

УДК 681.325.058

Анисимов В.Д. Ускоренное вычисление свертки цифровыми устройствами фильтрации и статистического анализа// Научное приборостроение. Л.: Наука, 1987.

Рассмотрен эффективный алгоритм цифровой фильтрации и предложены средства его реализации, обеспечивающие ускоренное выполнение процедуры свертки бесконечной входной последовательности с заданной в общем случае комплексной импульсной характеристикой.

Приведены сравнительные характеристики эффективности известных алгоритмов вычисления свертки во временной области и структурная схема цифрового фильтра, реализующая рассматриваемый ускоренный алгоритм. Библиогр. 7 назв. Ил. 1. Табл. 1.

В.Д.Анисимов

УСКОРЕННОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ СВЕРТКИ ЦИФРОВЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ФИЛЬТРАЦИИ И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Целью обработки результатов научного эксперимента является получение численных значений некоторых параметров, графиков, таблиц для определения или исследования свойств объекта с последующей модификацией объекта в соответствии с полученными при анализе данными. Обработка в реальном масштабе времени позволяет эффективно использовать экспериментальную масс-спектрометрическую установку, обеспечивает возможность проведения экспресс-анализа результатов и тем самым оперативность введения необходимых поправок в ход эксперимента при проведении исследований. Проблема обработки сигналов включает задачи обнаружения составляющих исследуемого процесса на фоне помех типа белого шума (фильтрация).

В данной работе рассмотрены алгоритмы цифровой фильтрации и предложена структура реализации устройства вычисления высокоскоростной свертки во временной области. В последние годы получили широкое распространение цифровые способы фильтрации. Основным аргументом использования цифрового способа реализации фильтра

является универсальность получаемого фильтра, которая обеспечивается тем, что отсчеты импульсной характеристики фильтра накапливаются в оперативной памяти. При такой структуре фильтра его характеристики легко изменять, обеспечивая, например, обработку сигналов различного типа. Кроме того, имеется возможность адаптации фильтра к изменяющейся целевой обстановке в реальном времени. Однако обработка сигналов в реальном времени накладывает жесткие требования по быстродействию к устройствам цифровой фильтрации.

Вопросам повышения эффективности алгоритмов обработки в настоящее время уделяется особое внимание [1, 2]. Вычисление свертки и корреляции при помощи не рекурсивных фильтров с конечными импульсными характеристиками (КИХ-фильтры) ввиду ряда их достоинств активно используется на практике.

В последнее время все большее применение находят алгоритмы, основанные на быстрых преобразованиях Фурье (БПФ), быстрых преобразованиях Уолша, и другие.

Быстрые преобразования в частотной области обеспечивают выигрыш в количестве операций умножения по сравнению с прямым методом вычисления свертки или корреляции во временной области при большой сложности сигнала. Однако использование быстрых прямых вычислений (БПВ) во временной области позволяет существенно увеличить эффективность прямых алгоритмов и в ряде случаев получить существенное преимущество перед быстрыми преобразователями в частотной области, в частности перед БПФ.

Как известно, для вычисления отсчета свертки или каждой ординаты взаимной корреляционной функции (ВКФ) между двумя числовыми последовательностями — бесконечной входной последовательностью x_i и опорной детерминированной y_i размера N по алгоритму прямого вычисления во временной области в реальном масштабе времени — требуется осуществление N операций умножения и сложения на интервале шага дискретизации вычисляемой ВКФ

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(i)x(i-k). \quad (1)$$

Таким образом, при реализации цифрового фильтра или коррелятора по алгоритму (1) важным показателем является количество одновременно учитывающихся отсчетов входного сигнала: $N = \Delta F_{вх} T_c$, где $\Delta F_{вх}$ — ширина полосы входного сигнала; T_c — длительность реализации входного сигнала, учитываемая для получения одной ординаты ВКФ или свертки. Количество операций умножения, затрачиваемое на получение одной ординаты по алгоритму (1), определяется величиной N

$$M_{(1)} = N. \quad (2)$$

Модификацией алгоритма (1) является алгоритм [2], обеспечивающий согласование шага дискретности вычисления с шириной полосы ($\Delta F_{вых}$) выходного сигнала фильтра

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(i)x(i - \frac{N}{Q}k), \quad (3)$$

где

$$Q = \Delta F_{вых} T_c = N \frac{\Delta F_{вых}}{\Delta F_{вх}} = \frac{N}{r}; \quad r \geq 1.$$

Количество операций умножения для получения одной ординаты осталось прежним и равным N , однако в r раз увеличился шаг вычисления ординат, т.е. уменьшилось количество ординат в единицу времени

$$M'_{(3)} = Q = \frac{N}{r}. \quad (4)$$

Быстродействие данного (3) алгоритма БПВ в L раз выше традиционного классического (1) за счет устранения избыточности на выходе фильтра.

Широко известны устройства, использующие выборки разной степени корреляции во входном и опорном трактах. Так, например, в опорном канале коррелятора [3] применяется некоррелированная выборка, а в приемном – коррелированная, причем некоррелированная выборка умножается с суммой коррелированных выборок приемного тракта на интервале корреляции. Аналитическое выражение данного алгоритма БПВ определяется выражением

$$R_{xy}^{(k)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N/L} \left[\sum_{j=(i-1)L+1}^{iL} x(j-k) \right] y(i), \quad (5)$$

где L – количество коррелированных выборок на интервале корреляции входного процесса. Как видно, количество операций сложения осталось неизменным, но в L раз сократилось количество наиболее трудоемких операций умножения. Основное отличие данного (5) алгоритма БПВ от известных алгоритмов, использующих радиокорреляционные выборки в каналах, в повышении точности измерения за счет формирования выборки приемного канала путем усреднения только коррелированных выборок на интервале корреляции.

Эффективность (быстродействие) алгоритма (5) БПВ по отношению к алгоритму (1) определяется величиной интервала корреляции исследуемого процесса

$$M_{(5)} = N/L. \quad (6)$$

При переходе от прямой формы реализации (1) КИХ-фильтра к использованию алгоритма высокоскоростной свертки с применением БПФ происходит уменьшение общего количества операций для сигналов с большой базой (N). Эффективность процедуры удается повысить за счет специального выбора числа отсчетов $N=2^m$, где m – целое число, при вычислении коэффициентов разложения возможно использование ряда итеративных процедур, позволяющих существенно сократить число умножений и тем самым ускорить процесс вычисления. При вычислении свертки с помощью БПФ необходимо выполнить два преобразования и перемножение двух точечных массивов. Количество операций умножения, необходимых для получения одной ординаты при помощи БПФ, определяется выражением

$$M_{БПФ} = 2 \log_2 2N + 2. \quad (7)$$

Как видно из (7), при больших N выигрыш в объеме вычислений по сравнению с прямым методом (1) вычисления свертки во временной области может оказаться весьма значительным. Однако при вычислениях по алгоритмам БПФ выбор точек спектральной полосы строго регламентирован. Отсчеты могут выбираться только кратными $2\pi/T$. При фильтрации периодических процессов или процессов, в составе которых имеются периодические компоненты, неточное совпадение гармоник фильтрующего сигнала и разрешенных БПФ частот ($\omega_n = 2\pi n/T$) приводит к "зарезанию" уровней вычисленных гармоник и обуславливает появление дополнительной погрешности. Кроме того, использование преобразования Фурье не позволяет в ряде случаев получить оценку точной структуры спектра. Если спектр исследуемого процесса негладкий (как например, спектр мощности несущей, промодулированной по частоте сигналом, представляющим собой сумму синусоидального сигнала и гауссовского шума и пропущенным через RC-фильтр), то использование для характеристики спектра оценки, получаемой при помощи БПФ, даже если приняты меры к уменьшению эффекта "размывания спек-

ральных составляющих", таит в себе риск не заметить характерные особенности спектра исследуемого сигнала [4] .

При вычислении свертки при помощи цифрового фильтра [5] и корреляции при помощи цифрового коррелятора [6] , работающих по алгоритму быстрого прямого вычисления, количество операций умножения инвариантно количеству (N) одновременно учитываемых отсчетов сигнала. Количество операций умножения ограничено конечным множеством значений, принимаемых коэффициентами импульсной характеристики или цифровыми выборками опорного сигнала.

В основу алгоритма положен принцип объединения в каждом цикле вычисления цифровых выборок входного сигнала в L групп по принципу равенства значений соответствующих им цифровых выборок опорного сигнала. Таким образом, входной массив из N выборок разбивается на L групп по m_j выборок в каждой из L_j групп

$$N = \sum_{j=0}^{L-1} m_j. \quad (8)$$

В пределах каждой j -й группы осуществляется суммирование m_j значений выборок $\sum_{i=0}^{m_j-1} x(i-k)$ с последующим умножением результата суммирования с соответствующим данной группе значением выборок опорного сигнала. Аналитическое представление данного алгоритма определяется выражением

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{L-1} \left\{ y_i \left[\sum_{i=0}^{m_j-1} x(i-k) \right] \right\}. \quad (9)$$

Как видно из (9), при реализации фильтра по алгоритму БПВ (9) количество операций умножения определяется не размерностью N , а множеством значений L , которые принимают цифровые выборки опорного сигнала (коэффициенты фильтрации)

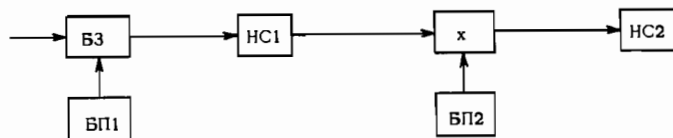
$$M_{(q)} = 2^q = L, \quad (10)$$

где q - разрядность представления опорного детерминированного сигнала (коэффициентов фильтрации). Область эффективности алгоритма (9) по отношению к алгоритму (1) определяется выражением

$$q < \log_2 N. \quad (11)$$

Как известно [7] , при аппаратном корреляционном анализе или фильтрации на основе прямого алгоритма во временной области к разрядности представления исходных величин предъявляются значительно менее жесткие требования, чем при анализе на основе БПФ. Использование алгоритма Стилтеса (разноразрядное представление исходных величин) и алгоритма (9) вычисления высокоскоростной свертки позволяет существенно повысить эффективность прямого вычисления во временной области. Необходимо отметить, что алгоритм (9) не вносит дополнительной погрешности в процесс вычисления по сравнению с прямым традиционным вычислением по алгоритму (1).

Пути реализации алгоритма БПВ (9) могут быть как программными, так и аппаратными с использованием микроЭВМ или без них. Как видно из рисунка, цифровые



Структура цифрового фильтра, реализующая алгоритм (9).

выборки анализируемого входного сигнала последовательно с частотой дискретизации поступают в память блока задержки БЗ, где каждая выборка хранится в течение N циклов, а затем заменяется новой, вновь поступившей на вход. В паузе между моментами поступления в память блока БЗ двух соседних выборок входного сигнала осуществляется групповой опрос всех N ячеек памяти при помощи блока памяти БП1 рангов коэффициентов импульсной характеристики (КИХ), т.е. в каждой L_j группе объединяются те выборки входного сигнала, которые в данном цикле вычисления умножаются на равные по значениям КИХ. С выхода БЗ выборки последовательно поступают в накапливающий сумматор НС1, где они в пределах своих групп суммируются. Результаты суммирования в умножителе перемножаются с соответствующими им значениями КИХ, которые хранятся в блоке памяти БП2 значений КИХ. Накапливающий сумматор НС2 осуществляет суммирование и усреднение результатов умножения на интервале дискретизации вычисляемой свертки.

Техническая реализация данного цифрового фильтра не требует разработки специальных цифровых узлов и может быть реализована в виде модульной структуры, например структуры КАМАК с использованием микроЭЕМ типа "Электроника-60" или автономного контроллера.

Из таблицы видно, что по количеству операций умножения при разрядности КИХ, не превышающей 4 ($q = 4$), алгоритм БПВ (9) имеет существенное преимущество перед остальными, в том числе и перед алгоритмом на основании БПФ. При этом не учитывалось, что в алгоритме БПВ (9) используется умножение разноразрядных чисел, что в ряде случаев значительно (в несколько раз) уменьшает время, затрачиваемое на выполнение одной базовой операции умножения.

Предложенный алгоритм БПВ (9) вычисления свертки и корреляции может эффективно использоваться при фильтрации сложных сигналов, причем его быстродействие не зависит от вида импульсной характеристики фильтра, что обуславливает оперативную перестройку при решении задач распределения и адаптации.

Сравнительные характеристики эффективности алгоритмов вычисления свертки

Порядок фильтра N	Разрядность КИХ q	Количество операций умножения (в пересчете на одну ординату)		
		$M(I)$	БПФ	БПВ(9)
1024	8	1024	24	256
2048	8	2048	26	256
4096	8	4096	28	256
1024	6	1024	24	64
2048	6	2048	26	64
4096	6	4096	28	64
1024	4	1024	24	16
2048	4	2048	26	16
4096	4	4096	28	16
1024	3	1024	24	8
2048	3	2048	26	8
4096	3	4096	28	8

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение цифровой обработки сигналов/Под ред.Э.Оппенгейма. М., 1980.
2. Чайковский В.И. Анализ эффективности алгоритмов цифровой нерекурсивной фильтрации //Тез.докл.ХІ Всесоюз.симпоз."Методы и средства представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей", Сухуми, 1980.ВНИИЭП, 1980.
3. А.с.879595 СССР// Б.И.1981. № 41.С.233-234.
4. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М., 1982.
5. А.с.904201 СССР//Б.И.1982. № 5. С.287-288.
6. А.с.900289 СССР//Б.И.1982. № 3. С.227.
7. Домарацкий А.Н., Иванов Л.Н., Орлов Ю.И. Многоцелевой статистический анализ сигналов. Новосибирск, 1975.

О.Н.Бесчастнов, В.В.Зданович

О НЕКОТОРЫХ МАШИННЫХ МЕТОДАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящее время разработаны методы исследования вещества, основанные на применении электронных спектрометров, в которых возбуждающим воздействием является излучение, образующееся в накопителе синхротрона. Это направление считается весьма перспективным в связи с большой интенсивностью синхротронного излучения (СИ), обладающего практически непрерывным спектром от инфракрасной до рентгеновской области, а также острой направленностью и высокой степенью линейной и круговой поляризации [1].

С помощью электронных спектрометров решается достаточно широкий круг задач и при интерпретации результатов экспериментов зачастую требуется процеливать большой объем вычислений. Исследователь вынужден обрабатывать результаты на универсальной ЭВМ, расположенной на значительном удалении от прибора. Это существенно увеличивает суммарное время, затрачиваемое на проведение экспериментов. Появление мини-ЭВМ, обладающих большими быстродействием и оперативной памятью, предоставляет исследователю возможность производить оперативную интерпретацию результатов экспериментов непосредственно на встраиваемой в прибор мини-ЭВМ путем сравнения вычисленного спектра с экспериментальным. Исходя из этого, представляется актуальным выявить те модели, которые целесообразно обчислять на мини-ЭВМ уже сейчас и в ближайшем будущем. Критериями отбора физических моделей являются возможность их обчета на мини-ЭВМ, а также частота применения в физико-химических расчетах.

Следует отметить, что расчеты на моделях часто носят весьма приближенный характер, во-первых, в силу малой точности самой модели, а во-вторых, из-за того, что численный метод решения уравнения зачастую не гарантирует сходимости к какому-либо решению. Поэтому все подобные расчеты должны происходить в режиме диалогового взаимодействия исследователей с системой.

Все вычисления по согласованию теоретических данных с экспериментальными можно условно разделить на две группы. В первую входят простейшие расчеты по заданным физическим формулам. Ко второй группе можно отнести вычисления по физическим моделям, обычно связанные с нахождением численным методом приближенного решения