

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АППАРАТНОГО ЦИФРОВОГО НЕРЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА НА БАЗЕ СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА ADSP 21065L

А. Г. Хайминов

Массовое распространение ПЭВМ сделало доступным применение цифровой обработки сигналов во многих приложениях, например, в мультимедийных или при фильтрации данных, поступающих с измерительных приборов. Зачастую производительности процессора не хватает для проведения вычислений в режиме реального времени.

Для разгрузки компьютера цифровую обработку сигналов можно поручить подключаемому по скоростной шине аппаратному блоку на базе сигнального процессора. В НИЛ информационно-измерительных систем кафедры информатики факультета радиофизики и электроники Белгосуниверситета организовано производство устройств цифровой обработки сигналов, имеющих возможность совместной работы с ПЭВМ. Их центральным звеном является цифровой сигнальный процессор фирмы Analog Devices ADSP 21065L.

Цель работы – разработка программного модуля для процессора ADSP 21065L, который реализует цифровой нерекурсивный фильтр с максимально возможным спектральным разрешением.

Линейный цифровой нерекурсивный фильтр осуществляет линейную апериодическую свертку входной последовательности с коэффициентами фильтра. Уравнение линейной апериодической свертки:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N c[k]x[n-k] \quad (1)$$

Более краткая запись уравнения (1):

$$\{y\} = \{c\} * \{x\} \quad (2)$$

Важнейшие свойства свертки – коммутативность (3) и линейность (4):

$$\{y\} = \{c\} * \{x\} = \{x\} * \{c\} \quad (3)$$

$$\{c\} * (\{a\} + \{b\}) = \{c\} * \{a\} + \{c\} * \{b\} \quad (4)$$

Линейность свертки позволяет проводить секционированную фильтрацию последовательностей, не ограниченных по длине. Входной сигнал разбивается на секции (блоки), каждая из которых фильтруется отдельно. Затем отфильтрованные блоки «сшиваются».

Результат свертки блока и фильтра, содержащих соответственно B и F отсчетов, будет иметь длину $B+F-1$ отсчетов, что ведет к перекрытию выходных блоков при их наложении.

Линейную свертку последовательностей можно провести непосредственно по формуле (1), но есть другой способ – использование дискретного преобразования Фурье [1].

Прямое дискретное преобразование Фурье конвертирует сигнал из временной формы представления в спектральную по уравнению:

$$X[k] = \sum_{n=0}^N x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad n = \overline{0, N-1}; \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (5)$$

Соответственно, обратное ДПФ по спектру сигнала восстанавливает его зависимость от времени:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N X[k] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad n = \overline{0, N-1}; \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (6)$$

Следует учитывать, что все математические действия при преобразованиях выполняются по правилам комплексной арифметики. При этом спектр последовательности действительных чисел будет комплексным. Обратное утверждение в общем случае неверно.

Произведение двух спектров эквивалентно свертке сигналов, соответствующих этим спектрам, поэтому при помощи прямого и обратного ДПФ можно проводить свертку двух сигналов. Порядок действий таков:

1. Провести прямое ДПФ блока и фильтра.
2. Перемножить полученные спектры.
3. Провести обратное ДПФ произведения.

Так как произведение спектров действительных сигналов есть спектр сигнала действительного, то результатом описанных операций будет сигнал, мнимая часть которого равна нулю. При проведении расчетов на цифровой ЭВМ неравенство нулю мнимой части выходного сигнала вызвано ошибками округления.

Во избежание циклического наложения размер N преобразования Фурье должен быть не менее суммарного количества точек блока и фильтра, уменьшенного на единицу:

$$N \geq B + F - 1. \quad (7)$$

Перед выполнением преобразований блок и фильтр дополняются нулями до длины N отсчетов.

Вычислительная сложность непосредственной свертки и свертки с использованием ДПФ пропорциональна N^2 . Если $N > 60$, то ДПФ целесо-

образно заменить быстрым преобразованием Фурье (БПФ), вычислительная сложность которого пропорциональна $N \log_2 N$ [2].

Исходя из теоретического материала, представленного выше, опишем алгоритм эффективной секционированной фильтрации. Продолжим использовать введенные обозначения:

N – размер БПФ, F – количество коэффициентов фильтра.

$S = F - 1$ – длина массива состояния («хвоста»).

$B = N - F + 1$ – длина фильтруемого блока.

Входные массивы:

$\{\text{Block}\}$, $\{_Filter_ \}$ – комплексные,

$\{\text{State}\}$ – действительный.

Алгоритм:

1. Обнуление «хвоста» блока:

$\text{Block}[j + B].\text{re} = 0; 0 \leq j \leq S-1;$

2. Прямое БПФ блока:

$\{_Block_ \} = \text{FFT}\{\text{Block}\};$

3. Комплексное перемножение спектров $\{_Block_ \}$ и $\{_Filter_ \}$:

$_Block_ [j] = _Block_ [j] * _filter_ [j]; 0 \leq j \leq N-1;$

4. Обратное БПФ полученного спектра:

$\{\text{Block}\} = \text{invFFT}\{_Block_ \}$

5. Наложение «хвоста» от предыдущего блока:

$\text{Block}[j].\text{re} = \text{Block}[j].\text{re} + \text{State}[j], 0 \leq j \leq S-1;$

6. Формирование нового массива состояний:

$\text{State}[j] = \text{Block}[j+B].\text{re}, 0 \leq j \leq S-1;$

Так как нежелательно, чтобы длина входного и выходного блока различались, то та часть выходного массива, которая не укладывается в первые B точек, перемещается в вектор состояний и участвует в формировании следующего блока. Такой подход позволяет использовать одну и ту же процедуру для параллельной фильтрации нескольких каналов данных. В этом случае для каждого канала достаточно раздельно хранить массивы состояний и, если необходимо, коэффициенты фильтра.

Для того, чтобы при вызове процедуры каждый раз не проводить лишних операций по расчету спектра фильтра, то рекомендуется заранее вычислить спектр фильтра, который и следует передавать в процедуру, осуществляющую фильтрацию.

Реальные физические сигналы – действительные, а преобразования Фурье – комплексные, поэтому перед фильтрацией информация заносится в действительную часть блока, а мнимая часть приравнивается к нулю. После фильтрации преобразованный сигнал будет находиться в действительной части выходного блока.

Расчетные характеристики цифрового нерекурсивного фильтра реального времени на базе процессора ADSP 21065L

		Количество коэффициентов фильтра					
		16	32	56	128	256	512
	Единицы изм.						
Время выполнения	мкс	38,71667	82,31667	179,3167	395,65	869,65	1902,667
—//— на один отсчет	мкс	2,419792	2,572396	3,202083	3,091016	3,39707	3,716146
макс. Частота дискретизации входного сигнала	кГц	413	388	312	323	294	269
макс. число каналов при $f_{\text{дискр.}}=44,1$ кГц		9	8	7	7	6	6
спектральное раз-решение при $f_{\text{дискр.}}=44,1$ кГц	Гц	2800	1400	700	350	180	90

Программа секционированной фильтрации была реализована на модификации языка С для семейства сигнальных процессоров ADSP 21000 [3, 4]. Критичные по времени выполнения части программы были подвергнуты ассемблерной оптимизации. В таблице даны результаты расчетного времени выполнения программы для различных размеров блока.

Максимально возможная длина блока в данной реализации составляет 512 точек и ограничена объемом памяти процессора.

Литература

1. Гольденберг Л. М. и др. Цифровая обработка сигналов: Справочник / М.: радио и связь, 1985. С. 22.
2. Cooley J. W., Tukey J. W. An algorithm for the machine computation of complex Fourier series // Math. Comp., 19, April 1965, pp. 297–301.
3. ADSP 2106x SHARC user's manual / USA, 1998.
4. ADSP 21000 Family C Tools Library Manual / USA, 1994.

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКИ

В. М. Харкевич

Все что сделано руками человека имеет свой срок службы и обязательно рано или поздно приходит в негодность. Да и сам человек не вечен и также обладает свойством старения и саморазрушения. Причем чем сложнее устройство, чем больше оно содержит в себе составных частей требующих совместной согласованной работы, тем больше вероятность выхода его из строя и сокращения срока его службы (срока жиз-