

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ДВУМЕРНОГО АККУМУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА ГИБРИДНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Бирюкова О.В., Смирнов В.И., Янина Г.М.

Московский энергетический институт (технический университет)

Лазерная диагностика турбулентности потоков жидкости и газа получила широкое распространение при решении многих практических, аналитических и прикладных задач аэрогидродинамики, химических технологий, энергетики и ряда других областей.

Для экспериментального исследования характеристик движения жидкостей и газов применяются различные типы датчиков и анемометрических устройств, обеспечивающих измерения случайных стационарных и нестационарных полей гидродинамических и теплофизических параметров турбулентных течений [1].

В научных исследованиях турбулентных течений подвижных сред наибольшее распространение получили лазерные доплеровские анемометры, определяющие скорость движения потока по доплеровскому сдвигу частоты рассеянного движущимися в потоке частицами лазерного излучения, и анемометрия изображения частиц.

В последние годы, в связи с широкими возможностями вычислительной техники и развитием компьютерных методов обработки сигналов, в лазерной диагностике турбулентности потоков интенсивно используется цифровая обработка измерительной информации. Современные методы исследования позволяют получать большое количество картин визуализации процессов в потоках жидкости и газа, при этом актуальной задачей является быстрое и надежное извлечение информации об исследуемых процессах.

В этой связи, большой интерес представляет использование лазерных измерительных систем диагностики турбулентности с гибридными оптоволоконными датчиками. При невысокой стоимости и относительной простоте конструкции, подобные устройства позволяют проводить измерения трехмерных пульсационных характеристик потока в реальном времени с достаточно высоким пространственным и временным разрешением. В данной работе представлены возможности таких систем в режиме получения двумерных сигналов, аккумулированных в течение больших, по сравнению с турбулентными, масштабами временных интервалов [2].

Оптоволоконный гибридный датчик турбулентности представляет собой изготовленный из стекловолокна консольный стержень кругового сечения. При помещении его в поток жидкости или газа в результате прогиба волоконной консоли под напором турбулентного течения происходит смещение светового пятна, излучаемого с торца световода, фиксируемое при проведении эксперимента на экране.

Принципиальная схема измерений изображена на рис. 1 и состоит из источника оптического излучения (лазера) 1, фокусирующей оптической системы 2, оптического волокна 3, оправы чувствительного элемента 4, волоконной консоли (отрезка оптоволокна, выходящего из оправы) 5, устройства формирования воздушного потока 6, проецирующей оптической системы 7 и экрана 8.

Лазерный пучок, сформированный источником 1, фокусировался на неподвижно закрепленный торец световода 3. Входной торец световода и оправы чувствительного элемента закреплялись в унифицированных юстировочных модулях, что облегчало юстировку установки. Противоположный конец оптического волокна закрепляется в оправе 4 таким образом, что имеет возможность свободно изгибаться под действием внешних сил. Прогиб чувствительного механического элемента, возникающего под воздействием набегающего турбулентного потока, фиксируется системой регистрации 7,8. Изменение параметров (длины, диаметра или модуля Юнга) подвижного участка позволяет варьировать чувствительность датчика.

При введении в волокно излучения, выходной торец чувствительного элемента датчика представляет собой источник излучения (световой маркер). Для измерения флуктуаций положения светового пятна, в которое проецирующей оптической системой 7 фокусируется световой поток, излученный с подвижного торца оптического волокна, возможно использование фотоэлектрической или фотографической системы регистрации.

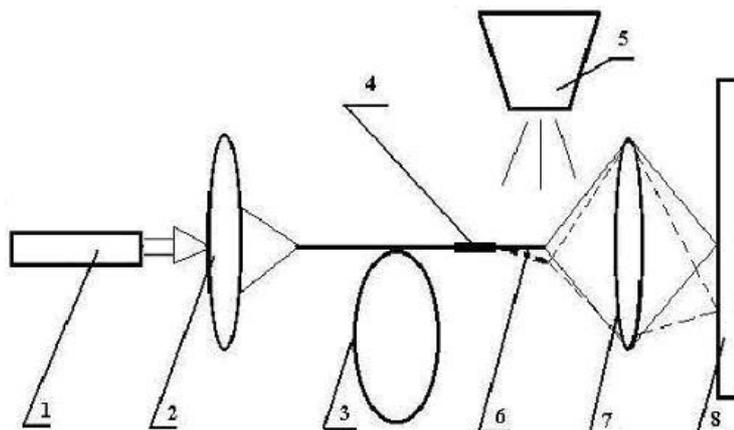


Рис1. Структурная схема волоконно-оптического датчика турбулентности, созданного по принципу светового маркера

Для получения цифрового аккумулированного двумерного сигнала проводилось фотографирование картины движения светового маркера на экране с помощью цифровой камеры, работающей в режиме приоритета выдержки. Возможно также использование пленочной фотокамеры с большим временем экспозиции и последующей оцифровкой полученного изображения сканером. В результате аккумулированный сигнал представляется в виде цифровой матрицы, удобной для последующей компьютерной обработки с целью получения оценок искомым характеристикам турбулентности.

Цифровые изображения движения светового маркера в воздушном струйном турбулентном потоке, при формировании которого применялась насадка эллиптической формы, проводились при различных временах аккумуляции сигнала.

При малых временах аккумуляции T , составляющих несколько временных турбулентных масштабов τ , на экране наблюдались изображения траектории движения светового маркера, которые в определенных условиях можно интерпретировать как флуктуации проекции вектора локальной скорости на плоскость регистрации.

Соответствующие изображения, полученные для точки на оси потока и для двух симметрично расположенных относительно оси потока точек, представлены на рис.2 а.

При значительных временах аккумуляции $T > \tau$ траектории сливаются в единое пятно, в котором распределение освещенности определяется плотностью вероятности турбулентных флуктуаций проекции вектора локальной скорости потока на плоскость регистрации.

Получаемые при этом уровневые картины распределения яркости, визуализирующие двумерную плотность турбулентных пульсаций в указанных точках, представлены на рис.2б.

Для обработки аккумулированных сигналов разработаны компьютерные программы. На первом этапе осуществляется исключение фоновой засветки.

На следующем этапе проводится сглаживание шумовых составляющих сигнала методом фильтрации. На рис.2в представлены уровневые картины яркости, соответствующие изображениям рис.2б после проведения фильтрации.

На рис. 3 представлены результаты оценок параметров турбулентности в поперечном сечении горизонтального струйного воздушного турбулентного потока. Начальная скорость потока на срезе сопла составляла 20 м/с. Число Рейнольдса по диаметру сопла составляло $6 \cdot 10^4$, сечение располагалось в 20 калибрах от среза сопла, y - координата, отсчитываемая от оси потока в вертикальном направлении. На рис. 3 показаны: 1- оценки относительной средней продольной скорости

$$\xi(y) = \langle u_x(y) \rangle / \langle u_x(0) \rangle,$$

2- относительной интенсивности нормальных турбулентных напряжений

$$\chi(y) = [\langle (u_x(y) - \langle u_x(y) \rangle)^2 \rangle + \langle (u_y(y) - \langle u_y(y) \rangle)^2 \rangle]^{1/2} / \langle u_x(0) \rangle,$$

3- относительной интенсивности касательных турбулентных напряжений

$$\rho(y) = [\langle (u_x(y) - \langle u_x(y) \rangle) \cdot (u_y(y) - \langle u_y(y) \rangle) \rangle]^{1/2} / \langle u_x(0) \rangle.$$

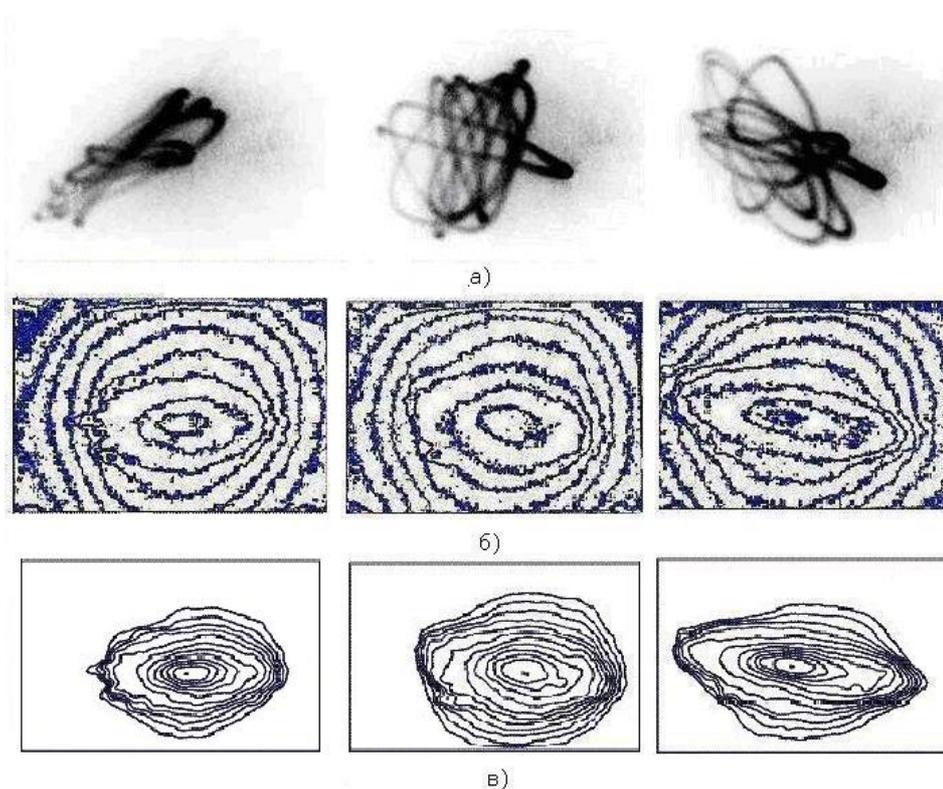


Рис 2. Цифровые изображения сигналов с различным временем аккумуляции

Вносились поправки, связанные с конечностью размеров изображения светового маркера и нелинейным характером взаимосвязи прогиба чувствительного элемента датчика и скорости набегающего потока [3].

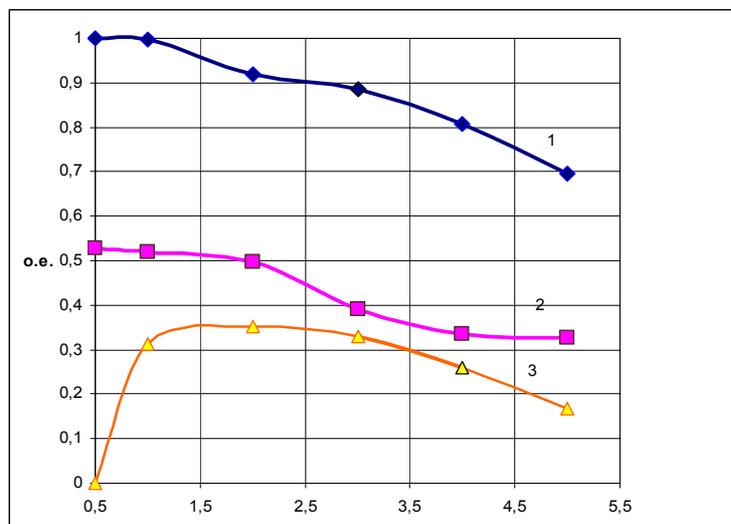


Рис.3. Конечные результаты измерений в реальном турбулентном течении.

При получении указанных оценок использовались как стандартные непараметрические процедуры, основанные на интегральных соотношениях для статистических моментов, так и более эффективные параметрические методики.

Полученные данные согласуются с имеющимися в литературе теоретическими и экспериментальными данными по течениям аналогичного типа [4], что свидетельствует о пригодности разработанного метода для практической диагностики турбулентности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Минобразования РФ (Т02-02.4-998)

Литература

1. Смирнов В.И., Янина Г.М. Расчет и проектирование лазерных анемометров. // М.: Моск. энерг. ин-т. 1996.
2. Бирюкова О.В. Меляков А.В., Смирнов В.И. Визуализация турбулентных пульсаций с помощью оптоволоконного датчика. Труды VII Международной научно-техн. конф. Оптические методы исследования потоков. М.: МЭИ. 2003.
3. Смирнов В.И. Методические погрешности лазерных измерений эйлеровых статистических моментов неоднородного турбулентного поля скорости. Измерительная техника. 2002. №7.
4. Смирнов В.И. Лазерная анемометрия турбулентных потоков. // Гл. 7 в кн. Б.С. Ринкевичюса "Лазерная диагностика потоков". М.: МЭИ. 1990. С. 235-272.

