

Метод коррекции наклона АЧХ параметрическим КИХ-фильтром 3-го порядка с линейной ФЧХ

Введение

В опубликованной ранее статье [4] для решения задачи коррекции наклона АЧХ на высоких частотах предлагался простейших КИХ-фильтр 2-го порядка с одним параметром. Относительным недостатком этого решения являлся нелинейный характер ФЧХ. В данной статье для решения той же задачи предлагается КИХ-фильтр 3-го порядка с одним параметром, обладающий свойством линейности ФЧХ.

Простая аналитическая форма передаточной характеристики с одним параметром, определяющим наклон АЧХ, даёт возможность применить данный фильтр для коррекции АЧХ в полосе частот пропускания трактов АЦП или ЦАП, например, при операции калибровки коэффициента передачи на средних и верхних частотах полосы частот пропускания этих трактов. Фильтр имеет постоянную задержку сигнала для разных частот сигнала и разных значений параметра наклона АЧХ. Как и все остальные КИХ фильтры, данный фильтр абсолютно устойчив.

Цифровой фильтр

Предлагаемый фильтр описывается разностным уравнением:

$$Y(n) = (X(n) - X(n - 1)) * M + (X(n) - X(n - 2)) * K + X(n) \quad (1)$$

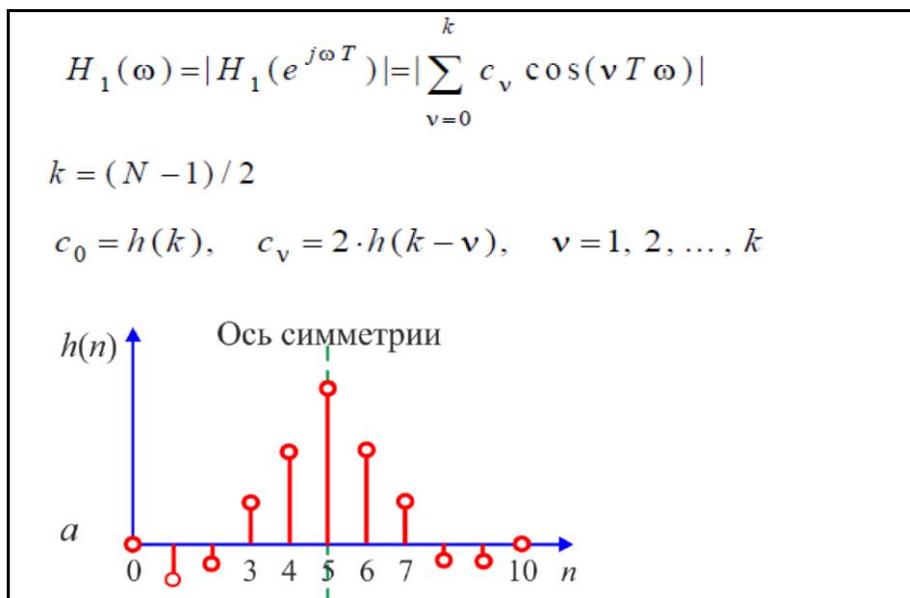
Преобразуя в каноническую форму,

$$Y(n) = X(n) * (M + K + 1) + X(n - 1) * (-M) + X(n - 2) * (-K) \quad (2)$$

получаем разностное уравнение КИХ-фильтра 3-го порядка. Теоретическое условие линейности его ФЧХ – это симметричность коэффициентов: $M + K + 1 = -K$, отсюда $M = -2K - 1$. Подставляем M в (2):

$$Y(n) = X(n) * (-K) + X(n - 1) * (2K + 1) + X(n - 2) * (-K) \quad (3)$$

Это уже КИХ фильтр с симметричной импульсной характеристикой. Для такого фильтра [1]:



Отсюда получаем $C_0 = 2K + 1$; $C_1 = 2 * (-K)$; и модуль передаточной характеристики полученного КИХ фильтра с линейной ФЧХ:

$$|H(f)| = (2K + 1) - 2K * \cos(2\pi fT) \quad (4)$$

Линейная ФЧХ: $\varphi(f) = 2\pi fT$

Приведём некоторые значения передаточной характеристики:

$$H(0) = 1$$

$$H(0,0625/T) \approx 0,152 * K + 1$$

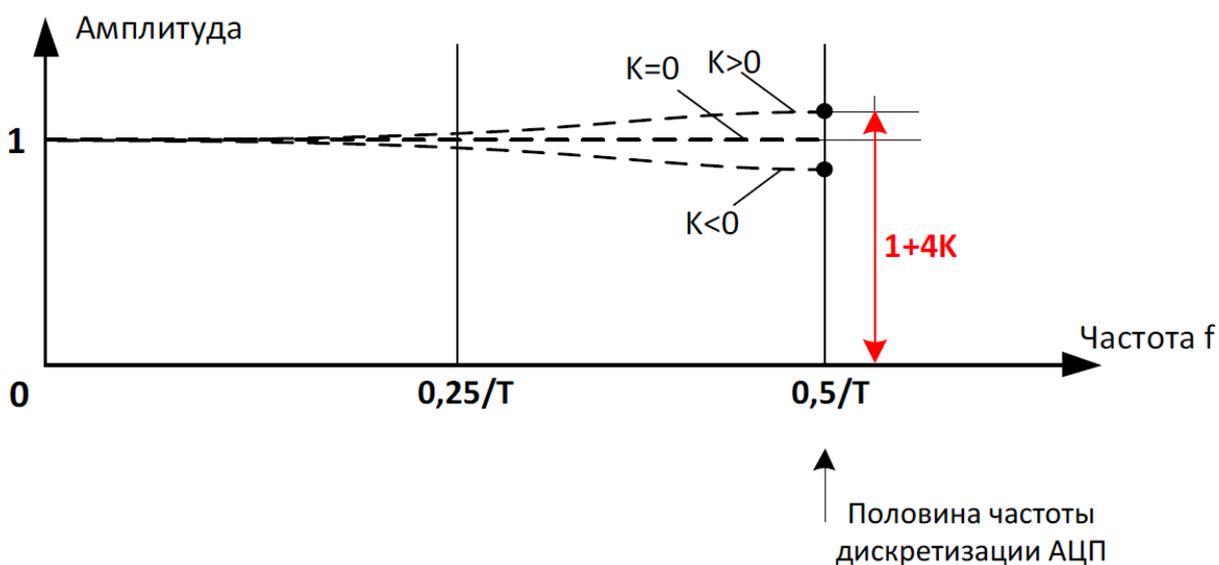
$$H(0,125/T) \approx 0,586 * K + 1$$

$$H(0,25/T) = 2K + 1$$

$$H(0,375/T) \approx 3,414K + 1$$

$$H(0,5/T) = 4K + 1$$

Характер передаточной функции и физический смысл коэффициента K показан на рисунке ниже.



Практическая постановка задачи

В практическом случае задача ставится “с другого конца”. Имеется тракт АЦП с частотой преобразования $1/T$ с монотонным наклоном АЧХ. Для расчёта корректирующего фильтра требуется измерить с помощью этого АЦП амплитуду A_0 сигнала с наименьшей частотой и измерить амплитуду A_1 сигнала с частотой $f < 0,5/T$. Соответственно, модуль передаточной функции тракта АЦП при частоте f будет равен A_1/A_0 , а модуль корректирующего фильтра $|H(e^{j2\pi fT})|$ на этой частоте должен быть равен обратной величине, т.е. A_0 / A_1 , для выравнивания АЧХ.

Итак, практическая задача состоит в нахождении K при известных значениях

$|H(e^{j2\pi fT})|$, f , T . Выражая K из формулы (4), получим:

$$K = \frac{|H(f)| - 1}{2 * (1 - \cos(2\pi fT))} \quad (5)$$

Коррекция постоянного наклона АЧХ аналогового тракта для разных частот дискретизации АЦП или ЦАП

Ниже приводится вывод формулы расчёта коэффициента фильтра для новой частоты дискретизации АЦП (ЦАП) при условии сохранения той же величины спада АЧХ на выбранной частоте.

Если f_0 – частота нормируемого спада АЧХ при периоде T_1 дискретизации, то, исходя из формулы (4), АЧХ фильтра с коэффициентом фильтра K_1 будет определяться как

$$|H(f_0, T_1)| = (2K_1 + 1) - 2K_1 * \cos(2\pi f_0 T_1) \quad (6)$$

Если f_0 - частота нормируемого спада АЧХ при периоде T_2 дискретизации, то, исходя из формулы (5), коэффициент фильтра K_2 будет определяться как

$$K_2 = \frac{|H(f_0, T_2)| - 1}{2 * (1 - \cos(2\pi f_0 T_2))} \quad (7)$$

Если при разных периодах дискретизации мы хотим иметь одинаковый спад на частоте f_0 , тогда $|H(f_0, T_1)| = |H(f_0, T_2)|$.

Подставляя в формулу (7) вместо $|H(f_0, T_2)|$ значение $|H(f_0, T_1)|$ из формулы (6), получим:

$$K_2 = \frac{(2K_1 + 1) - 2K_1 * \cos(2\pi f_0 T_1) - 1}{2 * (1 - \cos(2\pi f_0 T_2))} \quad (8)$$

После упрощения:

$$K_2 = K_1 \frac{(1 - \cos(2\pi f_0 T_1))}{(1 - \cos(2\pi f_0 T_2))} \quad (9)$$

Очевидно, что условиями корректности применения этой формулы являются:

$$f_0 < 0,5/T_1 \text{ и } f_0 < 0,5/T_2$$

Таким образом, нет необходимости для каждой частоты дискретизации хранить коэффициенты фильтра, поскольку они могут быть вычислены по формуле (9), если известен коэффициент фильтра для одной из частот дискретизации.

Литература

1. Вадутов О.С. Лекции по дисциплине “Математические основы обработки сигналов” – Томский политехнический университет – 2010-2010 гг.
2. Гарманов А.В., Колядин Р.С. Фазовый корректор дифференцирующей RC-цепи: [Электронный ресурс] // L-Card, М., 2019. URL: http://www.lcard.ru/download/articles/iir_phase_corrector.pdf.
3. Гарманов А.В. Простой БИХ-фильтр коррекции излома АЧХ в низкочастотной области полосы частот пропускания: [Электронный ресурс] // L-Card, М., 2019. URL: http://www.lcard.ru/download/simple_iir_filter.pdf.
4. Гарманов А.В. Метод тонкой коррекции наклона АЧХ с помощью простого цифрового фильтра: [Электронный ресурс] // L-Card, М., 2019. URL: http://www.lcard.ru/download/simple_fir_filter.pdf.



www.lcard.ru

Конференция на сайте:

<http://lcard.ru/forums/1?forum=1>

Техподдержка ООО “Л Кард”:

support@lcard.ru

Автор статьи: *А. В. Гарманов,*
инженер-электронщик

Версия статьи 1.0. Сентябрь 2019 г