ВИРТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

П.Ю. Гуляев, А.В. Долматов
Югорский государственный университет
г. Ханты-Мансийск

В области исследования дисперсно-фазных плазменных потоков (ДФПП) виртуальные приборы оптической диагностики призваны решать следующие задачи за контролем распределения частиц:

- по температурам;
- по скорости;
- по размерам.

В основе диагностики лежат интегральные измерительные соотношения, которые соответствуют трем типам преобразований светового потока в оптических схемах (ОС) измерений [1, 2]:

1. проекционные ОС – интегральное преобразование Радона;
2. дифракционно-интерференционные – интегральное преобразование Фурье;
3. спектральные – интегральное уравнение Фредгольма.

В общем виде работа виртуального прибора оптической диагностики плазменного потока выглядит следующим образом (рис.1). На входе в прибор излучение ДФПП проходит через ОС и попадает на датчики измерительной системы, которые обеспечивают интегрирование светового потока, работая в режиме накопления заряда. Сигнал с датчиков подается в блок обработки, где редуцируется распределение частиц. Таким образом, входному световому потоку излучения от дисперсно-фазной среды (ДФС) виртуальный прибор ставит в соответствие распределение частиц в этой среде по параметру, зависящему от вида ОС [3, 4].

Целью настоящей статьи является разработка обобщенной математической модели работы виртуального прибора оптической диагностики плазменных потоков интегральными методами контроля на примере импульсного слабо запыленного потока частиц, поочередно и в случайный момент времени пересекающих измерительный объем. Такая модель так же справедлива для контроля неподвижной ДФС и оптической измерительной системы (ИС) с известным законом сканирования измерительного объема, заполненного случайным образом частицами, размер которых не меньше величины оптической разрешающей способности прибора.

В случае ДФПП сканирование частиц обеспечивается движением потока относительно ИС. Каждой частице соответствует свое значение контролируемого физического параметра z_j, связанного с интенсивностью оптического излучения $\zeta_i(x)$ законом физической оптики $A(z_j,x)$, например дифракционного рассеяния, спектром теплового излучения, лучевой проекции и т.п. При этом *x* - регистрируемый параметр оптического излучения (угол дифракционного рассеяния, длина волны, координата проекции и т.п.). Фотоприемник и тракт ИС вносят искажения в оптический сигнал , которые описываются соответствующими аппаратными функциями $k_1(x)$ и $k_2(x)$ (спектральная чувствительность, дифракционный предел разрешающей способности, астигматизм, аберрация и т.п.). Тогда, преобразование величины контролируемого параметра z_j в выходной электрический сигнал $g_i(x) = A(z_i,x)k_1(x)k_2(x)$, может быть описано с помощью обобщенной аппаратной функции всего прибора в целом $K(z,x)$, а входной оптический сигнал, зарегистрированный за время полного сканирования всех частиц, в интегральном виде:

$$\zeta(x) = \sum \zeta_i = \int A(z,x) f(z) dz ,$$

где $f(z) = di/dz$ – искомая функция распределения контролируемого параметра ДФС.

Решение задачи состоит в определении функции *f(z)* по выходному сигналу ИС, когда оптический параметр *x* взаимно однозначно определяется координатой точки сканируемого изображения, например, когда каждому элементу изображения соответствует своя длина волны, угловой или линейный параллакс световых лучей рассеянных или излучаемых частицами ДФС. В простейшем случае проекционной ОС параметр *x* может быть просто координатой изображения частицы. Прямую задачу измерения можно записать в интегральном виде:

$$g(x) = k_1(x)k_2(x)\varsigma(x) =$$

$$= \int [k_1(x)k_2(x)A(z,x)]\, f(z)dz =$$
$$= \int K(z,x) f(z)dz,$$

которая в дискретном виде соответствует операторному уравнению $g = Af$. – для идеального прибора, и $g = Kf$ – для реального прибора.

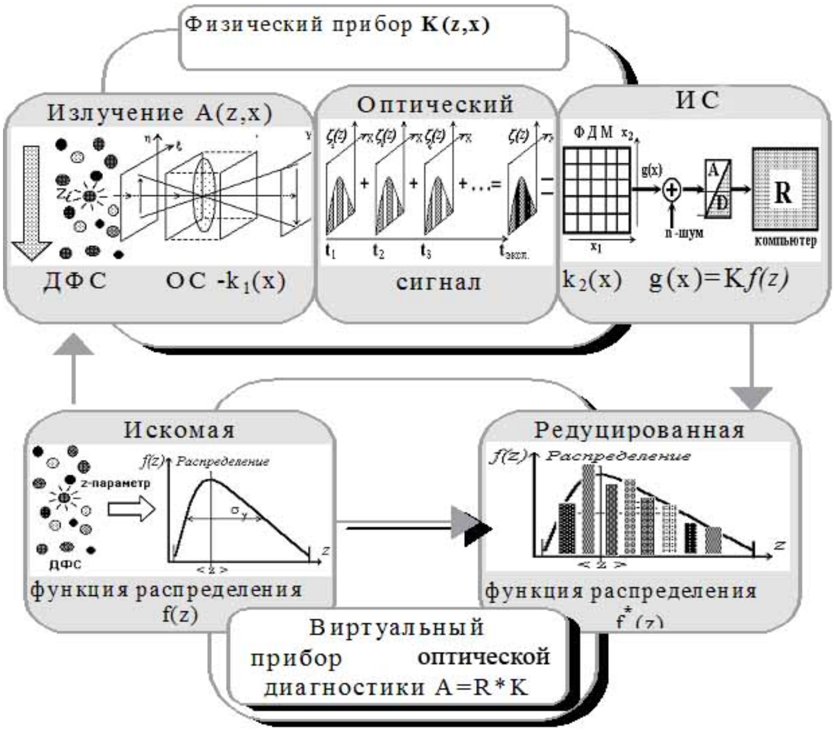

Рисунок 1 – Обобщенная функциональная схема виртуального прибора оптической диагностики плазменных потоков

Рассмотрим задачу определения величины f прибором *A* по результатам косвенных измерений *g*. Конкретный вид оператора *A* определяется физическим методом измерения и аппаратной функцией прибора *k(r,...)*, но предполагается выполнение основного интегрального измерительного уравнения диагностики:

$$g = Af.; \quad g_i = \int_a^b k_i(r) f(r) dr, \qquad (1)$$

На практике истинное значение g никогда не известно, так как оно всегда содержит некоторую экспериментальную ошибку n. Поэтому измеренные данные g_d можно представить в виде

$$g_d = g + n, \qquad (2)$$

где g_d - известная матрица размера M×1, а n - матрица экспериментальных ошибок размера M×1.

Решение задачи диагностики сводится к процедуре подбора искомой функции *f* и минимизации следующей положительной величины:

$$U = (g_d - Af)^+(g_d - Af) +$$
$$+ \gamma_1 (f - f_0)^+ (f - f_0) + \gamma_2 (Bf)^+(Bf), \qquad (3)$$

где индекс + обозначает комплексное сопряжение и транспонирование, γ_1 и γ_2 – положительные константы, f_0 – “пробная” функция, а B – матрица размера M×M, описывающее некоторое сглаживание f. Первый член в (3) является мерой точности f, даваемой формулой (1). Заметим, что если экспериментальных ошибок нет, то $g_d = g, \gamma_1 = \gamma_2 = 0, U = 0$ – минимальное значение U и решением является $f = A^{-1}g$. Второй член в (3) указывает на отклонение f от пробной функции f_0, а третий член характеризует отклонение f от идеального сглаживания, соответствующего $(Bf) = 0$. Обычно (Bf) описывает первую или вторую производную.

Рассмотрим случай $\gamma_2 = 0$. Дифференцируя U по f, находим

$$f = (A^+A + \gamma_1 I)^{-1}(A^+g_d + \gamma_1 f_0), \tag{4}$$

где I – квадратная матрица размера N×N.

Выбор γ_1 должен быть сделан так, чтобы обеспечить разумный компромисс между первым и вторым членами в (3). Если γ_1 мало, то преобладает первый член, и решение является сильно осциллирующим. Если γ_1 велико, то преобладает второй член, и решение получается сильно сглаженным.

В случае $\gamma_1 = 0$ решение имеет вид

$$f = (A^+A + \gamma_2 B^+B)^{-1} A^+ g_d. \tag{5}$$

Матрица B может быть взята в виде

$$B = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & & \\ 0 & 1 & -2 & 1 & & \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ & & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

Bf представляет собой дискретный аналог второй производной f.

Выводы. Таким образом, основная задача измерения параметров ДФС приведена к постановке, аналогичной задачам вычислительной диагностики в томографии и дисперсионном анализе мутных сред по характеристикам рассеянного излучения. Данная постановка сделана в самых общих допущениях относительно свойств ОС измерения и контролируемых параметров. Она охватывает широкий класс физических приборов контроля, благодаря учтенным в модели особенностям сканирования частиц ДФС датчиками ИС, использующими режим накопления заряда. При этом виртуальный прибор как обычный физический прибор можно характеризовать тремя паспортными данными:

$$\begin{cases} H(\varepsilon,\delta) = E\|n\|^2, \\ G(\varepsilon,\delta) = \|K - K_0\|^2, \\ q(\varepsilon,\delta) \le \delta \end{cases}$$

где $H(\varepsilon,\delta)$ – уровень аппаратных шумов, приведенных ко входу, $G(\varepsilon,\delta)$ – невязка, $q(\varepsilon,\delta)$ – качество прибора K_0 [5].

Список литературы

1. Математические задачи компьютерной томографии / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин, А.А. Тимонов. – М.: Наука, 1988. – 158 с.
2. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
3. Евстигнеев В.В. Оптоэлектронный диагностический комплекс для контроля скорости конденсированной фазы импульсного потока в установках детонационно-газового напыления / В.В. Евстигнеев, П.Ю. Гуляев, М.А. Гумиров, А.В. Долматов, А.А. Гладких. – Волгоград: РПК «Политехник», 2004. – С.109-111.
4. Гуляев П.Ю. Диагностика распределения температуры и скорости напыляемого порошка в импульсном плазменном потоке / П.Ю. Гуляев, А.В. Долматов // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 9. Приложение. – С. 114 – 117.
5. Новицкий А.В. Основы информационной теории измерительных устройств / А.В. Новицкий – Л.: Энергия, 1968.