

УДК 681.335

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ И ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ СТАТИСТИК

В. Г. Галалу, В. В. Сарычев, М. М. Клопот

*Технологический институт Южного федерального университета
347928, г. Таганрог, ГСП-17А
E-mail: cit@pbox.ttn.ru*

Приведены результаты моделирования нескольких алгоритмов цифровой фильтрации выходных кодов АЦП, предназначенных для подавления периодических и импульсных помех и нормального шума. Экспериментальная проверка разработанных алгоритмов проводилась в среде LabVIEW. Показано, что возможно подавление шумов и импульсных помех в реальном масштабе времени до уровня $-57 \dots -63$ дБ.

Ключевые слова: импульсные помехи, коэффициент подавления, сглаживание, цифровой фильтр, моделирование, алгоритм подавления импульсных помех.

Введение. Современные датчики часто совмещают в себе функции предварительной обработки информации. Так, например, датчики температуры TMP03/04 фирмы “Analog Devices” (США), датчики LM74 фирмы “National Semiconductor” (США) имеют цифровой выход с эффективной разрядностью 12–13 бит. Такое решение вполне оправдано повышенной точностью измерений за счет исключения влияния аддитивного шума и сетевых наводок при использовании Δ - Σ -АЦП и цифрового фильтра. Импульсные же помехи, природа которых в производственных условиях весьма разнообразна, способны проникать на входы АЦП, минуя предварительный фильтр. Результаты экспериментальных исследований показали, что даже в экранированной витой паре длиной 50 м наблюдаются периодическая помеха нормального вида порядка 5–10 мВ (50 Гц) и короткие импульсные помехи длительностью 0,2–1,0 мкс и амплитудой до 100 мВ [1]. Имеется одна особенность в режиме работы Δ - Σ -АЦП — частота преобразования на несколько порядков выше граничной частоты спектра сигнала, поэтому составляющие от импульсных помех также оцифровываются. Цифровые фильтры, чаще всего с АЧХ типа sinc^2 и sinc^3 , имеют окна прозрачности на высоких частотах [2]. Коэффициент сглаживания импульсных помех не превышает 10–20 дБ и не обеспечивает требуемые метрологические характеристики. В этих условиях актуальной становится дополнительная обработка цифровых отсчетов сигнала в целях подавления импульсных помех.

В данной работе приводятся результаты имитационного (программно) и натурального моделирования процедур цифрового сглаживания потока отсчетов на выходе АЦП. Эти процедуры представлены в виде встроенных функций в таких программах, как Mathcad [3] и LabVIEW. В работе [4] представлены комбинированные фильтры для обработки изображений, когда важно сохранить резкое изменение уровня сигнала.

Исследовались погрешности обработки и требуемые вычислительные ресурсы, что актуально для систем реального времени. В качестве модели сигнала использовалась синусоида, на которую поочередно накладывались помехи. В процессе исследования функций цифровой фильтрации системы Mathcad были выявлены следующие недостатки:

1. При обработке импульсных помех в зависимости от их характера смещается исходная функция, так как обрабатывается весь массив исходных точек.

2. Для сглаживания импульсных помех можно применять медианный фильтр, однако коэффициент подавления не превышает десяти.
3. Большое время обработки (измеряется в секундах).
4. Высокая относительная погрешность восстановления исходного сигнала (в пределах единиц процентов).
5. Восстановленный сигнал смещен во времени.

Для анализа работы новых алгоритмов сглаживания [5] на разных входных сигналах с определенным типом помех была разработана прикладная программа, моделирующая передачу сигнала по каналу связи, на который воздействуют факторы, искажающие исходный сигнал. После формирования зашумленного сигнала и оцифровки его с помощью АЦП в блоке цифровой фильтрации используется один или несколько последовательных алгоритмов подавления помехи. Далее восстановленный сигнал сравнивается с исходным. На основании разбора накопленных ошибок результатов сравнения можно сделать определенные выводы об эффективности исследуемых методов. Предварительный анализ показал, что лучше подавлять каждую помеху в отдельности, причем начинать нужно с наиболее опасных импульсных помех. На эти алгоритмы изначально были наложены ограничения: анализ небольшого количества точек (не более семи), «скользящий» тип обработки, минимальное время обработки.

Целью данной работы является создание алгоритма подавления импульсных помех, эффективность работы которого определяется с помощью имитационного и натурального моделирования.

Подавление импульсных помех. Функционирует алгоритм следующим образом: каждое новое измерение физической величины преобразуется в цифровой код, который сравнивается с результатом предыдущего измерения. Если результат сравнения $\Delta_n = X_n - X_{n-1}$ больше некоторого порога ε (возможно, от действия импульсной помехи), то это новое значение X_n заменяется предсказанным, которое находится по результатам вычисления абсолютных разностей Δ_i на предыдущих шагах алгоритма. В зависимости от требуемой точности можно использовать от одной до семи разностей:

$$X_n = X_{n-1} + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta_i,$$

где k — количество точек для обработки.

Одним из важных моментов в рассматриваемом алгоритме является выбор порога ε . С одной стороны, если его выбрать на уровне 10 % от диапазона сигнала, то на выход системы может попасть большое количество мелких импульсных помех, что снизит коэффициент подавления. С другой стороны, при малом значении порога ε (на уровне 1 % от диапазона сигнала) такой фильтр будет срабатывать от нормального шума и небольших по амплитуде импульсных помех. В связи с этим было решено применить методы отбраковки аномальных результатов, широко используемые в математической статистике — это параметр 3σ , т. е. верхние и нижние пороги ε выбираются на уровне $\pm 3\sigma$. Такую величину дает критерий Романовского. Кроме того, на величину порога влияет максимальная скорость изменения измеряемого технологического параметра. Как правило, технологические процессы на производстве медленные и постоянные времени измеряются десятками и сотнями секунд. Таким образом, за 1 с изменение измеряемого параметра не превышает 1 %. А при частоте дискретизации порядка 1000 Гц разность между соседними отсчетами не превысит 0,001 %. Для более быстрых технологических процессов разность между отсчетами может достигать 0,01–0,10 %. На основании проведенных рассуждений и с учетом простоты деления на два и четыре целесообразно применение алгоритмов, использующих

Таблица 1

Количество используемых разностей	Коэффициент подавления, дБ		
	линейный входной сигнал	экспоненциальный входной сигнал	синусоидальный входной сигнал
1	75,8	66,8	70,1
2	76,0	66,4	68,1
3	75,9	66,1	66,6
4	75,9	65,8	65,3
5	75,9	65,6	64,1
6	75,9	65,4	63,1
7	75,9	65,3	62,2

две или четыре разности. Величина порога в процессе моделирования составляла 2, 3 и 4 кванта, порог был постоянным и не зависел от скорости нарастания производной.

В табл. 1 представлены полученные при моделировании коэффициенты подавления импульсных помех для трех входных сигналов: линейно растущего, экспоненты и синусоиды. Очевидно, что увеличение количества используемых разностей не приводит к увеличению коэффициента подавления.

Моделировались также дополнения к этому алгоритму, способные подавлять нормальный шум и сетевые наводки.

Нормальный шум подавляется по методу скользящего среднего. Простое сглаживание основывается на составлении нового ряда из средних арифметических, которые вычисляются для промежутков времени длиной q :

$$\bar{x}(k) = \frac{1}{q} \sum_{t=k}^{q+k} x(t) \quad (k = 1, 2, \dots, n - q + 1),$$

где длина периода сглаживания q зависит от характера временного ряда, а также от цели сглаживания и выбирается исследователем; k — порядковый номер среднего.

Для подавления сетевых наводок усреднение производится по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где n — количество выборок, которое должно быть согласовано с периодом помехи, в частности на один период помехи 50 Гц их количество будет 18, 36, 72. В процессе исследования на основную помеху 50 Гц накладывались гармоники с частотой 150 и 250 Гц и амплитудой до 20 % от амплитуды первой гармоники. Однако это не привело к уменьшению коэффициента подавления фильтра, т. е. рассматриваемый метод усреднения по определенному количеству выборок был близок к идеальному.

В ходе имитационного моделирования проводились две серии опытов на эталонном сигнале с разными уровнями нормального шума и помех. В качестве эталонного сигнала была выбрана синусоида. На сигнал накладывались импульсные помехи положительной, отрицательной и смешанной полярности. Коэффициент подавления для оценки эффективности методов вычисляется по формуле $K = \left| \frac{\sum \Delta_{\text{п}}}{\sum \Delta} \right|$, где $\Delta_{\text{п}}$ — уровень помехи, Δ — ошибка восстановления сигнала по цифровому отсчету.

Таблица 2

Номер эксперимента	Тип сигнала	Уровень импульсных помех, %	Уровень нормального шума, %	Уровень помехи 50 Гц, %	Коэффициент подавления помех		Время работы алгоритма
					К	дБ	
1	Синусоида	20	0,01	1	723,38	57,19	$0,26 \cdot 10^{-3}$
2	Синусоида	40	0,1	5	1367,04	62,72	$0,26 \cdot 10^{-3}$
3	Линейный	20	0,01	1	725,13	57,21	$0,25 \cdot 10^{-3}$
4	Линейный	40	0,1	5	1464,28	63,31	$0,27 \cdot 10^{-3}$
5	Экспонентный	20	0,01	1	738,21	57,36	$0,33 \cdot 10^{-3}$
6	Экспонентный	40	0,1	5	1523,28	63,66	$0,36 \cdot 10^{-3}$

Исследование отдельных фильтров показало, что для более эффективного сглаживания сигналов целесообразно применять комбинированный фильтр, сочетающий в себе все описанные выше фильтры в следующем порядке:

- 1) сглаживание импульсных помех,
- 2) метод скользящего среднего для подавления нормального шума,
- 3) усреднение для подавления периодической помехи 50 Гц и ее гармоник.

Имитационное моделирование подавления помех производилось на трех наиболее часто встречающихся в практике сигналах: синусоидальном, линейном и экспоненциальном. Всего было проведено шесть серий экспериментов по моделированию подавления наложенных на основной сигнал импульсных и периодических помех различного уровня, а также нормального шума. Сглаживание помех комбинированным фильтром проводилось методом линейной интерполяции по трем точкам для импульсных помех, методом скользящего среднего по пяти точкам для нормального шума, методом усреднения по 18 отсчетам для периодической помехи 50 Гц. Представим результаты одного из экспериментов, проведенного при следующих условиях: синусоидальный входной сигнал с амплитудой 0,95, импульсные помехи смешанной полярности (амплитуда 20 %), нормальный шум 0,01 %, помеха 50 Гц (1 %).

Все перечисленные помехи были подавлены до уровня -57 дБ. Относительная погрешность восстановления исходного сигнала не превышала 0,11 %. В других экспериментах были получены аналогичные результаты (табл. 2), которые позволяют сделать следующие выводы:

1. Коэффициент подавления помех в зависимости от амплитуды помехи находится в диапазоне 55–65 дБ.
2. Относительная погрешность восстановления не превышает 0,15 %.
3. Увеличение уровня помехи повышает коэффициент подавления.
4. Максимальное время обработки кодов комбинированным фильтром не превышает 360 мкс, что позволяет использовать его в режиме реального времени.

Натурное моделирование предполагает оценку эффективности предложенных алгоритмов подавления импульсных помех для реального сигнала и оборудования. Входной сигнал задавался генератором сигналов PXI-5421 фирмы “National Instruments” (США). Использовался синусоидальный сигнал $s(t) = 2 \sin(2\pi t)$, на который накладывались импульсные помехи, имеющие распределение Бернулли и эквивалентные по амплитуде входному сигналу (рис. 1). Далее полученный сигнал с шумом подавался на вход платы сбора данных PXI-6259, которая содержит 16-разрядный АЦП. Оцифрованный с частотой дискретизации 1 кГц сигнал обрабатывался с помощью программ, написанных в среде LabVIEW.

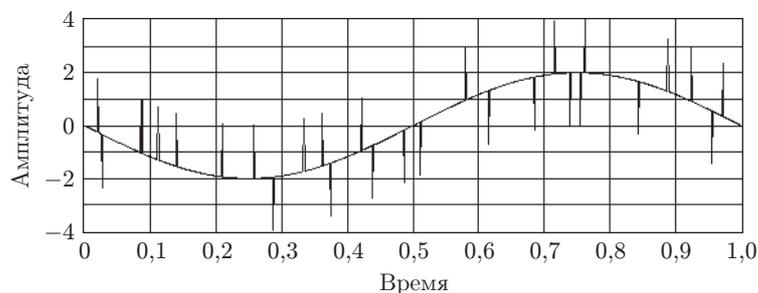


Рис. 1

Таблица 3

Коэффициент подавления	Фильтр № 1 (одна разность)	Фильтр № 2 (две разности)	Фильтр № 3 (четыре разности)	Фильтр инверсный Чебышева	Фильтр Бесселя	Фильтр медианный
Положительных помех	99,06 (40 дБ)	153,29 (43,7 дБ)	147,21 (43,3 дБ)	0,51 (-6 дБ)	0,62 (-4,1 дБ)	54,74 (34,8 дБ)
Отрицательных помех	85,86 (38,6 дБ)	132,24 (42,4 дБ)	131,3 (42,3 дБ)	0,43 (-7,4 дБ)	0,55 (-5,2 дБ)	53,68 (34,6 дБ)

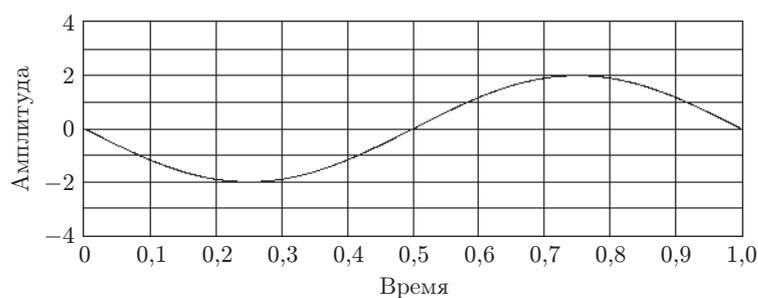


Рис. 2

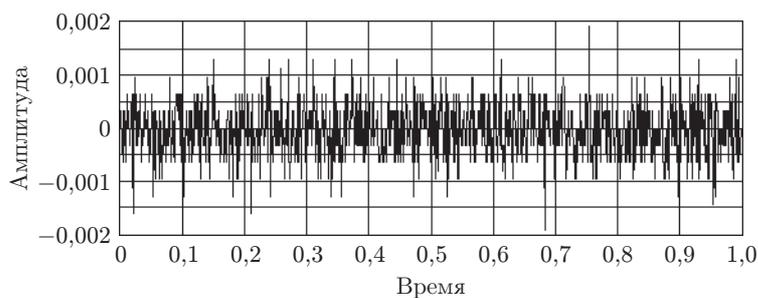


Рис. 3

Кроме того, этот же входной сигнал обрабатывался стандартными средствами цифровой фильтрации, встроенными в среду LabVIEW, в частности использовались фильтры низкой частоты: инверсный Чебышева и Бесселя с частотой среза 10 Гц.

Полученные результаты представлены в табл. 3. На рис. 2 и 3 приведены соответственно отфильтрованный сигнал и значения абсолютной погрешности фильтра № 2, в котором для предсказания результата используются две разности.

Заключение. Таким образом, результаты имитационного и натурного моделирования полностью подтвердили возможность подавления импульсных помех с помощью предложенных алгоритмов. Наиболее эффективным оказался фильтр № 2, использующий две разности. Значение коэффициента подавления составило 43,7 дБ, что в 3 раза больше, чем для медианного фильтра, встроенного в LabVIEW. Стандартные функции линейной фильтрации (фильтр Чебышева и фильтр Бесселя) не приспособлены для сглаживания импульсных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галалу В. Г., Миляева Е. А., Хало П. В.** Защита входных цепей информационно-измерительных систем от помех и наводок // Матер. VI Междунар. науч. конф. «Статистические методы в естественных, гуманитарных и технических науках». Таганрог: Изд-во «Антон», 2006. Ч. 4. С. 17–27.
2. **Редькин П. П.** Прецизионные системы сбора данных семейства MSC12xx фирмы “Texas Instruments”. М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2006. 608 с.
3. **Кирьянов Д. В.** Mathcad 13. С.-Пб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2006. 608 с.
4. **Бронников А. В., Воскобойников Ю. Е.** Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений // Автометрия. 1990. № 1. С. 21–26.
5. **Галалу В. Г., Замятин А. В.** Алгоритмы цифровой фильтрации выходных кодов аналого-цифровых преобразователей // Матер. VIII Междунар. науч. конф. «Информация, сигналы и системы: вопросы методологии, анализа и синтеза». Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2008. Ч. 4. С. 14–19.

Поступила в редакцию 23 декабря 2008 г.
