

УДК 519.272:53.082.5

А.И. Денисенко

К ВЗАИМОСВЯЗИ МНОГОМЕРНЫХ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА И ТЕНЕВЫХ СИГНАЛОВ ОТ НИХ ПО ПАРАМЕТРАМ

Введение

Оптическая диагностика двухфазных плазменных потоков на основе регистрации параметров теневых сигналов от одиночных частиц с применением лазерного излучения для формирования измерительной зоны представляет собой динамически развивающееся направление техники физического эксперимента.

Информация о таких параметрах двухфазных плазменных струй, как скорость, размеры и температуры дисперсных включений, распределение их по потоку, необходимая для аттестации и оптимизации использования этих систем, определяет актуальность разработки и совершенствования невозмущающих бесконтактных методов исследования параметров дисперсной фазы. Работы в этом направлении ведутся во многих странах мира (США, России, Великобритании, Швеции и т.д.) [1-4].

Анализ публикаций

Перспективы энерго- и ресурсосбережения при исследованиях двухфазных плазменных потоков в направлении повышения информационной емкости метода лазерной теневой диагностики связаны с проблемой оптимизации скорости набора информации о параметрах сигналов от частиц, а достоверность экспериментально регистрируемых функций распределений в значительной мере определяется характером временной зависимости поступления этой информации. В результате оптимальной настройки оптического измерительного объема на исследуемую зону двухфазного потока сигналы от частиц разделяются во времени промежутками отсутствия частиц в счетном объеме, а минимизация времени холостой работы счетчика частиц дисперсной фазы, обеспечивает экономическую и информационную эффективность замеров [5].

Многообразие факторов, влияющих на формирование диагностических импульсов при пересечении частицами дисперсной фазы оптической измерительной зоны произвольной конфигурации с стабильным во времени неравномерным распределением интенсивности зондирующего луча, а также определяющих формы и точность взаимосвязей характеристик оптических сигналов и формирующих их частиц двухфазного потока, в основном сводится к эффекту виньетирования.

Основные тенденции совершенствования диагностической аппаратуры на этапе формирования оптического измерительного объема группируются в два направления. Первое направление связано с требованием однозначности связи между параметрами одиночного регистрируемого оптического импульсного сигнала и формирующей этот сигнал частицы, например, между размером частицы и амплитудой оптического сигнала. При этом аппаратными средствами, реализующими жесткие требования к свойствам измерительного объема, добиваются снижения проявлений эффекта виньетирования в регистрируемой информации и отбраковку сигналов от одновременно попадающих в измерительный объем двух или более частиц [6].

Эффект виньетирования проявляется в том, что вся область счетного объема может быть разбита по чувствительности на ряд зон, в которых реакция приемника на попадание в них частиц одного и того же размера и природы отличается на порядки величины. Вследствие того, что частицы, попадающие в граничные зоны счетного объема, формируют сигнал, значительно меньший того значения, которое должно наблюдаться при попадании этих же частиц в центральную зону, уменьшение амплитуды сигнала будет интерпретироваться электронной частью прибора как частицы уменьшенного размера, что обуславливает искажение наблюдаемого спектра размеров частиц дисперсной фазы. С уменьшением размеров измерительного объема, как правило, возрастает степень проявления эффекта виньетирования [2,3].

Второе направление связано с более общим требованием однозначности функциональной связи распределений по параметрам совокупности оптических сигналов и распределений по параметрам совокупности частиц дисперсной фазы, формирующих эту совокупность сигналов. В рамках этого направления разработаны

взаимно независимые методы определения лазерным теневым методом функции распределения по размерам частиц дисперсной фазы для оптического измерительного объема с произвольной конфигурацией стабильного во времени неравномерного распределением интенсивности зондирующего луча [2,3], скорости частиц в полидисперсном потоке [7], температуры светящихся частиц [8,9], объемной функции распределения частиц по размерам в полискоростном потоке [3].

Постановка задачи

В материалах специальных технических публикаций теоретически не рассматривались во взаимосвязи такие вопросы, как способы определения функции распределения по скоростям частиц полидисперсного двухфазного потока при дисперсии пролетных длин в измерительном объеме, а также методика разделения вкладов в амплитуду сигнала от ослабления интенсивности зондирующего луча и от индивидуального свечения пересекающей луч частицы дисперсной фазы плазменного потока при наличии виньетирования.

Впервые автором поставлена задача синтеза на основе методов определения скорости частиц в полидисперсном потоке, температуры светящихся частиц и объемной функции распределения частиц по размерам в полискоростном потоке единого алгоритма определения трехмерной функции распределения по параметрам дисперсной фазы полидисперсного, полискоростного, политемпературного двухфазного потока лазерным теневым методом для оптического измерительного объема с произвольной конфигурацией стабильного во времени неравномерного распределением интенсивности зондирующего луча.

Основная часть

Последовательность этапов функциональных преобразований параметров совокупности диагностических сигналов от частиц дисперсной фазы к трехмерной функции распределения объемных плотностей частиц по параметрам представлена на рис 1. На схеме каждый этап пронумерован в левом верхнем углу символизирующего его прямоугольника, содержащего внутри эллипс или треугольник с итоговой (для этапа) функцией распределения по отмеченным выделенными точками и помеченным соответствующими символами параметрам диагностических импульсов или частиц дисперсной фазы.

Соединения параметров линиями символизируют отнесение этих параметров к одному и тому же объекту (частице дисперсной фазы) как при регистрации характеристик диагностических сигналов, так и при последующих функциональных преобразованиях.

Рассмотрим этапы преобразований параметров диагностических сигналов от частиц дисперсной фазы к трехмерной функции распределения объемных плотностей частиц по параметрам в порядке, соответствующем схеме рис.1.

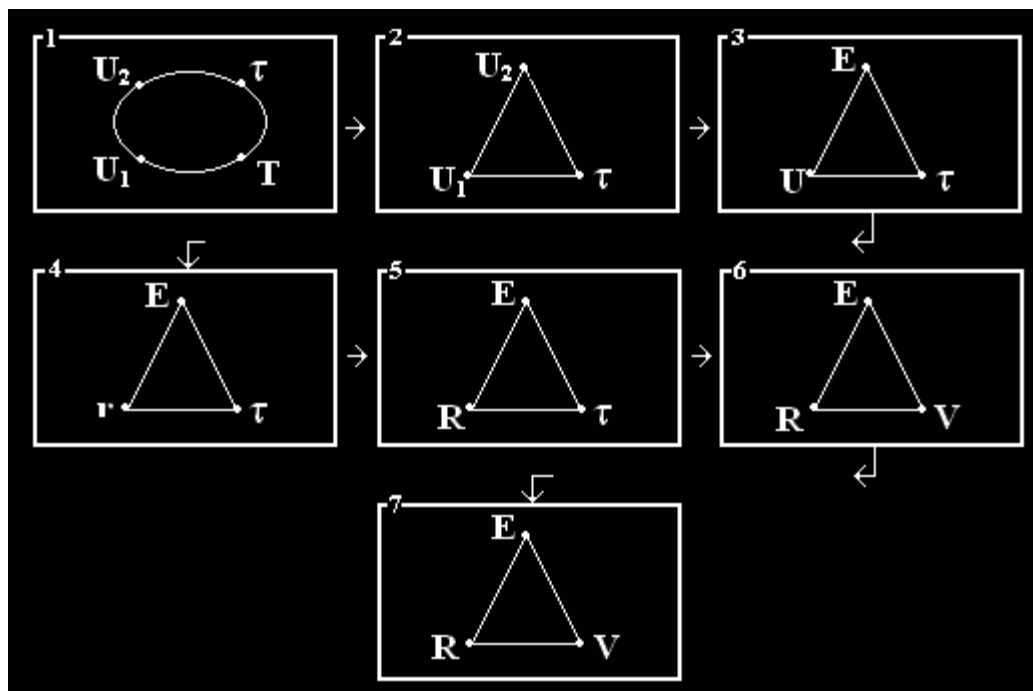


Рисунок 1 - Этапы преобразований функции распределения по параметрам теневого сигнала от частиц дисперсной фазы к трехмерной функции распределения объемных плотностей частиц по параметрам

Этап 1. Экспериментальная регистрация многомерной функции распределения теневого сигнала от частиц двухфазного потока по параметрам.

Пусть экспериментально регистрируемая на последовательных интервалах времени статистическая информация о многомерном распределении по параметрам теневого сигнала от пересекающих оптический измерительный объем частиц дисперсной фазы двухфазного потока представима в виде функции на интервалах амплитуд и сигналов по двум приемным оптическим каналам, длительностей сигналов от частиц, регистрируемых по первому каналу, и длительностей последовательных временных интервалов набора информации.

На рис.2 представлен пример оптической схемы установки для лазерной теневой диагностики частиц дисперсной фазы двухфазного потока. Луч лазера 1 линзой 2 фокусируется в пределах двухфазного потока 3. Частицы дисперсной фазы потока, пересекая измерительный оптический объем, представляющий собой пространственную область фокусировки луча с неравномерным, но стабильным во времени распределением интенсивности, формируют теневые диагностические сигналы.

Делителем 4 луч за областью фокусировки расщепляется в два приемных оптических канала, содержащих фокусирующие линзы 2 и фотоэлектронные преобразователи 6. В один из приемных оптических каналов помещен ослабитель интенсивности лазерного луча 5.

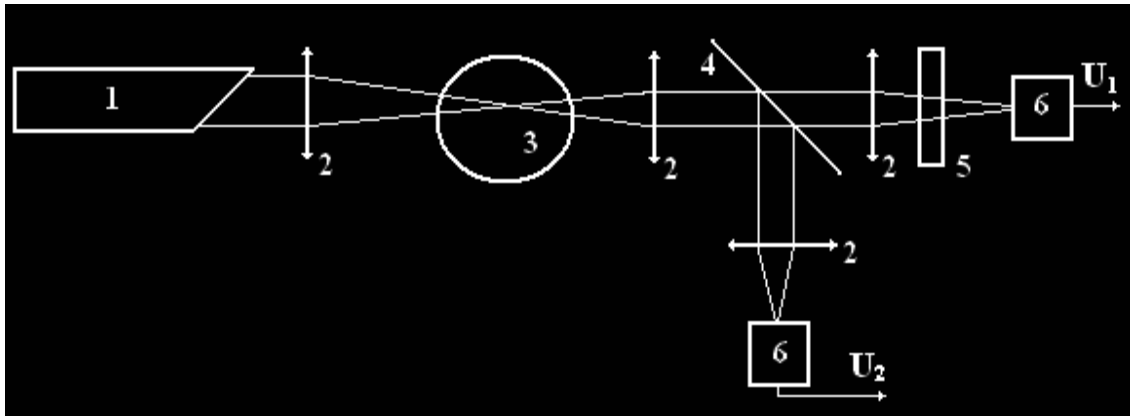


Рисунок 2 - Оптическая схема диагностической установки: 1 – лазер, 2 – линзы, 3 – исследуемый поток, 4 – делитель луча, 5 – ослабитель интенсивности лазерного луча, 6 – фотоэлектронные преобразователи

Функция $f(U_1, U_2, \tau, T)$ в зависимости от способа регистрации может быть задана множеством групп из значений параметров U_1, U_2, τ, T , зарегистрированных в порядке поступления экспериментальной информации, или многомерной статистически непроработанной гистограммой на группах интервалов тех же параметров.

Этап 2. Выделение из функции $f(U_1, U_2, \tau, T)$ стабильного во времени распределения по параметрам $f(U_1, U_2, \tau)$.

В спектрометрах дисперсной фазы регистрация экспериментальной информации может быть выполнена непосредственно на матрице счетчиков импульсов или приведена к такой же структуре последующим распределением сигналов по сеткам интервалов разбиения диапазонов регистрируемых параметров. В

любом из вышеупомянутых вариантов параметру скорости счета присущи затухающие с ростом времени и числа накапливаемых сигналов осцилляции, порождаемые дискретностью характера регистрации. Величина скорости счета, имеющая статистический характер, является основной измеряемой экспериментально характеристикой двухфазного потока в каждой счетной ячейке, образованной пересечением интервалов всех регистрируемых параметров.

Регистрация параметров диагностических сигналов на последовательных интервалах времени длительностями T позволяет вычислительными методами производить количественную оценку стабилизации скорости счета по мере накопления сигналов в любой образованной пересечением интервалов регистрируемых параметров счетной ячейке [5,6].

Вычислительными методами, основанными, например, на эвристических алгоритмах [10] решения задачи таксономии, преобразованием статистически непроработанной гистограммы на первичных (регистрационных) интервалах параметров в гистограмму на объединенных интервалах, может быть выполнено выделение из функции $f(U_1, U_2, \tau, T)$ стабильного во времени распределения по параметрам $f(U_1, U_2, \tau)$ с учетом временной стабилизации пересчитываемой скорости счета в любой, образуемой пересечением объединяемых интервалов регистрируемых параметров, счетной ячейке.

Этап 3. Выделение из функции $f(U_1, U_2, \tau)$ распределения по параметрам $f(U, E, \tau)$.

В тех случаях, когда энергетическая светимость диагностируемых частиц достаточна для влияния на величину амплитуды теневого сигнала, формируемого пересечением частицей лазерного луча, но это не учитывается, свечение частиц приводит к сдвигу амплитуды регистрируемого сигнала в меньшую от соответствующей сигналу от частицы без свечения амплитуде сторону.

Расщепляя зондирующий луч на выходе из исследуемого двухфазного потока на две части (Рис.2), формируем частицей, пересекающей измерительный объем, два сигнала U_1 и U_2 , каждый

из которых определяется как перекрываемой частицей частью сечения оптического измерительного объема, так и той частью ее свечения, которая попадает в измерительный канал. Применение в одном из приемных оптических каналов ослабителя интенсивности лазерного луча позволяет выразить связь регистрируемых величин U_1 и U_2 с параметрами E (поверхностная плотность энергетической светимости частицы) и U (величина сигнала от такой же, но не светящейся частицы) системой двух линейных уравнений [8,9], опираясь на которую и выполнить численными методами преобразование функции распределения $f(U_1, U_2, \tau)$ к виду $f(U, E, \tau)$.

Устранение влияния свечения частиц на амплитуду сигналов позволяет перейти к преобразованию функции распределения по амплитудам сигналов от частиц в функцию распределения по их размерам.

Этап 4. Преобразование функции $f(U, E, \tau)$ распределения по амплитудам сигналов к распределению $f(r, E, \tau)$ по “кажущимся” размерам частиц дисперсной фазы.

На этом этапе преобразования используем результаты предварительной калибровки в форме функционального соответствия размеров r , пропускаемых через оптический измерительный объем частиц дисперсной фазы, и максимальных из соответствующих этим частицам амплитуд U диагностических сигналов.

При однозначной связи величины U амплитуды сигнала с размером r формирующей этот сигнал частицы (характерной для оптического измерительного объема с равномерным по сечению распределением интенсивности луча и обеспечением отбраковки сигналов от частиц, пересекающих края его сечения), применение преобразования $U = f(r)$ переводит функцию распределения по амплитудам сигналов от частиц в функцию распределения по размерам частиц.

При неоднозначной связи величины U амплитуды сигнала с размером r формирующей этот сигнал частицы, (что характерно для стабильного во времени неравномерного распределения интенсивности луча по оптическому измерительному объему, применение преобразования $U = f(r)$ переводит функцию распределения по

амплитудам сигналов от частиц в функцию распределения по “кажущимся” размерам частиц и для выделения из нее функции распределения по размерам необходимо применение методики учета эффекта виньетирования.

Преобразование от $f(U, E, \tau)$ к $f(r, E, \tau)$ с использованием калибровочной функции $U = f(r)$ не затрагивает в этих распределениях функциональную связь с величинами поверхностной плотности E энергетической светимости частиц и длительностями τ сигналов от них.

Этап 5. Преобразование функции распределения $f(r, E, \tau)$ по “кажущимся” размерам в функцию распределения $f(R, E, \tau)$ по размерам частиц дисперсной фазы.

Пусть в результате предварительно произведенной калибровки будет сформирована двумерная функция $U(R, r)$ распределения вероятности регистрации частицы размера R в виде частицы “кажущегося” размера r для используемого оптического измерительного объема [3,11].

Определение функции распределения частиц по размерам на основании функции распределения по “кажущимся” размерам с учетом результатов предварительной калибровки $U(R, r)$ произведем с применением соотношения

$$F(r) = f_n(r) - \int_r^{r_{\max}} F(R) \cdot U(R, r) \cdot dR \quad (1)$$

Для максимального значения диапазона размеров соотношение (1) примет вид:

$$F(r_{\max}) = f_n(r_{\max}) \quad (2)$$

Определение функции $F(r)$ в области $r < r_{\max}$ произведем следующим образом. Разобьем диапазон изменения r , начиная с r_{\max} , на интервалы. Для конца первого интервала, прилегающего к r_{\max} , соотношение (1) запишем в виде:

$$F(r_1) = f_n(r) - F(r_{\max}) \int_{r_1}^{r_{\max}} U(R, r) \cdot dR \quad (3)$$

В соотношении (3) и далее используется упрощающее допущение — значение функции $F(r)$ на большем краю интервала по r (на стадии преобразования функции распределения по “кажущимся”

размерам в функцию распределения по размерам) присваивается всем r из этого интервала, что позволяет вынести, например, $F(r_{\max})$ за знак интеграла в выражении (3) и произвести вычисление интеграла. Для вычисления интеграла из функции $U(R, r)$ на интервале $[r, r_{\max}]$ по параметру R выделяется для значения r функциональная зависимость по R , которая и интегрируется в указанных для R пределах. После определения значения функции $F(r)$ в точке r_1 на конце первого интервала производим определение функции $F(r)$ в точках r_i на концах остальных интервалов поочередно, используя для этого каждый раз соотношение:

$$F(r_i) = f_n(r_i) - \sum_{p=0}^{i-1} F(r_p) \cdot \int_{r_{p+1}}^{r_p} U(R, r_i) \cdot dR \quad (4)$$

В результате учета эффекта виньетирования для границ интервалов разбиения диапазона по r определим значения $f(R) = F(r)$, отличающиеся на величину суммарного вклада от частиц больших размеров во все части диапазона, соответствующие частицам меньших размеров.

Преобразование от $f(r, E, \tau)$ к $f(R, E, \tau)$ с использованием (4) не затрагивает в этих распределениях функциональную связь между размерами R частиц дисперсной фазы и величинами поверхностной плотности E излучения частиц.

Этап 6. Преобразование функции $f(R, E, \tau)$ распределения по длительностям импульсов от частиц в функцию $f(R, E, V)$ распределения по скоростям частиц дисперсной фазы.

Из распределения $f(R, E, \tau)$ по размерам частиц дисперсной фазы и по длительностям сигналов от них, используя результат предварительно проведенной калибровки по длинам L траекторий в измерительной зоне для частиц разных размеров, приведенный к форме двумерной функции $\Phi(L, R)$ распределения по длинам траекторий и размерам частиц [7], преобразованием

$$f(R, E, V) = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} f(R, E, \tau) \cdot \Phi(V \cdot \tau - R, R) d\tau \quad (5)$$

(использована оценка $L = V \cdot \tau - R$) перейдем к счетному распределению частиц по скоростям в виде $f(R, E, V)$.

Преобразование от $f(R, E, \tau)$ к $f(R, E, V)$ с использованием (5) не затрагивает в этих распределениях функциональную связь между размерами R частиц дисперсной фазы и величинами поверхностной плотности E излучения частиц.

Этап 7. Преобразование счетной функции $f(R, E, V)$ распределения частиц по их параметрам в функцию $F(R, E, V)$ распределения объемных плотностей частиц по их параметрам.

При преобразовании счетной функции $f(R, E, V)$ распределения частиц по их параметрам в объемную $F(R, E, V)$ учтем функциональный характер зависимости величины площади сечения оптической измерительной зоны от размера частиц дисперсной фазы $S(R)$, а также разброс частиц по скоростям. Из полученной ранее счетной функции $f(R, E, V)$ распределения частиц по их параметрам определим функцию распределения объемных плотностей частиц по их параметрам:

$$F(R, E, V) = \frac{f(R, E, V)}{K_3 \cdot S(R) \cdot V} \quad (6)$$

где нормирующий коэффициент имеет вид:

$$K_3 = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \frac{f(R, E, V)}{S(R) \cdot V} dV dE dR \quad (7)$$

Функция распределения частиц по размерам может быть получена из соотношения (6) преобразованием:

$$F(R) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} F(R, E, V) dV dE \quad (8)$$

Аналогичными преобразованиями могут быть определены из соотношения (6) одно- или двумерные функции распределений для любого сочетания из использованных в нем параметров частиц.

Компонента распределения по поверхностным плотностям энергетической светимости может быть с учетом преобразована в распределение по энергетической светимости частиц и, при наличии функции зависимости коэффициента серости материала частиц от температуры, – в распределение частиц по температурам.

Выводы

На основе сравнительного анализа группы ранее разрозненных методик определения параметров дисперсной фазы по параметрам совокупности импульсных сигналов от частиц положительно решен вопрос о принципиальной возможности определения функции распределения частиц по размерам, скоростям и температурам и синтезирован алгоритм последовательности этапов для измерительного объема произвольной конфигурации с применением лазерного теневого способа формирования сигналов. Основная группа методик определения функций распределения частиц по скоростям, размерам и температурам, а также их парным комбинациям, применяемая для оптических измерительных объемов разных конфигураций, может быть получена из разработанного алгоритма свертками по соответствующим параметрам.

Перспективы практического применения синтезированного алгоритма связаны с развитием и совершенствованием вычислительных методов реализации рассмотренных поэтапных функциональных преобразований а также оценки результата на каждом этапе с учетом комплекса погрешностей измеряемых при многоканальной регистрации статистической информации параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vaulina O.S., Samarian A.A., Denisenko A.I., Nefedov A.V., Chernyshev A.V., Petrov O.F. Analysis of light scattering on particle ordered structure in a thermal plasma // *Phys. Lett.* – 2001. – A 290.– P.151–156.
2. Samarian A.A, Vaulina O.S., Denisenko A.I., Nefedov A.V., Petrov O.F. Optical Diagnostics of Plasma and Particle in an Atmospheric Pressure Dusty Plasma // *Physica Scripta.* – 2002. – Vol. 65. – P.1–7,
3. Holve Don., Sidney A. Self optical particle sizing for in situ measurements // *Appl. Opt.* – 1979. –Vol. 18, №10. – P.1632–1652.
4. Malvern - The practical approach to submicron particle sizing. Master Sizer, 1988.
5. Денисенко А.И., Однороженко В.Б., Нефедов А.П. Оптимизация скорости накопления статистической информации лазерным спектрометром дисперсной фазы. // *Измерения в потоках. Методы, аппаратура и применение.* – Москва, 1990. – С 12.
6. Тігарев А.М. Контроль та управління дисперсним складом порошків у технологічних процесах їх виробництва: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.07 / Одеський національний політехнічний університет. – Одеса, 2004. – 20 с.

7. Денисенко А.И., Однороженко В.Б., Кузнецов А.Н., Патеюк Н.Г. Преобразование распределения сигналов по длительности в распределение частиц дисперсной фазы по скоростям. // Измерения в потоках. Методы, аппаратура и применение. – Москва, 1990. – С 11.
8. Способ измерения температуры движущихся объектов: А.с. № 805082 СССР, МКИ G01j 5/50/ А.И. Денисенко и др. – № 2735905; Заявл 06.03.79; Оpubл. 15.02.81 в Б.И. №6.
9. Способ измерения температуры движущихся объектов: А.с. № 761853 СССР, МКИ G01j 5/52/ А.И. Денисенко и др. – № 2645549; Заявл 11.07.78; Оpubл. 07.09.80 в Б.И. №33.
10. Денисенко О.І. До проблеми виділення функції розподілу по параметрах імпульсів з гістограм при лазерній діагностиці дисперсної фази плазмових потоків. // Україна наукова 2003. – Дніпропетровськ, 2003. – Т. 31. – С. 24 –26.
11. Денисенко А.И., Денисенко С.А. К анализу функций распределения частиц дисперсной фазы по параметрам. // Теорія та методика навчання фундаментальних дисциплін у вищій школі. – Кривий Ріг, 2005. – Том 2. – С. 119 –124.

Получено 13.12.06 г.