

УДК 681.327

И. Н. БУРДОНСКИЙ, М. П. ГРИШИН, Ш. М. КУРБАНОВ,
В. П. МАРКЕЛОВ, В. В. СЕРГЕЕВ, В. Р. СИДОРЕНКО,
С. С. ЦЕРЕВИТИНОВ, Л. М. ШАБУРОВА
(МОСКВА)

ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ НА ЭВМ

Фотографические методы регистрации в настоящее время применяются практически во всех областях науки и техники. Объем информации, получаемый такими методами, огромен. При ее ручной обработке непроизводительно затрачивается много труда. Зачастую это приводит к вынужденному снижению точности обработки, к большим потерям информации, а в ряде случаев к отказу от применения фотографических методов.

Для считывания информации, записанной на фотоматериале в виде штриховых (двухградационных) изображений, и ввода этой информации

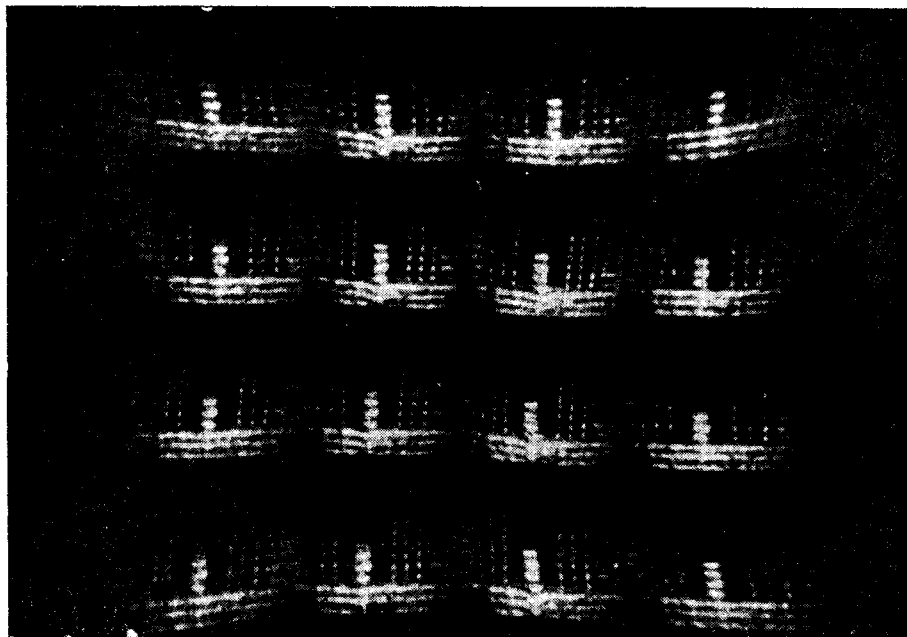


Рис. 1.

в ЭВМ уже достаточно широко применяются различные автоматические устройства. Очень большой опыт их использования накоплен в ядерной физике.

В настоящей работе рассказывается о первых опытах использования фотометрирующей системы, связанной с универсальной ЭВМ [1, 2], для обработки оптических интерферограмм. В таком виде информация получается при многих физических и технических измерениях и, в частности, в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу, где метод оптической интерферометрии находит все более широкое применение при диагностике высокотемпературной плазмы. Задача анализа полутонной информации встречается и в методах голографии, будущее которой трудно переоценить. Нами обрабатывались интерферограммы, полученные с помощью «клинового» интерферометра Фабри—Перо с лазерным осветителем и интерферометра Маха—Цендера [3]. На рис. 1 представлены интерферограммы процесса, снятые электронно-оптической лупой времени. Кадры следуют через 0,3 мкс слева направо, сверху вниз. Время экспонирования каждого кадра 0,2 мкс. Первые четыре кадра представляют собой невозмущенные плазмой интерференционные картины. На фоне интерференционных полос видны тени электродов. Каждая картина представляет собой совокупность чередующихся линий интерференции. На невозмущенных кадрах интерференционные полосы — прямые линии либо дуги со стрелой не более 0,5 полосы. Последующие кадры демонстрируют сдвиги интерференционных полос, вносимые плазмой.

Целью оптической интерферометрии плазмы является построение пространственного распределения плотности во времени $n=f(x, r, t)$ (кадровый режим съемки) различных компонентов плазмы или же их пространственно-временного распределения $n=f(r, t)$ (режим фоторазвертки). В обоих случаях измеряемыми величинами являются сдвиги интерференционных полос. Эти сдвиги вызываются изменением фаз φ световых волн, распространяющихся через исследуемый объект по хордам поперечного сечения. Знание фазовых сдвигов $\Delta\varphi$ и предположение аксиальной симметрии объекта исследования дают возможность рассчитать распределение плотности плазмы, решая известное интегральное уравнение Абеля [4]:

$$Q(x) = 2 \int_x^R \frac{n(r) r dr}{(r^2 - x^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где $Q(x)$ — функция распределения плотности частиц по хорде поперечного сечения; $n(r)$ — функция распределения плотности частиц по радиусу. Примененный алгоритм обработки интерферограмм как ручным, так и автоматическим методами одинаков.

При вводе интерферограмм в ЭВМ производилось строчное фотометрирование кадра. Строчные аналоговые сигналы, преобразованные аналого-цифровым преобразователем в шестизрядный код (64 уровня квантования яркости), вводились в ЭВМ «Минск-22» по специальному каналу. Из-за сравнительно малой оперативной памяти машины (8192 ячейки) и большого объема вводимой информации (до 1000 элементов разложения на каждой строке) использовалась система внешних накопителей на магнитных лентах.

В целях оперативного контроля при вводе и обработке информации была предусмотрена возможность как вывода исходной, так и промежуточной информации с помощью стандартного телеграфного аппарата с записью на электрохимическую бумагу или с помощью дигропечата-

ющего устройства в виде цифрового поля. Синхронизация ввода — вывода с ЭВМ осуществлялась специальным блоком управления.

Программа обработки составлена отдельными самостоятельными блоками, связь между которыми осуществляется в управляющей программе. Это позволяет быстро компоновать новые программы при изменении алгоритма решения или при изменении режима работы устройства ввода. Блок-схема программы представлена на рис. 2.

Для количественной обработки интерферограмм необходимо определить величины смещения интерференционных полос на «возмущенном» кадре относительно их положения на «невозмущенном». При этом требуется единообразный для двух обрабатываемых кадров выбор метода фиксации положения полос.

В идеальном случае для одноходового интерферометра почернение пленки B при ее сканировании поперек интерференционных полос («филь строки») изменяется по закону

$$B \sim B_0 \ln \cos^2 \alpha.$$

У многоходовых интерферометров максимумы почернения полос обостряются [5].

В таких случаях положение полосы удобно определять в пространстве координатами экстремальных значений плотности почернения (блок программы 2а). Это эквивалентно построению двухградационного изображения полос из многоградационного.

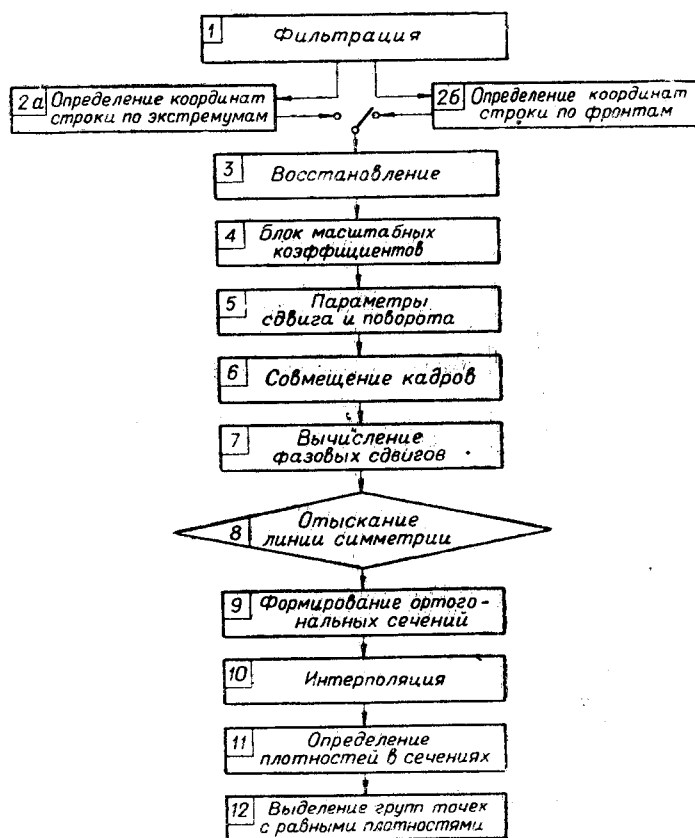


Рис. 2.

После определения координат полос информация о всем профиле считанной строки становится избыточной и может больше не храниться в памяти машины. Такое сокращение объема информации позволяет хранить в ОЗУ необходимые данные сразу о двух кадрах. Это является весьма удобным при дальнейшей обработке и, кроме того, значительно снижает затраты машинного времени за счет сокращения числа обращений к накопителям на магнитной ленте.

Однако обычно профиль строки довольно сильно отличается от идеального: аналоговый сигнал (рис. 3) может быть изрезан шумовыми импульсами (от отдельных зерен и неоднородностей пленки, от ее загрязнений, царапин и т. д.), при переэкспонировании фотоматериала вершины линий могут становиться плоскими; возможно наложение на интерферограмму собственного светового излучения из плазмы, может меняться постоянная составляющая засветки кадра по строке и т. д. В таких случаях приходится применять более сложные методы определения координат полос. Так, при «пересвеченном» фотоматериале за середину полосы принимается координата точки, равноудаленной от фронтов (переднего и заднего) полосы (блок 2б). При наличии шумовых импульсов проводится их сглаживание. Для этой цели программно моделируется фильтр с линейной фазовой характеристикой и осуществляется фильтрация исходного изображения в направлении строки (блок 1). Только после такого сглаживания проводилось определение координат середины полосы по одному из описанных выше алгоритмов — по экстремумам или фронтам (блок 2а или 2б).

При очень сложных профилях линий, при их резких изломах, при некоторых типах разрывов, а также при сильной подсветке интерферограмм собственным излучением плазмы применялся метод ручной ретуши интерферограмм перед их вводом в ЭВМ. Следует отметить, что и в случае ретуши всего кадра скорость и точность обработки интерферограмм с помощью ЭВМ намного выше, чем при ручной обработке.

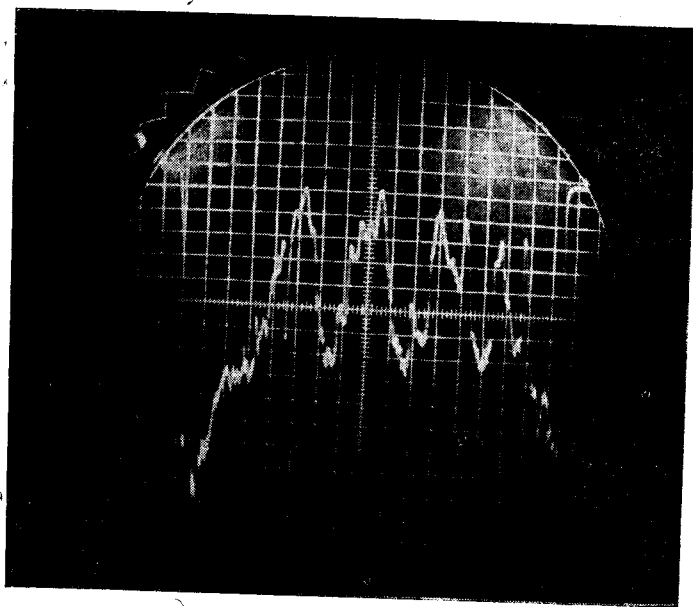


Рис. 3.

В блоке 3 полученные двухградационные изображения («1» соответствует наличию интерференционной полосы, а «0» — отсутствию) в местах разрывов полос интерполируются прямыми линиями. Разрывы обязаны своим происхождением непрозрачным предметам, имеющимся в поле интерференции (электроды, зонды и т. д.), а также строчной структуре вводимого изображения (см. рис. 1).

Поскольку кадры, соответствующие возмущенному и невозмущенному состоянию, вводятся раздельно, то может иметь место их взаимное смещение или поворот относительно друг друга или и то и другое вместе. Кроме того, в ряде снимков может быть искажение масштабов по осям. В соответствии с этим задачей блоков 4 и 5 является определение масштабных коэффициентов, величин сдвига и поворота и осуществление необходимых операций по коррекции изображения. После этих операций производится совмещение двух кадров: возмущенного и невозмущенного (блок 6). Далее в блоке 7 определяется сдвиг фаз для каждой точки возмущенной интерферограммы по отношению к невозмущенной.

В общем случае рассматривалась задача, в которой ось симметрии плазменного образования является кривой линией, и решения отыскивались в плоскостях, ортогональных к истинной линии симметрии. Этим целям служат блоки нахождения линий симметрии и формирования ортогональных сечений (блоки 8 и 9). Для решения интегрального уравнения необходимо знать фазовые сдвиги в точках нормальных сечений, которые получаются интерполяцией ранее вычисленных фазовых сдвигов в точках возмущенных полос (блок 10). Вычисления плотностей плазмы в полученных сечениях производятся по формулам численного решения интегрального уравнения Абеля [1] (блок 11):

$$n_k(r) = -\frac{2}{\pi a} \sum_{n=k}^N B_{kn} Q_n, \quad (2)$$

где $n_k(r)$ — значение функции $n(r)$ в точке k ($k=0, 1, 2, \dots$); a — интервал разбиения $Q(x)$; B_{kn} — значения табулированных коэффициентов; Q_n — значение функции $Q'(x)$ в точке n ($n=1, 2, 3, \dots$); N — номер зоны разбиения $Q(x)$.

Последним этапом является отыскание точек с равными плотностями и вывод из ЭВМ результатов в виде цифрового массива (блок 12).

Результаты обработки на ЭВМ «Минск-22» сравнивались с результатами ручной обработки. Сравнение показало весьма хорошее совпадение. Затраты времени на обработку одной интерферограммы (при одинаковой заданной точности) сократились более чем на два порядка.

Такие блоки программы, как выделение полезной информации на фоне помех (блоки 1, 2а, 2б), коррекция (блоки 4, 5) и совмещение изображений (блок 6), имеют самостоятельное значение. Эти программы могут быть использованы при решении задач по устранению с помощью ЭВМ различных дефектов фотографических изображений (зернистость, царапины, точки, различные аберрационные искажения и т. д.).

Описанные в данной работе первые опыты использования ЭВМ для обработки оптической информации, а именно интерферограмм показали высокую эффективность этого метода и возможность разработки универсального комплекса программ, наличие которых может позволить решать широкий круг задач по автоматической обработке многоградационных фотографических изображений.

Авторы считают приятной обязанностью поблагодарить В. С. Вайнштейна и М. И. Пергамента за активное участие в данной работе на ее начальном этапе.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Вайнштейн, М. П. Гришин, Ш. М. Курбанов, В. В. Сергеев, В. Р. Сидоренко. Автоматическая обработка оптической информации с применением ЭЦВМ.— Измерительная техника, 1970, № 10.
2. И. Н. Бурдонский, В. С. Вайнштейн, М. П. Гришин, Ш. М. Курбанов, М. И. Пергамент, В. В. Сергеев, Л. А. Ферстер, Л. М. Шабурова. Тезисы III Всесоюзного совещания по диагностике высокотемпературной плазмы. Сухуми, 1970.
3. Ф. А. Королев. Спектроскопия высокой разрешающей силы. М., Госиздат, 1953.
4. O. H. Nestor and H. N. Olsen. Numerical Methods for Reducing Line and Surface Probe Data.— SIAM Review, 1960, v. 2, № 3.
5. Г. Г. Долгов-Савельев, М. И. Пергамент, М. М. Степаненко, А. И. Ярославский. Диагностика плазмы, вып. II. М., Атомиздат, 1968.

*Поступила в редакцию
10 сентября 1970 г.*
