

В. Я. ГЛУХОВ

(Москва)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ

ной задачей. Для процессов, протекающих в газовой среде, эта задача практически решена [1]. Измерение плотности, температуры, давления в металлах и металлических порошках чрезвычайно затруднено. Одним из методов регистрации физических процессов в таких средах является рентгеноимпульсная съемка.

В данной работе рассматривается метод определения плотности вещества в быстропотекающем процессе, обладающем осевой симметрией, например, при обжати ампулы с металлическим порошком цилиндрическим зарядом взрывчатого вещества. Измерение физической плотности исследуемого вещества проводится косвенным путем по измеренной плотности почернения снимка, полученного на рентгеноимпульсной установке.

Плотность почернения рентгеновского снимка зависит от величины

$$L = \int_l \rho dl, \quad (1)$$

где ρ — плотность вещества, l — длина пути, проходимого рентгеновским лучом по образцу. Если на пути рентгеновских лучей поставить клин из исследуемого материала, то, сканируя изображение этого клина на рентгеновском снимке, можно получить кривую почернения фотоматериала в зависимости от величины $\rho_0 l$ (ρ_0 — плотность вещества клина, l — толщина клина).

Представим исследуемый образец в виде цилиндрического тела, состоящего из слоев одного и того же вещества, но с различной плотностью. Схематический поперечный разрез такого образца дан на рис. 1, где R_i — внешний радиус слоя с плотностью ρ_i , l_i — длина хорды окружности, касательной к $(i-1)$ -му слою. Сканируя снимок исследуемого цилиндрического образца в поперечном направлении с шагом $\Delta = R_i - R_{i-1}$, получим набор значений почернений. Используя кривую почернения фотоматериала, по этим значениям определим интегралы вида (1), где интегрирование проводится по хордам окружности l_i , а плотность вещества меняется от слоя к слою. Обозначим эти интегралы L_1, \dots, L_n , а совокупность значений L_1, \dots, L_n в точках $R_1, \dots, R_n = L$. Зададим n -мерный базис функциями

$$\varphi_i(r) = \begin{cases} 2 \sqrt{R_i^2 - r^2} & \text{при } 0 \leq r \leq R_i, \\ 0 & \text{при } R_i < r \leq R_n. \end{cases}$$

Коэффициенты разложения α_i вектора \mathbf{L} по этому базису равны разности плотностей соседних слоев. Определив α_i , можно найти и плотность каждого слоя ρ_i .

В реальном эксперименте источник излучения имеет конечные размеры, вследствие чего границы образца на снимке размываются. Для повышения чувствительности фотоматериала к рентгеновскому излучению применяются усиливающие экраны, которые дополнительно ухудшают изображение.

Зернистая структура фотоматериала служит причиной случайного шума в сигнале, получаемом при сканировании изображения.

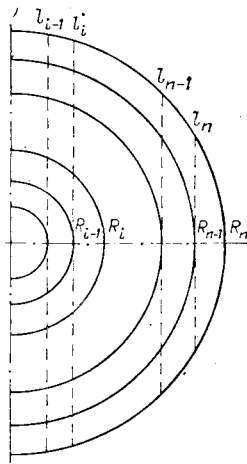


Рис. 1.

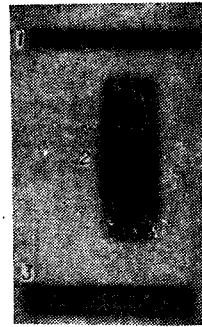


Рис. 2.

Все это приводит к тому, что в реальном эксперименте измеряется не вектор значений \mathbf{L} , а вектор \mathbf{LL} , который связан с вектором \mathbf{L} операторным уравнением

$$A\mathbf{L} + \xi = \mathbf{LL}, \quad (2)$$

где A — функция рассеяния, обусловленная конечными размерами рентгеновского источника и применением усиливающих экранов; ξ — вектор случайного шума, порожденного зернистостью фотоматериала.

Вследствие того, что источник излучения имеет конечные размеры, операторное уравнение (2) относится к уравнениям типа свертки. Из-за наличия случайного шума в сигнале, полученном при сканировании, задача решения этого операторного уравнения является некорректно поставленной. Методы решения задач такого типа подробно описаны в [2].

В литературе имеются и другие методы решения некорректных задач, например метод упорядоченной минимизации риска, изложенный в [3]. Приведем краткое описание алгоритма из этой монографии. Сканируя фотопленку, можно получить набор эмпирических данных LL_1, \dots, LL_n .

Нужно восстановить одномерную функциональную зависимость в классе линейных по параметрам функций

$$F_n(r, \beta) = \sum_{i=1}^n \beta_i \psi_i(r), \quad 0 \leq r \leq R_n. \quad (3)$$

Будем считать, что функции

$$\psi_1(r), \dots, \psi_n(r) \quad (4)$$

априорно ранжированы, т. е. задана структура

$$S_1 \subset S_2 \subset \dots \subset S_n, \quad (5)$$

элемент которой S_p есть множество функций

$$F_p(r, \beta) = \sum_{i=1}^p \beta_i \psi_i(r), \quad 0 \leq r \leq R_n.$$

Задание структуры на множестве функций $F_n(r, \beta)$ является неформальным моментом в реализации метода. В структуре должна быть отражена априорная информация о задаче, которая имеется у исследователя. Те функции, которые, по мнению исследователя, более вероятно приближают искомую, следует относить к классу S_i с меньшим номером. При этом чем больше имеется априорной информации, тем более узкими следует задавать классы с малыми номерами. В данном случае проблема сводится к отысканию такого элемента S_p структуры (5) и функции $F_p(r, \beta)$,

минимизирующей в S_p эмпирический риск

$$I_3(\beta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(LL_i - \sum_{j=1}^p \beta_j \psi_j(R_i) \right)^2, \quad (6)$$

для которых достигается минимум функционала

$$R(p) = \frac{I_3(\beta)}{1 - \sqrt{(p \ln(n/p + 1) - \ln \eta)/n}} \quad (7)$$

($R(p) > 0$, $p < n$). Здесь $1 - \eta$ — вероятность того, что средний риск меньше, чем функционал $R(p)$.

В этом случае за образ решения принимается функция $F_p(r, \beta)$, при которой функционал (7) имеет минимум

$$LL = F_p(r, \beta) = \sum_{i=1}^p \beta_i \psi_i(r), \quad 0 \leq r \leq R_n. \quad (8)$$

Единственная проблема, возникающая при реализации рассмотренной схемы, — определить, какую систему функций (3) использовать. Если взять систему функций ψ_i как результат воздействия оператора A на функции φ_i ($\psi_i = A\varphi_i$), то, учитывая (2) и (8), получим, что $\alpha_i + A\alpha_i = \beta_i$, где $\Delta\alpha_i$ — ошибка, обусловленная случайным шумом. Таким образом, применяя систему функций ψ_i к обработке экспериментальных данных LL_1, \dots, LL_n , можно получить коэффициенты $\alpha_i + \Delta\alpha_i$, по которым определяется плотность каждого слоя образца.

В тех случаях, когда априорной информации не хватает для расширения функций ψ_i , зададим структуру следующим образом. В класс S_1 отнесем все функции из множества (3), у которых только один коэффициент β_i отличен от нуля. В класс S_2 входят функции, у которых два коэффициента отличны от нуля, и т. д. Разбиение на такие классы имеет под собой физическую основу. Класс S_1 объединяет множество цилиндрических тел, состоящих всего из одного слоя с плотностью ρ . В класс S_2 входят тела, состоящие из двух слоев различных радиусов и плотностей, а в класс S_n — все тела, схематический вид которых приведен на рис. 1.

Поскольку в коэффициентах разложения α_i заложен определенный физический смысл (разность плотностей соседних слоев), появляются критерии отбрасывания побочных решений. Это, прежде всего, неотрицательность плотности (ограничение снизу). Кроме того, известно [4], что в диапазоне давлений, характерных для взрывных процессов, плотность не превышает величины $1,5\rho_0$, где ρ_0 — исходная плотность вещества при нормальных условиях (ограничение сверху). Эти ограничения на плотность сверху и снизу помогают выбрать из множества функций $F_n(r, \beta)$ наиболее подходящую для эмпирических данных LL_1, \dots, LL_n .

Неизвестный оператор A определяется из эксперимента. В плоскость с исследуемым образцом и клином вносится тестовый объект. Размеры и распределение плотности в осесимметричном пробном объекте заранее известны. По размытому тестовому объекту численно восстанавливается функция рассеяния — оператор A . Действуя оператором A на функции φ_i , переходим к системе функций ψ_i . Применяя затем метод упорядоченной минимизации риска, получаем распределение плотности в тестовом объекте и его размеры.

Практическая реализация этого метода заключается в следующем. Сначала ищется минимум функционала (7) в классе S_1 , затем — в классе S_2 , и так продолжается до тех пор, пока коэффициенты разложения β_i не выйдут за рамки ограничений, описанных выше ($0 < \beta_i < 1,5$).

В каждом классе в процессе решения находится функция, минимизирующая функционал (7). Например, для тестового объекта-трубки в классе S_1 функционал имеет значение R_1 , в классе S_2 — значение $R_2 < R_1$, а в классе S_3 вообще не нашлось функции, у которой коэффициенты разложения удовлетворяли бы ограничениям. Поэтому за решение при-

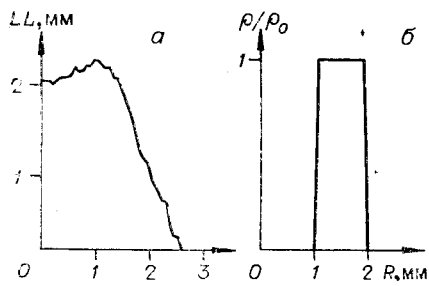


Рис. 3.

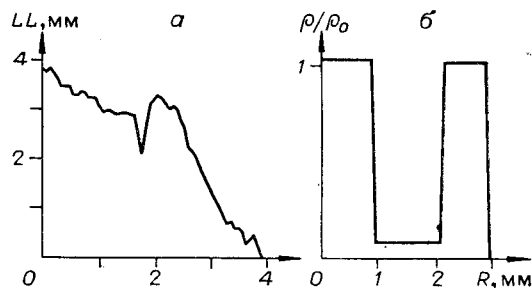


Рис. 4.

пимается функция из класса S_2 , т. е. функция, минимизирующая функционал по классам и описывающая цилиндрическое тело, состоящее из двух слоев с плотностями ρ_1 и ρ_2 . В трубке плотность $\rho_1 \sim 0\rho_0$, а $\rho_2 \sim 1\rho_0$. Сравнивая полученную и истинную плотности, а также размеры объектов, оцениваем качество восстановления объекта. Если качество восстановления приемлемо, то полученный оператор A используется для восстановления плотности и размеров неизвестного объекта.

Предложенная методика проверялась экспериментально. На рис. 2 приведен рентгеновский снимок, предназначенный для обработки. На этом рисунке обозначено: 1 — тестовый объект (медная трубка наружным диаметром 4 мм и внутренним — 2 мм); 2 — двусторонний клин из меди, по которому сопоставлялись почернение фотоматериала и толщина просвечиваемого образца; 3 — объект, плотность и размеры которого измерялись (медная трубка наружным диаметром 6 мм, внутренним — 4 мм, внутри которой размещался медный цилиндр диаметром 2 мм). Съемка велась на рентгеноимпульсной установке РИПА-ЗБ. Скапирование осуществлялось с помощью прибора «Autodensydatel» (производство Великобритании), измеренный сигнал выводился на перфолениту. Размер щели скапирования $0,1 \times 0,1$ мм, шаг скапирования 0,1 мм. Прибор имеет сменные оптические клинья с разными градациями плотности почернения. Это позволяет разделить минимальный и максимальный уровни почернения на снимке на 1000 градаций. В наших экспериментах деление обычно проводилось на 500—600 уровнях. Тестовый и неизвестный объекты скапировались попеременно вдоль оси объектов. По полосе шириной 1 мм считывались 10 строк, которые затем усреднялись между собой. Скапирование клина осуществлялось по полосе шириной 3 мм (30 строк) с той же щелью и с таким же шагом.

Полученные данные вводились в ЭВМ БЭСМ-6. На первом этапе обработки определялась функция рассеяния — оператор A . На рис. 3, а приведен график толщины тестового объекта, полученный из почернений фотоленки с использованием клина, на рис. 3, б — результат восстановления плотности тестового объекта. Ось ординат на графиках — ось симметрии объекта. Размеры трубки и восстановленного объекта совпадают с точностью до одного отсчета. Шаг скапирования 0,1 мм, увеличение снимка 1,4 раза, поэтому размеры совпадают с точностью до 0,07 мм. Значения плотности приведем в безразмерном виде. В той части объекта, где плотность должна быть равной 1,0, она оказалась равной 1,000171, а вместо плотности 0,0 получена величина 0,005717. Таким образом, качество восстановления тестового объекта вполне удовлетворительно.

На втором этапе обработки с помощью найденной функции рассеяния определены размеры и плотность исследуемого объекта (цилиндр в трубке). Размеры восстановленного объекта совпали с истинными размерами с точностью до 0,07 мм. На рис. 4, а показан график толщины исследуемого объекта, полученный из почернений фотоматериала с использованием клина, на рис. 4, б — график плотности этого объекта. Плотности в безразмерном виде равны 1,047 — для плотности внутрен-

него цилиндра (1,0 — его истинная плотность), 0,079 — для плотности «пустоты» (0,0 — ее истинная плотность), 1,029 — для плотности наружной трубки (1,0 — ее истинная плотность).

ВЫВОД

Предложенная методика позволяет получать распределение плотности осесимметричных объектов с использованием рентгеноимпульсной съемки при условии полного просвечивания объекта рентгеновскими лучами (кривая почернения фотоматериала не выходит на насыщение). Точность определения плотности (5—10%) вполне соответствует требованиям задач физики быстротекущих процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестерихин Ю. Е., Солоухин Р. И. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы.— М.: Наука, 1967.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач.— М.: Наука, 1974.
3. Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным.— М.: Наука, 1979.
4. Физика взрыва/Под ред. К. Т. Станюковича.— М.: Наука, 1975.

*Поступила в редакцию 14 февраля 1983 г.;
окончательный вариант — 14 июля 1983 г.*

УДК 681.335.2.088

А. Л. ТИМОФЕЕВ

(Уфа)

СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Динамическая погрешность, возникающая при аналого-цифровом преобразовании широкополосных сигналов, является одним из основных факторов, ограничивающих ширину спектра входных сигналов АЦП. Для преобразования сигналов с максимально широким спектром ограничения, накладываемые динамической погрешностью на частоту входного сигнала, должны согласовываться с требованиями теоремы отсчетов. Однако в сверхбыстродействующих АЦП, предназначенных для исследования коротких импульсных сигналов наносекундного диапазона, это условие не выполняется.

Характерным примером является АЦП с многоканальным аналоговым запоминающим устройством (АЗУ), работающий с частотой дискретизации 500 МГц [1]. При апертурном времени АЗУ около 0,2 нс преобразование сигналов с полосой 100—200 МГц приводит к появлению динамической погрешности 10—20%. Аналогичная проблема возникает при построении АЦП с использованием устройств амплитудной свертки (УАС) [2, 3]. Возрастание динамической погрешности ограничивает спектр преобразуемого сигнала на частоте 10 МГц, хотя дискретизация проводится с частотой 100 МГц. Определяющее влияние динамической погрешности при оценке максимальной ширины спектра входного сигнала характерно также для параллельных и некоторых видов параллельно-последовательных АЦП, имеющих высокую частоту дискретизации. В связи с этим актуальна задача уменьшения динамической погрешности аналого-цифрового преобразования.