

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-42-50-57>

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МАЯТНИК НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ»

Кузнецов М.А., Масленников А.Л.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: цифровая фильтрация, фильтр скользящего среднего, медианный фильтр, фильтр Савицкого-Голея, система стабилизации, перевернутый маятник.

Аннотация. В работе рассматриваются особенности применения цифровых фильтров в системе стабилизации учебно-лабораторного стенда «Перевернутый маятник на подвижном основании», разработанного с использованием программного обеспечения SimInTech. Описана конструкция стенда и его измерительная система. Проведен сравнительный анализ трех фильтров: скользящего среднего, фильтра и Савицкого-Голея. Исследованы области применимости в зависимости от отношения частоты дискретизации к частоте сигнала и размера окна фильтра. Выполнено сравнительное исследование фильтров по их эффективности, точности и устойчивости к аномальным измерениям.

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF DIGITAL FILTERS IN THE STABILIZATION SYSTEM IN THE LABORATORY STAND "INVERTED PENDULUM ON A MOVABLE BASE"

Kuznetsov M.A., Maslennikov A.L.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: digital filtering, moving average, median filter, Savitsky-Golay filter, stabilization system, inverted pendulum.

Abstract. The paper discusses the practical aspects of the digital filters implementation in the stabilization system in the laboratory stand "Inverted pendulum on a moving base", developed using SimInTech software. The design of the stand and its measuring system are described. A comparative analysis was carried out for moving average, moving median and Savitsky-Golay filters. The areas of applicability are studied depending on the ratio of the sampling frequency to the signal frequency and the size of the filter window. A comparative study of filters was carried out on their efficiency, accuracy and resistance to anomalous measurements.

Введение

Реализация цифровых фильтров в бортовых вычислителях систем управления лабораторными стендами сопряжена с рядом сложностей. Во-первых, в подобных системах решается задача стабилизации, регулирования или управления непрерывной динамической системой обладающей достаточно быстрой нелинейной динамикой и, как следствие, должно обеспечивать соответствующие быстродействие работы цифровых фильтров. Во-вторых, цифровые сигналы, поступающие от измерительных систем, как правило, имеют достаточно высокий уровень шума, требующий достаточно сильной фильтрации, прежде чем на основе измеренных данных сформировать сигнал управления. В-третьих, с учетом специфики учебно-

лабораторного оборудования, которое реализуется за счет относительно дешевых комплектующих, возможно наличие в сигналах достаточно большого количества аномальных измерений, которые также, необходимо отработать перед формированием управления.

В данной работе рассматривается задача применения методов цифровой обработки сигналов для учебно-лабораторного стенда «Перевернутый маятник на подвижном основании», разработанного в Молодежном инженерном центре МГТУ имени Н.Э. Баумана с применением программного обеспечения SimInTech.

Учебно-лабораторный стенд

Учебно-лабораторный стенд конструктивно представляет из себя балку-направляющую, установленную на двух регулируемых опорах (рис. 1). Каретка с маятником является подвижной частью стенда, состоящую из каретки, закреплённой на направляющей, и маятника, ось которого удерживается двумя подшипниками. Измерительными приборами стенда являются абсолютный энкодер AS5048a, измеряющий абсолютное угловое положение маятника, и инкрементный энкодер LPD3806, измеряющий количество оборотов собственного вала, которые затем пересчитываются в линейное положение каретки. Объектом управления является двигатель постоянного тока RS-540SH. Обработка информации с датчиков и управление осуществляется микроконтроллером STM32F411.

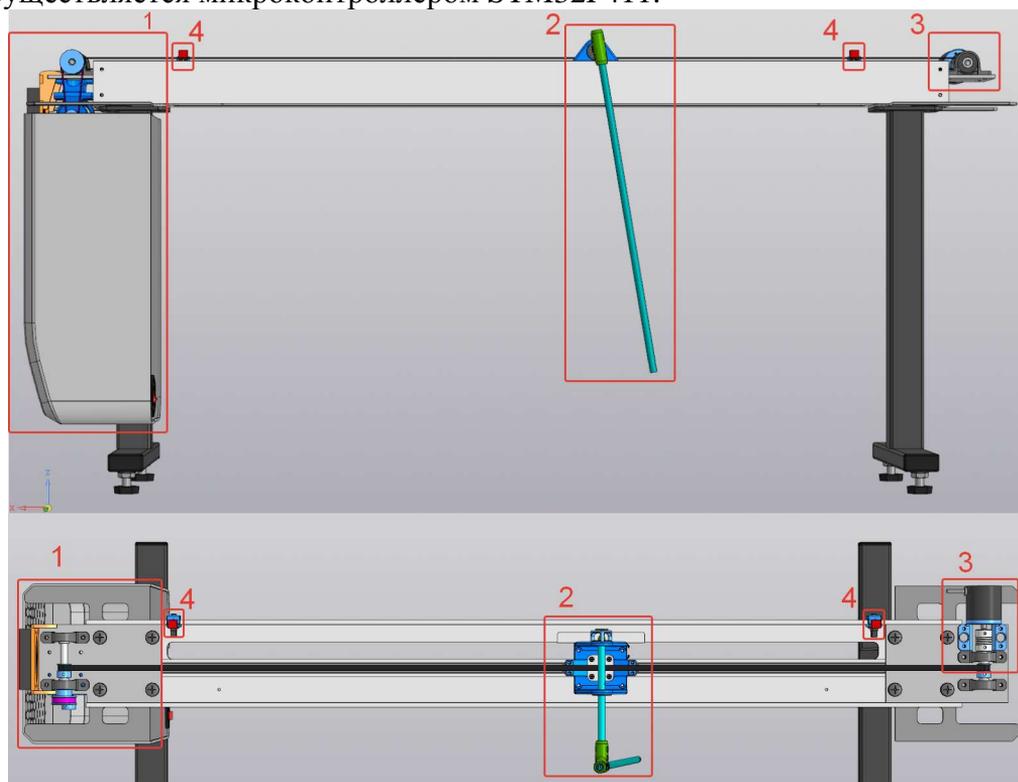


Рис. 1. Конструкция стенда: 1 – блок управление и двигатель; 2 – каретка с маятником; 3 – инкрементный энкодер; 4 – концевые выключатели

Программирование микроконтроллера реализуется при последовательном использовании кодогенератора в среде SimInTech и последующей компиляцией кода с его загрузкой в память бортового вычислителя с использованием программной среды Keil. Особенностью подобного решения является использование взаимосвязи двух программных систем, в результате работы которых генерируемый программный код, загружаемый на контроллер, не обладает необходимым быстродействием по сравнению с тем случаем, если он пишется непосредственно на языке C/C++. Однако, несмотря на подобный недостаток, использование SimInTech упрощает достаточно сложную для неопытного пользователя процедуру программирования микроконтроллера, т.к. заменяет процесс написания программного кода на формирование схемы моделирования, которая затем переводится кодогенератором в C/C++ код.

В этом случае задача проектирования алгоритмов цифровой обработки информации, формирования самих фильтров и их реализации требует более тщательного подхода.

Алгоритмы фильтрации

Фильтр скользящего среднего. Принцип работы фильтра скользящего среднего заключается в усреднении значений сигнала в окне фиксированной длины, взвешивая каждое значение в окне равномерно и вычисляя среднее значение. Этот процесс позволяет сгладить резкие колебания в сигнале, сохраняя общий тренд. Математически данный фильтр задается в виде [1].

$$y_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{i-k},$$

где N – размер окна, задаваемый в дискретах съема, x – значения сигнала.

Для рассматриваемого учебно-лабораторного стенда эмпирически была определена зависимость СКО фильтра от величины размера окна и от величины отношения полезной составляющей сигнала относительно частоты дискретизации, что проиллюстрировано на рисунке 2, где красными линиями отмечены сечения равные СКО.

Можно сказать, что фильтры скользящего среднего высоких (более 50-го) порядков применимы в очень узком диапазоне отношения частот, либо требуют существенного увеличения частоты дискретизации, которая в данном случае связана с частотой работы микроконтроллера, увеличение которой на порядок не представляется возможным.

Медианный фильтр используется для устранения шумов из сигнала путем замены каждого элемента сигнала медианным значением окрестности данного элемента. Математически задача формулируется следующим образом [1].

$$y_i = \text{median}(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-N}).$$

Алгоритмически данный фильтр имеет сложность равную сложности сортировки элементов из N элементов, однако, позволяет достаточно эффективно бороться с аномальными измерениями (статистическими

выбросами) в сигнале. Аналогичная зависимость СКО фильтра от величины размера окна и от величины отношения полезной составляющей сигнала относительно частоты дискретизации для медианного фильтра показана на рисунке 3.

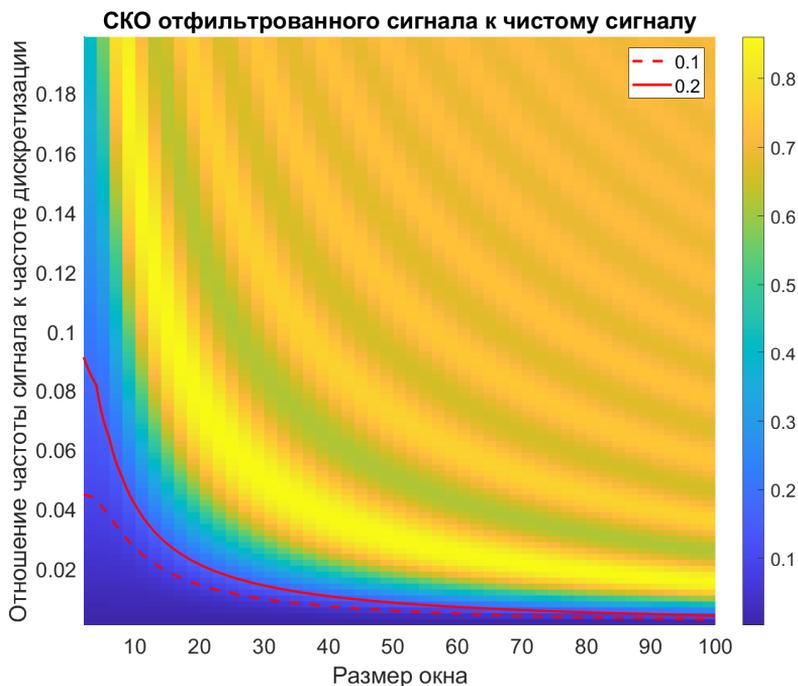


Рис. 2. Зависимость СКО фильтра скользящего среднего от размера окна

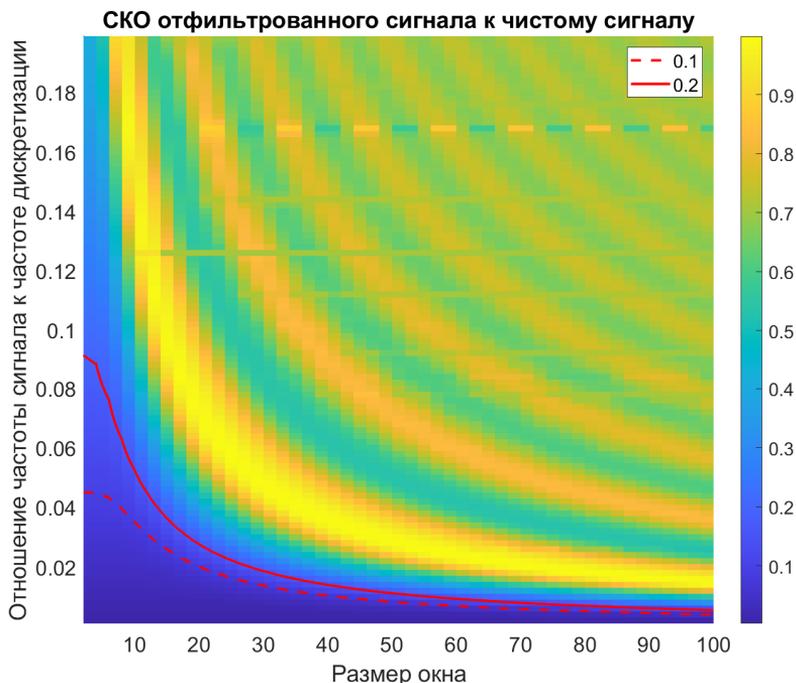


Рис. 3 Зависимость СКО медианного фильтра

Область возможной применимости медианного фильтра схожа с фильтром скользящего среднего, однако надо заметить и гармонические колебания на некоторых частотах, которые связаны с искажениями, вызываемыми дискретизацией сигнала, приближающегося к частоте Найквиста. Несмотря на свои достоинства у медианного фильтра имеется существенный недостаток, который проявляется в возможном существенном искажении полезного сигнала, если его характер на некотором интервале времени близок к гармоническому, что проиллюстрировано на рисунке 4.

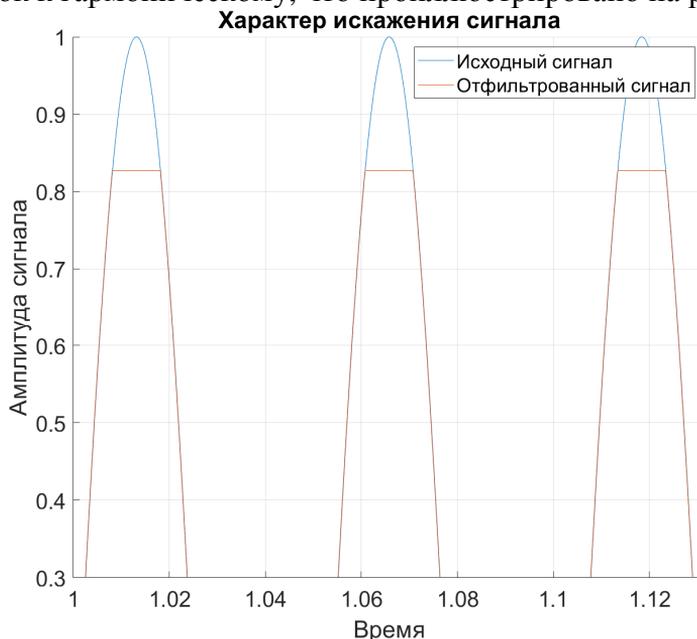


Рис. 4. Пример искажения медианным фильтром

Для решения этой проблемы можно применять взвешенный медианный фильтр, который позволяет менять пропорцию "полок", если смещать выход фильтра ближе к максимуму отсортированного массива, то "полка", которая съедает верхний пик, уменьшится, а полка, которая съедает нижний пик – увеличится. Справедливо и обратное высказывание для смещения выхода ближе к минимуму. [2]

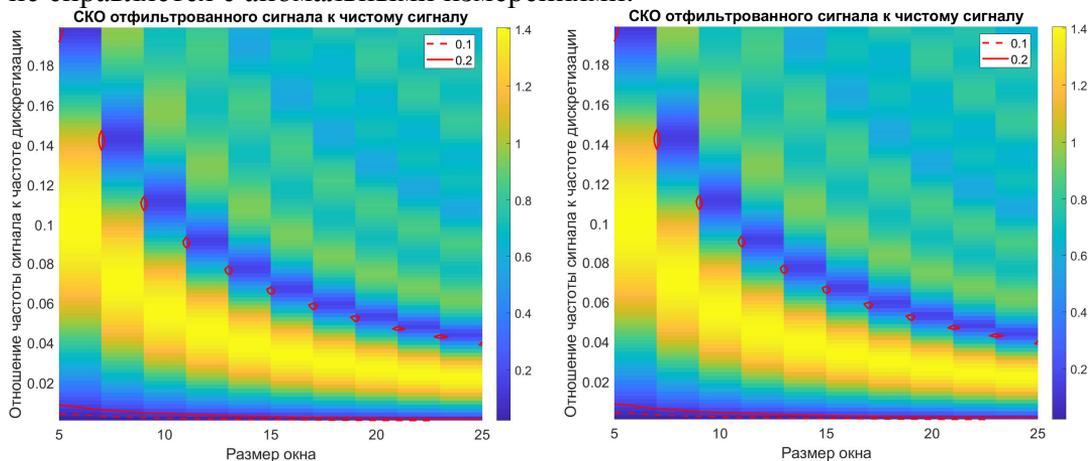
Фильтр Савицкого-Голея – это эффективный нуль-фазный фильтр. Фильтр может быть сформирован произвольного порядка, зависящего от размера окна во временной области. При увеличении окна и порядка фильтра увеличивается качества фильтрации – результирующий сигнал становится более гладкий, однако требуется несколько больший объем вычислений [3, 4]. Математически фильтр можно описать в следующем виде:

$$y_i = \sum_{k=-\frac{1-N}{2}}^{\frac{1+N}{2}} C_k x_{i+k},$$

где N – размер окна, C – коэффициенты полинома.

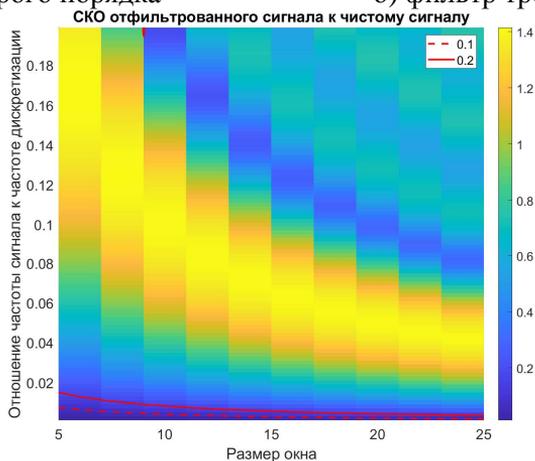
При этом необходимо отметить, что лежащие в основе фильтра полиномы имеют нелинейное влияние на его частотную характеристику в отличие от фильтров скользящего среднего или медианного. Достоинством же фильтра является возможность по-прежнему (фильтрующим образом) вычислять первые и вторые производные сигналы без использования вычислительно неустойчивых операций в виде численного дифференцирования.

Зависимость СКО фильтра от величины размера окна и от величины отношения полезной составляющей сигнала относительно частоты дискретизации для данного вида фильтров 2-го, 3-го и 4-го порядков показана на рисунке 5, по которому наглядно видно, что для каждого из размеров окон частоты и их гармоники, которые лучше фильтрует фильтр, сильно отличаются в зависимости от порядка. Применение фильтра Савицкого-Голея может приводить к небольшому уменьшению амплитуды (искажению информативной составляющей сигнала). Помимо этого, данный вид фильтров не справляется с аномальными измерениями.



а) фильтр второго порядка

б) фильтр третьего порядка



в) фильтр четвёртого порядка

Рис. 5. Зависимость СКО фильтра Савицкого-Галлея

Сравнительный анализ

Результаты сравнения трех рассмотренных фильтров приведены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнительная таблица

	Фильтр скользящего среднего	Медианный фильтр	Фильтр Савицкого–Голея
Алгоритмическая сложность	$O(N)$	$O(N \log N)$	$O(N)$
Вид искажения	Снижение амплитуды	Обрезание пиков	Небольшое снижение амплитуды
Обработка аномальных измерений	Плохо	Хорошо	Очень плохо

Для борьбы с аномальными измерениями можно применить нелинейную технику сглаживания на примере LULU фильтра [5]. Другим вариантом является применение фильтра Хампеля [6]. Однако, настройка фильтра под работу с требуемыми и неизвестными значениями СКО достаточно сложна.

Заключение

В работе рассмотрен вопрос применения цифровых фильтров для учебно-лабораторного стенда «Перевернутый маятник на подвижном основании», программная часть которого формируется с использованием связки программных систем SimInTech и Keil.

Рассматривались три вида цифровых фильтров: плавающее среднее, плавающее медианное среднее и фильтр Савицкого–Голея. Медианный фильтр является лучшим в борьбе с аномальными измерениями. Фильтр Савицкого–Голея продемонстрировал наименьшую степень искажения сигнала, но очень плохо справляется с фильтрацией при наличии аномальных измерений. Фильтр скользящего среднего показал недостаточную защиту от аномальных измерений и значительное искажение амплитуды сигнала.

Список литературы / References

1. Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. – San Diego, California: California Technical Publishing, 1999. – 650 p.
2. Lin Y., Yang R., Gabbouj M., Neuvo Y. Weighted median filters: a tutorial // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. 1996, vol. 43, no. 3, , pp. 157-192.
3. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Analytical Chemistry. 1964, vol. 36, no. 8, pp. 1627-1639. DOI: 10.1021/ac60214a047.
4. Savitzky A., Abraham. A Historic Collaboration // Analytical Chemistry. 1989, vol. 61, no. 15, pp. 921A-923A. DOI: 10.1021/ac00190a744.

5. Rohwer C.H. Idempotent one-sided approximation of median smoothers // Journal of Approximation Theory. 1989, vol. 58, iss. 2, pp. 151-163.
6. Liu H., Sirish S., Wei J. On-line outlier detection and data cleaning // Computers and Chemical Engineering. 2004, vol. 28, pp. 1635-1647.

Кузнецов Михаил Александрович – студент	Kuznetsov Mikhail Aleksandrovich – student
Масленников Андрей Леонидович – старший преподаватель amas@bmsu.ru	Maslennikov Andrey Leonidovich – senior lecturer

Received 27.06.2024