

Г.Э. Куликов

## О ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ДЛИН ВОЛН В БИХРОМАТИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ СПЕКТРОМЕТРЕ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 8.07.99 г.

Предложен простой алгоритм выделения пиков интерферограммы. Описана структура программного обеспечения (ПО) импульсного измерителя длин волн ИДВ-3 в бихроматическом лазерном спектрометре, ориентированная на работу в многозадачной операционной системе.

Для экспериментальной проверки метода высокоточной диагностики молекулярного состава среды [1] в ИОА СО РАН разработан спектрометр с бихроматическим лазерным излучателем на алюмонате иттрия [2]. Условия эксперимента накладывают жесткие требования на длины волн, соотношение интенсивностей обеих компонент лазерного излучения-накачки. Небольшая величина ожидаемого сигнала вынуждает использовать режим накопления, поэтому лазерный излучатель работает в периодическом режиме с частотой повторения 12,5 Гц. Требуется обрабатывать каждый лазерный импульс, постоянно контролируя спектральный состав и соотношение интенсивностей компонент лазерного излучения, отбрасывая «неподходящие» по условию задачи реализации. Кроме того, в ходе эксперимента требуется отображать на экране дисплея основную информацию, включая спектрограмму переизлучения.

Соотношение длин волн и предварительный контроль спектрального состава лазерного излучения осуществляются в спектрометре при помощи ИДВ-3, изготовленного новосибирским ТОО «Ангстрем». Измеритель ИДВ-3 имеет два идентичных оптических канала, каждый из которых состоит из формирователя параллельного пучка (с волоконно-оптического входа) и трех интерферометров Физо с различными параметрами  $L_{1,2,3}$ ,  $\alpha_{1,2,3}$ ,  $x_{1,2,3}$  ( $L$  – эффективная толщина,  $\alpha$  – угол клина,  $x$  – расстояние до плоскости фотоприемника). Интерферограмма в каждом из каналов регистрируется линейным фотодиодным приемником на 1024 ячейки. Вычисление длин волн выполняется персональным компьютером, не входящим в комплект прибора. Поскольку ИДВ-3 рассчитан на работу в монопольном режиме, то возникли трудности при его стыковке с другими приборами спектрометра. Оказалось невозможным одновременно вычислять длины волн компонент лазерного бихроматического излучения и регистрировать остальные его параметры. Главный недостаток ИДВ-3 состоял в том, что при вычислении длин волн периодически возникали ошибки.

Анализ источников ошибок показал, что их причиной является примененный в программном обеспечении ИДВ-3 алгоритм выделения центра интерференционных полос Физо, не учитывающий наличия субструктуры. Как известно [3], для интерференционной картины Физо характерно наличие субструктуры и размытия интерференционных полос. Отклонение угла падения света от оптимального значения  $\Theta$  всего на доли миллирадиана приводит к резкому усилению размытия и увеличению

субструктуры [3]. Оптимальное значение  $\Theta$  оказывается разным для каждого из трех интерферометров Физо.

Размытие полосы зависит также от угла расходимости светового пучка  $\Theta'$ . Поскольку порядок интерференции  $m$  для пучка с расходимостью  $\Theta'$  равен  $2L \cos \Theta'/\lambda$ , а его изменение

$$\Delta m = 2L(1 - \cos \Theta')/\lambda, \quad (1)$$

то для  $\lambda \approx 530$  нм размытие полосы, малое по сравнению с ее полушириной, достигается при  $\Theta' \leq 4 \cdot 10^{-4} \sqrt{L}$  рад. Из-за механических и физических причин неизбежны малые колебания углов  $\Theta'$  и  $\Theta$ , в результате которых изменяется вид интерференционных полос от импульса к импульсу излучения бихроматического лазера. Соответственно изменяются ширина и субструктура полос интерферограммы. Конструкция ИДВ-3 не позволяет осуществлять юстировку по углам  $\Theta$ ,  $\Theta'$  с требуемой для получения оптимальной интерференционной картины точностью. Чтобы избежать ошибок в измерении длины волны, необходимо использовать алгоритм поиска центра интерференционных полос, нечувствительный к влиянию субструктуры и изменению вида полос (т. е. устойчивый к мешающим колебаниям  $\Theta$ ,  $\Theta'$ ). В ИДВ-3 применяется эмпирический алгоритм. Записанная интерферограмма сканируется скользящим окном шириной 30 пикселей. На каждом рабочем интервале, попавшем в окно, определяется величина локальных минимумов и максимумов интерферограммы. Рассчитываются числа  $n_1 \approx [(max + 6 \times min)/7] + 0,5$ ,  $n_2 \approx [(max + min)/2] + 0,5$ , где  $max$  и  $min$  – значения локальных экстремумов. Ищется локальный максимум, за который принимается точка интерферограммы с интенсивностью  $> n_1$ . Если интенсивность точки больше  $n_2$ , то за ее интенсивность принимается  $n_2$ . Определяется номер точки, в которой интенсивность становится  $< n_1$ . Переход через точку считается центром полосы. Проверяется, что расстояние между очередными найденными центрами больше 15 точек, в противном случае, найденный «центр» бракуется. Окно сканирования сдвигается на 20 точек вправо, и цикл поиска повторяется. Такой алгоритм слабо чувствителен к изменениям интенсивности точек интерферограммы, но жестко привязан к виду интерференционной полосы. Поэтому появление выраженной субструктуры полосы приводит к заметному отклонению вычисленных положений центров от действительных.

Еще хуже ведет себя стандартный алгоритм [7], основанный на дифференцировании интерферограммы: он реагирует как на «субструктуру», так и на все неоднородности фотоприемника. Хорошие результаты показывает алгоритм Блока [8], но время его работы слишком велико и при его использовании на доступном компьютере не удается измерять  $\lambda$  каждого импульса излучения.

Для получения приемлемой точности вычисления  $\lambda$  излучения лазера с частотой повторения 12,5 Гц нами предлагается следующий алгоритм.

Преобразовав формулы [3], найдем, что контур интерференционных полос Физо описывается формулой Эйри

$$I = K_{\text{пр}}^2 \left[ \left( \sum_{i=0}^N K_{\text{отр}}^i \cos \delta_i \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^N K_{\text{отр}}^i \sin \delta_i \right)^2 \right] \quad (2)$$

с добавкой  $\delta_i$  на разность хода между лучами, претерпевшими  $i$  и  $i + 2$  отражения:

$$\delta_i = \frac{4\pi L}{\lambda} [i - i(i + 1) (2i_1)\Theta^2/3].$$

Здесь  $K_{\text{пр}}$  и  $K_{\text{отр}}$  – коэффициенты пропускания и отражения зеркал интерферометра;  $i = 0, 1, 2, \dots; N$  – номер луча. Соотношения (2) используются нами как модельная функция. Константы интерферометров ( $L_{1,2,3}, \alpha_{1,2,3}, x_{1,2,3}$ ) уточняются по интерферограмме, записанной от стабилизированного по частоте He-Ne-лазера ЛГН-302, подставляются в модельную функцию (2), которая табулируется для среднего значения рабочего диапазона длин волн. Из полученной модельной интерферограммы методом градиентного спуска [6] выделяется один из пиков. Методом прогонки и по формулам из [5] строим для него коэффициенты сплайна

$$\phi(j) = a_i + b_i(j - j_{i-1}) + c_i(j - j_{i-1})^2 + d_i(j - j_{i-1})^3, \quad (3)$$

где  $a_i, b_i, c_i, d_i$  – коэффициенты сплайна на каждом интервале;  $j$  – номер точки. Полученные коэффициенты описывают сглаженный контур интерференционной полосы, включая влияние субструктуры, и используются для поиска центров интерференционных полос рабочей интерферограммы. Процесс поиска включает следующие шаги:

1) по модельным данным определяется «полуширина на полувысоте» интерференционной полосы. Размер окна сканирования устанавливается равным этой величине;

2) интерферограмма сканируется точка за точкой, определяются локальные максимумы, попадающие в окно сканирования;

3) для каждого перехода через локальный максимум, при помощи экстраполяции по заданным коэффициентам сплайна, находится значение координаты  $x_{\text{max}}$ , принимаемое за действительный центр полосы.

Свойства сплайн-функций, описанные в [5], обеспечивают исключение мешающего действия субструктуры. Время обработки интерферограммы (2048 точек  $\times$  7 бит) на компьютере с процессором «AMD-5x86-133» не превышает 12 мс, и быстродействие ИДВ-3 оказывается достаточным для обработки каждого лазерного импульса.

Проблема стыковки измерителя с другими приборами спектрометра решается путем использования многозадачной, многотредовой среды для программ и процессов, обслуживающих различные приборы спектро-

метра. В этом случае в ПО [4] спектрометра вычленяются «критические», «нормальные» и «необязательные» процессы и каждому из них назначается соответствующий приоритет. При этом задача оптимального распределения времени процессора между программами ложится на планировщик операционной системы. Для обеспечения взаимодействия ПО разных приборов спектрометра выбрана модель «клиент–сервер».

Основой ПО измерителя длин волн является сервер – вычислительный модуль «idvserv.exe», в состав которого входят только подпрограммы определения положения центров интерференционных полос интерферограмм и вычисления длин волн. «Idvserv.exe» запущен постоянно, с регулярным приоритетом. Для обмена данными между программами спектрометра используется механизм именованных каналов ввода (вывода) данных (pipe) и (или) механизм блоков «разделяемой памяти» [4]. Программа «idvserv.exe» занимается только вычислениями, а считывание интерферограмм с фотодиодных линеек ИДВ-3 возлагается на отдельную программу, работающую с приоритетом реального времени.

Вычислительный модуль «idvserv.exe» работает следующим образом. Она создает именованный двунаправленный буферизированный канал «PIPE\IDVINPUT» и «засыпает» на функции ожидания соединения с данным каналом. Любая другая программа, пожелавшая поработать с измерителем длин волн, должна открыть этот канал (как обычный файл) и поместить в него команду и (возможно) входные данные. Получив из канала данные, программа «idvserv.exe» обрабатывает их, вычисляет длины волн и помещает результат в тот же именованный канал. Таким образом, собственно программа ИДВ-3 оказывается отделена от всех деталей, не имеющих отношения к процессу вычисления длин волн, в том числе и от интерфейса с оператором. При необходимости сменить источник поступления данных (например, вычислить  $\lambda$  по ранее записанной интерферограмме) не требуется никаких изменений в ПО ИДВ-3, достаточно воспользоваться стандартной командой операционной системы для перенаправления потоков. Такой подход позволяет легко изменять конфигурацию измерительных приборов спектрометра. Дополнительным преимуществом является то, что теперь программа ИДВ-3 может без переделок ПО спектрометра выполняться на любом компьютере, подключенном к вычислительной сети.

Для обработки данных, поступающих с фотодиодных линеек ИДВ-3, вместо канала ввода (вывода) используется механизм разделяемой памяти. В этом случае программа, ответственная за работу с приборами спектрометра, передает в «PIPE\IDVINPUT» специальную команду и имя открытого ею блока разделяемой памяти. С этого момента стартует дополнительный тред программы «idvserv.exe», функционирование которого определяется семафорами, размещенными в блоке разделяемой памяти. Это позволяет минимизировать потери времени на передачу данных, поскольку механизм блоков разделяемой памяти – самый быстрый способ передачи данных между параллельными процессами.

Все остальные подпрограммы, связанные с вычислителем длин волн (запись эталонной интерферограммы и корректировка констант интерферометра, графический интерфейс), выполнены в виде отдельных программ и запускаются оператором по мере необходимости.

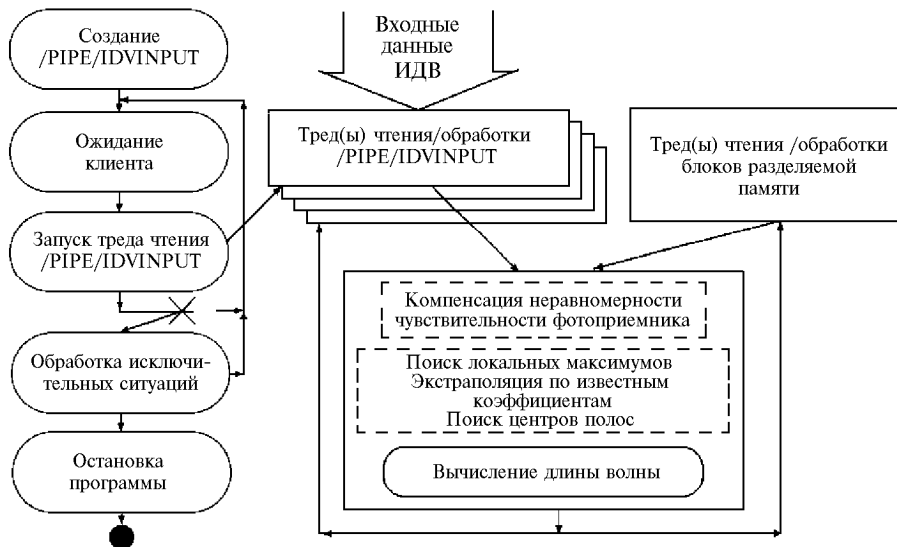


Рис. 1. Структура ПО измерителя длин волн

На рис. 1 приведена структура программного обеспечения ИДВ-3, построенного по принципу «клиент–сервис» и работающего во многозадачной, многотредовой среде. Рис. 2–4 иллюстрируют пример того, как предложенный алгоритм поиска центров интерференционных полос, основанный на сплайн интерполяции, способствует устранению сбоев в вычислении длин волн. На рис. 2, 3 показаны интерферограммы излучения стабилизированного He–Ne-лазера и результаты поиска центров интерференционных полос алгоритмом, основанным на дифференцировании, и первоначальным алгоритмом ИДВ-3 соответственно. Интерферограмма записана с пересветкой и моделирует типичную «сбойную» ситуацию, возникающую при работе с импульсным твердотельным лазером: интенсивность излучения в одном из импульсов может значительно превысить среднюю, и интерферограмма попадет в область насыщения. На рис. 2 видно, что алгоритм, основанный на дифференцировании, нашел 76% ложных центров. На рис. 3 показан результат обработки интерферограммы оригинальным алгоритмом ИДВ-3.

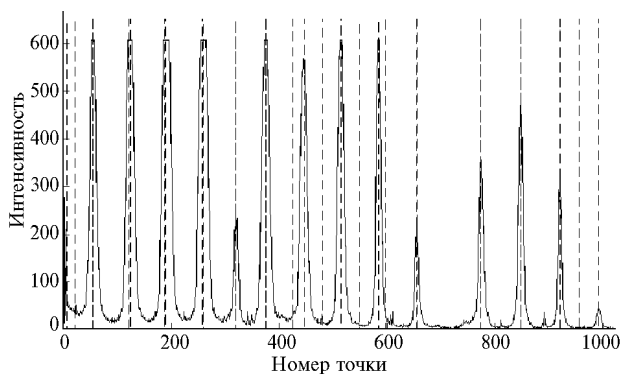


Рис. 2. Результат поиска центров интерференционных полос алгоритмом, основанным на дифференцировании (штриховая линия), и интерферограмма излучения (сплошная)

Рис. 4 иллюстрирует результат обработки той же интерферограммы предлагаемым алгоритмом. Правильно определены все центры интерференционных полос, включая ушедшие в насыщение. Единственная полоса (вблизи точ-

ки № 1000) не была обработана этим алгоритмом, поскольку ее интенсивность меньше порога срабатывания, установленного оператором.

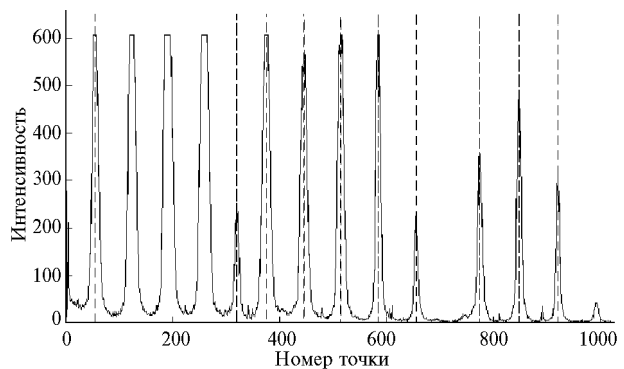


Рис. 3. Результат поиска центров интерференционных полос оригинальным алгоритмом ИДВ-3 (штриховая линия) и интерферограмма излучения (сплошная)

Алгоритм не смог найти центры полос, попадающих в насыщение (не найдено 23% центров). Ни в одном из этих случаев процедура расчета длины волны не смогла правильно определить  $\lambda$ .

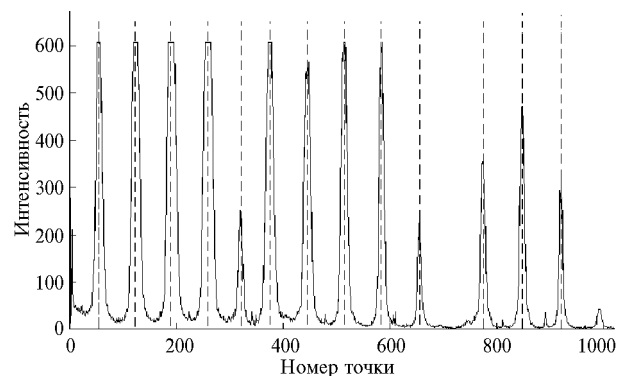


Рис. 4. Результат поиска центров интерференционных полос предлагаемым алгоритмом (штриховая линия) и интерферограмма излучения (сплошная)

Результат расчета длины волны дает значение 632,9914 нм, что соответствует значению, указанному в паспорте стабилизированного He-Ne-лазера.

В заключение автор выражает признательность В.П. Лопасову за ценные замечания и помощь в подготовке настоящей статьи.

1. Лопасов В.П. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 8. С. 1151–1154.
2. Гурков К.В., Куликов Г.Э., Лопасов В.П. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 6. С. 914–916.

3. Kajava T.T., Lauranto H.M., Salomaa R.R.E. // J. Opt. Soc. Am. B/V. 10. N 11. November 1993. P. 1980–1989.
4. Куликов Г.Э. // Приборы и техника эксперимента. № 5. 1998. С. 71.
5. Лившиц К.И. Сглаживание экспериментальных данных сплайнами. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1991.
6. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1972.
7. Дубровкин П.М. Спектроскопия по методу регистрации производных // ЖПС. 1983. Т. 39. № 6. С. 885.
8. Block H.P., Delange J.C. and Schotmann J.W. // Nukl. Instruments methods. 1975. V. 128. P. 545.

*G.E. Kulikov. Software for Wavelength Meter as a Part of Bichromatic Laser Spectrometer.*

Simple algorithm of searching of interferogram fringers centers is presented. The structure of software of pulse wavemeter IDV-3 for bichromatic laser spectrometer, oriented to multitask operation enviroment is described.