

Г.Э. Куликов, В.П. Лопасов

Автоматизированная система сбора и обработки данных – ключевой блок бигармонического лазерного спектрометра

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 29.07.2002 г.

Рассматриваются принцип, состав и структура построения автоматизированной системы сбора и обработки данных (АССОД) бигармонического лазерного спектрометра. Система работает в «реальном времени» и обеспечивает сбор, накопление и предварительную обработку данных, получаемых с приборов и узлов спектрометра, а также интерактивное (по командам оператора) или автоматизированное (по командам «программы-сценария») управление отдельными узлами спектрометра. Система обеспечивает учет измерений, строго соответствующих условиям задачи, и отсеивает неудачных. Представлена функциональная схема АССОД, рассмотрены взаимосвязи составляющих систему приборов, узлов и модулей; описаны алгоритм работы и интерфейс.

1. Постановка задачи

Процесс регистрации спектра переизлучения молекулярной среды на дифракционном спектрографе с ПЗС-линейкой не встречает серьезных трудностей при традиционных схемах возмущения среды лазерным излучением [1]. Основные трудности возникают, когда возмущение молекул осуществляется бигармоническим (частоты ω_1 и ω_2) лазерным излучением, а процесс переизлучения среды зависит не только от интенсивности (I_1 и I_2), длительности ($\tau_1 \approx \tau_2 \approx \tau$) и поляризации лазерных импульсов бигармонического излучения, но также от разности ($\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$) и суммы ($2\omega_s = \omega_1 + \omega_2$) частот, от временного ($\delta\tau$) и пространственного (δL) интервала между импульсами.

Именно этот набор параметров бигармонического возмущающего излучения необходим для экспериментальной проверки гипотезы о генерации поля с большим моментом количества движения (МКД) в молекулярной среде [2, 3].

Основным элементом лазерного спектрометра, обеспечивающего проверку гипотезы, является бигармоническая лазерная система (БЛС). БЛС состоит из двух лазеров на алюмоплате иттрия, объединенных перекрестной электрооптической обратной связью [4]. Существенным недостатком БЛС такого типа является высокая требовательность (на уровне лучше 1%) к стабильности уровней накачки в обоих каналах [5]. Эта зависимость носит принципиальный характер и не может быть устранена, что приводит к значительным флуктуациям «интенсивности» импульсов обеих компонент лазерного излучения и временного разброса $\delta\tau$ между ними.

Понятно, что указанные флуктуации параметров излучения БЛС будут накладываться на процесс взаимодействия молекул с возмущающим излучением, что приведет к двум негативным последствиям. Во-первых,

изменится динамика возмущения каждой молекулы бигармоническим излучением и, соответственно, вероятности процессов перераспределения энергии взаимодействия по внутримолекулярным каналам. Как следствие, изменятся состав и свойства спектра переизлучения среды. Во-вторых, возникнет необходимость выделять полезный сигнал на фоне случайного шума, обусловленного переизлучением среды за счет указанных выше флуктуаций параметров возмущающих лазерных импульсов. Оба последствия поставят под сомнение результаты проверки гипотезы о генерации поля с большим МКД в молекулярной среде.

Таким образом, возникла объективная необходимость оборудовать бигармонический лазерный спектрометр автоматизированной системой сбора и обработки данных (АССОД), исключающей оба негативных последствия.

2. Требования к АССОД

АССОД должна удовлетворять следующим требованиям:

1) Управлять работой отдельных блоков, приборов, узлов и модулей спектрометра по команде оператора или в автоматизированном режиме.

2) Отслеживать параметры каждого лазерного импульса (включая частоту излучения, временной $\delta\tau$ и пространственный δL разброс между импульсами и соотношение интенсивностей I_1/I_2 компонент бигармоники) в процессе буферизации результатов измерения на интервале времени ΔT .

3) Сохранять полученные данные в структурированных файлах (базе данных), обеспечивающих быстрый поиск информации в массиве накопленных измерений.

4) Удалять из массива накапливаемых данных реализации, не удовлетворяющие условиям задачи.

5) Обеспечивать:

- сбор, непрерывный мониторинг и вывод данных в виде, позволяющем оператору оптимизировать условия эксперимента;
- простоту изменения конфигурации блоков, приборов, узлов и модулей спектрометра, в том числе подключение новых;
- возможность гибкой настройки на проводимые работы и модификации алгоритмов, используемых для обработки данных без перекомпиляции основных программных модулей АССОД;
- быстрый доступ к различным буферизованным и обработанным данным.

3. Состав и функции аппаратных элементов АССОД

Аппаратная часть АССОД состоит из следующих приборов, узлов и модулей (рис. 1).

1) *Узел подстройки частоты (длины волны)* излучения лазеров БЛС работает следующим образом. Привод шагового двигателя позволяет путем изменения наклона эталона Фабри-Перо, размещенного в одном из каналов БЛС, сканировать и подстраивать излучение лазеров по частоте (длине волны).

Сканирование и подстройка излучения лазеров по частоте (длине волны) обеспечиваются модулем шагового двигателя, который функционирует по команде управляющего компьютера.

2) *Импульсные измерители энергии ИЛД-2М.*

Головки двух измерителей ИЛД-2М позволяют измерять соотношение между интенсивностями (I_1/I_2) компонент (ω_1 и ω_2) лазерного излучения. Информация об энергии лазерных импульсов вводится в ЭВМ через КАМАК-модули АЦП. Дополнительные повторители напряжения, включенные между измерителями ИЛД-2М и модулями АЦП, уменьшают электрические наводки. Оба измерителя функционируют непрерывно и независимо от управляющего компьютера.

3) *Двухканальный измеритель длин волн ИДВ-3* представляет собой двоянный узел интерферометров Физо, с которых излучение попадает на фотодиодные линейки ФУК-1Л1.

Головки измерителя длин волн ИДВ-3 сопряжены с компьютером при помощи модифицированного КАМАК-модуля АЦП и специальной схемы управления, обеспечивающей функционирование фотодиодных линеек. Запуск фотодиодных линеек производится по команде управляющего компьютера непосредственно перед лазерным импульсом. Время задержки определяется модулем общей синхронизации.

4) *Дифракционный спектрограф ДФС-452* и размещенная в его кассетном отсеке фотоприемная ПЗС-линейка ИЛХ-511 обеспечивают регистрацию спектра переизлучения исследуемой среды. ПЗС-линейка подключена к компьютеру при помощи специальной схемы управления и модифицированного КАМАК-модуля АЦП.

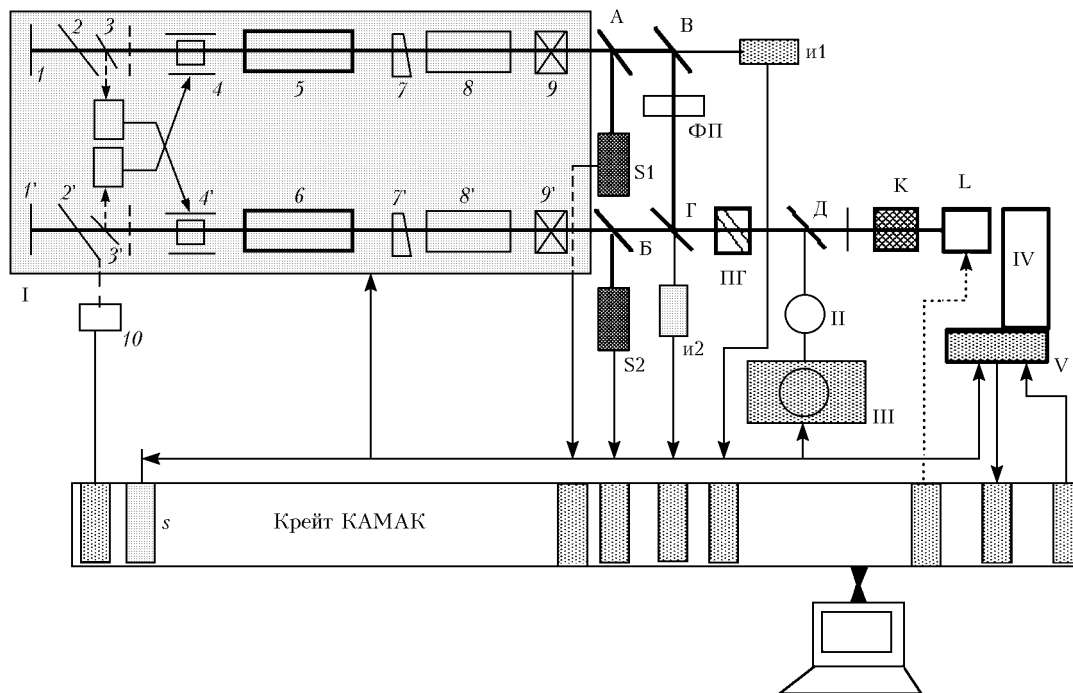


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: 1, 1' – глухие зеркала; 2, 2' – эталоны Фабри-Перо; 3, 3' – поляризационные зеркала; 4, 4' – электрооптический затвор и устройства управления; 5, 6 – активные элементы задающего генератора; 7, 7' – выходные зеркала; 8, 8' – активные элементы усилителей; 9, 9' – удвоители; 10 – шаговые двигатели и подвижные части; и1, и2 – головки измерителя длин волн; S1, S2 – головки измерителей ИЛД-2М; s – модуль общей синхронизации; А, Б – зеркала 10% (530 нм); В – зеркало 100% (530 нм); Г – зеркало 50% (530 нм); Д – зеркало 100% (1060 нм); ФП – фазовая пластинка регулируемая; ПГ – призма Глана; К – кювета; L – заграждающий перестраиваемый интерферометр; I – лазер; II – ФЭК-19; III – С7-19; IV – ДФС-452; V – ИЛХ-511

Запуск ПЗС-линейки осуществляется по команде управляющего компьютера, непосредственно перед лазерным импульсом. Время задержки определяется модулем общей синхронизации.

Если ПЗС-линейка работает в режиме «накопления», то циклы стирания отключаются, но момент запуска по-прежнему синхронизируется с лазерным излучателем.

5) *Электрически перестраиваемый интерферометр Фабри–Перо* размещен перед спектрографом ДФС-452 и работает как гребенчатый фильтр, подавляющий засветку ПЗС-линейки ИЛХ-511 излучением возмущающей бигармоники.

Интерферометр перестраивается синхронно с перестройкой частоты излучения лазера с помощью программируемого источника напряжения, управляемого цифровым кодом с аппаратуры КАМАК. Источник напряжения построен на основе пары высоковольтных nМОП транзисторов, управляемых высококачественным операционным усилителем, коэффициент усиления которого задается цифровым кодом. Источник обеспечивает подачу на пьезокерамические пластины интерферометра постоянного напряжения ($0 \div 150$ В) с шагом 30 мВ.

6) *Узел синхронизации и аппаратура КАМАК.*

Приборы, узлы и модули АССОД сопрягаются с компьютером с помощью крейтовой системы (КАМАК), которая обеспечивает наибольшую свободу действий на стадии поиска оптимальных условий эксперимента.

Узел общей синхронизации обеспечивает правильный порядок запуска и опроса приборов, узлов и модулей АССОД. Синхронизация осуществляется при помощи КАМАК-модулей таймер-счетчиков, каждый цикл работы которых начинается по инициативе управляющего компьютера. Таймер-счетчики задают временной промежуток между электрическими сигналами запуска лазера и старта модулей АЦП и фотоприемных линеек.

Варианты режимов работы фотоприемных ПЗС-линеек (ФПЗС), включая режим «накопления», задаются дополнительными сигналами управления, которые снимаются с модуля регистров и подаются на устройства управления линейками.

Определенная сложность при построении АССОД на основе КАМАК возникает из-за низкой пропускной способности канала. Эта трудность преодолевалась за счет модификации ряда КАМАК-модулей. Так, АССОД сопрягается с фотоприемными линейками посредством модулей запоминающих АЦП, объем памяти/цикл опроса которых приводился в точное соответствие объему линеек; дополнительные данные (например, температура интерферометров Физо) вносились в свободные ячейки памяти АЦП, а не направлялись на отдельные модули КАМАК. Кроме того, КАМАК-модули группировались в крейте так, чтобы максимально использовать автоматически генерируемые модулями сигналы и, по возможности, избегать лишних циклов обращения к ним для опроса состояния.

4. Программное обеспечение (ПО) АССОД

Необходимый темп обработки большого количества данных, получаемых при работе спектрометра, практически исключает использование стандартного ПО автоматизации лабораторных измерений (LabView и подобных оболочек) для реализации АССОД.

Более того, требования к АССОД и ее ПО (см. п. 2) исключают подход, обычно применяемый при разработке сбора данных и состоящий в том, что все внешние устройства «опрашиваются» последовательно в некотором измерительном цикле.

Для построения ПО используется «многоотредовая модель» программирования [6]. При этом основные измерительные циклы, характерные для каждого типа внешних устройств АССОД, оформлены в виде «параллельно» выполняющихся подзадач (тредов), приоритет выполнения которых выбран исходя из функции и специфики конкретного прибора так, чтобы за счет конкуренции между тредами автоматически устанавливалось оптимальное разделение времени процессора между тредами и процессами АССОД [6].

ПО построено на платформе операционной системы *общего назначения OS/2*, время переключения контекста в которой не превышает 50 мкс. Промежуток времени, в течение которого должен быть полностью проведен цикл сбора и предварительной обработки данных, а также очередной цикл взаимодействия с пользователем, определяется частотой следования лазерных импульсов и составляет 80 мс. При обращении к внешней аппаратуре (КАМАК) выполнение процессов и тредов, не связанных с работой КАМАК, почти полностью заблокировано на время ~ 40 мс. Остающихся примерно 40 мс измерительного цикла достаточно для выполнения сотен тысяч машинных команд на сравнительно современном персональном компьютере (ПЭВМ на базе процессора AMD Diron 600 МГц). Это обстоятельство и выбор операционной системы с минимальным временем переключения контекста позволяют «разбить» ПО на функциональные модули, выполняющиеся в различном масштабе времени.

Рассмотрим блок-схему модулей (рис. 2) и их взаимодействие.

Задачи работы с аппаратурой, диалога с пользователем и обработки данных решаются *независимыми* программными компонентами. Работа ПО с КАМАК и с узлами спектрометра осуществляется программой CamCtl. Программа IDVserver работает с головками измерителя длин волн, программа Archivarius осуществляет предварительное сохранение данных во временных файлах на жестком диске и последующее размещение их в файлах базы данных, интерфейсная оболочка предоставляет возможность пользователю управлять работой системы и наблюдать за собираемыми и обрабатываемыми данными. Благодаря разделению функций между программными компонентами ПО, в режиме реального времени (с критическим

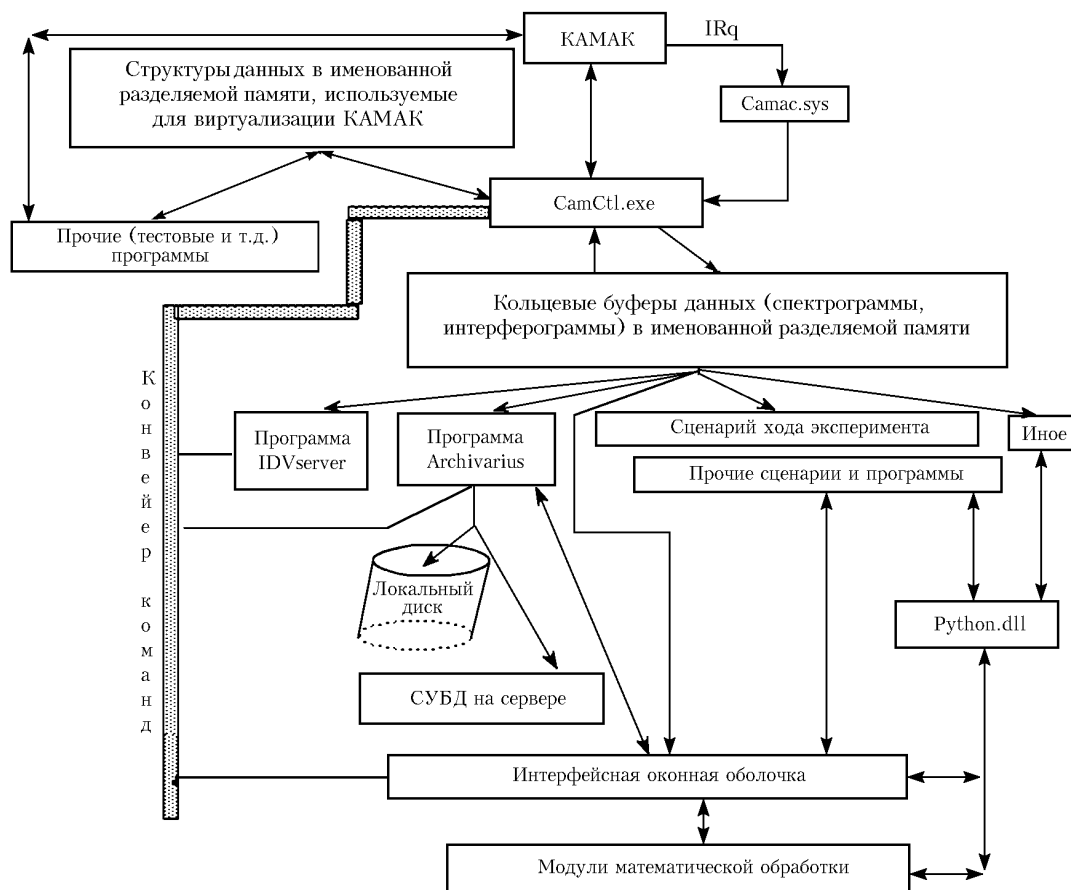


Рис. 2. Структура программного обеспечения

временем около 1 мс) работает только модуль сбора данных и управления спектрометром (CamCtl). Остальные программы ПО, за исключением нескольких тредов, ответственных за сохранение данных, выполняются на стандартном приоритете и не создают помех высокоприоритетным процессам сбора данных и управления спектрометром.

Для передачи больших массивов данных между процессами ПО использован механизм разделяемой памяти, вносящий минимальные накладные расходы. Размещение массивов данных в поименованной разделяемой памяти дает возможность легко комбинировать программы и модули ПО.

Полное использование возможностей приборов, узлов и модулей АССОД требует значительной вычислительной работы. Так, ПЗС-линейка, регистрирующая спектрограммы переизлучения, требует учета темнового фототока и неравномерности чувствительности по отдельным ячейкам. Для регистрации слабых сигналов нужно использовать методы сглаживания сигнала и подавления шума, причем для различных измерений необходимо применять разные алгоритмы редукции данных, некоторые из которых выполняют такие ресурсоемкие процедуры, как дискретное преобразование Фурье. Требования (см. п. 2) к АССОД и к ее ПО предусматривают непрерывный мониторинг спектрометрических данных, необходимый для оптимизации условий эксперимента, поэтому часть ресурсоемкой

вычислительной работы производится параллельно со сбором данных и управлением приборами, узлами и модулями.

Для того чтобы вычислительные операции не привели к сбоям процессов сбора данных и управления спектрометром, данные, принимаемые с приборов, разделены на два «потока» — предварительно обработанные и «сырые» данные, и оба «потока» буферизируются в «кольцевых буферах», также размещенных в резидентной разделяемой памяти. Процессы обработки информации работают только с буферизированными данными и не влияют на время-зависимые части ПО.

Объем кольцевого буфера выбран так, чтобы, с одной стороны, не происходило потерь данных, а с другой стороны, не вносились дополнительные накладные расходы на подкачку памяти. Конкретный объем памяти, выделяемой под кольцевые буферы, зависит от имеющегося объема оперативной памяти, а также от числа и типа одновременно выполняющихся процессов и определяется эмпирически. На компьютере спектрометра, имеющем 128 Мбайт оперативной памяти, в большинстве случаев было достаточно выделить под буферизацию данных 8 Мбайт разделяемой памяти.

Описанное разделение ПО АССОД на время-зависимые части, непосредственно работающие с аппаратурой, и на пользовательский код (возможно, медленный),

обрабатывающий данные, обеспечило гибкость работы с приборами спектрометра — при добавлении нового прибора или изменении алгоритма работы с ним не требуется перерабатывать весь код ПО. Простота модификации время-зависимых частей ПО, работающих с аппаратурой, достигается за счет применения объектного подхода. В этом случае подпрограммы, непосредственно работающие с модулями КАМАК, реализованы на языке программирования «С++» так, что каждому классу модулей соответствует своя иерархия наследования, восходящая к единому предку — абстракции КАМАК-модуля. Базовый предек содержит код, облегчающий комбинирование модулей и обработку ошибок. Такой подход позволил легко добавлять в спектрометр новые приборы, узлы и модули и соответственно новый код в действующее ПО.

Благодаря интерпретатору языка программирования сверхвысокого уровня «Python», встроенному в ПО, возможна легкая настройка АССОД на различные виды и режимы работы. (Была использована версия интерпретатора СPython 2.2.1c2, скомпилированная компилятором VAC 3.6.5. Для более плавной работы интерпретатора совместно с прочими модулями АССОД, его главный цикл модифицирован так, чтобы исключить излишне агрессивный захват квантов времени, выделяемых интерпретатору.)

Применение встроенного интерпретатора резко упростило программирование и позволило использовать для управления спектрометром простые «сценарии», избавиться от неизбежных при традиционном подходе к написанию ПО сбора данных многочисленных переделок ПО при изменении конфигурации приборов спектрометра или выполнения на нем нестандартных операций. Из сценария можно как контролировать работу приборов спектрометра, так и производить математическую обработку данных.

Работа спектрометра контролируется из графической интерфейсной программы (рис. 3). При старте программы управления выполняется стандартный

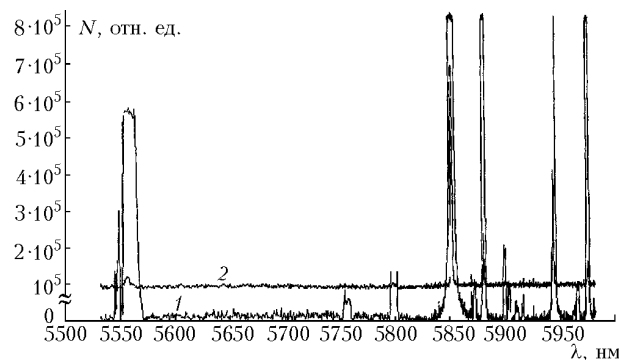


Рис. 3. Область спектра (5850 нм) Ne лампы ТН-0,2. Графики смещены относительно друг друга; 1 — экспозиция 80 мс, 2 — 1,6 мс

«сценарий» *profile.py*, содержащий специальный код, связывающий приборы и ПО спектрометра с объектами Python. В результате всем пользовательским программам и сценариям становятся доступны приборы спектрометра и буферизированные данные. Данные приборов

спектрометра представлены в виде матричных объектов модуля *Numeric Python*, с которыми можно производить любые операции, включая дискретное преобразование Фурье. Если возникает необходимость изменить алгоритм обработки данных или ход работы со спектрометром, то в каждом конкретном случае достаточно подправить сценарий «*profile.py*» или написать соответствующие строчки в окне редактирования «сценария».

5. Результаты апробации работы АССОД

Описанная АССОД и ее ПО обеспечивают продолжительный сбор данных (время накопления информации ограничено только объемом дисковой памяти, причем данные могут передаваться по сети и сохраняться на файловом сервере), получаемых со спектрометра. Параллельно со сбором данных и управлением спектрометром производится предварительная обработка считанных с приборов данных. Параметры АССОД и ее ПО приведены ниже.

Тип интерфейса	КАМАК
Период измерительного цикла, мс	≥ 80
Регистрация спектрограммы	ФПЗС ИЛХ-511, 2048 элементов
Режим регистрации спектрограммы	непрерывный, импульсный
Экспозиция при регистрации спектрограммы, мс	1,6÷800
Режим накопления	электрический + арифметический
Разрешение, Å	≤ 0,1
Регистрация интерферограмм	2×ФПЛ ФУК-1Л1, 1024 элемента
Режим регистрации интерферграммы	непрерывный, импульсный
Экспозиция при регистрации интерферограммы, мс	1,6÷3200
Управление работой спектрометра	ручное или по сценарию
Время наблюдения	ограничено дисковой памятью
Расход дисковой памяти без сжатия, кбайт/с	100,5
Коэффициент сжатия	1÷16 раз (используется библиотека ZLIB)

Побочным следствием примененного подхода к конструированию ПО АССОД стала возможность его легкой модификации для интеграции с сетью Интернет и работы в «удаленном режиме», в том числе для проведения «дистанционных экспериментов» в обучении.

На рис. 4 приведен пример использования АССОД для регистрации участка спектра неоновой лампы ТН-0,2, используемого для калибровки частотной шкалы спектрометра. ПО в реальном времени вычитало темновой ток ПЗС-линейки и корректировало неравномерность ее амплитудно-частотной

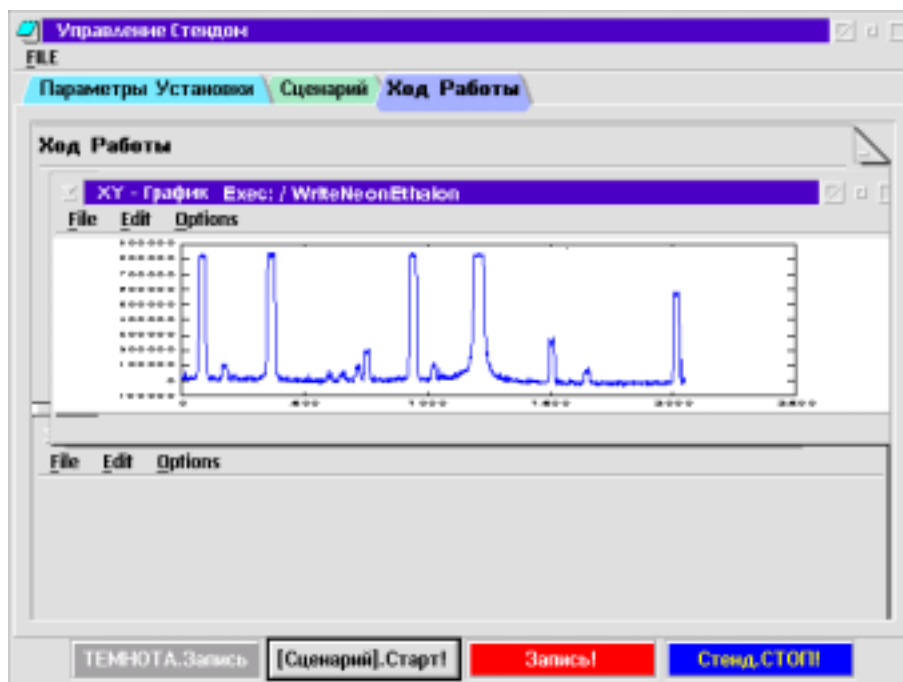


Рис. 4

характеристики (АЧХ), сглаживало шумы методом «скользящей средней» по 7 точкам. Возможно также применение более совершенных алгоритмов редукции данных и сглаживания шумов, например [7].

Для учета неравномерности АЧХ ПЗС-линейки в области 530 нм, в ПО задействована таблица поправочных коэффициентов, полученных измерением освещенности на выбранных длинах волн при внесении в канал регистрации известного затухания. Требуемое ослабление светового потока получалось при повороте в пучке поляризованного света (вблизи угла Брюстера) тонкой стеклянной пластинки с известным коэффициентом преломления. В таблицу заносилась разница между вычисленным и измеренным ослаблениями.

Поиск особенностей в спектрах переизлучения производится применением дискретного преобразования Фурье к файлам, содержащим предварительно обработанные спектрограммы, и анализа получаемого набора коэффициентов. Данные, содержащие особенности, переписываются из временных файлов хранения в структурированные файлы базы данных. Локальная база данных построена на основе библиотеки *Berkeley DB*.

Авторы благодарны М.М. Макогону за ценные обсуждения и А.Н. Куряку за помощь в изготовлении

устройств управления фотоприемными линейками и модификации модулей КАМАК.

1. *Виноградов В.П., Крашениников В.П., Пандык А.М., Улицкий Н.И., Платов Ю.В.* Портативный многоканальный спектрометр // Приборы и техн. эксперим. 1996. № 5. С. 163–164.
2. *Творогов С.Д.* Некоторые особенности электромагнитного поля с большим моментом количества движения // Изв. вузов. Физ. 1996. № 10. С. 93–103.
3. *Лопасов В.П.* О возможности приготовления молекулярного состояния для генерации поля с большим моментом количества движения // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 5. С. 471–481.
4. *Гурков К.В., Куликов Г.Э., Лопасов В.П.* Простой бигармонический лазерный излучатель // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 6. С. 914–916.
5. *Измайлов И.В., Макогон М.М., Пойзнер Б.Н., Равдин В.О.* Моделирование согласованного излучения лазеров в бихроматическом излучателе // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 4. С. 415–419.
6. *Куликов Г.Э.* Применение мультитредовой модели в программном обеспечении импульсного лазерного спектрометра // Приборы и техн. эксперим. 1998. № 5. С. 71–78.
7. *Домнич М.Б., Сахарук Т.А.* Традиционный и альтернативный методы цифрового сглаживания и дифференцирования спектроскопической информации // Ж. прикл. спектроскопии. 1990. Т. 53. № 4. С. 645–651.

G.E. Kulikov, V.P. Lopasov. Automated system for data acquisition and processing as a key unit of a biharmonic laser spectrometer.

In the present paper, the design, composition of elements and functional structure of one of biharmonic laser spectrometer units – an automated system for data collection and processing (ADCS) is described. The described system operates in the real time mode, providing collection, accumulation and preprocessing of data received from devices and units of the spectrometer. The described system controls the spectrometer in interactive (by operator's instructions) or automated (by the given script program) modes, providing appreciation of data corresponding to the conditions of the experiment and elimination of poor data. The functional diagram of ADCS with interconnections of devices, units and modules of the system is presented; the algorithm of ADCS operation and its interface are described.