

УДК 621.372.543 : 37/39 : 534

Е. В. Бауск, О. И. Одаренко

(Новосибирск)

**ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ
НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ
С ПОМОЩЬЮ КРИТЕРИЯ МИНИМАКСА**

Статья направлена на улучшение селективных свойств радиочастотных фильтров на поверхностных акустических волнах и их миниатюризацию. Использование математического аппарата известной методики минимакса позволило разработать эффективный алгоритм комплексной оптимизации встречно-штыревых преобразователей поверхностных акустических волн – основных элементов, определяющих селективные свойства акустоэлектронных фильтров. Благодаря одновременной оптимизации формы и положений электродов в преобразователях удастся синтезировать требуемые характеристики при минимальных размерах структуры. Разработано программное обеспечение для персональных компьютеров, реализующее предлагаемый алгоритм.

Введение. В течение последних 25 лет радиочастотные фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) расширяют свою нишу в радиоэлектронной аппаратуре благодаря сочетанию компактности, надежности и простоты изготовления с высокими селективными свойствами, которые непрерывно совершенствуются. Основными элементами ПАВ-устройств являются встречно-штыревые преобразователи (ВШП) – планарные электродные структуры, размещаемые на поверхности пьезоэлектрического кристалла (рис. 1), которые служат для возбуждения и приема ПАВ. Частотно-зависимая эффективность преобразования электрического сигнала в акустический и обратно определяет главным образом частотные свойства ПАВ-фильтра. Эффективность преобразования, в свою очередь, определяется конфигурацией электродов ВШП. В результате задача синтеза ПАВ-фильтра с заданными характеристиками сводится, прежде всего, к выбору оптимальной конфигурации электродов ВШП.

Для проектирования ПАВ-фильтров разработано большое число оптимизационных методик [1–4]. Предлагаемый в данной работе алгоритм имеет особенность: для рассматриваемого типа ПАВ-фильтров он производит наиболее полную оптимизацию электродной структуры одновременно обоих ВШП. Это позволяет добиться заданных характеристик при минимальной протяженности структуры. Поскольку миниатюризация – одна из важнейших задач при проектировании устройств, алгоритм имеет еще одно достоинство: он дает возможность проектировать преобразователи с малыми

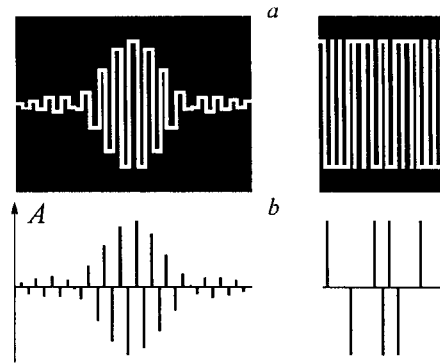


Рис. 1. Топология ПАВ-фильтра (а) и распределение источников ПАВ (б)

апертурами без значительного увеличения дифракционных эффектов для акустического пучка.

1. Постановка задачи. Статья посвящена наиболее компактной и наиболее распространенной разновидности ПАВ-фильтров, содержащей только один акустический канал (рис. 1, а). Входным (излучающим) является аподизованный (взвешенный величиной перекрытия соседних электродов) ВШП, выходным (приемным) – преобразователь с постоянной длиной электродов, взвешивание импульсной характеристики которого осуществляется распределением полярностей электродов [4]. Задача оптимизации электродной структуры здесь решается в рамках модели δ -источников [5], согласно которой источниками и приемниками ПАВ являются узкие области в центре зазоров между электродами с противоположными полярностями. В этом приближении частотный отклик фильтра может быть представлен в виде

$$H(f) = H_{\text{вх}}(f)H_{\text{вых}}(f),$$

где

$$H_{\text{вх}}(f) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(i2\pi f x_n / v); \quad H_{\text{вых}}(f) = \sum_{m=1}^M (-1)^m \exp(i2\pi f x_m / v);$$

f – частота; N и M – число источников ПАВ во входном и выходном ВШП соответственно; A_n – амплитуда n -го источника, пропорциональная величине перекрытия соседних электродов аподизованного преобразователя; x_n и x_m – координаты источников ПАВ во входном и выходном ВШП; v – скорость ПАВ.

Задача синтеза состоит в подборе конфигурации электродов ВШП (т. е. вектора $\{A_1, \dots, A_N, x_1, \dots, x_N, x_1, \dots, x_M\}$), которая бы реализовывала частотную характеристику фильтра, наилучшим образом удовлетворяющую заданным требованиям. Кроме того, обычно требуется минимизация размеров структуры. Естественно, что максимальный результат может быть достигнут при одновременной оптимизации положений источников ПАВ в обоих ВШП и амплитуд источников в аподизованном преобразователе, что и предлагается в данной работе.

2. Оптимизационный алгоритм. Сущность принципа минимакса [6, 7] в приложении к поставленной задаче может быть сформулирована как мини-

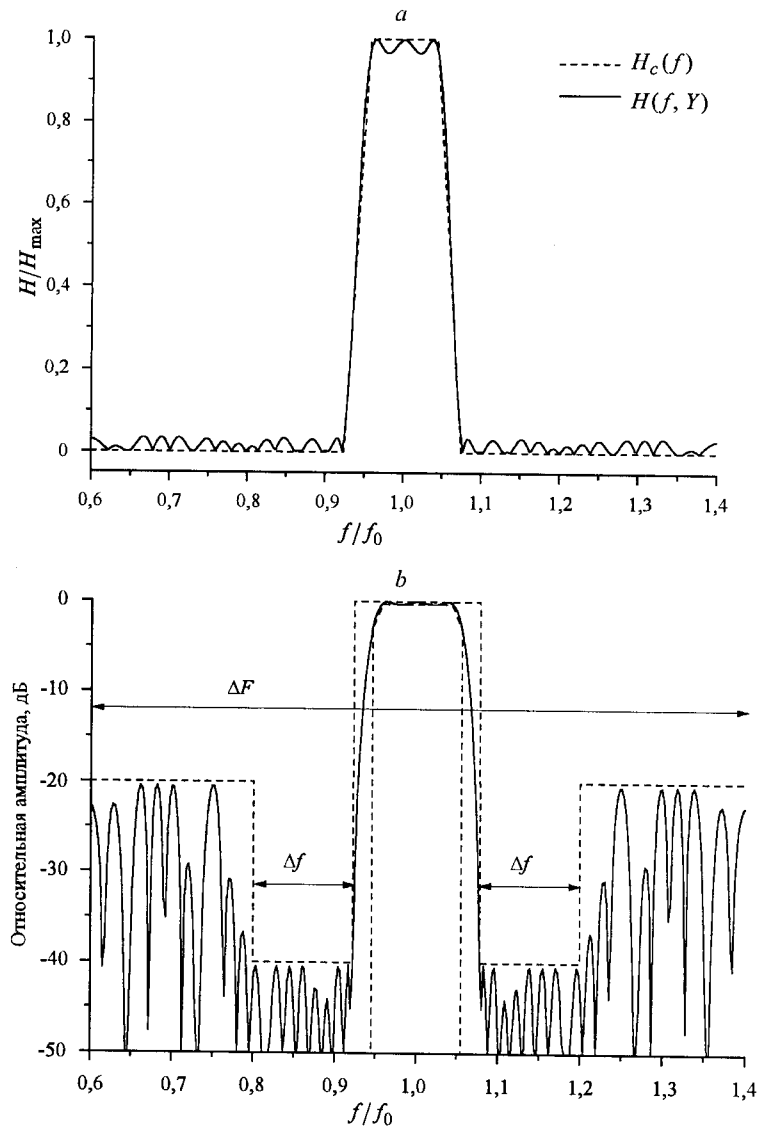


Рис. 2. АЧХ фильтра в линейном (а) и в логарифмическом (b) масштабах

минимизация максимума отклонения частотного отклика фильтра $H(f, Y)$ от целевой функции в контролируемой полосе частот ΔF , т. е. минимизация функции

$$\varphi(Y) = \max_{f \in \Delta F} (H(f, Y) - H_c(f)), \quad (1)$$

где $H_c(f)$ – целевая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра, $Y = \{y_1, \dots, y_K\} = \{A_1, \dots, A_N, x_1, \dots, x_N, x_1, \dots, x_M\}$ – вектор переменных, включающий амплитуды ПАВ-источников и их координаты. Наглядный пример целевой функции для радиочастотного фильтра приведен на рис. 2, а. Однако при реальном проектировании обычно решается несколько другая

задача: АЧХ фильтра должна иметь максимально достижимую режекцию в наиболее важной области полосы задержания Δf при условии, что она вписывается в коридор допусков отклонений от целевой функции в остальной части контролируемой частотной области ΔF (рис. 2, *b*). АЧХ фильтра принято задавать в децибелах, т. е. в логарифмическом масштабе. Таким образом, вместо выражения (1) алгоритм должен минимизировать функцию

$$\varphi'(Y) = \max_{f \in \Delta F} [D(Y, f)] = \max_{f \in \Delta F} [(20 \lg(H(Y, f)) - 20 \lg(H_c(f)))B(f)], \quad (2)$$

где $B(f)$ – весовая функция, определяющая форму коридора допусков. Делается это в два этапа. На первом этапе весовая функция имеет в области максимальной режекции Δf то же значение, что и в других частях полосы задерживания, т. е. вне полосы пропускания коридор однороден. На втором этапе, после того как АЧХ фильтра впишется в первоначальную форму коридора, функция $B(f)$, $f \in \Delta f$, начинает постепенно возрастать, оставаясь неизменной на остальных частотах. Это приводит к постепенному понижению коридора в области Δf (см. рис. 2, *b*) до предельно возможного уровня.

Исходная структура аподизованного ВШП, являющаяся отправной точкой оптимизационного процесса, формируется с помощью упрощенного варианта алгоритма Ремеза [8]. Начальная структура выходного преобразователя, взвешиваемого заданием полярностей электродов, подбирается с помощью алгоритма, описанного в [4].

На значения переменных $\{y_1, \dots, y_K\}$ накладывается ряд ограничений. Во-первых, ограничение на минимальную ширину электродов, что приводит к ограничению на допустимое сближение соседних источников: $(x_n - x_{n-1}) > \delta x$; $(x_m - x_{m-1}) > \delta x$. Во-вторых, ограничение на максимальную длину ВШП: $x_N < L_1$; $x_M < L_2$. В-третьих, для эффективности электроакустического преобразования крайние электроды не должны выходить за пределы апертуры (AP), задаваемой центральным лепестком аподизации, что сводится к требованию: $AP/2 \geq \sum_{n=1}^J A_n \geq -AP/2$ при $J = 1, \dots, N$; заметим, что A_n ,

как правило (хотя и не обязательно), меняет знак от источника к источнику. Кроме того, для достижения малых габаритов ПАВ-устройств иногда приходится уменьшать апертуру преобразователей до величины, которая может привести к значительной дифракции акустической волны от малых перекрытий электродов. Для снижения влияния дифракции алгоритм предусматривает возможность ограничения минимальной величины перекрытия электродов: $|A_n| > a$. При решении задачи оптимизации функции (2) с перечисленными ограничениями на параметры в нашем алгоритме используется метод, изложенный в [7] («Модифицированный (ϵ, μ) -субградиентный метод при наличии ограничений»).

Оптимизационный алгоритм минимакса состоит из ряда последовательных приближений. На каждом этапе для каждой из анализируемых частот $f_i \in \Delta F$ определяется вектор направления $g_i(Y)$ в K -мерном пространстве параметров $Y = \{y_1, \dots, y_K\}$, по которому функция $D(Y, f_i)$ (2) убывает максимально быстро, т. е. в данной точке пространства минимизируется функция $\frac{\partial D(Y, f_i)}{\partial Y}$. Результирующее направление движения в пространстве пара-

метров находится как суперпозиция направлений $g_i(Y)$ по всем анализируемым частотным точкам, при этом учитываются упомянутые выше ограниче-

ния параметров. Влияние каждого вектора $g_i(Y)$ на выбор результирующего направления тем больше, чем ближе $D(Y, f_i)$ к максимуму $D(Y)_{\max}$, поскольку принцип минимакса заключается в подавлении, прежде всего, максимальных расхождений между АЧХ фильтра и целевой функцией. Процедура определения направления движения является наиболее трудоемкой частью оптимизационного алгоритма. Для поиска направления мы адаптировали приведенную в [9] процедуру "Down". В рассмотрение включаются только наиболее важные частотные точки $f_i \in \Delta F$, для которых выполняется условие $|D(Y, f_i) - D(Y)_{\max}| \leq d$. При работе алгоритма АЧХ фильтра постепенно приближается к форме коридора, что ведет к увеличению принимаемых в расчет точек и снижению скорости алгоритма. Рост числа точек сдерживается постепенным уменьшением параметра d . Кроме того, как показано в [7, 10], в случае попадания в локальный минимум функции $\varphi'(Y)$ уменьшение значения d позволяет выбраться из него. Однако не следует задавать малое значение d с самого начала: это ведет к неточности определения направления движения.

При движении в выбранном направлении находится точка минимума функции $\varphi'(Y)$, для этой цели используется переменный шаг (так называемый метод «золотого сечения» [6]), после этого в найденной точке выбирается новое направление движения и цикл повторяется. Процесс заканчивается, если найдено такое значение вектора $Y = Y_m$, при котором по всем направлениям $\frac{\partial \varphi'(Y)}{\partial Y} \geq 0$. В нашем случае $D(Y, f_i)$ относится к функциям «овраж-

ного типа» из-за существенно разного влияния параметров A_n и x_n на АЧХ фильтра, поэтому для ускорения сходимости процесса в алгоритме используется прием «растяжения пространства» [9].

В заключение отметим, что синтез структуры преобразователей может осуществляться с учетом частотных характеристик внешних, по отношению к изображенной на рис. 1 конструкции, элементов, например согласующих LC-цепей или дополнительных частотно-избирательных структур. Таким образом, в заданный коридор (см. рис. 2, *b*) будет вписываться суммарная АЧХ, частотный же отклик собственно ПАВ-фильтра, как показано далее, может принимать более сложный вид.

3. Результаты. Описанный в предыдущем разделе алгоритм был воплощен в программном модуле, написанном на языке Фортран для персонального компьютера. С использованием этого модуля был рассчитан ряд ПАВ-фильтров с широким спектром характеристик.

На рис. 3 представлены характеристики двух модификаций фильтра с требованиями симметрии АЧХ. В обоих случаях сближение соседних источников ПАВ ограничено величиной $\lambda_0/4$, где λ_0 – длина волны на центральной частоте. Суммарная протяженность ВШП – $220\lambda_0$. В первом случае не накладывалось ограничений на весовую функцию аподизованного ВШП, кроме условия $AP/2 \geq \sum_{n=1}^J A_n \geq -AP/2$, т. е. электроды не должны выходить за

пределы апертуры. Во втором случае для снижения влияния дифракции ПАВ в длинных и узких структурах жестко ограничена величина перекрытий: она не должна быть меньше половины апертуры ($|A_n| \geq AP/2$). В известных оптимизационных методах такое ограничение существенно снизило бы возможности достижения высокой избирательности фильтра. Однако, как видно из рис. 3, *b*, предлагаемый алгоритм успешно компенсирует потерю гибкости

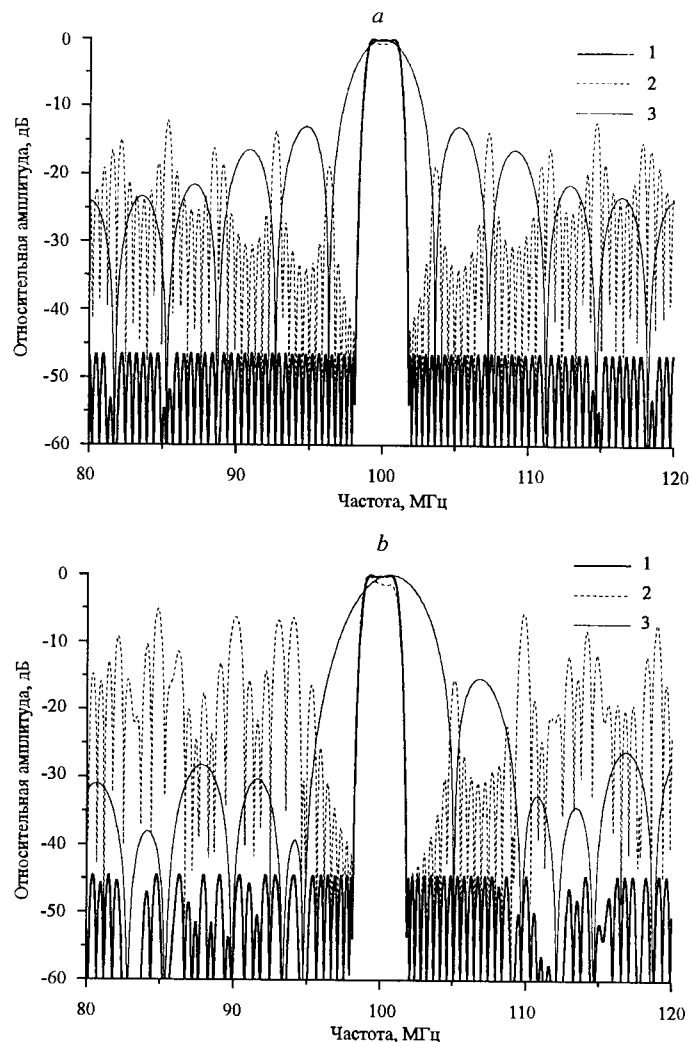


Рис. 3. Расчетные АЧХ: 1 – фильтра в целом, 2 – входного ВШП, 3 – выходного ВШП; *a* – аподизованный ВШП с произвольной величиной перекрытия электродов; *b* – все перекрытия в аподизованном ВШП не менее половины апертуры

функции аподизации: внеполосное подавление фильтра почти не пострадало, поскольку группы неэквидистантно расположенных источников ПАВ с большими амплитудами имитируют источники малой амплитуды, необходимые для формирования АЧХ заданного вида. Каждый из преобразователей имеет существенно несимметричную АЧХ, в то время как полный частотный отклик фильтра удовлетворяет требованию симметрии. Благодаря тому что алгоритм одновременно оптимизирует амплитуды ПАВ-источников и их положения, ему удается в максимальной степени взаимно согласовать характеристики обоих ВШП: высокое внеполосное подавление достигается за счет того, что максимумы АЧХ одного ВШП совпадают с минимумами другого.

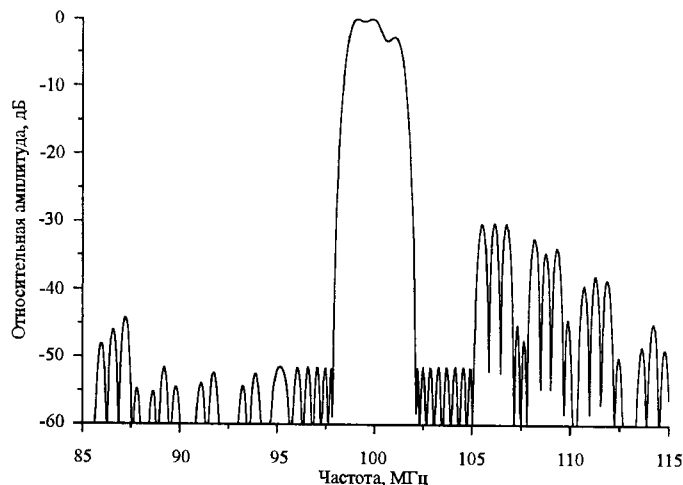


Рис. 4. Несимметричная АЧХ ПАВ-фильтра

Возможности алгоритма обеспечивают синтез АЧХ произвольной формы. На рис. 4 представлена реализация частотного отклика более сложного вида.

Заключение. На базе принципа минимакса разработаны алгоритм и программный модуль на языке Фортран, обеспечивающие комплексную нелинейную оптимизацию фильтров на поверхностных акустических волнах.

Фильтр включает в себя входной аподизованный ВШП и выходной ВШП, взвешиваемый заданием полярностей электродов; в общем случае оба преобразователя могут быть неэквидистантными. Преимущество алгоритма перед известными методами в том, что при реализации заданной частотной характеристики фильтра одновременно осуществляются двумерная оптимизация входного ВШП (т. е. подбор длины и положения каждого электрода) и оптимизация положений электродов в выходном преобразователе. Для уменьшения дифракционных эффектов в длинных и узких ВШП предусмотрена возможность ограничения минимальных величин перекрытий соседних электродов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Slobodnik A. J., Szabo T. L., Laker K. R. Miniature surface-acoustic-wave filters // Proc. IEEE. 1979. 67, N 1. P. 129.
2. Ruppel C. C. W., Sachs A. A., Seifert F. J. A review of optimization algorithms for the design of SAW transducers // IEEE Ultrason. Symp. 1991. P. 73.
3. Орлов В. С., Бондаренко В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1984.
4. Bausk E. V., Solie L. P. Optimization of broadband SAW transducers with polarity weighting // Proc. of 12th European Frequency and Time Forum. Warsaw, Poland, 1998. P. 189.
5. Танкрилл Р., Холланд М. Фильтры на поверхностных акустических волнах // ТИИЭР. 1971. 59, № 3. С. 62.

6. Демьянов В. Ф., Малоземов В. Н. Введение в минимакс. М.: Наука, 1972.
7. Демьянов В. Д., Васильев Л. В. Недифференцируемая оптимизация. М.: Наука, 1981.
8. Ланнэ А. А. Оптимальный синтез линейных электронных схем. М.: Связь, 1978.
9. Вопросы теории и элементы программного обеспечения минимаксных задач /Под ред. В. Ф. Демьянова, В. Н. Малоземова. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.
10. Bertsekas D. P., Mitter S. K. A descent numerical method for optimization problems with nondifferentiable cost functionals // SIAM Journ. Control. 1973. **11**, N 4. P. 637.

*Институт физики полупроводников СО РАН,
E-mail: bausk@thermo.isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
21 марта 2001 г.*

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!