

менно такая ориентация призмы имеет преимущество, когда излучение лазера линейно поляризовано. В целях уменьшения световых потерь вектор поляризации обычно ориентируется перпендикулярно плоскости падения лучей (см. рис. 1, а), и тогда призма, ориентированная как показано на рис. 1, б, вносит минимальные изменения в состояние поляризации отраженных пучков [2], а следовательно, не влияет на контраст интерференционных полос. В этом смысле во второй схеме (см. рис. 2, а) предпочтительнее ориентация призмы, показанная на рис. 2, г. Если направления поляризации в плечах интерферометра отличаются, то соответственно должны отличаться ориентации уголкового призм.

Анализ возможных положений уголкового призм в интерферометре показал, что при оценке пределов измерения следует принимать во внимание рассеяние света на ребрах призм и соответствие между ориентацией призм и направлением поляризации. Если на эффективность работы интерферометра влияют оба фактора, то в отношении непроеизводительных потерь света предпочтительнее схема в одной плоскости (см. рис. 1, а), если только второй, то схема в двух плоскостях (см. рис. 2, а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленкова Г. А. Анализ и сравнение угловых сканирующих интерферометров // Автометрия.— 1981.— № 1.
2. Ленкова Г. А. Поляризационные явления в лазерных интерферометрах перемещений // Автометрия.— 1975.— № 5.

Поступила в редакцию 19 августа 1987 г.

УДК 535.8

П. Я. БЕЛОУСОВ, Ю. Н. ДУБНИЦЕВ, В. Г. МЕЛЕДИН, В. А. ПАВЛОВ

(Новосибирск)

ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ АНЕМОМЕТР С ВРЕМЕННОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ ОРТОГОНАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ВЕКТОРА СКОРОСТИ

Одновременное измерение двух ортогональных компонент вектора скорости методами лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) осуществляется обычно оптическими устройствами, имеющими двухканальную структуру. Мощность входного лазерного излучения делится пополам между каналами. Разделение оптических сигналов, несущих информацию о компонентах вектора скорости, выполняется различными способами [1], использующими поляризацию или спектральный состав лазерного излучения. Применяется также частотная и пространственная селекция оптических сигналов.

Недостатком этих способов является неэффективное использование мощности лазерного излучения, поскольку на оптический канал, измеряющий одну компоненту скорости, приходится менее половины мощности лазерного источника. Указанный недостаток особенно сильно про-

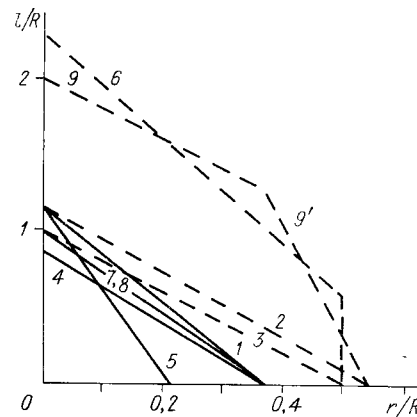


Рис. 3

является при измерениях скорости в режиме обратного рассеяния, когда интенсивность светового сигнала падает в среднем на три-четыре порядка по сравнению с интенсивностью света, рассеянного вперед. Уменьшение полезной мощности лазерного пучка в каждом оптическом канале приводит к снижению отношения сигнал/шум и соответственно ограничению дистанции, на которой возможны измерения.

Более полное использование энергии лазерного излучения достигается в измерительных устройствах с временным разделением оптических дистанционных делителей оптических каналов, каждый из которых выполнен по дифференциальной схеме. В этом устройстве используется временное разделение сигналов в двух оптических каналах, измеряющих ортогональные компоненты вектора скорости. Коммутация сигналов осуществляется внутри интервала, соответствующего времени пересечения зондирующего интерференционного поля одной рассеивающей частицей. Изображение поля формируется в рассеянном свете на фотоприемнике, выполняется преобразование фотоэлектрического сигнала в параллельную последовательность счетных и строб-импульсов и осуществляется измерение частоты сигнала по фиксированному числу счетных импульсов синхронно с переключением каналов.

Недостатком устройства является снижение точности измерений вследствие близости частоты коммутации каналов к измеряемой доплеровской частоте. Для уменьшения этой погрешности в алгоритм обработки введено «мертвое» время (около 0,25 длительности сигнала от одной частицы), в течение которого измерение не производится. В результате не используется примерно четверть энергии лазерного излучения. Структура оптического устройства состоит из двух идентичных интерферометрических каналов, согласованных с последовательно расположенными расщепителями и призмами, что ведет к дополнительным потерям энергии лазерного излучения и снижению надежности конструкции, а также к сложности юстировки. Наконец, при таком схемном решении измерительного устройства невозможны измерения в многочастичном режиме, когда в зондирующем оптическом поле одновременно находится несколько рассеивающих частиц.

Одновременное измерение двух компонент вектора скорости без деления мощности лазерного излучения между каналами возможно в схемах ЛДА с фотосмещением боковых полос фурье-спектра оптического сигнала [3]. Однако в этих схемах сложно применять частотную модуляцию световых пучков с целью определения знака измеряемой проекции скорости.

В настоящей работе описано когерентно-оптическое устройство для дистанционных измерений вектора скорости потоков в режиме обратного рассеяния. Разработаны две модификации измерителя: в одной из них применяется акустооптическое переключение измерительных каналов, в другой — электрооптический коммутатор. В каждом канале используется полная мощность лазерного излучения.

Отличительная особенность этих устройств состоит в повышении точности за счет автоматического согласования временной селекции компонент вектора скорости с пространственным распределением рассеивающих частиц в потоке и улучшении помехоустойчивости электронной системы обработки сигнала [4].

На рис. 1 показана оптическая схема измерительного устройства, в котором применяется акустооптическая коммутация измерительных каналов. Устройство содержит лазер 1 и последовательно расположенные по ходу лазерного луча фазовую пластинку 2, поворотные призмы 3,

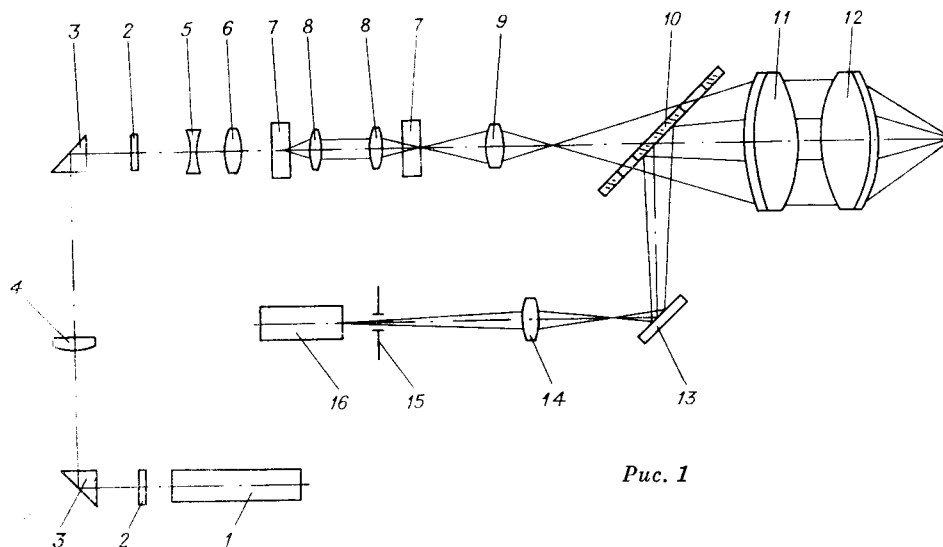


Рис. 1

линзы 4—6, два ортогонально ориентированных акустооптических модулятора 7, между которыми помещены линзы 8 и 9, зеркало с диафрагмой 10, объективы 11 и 12. На пути рассеянного пучка, ограниченного апертурой линз 11 и 12 и отраженного зеркалом 10, последовательно установлены поворотное зеркало 13, микрообъектив 14, полевая диафрагма 15 и фотоприемник 16. Используются серийные акустооптические модуляторы бегущей волны типа МЛ-201, работающие в брэгговском режиме на частоте 80 МГц. Направления ультразвуковых волн в модуляторах ортогональны и соответствуют ориентации измеряемых компонент вектора скорости. Диафрагмы в зеркале 10 расположены во взаимно ортогональных плоскостях и ограничивают световые пучки, дифрагированные в модуляторах соответственно в 0-й и -1-й порядки дифракции. В качестве фотоприемника применен фотоэлектронный умножитель. Фазовые пластинки 2 служат для согласования поляризации лазерного луча с элементами оптической схемы. К фотоприемнику (Ф) (рис. 2) подключен двухканальный измеритель доплеровского сдвига частоты, содержащий формирователь 1 счетных и строб-импульсов, к выходам которого параллельно подсоединены два счетчика счетных импульсов 2 и 3. К строб-импульсному выходу формирователя подключен дополнительный счетчик 4. Строб-импульсные входы счетчиков подсоединены к выходу формирователя через управляемый ключ 5, который связан с акустооптическими модуляторами через управляемый ключ 6 (коммутатор оптических каналов), переключающий питание акустооптических модуляторов от источника модулирующего напряжения 7.

Устройство работает следующим образом. Луч лазера 1 (см. рис. 1) после прохождения фазовых пластинок 2, поворотных призм 3 и согласующих объективов 4—6 направляется на модулятор 7, бегущая ультразвуковая волна в котором параллельна плоскости чертежа. Когда на этот модулятор поступает модулирующее напряжение от генератора 7 (см. рис. 2), на выходе модулятора формируются два световых пучка, дифрагированных в 0-й и -1-й порядки. Расщепленные пучки проходят последовательно через фурие-сопряженные объективы 8, второй модулятор 7 (см. рис. 1), согласующий объектив 9, диафрагмы в зеркале 10 и объективами 11 и 12 направляются в исследуемую область потока, скорость которого необходимо измерить. Пересекаясь в потоке, лазерные пучки образуют интерференционное поле с известной периодической структурой, изображение которого в рассеянном свете, ограниченное полевой диафрагмой 15, формируется последовательностью элементов 12, 11, 10, 13, 14 на светочувствительной поверхности фотоприемника 16. Напряжение с выхода фотоприемника поступает в систему обработки сигнала

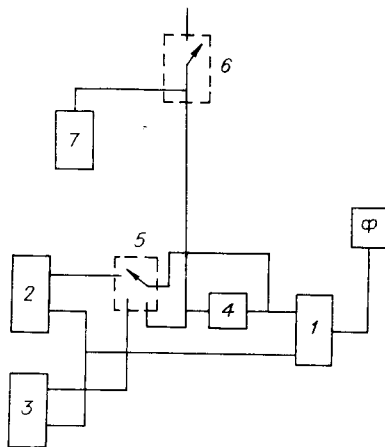


Рис. 2

из выходов формирователя 1 (см. рис. 2) образуется последовательность строб-импульсов, длительность которых равна длительности входных радиоимпульсов, а на другом выходе формируется последовательность счетных импульсов, частота которых равна частоте заполнения радиоимпульсов. Счетные импульсы параллельно подаются на счетчики 2 и 3. Строб-импульсы поступают на счетчики через управляемый ключ 5 и задают время счета. Параллельно строб-импульсы поступают на дополнительный счетчик (например, по модулю N), который формирует сигнал, переключающий управляемые ключи 5 и 6 через каждые N строб-импульсов. При уменьшении N частота выборки информации для каждой компоненты скорости увеличивается, достигая максимального значения при $N=2$, когда управляющий сигнал формируется дополнительным счетчиком по поступлении каждого четного строб-импульса.

В случае многочастичного режима работы амплитуда электрического доплеровского сигнала, как известно [1], имеет рэлеевское распределение. Поэтому выбором порога чувствительности режим работы устройства может быть переведен в квазиодночастичный. Другой путь — уменьшение размера зондирующего интерференционного поля до величины, при которой в измерительном объеме в среднем находится не более одной частицы. Таким образом, и в многочастичном режиме действие предлагаемого устройства, описанного выше, обеспечивает оптимальное использование энергии лазерного излучения и высокую точность измерений. Поскольку переключение измерительных каналов происходит в моменты, когда уровень сигнала нулевой, коммутационные помехи отсутствуют. Частота коммутации определяется концентрацией и скоростью движения рассеивающих частиц. Эффективность использования энергии лазерного излучения повышается за счет устранения «мертвого» времени измерений.

На рис. 3 приведена оптическая схема измерительного устройства, в котором осуществляется электрооптическая коммутация каналов, измеряющих ортогональные компоненты вектора скорости. Устройство содержит лазер 1 и последовательно расположенные по ходу луча фазовые пластинки 2, линзу 3, поворотные призмы 4, линзы 6, 7, призму-кубик 8. На пути расщепленных призмой 8 лазерных пучков последовательно установлены призмы 4, 9, фазовые пластинки 2, акустооптические модуляторы 10, линзы 11, призма 12 и объектив 13. В области пересечения ортогонально поляризованных световых пучков помещена поляризационная призма Волластона 14 и далее по ходу пучков зеркало 15 с диафрагмами на пути расщепленных призмой 14 пучков, объективы 16 и 17. Последовательно по ходу рассеянного светового пучка, ограниченного апертурой этих объективов и отраженного зеркалом 15, установлены поворотное зеркало 18, микрообъектив 19, полевая диафрагма 20 и фото-

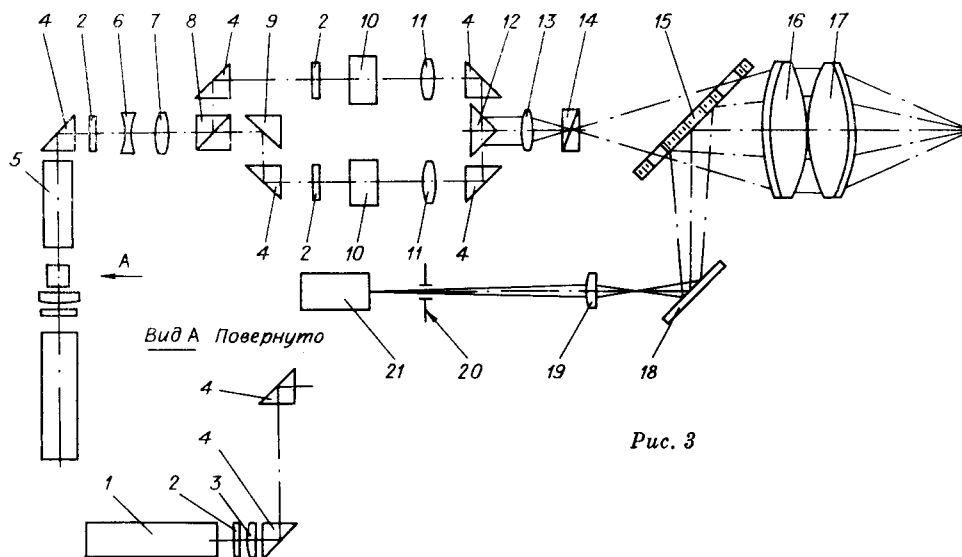


Рис. 3

приемник 21, к выходу которого подключена система обработки сигнала (см. рис. 2). В этой системе управляемый ключ 6 коммутирует цепь питания от источника полуволнового напряжения 7 к электрооптическому модулятору, выполняющему функцию переключателя поляризации лазерного луча.

В измерительной схеме на рис. 3 оптический блок, образованный элементами с призмой 8 на входе и призмой 12 на выходе, выполняет функцию расщепителя лазерного луча, на выходе которого формируются два параллельных ортогонально поляризованных лазерных пучка, разность частот которых задается акустооптическими модуляторами 10. Переключатель поляризации 5 выполнен на основе стандартного электрооптического модулятора МЛ-102, управляемого полуволновым напряжением. Поляризованный луч лазера 1 после прохождения переключателя поляризации 5 и согласующих элементов 2—7 лучевым расщепителем разделяется на два параллельных ортогонально поляризованных луча, разность частот которых равна 5 МГц (частота напряжений, поступающих на акустооптические модуляторы 10 типа МЛ-201, работающих в брэгговском режиме, составляет соответственно 82 и 77 МГц). Далее объективом 13 ортогонально поляризованные пучки пересекаются либо скрещиваются в области, где установлена поляризационная призма Волластона 14. Поскольку расщепляющий угол призмы 14 выбран равным углу между входными пучками, ортогонально поляризованные лучи на выходе призмы оказываются при переключении поляризации направленными попарно в ортогональных плоскостях.

Выходящие из поляризационной призмы пучки после прохождения направляющего объектива 16 попарно последовательно во времени формируют в исследуемой среде пространственно совмещенные зондирующие интерференционные поля с ортогонально ориентированными интерференционными полосами. Для согласования поляризаций на пути выходящих из призмы пучков могут устанавливаться дополнительные фазовые пластинки. Изображение зондирующего интерференционного поля в рассеянном свете формируется на фотоприемнике 21 (фотоэлектронный умножитель) последовательно расположенными объективами 17, 16, поворотными зеркалами 15, 18 и микрообъективом 19. Сформированное изображение ограничивается полевой диафрагмой 20.

Блок обработки сигнала действует так же, как и в системе с акустооптической коммутацией измерительных каналов. Отличие заключается в том, что управляемый ключ 6 (см. рис. 2) коммутирует цепь питания переключателя поляризации 5 (см. рис. 3).

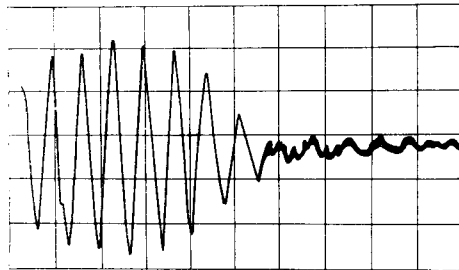


Рис. 4

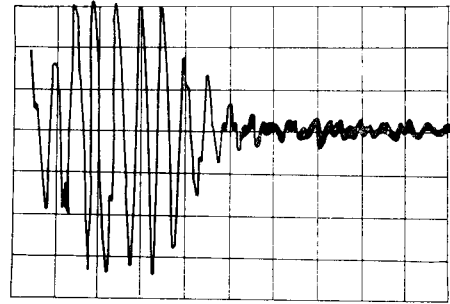


Рис. 5

энергетические потери, облегчает юстировку и повышает надежность. Система с электрооптическим переключателем поляризации позволяет работать на более высоких частотах коммутации, чем система с акустооптическим переключателем.

Двухканальный электронный блок обработки сигналов счетно-импульсного типа с коммутационной логикой выполнен в конструктиве КАМАК. Для повышения помехоустойчивости в системе обработки сигнала применен четырехпороговый алгоритм формирования счетных и строб-импульсов. Электронная система позволяет измерять в реальном масштабе времени концентрацию частиц и контролировать пространственную структуру зондирующего оптического поля.

Основные технические характеристики. Коэффициент преобразования частота — скорость $165 \text{ кГц} \cdot \text{с/м}$; измерительный объем (при измерениях в воде на расстоянии $0,7 \text{ м}$) — эллипсоид с полуосями $15, 15$ и 300 мкм ; полоса доплеровских частот 10 МГц ; максимальная частота коммутации измерительных каналов 300 кГц ; наибольшая измеряемая концентрация 10^5 частиц/с; режим работы автономный; обмен с ЭВМ — через магистраль КАМАК; режимы измерений — непрерывные измерения, буферирование, ручная коммутация измерительных каналов, автоматическая коммутация измерительных каналов, контроль коэффициента заполнения сигнала. Измеритель выдает информацию о скорости в цифровом коде и аналоговом виде. Адаптивность измерительной системы к распределению рассеивающих частиц в гидросреде позволяет исключить коммутационные помехи.

Экспериментально установлен факт существенного повышения контрастности сигнала при измерениях в режиме обратного рассеяния в длинноволновой спектральной области видимого диапазона излучения. На рис. 4 и 5 в качестве примера приведены осциллограммы доплеровских сигналов, полученных на описанном выше измерительном устройстве после гетеродинного преобразования в низкочастотную область, соответственно для аргонового ($\lambda = 0,48 \text{ мкм}$, мощность излучения 1 Вт , дистанция в гидросреде $0,7 \text{ м}$, полоса частот 3 МГц , развертка $2 \cdot 10^{-5} \text{ с/кл.}$) и криптонового ($\lambda = 0,65 \text{ мкм}$, мощность излучения $0,2 \text{ Вт}$, дистанция в гидросреде $1,5 \text{ м}$, полоса частот $1,5 \text{ МГц}$) лазеров. Гидросредой являлась обычная водопроводная вода в канале большого сечения. Спектральная зависимость показателя ослабления γ водопроводной воды в видимом диапазоне излучения оказалась сильной ($\gamma = 3$ для $\lambda = 0,48 \text{ мкм}$ и $\gamma = 0,9$ для $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$). Повышение отношения сигнал/шум в длинноволновой области оптического диапазона объясняется не только дисперсией показателя ослабления, но и свойствами неоднородной гидросреды как пространственно-частотного фильтра, влияющего

на структуру оптического сигнала. Эти свойства приводят к размытию изображения зондирующего поля в рассеянном свете. Гидросреда фильтрует высокочастотные компоненты углового спектра оптического сигнала. Как известно [4], флуктуации фазы светового пучка при распространении в неоднородной среде уменьшаются с ростом длины волны. Повышение плотности потока энергии в зондирующем оптическом поле и выбор лазерного излучения с большей длиной волны ведут к уменьшению эффекта размытия и повышению контрастности оптического сигнала в ЛДА.

Авторы выражают благодарность С. Ф. Шульженко и И. А. Похальчуку за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии.— М.: Наука, 1982.
2. Банен, Келлер. Лазерный доплеровский многокомпонентный анемометр на основе электрооптического модулятора // Приборы для научн. исслед.— 1984.— № 7.
3. Белоусов П. Я., Дубищев Ю. Н. Лазерное устройство для измерения скорости движения поверхностей // Квантовая электрон.— 1986.— Т. 13, № 12.
4. Бабак Э. В., Иванов П. Д., Котлецов В. Н., Родионов С. А. Подводная фотография.— Л.: Машиностроение, 1969.

Поступила в редакцию 13 мая 1987 г.

УДК 535.317.1

Э. И. ГЕЛЬФЕР, В. Г. ЗАКИН, Е. И. МИНДЛИНА
(Горький)

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВУМЕРНОГО ОБЪЕКТА В СХЕМЕ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАЙКЕЛЬСОНА

Один из методов коррекции изображения некогерентного оптического источника, наблюдаемого сквозь слой случайно-неоднородной атмосферы, основывается на использовании модифицированного интерферометра Майкельсона (рис. 1), называемого также в литературе сдвиговым или призмным интерферометром [1—4]. Он применяется для восстановления поперечной комплексной функции когерентности (КФК) неискаженного светового поля на приемнике. При этом предполагается, что в отсутствие искажений, вносимых средой распространения, КФК поля на приемнике и интенсивность в плоскости источника связаны преобразованием Фурье, что справедливо для удаленного квазимонохроматического пространственно-некогерентного источника.

В настоящей работе исследуется восстановление двумерных объектов сложной формы при помощи модифицированного интерферометра Майкельсона. Математический анализ алгоритма восстановления позволил обнаружить некоторые существенные особенности и определить оптимальные условия восстановления. В результате проведенного исследования получено хорошее восстановление сложных двумерных объектов при численном моделировании процессов искажения и восстановления.

1. Будем считать, что атмосфера вносит только фазовые искажения в проходя-

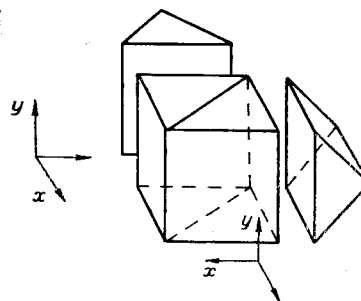


Рис. 1