

Авторы выражают глубокую признательность д-ру физ.-мат. наук А. П. Пискаркасу и сотрудникам руководимой им кафедры квантовой радиофизики и астрономии Вильнюсского государственного университета за консультацию на этапе проектирования автоматизированного лазерного абсорбционного спектрометра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dutton P. L., Prince R. C., Tiede D. M. e. a. Electron transfer in the photosynthetic reaction center // Brookhaven Symposia in Biology.— 1976.— V. 28.— P. 213.
2. Netzel T. L. Electron transfer reactions in reaction centers of photosynthetic bacteria and in reaction center models // II Biological Events Probed by Ultrafast Laser Spectroscopy.— N. Y.; Paris: Academic Press, 1982.
3. Кабелка В., Кутка А., Пискаркас А. и др. Параметрическая генерация наносекундных импульсов света с преобразованием энергии света 50 % // Квантовая электрон.— 1979.— Т. 6, № 8.
4. Крюков П. Г., Матвеец Ю. А., Никогосян Д. И., Шарков А. В. Перестраиваемый по частоте двухканальный генератор ультракоротких импульсов света // Там же.— 1987.— Т. 5, № 11.
5. Верхотуров В. П. Многомашинная локальная система автоматизации биофизических исследований в СКП ЭВМ. Структура, технические средства и организация систем автоматизации биофизических исследований.— Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1982.
6. Худсон Д. Статистика для физиков.— М.: Мир, 1967.
7. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными.— М.: Мир, 1975.

Поступила в редакцию 31 мая 1984 г.

УДК 681.3 : 519.246.8

Д. Н. ЗАБИЯКА, А. А. ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ, А. И. ЧЕРНЫХ

(Новосибирск)

#### АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА НА МИКРОЭВМ «ЭЛЕКТРОНИКА 60»

**Введение.** Преобразование временных сигналов в частотную область — спектральный анализ — является мощным средством исследования самых разнообразных физических объектов: радиотехнических устройств, каналов связи, акустических и сейсмических волн, волн на воде, гидродинамической турбулентности, вибраций аппаратов и т. д.

В настоящее время в звуковом диапазоне частот (до 20—40 кГц) традиционные аналоговые методы спектрального анализа полностью уступили место цифровым методам, таким как рекурсивная цифровая фильтрация, и методам с использованием различных вариантов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Эти методы совершенно незаменимы при спектральном анализе инфранизких частот и по точности анализа превосходят цифроаналоговый метод временной компрессии сигнала.

Регистрация спектра мощности не всегда является самоцелью: часто требуются дальнейшая, порой весьма сложная обработка и анализ полученных спектрограмм. Рекурсивная цифровая фильтрация эффективно реализуется только для логарифмической шкалы частот, что сильно затрудняет последующую обработку, особенно в случае многоканального анализа. Поэтому ниже ограничимся рассмотрением устройств, работающих на основе алгоритма БПФ. Можно выделить четыре подхода в реализации БПФ-анализа.

1. *Традиционный приборный подход.* В связи с многочисленностью параметров анализа соответствующие приборы — спектроанализаторы — становятся все более сложными в управлении и должны иметь большие специализированные панели с десятками разнообразных кнопок и ручек, часто функционирующих под управлением отдельного микропроцессора. Изделия рассматриваемого типа выпускаются многими изготовителями:

«Bruel & Kjaer» (Дания), «Hewlett — Packard» (США), «Ono Sokki» (Япония). Для повышения быстродействия в них встраивается специализированный БПФ-процессор, обеспечивающий полосу обрабатываемого в реальном времени сигнала до 2—5 кГц. Все процессоры таких приборов обычно узкоспециализированы и не допускают расширения функций силами пользователя, поэтому применение их в научных исследованиях малоэффективно.

2. *Автономные системы сбора данных.* При этом подходе сигнал предварительно регистрируется с помощью системы сбора данных (ССД), выполненной в виде отдельного блока, содержащего обычно многоканальный высококачественный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровую память в 40—100 Кслов, снабженные интерфейсом типа МЭК-625. В такой системе обработка данных, включая спектральный анализ, производится на дополнительно подключаемом персональном компьютере с использованием его вычислительных возможностей и средств отображения. Типичными являются приборы DL-1200 и DL-1208 («Data Laboratories», Англия), система 1250 («Solartron», Англия), система 3852 S («Hewlett — Packard», США). Положительное качество этих систем — их открытость для пользователя.

3. *Приборы на базе универсального микропроцессора.* При этом подходе непосредственно в прибор, содержащий ССД и дисплей, встраивается микроЭВМ на базе быстродействующего универсального микропроцессора (обычно типа MC68000 или 8086). Управление таким прибором производится с помощью небольшой клавиатуры, функциональное назначение клавиш которой обычно синтезируется на экране дисплея и может изменяться в процессе настройки прибора на желаемый режим работы. В качестве примера можно назвать анализатор сигналов DATA-6000 фирмы «Analogic» («Data Precision», США), где базовые операции выполняются программным путем на микропроцессоре MC68000. Более сложная обработка может быть запрограммирована пользователем на языке типа Бейсик с помощью клавиатуры калькуляторного типа. Как видно, системы рассматриваемого типа открыты для пользователя, хотя верхняя частота обрабатываемых в реальном времени данных получается довольно низкой: 200—400 Гц.

4. *Измерительно-вычислительные комплексы.* Задачи спектрального анализа сигналов могут также решаться с помощью открытых комплексов на основе магистрально-модульных систем типа КАМАК под управлением мини-ЭВМ при соответствующем программном обеспечении и средствах отображения. Возможности анализа в таких системах весьма велики, однако их габариты могут оказаться неприемлемыми. В качестве примера можно назвать анализаторы СК4-71 (СССР) и IN-110 («Inter-technique», Франция).

В этой связи представляет практический интерес реализация анализатора сигналов на базе широко распространенной микроЭВМ открытой архитектуры (с магистрально-модульной организацией), например из семейства «Электроника 60», желательно целиком в пределах конструктива и с минимальным количеством внешних устройств. Цель настоящей работы — разработка недостающих аппаратных компонентов (блока ввода и дисплейного контроллера), соответствующих программ для обработки и управления и изучение возможностей одноканального варианта прибора.

1. *Аппаратная часть.* Архитектура анализатора имеет классическую магистрально-модульную структуру и представлена на рисунке. Базовый комплект микроЭВМ (центральный процессор (ЦП), память, интерфейс терминала и принтера) дополнен системой ввода аналоговой информации и графическим контроллером. Следует отметить, что память ЭВМ должна иметь характер статической, чтобы регенерация от ЦП не нарушала непрерывности потока данных. Анализатор компоновался с расчетом на автономное применение без каких-либо внешних накопителей, поэтому содержится в своем составе модуль ППЗУ типа MC3404.04, хранящий всю

программу и некоторые тесты. Если даже в анализаторе применяется процессор М2, то в корзине ЭВМ еще остается место для полуформатной платы интерфейса последовательной связи или контроллера НГМД. Тогда возможности анализатора качественно расширятся.

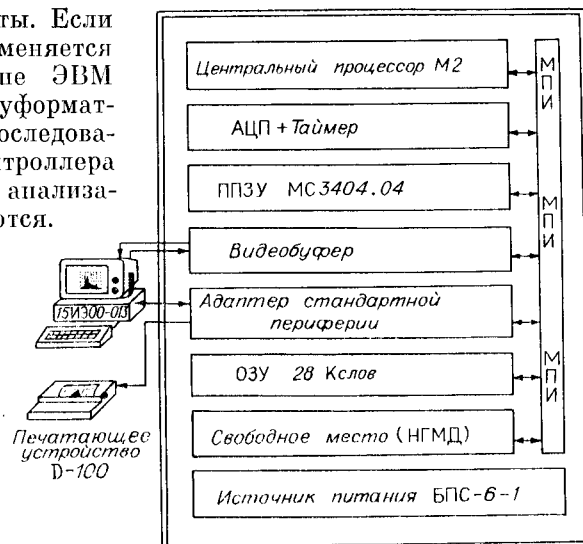
1.1. Подсистема ввода данных реализована на 10-разрядных интегральных АЦП типа 1113ПВ1, имеет два канала и интерфейс прямого доступа к памяти на базе БИС КР580ВТ57. Вход каждого из двух каналов выполнен по симметричной дифференциальной схеме на трех операционных усилителях типа КР544УД1А, после которых включена схема выборки-хранения типа КР1100СК2. Полуформатная плата также содержит кварцевые программируемые часы на БИС КР580ВИ53, задающие период выборки данных. Питается аналоговая часть от источника питания ЭВМ  $\pm 12$  В через развязывающие LC-фильтры и гальванической развязки не имеет. Испытания показали, что при входном диапазоне  $\pm 2,5$  В наводки от цифровых устройств не превышают 1/2 разряда АЦП. Темп сбора данных может достигать 32—33 кГц по двум каналам одновременно, обеспечивая полосу частотного анализа до 16 кГц.

В настоящем варианте система ввода данных не имеет управляемого антиалиазингового фильтра: предполагается, что пользователь сам должен ограничивать полосу входного сигнала.

1.2. Важной функцией анализатора, обеспечивающей комфортность работы, является качественное представление оператору результатов измерений в графической форме. К сожалению, графические терминалы пока еще мало распространены, и мы попытались совместить стандартное буквенно-цифровое изображение дисплея 15ИЭ-00-013 с графическим изображением, генерируемым специально разработанным видеобуфером. Сам дисплей доработке не подвергается. Схемы развертки модуля графического видеобуфера синхронизируются строчными и кадровыми импульсами, поступающими от кабеля, соединяющего блок логики дисплея с его монитором. Выдаваемые видеобуфером данные суммируются с буквенно-цифровым видеосигналом и поступают на вход монитора, формируя сумму изображений. Микропрограммный автомат доступен к видеопамяти обеспечивает немерцающее изображение при любых программных обращениях к видеобуферу в любое время цикла развертки раstra. Базовый модуль (собирает на полуформатной плате) формирует поле изображения  $512 \times 256$  точек и имеет аппаратную возможность сдвига всего изображения с шагом в 1 точку по вертикали и 8 точек по горизонтали. Предусмотрено расширение числа слоев памяти путем подключения дополнительной платы.

2. **Управляющая программа.** Как видно из рисунка, у анализатора нет специализированных модулей для вычисления БПФ и вся обработка данных ведется чисто программными средствами. Программа инициализирует три специальным образом синхронизированных псевдопроцессора.

Первый процессор имеет высший приоритет и контролирует ввод данных и передачу их процессору обработки. Процессор ввода управляет блоком прямого доступа, своевременно формируя адреса для двойной буферизации данных, и обеспечивает запуск процесса обработки данных, контролируя при этом реальность времени обработки. Кроме того, этот



Т а б л и ц а 1

Модель ЭВМ (процессор)	Время выполнения, с	Модель ЭВМ (процессор)	Время выполнения, с
«Электроника 60М» (М2)	1,9	LSI-11/23	0,80
«Электроника 81Б»	0,85	ДВК-2М (МС1201.02)	0,66
«Электроника 60.1» (М6)	0,82	«Электроника 100/25»	0,61

процессор обеспечивает синхронизацию запуска сбора данных входным сигналом: есть свободный или ждущий режим запуска по положительному или отрицательному фронту.

Процессор обработки данных реализован в виде псевдомашины, содержащей память макроинструкций специального формата, которые в некотором смысле составляют проблемный язык анализатора. Последовательная интерпретация макроинструкций подпрограммой-исполнителем обеспечивает необходимый порядок обработки данных. Процессор имеет режим редактирования макроинструкций, что обеспечивает определенную гибкость обработки. При этом автоматически перераспределяется память под буферные массивы с соответствующим контролем. В одноканальном варианте реализован следующий набор макроинструкций: умножение вектора входных данных на ряд стандартных окон, прямое и обратное преобразование Фурье, формирование спектральных амплитуд, линейное и экспоненциальное усреднение, логарифмирование и масштабирование спектра, графическое отображение.

Процессор управления синтезирует на свободном от графики поле экрана многоуровневое меню и обрабатывает команды оператора. Выбор строки меню производится одним нажатием клавиши с соответствующим номером, что обеспечивает максимально быстрое управление прибором. При задании числовых значений широко используется циклический перебор ряда стандартных значений с помощью управляющих клавиш («стрелок» и др.), причем в допустимых случаях сохранено непосредственное задание констант с обязательной защитой от некорректных значений. Все управление вводом — выводом реализовано через ЕМТ-процессор, а диагностика аппаратуры и сообщения об ошибках — через TRAP-процессор.

В процессе обработки данных основное время занимает БПФ. Нами реализован стандартный с использованием целочисленной арифметики алгоритм Кули — Тьюки, быстродействие которого равно быстродействию программы БПФ из [1]. Отличие состоит в том, что с целью экономии памяти таблица синусов пересчитывается для каждого нового значения длины обрабатываемого массива данных, а для ускоренного вычисления БПФ вещественного вектора применен алгоритм комплексной перенаковки. Время работы алгоритма (преобразование 1024 вещественные точки) на разных программно-совместимых моделях ЭВМ приведено в табл. 1. Интересно отметить, что быстродействие одноплатной микроЭВМ типа МС1201.02 лишь на 10 % ниже быстродействия мини-ЭВМ «Электроника 100/25» и на 20 % превышает быстродействие микроЭВМ «Электроника 81» и «Электроника 60.1».

Описанная выше программа позволила реализовать анализатор сигналов, который управляется как обыкновенный прибор. После включения питания автоматически загружается программа и высвечивается основное меню из 10 команд:

0. Установка параметров (сбора данных)
1. Программа 1 (отображение входных данных)
2. Программа 2 (спектр мощности)
3. Программа 3 (входные данные и спектр)
4. Управление обработкой
5. Управление маркером
6. Создание твердой копии (на устройстве D-100)

Сравнительные характеристики некоторых распространенных анализаторов сигналов и спектра

Модель	Изготовитель	Полоса частот, кГц	Вход: разряды, (дБ)	Число каналов	Число окон	Реальное время, кГц	Число полос	Объем, дм <sup>3</sup>	Вес, кг
SN4-71	СССР	0—50	10р	2	?	16	2048	2347	550
2515	«Bruel & Kjaer»	0—20	(60)	1	2	?	1275	24	16
2031	То же	0—20	12р	1	2	2	400	66	22
2033	»	0—20	12р	1	2	2	4000	66	22
2034	»	0—25,6	12р	2	4	1,6	804	66	35
3582A	«Hewlett — Packard»	0—25,5	(70)	1	3	?	256	44	24
3561A	То же	0—100	(80)	1	4	7,5	400	39	22
3562A	»	0—100	(70)	1	6+	10	800	54	26
CF-200	«Ono Sokki»	0—20	12р	1	2	0,2	400	18	8
CF-920	То же	0—100	12р	2	6	2	800	54	28
Дашный анализатор		0—16	10р	1	3+	0,3	4096	116	51

7. Управление отображением
8. Планирование памяти
9. Редактирование программы

Каждая команда предлагает свое подменю или синтезирует информацию о текущем назначении управляющих клавиш.

Типичная для спектрального анализа программа 2 включает сбор массива данных (обычно 512 отсчетов), умножение его на окно Хэмминга, БИФ полученного массива, формирование спектральных амплитуд, преобразование их в логарифмический масштаб, нормирование на заданный базовый уровень и вывод на графическое поле экрана с заданным динамическим диапазоном и разметкой до 10 дБ. Имеется возможность включить линейный или логарифмический режим усреднения получаемых периодограмм, изменить тип окна (прямоугольное, треугольное, Хеннинга, Хэмминга или определенное пользователем). После достаточного накопления спектра можно воспользоваться маркером, перемещаемым по графическому окну и указывающим в цифровой форме относительную амплитуду спектра на выбранной маркером частоте. После выбора команды 6 печатающее устройство создаст копию изображения вместе с зафиксированной маркером информацией и полным набором значений параметров проведенного измерения. Программа занимает около 10 Келов памяти и планирует оставшиеся 18 Келов под данные пользователя. Это дает возможность получать до 4096 линий в спектре мощности (без режима усреднения и с прямоугольным или Хеннинга окном).

В заключение в табл. 2 приведены основные параметры некоторых распространенных типов анализаторов сигналов, а в нижнем ряду — характеристики разработанного прибора. Нам представляется, что хотя входные параметры и скорость обработки здесь несколько ниже, чем у зарубежных образцов, открытость системы и возможность парализации сложности последующей обработки вполне компенсируют этот недостаток, особенно если учесть существование большого количества задач в низкочастотной и инфранизкочастотной областях. Кроме того, входные параметры прибора можно заметно улучшить, применив другие модули ввода сигнала, а полоса обрабатываемого в реальном времени сигнала может быть доведена до 25—30 кГц за счет использования быстродействующих периферийных процессоров типа [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Laboratory Subroutines Manual. Order N AA-C984-TC, DEC, Maynard, Massachusetts, 1978.
2. Толстых Б. Л., Талов И. Л., Плотников В. В., Бондарович Г. Г. Быстродействующий периферийный процессор «Электроника МТ-70» // Упр. сист. и маш.—1983.— № 4.

Поступила в редакцию 16 октября 1987 г.