

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 535.016

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ ОБЪЕКТОВ СО СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Г.Н. ДОЛЯ, А.М. КРЮКОВ, В.Г. МУДРИК

Проведен анализ диаграмм рассеяния когерентного светового излучения на световозвращающих покрытиях. Изложены особенности реализации прямого, инверсного и двойного дифференциальных методов лазерной доплеровской анемометрии, получены выражения для разностной частоты доплеровских сдвигов взаимодействующих волн. Приведены результаты экспериментального исследования указанных методов на лабораторной установке.

Ключевые слова: дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия, световозвращающее покрытие.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Лазерные методы дистанционного зондирования в технике и экологии – интенсивно развивающаяся область измерительной техники. Это связано с тем, что использование лазерных источников излучения позволяет на качественно новом уровне реализовывать традиционные оптические методы, а также создавать принципиально новые методы измерения [1, 2]. Показательным примером такого использования лазеров можно считать создание лазерных доплеровских анемометров (ЛДА), имеющих важное практическое значение, например, для диагностики потоков жидкостей и газов, состояния турбулентности атмосферы и т.д. [3–5]. При широком разнообразии схем практической реализации ЛДА интерес представляют дифференциальные схемы измерений, основанные на измерении разности доплеровских сдвигов частот взаимодействующих лучей, распространяющихся в пространстве по различным направлениям по отношению к движущемуся объекту.

Однако возможности применения таких методов часто бывают ограничены малым значением принимаемой мощности излучения, рассеянного диффузно-отражающим объектом. Для преодоления такого рода трудностей, связанных с малым отношением сигнал/шум на выходе измерительного преобразователя, в ряде случаев оказывается возможным нанесение световозвращающего покрытия (СВП) (retroreflecting sheet), состоящего из совокупности микропризм-тетраэдрических ретрорефлектов либо микростеклошариков, характерные размеры которых составляют нескольких десятков микрометров [6]. Так как диаграмма рассеянного лазерного излучения на такого рода поверхностях имеет свои специфические особенности [7], то представляет интерес рассмотреть с их учетом возможные реализации дифференциальных схем ЛДА, что и является предметом данной работы.

Цель статьи – исследование особенностей и установление закономерностей реализации методов и схем дифференциальной ЛДА при зондировании объектов со СВП.

Для определенности будем рассматривать СВП на основе микростеклошариков, хаотически расположенных на поверхности (рис. 1) и имеющих примерно одинаковые размеры порядка 50 мкм. Диаграмма рассеяния когерентного светового излучения на совокупности таких элементов в дальней зоне дифракции представляет собой хаотическую совокупность локальных максимумов, описываемых функцией $f(U)$, промодулированной регулярной функцией $F(U)$ [8]. Вид функции $F(U)$ определяется закономерностями дифракции на одном элементе круглой формы (светлая точка на рис. 1), а вид функции $f(U)$ определяется количеством освещенных элементов и характером их текущего расположения на зондируемой поверхности в пределах освещенной области. Характерное распределение локальных максимумов (спеклов) $f(U)$ в пределах максимума нулевого порядка функции $F(U)$ получено путем фоторегистрации и представлено на рис. 2. Основная мощность рассеянного излучения содержится в пределах именно этого пятна с угловыми размерами θ порядка единиц градусов.

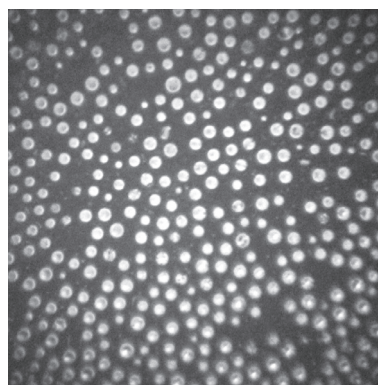


Рис. 1. Структура СВП

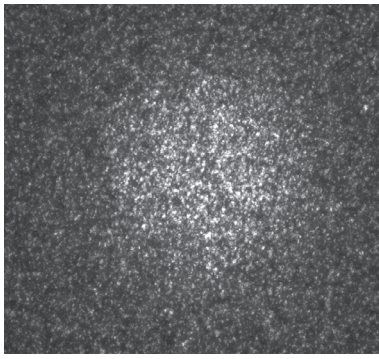


Рис. 2. Распределение спеклов

Даже при нормальном падении плоской монохроматической волны с циклической частотой f на поверхность движущегося объекта со СВП при условии направления движения вдоль этой поверхности со скоростью v (рис. 3), лучи в пределах диаграммы направленности, рассеянные в направлениях θ_1, θ_2 , отличных от нормального, будут иметь частотные сдвиги $\Delta f(\theta_1), \Delta f(\theta_2)$, зависящие от направления рассеяния в соответствии с эффектом Доплера.

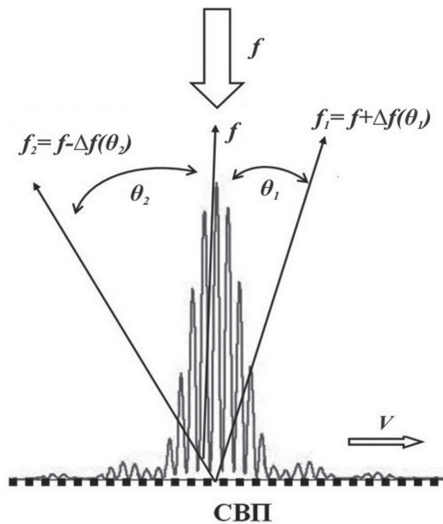


Рис. 3. Лучи, рассеянные в пределах диаграммы направленности

Рассмотрим далее более детально особенности различных оптических схем реализации дифференциальной ЛДА, следуя терминологии использованной в [2].

1. ПРЯМОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД

Пусть зондирующие лучи A и B падают на элемент поверхности СВП, движущийся в пространстве со скоростью v , в плоскости, содержащей лучи A и B , как это показано на рис. 4. В направлении A распространяется электромагнитная волна, электрическая составляющая которой имеет комплексное значение \underline{E}_A , а фаза меняется во времени по гармоническому закону с циклической частотой f . При отражении от элемента движущейся поверхности частота волны меняется в соответствии с законом Доплера [3, 8]:

$$f_A = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \alpha}{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \alpha \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \varphi \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \alpha - \cos \varphi) \right], \quad (1)$$

где углы падения α и рассеяния φ определены в соответствии с рис. 4, а скорость движения v предполагается значительно меньшей скорости света c .

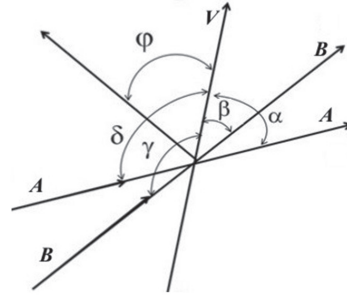


Рис. 4. Схема хода зондирующих лучей

Аналогичным образом может быть записано выражение для частоты волны \underline{E}_B после отражения её от поверхности:

$$f_B = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \beta}{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \beta \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \varphi \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \beta - \cos \varphi) \right]. \quad (2)$$

Эти две волны, рассеянные в направлении φ , при детектировании формируют электрический ток, сила которого пропорциональна интенсивности суммарного поля:

$$J \propto |\underline{E}_\Sigma|^2 = |\underline{E}_A + \underline{E}_B|^2 = |\underline{E}_A|^2 + |\underline{E}_B|^2 + \underline{E}_A \underline{E}_B^* + \underline{E}_A^* \underline{E}_B. \quad (3)$$

В правой части этого равенства первые два слагаемых создают постоянное значение силы тока при усреднении при детектировании по времени, значительно превышающем период световых колебаний $T \gg 1/f$. Частота колебаний третьего слагаемого определяется соотношением

$$\Delta f = f - f_B = \frac{fv}{c} (\cos \alpha - \cos \beta), \quad (4)$$

а частота биений, описываемых четвертым слагаемым, отрицательна, поэтому в дальнейшем рассматриваться не будет (заметим, что модуль ее также определяется выражением (4)).

Соотношение (4) отражает тот известный факт, что разностная частота Δf доплеровских сдвигов взаимодействующих волн может быть использована для определения той составляющей скорости движения объекта, которая лежит в плоскости взаимодействующих волн. Эта величина зависит также от условий пространственного расположения взаимодействующих волн по

отношению к вектору скорости. Отметим также, что Δf не зависит от угла φ .

Сформулированные выше закономерности проверялись экспериментально на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 5.

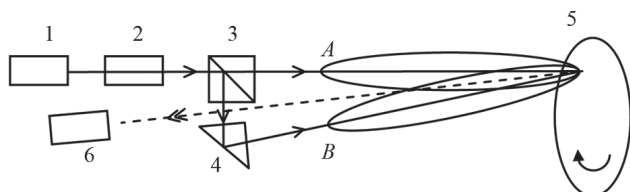


Рис. 5. Схема реализации прямого дифференциального метода

Излучение гелий-неонового лазера 1 (типа ЛГ-212) через коллиматор 2 направлялось на светоделительный куб 3, в результате чего с помощью также призмы 4 формировались зондирующие лучи A и B. Эти лучи подавались затем на вращающийся диск 5, на поверхность которого было нанесено СВП на основе микростеклошариков (см. рис. 1). Угловое рассогласование лучей A и B выбиралось таким образом, чтобы оно было меньше угловой величины нулевого порядка дифракции лазерного излучения на СВП, т.е. $\alpha - \beta < \theta$ (рис. 2, 3).

Таким образом на фотоприемник 6 (фотоэлектронный умножитель ФЭУ-28) попадало суммарное излучение (получаемое в результате отражения лучей A и B), формируя его выходной сигнал, частота которого определяется в соответствии с соотношением (4). Этот сигнал затем подавался на линейный вход звуковой карты компьютера и анализировался с помощью программы *Cool Edit*. Можно сказать, что в этом случае использовался активный интерферометр «на передачу» и одноканальный прием.

Характерные спектрограммы фототока приведены на рис. 6, 7. Положение максимумов на спектрограммах соответствует частотам разностных доплеровских сдвигов (см. (4)) и может быть использовано для определения скорости движения объекта V. Так, для начального положения точки сведения лучей (кривая 1 рис. 6) наблюдается максимум спектрограммы в области 4 кГц. При смещении точки сведения лучей по поверхности диска в радиальном направлении от центра при неизменной угловой скорости увеличивалась линейная скорость v, что приводило к адекватному смещению вправо положения максимума на спектрограмме в область 8 кГц (кривая 2).

В случае точного совмещения лучей отношение сигнал/шум составляло порядка 30 дБ (кривая 1, рис. 7). Однако при пространственном рассогласовании лучей вдоль вектора скорости на расстоянии порядка радиуса светового пятна на поверхности СВП значение максимума уменьшалось (кривая 2). При пространственном рассогласовании лучей поперек вектора скорости наблю-

далось как изменение значения максимума на спектрограмме, так и смещение его по оси частот (кривая 3). Уменьшение амплитуды колебаний фототока не может быть объяснено падением интенсивности взаимодействующих волн и является следствием антенной теоремы Зигмана [9], а смещение по частоте обусловлено изменением значений скоростей и углов α, β , входящих в (4).

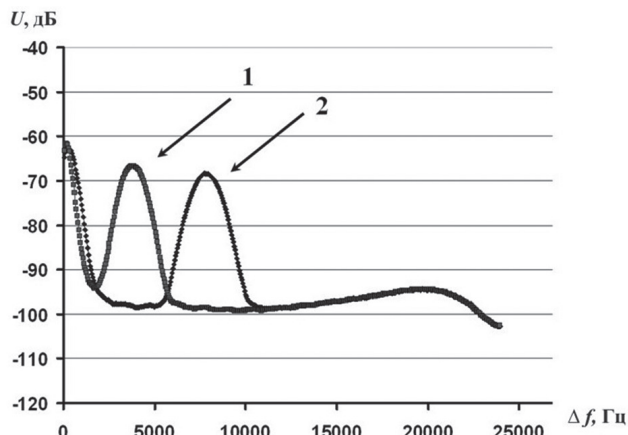


Рис. 6. Спектрограммы фототока для различных значений линейной скорости объекта

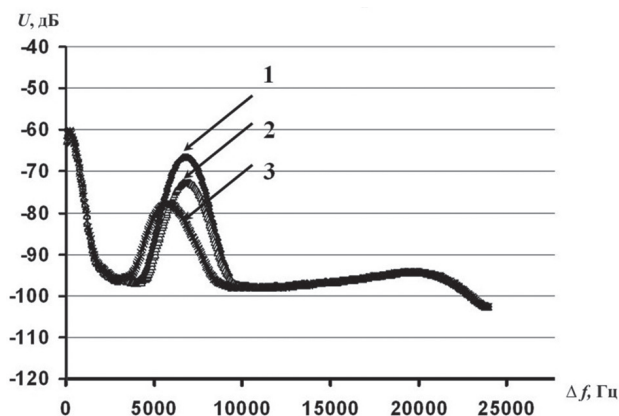


Рис. 7. Спектрограммы фототока для различных степеней пространственного рассогласования лучей

Другая особенность реализации данного метода заключается в необходимости точного выбора направления приема суммарного рассеянного излучения. Как уже отмечалось, для уверенной регистрации биений на спектрограмме необходимо обеспечить выполнение условия $\alpha - \beta < \theta$. В противном случае (при произвольном выборе угла φ) из-за особенностей световозвращения значения амплитуд E_A и E_B в третьем слагаемом выражения (3) становились незначительными, и определение разностной доплеровской частоты на спектрограмме становилось невозможным из-за малого отношения сигнал/шум.

2. ИНВЕРСНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД

В соответствии с терминологией, принятой в [3], в данном случае осуществляется однолучевое зондирование объекта под углом φ к вектору

скорости, а прием отраженного излучения осуществляется по двум направлениям *A* и *B*.

На лабораторной установке (рис. 8) это осуществлялось с помощью зондирования объекта лазером 1 через коллиматор 2 с последующим совмещением для анализа отраженных лучей на апертуре фотоприемника 6.

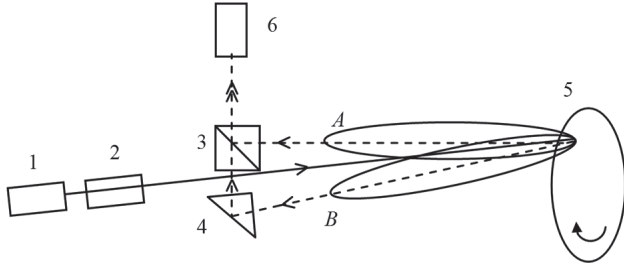


Рис. 8. Схема реализации инверсно-дифференциального метода

Эта схема обратна (инверсна) рассмотренной выше (рис. 5), при этом значения доплеровских сдвигов частот для каждого из каналов описываются соотношениями 5 и 6, а разностная доплеровская частота также определяется соотношением 4.

$$f_A = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{1 - \frac{v}{c} \cos \alpha} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \varphi \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \alpha \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \varphi - \cos \alpha) \right], \quad (5)$$

$$f_B = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{1 - \frac{v}{c} \cos \beta} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \varphi \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \beta \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \varphi - \cos \beta) \right]. \quad (6)$$

Таким образом, как и в первом случае, разностная частота Δf не зависит от направления зондирования, т.е. от угла φ , однако практические наблюдения показывают, что как и ранее, заметная амплитуда колебаний на разностной частоте, т.е. заметный максимум на спектрограмме наблюдается лишь в случае, когда угол φ достаточно близок к углам γ и δ . Прочие закономерности реализации данного метода весьма близки к таковым для предыдущего метода, однако, особенностью его является относительная сложность юстировки осей визирования пассивного интерферометра «на прием» [3].

3. ДВОЙНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД

Рассмотрим ситуацию, когда движущийся объект облучается двумя пучками *A* и *B*, выполняется условие $\alpha - \beta < \theta$, а прием излучения осуществляется фотоприемником 6. В этом случае мы имеем интерферометр «на передачу» и одновременно «на прием», объединяя две предыдущие схемы в одну (рис. 9).

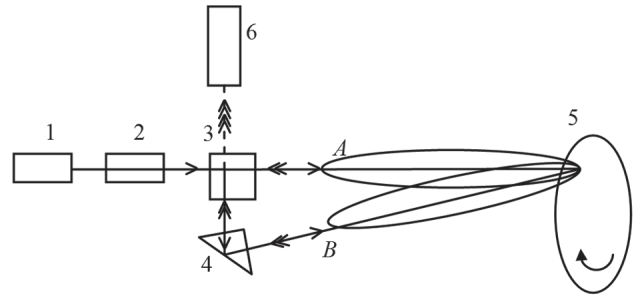


Рис. 9. Схема реализации двойного дифференциального метода

При этом суммарная волна \underline{E}_Σ в плоскости приема будет формироваться не двумя, как в предыдущих двух случаях, а четырьмя волнами. Первая из них (волна \underline{E}_{AA}) получена в результате падения лазерного излучения на объект с направления *A* и рассеяния его также в направлении *A*. Аналогично волна \underline{E}_{BB} получена в результате облучения объекта с направления *B* и рассеяния лазерного излучения также в направлении *B*. Так как разностный угол $\alpha - \beta$ лежит внутри угла θ , то существуют также волны \underline{E}_{AB} и \underline{E}_{BA} , которые формируются в результате падения волны с направления *A* и рассеяния её в направлении *B* и наоборот. Частотные сдвиги для волн \underline{E}_{AA} , \underline{E}_{AB} , \underline{E}_{BB} и \underline{E}_{BA} определяются соотношениями (7) – (10) соответственно. При выполнении преобразований были учтены также соотношения $\delta = \pi - \alpha$ и $\gamma = \pi - \beta$.

$$f_{AA} = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \alpha}{1 - \frac{v}{c} \cos \delta} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \alpha \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \delta \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \alpha - \cos \delta) \right] = f \left(1 - \frac{2v}{c} \cos \alpha \right), \quad (7)$$

$$f_{AB} = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \alpha}{1 - \frac{v}{c} \cos \gamma} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \alpha \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \gamma \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \alpha + \cos \beta) \right], \quad (8)$$

$$f_{BB} = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \beta}{1 - \frac{v}{c} \cos \gamma} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \beta \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \gamma \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \beta - \cos \gamma) \right] = f \left(1 - \frac{2v}{c} \cos \beta \right), \quad (9)$$

$$f_{BA} = f \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \beta}{1 - \frac{v}{c} \cos \delta} = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \beta \right) \left(1 + \frac{v}{c} \cos \delta \right) = f \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \alpha + \cos \beta) \right]. \quad (10)$$

По аналогии с соотношением (3) можно получить следующее выражение для сигнала на выходе фотоприемника:

$$\begin{aligned}
 J_{\infty} |E_{\Sigma}|^2 = & |E_{AA} + E_{AB} + E_{BB} + E_{BA}|^2 = |E_{AA}|^2 + \\
 & + |E_{AB}|^2 + |E_{BB}|^2 + |E_{BA}|^2 + E_{AA} E_{AB}^* + \\
 & + E_{AA}^* E_{AB} + E_{AA} E_{BB}^* + E_{AA}^* E_{BB} + E_{AA} E_{BA}^* + \\
 & + E_{AA}^* E_{BA} + E_{AB} E_{BB}^* + E_{AB}^* E_{BB} + E_{AB} E_{BA}^* + \\
 & + E_{AB}^* E_{BA} + E_{BB} E_{BA}^* + E_{BB}^* E_{BA}.
 \end{aligned} \quad (11)$$

Это выражение содержит в правой части 16 слагаемых, первые 4 из которых имеют нулевую частоту и не являются информативными для измерения скорости объекта. Воспользовавшись соотношениями (7) – (10) для слагаемых с номерами 5–16, можно получить следующие выражения для разностных доплеровских частот:

$$\Delta f_5 = f_{AA} - f_{AB} = \frac{fv}{c}(\cos \alpha - \cos \beta) \quad (12)$$

$$\Delta f_7 = f_{AA} - f_{BB} = \frac{2fv}{c}(\cos \alpha - \cos \beta) \quad (13)$$

$$\Delta f_6 = -\Delta f_5, \quad \Delta f_9 = \Delta f_{11} = \Delta f_{15} = \Delta f_5, \quad \Delta f_{13} = 0,$$

$$\Delta f_8 = -\Delta f_7, \quad \Delta f_{10} = \Delta f_{12} = \Delta f_{16} = \Delta f_6, \quad \Delta f_{14} = 0.$$

В соответствии с этими выражениями следует ожидать, что на спектрограмме будут присутствовать два максимума, частоты которых отличаются в 2 раза. Это предположение было проверено экспериментально.

Результаты измерений представлены на рис. 10, который полностью подтверждает высказанное выше предположение (кривая 1). При этом, так же как и ранее, эти два максимума смещаются синхронно вправо либо влево при изменении скорости объекта. Однако при пространственном рассогласовании лучей на СВП (кривая 2) второй максимум незначительно смещался по частоте (за счет соответствующего изменения углов α и β), но не менял своей амплитуды, в то время как максимум на частоте Δf_5 (см. (12)) быстро уменьшался по амплитуде и исчезал со спектрограммы, как и при реализации прямого дифференциального метода.

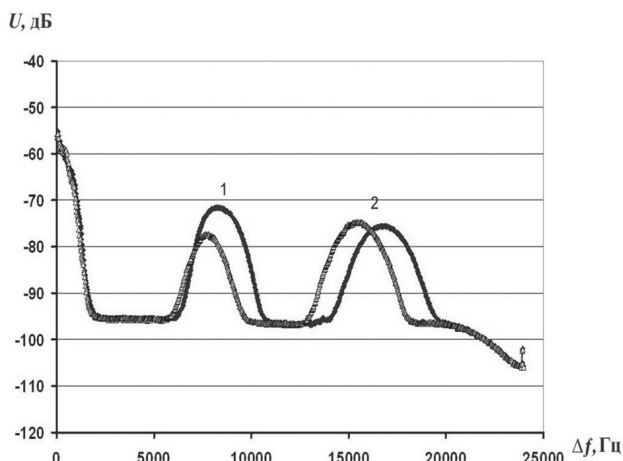


Рис. 10. Спектрограмма фототока при реализации двойного дифференциального метода

Устойчивость амплитуды максимума на частоте Δf_7 может быть пояснена особенностями световозвращения, а именно постоянством углов сведения в пространстве лучей E_{AA} и E_{BB} на апертуре фотоприемника 6 вне зависимости от направления распространения лучей A и B в пространстве после светоделителя 3. Можно заметить, что схема на рис. 9 по существу представляет собой самонастраивающийся за счет эффекта световозвращения интерферометр Майкельсона. Такая особенность двойного дифференциального метода ЛДА, на первый взгляд, делает его весьма привлекательным с точки зрения практических применений, однако для определения его реальных возможностей и ограничений требуются дополнительные исследования.

ВЫВОДЫ

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование особенностей методов дифференциальной ЛДА при зондировании объектов со СВП. Показано, что наряду с общими закономерностями, особенности световозвращения играют важную роль при реализации измерительных схем. В частности, для обеспечения большого отношения сигнал/шум целесообразно выбирать угол наблюдения рассеянных волн, не превышающим нескольких градусов в пределах ширины диаграммы эффективного световозвращения. При реализации методов ЛДА необходимо обеспечивать высокую точность совмещения в пространстве зондирующих лучей (прямой метод) или диаграмм световозвращения (инверсная схема), что накладывает ограничения на практические возможности этих методов.

При реализации двойного дифференциального метода на спектрограмме наблюдается два максимума, отличающихся по частоте в два раза, что обусловлено увеличением количества взаимодействующих волн на приемной апертуре. Амплитуды этих максимумов имеют различную устойчивость к разделению лучей в пространстве, амплитуда максимума на удвоенной частоте, в отличие от максимума с меньшей частотой, не чувствительна к пространственному рассогласованию лучей на СВП. Это обстоятельство позволяет высказать предположение о более широких возможностях двойного дифференциального метода при реализации практических схем ЛДА.

Литература

- [1] Лазерные измерительные системы / Под ред. Д.П. Лукьянова. — М. Радио и связь, 1981. — 456 с.
- [2] Каталог-справочник по странам СНГ «Лазерные измерения и диагностика в технике и экологическом контроле». — М.: Научно-технический информационно-учебный центр Лазерной ассоциации, 2000.
- [3] Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков / Под ред. В.А. Фабриканта. — М.: Издательство МЭИ, 1990. — 88 с.

- [4] Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. В.П. Клочков, Л.Ф. Козлов, И.В. Потыкевич, М.С. Соскин. – Киев: Наукова думка, 1985. – 759 с.
- [5] Доля Г.Н., Катунин А.Н., Садовый К.В. Шматков С.И. Спекл-интерферометрический метод анемометрии турбулентных потоков // Збірник наукових праць «Вісник Харківського національного університету ім.В.Н.Каразіна» № 756. Серія «Радіофізика та електроніка», вип №11. Харків, 2007. – С.118–122.
- [6] John Lloyd. A brief history of retroreflective sign face sheet materials. The principles of retroreflection. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rema.org.uk/pdf/history-retroreflective-materials.pdf>.
- [7] Доля Г.Н., Мазанов В.Г. Надь О.А. Анализ структуры лазерного излучения, рассеянного на световозвращающем покрытии для измерения скорости объекта // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: «Автомобиле- и тракторостроение». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – № 60 (966). – С. 59–66.
- [8] Дитчберн Р. Физическая оптика: Пер. с англ. под ред. И.А. Яковлева. – М.: Наука. Главн. ред. физико-математической литературы, 1965. – 631 с.
- [9] Протопопов В.В., Н.Д. Устинов Лазерное гетеродинамирование / Под ред. Н. Д. Устинова. – М.: Наука, 1985. – 288 с.

Поступила в редколлегию 26.04.2013

Доля Григорий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной системной техники ХНУ им. В.Н. Каразина. Научные интересы: методы формирования и обработки световых полей при дистанционном зондировании объектов.



Крюков Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры вооружения и специальной техники Академии ВВ МВД Украины. Научные интересы: метрологическое обеспечение, измерительный контроль параметров технических объектов.



Мудрик Вадим Геннадьевич, адъюнкт Академии ВВ МВД Украины. Научные интересы: измерительный контроль параметров стрелкового оружия.

УДК 535.016

Диференційна лазерна доплерівська анемометрія об'єктів зі світлоповертаючою поверхнею / Г.М. Доля, О.М. Крюков, В.Г. Мудрик // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2013. – Том 12. – № 3. – С. 436–441.

Проведено аналіз діаграм розсіювання когерентного світлового випромінювання на світлоповертаючих покриттях. Викладено особливості реалізації прямого, інверсного та подвійного диференціальних методів лазерної доплерівської анемометрії, отримано вирази для різницевої частоти доплерівських зсувів взаємодіючих хвиль. Наведено результати експериментального дослідження зазначених методів на лабораторній установці.

Ключові слова: диференційна лазерна доплерівська анемометрія, світлоповертаюче покриття.

Лл.: 10. Бібліогр.: 09 найм.

UDC 535.016

Differential Doppler laser anemometry of objects with retroreflecting surface / G.N. Dolya, A.M. Kryukov, V.G. Mudrik // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2013. – Vol. 12. – № 3. – P. 436–441.

Diagrams of coherent light radiation dispersion on retroreflecting sheets have been analyzed. The peculiarities of realization of direct, inverse and dual differential methods of laser Doppler anemometry are described, the expressions of difference frequency of Doppler shift of interacting waves are derived. Experimental research results of the above-mentioned methods on a laboratory setup are presented.

Keywords: differential Doppler laser anemometry, retroreflecting sheet.

Fig.: 10. Ref.: 09 items.