

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СКОРОСТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОБЛОЧНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ РЕОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Штепа А.А., Чичикало Н.И.

Донецкий национальный технический университет,
кафедра электронной техники

Abstract. *Shtepa A.A., Chichikalo N.I. Technique of an estimation of high-speed efficiency of a block digital filtration a reographic signal. The technique of a tentative estimation of time expenses for realization of the offered block algorithm of digital signal processing is developed. Optimum minimized sizes of the processable block satisfying a condition of affinity of the current spectrum to a spectrum of indefinitely long sample are proved for a reographic signal.*

Постановка проблемы и ее актуальность. Создание неинвазивных диагностических медицинских приборов и систем является перспективным и активно развивающимся направлением. Перед разработчиками автоматизированных систем обработки медико-биологической информации возникает проблема стандартизации условий измерений для получения стабильных, воспроизводимых результатов измерения. В рассчитываемых диагностической системой параметрах состояния пациента искажения связанные с амплитудно-фазочастотными характеристиками измерительных преобразователей могут давать погрешность до 50% (например, при контурном анализе импедансной реовазограммы [1]).

Наиболее удобным способом устранения искажений, вносимых реальным регистрирующим прибором в наблюдаемый сигнал, является апостериорная обработка сигнала с целью уменьшения влияния реальных характеристик прибора (приведение их к "идеальному" виду) с помощью персонального компьютера (ПК), входящего в состав современного диагностического комплекса.

Анализ известных решений. Коррекция исходного сигнала есть не что иное, как фильтрация с передаточной функцией $1/H(\omega)$, где $H(\omega)$ — это предварительно измеряемая или вычисляемая передаточную функцию самого прибора. Синтез подобного фильтра аналоговыми методами в общем случае невозможен из-за неограниченно высокой сложности его структуры. Единственным общим

способом его реализации является апостериорная цифровая обработка [1], [3]. Различные методы подобного восстановления сигнала хорошо развиты в области обработки изображений (например [2],[3],[4]). Особенностью современных диагностических комплексов является наличие их в составе ПК для регистрации, обработки и хранения полученной информации. Быстродействие современных ПК позволяет проводить с их помощью цифровую фильтрацию сигналов [5]. Однако часто в процессе диагностического исследования требуется проведение длительных измерений (до нескольких часов) с одновременной обработкой данных не допускающих возможности длительной паузы между регистрацией данных и анализом результатов.

Постановка задачи исследований. Вопрос о проведении фильтрации-восстановления во временной или в частотной областях решается исходя из требуемой точности и скорости обработки. В частотной области можно достичь наивысшей точности восстановления и наиболее крутых фронтов фильтров при приемлемом времени вычислений. Неудобство при этом состоит в необходимости ввода всей последовательности, для ее обработки, кроме того, при использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) ограничения накладываются на число точек в последовательности. Во временной области эти два недостатка отсутствуют, однако сильно возрастает время вычислений, которое можно сократить только за счет снижения точности.

Рассмотрим применения алгоритмов фильтрации-восстановления в частотной области с учетом требований, предъявляемых длительными диагностическими исследованиями. Для этого необходимо исследовать возможность разбиения сигнала на относительно короткие отрезки и проведения цифровой фильтрации-восстановления каждого такого отрезка (блока) последовательно непосредственно после его регистрации. При этом время, затрачиваемое на выполнение алгоритма, играет доминирующую роль, т.к. оно определяет задержку между регистрацией последнего отсчета блока и получением восстановленного сигнала. Отсюда следует важность предварительной оценки требуемых объемов вычислений и временных затрат вычислительных средств на реализацию алгоритмов фильтрации. Такая предварительная оценка позволяет заранее получить представление о требуемом классе аппаратного обеспечения и о применимости рассматриваемых методик для решения конкретной задачи.

Цель исследований. Необходимо разработать методику предварительной оценки суммарного объема вычислений для алгоритмов восстановления сигнала

ла, а также временных затраты на их реализацию с помощью ПК применительно к конкретному виду медицинских исследований, а именно — реографии. На основе такой оценки сделать выводы о скоростной эффективности поблочной фильтрации-восстановления и о применимости рассматриваемых методик.

Основной материал и результаты исследований. Рассмотрим применение поблочной фильтрации сигнала (рис. 1).

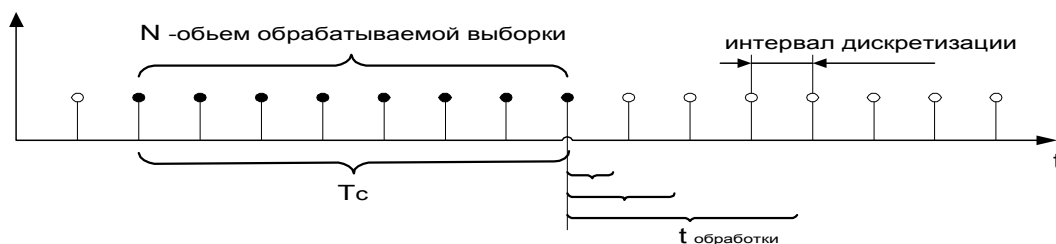


Рисунок 1 — Иллюстрация поблочной цифровой фильтрации сигнала

Как видно из рис. 1, после регистрации последнего отсчета блока ПК потребуется время для реализации алгоритма фильтрации $t_{обработки}$. Чтобы оценить скоростную эффективность поблочной фильтрации необходимо сравнить задержку $t_{обработки}$ с величиной, характеризующей динамику процесса. В качестве такой величины может выступать интервал дискретизации ($1/F_{\Delta}$, где F_{Δ} — частота дискретизации). Для оценки нами предлагается следующая зависимость:

$$k = \frac{t_{обработки}}{1 / F_{\Delta}}. \quad (1)$$

Если $k < 1$, т.е. $t_{обработки}$ меньше интервала дискретизации сигнала, то (см. рис. 1) отпадает всякая необходимость в буферизации регистрируемых отсчетов следующего блока на время $t_{обработки}$ и задержка получения результата фильтрации-восстановления будет определяться исключительно длительностью регистрации сигнала T_c . Это показатель наивысшей эффективности.

Общая задержка выдачи результата для первого отсчета блока обязательно включает длительность сигнала T_c , соответствующую объему обрабатываемой выборки (блока) N . Поэтому для более общей оценки скоростной эффективности поблочной фильтрации введем понятие — коэффициент оценки скоростной эффективности поблочной цифровой фильтрации сигналов, определяемый отношением выражения (1) к объему выборки N :

$$K_{сэ} = \frac{k_{сэ}}{N} = \frac{t_{обработки} F_{\partial}}{N}. \quad (2)$$

$K_{сэ}$ будет равен единице, при $t_{обработки} = T_c$. Если $K_{сэ} > 1$, то $t_{обработки} > T_c$, следовательно, после регистрации очередного блока не будет готов результат обработки предыдущего, что является недопустимым в отношении продолжительных непрерывных диагностических исследований.

Произведем оценку скоростной эффективности поблочной цифровой фильтрации сигналов для реографического исследования. Для оценки временных затрат ($t_{обработки}$) необходимо знать быстродействие персонального компьютера и общий объем вычислений.

Быстродействие ПК оценим с помощью времени исполнения операций сложения и умножения пары чисел [5]. Для этого протестируем несколько типов ПК с помощью несложной программы, реализующей цикл, в теле которого выполняется тестовая операция. Типы используемых в опыте переменных (см. табл. 1) наиболее близкие по разрядности к используемым в реальных медицинских диагностических приборах АЦП (обычно 10-12 разрядов).

Таблица 1 — Оценка затрат времени на выполнение простейших арифметических действий

Тип процессора	Время выполнения операции, мкс			
	Целочисленные операции		Операции с плавающей запятой	
	16-битное целое (тип SmallInt)		4-байтное действительное (тип Single)	
	сложение	умножение	сложение	умножение
AMD K5 (75 MHz)	0.309	0.293	0.204	0.213
AMD K5 (100 MHz)	0.252	0.237	0.137	0.143
Intel Celeron (466 MHz)	0.0028	0.031	0.029	0.029
AMD Athlon (1.33 GHz)	0.014	0.014	0.014	0.014
Intel Celeron (1.5 GHz)	0.009	0.011	0.010	0.010

Требуемые объемы вычислений в основном определяются особенностями алгоритма восстановления и информативностью сигнала. Алгоритмы обработки сигнала в частотной области предусматривают последовательное выполнение следующих процедур:

- синтез передаточной функции восстанавливающего фильтра,
- вычисление преобразования Фурье (ПФ) от наблюдаемой функции,

- умножение спектра наблюдаемой функции на передаточную функцию восстанавливающего фильтра,
- вычисление обратного ПФ от восстановленного спектра сигнала.

При этом основные затраты времени приходятся на вычисление ПФ.

Для вычисления одного из коэффициентов Фурье требуется N операций умножения и столько же операций сложения комплексных чисел. Для вычисления N коэффициентов требуется N^2 операций [3]. Для вычисления комплексного спектра сигнала с N отсчетами алгоритм БПФ требует [3]

$$N \log_2 N \quad (3)$$

операций над комплексными числами.

Известно, что каждое комплексное умножение на ЭВМ содержит четыре умножения и два сложения действительных, а каждое комплексное сложение - два сложения действительных чисел. Поэтому пара комплексных операций умножения и сложения эквивалентна восьми операциям над действительными числами. Как видно из табл. 1, разница между временем выполнения операций сложения и умножения для современных типов процессоров незначительна.

Суммарный объем вычислений для алгоритмов восстановления сигнала содержащего N точек в частотной области складывается из объема вычисления обратной передаточной функции (N операций), умножения ее на стабилизирующий множитель (N), вычисления прямого преобразования Фурье наблюдаемого сигнала ($8N \log_2 N$ — при использовании алгоритма БПФ в соответствии с (3)), умножения спектра на передаточную функцию восстанавливающего фильтра (N), вычисления обратного преобразования Фурье от полученного произведения (еще $8N \log_2 N$) и вспомогательных логических операций (примерно N). Таким образом, суммарный объем вычислений составляет:

$$V(N) = 4N(1 + 4 \log_2 N) \text{ операций.} \quad (4)$$

Оценим информативность реографического сигнала.

Цифровой сигнал представляет собой значения реального аналогового сигнала, взятые через равные промежутки времени (интервал дискретизации). Необходимую частоту дискретизации $F_{\text{д}}$ определяют из теоремы Котельникова. Она должна быть больше $2F_{\text{макс}}$, где $F_{\text{макс}}$ — максимальная присутствующая в спектре сигнала частота. На практике используют частоту, превышающую частоту Котельникова (Найквиста) в 2–5 раз. Принимая во внимание частотный состав реографического сигнала и полосу пропускания серийно выпускаемого реографа (для Р4–02 — 0,3...30 Гц), опреде-

лим F_δ , которая должна быть больше, по крайней мере, 60 Гц. Для уменьшения погрешности дискретизации примем $F_\delta = 100$ Гц.

Длительность сигнала T_c , соответствующая объему выборки отдельного блока, определяется из условий близости текущего спектра к идеальному спектру бесконечно длинной выборки. То есть должна быть такой, чтобы в ней помещалось 3-4 периода дыхательных волн, присутствующих в составе реографического сигнала и представляющих собой наиболее низкочастотные гармоники спектра сигнала. Из физиологических диапазонов частоты дыхания следует, что T_c должна быть не менее 9..12 секунд. При $F_\delta=100$ Гц N получается порядка 1000 отсчетов. Алгоритм БПФ накладывает специфические ограничения на количество точек сигнала N , которое должно выбираться как $N=2^n$, где n — целое число. Отсюда, выбрав $T_c=10$ сек, получаем $n=10$ и объем обрабатываемой выборки $N=1024$ отсчета, что удовлетворяет перечисленным выше условиям. Воспользовавшись (4) проведем расчет ориентировочных временных затрат, результат которого приведен на рис. 2.

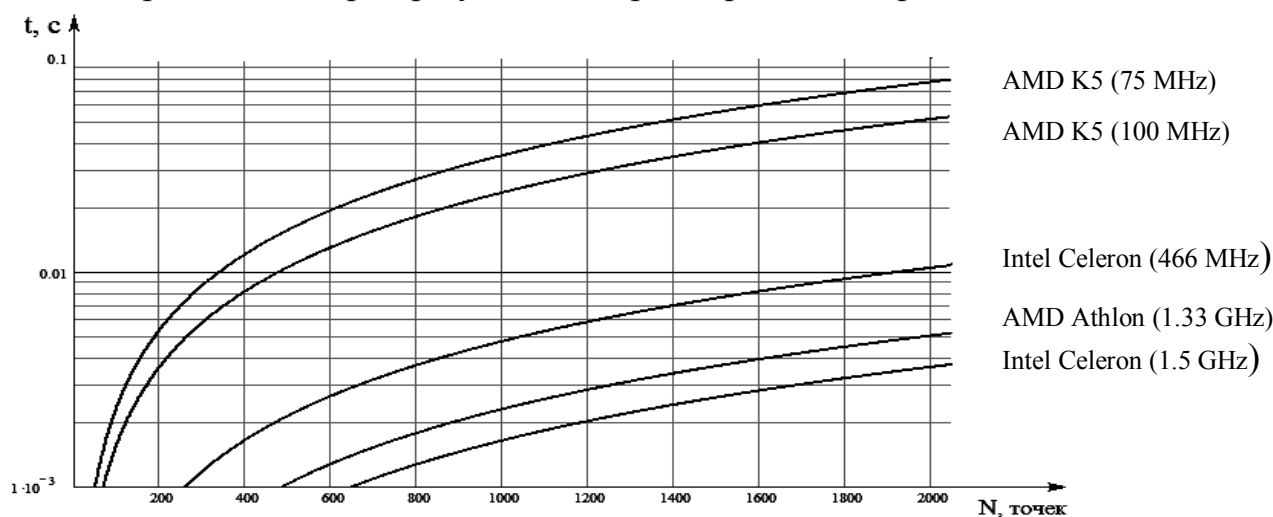


Рисунок 2 — Оценочное время выполнения алгоритма цифровой фильтрации-восстановления сигнала (t , с) с размером выборки N

В табл. 2 сведены результаты оценки скоростной эффективности поблочной цифровой фильтрации сигналов реографического исследования для 1- и 4-канальной регистрации реограммы. Полученные значения K_{cs} подтверждают применимость типовых ПК для решения задачи восстановления сигналов с помощью алгоритма поблочной цифровой фильтрации. На основании значений k (табл. 2) можно выделить класс ПК, обеспечивающий наивысшую скоростную эффективность применения рассматриваемого метода — это ПК с тактовой частотой процессора не ниже 1,3 ГГц.

Таблица 2 — Оценка скоростной эффективности поблочной цифровой фильтрации сигналов

Тип процессора	Интервал дискретизации $1/F_d$, мс	Объем выборки блока, N , точек	Время обработки блока реографического сигнала, T_c , мс		k	$K_{сэ}$
			1 канал	4 канала		
AMD K5 (75 MHz)	10	1024	35.8	143.2	14.32	0.0139
AMD K5 (100 MHz)	10	1024	24.0	96.0	9.60	0.0096
Intel Celeron (466 MHz)	10	1024	4.9	19.6	1.96	0.0019
AMD Athlon (1.33 GHz)	10	1024	2.4	9.6	<u>0.96</u>	0.0009
Intel Celeron (1.5 GHz)	10	1024	1.7	6.8	<u>0.68</u>	0.0007

Выводы.

1. Разработана методика предварительной оценки временных затрат на реализацию предложенного поблочного алгоритма цифровой обработки реографического сигнала. Определен суммарный объем требуемых вычислений.

2. Обоснованы оптимально минимизированные размеры обрабатываемого блока, удовлетворяющие условию близости текущего спектра к спектру бесконечно длинной выборки.

3. Предложены коэффициенты для оценки скоростной эффективности поблочной цифровой фильтрации и найдены их значения для типовых ПК.

Литература

1. Беляев К.Р., Морозов А.А. Коррекция фазовых искажений и обработка биомедицинских сигналов. — Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 1993. № 4. — С.40.
2. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. — М.: Радио и связь, 1987.
3. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике. — М.: Сов. радио, 1979.
4. Федоров Б. Ф., Эльман Р. И. Цифровая голография. — М.: Наука, 1976.
5. Steven W. Smith The scientist and engineer's guide to digital signal processing. — California Technical Publishing, 1997.

Сдано в редакцию: 11.03.2003г.

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Зори А.А.