

АДАПТИВНЫЙ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКТОР АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ

Тяжеев А.И.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: tyagev@psati.ru

В статье приводится методика расчета параметров и описание работы адаптивного цифрового корректора амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) каналов связи. Корректор строится на базе нерекурсивного цифрового фильтра с симметричными коэффициентами относительно центрального коэффициента фильтра. Этот фильтр включается на входе или выходе канала. Форма АЧХ корректора в полосе пропускания аппроксимируется полиномом второй степени или параболой. Коэффициенты аппроксимации полинома определяются в результате измерений АЧХ канала и последующего решения системы из трех линейных уравнений, а коэффициенты фильтра вычисляются по формулам, полученным в статье из общей формулы коэффициентов ряда Фурье.

Ключевые слова: коррекция характеристик канала, нерекурсивный цифровой фильтр, коэффициенты аппроксимации амплитудно-частотной характеристики, методика расчета коэффициентов фильтра и коэффициентов аппроксимации.

Введение

В ряде систем связи, в информационно-измерительных системах, в системах контроля и регулирования возникает необходимость построения корректоров АЧХ каналов, трактов передачи и т.д. [1]. Суть коррекции АЧХ канала состоит в том, что в силу различных явлений неравномерность АЧХ канала изменяется во времени и необходимо периодически компенсировать эту неравномерность, включив на выходе канала адаптивный корректор, АЧХ которого изменялась бы так, чтобы результирующая неравномерность АЧХ тракта канал-корректор оставалась неизменной с определенной погрешностью. Возможности цифровой обработки сигналов позволяют создавать такие адаптивные корректоры АЧХ каналов [2-3]. В технической литературе описаны методы расчета фильтров различного типа. В том числе с адаптивными характеристиками [4-10].

В данной статье приводится методика расчета и описание работы адаптивного цифрового корректора, в основу которого положен нерекурсивный цифровой фильтр порядка $2k$ с симметричными коэффициентами b_n относительно центрального коэффициента фильтра b_0 . Структурная схема такого фильтра приведена на рис. 1. Порядок нерекурсивного фильтра $2k$ определяется числом элементов задержки в схеме фильтра. Фазо-частотная характеристика этого фильтра линейная, а амплитудно-частотная характеристика описывается выражением [2]:

$$K(x) = \left| \sum_{n=0}^k C_n \cos 2\pi nx \right|, \quad (1)$$

где $x = f/f_0$ – частота, нормированная к частоте дискретизации f_0 . Нормированную частоту x

достаточно изменять от 0 до 0,5, дальше АЧХ циклически повторяется. Коэффициенты фильтра b_0 и b_n связаны с входящими в эту формулу коэффициентами C_n следующим образом:

$$b_n = 0,5C_n \text{ при } n \neq 0, b_0 = C_0 \text{ при } n = 0. \quad (2)$$

Желаемую АЧХ фильтра $F(x)$ в полосе пропускания можно задать равномерной $F(x) = C$, с определенным наклоном $F(x) = Ax + B$ или рельефной в форме параболы $F(x) = Ax^2 + Bx + C$.

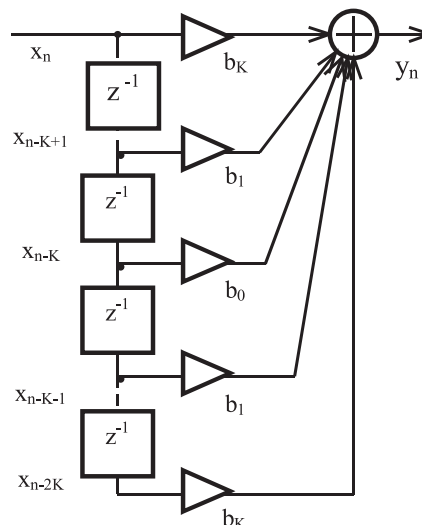


Рис. 1. Структурная схема нерекурсивного цифрового фильтра порядка $2k$ с симметричными коэффициентами

Коэффициенты A , B и C определяют вид рельефности АЧХ фильтра в полосе пропускания и являются исходными данными для расчета коэффициентов b_0 и b_n фильтра, выполняющего функцию корректора АЧХ канала. Иначе гово-

ря, коэффициенты b_0 и b_n являются параметрами адаптивного корректора АЧХ канала.

Расчет коэффициентов фильтра по заданной рельефности АЧХ в полосе пропускания

На рис. 2 приведены рельефные АЧХ фильтров четырех типов: фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра верхних частот (ФВЧ), полосового фильтра (ПФ) и режекторного фильтра (РФ). Здесь мы ограничимся расчетом только полосового фильтра (ПФ), то есть получим формулы для расчета его коэффициентов b_0 и b_n , обеспечивающих рельефность АЧХ в полосе пропускания в форме параболы $F(x) = Ax^2 + Bx + C$, поскольку из параболы вытекают частные случаи: АЧХ с наклоном при $A = 0$ или равномерная АЧХ при $A = B = 0$.

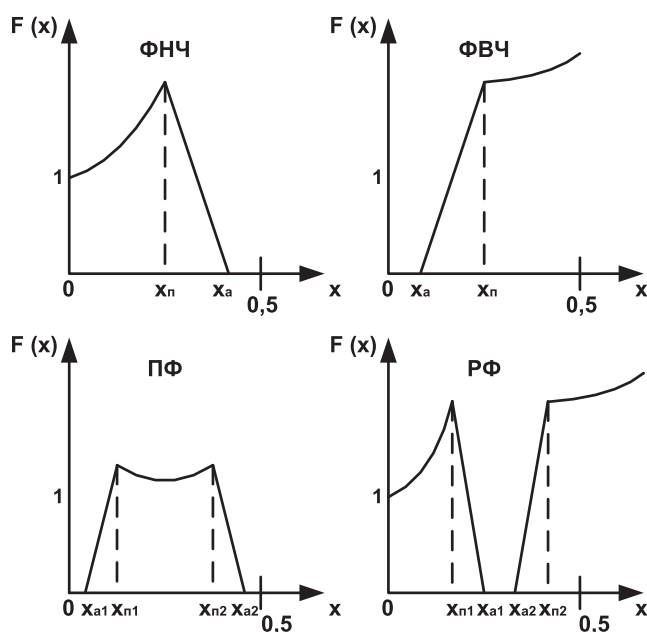


Рис. 2. Рельефные амплитудно-частотные характеристики фильтров четырех типов: ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ

Аналитическое выражение $F(x)$ для АЧХ полосового фильтра на всем участке изменения нормированной частоты x имеет вид

$$F(x) = \begin{cases} 0; & 0 \leq x \leq x_{31}; \\ a_1x + b_1; & x_{31} < x < x_{n1}; \\ Ax^2 + Bx + C; & x_{n1} \leq x \leq x_{n2}; \\ a_2x + b_2; & x_{n2} < x < x_{32}; \\ 0; & x_{32} \leq x \leq 0,5; \end{cases} \quad (3)$$

где x_{n1} , x_{n2} , x_{31} , x_{32} – нормирование границы полосы пропускания и заграждения фильтра (см. рис. 2).

Они являются исходными данными для последующего расчета. Коэффициенты a_1 , b_1 , a_2 , b_2 определяются по формулам:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{F(x_{n1})}{x_{n1} - x_{31}}; & b_1 &= -a_1x_{31}; \\ a_2 &= \frac{F(x_{n2})}{x_{32} - x_{n2}}; & b_2 &= -a_2x_{32}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $F(x_{n1,2}) = Ax_{n1,2}^2 + Bx_{n1,2} + C$ – значения АЧХ полосового фильтра на нижней и верхней границах полосы пропускания. Тогда искомые коэффициенты b_0 и b_n фильтра определим по формуле рядов Фурье [1]:

$$b_n = \int_0^{0.5} F(x) \cos(2\pi nx) dx. \quad (5)$$

Подставим в эту формулу приведенное выше выражение для $F(x)$, проинтегрируем ее по всем участкам изменения x в интервале от 0 до 0,5 и получим следующие формулы для расчета коэффициентов b_0 и b_n фильтра-корректора АЧХ:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{2A}{3}(x_{n2}^3 - x_{n1}^3) + B(x_{n2}^2 - x_{n1}^2) + \\ &+ 2C(x_{n2} - x_{n1}) + F(x_{n1})(x_{n1} - x_{31}) + \\ &+ F(x_{n2})(x_{32} - x_{n2}); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{0.5}{(\pi n)^2} (a_1(\cos 2\pi nx_{n1} - \cos 2\pi nx_{31}) + \\ &+ a_2(\cos 2\pi nx_{n2} - \cos 2\pi nx_{32}) + \\ &+ B(\cos 2\pi nx_{n2} - \cos 2\pi nx_{n1}) + \\ &+ 2A(x_{n2} \cos 2\pi nx_{n2} - x_{n1} \cos 2\pi nx_{n1}) + \\ &+ \frac{1}{2\pi n} (\sin 2\pi nx_{n1} - \sin 2\pi nx_{n2})). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь величина n изменяется от 1 до k . Отметим, что реальная АЧХ фильтра $K(x)$ будет отличаться от желаемой, описываемой выражением $F(x)$. И отличие это будет тем меньше, чем выше порядок фильтра. А порядок фильтра $2k$ однозначно определяет число гармоник k ряда Фурье, участвующих в формировании рельефной АЧХ полосового фильтра, изображенной на рис. 2.

В полученных формулах для расчета коэффициентов b_0 и b_n неизвестными являются коэффициенты, аппроксимирующие форму рельефности АЧХ фильтра. Опишем процедуру расчета этих коэффициентов.

Алгоритм расчета коэффициентов, аппроксимирующих форму рельефности АЧХ фильтра

Для расчета коэффициентов A ; B и C введем еще одну нормированную частоту:

$$x_n = 0,5(x_{n1} + x_{n2}), \quad (8)$$

то есть x_n – это средняя частота полосового фильтра. Для придания корректору адаптивных свойств необходимо периодически измерять значения АЧХ канала W на трех частотах x_{n1} , x_{n2} и x_n . Допустим, мы измерили эти значения АЧХ канала на трех частотах $W(x_{n1})$, $W(x_{n2})$, $W(x_n)$. В результате измерений оказалось, что они не равны между собой и отличаются от требуемого постоянного значения АЧХ канала, равного значению K . Тогда, зная измеренные величины $W(x_{n1})$, $W(x_{n2})$, $W(x_n)$ и желая иметь одинаковое значение АЧХ канала на всех трех частотах равным K , определим необходимые значения АЧХ фильтра-корректора на этих трех частотах:

$$\begin{aligned} F(x_{n1}) &= \frac{K}{W(x_{n1})}; \quad F(x_{n2}) = \frac{K}{W(x_{n2})}; \\ F(x_n) &= \frac{K}{W(x_n)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Теперь составим систему из трех уравнений:

$$\begin{aligned} F(x_{n1}) &= Ax_{n1}^2 + Bx_{n1} + C; \\ F(x_{n2}) &= Ax_{n2}^2 + Bx_{n2} + C; \\ F(x_n) &= Ax_n^2 + Bx_n + C. \end{aligned} \quad (10)$$

Неизвестными в этой системе линейных уравнений являются коэффициенты A ; B и C . Решив эту систему уравнений относительно неизвестных, найдем искомые коэффициенты A ; B и C , обеспечивающие необходимую форму рельефности фильтра-корректора АЧХ канала связи. Измерения величин $W(x_{n1})$, $W(x_{n2})$, $W(x_n)$ требуют определенного времени и дополнительных технических средств: генераторов, детекторов, измерительной техники. Для каждого конкретного случая выбирается тот или иной способ измерений. Периодичность измерения величин $W(x_{n1})$, $W(x_{n2})$, $W(x_n)$ выбирается в зависимости от того, насколько быстро изменяются во времени характеристики канала связи.

Заключение

В статье получены формулы для расчета параметров и описание работы адаптивного цифро-

го корректора АЧХ канала, но не рассматриваются точностные характеристики адаптивного цифрового корректора АЧХ во всей полосе пропускания канала. Однако они могут быть однозначно определены из полученных в данной статье формул и расчетных соотношений. Если рельефность АЧХ в форме параболы, то есть в виде полинома второго порядка, окажется слишком грубой по точности аппроксимации АЧХ корректора для компенсации неравномерности АЧХ канала, тогда можно использовать для аппроксимации полиномы более высокого порядка. Но при этом усложняются формулы для расчета коэффициентов b_0 и b_n , а также усложняется алгоритм вычисления коэффициентов аппроксимирующего полинома.

Литература

1. Куляс О.Л., Никитин К.А. Коррекция аберраций хроматизма в телевизионных изображениях, сформированных в особых условиях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 15, №1, 201. – С. 89-97.
2. Иванова В.Г., Тяжев А.И. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры. Самара: Изд-во ОФОРТ, 2008. – 264 с.
3. Тяжев А.И. Цифровые фильтры с рельефными амплитудно-частотными характеристиками // Успехи современной радиоэлектроники. №11, 2015. – С. С. 54-57.
4. Елисеев С.Н., Тяжев А.И. Аналоговые и цифровые фильтры Чебышева 1 и 2 рода // Вестник СОНИИР. №1, 2008. – С. 65-69.
5. Гусейнов Т.А., Тяжев А.И. Оценка взаимного влияния сигналов цифрового и аналогового радиовещания в канале с аддитивным белым гауссовым шумом от плотности упаковки спектров // Инфокоммуникационные технологии. Т. 5, №1, 2007. – С. 68-72.
6. Тяжев А.И. Операция перестановки и ее применение для исследования радиотехнических устройств и систем // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 17, №2, 2014. – С. 59-63.
7. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М: Радио и связь, 1989. – 440 с.
8. Льюнг Л. Идентификация систем: Теория для пользователя. М: Наука, 1991. – 431 с.
9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. С.-Пб: Питер, 2006. – 751 с.
10. Запорожец О.В. Коррекция частотной характеристики измерительного канала с помощью адаптивного фильтра // Системи обробки інформації. Вып. 9 (67), 2007. – С. 52-59.

Получено 18.01.2016

Тяжев Анатолий Иванович, д.т.н., профессор Кафедры радиосвязи, радиовещания и телевидения Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. 8-906-340-17-91. E-mail: tyagev@psati.ru

ADAPTIVE DIGITAL CORRECTOR AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE CHANNELS

Tyazhev A.I.

*Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23 L.Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation
E-mail: tyagev@psati.ru*

This work presents method for description of operation of digital corrector for telecommunication channel amplitude-frequency response and computing of channel parameters. Proposed corrector is based on non-recursive digital filter with unsymmetrical parameters related to filter central parameter. That filter is jointed at the input or output of the channel. Amplitude-frequency response characteristic form is approximated by second order polynomial. Polynomial approximation parameters are evaluated by measurement of channel amplitude-frequency response and following solution of three linear equation system. Filter parameters are computed by formulas been derived from the general expression for Fourier series parameters.

Keywords: channel characteristics correction, non-recursive digital filter, parameters for amplitude-frequency characteristic approximation, method for calculation of filter and approximation parameters.

DOI: 10.18469/ikt.2016.14.2.13

Tyazhev Anatoly Ivanovich, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; Professor of the Department of Radiocommunication, Radiobroadcasting and Television; Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +79063401791. E-mail: tyagev@psati.ru

References

1. Kulyas O.L., Nikitin K.A. Korrektsiya aberratsiy hromatizma v televizionnykh izobrazheniyah, sformirovannykh v osobnykh usloviyakh [Chromaticity correction of aberrations in the television image formed under special conditions] *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2012, vol. 15, no. 1, pp. 89-97.
2. Ivanova V.G., Tyazhev A.I. *Tsifrovaya obrabotka signalov i signalnyye protsessory* [Digital Signal Processing and Signal Processors]. Samara, OFORT Publ., 2008. 264 p.
3. Tyazhev A.I. Tsifrovyye filtry s relefnyimi amplitudno-chastotnyimi harakteristikam [Digital filters with relief amplitude-frequency characteristics]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2015, no. 11, pp. 54-57.
4. Eliseev S.N., Tyazhev A.I. Analogovyye i tsifrovyye filtry Chebysheva 1 i 2 roda [Analog and digital filters 1 and 2 Chebyshev kind]. *Vestnik SONIIR*, 2008, no. 1, pp. 65-69.
5. Guseynov T.A., Tyazhev A.I. Otsenka vzaimnogo vliyaniya signalov tsifrovogo i analogovogo radioveschaniya v kanale s additivnyim belyim gaussovym shumom ot plotnosti upakovki spektrov [Evaluation of the mutual influence of digital and analog signals broadcasting in a channel with additive white Gaussian noise from the packing density spectra]. *Infokommunikatsionnye tehnologii*, 2007, vol. 5, no. 1, pp. 68-72.
6. Tyazhev A.I. Operatsiya perestanki i ee primeneniye dlya issledovaniya radiotekhnicheskikh ustroystv i system [Operation transposition and its application for research of radio engineering devices and systems]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2014, vol. 17, no. 2, pp. 59-63.
7. Uidrou B., Stirnz S. *Adaptivnaya obrabotka signalov* [Adaptive Signal Processing] Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989. 440 p.
8. Lyung L. *Identifikatsiya sistem: Teoriya dlya polzovatelya* [System Identification: Theory for a User]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 431 p.
9. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2006. 751 p.
10. Zaporozhets O.V. Korrektsiya chastotnoy harakteristiki izmeritelnogo kanala s pomoschyu adaptivnogo filtra [Correcting of the frequency characteristic of the measuring channel via the adaptive filter] *Sistemy obrabotki informatsii*, 2007, vol. 67, no. 9, pp. 52-59.

Received 18.01.2016