

## Оптимальное проектирование трансверсальных фильтров на поверхностных акустических волнах

*П.С. Маринушкин, А.А. Левицкий, Ф.Г. Зограф*

*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

**Аннотация:** Статья посвящена расчёту аподизованных встречно-штыревых преобразователей для полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах. Обсуждаются этапы численного решения оптимизационной задачи определения коэффициентов аподизации в рамках итерационного алгоритма Паркса-Маклеллана и расчет частотных характеристик встречно-штыревых преобразователей с учетом эффектов второго порядка по модели связанных мод. Представлен пример моделирования трансверсального фильтра, синтезированного с помощью оптимизационного алгоритма.

**Ключевые слова:** акустоэлектроника, аподизация, аппроксимация, встречно-штыревой преобразователь, импульсная характеристика, поверхностная акустическая волна, оптимизация, пьезоэлектричество, фильтр, частотная характеристика.

### Введение

Передачная функция частотно-избирательных устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с аподизованными встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) определяется значениями весовых коэффициентов электродов. Весовые коэффициенты подлежат расчету в процессе проектирования. Первые процедуры, разработанные для этой цели, использовали преобразование Фурье и соответствующие оконные функции. В целом, рассчитанные с их помощью конструкции ПАВ-преобразователей не являются оптимальными с точки зрения производительности, но могут служить отправной точкой для последующей оптимизации.

В основе методов оптимального машинного проектирования фильтров на ПАВ лежат алгоритмы, которые изначально были сформулированы для проектирования оптимальных цифровых фильтров с линейной фазой и конечной импульсной характеристикой. В частности, методика компьютерного проектирования, предложенная Парксом и Маклелланом, основана на использовании чебышёвской аппроксимации и обменного алгоритма Ремеза [1-3]. При этом расчет сводится к задаче отыскания

---

характеристики, оптимальной в смысле минимума максимальной ошибки аппроксимации (иногда называемой минимаксной ошибкой или ошибкой Чебышёва).

### Процедура синтеза ПАВ-преобразователей

Процедура синтеза ПАВ-преобразователей методом чебышёвской аппроксимации включает в себя ряд этапов.

На подготовительном этапе задаются требования к амплитудно-частотной характеристике ВШП (рис. 1) в основной полосе частот  $[0; f_{d/2}]$  и включают в себя: частоту дискретизации  $f_d$ ; граничные частоты полос пропускания и полос задерживания:  $f_1, f_2$  – нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания;  $f_3, f_4$  – нижняя и верхняя граничные частоты полос заграждения; максимально допустимые отклонения АЧХ  $\hat{A}(f)$ :  $\delta_p$  – от единицы в полосе пропускания;  $\delta_s$  – от нуля в полосе заграждения.

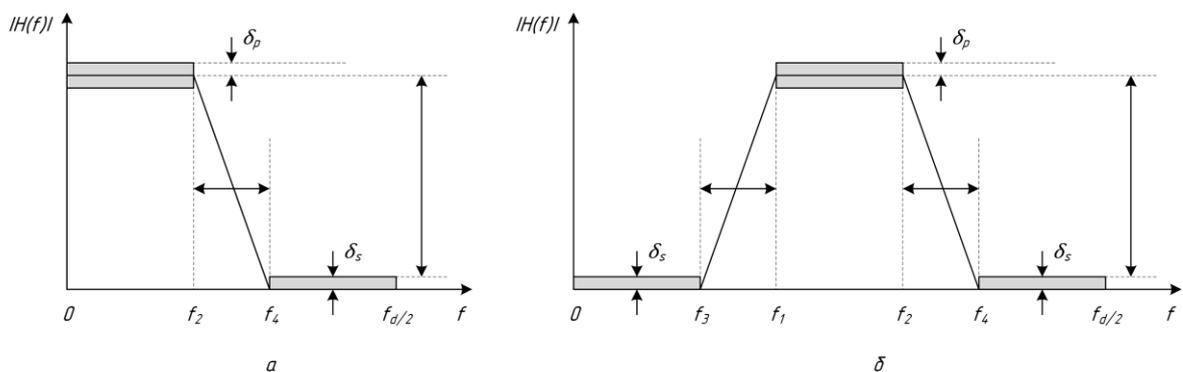


Рис. 1. – Задание требований к частотным характеристикам ПАВ-фильтров по первому и второму способу

Причем в зависимости от способа выбора частоты дискретизации  $f_d$  возможно два варианта реализации полосового фильтра [4]. В первом случае частота синхронизации совпадает с центральной частотой проектируемого фильтра  $f_0$ , т.е. прототипом служит фильтр нижних частот (ФНЧ). Пример графического представления соответствующих весовых коэффициентов ВШП приведен на рис. 2. Практическое воплощение такого фильтра требует,

чтобы в разрабатываемом ВШП использовались расщепленные электроды для уменьшения паразитных отражений.

Во втором случае частота дискретизации  $f_d$  меньше центральной частоты полосы пропускания  $f_0$ . Тогда прототипом в основной полосе частот служит полосно-пропускающий фильтр (ППФ). При переносе отклика из основной полосы частот на заданную рабочую частоту он приобретет характерный «двугорбый» вид, что обусловлено влиянием комплексно-сопряженного отклика в области отрицательных частот. Паразитный отклик можно подавить в выходном ВШП, параметры которого выбирают соответствующим образом. ВШП, синтезированные по второму способу, не требуется изготавливать с расщепленными электродами, поскольку синхронная частота, на которой отражения максимальны, находится за пределами полосы пропускания. В результате снижаются требования к литографическому процессу [4]. Весовые коэффициенты для этого случая имеют вид, представленный на рис. 3.

Поскольку для расчета оптимального ВШП по заданной спецификации, алгоритму требуется перебор порядка, то последующие этапы можно представить в виде следующего итерационного алгоритма.

1. Оценка порядка фильтра  $N$ , численно равного количеству пар электродов ВШП. Оценка порядка фильтра  $N$  производят по эмпирическим формулам на основании требований к АЧХ.

2. Расчет импульсной характеристики фильтра. Импульсную характеристику рассчитывают по алгоритму Паркса-Маклеллана, разработанному на основе метода аппроксимации Чебышёва и обменного алгоритма Ремеза.

3. Проверка выполнения требований к АЧХ. В методе чебышёвской аппроксимации проверка выполнения требований заключается в сравнении максимального по модулю отклонения АЧХ от идеальной с  $\delta_{\min \max}$ .

Требования выполняются, если максимальное по модулю отклонение АЧХ не превосходит  $\delta_{\min \max}$ .

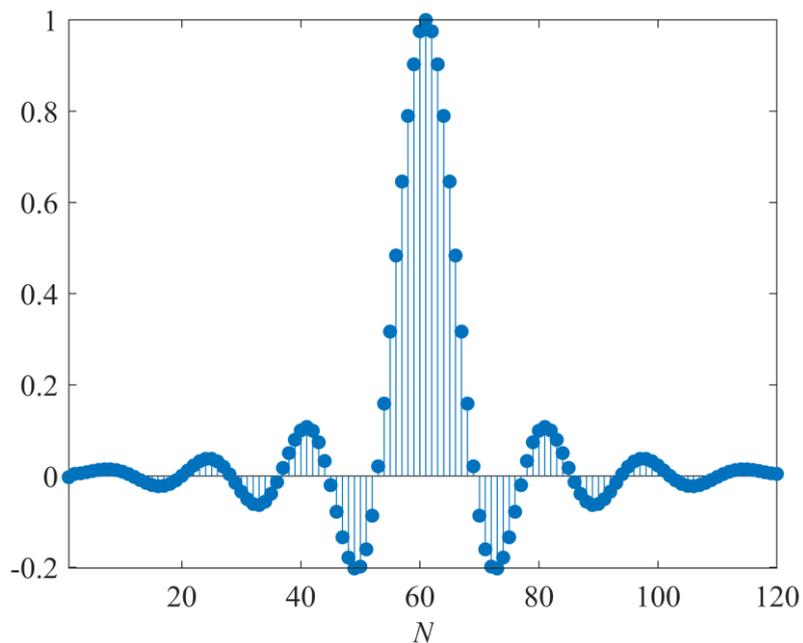


Рис. 2. – Графическое представление весовых коэффициентов ВШП, синтезированного на основе ФНЧ-прототипа

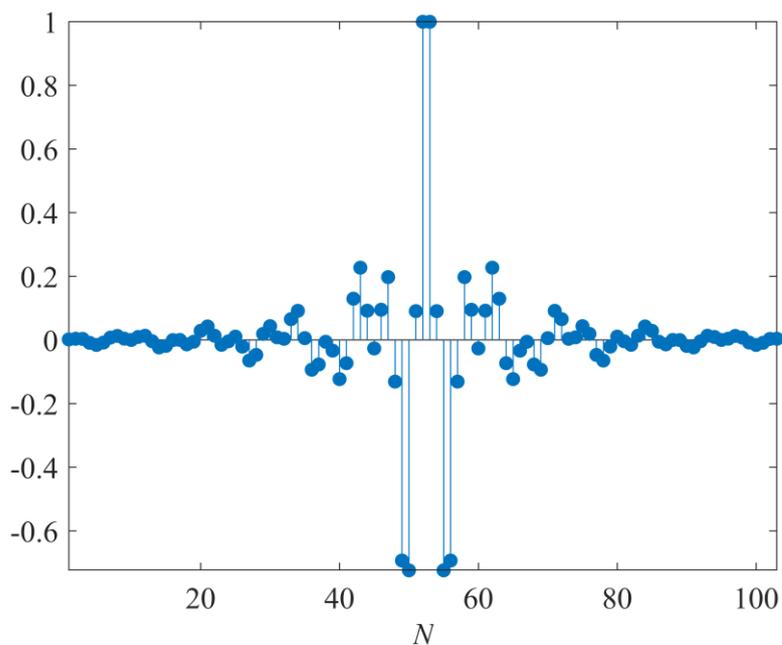


Рис. 3. – Графическое представление весовых коэффициентов ВШП, синтезированного на основе ППФ-прототипа

Таким образом, сначала нужно задаться некоторым начальным порядком  $N$  и решить оптимизационную задачу для выбранного  $N$ , затем, в зависимости от того, избыточно или недостаточно качество аппроксимации, уменьшить или увеличить  $N$  и повторять процедуру до тех пор, пока не будет найден минимальный порядок  $N_{\text{opt}} = N_{\text{min}}$ , при котором выполняются требования к АЧХ.

С использованием изложенного алгоритма в математическом пакете Matlab был разработано семейство подпрограмм, реализующих метод чебышёвской аппроксимации (с помощью встроенной в Matlab функции `firpm`).

### **Моделирование частотных характеристик фильтров**

При помощи разработанных подпрограмм были численно промоделированы основные характеристики трансверсальных полосовых фильтров. В первом приближении частотную характеристику фильтра (рис. 4) можно получить преобразованием Фурье от рассчитанной на предыдущем этапе импульсной характеристики ВШП с последующим перемножением частотных откликов отдельных ВШП. Полученная характеристика является, в известной степени, идеализацией, поскольку не учитывает эффекты второго порядка, такие как отражения от электродов, потери на распространение, дисперсия и др., которые могут быть достаточно заметными, чтобы вызвать искажения частотного отклика фильтра.

Для последующего уточненного расчета частотной характеристики фильтра были использованы методы Р-матриц и связанных волн (СОМ-метод), теория которых была предложена в [5, 6] и развита в работах [7-9].

В модели Р-матриц ПАВ-устройства рассматриваются как системы элементов: преобразователей, отражательных решеток и т. д., каждый из которых представлен как набор элементарных ячеек. Реакция всей системы получается путем каскадирования Р-матриц отдельных элементов [10].

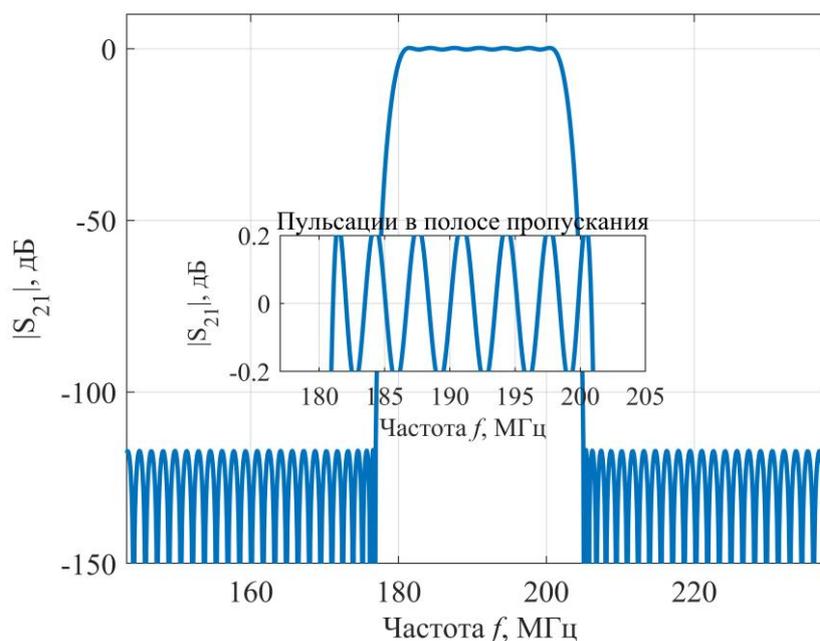


Рис. 4. – Нормированная АЧХ фильтра, образованного двумя идентичными ВШП, синтезированными на основе ФНЧ-прототипа

СОМ-модель основана на рассмотрении в структуре ВШП двух однородных плоских волн, распространяющихся во встречных направлениях и подпитывающих друг друга за счет переотражений от электродов. Использование Р-матриц для решения СОМ-уравнений подразумевает представление ПАВ-преобразователя как шестиполосника, имеющего два акустических порта, описываемых S-матрицей, и один электрический порт, описываемый характеристикой проводимости. Результирующая модель связывает выходящие ПАВ и электрический ток с входящими ПАВ и потенциалом преобразователя и позволяет оценить влияние таких эффектов, как сигнал тройного прохождения, внутренние отражения от соседних электродов и т. д.

На рис. 5 приведен пример рассчитанной таким образом частотной характеристики фильтра, синтезированного на основе ФНЧ-прототипа, т.е. на центральной частоте. Заданные в спецификации характеристики ( $f_0 = 191$  МГц, подавление в полосе заграждения 60 дБ, пульсации в полосе

пропускания 0,1 дБ, коэффициент прямоугольности – 1,4) достигнуты при  $N = 120$ .

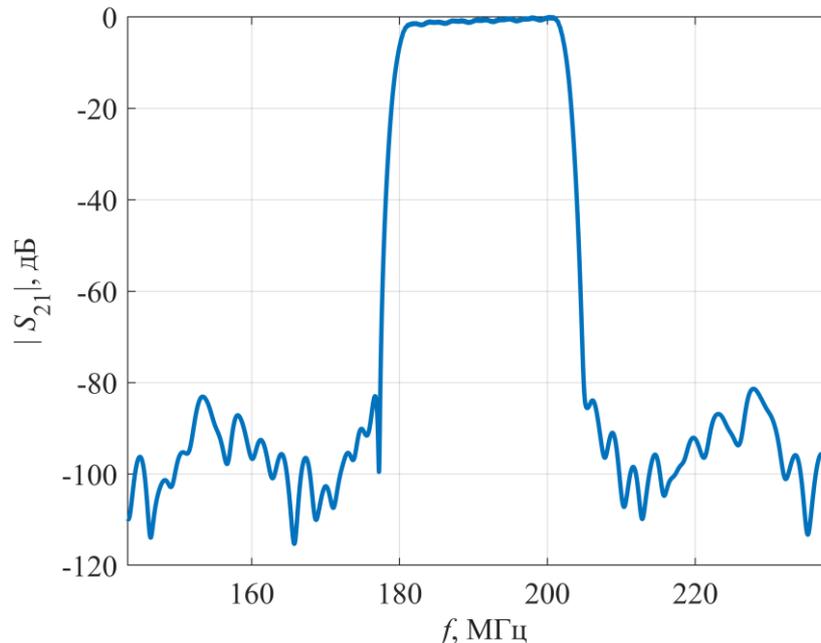


Рис. 5. – Результирующая нормированная АЧХ фильтра, образованного двумя идентичными ВШП, синтезированными на основе ФНЧ-прототипа

### Заключение

Полученные результаты составляют набор инструментов для практического расчёта аподизованных ВШП и фильтров на их основе по заданной спецификации. При помощи разработанных подпрограмм численно промоделированы основные характеристики трансверсальных полосовых фильтров. Подпрограммы, реализующие модели Р-матриц и связанных волн, могут применяться в составе библиотек при разработке программ для проектирования частотно-избирательных устройств на ПАВ.

*Исследование выполнено при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках проекта «Развитие научных основ и разработка технологий создания микроминиатюрных высокоизбирательных устройств частотной селекции на поверхностных акустических волнах», № 2023091109826 и АО "НПП "Радиосвязь"».*

### Литература (References)

1. McClellan J.H., Parks T.M., Rabiner L.R. A computer program for designing optimum FIR linear phase digital filters. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. Vol. 21. No. 6. 1973. Pp. 506-526.

2. McClellan J.H., Parks T.W. A personal history of the Parks-McClellan algorithm. IEEE Signal Processing Magazine. Vol. 22. No. 2. 2005. Pp. 82-86.

3. Hashimoto K.Y. Surface acoustic wave devices in telecommunication: Modelling and simulation. Heidelberg: Springer Berlin, 2000. 330 p.

4. Campbell C.K. Surface acoustic wave devices and their signal processing applications. San Diego: Academic Press, 1989. 484 p.

5. Tobolka G. Mixed matrix representation of SAW transducers. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. Vol. 26. No. 6. 1979. Pp. 426-427.

6. Hartmann C.S., Wright P.V., Kansy R.J., Gaber E.M. An analysis of SAW interdigital transducers with internal reflections and the application to the design of single-phase unidirectional transducers. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 1982. Pp. 40-45.

7. Dmitriev V.F. The theory of coupled waves as a universal method for designing devices operating on surface acoustic waves. Technical Physics. Vol. 49. 2004. Pp. 1339-1348.

8. Dmitriev V.F. Modified equations of coupled surface acoustic waves. Journal of Communications Technology and Electronics. Vol. 54. 2009. Pp. 1077-1086.

9. Koigerov A.S. Modern physical-mathematical models and methods for design surface acoustic wave devices: COM based P-matrices and FEM in COMSOL. Mathematics. Vol. 10. No. 22. 2022. URL: [mdpi.com/2227-7390/10/22/4353](https://mdpi.com/2227-7390/10/22/4353).

10. Koigerov A.S., Balysheva O.L. Fast numerical calculation of the parameters of Rayleigh surface acoustic waves for the coupled mode model.

---



Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika. Vol. 25. № 5.  
2022. Pp. 67-79.

**Дата поступления: 6.05.2024**

**Дата публикации: 19.06.2024**