

УДК 520.36

Система обработки информации и управления бортового фурье-спектрометра. Принципы построения

А. А. Велесь, И. Г. Кесельман, М. Г. Сосонкин

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,
03680 ГСП, Киев-127, Голосиив

На базе лабораторного макета отработаны принципы аппаратно-программного комплекса управления, сбора и обработки данных фурье-спектрометра, предназначенного для бортовых экспериментов с учетом требований надежности, быстродействия, энергопотребления. Обосновываются преимущества IBM-совместимого специализированного ПК перед цифровым сигнальным процессором в качестве ядра системы. Описан реализованный интерфейс системы обработки данных и управления прибором, с помощью которого конкретизированы требования к программному обеспечению и ресурсам ПК. Приведены результаты тестовых измерений основных характеристик макета фурье-спектрометра.

СИСТЕМА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ БОРТОВИМ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРОМ. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ, Велесь О. А., Кесельман Й. Г., Сосонкін М. Г. — На базі лабораторного макета відпрацьовані принципи апаратно-програмного комплексу керування, збору і обробки даних фур'є-спектрометра, призначеного для бортових експериментів з урахуванням вимог надійності, швидкодії, енергоспоживання. Обґрунтовуються переваги IBM-сумісного спеціалізованого РС перед цифровим сигнальним процесором як ядром системи. Описується реалізований інтерфейс системи обробки даних та керування приладом, за допомогою якого конкретизовано вимоги до програмного забезпечення та ресурсів РС. Наведені результати тестових вимірів основних характеристик макета фур'є-спектрометра.

SYSTEM OF DATA PROCESSING AND OPERATION FOR AN ONBOARD FOURIER SPECTROMETER. PRINCIPLES OF CONSTRUCTION, by Veles' A. A., Keselman I. G., Sosonkin M. G. — Based on a laboratory experimental model, we developed the principles of the design for a hardware-software complex of Fourier spectrometer operation, data collection and processing. The Fourier spectrometer is used for flight experiments in view of the requirements of reliability, speed, and energy consumption. The advantages of IBM compatible special PC as a system kernel over the digital signal processor are justified. Furthermore, the paper describes the implemented interface between the data processing system and device operation which helps to elaborate the requirements to the software and PC resources. We also give the results of test measurements of basic characteristics of an experimental Fourier spectrometer model.

Научные программы ряда орбитальных миссий для анализа ИК-излучения предусматривают использование бортовых фурье-спектрометров. Условия

этих экспериментов накладывают особые ограничения к принципам построения приборов.

Цель нашей работы — определение принципов аппаратно-программного комплекса управления, сбора и обработки информации бортового фурье-спектрометра. Для этого изготовлен соответствующий макет, позволяющий проводить полный цикл измерений и определять основные метрологические характеристики прибора.

В большинстве задач диапазон исследуемого излучения допустимо ограничить участком $\lambda\lambda = 2...11$ мкм. Этот диапазон могут перекрывать либо пироэлектрические приемники, либо фоторезистивные на основе КРТ-соединения [2]. КРТ-приемникам присуща более высокая чувствительность и скорость, которые проявляются только при достаточно глубоком охлаждении (≤ 80 К). В нашем макете использован серийный пироприемник МГ32, что объясняется простотой его эксплуатации. Этим мы существенно ограничили скорость получения интерферограммы, так как пироприемники заметно инерционны. Верхняя частота пропускания тракта «приемник — предварительный усилитель» составляет 2 кГц, что для выбранной скорости светоделителя соответствует максимальному волновому числу $k = 5000$ см⁻¹. Интерферограмма в виде электрического сигнала после предварительного усиления попадает на вход программно-управляемого масштабирующего усилителя (МУ) с коэффициентом усиления 1—256. Как известно, для минимальных искажений сигнала при передаче необходимо обеспечить линейность ФЧХ (постоянство группового времени запаздывания) и постоянство АЧХ в рабочей полосе частот. Одновременное выполнение этих двух условий невозможно. Более важным представляется обеспечение линейности ФЧХ, что в конечном счете приводит к уменьшению погрешности, вызванной паразитной частотной модуляцией, появляющейся вследствие нестабильности скорости движения светоделителя. Линейность ФЧХ наилучшим образом демонстрируют фильтры, аппроксимирующие ФЧХ полиномами Бесселя — Томсона. Используемая интегральная микросхема LTC1164-5 представляет собой фильтр Бесселя восьмого порядка.

Аппаратная фильтрация низких частот не является необходимой, так как приводит к потере линейности ФЧХ в рабочем диапазоне. Для уменьшения влияния высокочастотных шумов на работу АЦП введен дополнительный фильтр низких частот с полосой до 10 кГц. В схеме использован 16-разрядный АЦП AD 677 с защитой соответствующих входов дополнительными ограничителями напряжения. Кроме исследуемого излучения, в интерферометр направляется излучение гелий-неонового лазера ($\lambda = 0.6328$ мкм). Из интерферограммы монохроматического излучения формируются метки, следующие через равные отрезки пути светоделителя и выполняющие функцию команды запуска АЦП. Частота меток — около 6 кГц. Полученная в цифровом виде интерферограмма может передаваться для дальнейшей обработки через систему сбора научной информации (ССНИ) в центр управления или в центральный бортовой процессор.

Кроме того, современные аппаратные средства позволяют организовать процесс обработки в самом приборе с минимальными энергетическими и массо-габаритными затратами, передавая в ССНИ получаемый спектр излучения, что сокращает объем передаваемой информации более чем в два раза и уменьшает влияние сбоев при передаче.

Определяющим решением есть выбор типа процессора как ядра системы вычисления и управления. Существуют два направления реализации системы. С одной стороны — широкая гамма современных сигнальных процессоров, которые наиболее эффективны с точки зрения соотношения скорости, энергопотребления, минимизации числа элементов. Они максимально приспособлены для получения информации от АЦП и последующей ее обработ-

ки. С другой стороны — предельно универсальные IBM-совместимые ПК, модификации которых в виде микроПК полностью адаптированы для бортовых условий. Использование IBM ПК для решения описанной задачи требует дополнительных аппаратных разработок. В силу универсальности IBM ПК большое количество их элементов останутся незадействованными. Поэтому с точки зрения аппаратного обеспечения сигнальные процессоры обладают очевидными преимуществами. Несколько иначе представляется проблема выбора процессора со стороны программного обеспечения. Сигнальные процессоры имеют слишком малые стандартные библиотеки программного продукта. Практически все программное обеспечение для решения конкретной задачи нужно создавать и отлаживать самостоятельно, для чего необходим узко специализированный дорогостоящий стенд. Для IBM-совместимых ПК наработан широкий спектр разнообразных программ; отладка специализированных программ не требует специального оборудования. Практика показывает, что наибольшее число сбоев, в том числе и фатальных, автономно работающей аппаратуры происходит по вине программного обеспечения. Кроме того, нет необходимости в специальных усилиях по созданию интерфейсов связи с бортовыми системами, так как микроПК имеют большой набор средств для реализации этих интерфейсов. Это и послужило основным аргументом в пользу ПК в качестве ядра системы.

Для связи интерферометра с компьютером выбран вариант использования ISA -шины, для чего была разработана и изготовлена интерфейсная карта и ее драйвер. Вариант COM порта был отвергнут вследствие низких «стандартных» скоростей обмена. LPT-порт ориентирован в основном на передачу данных от компьютера, и хотя обмен данными в обоих направлениях возможен, он требует разработки специализированных программ и постоянного манипулирования LPT-разъемами при отладке.

Последовательный поток данных от интерферометра S-DATA, сопровождаемый синхроимпульсами S-CLK по гальваноразвязанной линии принимается интерфейсной картой, где преобразуется в параллельную (байтовую) форму. Два байта данных запоминаются в регистрах младшего и старшего байтов. По окончании цикла приема выдается сигнал запроса прерывания IRQ10, следующего с частотой около 6 кГц, означающий готовность данных для чтения процессором — «Ready Data» по адресам 300H и 301H. Процессор осуществляет процедуру обслуживания прерывания и в конце ее через регистр завершения обслуживания прерывания P30 сбрасывает IRQ10. В случае, если процессор по каким-либо причинам не осуществит процедуру обслуживания, при завершении передачи следующего двухбайтного слова установится запрос прерывания IRQ11 — «Error Data», что будет обнаружено и зафиксировано процессором при очередном обслуживании. Синхронизация процесса передачи данных в компьютер с циклом работы интерферометра осуществляется посылкой сигнала «Rev» — реверсирование движения светоделителя. Периодичность этого сигнала зависит от амплитуды и скорости светоделителя; максимальный период около 3.2 с. По сигналу «REV» выставляется запрос прерывания IRQ9 — «START», обслуживаемый компьютером по обычной процедуре и является сигналом начала цикла приема информации. Программная часть обеспечивает четыре основных функции: 1) регистрация сигналов, поступающих с интерфейсной карты фурье-спектрометра; 2) математическая обработка массивов данных; 3) визуальное представление информации; 4) обработка пользовательского ввода.

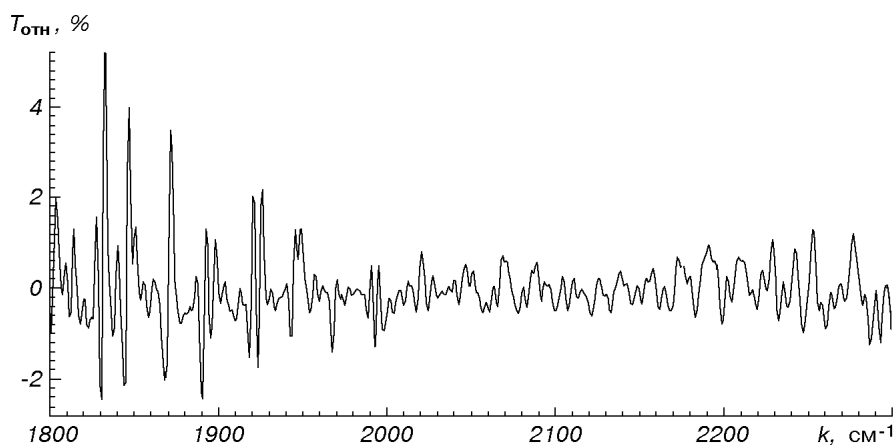
Основной трудностью реализации является необходимость непрерывной регистрации сигналов, поступающих с частотой более 6 кГц. Это вынуждает использовать операционную систему так называемого «реального времени»

с гарантированным откликом на событие менее 100 мкс (в действительности требования еще жестче, так как из-за неравномерности скорости светодели-теля временной интервал между приходами сигнала может быть меньше 100 мкс). Ни одна из современных операционных систем общего назначения (Windows9x, WindowsNT, OS/2, Linux) не может обеспечить отклик поряд-ка 10 мкс, и к тому же размер ядра делает затруднительной их установку в ограниченный модуль FLASH-памяти. Системы реального времени, пред-назначенные для таких применений, либо слишком дорогие (QNX, LynxOS), либо недостаточно разработанные. Поэтому для нашей задачи была выбрана система MS DOS. Хотя она не является чистой системой реального времени, но предоставляет программисту полный контроль над аппаратурой и ресурсами персонального компьютера. К тому же ядро DOS невелико и легко помещается в ROM. В качестве ПК использовалась система на базе процессора «Intel Pentium 150 МГц», который обеспечивает достаточную производительность. Программное обеспечение разрабаты-валось с помощью С-компилятора DJGPP* для платформы DOS32 на основе графической библиотеки GRX**. Разработка компонентов сопряжения для обычного персонального компьютера имеет ряд преимуществ. Во-первых, используется стандартное аппаратное и программное обеспечение (компи-ляторы, библиотеки). Во-вторых, увеличивается надежность системы, так как платформы при разработке, тестировании и использовании совпадают. По выполняемым функциям программную часть можно разбить на три блока. Блок обработки прерываний обеспечивает непрерывный прием запро-сов на аппаратное прерывание (IRQ), поступающих с интерфейсной карты спектрометра. Используются три линии: IRQ9, IRQ10, IRQ11. Этот блок также выполняет объединение последовательно поступающих отсчетов в массив данных отдельно по направлениям движения светодели-теля. Други-ми словами, блок является драйвером периферийного устройства — спек-трометра, который выдает программный сигнал о готовности интерферограм-мы. Схема с отдельным накоплением интерферограмм по направлению движения светодели-теля дает возможность обрабатывать один массив на протяжении времени накопления следующего. При этом на операции с интерферограммой может быть выделено до 3 с процессорного времени, что важно для возможности графического представления данных. Блок матема-тической обработки выполняет ряд математических операций с данными в зависимости от режима работы. Режим работы задается в конфигурацион-ным файле, с возможностью изменения некоторых параметров перед нача-лом сканирования или уже в процессе работы спектрометра. К матема-тическим операциям, выполняемым этим блоком, относятся: центрирование/де-центрирование интерферограммы; апподизация интерферограммы (треу-гольной функцией, гауссианой, квадратом косинуса); код быстрого преобра-зования Фурье (FFT) ***; сглаживание спектра по трем и более точкам; накопление спектра отдельно по направлению движения светодели-теля; вычисление средних значений и дисперсии на произвольном участке дан-ных; вычисление стопроцентной линии для двух накопленных спектров. Ограничение по времени требует предельно быстрого выполнения всех этих операций. Используемый процессор позволяет выполнять, например, код FFT для 16384 точек за 39 мс, что освобождает время для манипуляций с графиками. Блок визуализации предназначен для представления данных в виде двух графиков по выбору: интерферограмма + спектр; спектр + спектр; стопроцентная линия + спектр. Возможно также изменение масштаба

* <http://www.delorie.com/djgpp>** <http://www.gnu.de/software/grx>*** http://www.geocities.com/ResearchTriangle/8869/fft_summary.html

изображения по двум осям для каждого графика. Этот блок используется только на стадиях отладки и испытаний. В тоже время он требует больших затрат процессорного времени для организации дружественного интерфейса пользователя. Так как процесс вывода и прорисовки должен осуществляться за время, гарантированно меньшее времени одного скана, при выводе большого количества точек выполняется простая оптимизация выводимых данных. В задачу этого блока входит также реакция на пользовательские команды (выбор меню, обработка нажатий клавиш и т. п.) Вышеописанная схема позволяет вести регистрацию сигналов как с одновременной коррективкой со стороны пользователя, так и в режиме сохранения результатов серии с неограниченным числом сканов. При создании фурье-спектрометров особо важна проблема стабильности скорости перемещения элемента, создающего разность хода в плечах интерферометра, в нашем случае светоделиителя. В нашем макете подвижная часть перемещается на упругом подвесе с помощью магнитоэлектрического привода, на катушку которого подается трапецеидальное напряжение. Формирует это напряжение интегратор, заряжаемый постоянным током с периодически изменяемой полярностью. Компаратор и устройство управления осуществляют реверсирование тока заряда и формирование постоянного напряжения в крайних положениях подвижной части. В макете применен регулятор скорости пропорционально-интегрирующего типа. Датчиком скорости служит цифровой измеритель интервалов времени между появлениями меток референтного канала. Сигнал датчика скорости после фильтрации поступает на пропорционально-интегрирующий фильтр и устройство формирования сигнала рассогласования, где задается нужная скорость перемещения, выделяется разность между текущей и заданной скоростями, производится изменение знака коэффициента усиления усилителя рассогласования, а также предотвращается перегрузка последнего в момент изменения направления движения, что сокращает время переходного процесса после реверса. Сигнал от генератора трапецеидального напряжения (ГТН) и сигнал рассогласования поступают на вход суммирующего усилителя и после усилителя мощности подаются в катушку магнитоэлектрического привода. Описанная система обеспечивает стабильность скорости в пределах $\pm 1.5\%$.

Процесс управления интерферометром заключается, в частности, в выборе объекта измерения, задании разрешения и времени измерения и осуществляется путем выдачи двух стандартных посылок в виде двух байтов управления в линию связи. Комплексная оценка качества системы проводилась по результатам измерений тестовых оптических сигналов. Разрешающая способность (аппаратный контур) оценивалась по виду спектра гелий-неонового лазера ($\lambda = 3.39$ мкм), который аппроксимировался контуром Гаусса с последующим подбором параметров (полуширины, амплитуды, положение максимума) методом Левенберга — Маркуарда. При 2^{14} отсчетах интерферограммы полуширина гауссианы равна 2 см^{-1} . Отношение сигнал/шум в получаемых спектрах оценивалось как величина, обратная среднему квадратичному отклонению 100 %-й линии. 100 %-й линией мы называем отношение $T_{\text{отн}}$ двух полученных последовательно спектров одного и того же стабильного источника. На рисунке приведен пример 100 %-й линии и оценки СКО. Отношение сигнал/шум, равное 285, не является предельным для рассматриваемого прибора, оно увеличивается с увеличением облученности входного зрачка. Для наших экспериментов выбиралась облученность, близкая к рабочей. Следует отметить, что вид спектров и отношение сигнал/шум не изменялись даже с появлением сильных вибраций прибора от внешних источников. Паразитная частотная модуляция, возникающая в условиях сильных вибропомех, сокращает время, выделяемое процессору на процедуру обслуживания. Медленный процессор не



Пример 100 %-й линии; СКО = 0.352 % (на участке $k = 2100...2300 \text{ см}^{-1}$). Отношение сигнал/шум равно 285

успевал провести эту процедуру, и при нашем уровне вибрационного фона появлялись пропуски отсчетов интерферограммы (появление IRQ11) — несколько за один скан. После перехода на процессор 150 МГц полностью исчезли ошибки считывания в сериях до 1000 сканов.

Из результатов испытаний следует, что дальнейшие усилия должны быть направлены на повышение эффективности системы стабилизации скорости подвижного элемента путем создания многоконтурной схемы и повышения мощности исполнительного элемента. Для увеличения соотношения сигнал/шум имеет смысл изменить алгоритм работы масштабирующего усилителя так, чтобы коэффициент усиления устанавливался не перед сканом, а изменялся в ходе текущего скана (переход на режим аналого-цифрового преобразования с плавающей запятой, где в качестве величины порядка используется значение текущего коэффициента усиления МУ, а мантиссы — код собственно АЦП). Реализация данного алгоритма возможна как чисто программным путем с использованием ПК в качестве контроллера АЦП, так и аппаратно-программным путем создания специализированного контроллера. Выбор зависит от пропускной способности канала связи с ПК и программной нагрузки последнего.

Авторы благодарны Ю. С. Иванову за постоянное активное участие в работе.

Работа поддержана грантом ГФФН Министерства образования и науки 6.4/49.

1. Белл Р. Дж. Введение в фурье-спектроскопию / Пер. с англ. под ред. Г. Н. Жижина. — М.: Мир, 1975.—380 с.
2. Ежевская Т. Б., Шипилов А. Ф. Фурье-спектрометр с подвижным светоделителем // Приборы и техн. эксперимента.—1981.—№ 6.—С. 166—167.
3. Киес Р. Дж. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов / Пер. с англ. под ред. В. И. Стафеева. — М.: Радио и связь, 1985.—328 с.

Поступила в редакцию 21.02.00