

УДК 621.317

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

А.В. Клеопин, В.В. Макаров, М.А. Зенченко, Л.Н. Селин

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

kleopin@vniiftri.ru,
makarov_vv@vniiftri.ru,
selin_ln@vniiftri.ru

Представлен алгоритм композитной цифровой фильтрации нано- и пикосекундных импульсных сигналов.

Ключевые слова: фильтрация импульсных сигналов, импульсы, метод скользящего среднего, метод наименьших квадратов, взвешенное сглаживание.

ALGORITHM FOR PICOSECOND PULSE SIGNALS FILTERING

A.V. Kleopin, V.V. Makarov, M.A. Zenchenko, L.N. Selin

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

kleopin@vniiftri.ru,
makarov_vv@vniiftri.ru,
selin_ln@vniiftri.ru

An algorithm for composite digital filtering of nano- and picosecond pulse signals is presented.

Key words: pulse signal filtering, pulses, moving average method, least squares method, weighted smoothing.

В статье представлен алгоритм композитной цифровой фильтрации нано- и пикосекундных импульсных сигналов, применяющийся при измерениях их амплитудно-временных параметров.

Измерения амплитудно-временных параметров импульсных сигналов производятся с помощью цифрового (реального времени или стробоскопического) осциллографа, при этом результаты измерений сохраняются в памяти осциллографа в виде выборок сигналов, которые затем используются для цифровой обработки (включающей операции фильтрации и восстановления формы импульса).

Эффективная фильтрация импульсных сигналов от посторонних шумов, обусловленных разными причинами (белый шум, джиттер сигнала и др.), которые полностью исключить из результатов измерений невозможно ввиду их случайного характера, производится с помощью композитного метода цифровой фильтрации [1], производимой последовательно в три шага:

- усреднение мгновенных значений импульсного электрического напряжения методом скользящего среднего [2];
- обработка полученных на первом шаге усреднённых значений методом наименьших квадратов [3];
- взвешенное сглаживание полученных на втором шаге усреднённых значений с применением гауссовой весовой функции [2].

При этом на каждом шаге производится цифровая обработка сигнала в окне из $2k + 1$ точек (обычно k выбирается в диапазоне от 1 до 3), в котором вычисляется (методами скользящего среднего и наименьших квадратов) мгновенное значение сигнала и которое считается сглаженным значением сигнала в центральной точке окна. Далее в процессе цифровой обработки сигнала окно сдвигается на 1 отсчёт, и цифровая обработка повторяется аналогичным способом (и так до конца выборки).

На первом шаге для фильтрации используется фильтр скользящего среднего, частотная характеристика которого выражается функцией $\sin(x)/x$. Данный фильтр хорошо фильтрует высокочастотный шум, т.е. срезает резкие выбросы значений, но при сильном увеличении ширины окна (порядка 10 и более точек) приводит к нежелательному увеличению длительности фронта измеренного импульса.

В данном методе в окне из $2k + 1$ точек вычисляется простое (не взвешенное) среднее значение, которое считается сглаженным значением в центральной точке окна:

$$y(m) = \frac{1}{2k + 1} \cdot \sum_{i=1}^{2k+1} x(i). \quad (1)$$

Увеличение числа точек (ширины окна) при реализации данного фильтра хоть и сужает основной лепесток, но не может уменьшить амплитуду боковых лепестков частотной характеристики более чем на 15 дБ. Значение параметра сглаживания k выбирается в процессе сглаживания сигнала эмпирически в диапазоне от 1 до 5 в зависимости от качества (или степени «зашумлённости») измеряемого сигнала (возможен выбор значения $k = 1$, но сглаживание сигнала может производиться несколько раз).

Фильтрация на втором шаге производится с использованием метода наименьших квадратов, при этом определяются параметры a , b , соответствующие линейной зависимости мгновенных значений сигнала от внутриоконного номера отсчёта i :

$$w(i, a, b) = a \cdot i + b \quad (2)$$

В соответствии с методом наименьших квадратов для вычисления значений параметров a , b составляется система из двух уравнений:

$$a \cdot \sum_{i=1}^{2k+1} i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^{2k+1} i = \sum_{i=1}^{2k+1} i \cdot y(i); \quad (3)$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^{2k+1} i + (2k+2) \cdot b = \sum_{i=1}^{2k+1} y(i). \quad (4)$$

Решением данной системы уравнений являются значения параметров a и b , с помощью которых вычисляется сглаженное значение в центральной точке окна:

$$w(m) = a \cdot m + b \quad (5)$$

В процессе цифровой обработки сигнала методом наименьших квадратов окно далее сдвигается на 1 отсчёт, и цифровая обработка повторяется аналогичным способом до конца выборки.

На третьем шаге для фильтрации применяется метод сглаживания скользящим средним, как и на первом шаге, но вместо простого среднего используется взвешенное среднее, при этом веса взвешенного среднего берутся распределёнными по закону Гаусса:

$$y(m) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{2k+1} e^{-\left(\frac{i}{A}\right)^2}} \cdot \sum_{i=1}^{2k+1} e^{-\left(\frac{i}{A}\right)^2} w(i). \quad (6)$$

Значение параметра сглаживания A выбирается в процессе сглаживания сигнала эмпирически в диапазоне от 2 до 100 в зависимости от качества (или степени «зашумлённости») измеряемого сигнала.

На рисунке представлены результаты измерений мгновенных значений импульсного электрического напряжения с применением программных средств в виде двух вариантов фильтрации: предложенный метод композитной цифровой фильтрации и метод фильтрации низких частот (ФНЧ) Баттерворта 3 порядка с граничными частотами 2 ГГц и 200 МГц при частоте дискретизации осциллографа 40 ГГц.

При использовании ФНЧ фронт импульсов либо недостаточно гладкий (явно видны искажения фронта — ФНЧ вариант 1), либо слишком сглаженный, и вследствие этого его длительность увеличена (ФНЧ вариант 2).

Фильтрация сигнала позволяет уменьшить искажения формы импульсов, которые могут привести к некорректным измерениям длительности фронта, когда отсчёт шумового сигнала достигает точки отсчёта фронта раньше или позже, чем есть в самом деле, что ведёт к увеличению длительности фронта импульса.

Таким образом, в результате использования метода композитной цифровой фильтрации получен импульс оптимальной формы с малыми амплитудными искажениями, что позволяет произвести точное измерение длительности фронта импульса.

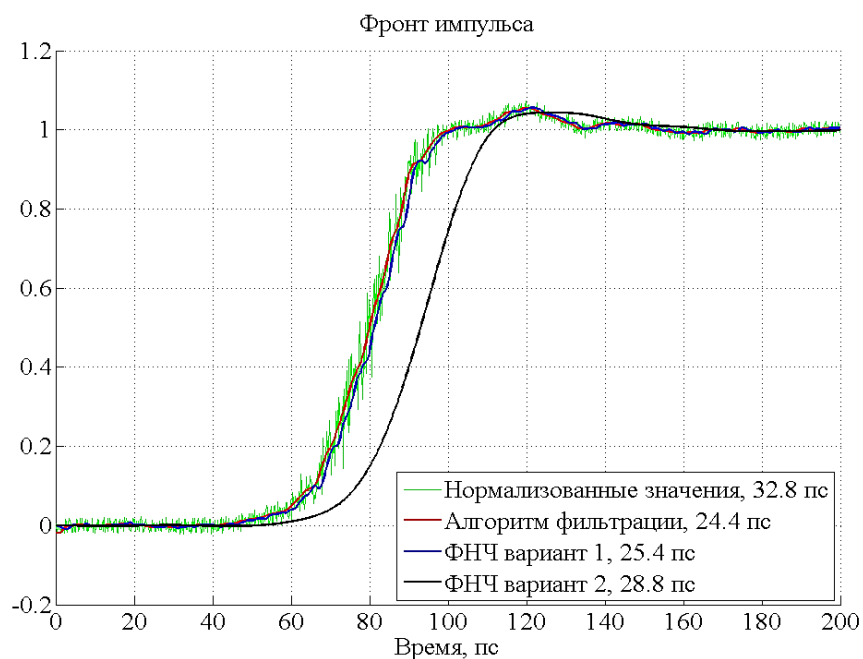


Рис. 1. Результаты измерений мгновенных значений импульсного напряжения

Литература

1. Guillaume M.E., Nahman N.S. Deconvolution of time domain waveform in presence of noise: technical report NBS. 1981. No. 1047. 122 p.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 448 с.
3. Вержбицкий В.М. Основы численных методов: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2009. 848 с.