
ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

20. Fomenkov S. A. Avtomatizirovannaja sistema poiska fizicheskih principov dejstvija izdelij i tehnologij (SAPFIT) / S. A. Fomenkov, V. A. Grishin, G. A. Karachunova. – Volgograd : Dep. v VINITI, 1990.
21. Computer-Aided Innovation with TriSolver Software. – Rezhim dostupa: http://www.trisolver.eu/leistungen/leistungen_1.htm, svobodnyj. – Zaglavie s jekrana. – Jaz. rus.
22. Ideation International: Bringing the Science of Innovation to the World. Innovation WorkBench 3.2. – Rezhim dostupa: <http://www.ideationtriz.com/new/iwb.asp>, svobodnyj. – Zaglavie s jekrana. – Jaz. rus.
23. Invention Machine. – Rezhim dostupa: <http://inventionmachine.com>, svobodnyj. – Zaglavie s jekrana. – Jaz. rus.
24. Origin of Computer Aided Innovation: TriSolver Software. – Rezhim dostupa: <http://www.trisolver.eu/software/cai.htm> 13, svobodnyj. – Zaglavie s jekrana. – Jaz. rus.
25. Pretium Innovation, LLC: Инноватор (Guided Innovation Toolkit). – Rezhim dostupa: <http://www.nadir.crimea.com/Soft1.htm>, svobodnyj. – Zaglavie s jekrana. – Jaz. rus.
26. Henry R. Invention Machine Introduces Goldfire Innovator™ / R. Henry. – Rezhim dostupa: http://inventionmachine.com/Portals/56687/docs/pr_introduces_goldfire_innovator.pdf, svobodnyj. – Zaglavie s jekrana. – Jaz. rus.
27. Husig S. Computer Aided Innovation – state of the art from a new product development perspective / S. Hüsig, S. Kohn // Computers in Industry. – 2009. – № 60 (8). – P. 551–562.
28. Kohn S. Development of an empirical based categorisation scheme for CAI software / S. Kohn, S. Hüsig // International Journal of Computer Applications in Technology. – 2007. – № 30 (1/2). – P. 33–46.

УДК 681.3.06(075.8)

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОЙ ВЫБОРКИ

Иванов Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, Поволжский государственный университет сервиса, 445677, Россия, г. Тольятти, ул. Гагарина, 4, e-mail: Ivanov@tolgas.ru.

Шакурский Виктор Константинович, доктор технических наук, профессор, Тольяттинский государственный университет, 445677, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, e-mail: Shakurskiy@mail.ru.

Шакурский Максим Викторович, заведующий лабораторией, Поволжский государственный университет сервиса, 445677, Россия, г. Тольятти, ул. Гагарина, 4, e-mail: M.Shakurskiy@gmail.com.

В статье решается задача синтеза методом частотной выборки цифровых фильтров с заданными параметрами амплитудочастотной характеристики. Классический подход к синтезу цифровых фильтров приводит к дискретному изменению полосы пропускания с шагом, равным ширине полосы пропускания отдельного элементарного цифрового фильтра. При этом оптимизация амплитудочастотной характеристики выполняется введением симметричных амплитудных коэффициентов для выходных сигналов элементарных цифровых фильтров. В статье показан эффект плавного смещения полосы пропускания при несимметричной вариации амплитудных коэффициентов элементарных цифровых фильтров. Данный эффект позволяет реализовать синтез цифрового фильтра с заданной полосой пропускания и заданным подавлением вне полосы с высокой точностью. В основу технологии синтеза положено использование несимметричных, относительно среднего элементарного цифрового фильтра, значений амплитудных коэффициентов для выходных сигналов основных и дополнительных элементарных цифровых фильтров. При этом сохраняется ли-

нейность фазочастотной характеристики. В статье приведен пример синтеза цифрового фильтра по заданным параметрам амплитудочастотной характеристики с использованием несимметричных коэффициентов для выходных сигналов элементарных цифровых фильтров. Результат улучшения амплитудочастотной характеристики получен с помощью метода последовательных приближений.

Ключевые слова: метод частотной выборки, амплитудочастотная характеристика, ряд Котельникова, элементарный цифровой фильтр.

THE TECHNOLOGY OF SYNTHESIS OF DIGITAL FILTERS USING FREQUENCY – SAMPLING METHOD

Ivanov Victor V. Doctor of technical science, Volga Region State University of service, 445677, Russia, Gagarina 4, Togliatti, e-mail: Ivanov@tolgas.ru.

Shakurskiy Victor K. Doctor of technical science, Toliatti State University, 445677, Russia, Belorusskaya 14, Togliatti, e-mail: Shakurskiy@mail.ru.

Shakurskiy Maxim V. Head of laboratory, Volga Region State University of service, 445677, Russia, Gagarina 4, Togliatti, e-mail: M.Shakurskiy@gmail.com.

In article solves the problem of the synthesis of digital filters with given parameters of amplitude-frequency characteristic using frequency-sampling method. The classical approach to the synthesis of digital filters leads to a discrete change in bandwidth in increments equal to the bandwidth of a single elementary digital filter. In this case optimization of amplitude-frequency characteristic is performed by symmetric amplitude coefficients for the output signals of the elementary digital filters. The article shows the effect of a smooth shift of bandwidth by asymmetric variation of the amplitude coefficients of elementary digital filters. This effect allows the synthesis of a digital filter with a determined bandwidth, and the suppression outside the passband with high accuracy. The technology of synthesis based on the use of asymmetric, relative to the average elemental digital filter, values of the amplitude coefficients for the output of primary and additional elementary digital filters. This preserves the linearity of the phase-frequency characteristics. In article shown an example of the synthesis of digital filter on the given parameters of amplitude-frequency characteristics with use of asymmetric coefficients for the output of the elementary digital filters. The result of improved performance of amplitude-frequency characteristic achieved by the method of successive approximations.

Key words: frequency-sampling method, amplitude-frequency characteristic, Kotelnikov series, elementary digital filter.

Особенностью синтеза цифровых фильтров (ЦФ) методом частотной выборки [1, с. 418] является аппроксимация заданной амплитудочастотной характеристики (АЧХ) ограниченным рядом Котельникова. Элементы ряда определяют АЧХ элементарных цифровых фильтров (ЭЦФ), суперпозиция которых дает реальную АЧХ. Несмотря на высокую вычислительную эффективность таких фильтров за счет распараллеливания операций и оптимальной структуры ЭЦФ [2, с. 99], они находят ограниченное применение. Это связано с дискретностью настройки полосы пропускания и слабым подавлением вне полосы пропускания. Выполненные исследования показали, что существует возможность плавной настройки полосы пропускания при сохранении подавления вне полосы не менее 40 дБ. Во многих случаях этого достаточно, например, при синтезе цифровых управляемых автоколебательных систем [3, с. 112].

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

С целью аппроксимации АЧХ используем ряд Котельникова в области положительных частот:

$$s(\tilde{\omega}) = \sum_{q=0}^{+\infty} (U_q \operatorname{sinc}(\tilde{\omega}\pi - q\pi) + U_q \operatorname{sinc}(-\tilde{\omega}\pi - q\pi)), \quad (1)$$

где U – массив амплитудных коэффициентов составляющих ряда; $\tilde{\omega}$ – нормированная частота; q – номер составляющей ряда.

Разработаны ЭЦФ, у которых АЧХ совпадает с элементами ряда (1), а фазочастотная характеристика (ФЧХ) линейная [4, с. 29; 5]. Для работы всех ЭЦФ используется одна скользящая выборка отсчетов входного сигнала. Средняя частота первого ЭЦФ f_0 определяется длительностью скользящего окна и равна

$$f_0 = \frac{1}{N \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

где N – количество отсчетов в скользящем окне; Δt – интервал дискретизации. Средние частоты остальных ЭЦФ кратны f_0 .

Минимальный шаг изменения полосы пропускания ЦФ, синтезируемого на основании прямоугольного окна, составляет величину f_0 . Для уменьшения шага необходимо уменьшать f_0 , что, в свою очередь, увеличивает количество ЭЦФ в структуре фильтра. При этом дискретность изменения полосы пропускания при настройке фильтра сохраняется.

Добиться плавного изменения полосы пропускания можно вариацией амплитудных коэффициентов ЭЦФ слева и справа полосы пропускания. Покажем данный эффект на примере ЦФ состоящего из двух ЭЦФ.

На рисунке 1 (АЧХ 1) приведена АЧХ ЦФ, состоящего из двух ЭЦФ с одинаковыми U . После нормировки были получены амплитудные коэффициенты $U = 0,78$, одинаковые для обоих ЭЦФ. Если коэффициенты изменить несимметрично, то АЧХ исказится. При этом ФЧХ не смещается и сохраняет свою линейность. АЧХ 2 и АЧХ 3 (рис. 1) получены при разных амплитудных коэффициентах. Видно, что полосу пропускания можно плавно смещать в обе стороны.

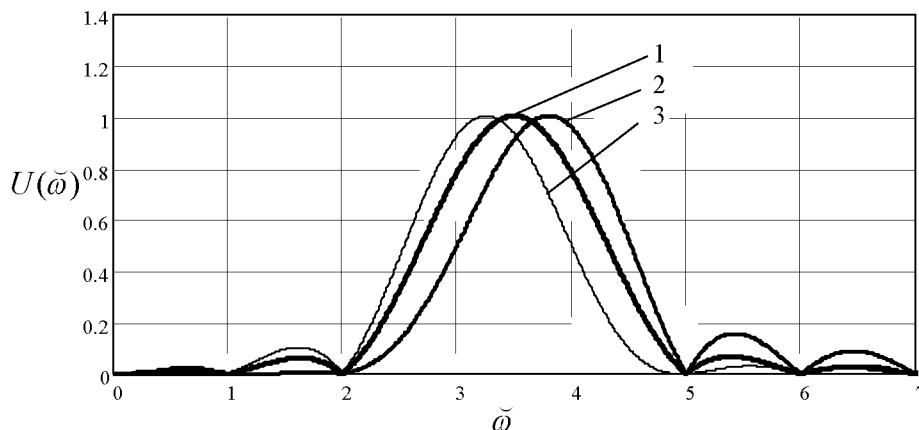


Рис. 1. Влияние амплитудных коэффициентов ЭЦФ на АЧХ ЦФ:
1: $U_1 = 0,78; U_2 = 0,78$; 2: $U_1 = 0,5; U_2 = 0,96$; 3: $U_1 = 0,93; U_2 = 0,5$

Настройка ширины полосы пропускания ЦФ, состоящего из трех и более ЭЦФ, осуществляется по такому же принципу, с той лишь разницей, что в настройке участвуют толь-

ко крайние ЭЦФ. При этом изменение амплитудных коэффициентов крайних ЭЦФ приводит к изменению всей АЧХ. Для получения АЧХ, удовлетворяющей заданные требования по полосе и по подавлению, требуется вводить в структуру фильтра дополнительные ЭЦФ. Использование дополнительных ЭЦФ является классическим способом улучшения свойств АЧХ ЦФ, синтезируемых методом частотной выборки.

Рассмотрим технологию синтеза ЦФ с линейной ФЧХ по заданным параметрам АЧХ. Пусть заданы следующие исходные параметры:

Интервал дискретизации $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$ с.

Нижняя граница полосы пропускания: $\omega_1 = 3$ кГц.

Верхняя граница полосы пропускания: $\omega_2 = 4,35$ кГц.

Степень подавления: 40 дБ.

Пульсации в полосе пропускания в пределах $\pm 0,5$ %

Полоса спада: 0,3 кГц.

Границы полосы пропускания оцениваются по среднему значению относительно пульсаций в полосе пропускания.

Определим число отсчетов в скользящей выборке. С учетом введения дополнительных ЭЦФ примем полосу спада f_{cn} равной утроенной частоте f_0 . Таким образом:

$$\frac{1}{3} \cdot f_{cn} = (N \cdot \Delta t)^{-1} \quad (3)$$

Из (3) находим $N=10000$, $f_0=100$ Гц. Для реализации ЦФ необходимо использовать ЭЦФ с номерами от 29 по 44. АЧХ полученного фильтра показана на рисунке 2. Все амплитудные коэффициенты ЭЦФ приняты равными единице. Пунктирными линиями обозначены границы и допуски. Видно, что на данном этапе синтеза АЧХ является неудовлетворительной.

Добавим четыре дополнительных ЭЦФ с номерами 27, 28, 45 и 46 в структуру ЦФ и проведем симметричный подбор амплитудных коэффициентов. В таблице 1 приведены соответствующие амплитудные коэффициенты. В результате АЧХ приобретает вид, показанный на рисунке 3. Там же показаны пульсации в полосе пропускания (правая шкала).

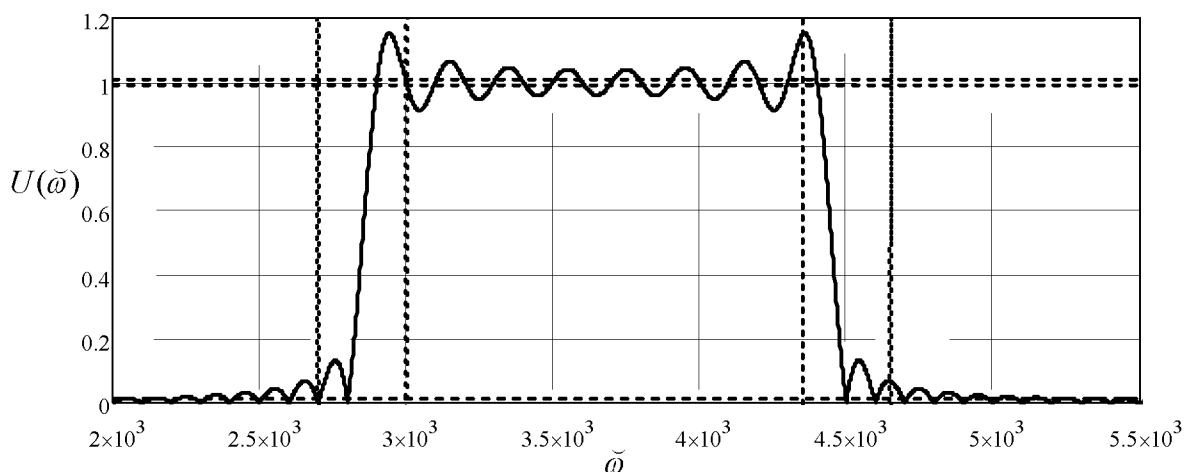


Рис. 2. АЧХ цифрового фильтра

Таблица 1

Значения амплитудных коэффициентов ЭЦФ

Номер ЭЦФ	27	28	29	30–43	44	45	46
Коэффициент	0,02	0,28	0,8	1	0,8	0,28	0,02

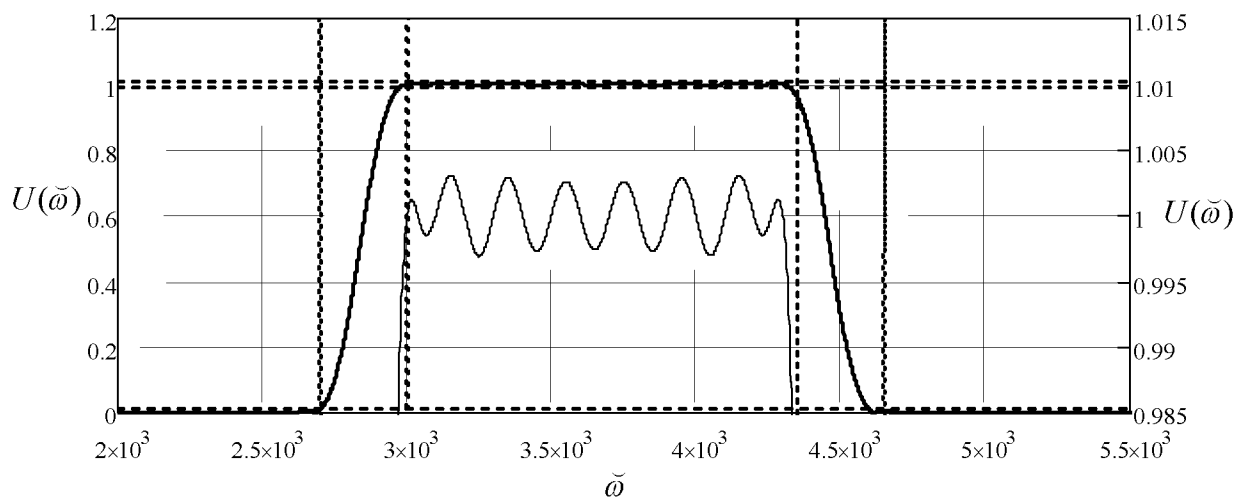


Рис. 3. АЧХ цифрового фильтра

Видно, что при симметричном подборе амплитудных коэффициентов полоса пропускания АЧХ не отвечала заданным требованиям в области высоких частот.

Проведем несимметричный подбор коэффициентов таким образом, чтобы АЧХ отвечала заданным требованиям. Соответствующие амплитудные коэффициенты приведены в таблице 2. На рисунке 4 приведена результирующая АЧХ и пульсации в полосе пропускания.

Таблица 2

Значения амплитудных коэффициентов ЭЦФ

Номер ЭЦФ	27	28	29	30–43	43	45	46
Коэффициенты	0,01	0,3	0,82	1	0,94	0,5	0,05

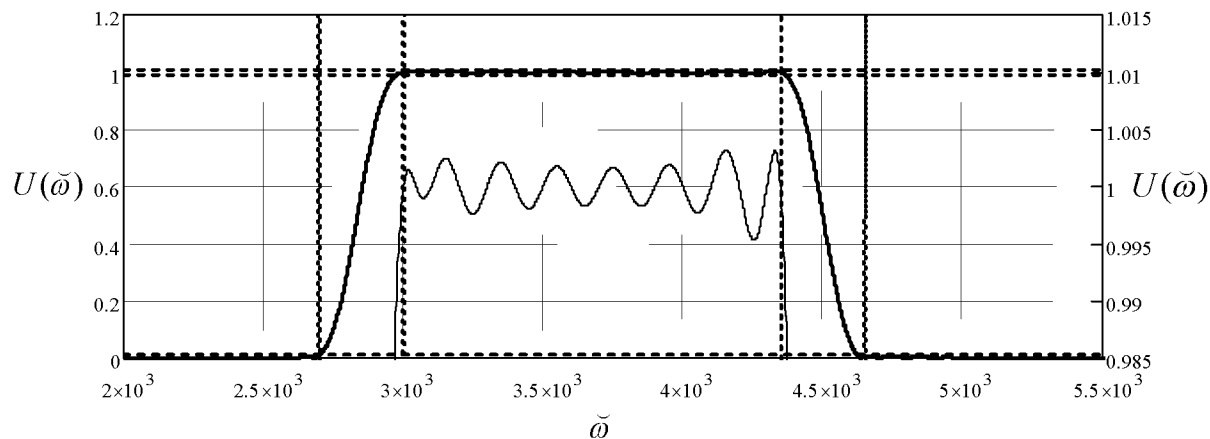


Рис. 4. Результирующая АЧХ цифрового фильтра

Видно, что пульсации удовлетворяют заданному допуску, а АЧХ соответствует заданным требованиям. На рисунке 5 приведены результирующая АЧХ в логарифмических координатах и соответствующая ей ФЧХ.

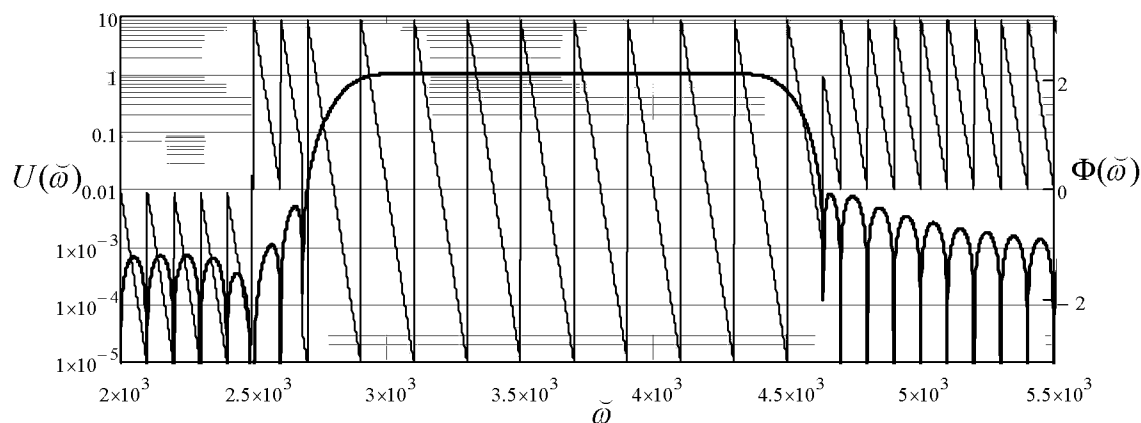


Рис. 5. Результирующие АЧХ и ФЧХ цифрового фильтра

Таким образом, использование несимметричных значений амплитудных коэффициентов дополнительных ЭЦФ позволяет осуществлять точную настройку АЧХ ЦФ. Алгоритм подбора коэффициентов осуществляется на основе метода последовательных приближений. Данная технология позволяет синтезировать ЦФ с АЧХ произвольной формы.

Список литературы

1. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход : пер. с англ. / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2004. – 989 с.
2. Голд Б. Цифровая обработка сигналов / Б. Голд, Ч. Рэйдер // Советское радио. – М., 1973. – 368 с.
3. Иванов В. В. Генераторные фазовые и частотные преобразователи и модуляторы / В. В. Иванов, В. К. Шакурский. – М. : Радио и связь, 2003. – 184 с.
4. Шакурский М. В. Алгоритм синтеза цифровых фильтров на основе прямого и обратного преобразования Фурье с промежуточной обработкой спектра / М. В. Шакурский // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – Т. 8, № 4. – С. 29–32.
5. Шакурский М. В. Патент РФ на полезную модель № 108669 Цифровой фильтр / М. В. Шакурский. – Оpubl. 20.09.2011. – Бюл. № 26.

References

1. Ajficher Je. S. Cifrovaja obrabotka signalov: prakticheskij podhod : per. s angl. / Je. S. Ajficher, B. U. Dzhervis. – 2-e izd. – M. : Vil'jams, 2004. – 989 s.
2. Gold B. Cifrovaja obrabotka signalov / B. Gold, Ch. Rjejder // Sovetskoe radio. – M., 1973. – 368 s.
3. Ivanov V. V. Generatornye fazovye i chastotnye preobrazovateli i moduljatory / V. V. Ivanov, V. K. Shakurskij. – M. : Radio i svjaz', 2003. – 184 s.
4. Shakurskij M. V. Algoritm sinteza cifrovyh fil'trov na osnove prjamoego i obratnogo preobrazovanija Fur'e s promezhutochnoj obrabotkoj spektra / M. V. Shakurskij // Infokommunikacionnye tehnologii. – 2010. – T. 8, № 4. – S. 29–32.
5. Shakurskij M. V. Patent RF na poleznuju model' № 108669 Cifrovoy fil'tr / M. V. Shakurskij. – Opubl. 20.09.2011. – Bjul. № 26.