

Алгоритм наименьших квадратов для калибровки Time Interleaved ADC

1. Исходим из того, что АЦПО принимается как референсный АЦП . [1] Формула (1)
2. Задерживаем выходной сигнал АЦПО для разных суб-АЦП на i/M . Таким образом мы представляем систему из M суб-АЦП как интерполированный сигнал с выхода АЦПО в M раз. Передаточная функция идеального фильтра дробной задержки [1] формула (16). Тип окна для синтеза данного фильтра и его порядок указаны в [1] Таблица 2. Импульсная характеристика идеального ФНЧ записывается как

$$h = \text{sinc}(n) = \sin \frac{n}{\pi n}, 0 < n < N$$

Подвинув эту характеристику на нецелое число отсчетов D получим импульсную характеристику фильтра дробной задержки

$$h = \text{sinc}(n - D) = \sin \frac{n-D}{\pi(n-D)}, 0 < n < N,$$

где n – номер отсчета, D -задержка фильтра N – кол-во отсчетов

$$D = D_{\text{int}} - d,$$

Где D_{int} – целое число отсчетов, d – дробная часть задержки

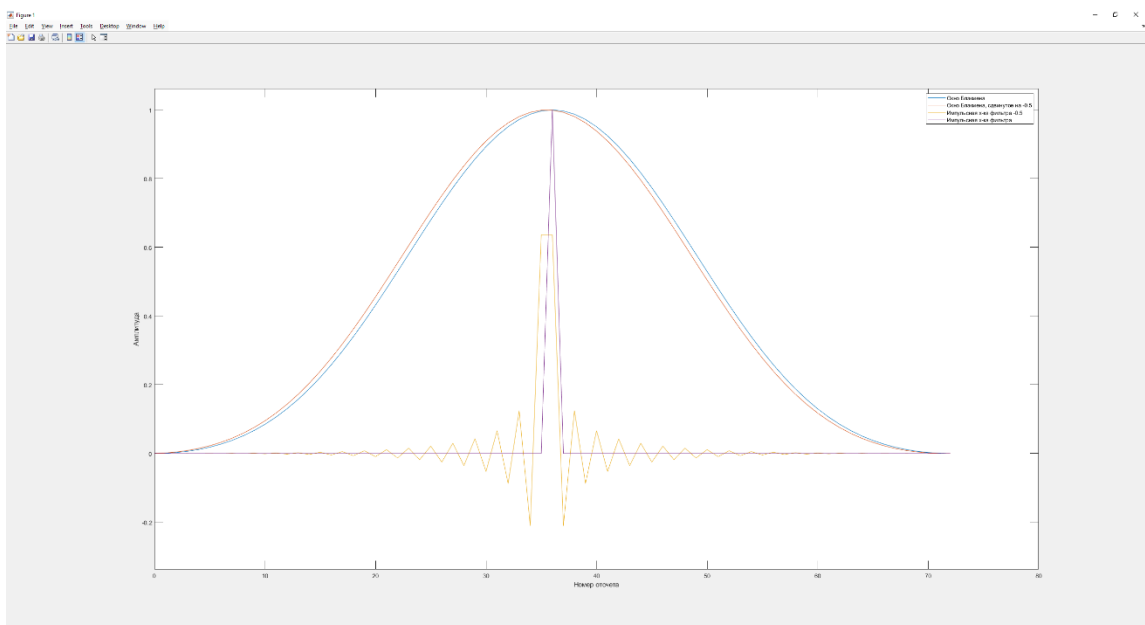
Целая часть общей задержки должна быть равной половине длины фильтра. Для фильтров нечетного порядка D_{int} равен

$$D_{\text{int}} = (N - 1)/2,$$

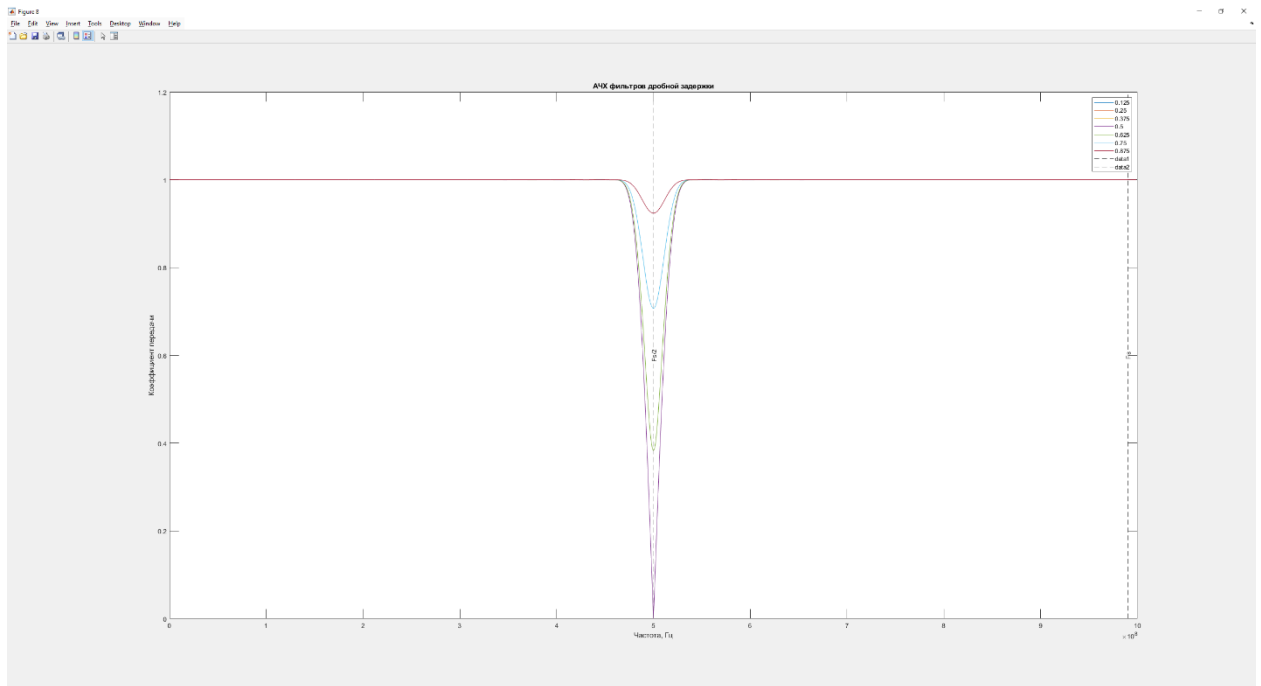
где N - порядок фильтра [2] Fractional Delays Filter. стр 73. Формула (3.35)

Умножив данную характеристику на окно Блэкмэна размером 73 получим фильтр дробной задержки 73 порядка. Импульсная характеристика равна

$$h = w(n - D) * \text{sinc}(n - D), 0 < n < N$$



Из-за того, что данный фильтр ограничен частотой f_c (частота среза), то работать он будет в первой зоне Найквиста каждого суб АЦП ($F_s/2$). АЧХ фильтра при различных дробных задержках



Чтобы иметь возможность работать в разных зонах всей АЦП системы применяется схема с однополосной АМ-модуляцией.

Необходимо получить ортогональный сигнал от исходного сигнала, для этого используется фильтр Гилберта. Импульсная характеристика фильтра [1] (33)

$$h(n) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} * \left(\sin^2 \left(\frac{n * \pi}{2} \right) \right), & n \neq 0 \\ 0, & n = 0 \end{cases}$$

Так же при синтезе фильтра используется оконная функция Блэкмэна [1] (Таблица 2)

$$w(n) = 0.42 - 0.5 * \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) + 0.08 * \cos \left(\frac{4\pi n}{N-1} \right)$$

Таким образом мы получили референсные сигналы для каждого суб-АЦП из исходного сигнала АЦП0, задержанного на различные значения.

Далее необходимо свести к минимуму ошибку между референсным сигналом для каждого суб-АЦП и сигналом с выхода суб-АЦП с помощью алгоритма наименьших квадратов. [1] Формула (18)

Сама формула наименьших квадратов записывается как

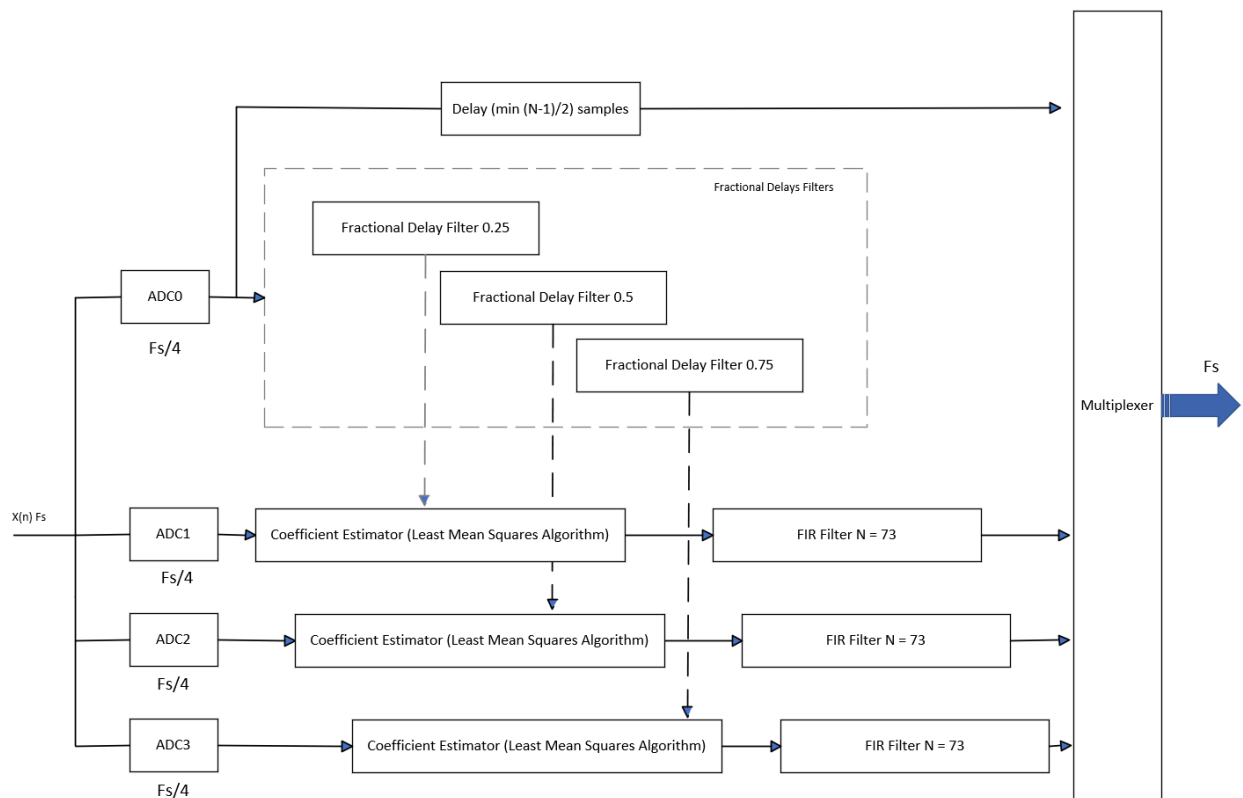
$$h_{\Delta g, \Delta \tau, \Delta w}(k) = (y_{ical o}^T y_{ical o})^{-1} y_{ical o}^T y_{ri}, [1] (19)$$

Где y_{ri} – массив отсчетов референсного сигнала, $y_{ical o}$ – матрица сигнала с выхода суб АЦП размером $L_s \times N$, где N – порядок фильтра, L_s – кол-во отсчетов

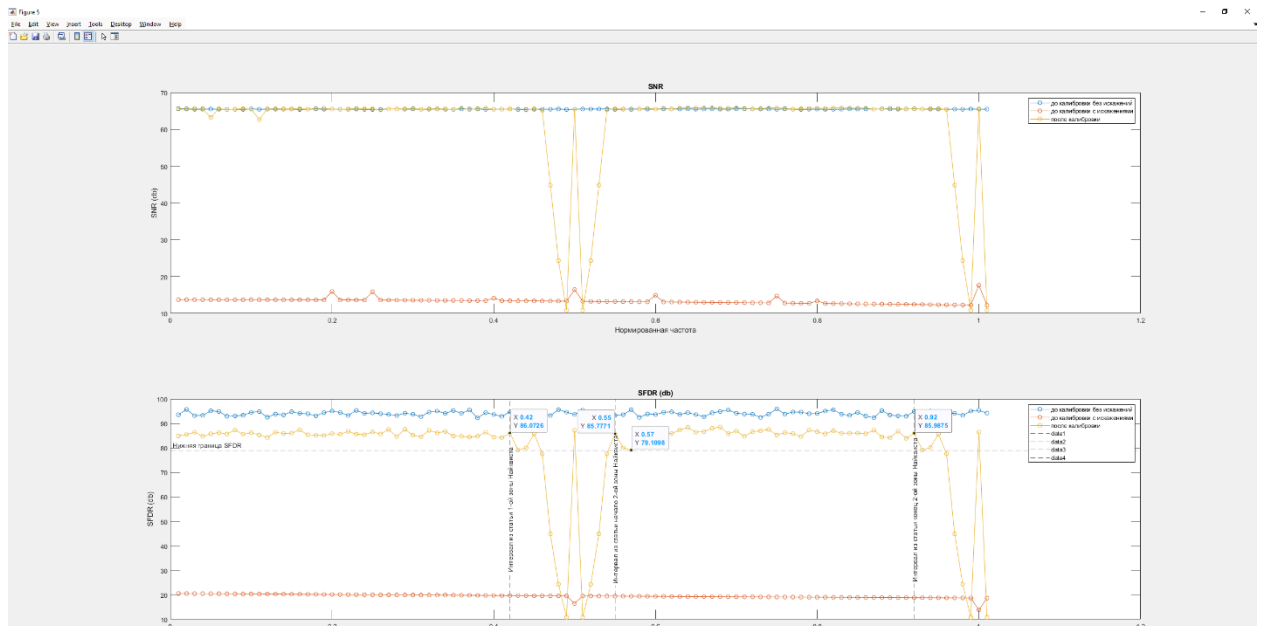
Полученный вектор – это значения коэффициентов КИХ фильтра [1] (9)

Коэффициенты фильтра пересчитываются для каждого нового отсчета входного сигнала. [2] Джиган

Предлагаемая блок-схема алгоритма калибровки



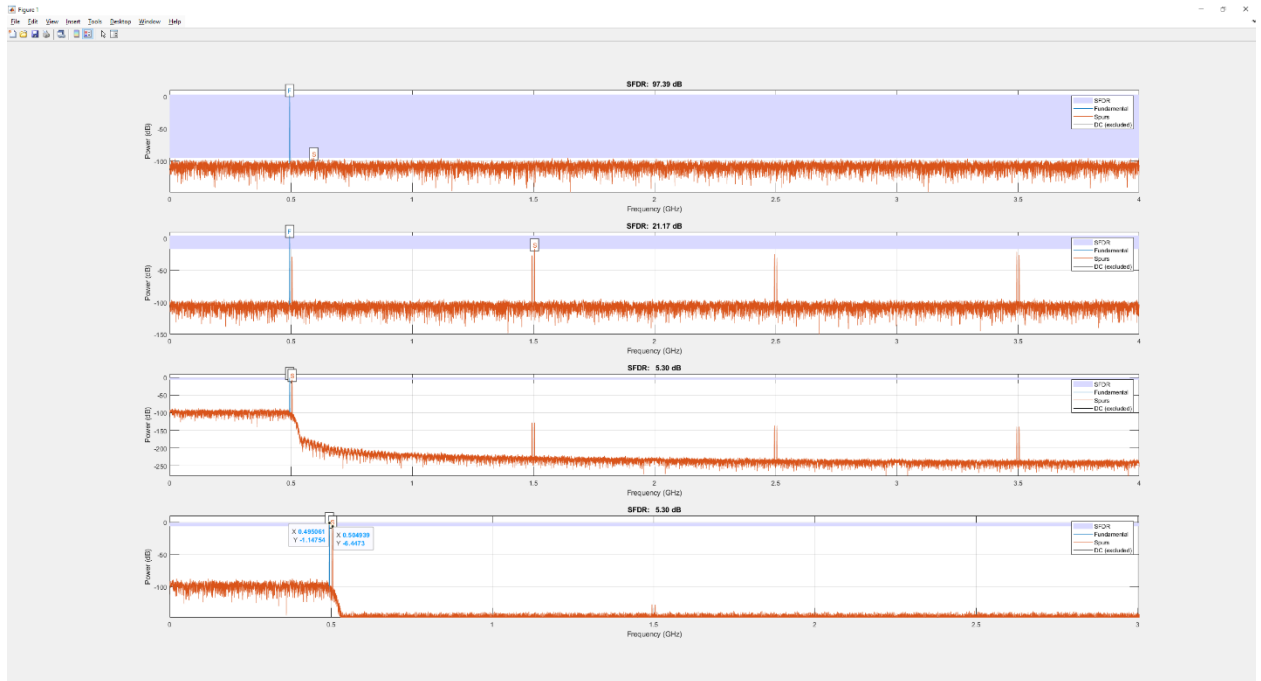
Как и в статье моделировался АЦП с частотой дискретизации 8 ГГц, 8 каналов. Результаты моделирования с ошибками, представленными в [1] Таблица 3. Кроме столбца Bandwidth Mismatch.



Видно, что на частотах, близких к границам зон Найквиста, алгоритм калибровки не работает. График SNR и SFDR повторяет АЧХ фильтров дробной задержки, следовательно на частотах, близких к границам зон Найквиста, происходит работа в переходной полосе фильтров. Следовательно мы уменьшаем амплитуду референсного сигнала и при

дальнейшей сборке всего сигнала получаем амплитудно-модулированный сигнал, т.е ошибку Gain на всех суб-АЦП.

Тестирование на частоте $f_{in} = 495$ МГц, близкой к $F_s/2 = 500$ МГц (первой зоны Найквиста суб АЦП)



Паразитные гармоники АЦП, вызванные ошибкой Gain определяются как [5] стр 24

$$\frac{F_s}{M} \pm f_{in}$$

Где F_s – частота всей системы АЦП = 8 ГГц, M – кол-во каналов = 8, $f_{in} = 495$ МГц.

1 ГГц – 495 = 505 МГц

Список литературы:

1. Hu.M, Yi.P, Digital Calibration for Gain, Time Skew, and Bandwidth Mismatch in Under-Sampling Time-Interleaved System
2. Fractional Delay Filters
3. В.И Джиган, Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы
4. Behrouz Farhang-Boroujeny, Adaptive Filters Theory and Applications
5. Calibration_techniques_for_time_interleaved_sar_adc