

# Синтез КИХ-фильтров с произвольной АЧХ при ограниченной длине слова коэффициентов

Александр МИНГАЗИН  
alexmin@radis.ru

Для синтеза КИХ-фильтров с линейной ФЧХ и произвольной АЧХ при ограниченной длине слова коэффициентов предлагается использовать сочетание классического адаптивного метода и вариации исходных параметров. На примере синтеза КИХ-фильтра, предназначенного для коррекции АЧХ гидроакустического тракта, показано, что полученный таким способом КИХ-фильтр значительно проще БИХ-фильтра, найденного ранее методом целочисленного нелинейного программирования.

## Введение

Для синтеза цифровых фильтров с ограниченной длиной слова коэффициентов применяются различные алгоритмы, основанные на вариации коэффициентов или исходных параметров либо их сочетании. Хорошие потенциальные возможности метода вариации исходных параметров (ВИП) продемонстрированы на примерах синтеза КИХ-фильтров с линейными ФЧХ (ЛФЧХ) и стандартными требованиями к АЧХ [1, 2]. В работе [1] рассмотрен метод ВИП применительно к аппроксимации АЧХ фильтров на основе окна, а в [2] — к взвешенной чебышевской аппроксимации.

В этой статье предлагается использовать ВИП в сочетании с классическим адаптивным методом синтеза КИХ-фильтров с ЛФЧХ

и произвольными требованиями к АЧХ. Адаптивный метод детально изложен в [3].

## Синтез КИХ-фильтров на основе алгоритмов адаптации и ВИП

Объединение алгоритмов адаптации и ВИП можно выполнить по-разному. Ограничимся наиболее простым двух-этапным подходом. На первом этапе с помощью адаптивной процедуры определим непрерывные коэффициенты КИХ-фильтра с ЛФЧХ. На втором этапе используем однопараметрический алгоритм ВИП. В качестве варьируемого параметра в нем будет служить масштабный множитель, введенный в коэффициенты, найденные на первом этапе. Изменение множителя влияет на усиление

фильтра. На этом этапе выполним квантование текущих масштабированных коэффициентов с заданным шагом, контроль АЧХ фильтра и выбор наиболее подходящего решения из конечного числа возможных.

## Пример синтеза

В [4] рассмотрена задача коррекции АЧХ гидроакустического тракта в полосе пропускания с помощью цифрового фильтра, который также должен обеспечивать заданное ослабление в полосе задерживания и обладать хорошей линейностью ФЧХ. При этом длина слова коэффициентов фильтра должна быть ограниченной. Для решения этой задачи авторы [4] использовали метод целочисленного нелинейного программирования (ЦНП) применительно к каскадным БИХ-фильтрам на звеньях второго порядка прямой формы. Далее приведены результаты альтернативного решения этой задачи с применением предложенного выше алгоритма, которые сравниваются с полученными в [4].

На рис. 1 показаны АЧХ искаженного, идеального и скорректированного с помощью КИХ-фильтра гидроакустического тракта. Там же представлена АЧХ самого фильтра.

В таблице 1 приведены параметры тракта, скорректированного КИХ- и БИХ-фильтром. Как видим, цифры для этих вариантов коррекции близки и согласно [4] приемлемы.

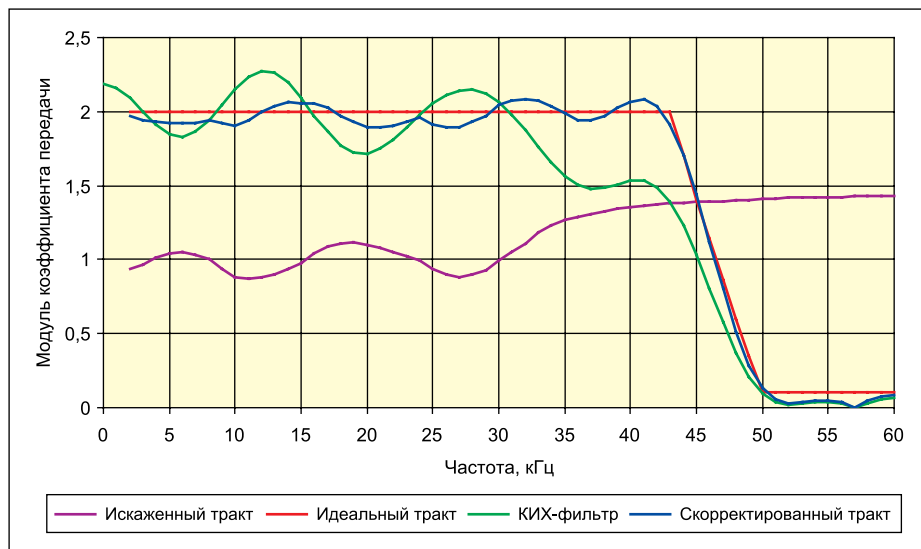


Рис. 1. АЧХ трактов и корректирующего КИХ-фильтра

Таблица 1. Результаты коррекции АЧХ тракта КИХ- и БИХ-фильтром

Параметры АЧХ скорректированного тракта	КИХ-фильтр	БИХ-фильтр
Отклонение усиления в полосе 2–43 кГц	≤0,1	≤0,08
Усиление в полосе 50–60 кГц	≤0,136	≤0,153

В таблице 2 представлены параметры корректирующих КИХ- и БИХ-фильтров. Значения параметров АЧХ (табл. 1), ФЧХ и ХГВЗ (табл. 2) для БИХ-фильтра уточнены по коэффициентам из [4].

Таблица 2. Параметры корректирующих фильтров

Параметры	КИХ-фильтр	БИХ-фильтр
Порядок	22	16
Количество умножителей	9	39
Количество сумматоров	16	31
Шаг квантования коэффициентов	$2^{-5}$	$2^{-6}$
Нелинейность ФЧХ	$0^\circ$	$\pm 5,9^\circ$
Неравномерность ХГВЗ, %	0	$\pm 8$
Среднее значение ГВЗ, мс	0,092	0,125

**Примечания.** Параметры ХГВЗ и ФЧХ для БИХ-фильтра оценены в полосе 0–43 кГц. АЧХ фильтров обеспечивают параметры тракта, приведенные в таблице 1. Частота дискретизации равна 120 кГц.

Из таблицы 2 следует, что синтезированный КИХ-фильтр 22-го порядка с ЛФЧХ имеет неоспоримое преимущество в сравнении с БИХ-фильтром 16-го порядка, как по параметрам характеристик, так и по его простоте. Действительно, КИХ-фильтр имеет нулевую нелинейность ФЧХ (неравномерность ХГВЗ), требует в четыре раза меньше умножителей и почти в два раза меньше сумматоров, а также соответствует большему шагу квантования (меньшей длине слова).

Найденные коэффициенты  $h_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, 11$  КИХ-фильтра представлены в таблице 3. Три из них равны нулю, что учтено в таблице 2 при подсчете количества умножителей и сумматоров. Импульсная характеристика фильтра симметрична относительно  $h_{11}$ . Время синтеза КИХ-фильтра на компьютере (с процессором 3 ГГц) пренебрежимо мало.

На рис. 2а показана прямая структура КИХ-фильтра с ЛФЧХ, а на рис. 2б приведен ее векторный умножитель, реализованный на сумматорах и элементах сдвига согласно коэффициентам из таблицы 3. На рис. 2б узлы сверху соответствуют входам умножителей, причем номер узла совпадает с индексом коэффициента, а отрезок жирной линии и указанное рядом число, равное степени два, означают, что здесь необходим сдвиг данных в соответствии с этим числом и инверсия

Таблица 3. Коэффициенты КИХ-фильтра

$i$	$h_i$	$h_i/2^{-5}$
0	0,03125	1
1	0	0
2	0,0625	2
3	0,0625	2
4	-0,0625	-2
5	0	0
6	-0,03125	-1
7	0	0
8	0,09375	3
9	-0,25	-8
10	0,46875	15
11	1,4375	46

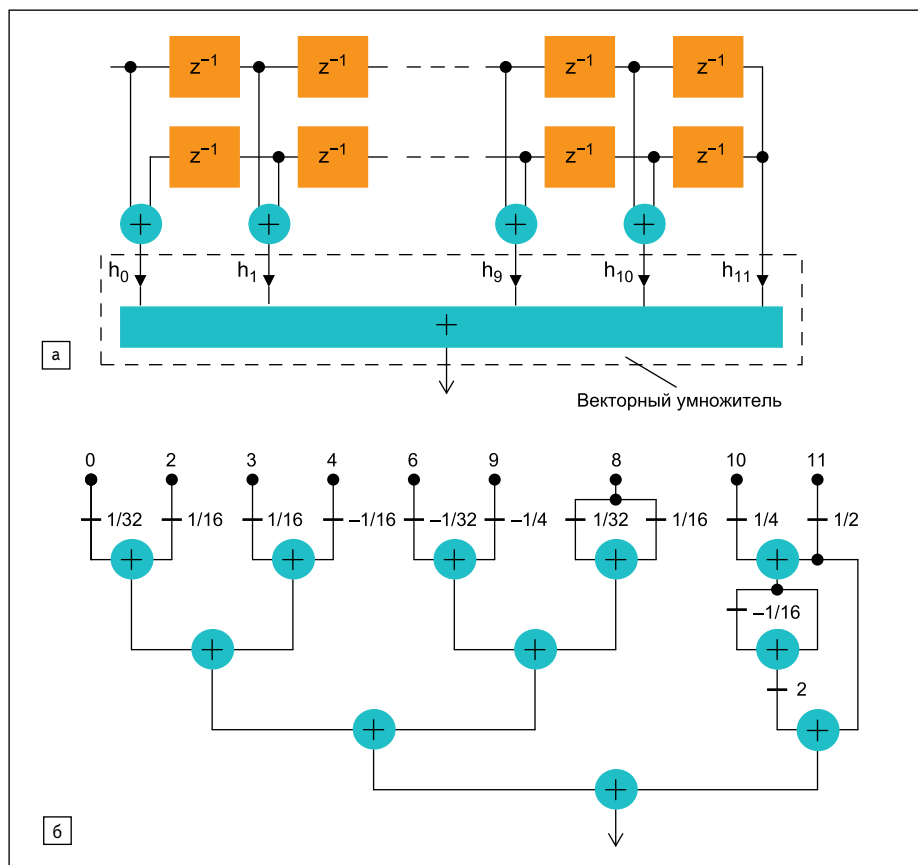


Рис. 2. Прямая структура КИХ-фильтра с ЛФЧХ (а) и его векторный умножитель на сумматорах и элементах сдвига (б)

знака, если оно отрицательное. Как видим, векторный умножитель на коэффициенты  $h_{10}$  и  $h_{11}$  реализован на трех сумматорах, умножитель на  $h_8$  — на одном сумматоре, а умножители на остальные коэффициенты вообще не требуют сумматоров.

Структура фильтра на рис. 2 экономична при параллельном ее исполнении на ПЛИС, заказных или полузаказных СБИС. В этом случае сдвиг не требует временных и аппаратных затрат. Для реализации фильтра необходимо 19 сумматоров. Его быстродействие определяется временем пяти суммирований, а при введении в структуру максимального числа буферных задержек — лишь временем одного суммирования.

Замену умножителей на сумматоры и элементы сдвига можно выполнить и для обращенной прямой структуры синтезированного КИХ-фильтра, которая содержит блок умножителей с общим входом. В этом случае для реализации фильтра также необходимо 19 сумматоров. Выбор прямой или обращенной структуры определяется требованиями к сложности реализации фильтра, его быстродействию и отношению сигнал/шум округления на выходе. Однако обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

Представляется, что существует более простой БИХ-фильтр, чем найденный в [4]. Возможно, он будет проще полученного КИХ-фильтра с ЛФЧХ. Но для БИХ-фильтров, оперирующих в реальном масштабе времени, нулевая нелинейность ФЧХ недостижима, хотя в полосе пропускания ее можно сделать сколь угодно малой, увеличивая порядок фильтра и длину слова коэффициентов.

## Заключение

Итак, синтез цифрового КИХ-фильтра с ЛФЧХ и произвольной АЧХ при ограниченной длине слова коэффициентов может быть успешно выполнен на основе простейшего сочетания классического адаптивного метода и техники ВИП. Так, синтезированный в качестве примера КИХ-фильтр оказался много проще БИХ-фильтра, найденного ранее методом ЦНП.

Предложенный подход и его возможный уточненный вариант не гарантируют нахождения глобального оптимума. Поэтому полученные решения можно использовать в качестве начальных приближений в алгоритмах вариации коэффициентов, ожидая дополнительного их улучшения.

Автор статьи благодарит В. Н. Бугрова за предоставленную копию публикации [4], а также данные по гидроакустическому тракту и надеется, что изложенный материал окажется полезным для конкретного приложения и послужит хорошей подсказкой разработчикам при проектировании цифровых корректоров АЧХ.

### Литература

1. Мингазин А. Т. Вариация исходных параметров в задачах синтеза цифровых КИХ-фильтров с конечной длиной слова коэффициентов. 3-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA). 2000. Т. 1.
2. Мингазин А. Т. Вариация исходных параметров взвешенной чебышевской аппроксимации в задаче синтеза КИХ-фильтров без умножителей. 7-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA). 2005. Т. 1.
3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989.
4. Шкелев Е., Бугров В., Пройдаков В., Артемьев В. Целочисленные цифровые фильтры — эффективное решение для 8-битовых цифровых платформ // Компоненты и технологии. 2013. № 10.