосе пропускания условно делится на число одинаковых частотных отрезков n, равное числу каналов (принимается приближение, что частотное разбиение каналов равномерное), и фиксируется среднее отклонение каждого i-го отрезка АЧХ ΔL_i от общего среднего значения затухания в полосе L_{med} (рис.3).

Принимая приближение, что изменение вклада канала в АЧХ полосы пропускания пропорционально изменению его апертуры, имеем:

$$\Delta L_i = 20 \lg X_i,$$

где X_i – коэффициент масштабирования апертуры i-го канала. После преобразования полученный набор отклонений затуханий ΔL_i подставляется в формулу для расчета коэффициентов масштабирования X_i:

$$X_i = 10^{(\Delta L_i/20)}.$$

Для коррекции уровня АЧХ на участке на ΔL_i нужно масштабировать апертуры топологии соответствующих каналов A_i (см. рис.2) на полученный коэффициент X_i, сохраняя при этом ширины электродов и периоды λ_i.

После запуска фильтра с откорректированной топологией в производство была получена характеристика, полностью подтверждающая выполненные выше расчеты (рис.4). Как видно из рисунка, наклон характеристики удалось практически полностью устранить и неравномерность АЧХ в полосе составляет около 0,5 дБ, что полностью соответствует требованиям к современным фильтрам на ПАВ (обычно требования к неравномерности составляют ~1 дБ).

Следует отметить, что данный фильтр успешно применяется в качестве фильтра промежуточных частот для интегральных навигационных модулей приемников ГЛОНАСС (рис.5) [9] ведущего российского производителя навигационных систем ЗАО "КБ Навис".

ЛИТЕРАТУРА

1. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология, применение / Под ред. Г. Мэттьюза. – М.: Радио и связь, 1981. 472 с.
2. **Орлов В.С., Бондаренко В.С.** Фильтры на ПАВ. – М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
3. http://saw-filters.ru/New_sait_1/filters.html.
4. **Данилов А.Л., Иванов П.Г., Макаров В.М., Орлов В.С., Швец В.Б.** Фильтр на поверхностных акустических волнах с квазивеерными преобразователями. – Патент РФ № 2171010 C2.
5. **Chvets V.B., Orlov V.S., Rusakov A.N.** Development of Low-Loss SAW Filters Based on Quasi-Slanted SPUDTs. – IEEE 2000 Ultrasonics Symposium Proc., p. 75–78.
6. **Chvets V.B., Ivanov P.G., Makarov V.M., Orlov V.S.** Low-Loss Slanted SAW Filters With Low Shape-Factor. – IEEE 1999 Ultrasonics Symposium Proc., p.51–54.
7. **Туркин И.А.** Исследование и разработка методов создания поверхностно-акустических фильтров на базе квазивеерных однофазных однонаправленных преобразователей. (05.27.01). – Дисс. канд. тех. наук. М., 2010. 105 с.
8. **Туркин И.А.** Фильтры на ПАВ – ускоренные методы проектирования // Электроника: НТБ. 2008. № 2.
9. http://navis.ru/ru/katalog/specialnoe-naznachenie/navigacionnye-moduli.