

ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ
ДВУХКАНАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ДОПЛЕРОВСКИМ АНЕМОМЕТРОМ

Одним из важнейших направлений гидроаэродинамических исследований является изучение пространственной структуры турбулентных потоков, что требует разработки методов измерений всевозможных пространственных корреляций турбулентного поля, масштабов вихрей, структурных функций турбулентности и ряда других характеристик.

Оптическая доплеровская анемометрия [1] открывает широкие возможности экспериментального исследования пространственной структуры турбулентности, однако практическая реализация метода выявляет множество чисто технических трудностей, касающихся как вопросов разработки соответствующих оптических схем, так и вопросов радиоэлектронной обработки первичных сигналов.

Очевидное решение проблемы состоит в использовании двух или нескольких одноканальных систем доплеровских анемометров [2] с последующей взаимной корреляционной обработкой их выходных сигналов. Подобное решение нельзя признать оптимальным как в силу высокой стоимости лазерно-анемометрической аппаратуры, так и ввиду больших трудностей взаимной компоновки нескольких систем зондирующей и приемной оптики с обеспечением нужной ориентации векторов чувствительности различных каналов и сканированием точек измерений в различных направлениях. В связи с этим целесообразно представляется разработка специализированных измерителей пространственной структуры турбулентности.

При рассмотрении данной проблемы с точки зрения общих принципов оптической доплеровской анемометрии все анемометры можно подразделить на две большие группы в зависимости от ранга используемой статистики регистрируемого светового поля.

В анемометрах первой группы (рис. 1, а) [3] анализируются статистические свойства рассеянного светового поля второго порядка. Информацию о корреляции турбулентных пульсаций несут средние величины вида $E_1 E_2$, где E_1 и E_2 — поля световых волн, рассеянных в точках измерений 1 и 2. Эти схемы аналогичны по принципу своего действия звездному интерферометру Майкельсона [4]. Основная проблема измерителей такого типа состоит в обеспечении высокой эффективности фотосмещения рассеянных волн k_{s1} и k_{s2} на светочувствительной поверхности фотоприемника 3 (см. рис. 1, а). О разработке соответствующих согласующих устройств сообщалось в [5].

В анемометрах второй группы анализируются статистические свойства рассеянного светового поля четвертого порядка. Информацию о корреляции турбулентных пульсаций несут средние величины вида $I_1 I_2$, где I_1 и I_2 — интенсивности рассеянных в точках измерений 1 и 2 световых волн (рис. 1, б). Формирование средних величин вида $I_1 I_2$ осуществляется специальным устройством 4, в качестве которого

может быть использован, например, коррелятор. Такие схемы по принципу действия аналогичны интерферометру интенсивностей Брауна — Твисса [4], нашедшему широкое применение в радиоастрономии. В анемометрах этой группы используется некогерентный режим работы и рассеянное излучение собирается в большом телесном угле, что обеспечивает высокие отношения сигнала к шуму.

В данной работе приводится описание специализированной двухканальной оптической доплеровской системы, относящейся к анемометрам второй из названных групп и предназначенной

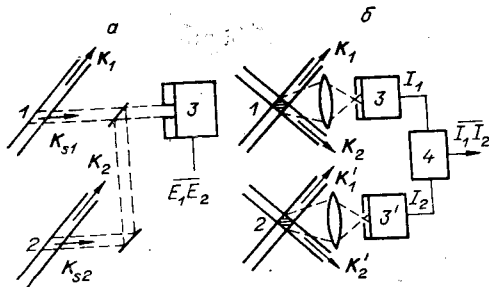


Рис. 1.

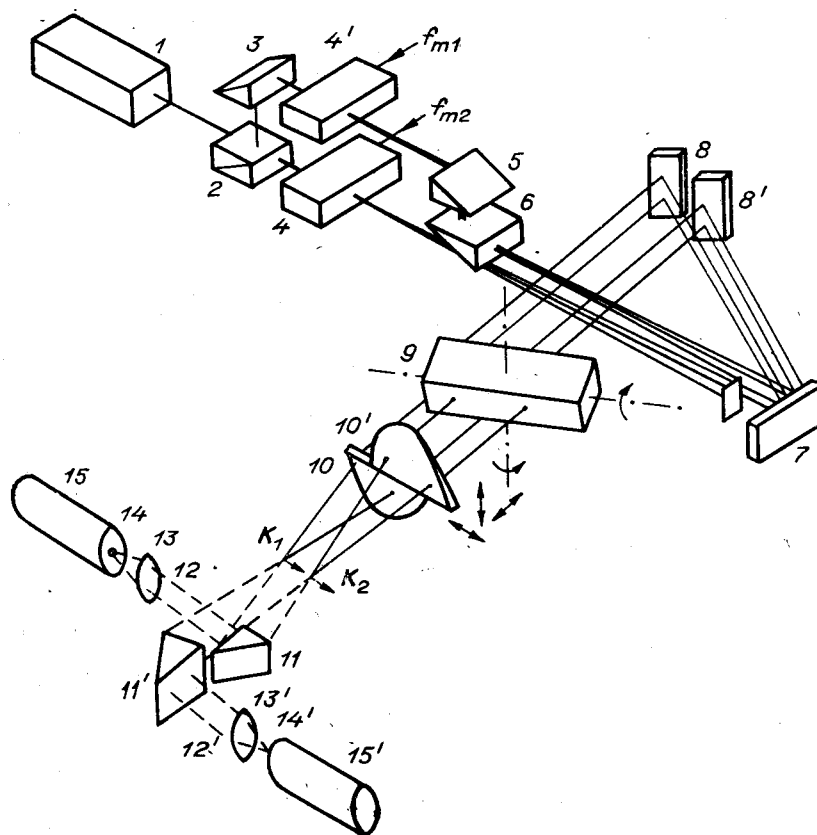


Рис. 2.

для измерения поля локальных скоростей и интенсивностей пульсаций, а также пространственной структуры турбулентного потока, в частности различных компонент тензора пространственной корреляции скорости.

Блок зондирующей и приемной оптики разработанной двухканальной системы представлен на рис. 2. Луч источника когерентного излучения 1 делится светоделительной пластинкой 2. Одна часть излучения попадает в ультразвуковой модулятор 4, вторая, отражаясь от зеркала 3, — в ультразвуковой модулятор 4'. Частоты модуляции f_{m1} и f_{m2} выбираются различными из соображения частотного разделения сигналов различных каналов. Для работы используются пучки, соответствующие нулевому и первому порядкам дифракции, остальные пучки диафрагмируются. Система зеркал 5—8, 8' формирует две пары параллельных зондирующих пучков. Система сканирования содержит плоскопараллельную пластину 9, вращающуюся вокруг оси симметрии, и полулинзы 10 и 10', перемещаемые друг относительно друга. Сканирование точки измерений достигается перемещением одной из полулинз на расстояние, соответствующее шагу измерения, и поворотом плоскопараллельной пластины на соответствующий угол, обеспечивающий перемещение верхней пары пучков до совпадения с отверстиями маски, укрепленной на передней поверхности полулинзы.

Такая конструкция системы сканирования позволяет путем несложной перестройки оптических элементов осуществлять перемещение точки измерения в любом из трех взаимно-ортогональных направлений при различной ориентации векторов чувствительности K_1 и K_2 1-го и 2-го каналов.

Приемная оптическая система имеет два канала, содержащих призмы 11, 11', апертурные диафрагмы 12, 12', объективы 13, 13', полевые диафрагмы 14, 14', фотоприемники 15, 15', и позволяет одновременно осуществлять раздельный прием света, рассеянного из двух измерительных объемов.

Сигналы с выходов двух фотоприемников 15 и 15' могут быть подвергнуты различной радиоэлектронной обработке с целью оценки параметров турбулентного потока. Например, может быть осуществлена демодуляция сигналов системами слежения за доплеровской частотой либо другими электронными устройствами, входящими в комплект обычных одноканальных оптических доплеровских анемометров. При этом последующая статистическая обработка демодулированных сигналов, являющихся аналогами пульсаций локальных скоростей в соответствующих точках, проводится стандартными методами.

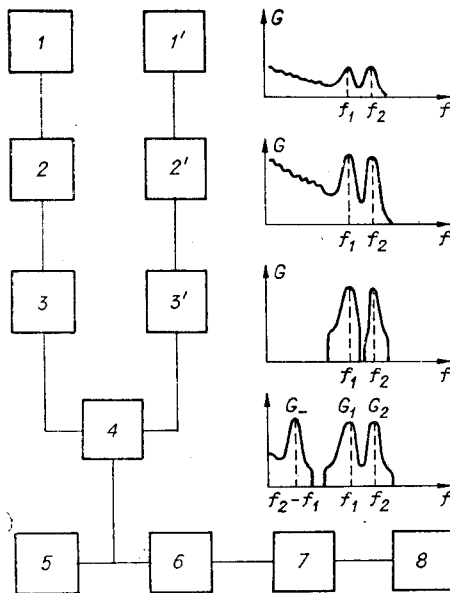


Рис. 3.

узкополосных компонент, соответствующих комбинационным частотам f_1 и f_2 . В данной работе для определения корреляции скоростей использовались только три компоненты $G_1(f)$, $G_2(f)$ и $G_-(f)$, схематически изображенные на нижнем графике рис. 3. Компоненты $G_1(f)$ и $G_2(f)$ соответствуют спектрам сигналов 1-го и 2-го каналов, а $G_-(f)$ — компоненте спектра произведения этих сигналов на разностной частоте $f_2 - f_1$.

Сущность примененной методики кратко можно изложить, опираясь на результаты, полученные в [4, 6], согласно которым спектры $G_1(f)$ и $G_2(f)$ по форме подобны функциям плотности вероятности проекций локальных скоростей u_1 и u_2 на K_1 и K_2 . В частности, если K_1 и K_2 ориентированы вдоль осей i и j некоторой системы координат и $|K_1| = |K_2| = K$, то для плотностей вероятности W i -й составляющей скорости потока в первой точке u_1^i и j -й составляющей во второй точке u_2^j , пренебрегая аппаратным уширением, можно написать

$$W(u_1^i) = C_1 G_1(f) \Big|_{f=f_{m1} - (K/2\pi)u_1^i}, \quad (1)$$

$$W(u_2^j) = C_2 G_2(f) \Big|_{f=f_{m2} - (K/2\pi)u_2^j}, \quad (2)$$

где C_1, C_2 — нормировочные коэффициенты.

По аналогии, используя аргументацию работ [4, 6], можно показать, что компонента $G_-(f)$ в этом случае подобна плотности вероятности разности скоростей $u_2^j - u_1^i$, т. е.

$$W(u_2^j - u_1^i) = C_3 G_-(f) \Big|_{f=f_{m2} - f_{m1} - (K/2\pi)(u_2^j - u_1^i)}, \quad (3)$$

C_3 находится из условия нормировки $W(u_2^j - u_1^i)$.

Легко показать, что второй центральный момент μ_- спектра $G_-(f)$ определяется так:

$$\mu_- = (K/2\pi)^2 [\langle (u_1^i)^2 \rangle + \langle (u_2^j)^2 \rangle - 2 \langle u_1^i u_2^j \rangle]. \quad (4)$$

Введя соответствующие обозначения, получим

$$\mu_- = \mu_1 + \mu_2 - 2 \sqrt{\mu_1 \mu_2} R_{12}^{ij}, \quad (5)$$

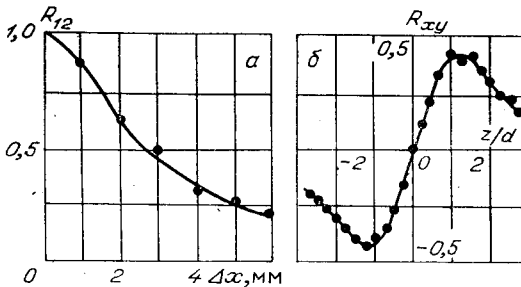


Рис. 4.

В данной работе использовалась система обработки двух доплеровских сигналов и оценки параметров турбулентности, функциональная блок-схема которой показана на рис. 3. Принцип действия этой системы основан на прямом спектральном анализе двух доплеровских сигналов и анализе их спектра смещения.

Доплеровские сигналы с фотоприемников I, I' каждого канала измерений усиливаются широкополосными усилителями $2, 2'$, фильтруются блоками полосовых перестраиваемых фильтров $3, 3'$ и подаются на вход электронного смесителя доплеровских сигналов 4 . Преобразование спектральной плотности сигналов 1-го и 2-го каналов со средними частотами f_1 и f_2 на каждом этапе схематически проиллюстрировано верхними тремя графиками на рис. 3.

Спектральная плотность сигнала на выходе смесителя оценивается по обычной схеме [6], включающей селективный микровольтметр 6 , квадратирующее и осредняющее устройство 7 и самописец 8 . Для оперативного контроля за ходом измерений применяется панорамный спектроанализатор 5 . Спектр выходного сигнала смесителя в общем случае содержит набор

откуда коэффициент корреляции скоростей u_1^i и u_2^j равен

$$R_{12}^{ij} = (\mu_1 + \mu_2 - \mu_-)/2 \sqrt{\mu_1 \mu_2}. \quad (6)$$

Результаты контрольных измерений, проведенных по методике, основанной на соотношении (4), в осевой области турбулентной струи [6] на расстоянии 20 калибров от среза сопла представлены на рис. 4, а и б. На рис. 4, а показана зависимость коэффициента корреляции продольных составляющих скорости от расстояния между точками измерений при их разнесении вдоль оси потока, на рис. 4, б — зависимость коэффициента корреляции продольных и поперечных пульсаций скорости в одной и той же точке от относительного расстояния до оси потока.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности практического использования разработанного двухканального доплеровского измерителя в гидродинамических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ринкевичюс Б. С. Лазерная анемометрия. — М.: Энергия, 1978.
2. Morton J. B., Clark W. H. Measurement of Two-Point Velocity Correlation in a Pipe Flow Using Laser Anemometers. — J. Phys. E: Scientific Instruments, 1971, vol. 4, p. 36—44.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970.
4. Ринкевичюс Б. С., Смирнов В. И. Оптические доплеровские измерения пространственной структуры турбулентности. — Труды МЭИ, 1979, вып. 422.
5. Гуменник Е. В., Смирнов В. И. Согласование рассеянных световых пучков доплеровского измерителя пространственной структуры турбулентности. — Труды МЭИ, 1979, вып. 422.
6. Ринкевичюс Б. С., Смирнов В. И. Оптический доплеровский метод исследования турбулентных потоков с использованием спектрального анализа сигнала. — Квант. электроника, 1973, № 2 (14).

Поступило в редакцию 13 января 1981 г.;
окончательный вариант — 8 декабря 1981 г.

УДК 532.574

В. А. БЕЗУГЛОВ, В. А. МОГИЛКО, Ю. А. ЦЕРБИНА
(Москва)

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕНОСА ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ С ПОМОЩЬЮ ЛДИС

В последнее время интенсивно развивается новое перспективное направление в теории турбулентности, связанное со статистическим описанием связи величин, характеризующих турбулентное движение сред [1, 2]. Эта связь выражается через совместные функции плотности распределения вероятности (СФПВ). Теоретические модели являются полуэмпирическими и поэтому требуют проведения систематических экспериментальных исследований. Большие надежды здесь связываются с использованием ЛДИС. К сожалению, получение аналогового сигнала скорости в многочастичном режиме ЛДИС в условиях перемежающейся и сильно флуктуирующей концентрации примеси сопряжено с большими трудностями, носящими иногда принципиальный характер. В данной работе предлагается метод измерения СФПВ скорости и концентрации примеси с помощью ЛДИС. Метод не требует преобразования доплеровской частоты в напряжение и позволяет обойтись серийными приборами. Первые измерения СФПВ при помощи ЛДИС были описаны в работе [3].

Предлагаемая методика измерения СФПВ концентрации и скорости сохраняет преимущества методики [3] и вместе с тем позволяет в значительной мере сократить время измерений и объем обработки результатов. Она является развитием следующей известной идеи. Если на входы X и Y осциллографа поданы два случайных сигнала, то электронный луч выписывает на экране некоторые траектории. Нетрудно видеть, что суммарное время пребывания электронного луча в окрестности любой точки экрана за достаточно длительный период наблюдения есть величина СФПВ этих случайных сигналов. Случайная функция скорости сканируется по амплитуде, что для сигнала ЛДИС эквивалентно сканированию по частоте, а яркость луча осциллографа включается специальным устройством в моменты времени, когда доплеровская частота попадает в полосу пропускания спектроанализатора.

Блок-схема регистрирующей части экспериментальной установки для измерения СФПВ скорости и концентрации показана на рис. 1. Она состоит из светопреем-