

Алгоритм наименьших квадратов для калибровки Time Interleaved ADC

1. В очень упрощенном приближении чередование во времени заключается в мультиплексировании во времени выходов параллельного массива из M идентичных АЦП (как показано на рис. 1) для достижения более высокой суммарной частоты дискретизации f_s (интервал дискретизации $T_s = 1/f_s$). При этом каждый АЦП массива в действительности осуществляет выборку (и преобразование) сигнала на меньшей частоте, f_s/M . [6]

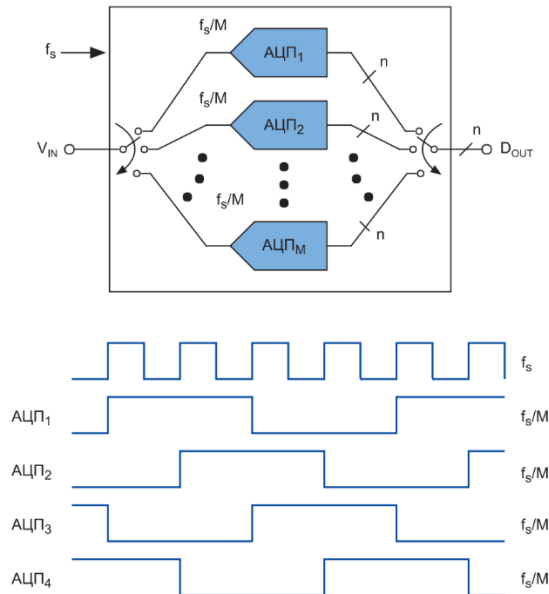


Рисунок 1. Массив из M n -разрядных АЦП с чередованием во времени. (Частота дискретизации каждого АЦП равна f_s/M , а общая частота дискретизации всей системы f_s)

2. Фильтры дробной задержки

- 2.1 Исходим из того, что АЦП0 принимается как референсный АЦП. [1] Формула (1)
- 2.2 Задерживаем выходной сигнал АЦП0 для разных суб-АЦП на i/M . Таким образом мы представляем систему из M суб-АЦП как интерполированный сигнал с выхода АЦП0 в M раз. Передаточная функция идеального фильтра дробной задержки [1] формула (16).

$$H_{ri}(j\omega) = e^{-j\omega T_s \frac{i}{M}}$$

Где i – номер суб-АЦП, M – общее кол-во АЦП

Тип окна для синтеза данного фильтра и его порядок указаны в [1] Таблица 2.

Следовательно фильтр дробной задержки был синтезирован с помощью метода взвешивания. Этапы синтеза приведены ниже.

- 2.3 Импульсная характеристика идеального ФНЧ записывается как

$$h = \text{sinc}(n) = \sin \frac{n}{\pi n}, -\infty < n < +\infty$$

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

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

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

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

где N - порядок фильтра. [2] Формула (3.35)

Умножив данную характеристику на окно Блэкмена размером $N=73$ отсчета, сдвинутое на d , получим фильтр дробной задержки 73 порядка. Импульсная характеристика фильтра равна

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

где $w(n-D)$ – окно Блэкмена [1] (Таблица 2)

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

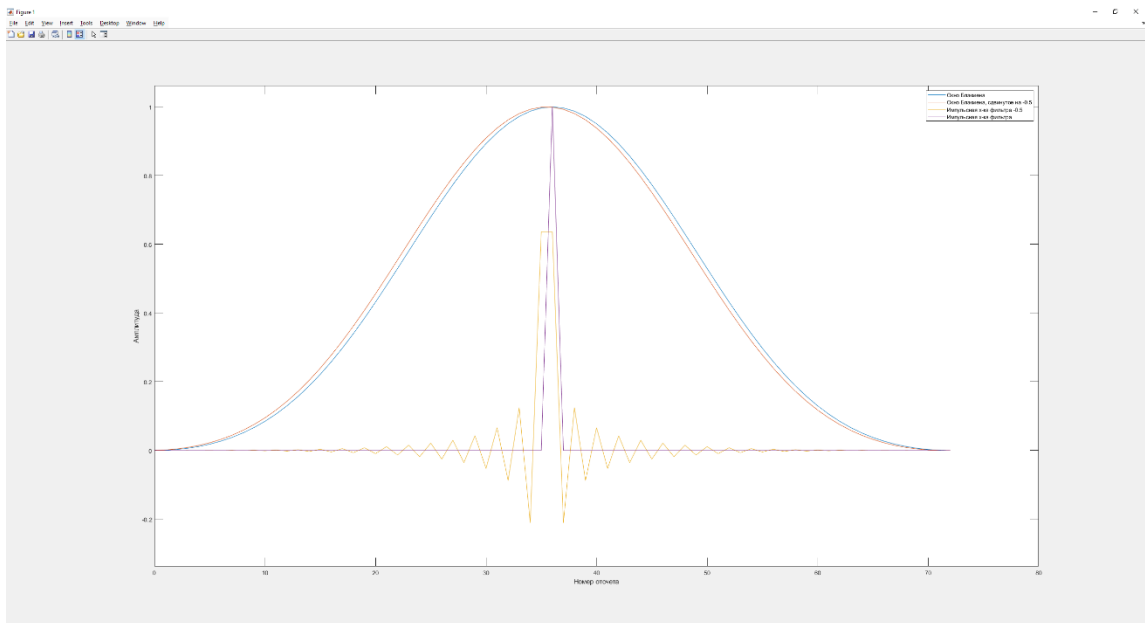


Рисунок 2. Окна Блэкмена и импульсные характеристики фильтров.

Из-за того, что фильтр работает в первой зоне Найквиста каждого суб АЦП ($F_c/2$, где F_c – частота дискретизации суб-АЦП).

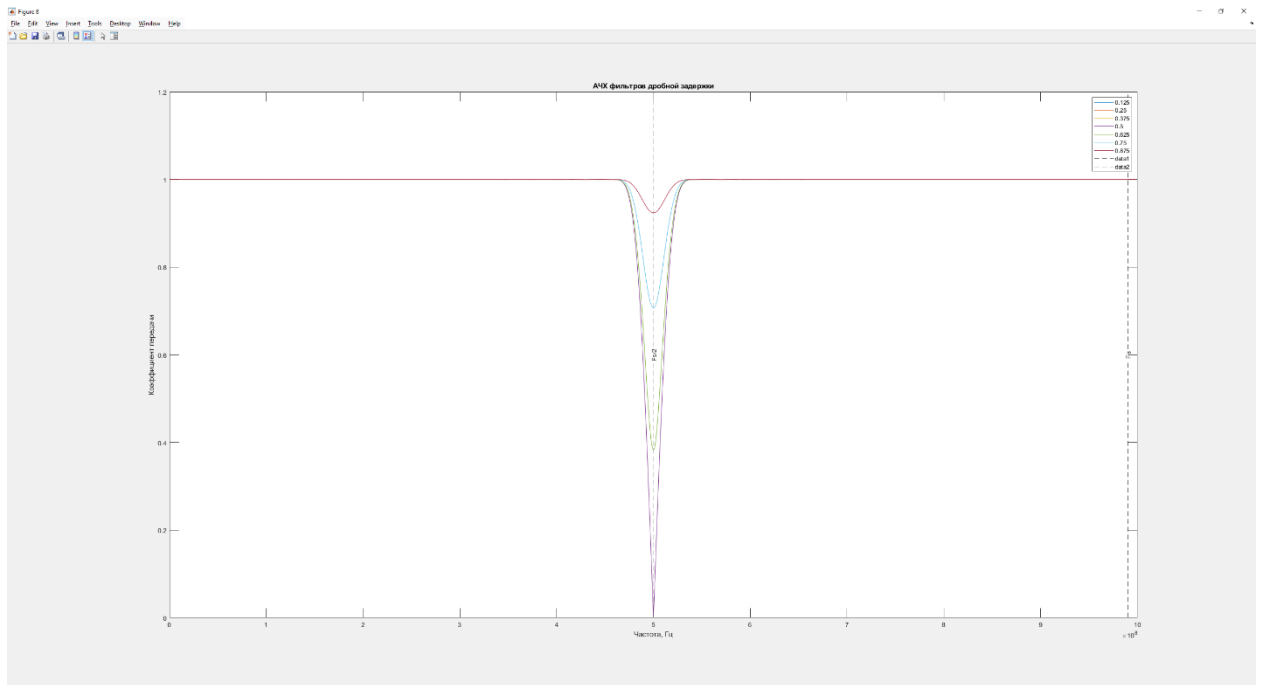


Рисунок 3. АЧХ фильтра дробной задержки при различных значениях

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

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

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

Затем сигнал модулируют с помощью синуса с той же несущей частотой, как прежде, и добавляют его в предыдущий сигнал. [1] Рисунок 5.

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

3. Алгоритм наименьших квадратов

3.1 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] стр.194

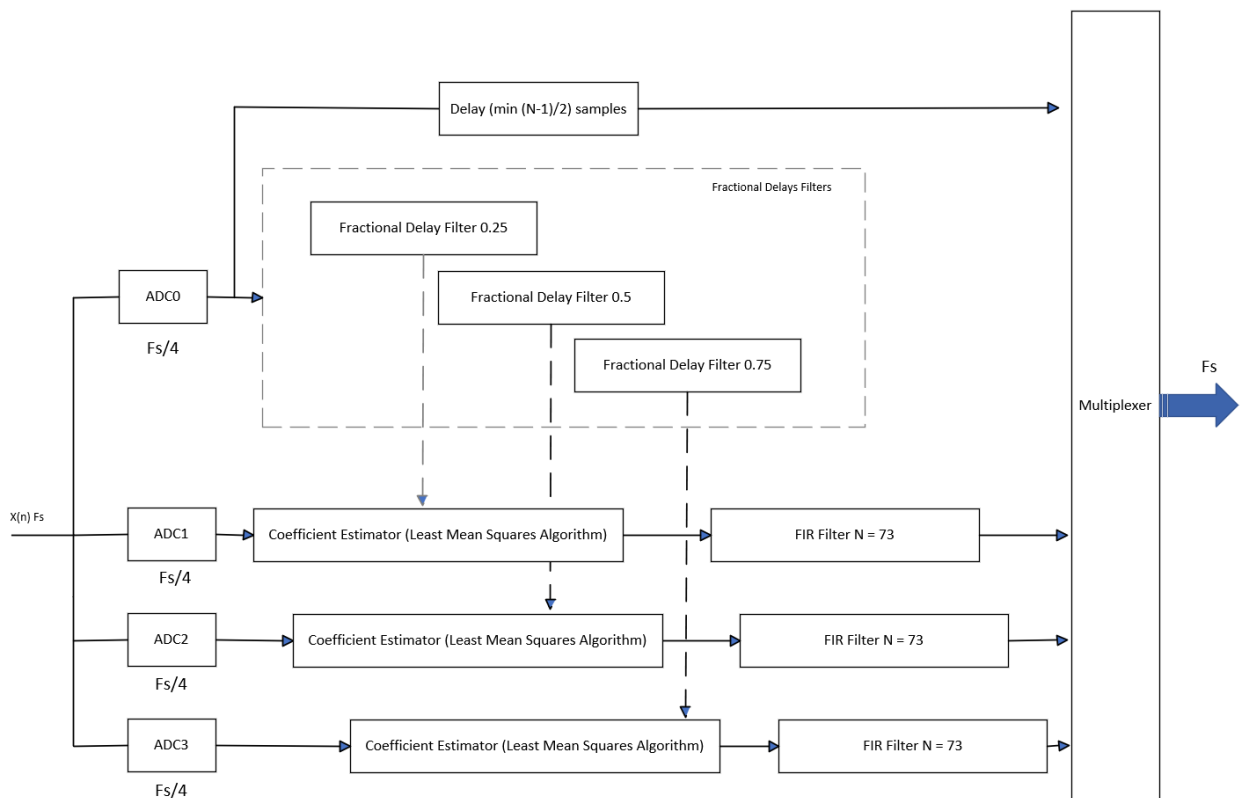


Рисунок 4. Предлагаемая блок-схема алгоритма калибровки для $M = 4$

4. Моделирование

Как и в [1] (стр.10) моделировался АЦП с частотой дискретизации $F_s = 8$ ГГц, 8 каналов. Результаты моделирования с ошибками, представленными в [1] Таблица 3. Кроме столбца Bandwidth Mismatch.

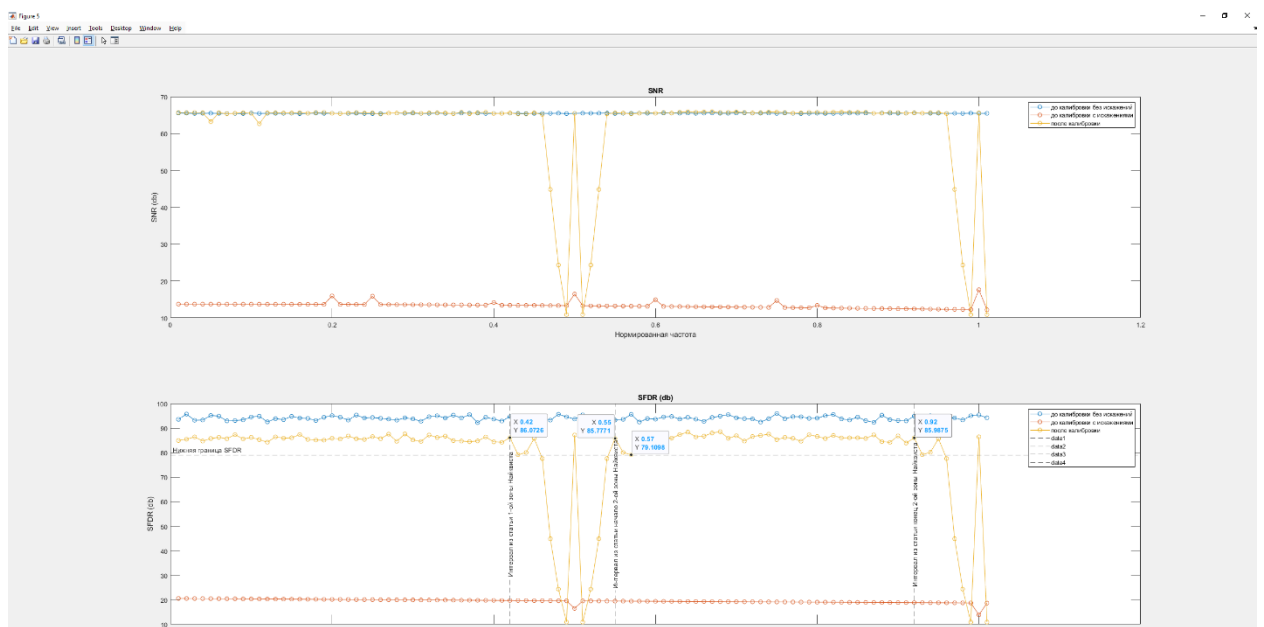


Рисунок 4. Графики SNR и SFDR, полученные в результате моделирования

Видно, что на частотах, близких к границам зон Найквиста каждого суб-АЦП, 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.

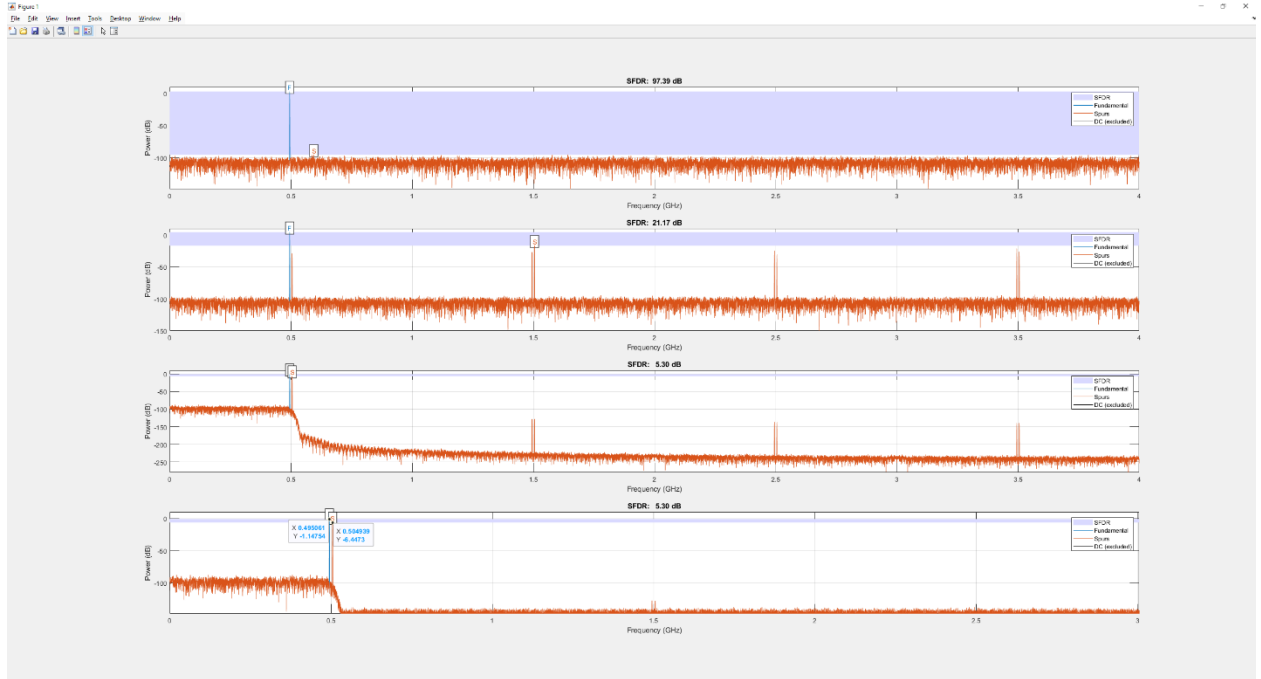


Рисунок 5. График SNR и SFDR при тестировании на частоте $f_{in} = 495$ МГц, близкой к $F_c/2 = 500$ МГц, (первой зоны Найквиста суб АЦП), $F_c = 1$ ГГц.

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.

1ГГц – 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
6. АЦП с чередованием во времени