

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 681.324

И. И. БРОДСКИЙ, В. А. КОЗЛАЧКОВ, И. И. КОРШЕВЕР,
В. С. ЛЬВОВ, С. Л. МУШЕР, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН,
С. А. ПАВЛОВ, А. А. ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ, И. Г. РЕМЕЛЬ,
А. В. ШАФАРЕНКО
(Новосибирск)

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Введение. Практика гидрофизической информации имеет давние традиции. До недавних пор экспериментальные гидрофизические системы строились как комплексы специализированных аналоговых и цифровых приборов. В последнее время подобные сложные измерительные комплексы стали включаться в системы реального времени под управлением малых ЭВМ [1].

Одновременно совершенствовались вычислительные методы обработки данных гидро- и газодинамических экспериментов. Помимо традиционных методов обработки — спектрального и корреляционного анализа — были развиты подходы, связанные с применением регрессионного анализа, адаптивных методов спектральных оценок и т. п. [2]. При изучении проблемы зарождения гидродинамической турбулентности широко использовались различные алгоритмы фильтрации данных; результаты многоточечных измерений временных зависимостей скорости течения жидкости позволили изучать топологические свойства аттракторов в эффективном фазовом пространстве, в частности измерять по данным эксперимента фрактальную и информационную размерности [3]. Весь этот аппарат, отработанный на современных высокопроизводительных вычислительных машинах, не имеет никакой перспективы в рамках традиционных для гидрофизики аналоговых способов обработки.

Появление высокопроизводительных вычислительных средств в архитектуре систем реального времени дало возможность внедрить в практику обработки гидрофизических сигналов мощные современные методы обнаружения и оценивания сигналов. Это послужило основой для создания в Институте автоматизации и электрометрии СО АН СССР гидрофизического вычислительного комплекса реального времени (ГФВК) в соответствии с идеологией вычислительных систем четвертого поколения.

Постановка задачи. Одним из реализованных вариантов использования ГФВК является изучение перехода от ламинарного течения жидкости к турбулентному при увеличении скорости, в частности исследование когерентных структур в течении Куэтта, возникающих при больших числах Рейнольдса. Для этого в гидродинамическом стенде (описанном детально в работе [4]) установлено около сотни гидродинамических датчиков, измеряющих градиент скорости жидкости в эквидистантно расположенных точках $z = \alpha_n$ вдоль вертикальной образующей цилиндра. С этих датчиков в ГФВК поступает пространственно-временной сигнал, несущий в себе информацию о динамическом поведении течения жидко-

сти. Обработка в реальном времени эксперимента этого многомерного потока данных по гибко изменяемым алгоритмам — основная задача ГФВК.

Первый (и обязательный) этап обработки данных в ГФВК заключается в параллельном вычислении пространственных (по датчикам) фурье-гармоник сигнала, характеризующих различные когерентные структуры в потоке. После этого в простейшем варианте обработки необходимо вычислять спектры мощности для временной реализации каждой пространственной фурье-компоненты. В результате данный способ сводится к двумерному преобразованию Фурье исходного пространственно-временного сигнала.

Глобальная структура данных в ГФВК представляется в системе в виде неограниченно развивающейся ленты, генерируемой системой датчиков и определенной на решетке, поперечные сечения которой — мгновенные отсчеты сигналов, поступающих от датчиков, а продольные — временные реализации сигналов каждого из датчиков. Двумерное фурье-преобразование подобного сигнала реализуется сначала по столбцам этого прямоугольного массива, а затем по строкам, представляющим собой бесконечные временные последовательности одноименных пространственных частот.

При переходе от векторных операций над строками к операциям над столбцами (или наоборот) возникает необходимость в транспонировании двумерного массива. Это не представляет особой сложности, если весь массив хранится в оперативной памяти, однако при ограничениях на ее объем необходимы более сложные процедуры поэтапного транспонирования с использованием внешних носителей [5].

Поскольку для повышения отношения сигнал — шум и получения спектральных оценок сигналов с удовлетворительной точностью необходимо накапливать периодограммы [6] отдельных реализаций с перекрытием, то «бесконечная лента» имеет блочную структуру. Отдельные ее «кадры» перекрываются с некоторым шагом, выбранным из соображений, связанных с достигаемой дисперсией спектральной оценки и допустимым временем накопления (рис. 1).

Процедура получения спектральных оценок включает в себя также низкочастотную фильтрацию. Двумерные спектры являются исходной информацией для анализа динамических характеристик потока жидкости. Решение о наличии когерентной структуры принимается путем сравнения уровней и статистик сигнала и шумового процесса. Поэтому необходимо также оценивать статистические характеристики турбулентного фона для динамической оптимизации работы ГФВК.

Следует отметить, что ГФВК представляет собой достаточно гибкий вычислительный комплекс и его можно использовать для решения ряда методически близких задач (электро- и сейсморазведка, изучение океанической турбулентности и т. п.). В первом случае речь идет об аналогии между поисками когерентных структур в турбулентности и рудных тел либо других геологических образований [7]. Во второй группе задач важным является изучение взаимодействия поверхностных и внутренних волн, проблема генерации объемной турбулентности в океане и т. п. [8].

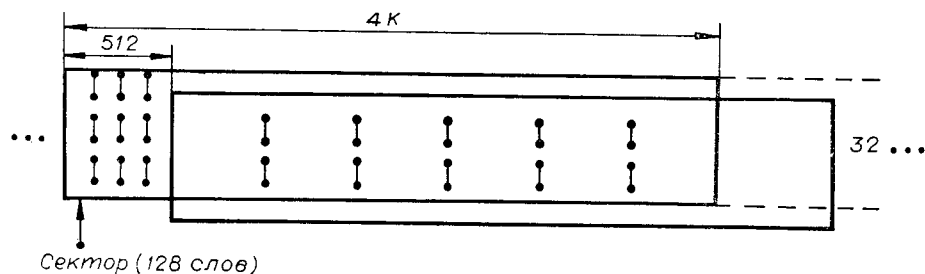


Рис. 1. Структура данных в системе.

В большинстве подобных ситуаций темп поступления данных с многоканальной системы сбора на вход вычислительного комплекса 2—20 кГц. Длительность одного эксперимента может составлять несколько часов, поэтому обработку данных необходимо вести в реальном времени. Как уже отмечалось, обработка включает фильтрацию данных в пространстве многих параметров, двумерное преобразование Фурье, корреляционный анализ и т. д.

Для удовлетворения этих требований необходима вычислительная мощность комплекса обработки порядка 8—10 млн. опер./с, причем на завершающих этапах обработки требования к динамическому диапазону результатов могут быть удовлетворены только при вычислениях с плавающей запятой.

Принципы построения и архитектура ГФВК. Оценки показывают, что в настоящее время невозможно обеспечить нужную в реальных экспериментах производительность и гибкость обработки, применяя для этих целей мощные универсальные ЭВМ традиционной архитектуры. Поэтому поставленная задача может быть решена только путем создания проблемно-ориентированного вычислительного комплекса.

В основу архитектуры такого комплекса были положены следующие принципы:

модульность структуры с широким использованием специальных блоков (аппаратных и программных) для выполнения отдельных функций; конвейерный принцип организации, используемый как внутри отдельных блоков, так и между блоками (исключение составляет система сбора, принципиально являющаяся синхронной системой реального времени);

эквивалентность программных и аппаратных средств с точки зрения выполняемых функций, допускающая замену одних средств другими; интеллектуализация внешних устройств (памяти, средств графического вывода, линий связи и т. д.);

возможность простой и быстрой адаптации системы к параметрам сигнала и среды, а также к типу приемного устройства;

сведение к минимуму разработки нестандартного оборудования; предпочтительное использование серийных отечественных вычислительных средств и стандарта КАМАК для сопряжения ЭВМ с объектом эксперимента;

разветвленная система автономного тестирования для обеспечения повышенной надежности;

стандартизованное подключение к системе новых устройств и программных разработок.

В качестве базовой ГФВК выбрана трехуровневая структура, причем каждый ее уровень является законченной функционально независимой подсистемой (рис. 2).

Нижний уровень предназначен для сбора информации под управлением микро-ЭВМ «Электроника-60». Он строится в принятой в ИАиЭ СО АН СССР методологии «Микро-КАМАК-лаб» [9, 10]. Для предварительной аналого-цифровой обработки сигналов разработан специальный модуль КАМАК, осуществляющий необходимые преобразования сигнала. Первый этап цифровой обработки данных, заключающийся в получении пространственного спектра сигналов, реализуется в быстром периферийном процессоре «Электроника-МТ/70» [11], подключенном к общей шине ЭВМ «Электроника-60».

Подсистема сбора (ПС) через стандартный канал последовательной связи подключена к общей шине подсистемы среднего уровня, назначение которой — накопление отдельных пространственных спектров сигнала с целью формирования двумерных массивов и их транспонирования, а также для временного усреднения полученных двумерных спектров (далее — подсистема накопления (ПН)).

Ядром ГФВК является векторный процессор А-12 [12], осуществляющий фурье-преобразование сигналов во временной области, а также

вторичную обработку информации. Для загрузки данных из нижнего уровня в основную память А-12 в режиме прямого доступа используется стандартный модуль автономного канала ввода-вывода А-12.

Через канал связи А-12 с подсистемой верхнего уровня производится управление векторным процессором, его загрузка и инициализация, выдача результатов для кратко- и долговременного хранения, тестирование и другие функции системной поддержки А-12. Этот уровень используется также для общего управления системой и синхронизации подсистем и потоков между ними (далее — подсистема управления и синхронизации (ПУС)).

На этом же уровне подключено рабочее место оператора, содержащее ряд устройств ввода-вывода, представляющих собой в совокупности подсистему отображения, регистрации и документирования (ПСОРД) (алфавитно-цифровой терминал, система отображения графической информации, устройство символьной и растровой — для получения твердых копий — мозаичной печати).

Организация обработки информации в ГФВК. В целом система представляет собой конвейер функциональных подсистем, так что данные и промежуточные результаты их обработки перемещаются «снизу вверх» — от датчиков к системе отображения. Каждая из подсистем имеет собственные средства управления отдельными процессами как внутри отдельных подсистем, так и между ними. На рис. 3 представлена блок-схема всех протекающих в системе процессов, иллюстрирующая распространение в ней информации. Наличие такого большого количества процессов обусловлено тем,

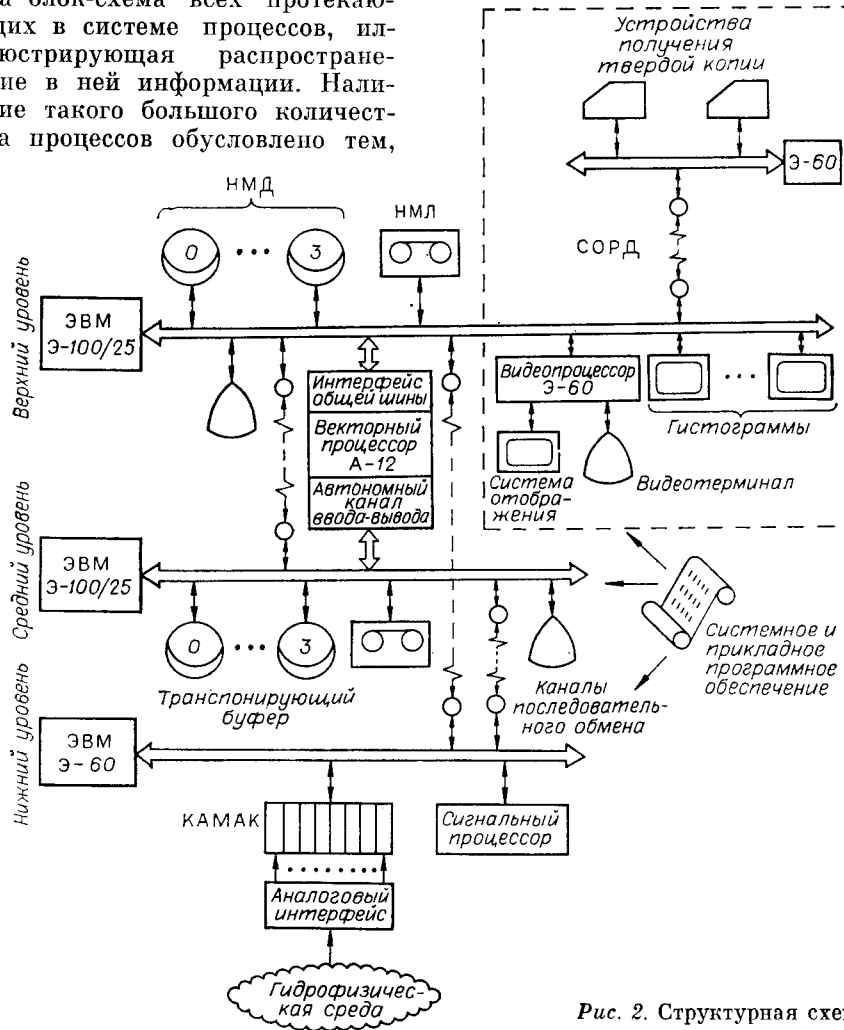


Рис. 2. Структурная схема системы.

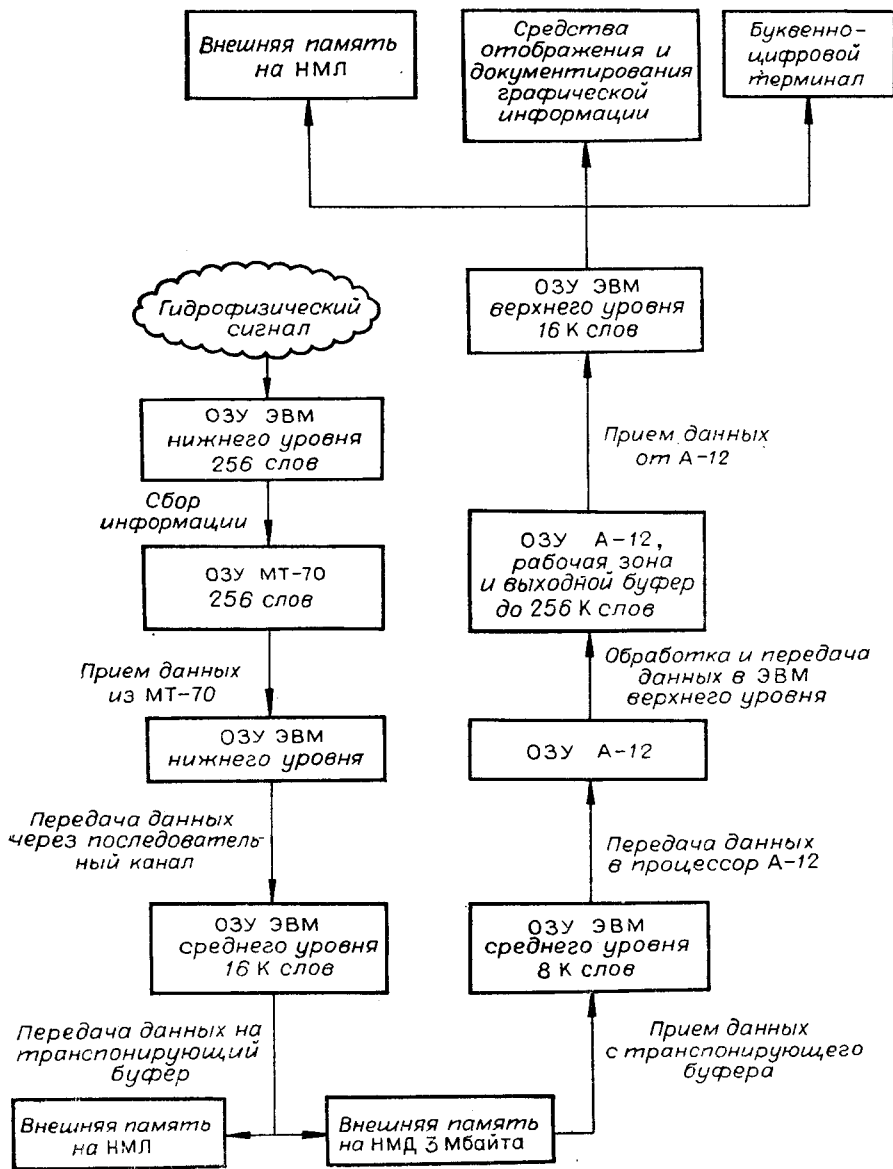


Рис. 3. Блок-схема процессов в ГФВК.

что большинство пересылок осуществляется с использованием режима прямого доступа к памяти, который является асинхронным по отношению к управляющей программе ЭВМ.

Каждый процесс, как правило, принимает данные из входного буфера, модифицирует их и передает в выходной буфер [3]. При этом входной буфер процесса будет одновременно выходным буфером для предшествующего процесса, а выходной — входным для последующего процесса. Синхронизация между отдельными процессами осуществляется с помощью специальных признаков «Буфер полон», «Буфер пуст», «Буфер готов».

Подсистема сбора данных содержит входной многоканальный блок, модули коммутатора, аналого-цифрового преобразователя и устройство синхронизации (таймер). Управление подсистемой обеспечивается микро-ЭВМ «Электроника-60» через крейт-контроллер КАМАК.

Входной блок предназначен для аналоговой предобработки вектора входных сигналов. В зависимости от применений этот блок собирается

из необходимого числа отдельных модулей, каждый из которых имеет по четыре одинаковых канала. Каждый канал содержит усилитель с программируемым коэффициентом усиления и умножители на два сопряженных опорных сигнала, генерируемых в цифровом виде отдельным управляющим модулем. За каждым умножителем следует фильтр нижних частот, обеспечивающий необходимое подавление комбинационных частот.

Полученный во входном блоке комплексный вектор демодулированных сигналов через задаваемый промежуток времени преобразуется из аналоговой формы в цифровую и помещается в оперативную память микро-ЭВМ. Далее этот массив данных передается в периферийный процессор «Электроника-МТ/70».

Для обеспечения работы процессора «Электроника-МТ/70» разработан комплекс программ на Макроассемблере, включающий:

драйвер контроллера прямого доступа, осуществляющий операции обмена между памятью данных МТ/70 и оперативной памятью микро-ЭВМ;

драйвер процессора МТ/70, необходимый для передачи параметров и организации запуска его микропрограмм;

библиотеку подпрограмм, являющихся интерфейсом между программами, написанными на Фортране, и драйверами МТ/70; эта библиотека поддерживает полный набор аппаратных возможностей процессора (арифметические и логические операции, быстрое преобразование Фурье, статистическая обработка).

Организация очередей возложена на операционную систему микро-ЭВМ РАФОС, что позволяет программировать МТ/70, не прерывая его вычислений, при использовании в режиме реального времени.

Для управления аппаратурой КАМАК применяются программы сбора и обработки прерываний. Программа сбора содержит, в частности, обращения к микропрограммам МТ/70 с помощью компонент описанной выше библиотеки для цифровой предобработки сигналов. Для передачи 32 комплексных пространственных спектральных отсчетов (64 16-рядных действительных чисел) программа сбора использует драйвер линии связи. Передача ведется в соответствии с выбранным протоколом, предусматривающим защиту от рассинхронизации процессов передачи и приема.

Средний уровень системы находится под управлением ЭВМ «Электроника-100/25» и используется для реализации подготовительных операций, предшествующих обработке. К ним относятся прием данных с системы нижнего уровня, транспонирование массива пространственно-временных отсчетов и передача сформированных данных в главную память процессора А-12. Здесь же осуществляется непрерывное накопление цифровых отсчетов на магнитной ленте с целью сохранения информации о предыстории обработанного сигнала.

Для обеспечения функционирования этого уровня создан комплекс программ, работающих под управлением операционной системы ОС РВ:

программа приема данных с линии;

программа накопления частично транспонированных данных на магнитофоне;

программа транспонирования данных на дисковом накопителе;

программа, управляющая каналом прямого доступа к главной памяти А-12.

Все эти программы активны, равны по приоритету по отношению к процессору ЭВМ и работают одновременно. Для их синхронизации используются флаги так, что каждая из них начинает свою работу, лишь убедившись в завершении предшествующего процесса, и, окончив свою работу, устанавливает флаг готовности, который свидетельствует о завершении процесса (одновременно происходит сброс флага готовности предыдущего процесса). На рис. 4 приведена блок-схема программ среднего уровня.

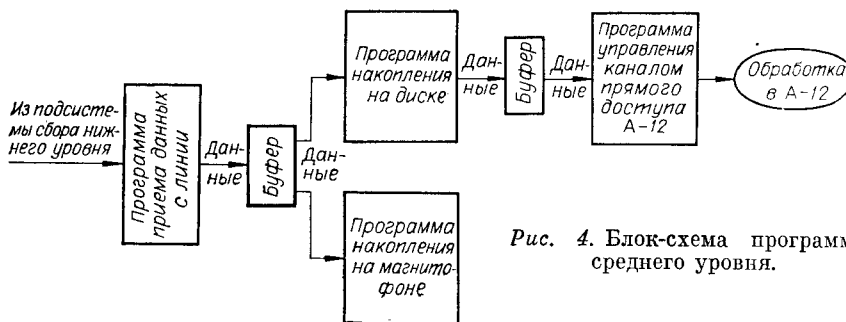


Рис. 4. Блок-схема программ среднего уровня.

Этап *фурье-преобразования* временных отсчетов и последующего накопления периодограмм с целью получения спектральных оценок реализуется в векторном процессоре А-12. При этом из-за ограниченного объема основной памяти данных процессора А-12 возникает необходимость промежуточной буферизации массива с целью его транспонирования.

Транспонирующий буфер реализован на базе магнитного дискового накопителя, в котором запись поступающих с нижнего уровня векторных отсчетов пространственных спектров осуществляется по радиусу плоской дисковой пластины, а считывание временных последовательностей в главную память А-12 — по окружности пластины.

Поскольку обращение к диску возможно лишь блоками по 256 слов, то требуется промежуточный транспонирующий буфер объемом 32×128 комплексных чисел, реализованный на оперативной памяти ЭВМ среднего уровня. Программа приема данных, работающая по специальному протоколу обмена, осуществляет прием данных с линии, запись поступающих из подсистемы сбора блоков по 32 комплексных числа в два передвигающихся буфера (каждый объемом 8 К), один из которых всегда заполняется из подсистемы сбора, а другой записывается на диск. В процессе считывания выполняется первый этап транспонирования.

Блоки, поступающие на диск буферной памяти, являются отрезками временных последовательностей, которые «монтируются» в единую последовательность, расположенную по окружности диска, через каждые 32 операции записи на диск. Программа, осуществляющая транспонирование, укладывает эти частично транспонированные массивы последовательно по трем зонам, чередующимся в режимах обращения так, что запись на диск производится в одну очередную зону, а считывание из двух заполненных зон этого буфера — в главную оперативную память А-12.

Изложенная процедура представлена на рис. 5 как процесс двухэтапной модификации структуры двумерного массива размером $2 \times 32 \times 4$ К комплексных чисел, адресное пространство которого отображено в виде двух полей — 5- и 12-разрядных. Одновременно на магнитофоне происходит архивная регистрация массивов, поступающих с нижнего уровня системы.

Таким образом, в течение сеанса считывания с диска в оперативную память А-12 поступают последовательно по каналам временные последовательности по 8 К отсчетов.

Основные вычислительные ресурсы системы представляет собой «связка» двух процессоров универсальных мини-ЭВМ «Электроника-100/25» с векторным процессором А-12. Такое объединение позволяет разумно распределить нагрузку на систему. При этом А-12 берет на себя основную вычислительную работу по реализации прикладных программ и программ вторичной обработки, а ЭВМ верхнего уровня — управление этими процессами в А-12, глобальное управление всей системой, а также упорядочение и отображение результатов.

Вычисления в А-12 осуществляются в двух чередующихся буферах (8 К комплексных чисел в каждом) в главной памяти А-12, в которые

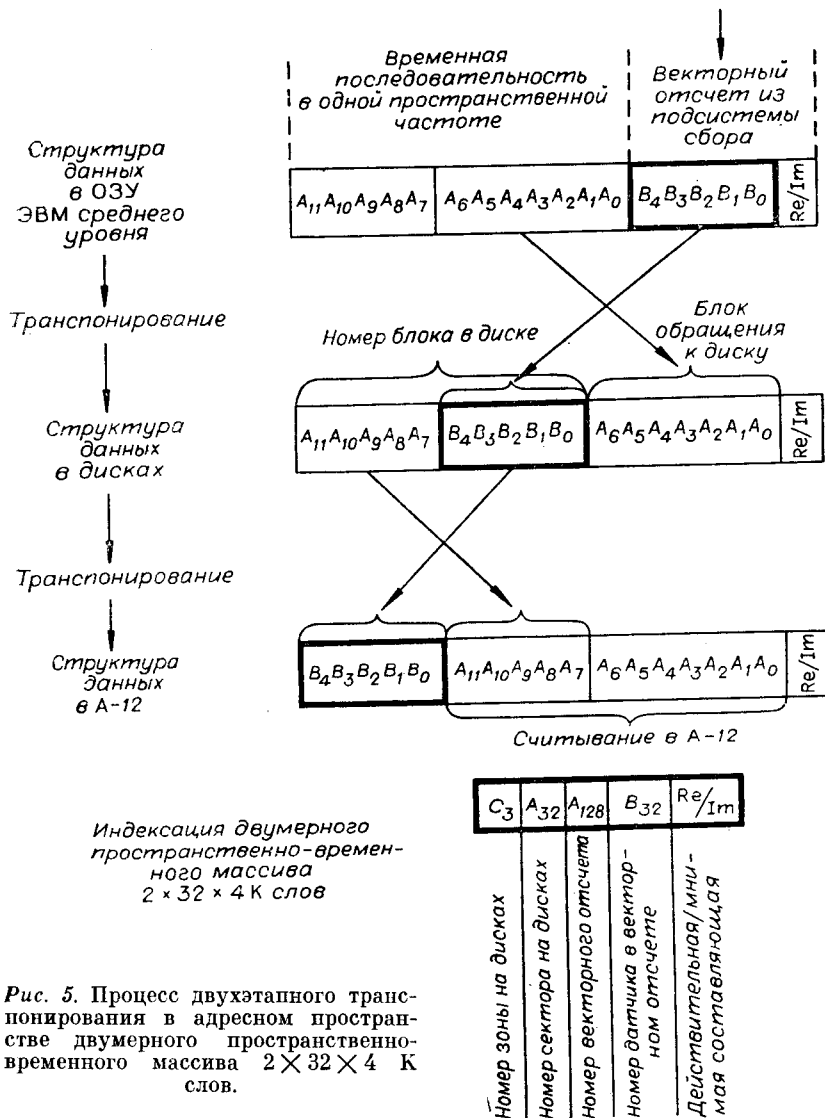


Рис. 5. Процесс двухэтапного транспонирования в адресном пространстве двумерного пространственно-временного массива $2 \times 32 \times 4$ К слов.

записываются массивы с перекрытием наполовину относительно друг друга. Каждый буфер, таким образом, содержит 8 перекрывающихся через 512 слов массивов по 4 К отсчетов.

Процесс глобального управления системой заключается в начальной инициализации всех процессов, контроле над ними в целом, обработке и выдаче в реальном времени сообщений об ошибках и особых ситуациях, происходящих в системе. Здесь полностью реализуются преимущества, предоставляемые стандартной операционной системой ОС РВ: управление файлами, работа с архивами данных, управление многими задачами и т. д.

Подсистема отображения, регистрации и документирования работает под управлением микро-ЭВМ «Электроника-60» и связана с верхним уровнем каналом последовательного обмена. Отображение данных производится на телевизионном мониторе в виде карты уровней сигнала с использованием технического раскрашивания. Уровни сигнала, соответствующие каждому цвету, задаются оператором перед процессом отображения и хранятся в системе в виде таблицы.

На рабочем месте оператора расположены устройства регистрации и документирования, а также управляющая консоль. Взаимодействие оператора с системой протекает в режиме диалога: оператор имеет воз-

возможность вызывать для отображения интересующие его фрагменты информационных массивов. Затем, используя различные методы вторичной обработки и отображения, он принимает решение о наличии когерентных структур и производит их детальное исследование.

Программная подсистема тестирования и выявления ошибок включает локальные и глобальные тесты. Локальные тесты — это стандартные программные элементы всех подсистем ГФВК. К средствам выявления ошибок, кроме локальных программных, следует отнести и аппаратные (например, контроль по четности в главной памяти А-12), которые при ошибке вызывают прерывание управляющей ЭВМ верхнего уровня и запуск стандартных программ обработки сбойных ситуаций.

Глобальная тестирующая система реализована программно-аппаратными средствами и включает имитатор пространственно-временных последовательностей на входе подсистемы сбора. Для известной входной последовательности на каждом этапе обработки хранятся «слепки» ее модификаций. Тестирующий процесс заключается в генерировании эталонной последовательности и сравнении на каждом этапе обработки реально полученных промежуточных массивов с хранящимися на этом уровне «слепками».

Программный имитатор сигналов служит для глобальной проверки трактов и операционных средств среднего и верхнего уровней. Это комплекс программ, реализуемый штатными средствами системы (включая А-12), имитирующий прием и демодуляцию квазимонохроматического пакета волн с наложенным на него шумовым фоном с гауссовой статистикой. Программы этого комплекса осуществляют математическое моделирование (вне реального времени) сигналов; генерирование имитационного сигнала с магнитофона подсистемы среднего уровня и реализацию процессов обработки этого сигнала; диалог с оператором, задающим с консоли параметры модели и осуществляющим общее управление процессами.

Программная подсистема имитации позволяет не только проводить тестирование системы, но и отлаживать прикладное программное обеспечение без натуральных экспериментов.

Заключение. Развитие системы целесообразно осуществлять в следующих направлениях:

увеличение вычислительной мощности системы, главным образом за счет интеллектуализации нижнего и среднего уровней;

расширение внешней памяти для создания архивов натуральных данных и имитационных сигналов;

замена малых и микро-ЭВМ на более мощные современные модели;

расширение прикладного программного обеспечения, создание прикладных пакетов программ, усложнение моделирующих функций;

совершенствование системы отображения и устройств ввода-вывода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение цифровой обработки сигналов/Под ред. Э. Опенгейма.— М.: Мир, 1981, гл. 6.
2. Монин А. С., Яглом А. С. Статистическая гидромеханика. Ч. 2. Механика турбулентности.— М.: Наука, 1967.
3. Brandstater A. et al. Low-dimensional chaos in a hydrodynamic system.— Phys. Rev. Lett., 1983, vol. 51, N 6.
4. Львов В. С., Предтеченский А. А., Черных А. И. Бифуркация и хаос в системе вихрей Тейлора: натуральный и численный эксперимент.— ЖТФ, 1981, т. 80, № 3.
5. Eklundh O. A fast computer method for matrix transposing.— IEEE Trans., 1972, vol. c-72, N 80, p. 801—803.
6. Бендат Б., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа.— М.: Мир, 1983.
7. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсморазведка.— М.: Недра, 1980.
8. Океанология. Физика океана. Т. 2. Гидродинамика океана/Под ред. А. С. Моница, В. М. Каменковича.— М.: Наука, 1978.
9. Нестерихин Ю. Е., Золотухин Ю. Н., Лившиц З. А. Автоматизация: итоги десятилетия.— Автометрия, 1984, № 4.

10. Гусев О. З., Золотухин Ю. Н., Прохожев О. В., Ян А. П. Базовые конфигурации систем «Микро-КАМАК-лаб». — Там же.
11. Талов И. П. и др. Быстродействующий периферийный процессор «Электроника-МТ/70». — УСиМ, 1983, № 4.
12. Бродский И. И. и др. Высокопроизводительный периферийный векторный процессор А-12. — Автометрия, 1984, № 4.
13. Байцер Б. Архитектура вычислительных комплексов. — М.: Мир, 1974, т. 2.

Поступила в редакцию 13 апреля 1984 г.

УДК 681.329

К. И. БУДНИКОВ, А. Я. ИВАНЧЕНКО, П. М. ПЕСЛЯК
(Новосибирск)

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

Введение. Система цифрового частотного анализа «Енисей» [1] построена на базе локальной конфигурации «Микро-КАМАК-лаб» [2], включающей микро-ЭВМ «Электроника-60», накопитель на гибких магнитных дисках, алфавитно-цифровой дисплей (АЦД), плоттер, печатающее устройство с использованием прецизионной аналоговой аппаратуры в стандарте КАМАК и оборудования для цифровой обработки сигналов.

Комплекс математического обеспечения подразделяется на две части: программы сопровождения системы и программы автоматизации определенных процедур измерений. В первый раздел входят пакет тестов, предназначенный для проверки и настройки аппаратуры системы, а также программа «Исследовательский режим» (ИР), позволяющая в диалоговом режиме использовать все технические возможности системы «Енисей». Ко второму разделу относится программа «Режим контрольных измерений» (РКИ), обеспечивающая автоматизацию конкретной методики производственного контроля качества готовой продукции.

Языковые средства программирования. Программы, входящие в пакет тестов, написаны на языке SATY-M [3]. Этот язык имеет бейсикоподобный синтаксис, предназначен для программирования КАМАК-оборудования и особенно удобен при написании «инженерных» программ для тестирования и настройки аппаратуры.

Крупные программы (ИР, РКИ) были написаны на языке Паскаль операционной системы РАФОС. Эта версия языка Паскаль предоставляет дополнительные возможности для программирования работы внешних устройств.

Поскольку основные технические средства системы «Енисей» выполнены в стандарте КАМАК, то обеспечению эффективности программной работы с КАМАК-аппаратурой было уделено существенное внимание. При построении программного интерфейса использовался следующий метод: на основе примитивных операций (типа «КАМАК-операция записи в определенный регистр крейта», «Проверка сигнала Q на магистрали крейта» и т. п.) был реализован набор процедур для управления специализированным оборудованием системы.

Хорошие временные характеристики программного интерфейса с КАМАК-аппаратурой, выполненного на языке Паскаль, позволили отказаться от применения Макроассемблера, что существенно сократило сроки разработки программного комплекса.