РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.417: 681.787

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В ВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

© 2007 г. **Н. В. Петров***; **В. Г. Беспалов***, доктор физ.-мат. наук; **А. П. Жевлаков****, канд. физ.-мат. наук; **Ю. И. Солдатов**** канд. техн. наук

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** НПК "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

E-mail: trittch@gmail.com

Метод цифровой спекл-фотографии развит для дистанционной регистрации и определения параметров перемещения объектов в водной среде. Апробация метода проведена в экспериментах с тест-объектом в условиях закрытого бассейна. Получены векторные диаграммы, отображающие средние скорости перемещения объекта. Обсуждена зависимость точности векторных диаграмм скорости от параметров эксперимента.

Коды OCIS: 110.6150, 120.6150.

Поступила в редакцию 16.07.2007.

Введение

Зондирование случайно-неоднородных фазовых сред, в том числе водных, когерентным излучением является перспективным направлением оптической диагностики. Одним из методов диагностики рассеивающих сред с использованием когерентного света является статистический анализ спекл-полей, формируемых при рассеянии зондирующего излучения объектом [1–4]. Метод спекл-фотографии широко используется для дистанционного определения поверхностного перемещения амплитудных и/или фазовых объектов, тангенциальной скорости в различных точках [3–5]. В последнее время широко применяется компьютерная обработка фотографий спекл-структуры, зарегистрированных цифровыми фотоприемниками, что позволяет получать значения тангенциального сдвига и проводить вычисления скорости объектов, в том числе и в реальном времени.

Цель данной работы состояла в исследовании эффективности использования метода цифровой спекл-фотографии для дистанционного определения скорости движения объектов в толще водной среды.

Экспериментальная схема и результаты эксперимента

Для обработки цифровых спекл-фотографий нами использовался алгоритм Хантли [6], модифицированный Сьодалом и Бенкертом [4]. Записывалась серия подобных изображений $I(t)$, $t = 0, \ldots, T$ (t – время, T – номер изображения) спекл-структуры объекта, двигавшегося в водной среде. Каждое из изображений разбивалось на $M \times N$ квадратных частей размером $B \times B$ пикселов. Для каждой пары квадратных фрагментов из последовательно записанных изображений объекта рассчитывалась функция корреляции. Положение главного максимума полученной корреляционной функции полностью характеризует тангенциальный сдвиг (направление, расстояние), который претерпел данный фрагмент объекта за время между двумя экспозициями. Зная коэффициент увеличения регистрирующей системы K и время между экспозициями, можно представить это поле смещений в виде поля скоростей. Если координата $(\tilde{m}, \tilde{n})$ объекта соответствует координате (m, n) фрагмента, то реальное перемещение задается как $R(\tilde{m}, \tilde{n}) = Kc(\Delta x, \Delta y, t)$, а скорость перемещения части объекта, соответствующей данному фрагменту, $V(\tilde{m}, \tilde{n}) = R(\tilde{m}, \tilde{n})/t$.

Следует отметить, что для определения скорости объекта с заранее определенной точностью, необходимо подбирать параметр t таким образом, чтобы изображение отдельного спекла средним размером σ между экспозициями смещалось на величину $\leq (10–20)\sigma$. При слишком больших смещениях уменьшается область взаимного перекрывания изображений, что сказывается на функции корреляции и на достигаемой точности [4].

Формирующее спекл-поля импульсное лазерное излучение должно обладать, с одной стороны, до-

статочной мощностью и когерентностью, а с другой – удовлетворять требованиям среды, в которой оно распространяется. Минимум коэффициента поглощения морской воды $k = 0{,}05$ м$^{-1}$ находится в диапазоне $\lambda = 0{,}45$–$0{,}48$ мкм (зависит от глубины и содержания частиц и примесей) [7], однако мощные импульсные лазерные источники, генерирующие на данных длинах волн, практически отсутствуют. В данной работе использовалась лазерная система, генерирующая импульсно-периодическое излучение второй гармоники Nd:YAG-лазера с частотой следования импульсов 50 Гц, максимальной средней мощностью 4 Вт и длиной волны излучения 532 нм, для данной длины волны $k = 0{,}06$ м$^{-1}$.

Метод цифровой спекл-фотографии был опробован для определения перемещения и скорости слабо рассеивающего тест-объекта, который представлял собой слегка матированный лист оргстекла. Эксперимент проводился в условиях закрытого бассейна с оптическими характеристиками водной среды, близкими к натуральным.

Показатель ослабления в бассейне вдоль трассы зондирования вычислялся по формуле

$$c = [\ln(I_{\text{вх}}\beta/I_{\text{вых}})]/L, \qquad (1)$$

где $I_{\text{вх}}$ – средняя мощность излучения лазера перед иллюминатором, $I_{\text{вых}}$ – средняя мощность лазерного излучения после прохождения водной среды длиной L и иллюминатора, $\beta \approx 0{,}9$ – потери лазерного излучения, связанные с отражением на стеклах двух иллюминаторов. Средняя мощность измерялась калиброванным прибором ИМО-2Н. Длина L определялась длиной бассейна и составляла 34 и 48 м.

Показатель обратного рассеяния воды (b_b) вдоль трассы зондирования вычислялся с учетом результатов измерений обратного рассеяния с использованием подводного лидара на ФЭУ МКП и осциллографа Tektronix TDS 5054. Результаты измерений и расчетов приведены в таблице.

В бассейне с водой с небольшой скоростью (схема эксперимента представлена на рис. 1) вдоль своей плоскости перемещался тест-объект, линейные размеры которого составляли 100×100 см. Через иллюминатор в стене бассейна тест-объект освещался параллельным пучком излучения второй гармоники Nd:YAG-лазера диаметром порядка 80 см. Расстояние от иллюминатора до тест-объекта составляло 10 м. Оптическая система формировала изображение тест-объекта на ПЗС-матрице Fujifilm SuperCCD размером 2400×1800 пикселов. Диафрагма выбиралась таким образом, чтобы размер спекла на ПЗС-матрице соответствовал размеру 3–10 пикселов. Контраст регистрируемых спеклов достигал 100%, что свидетельствует о хорошей пространственной когерентности лазерного излучения.

Результаты измерений и расчетов

Длина, м	$I_{\text{вх}}$, Вт	$I_{\text{вых}}$, Вт	c, м$^{-1}$	b_b, м$^{-1}$
34	4	0,140	0,096	0,007
48	4	0,08	0,079	0,007

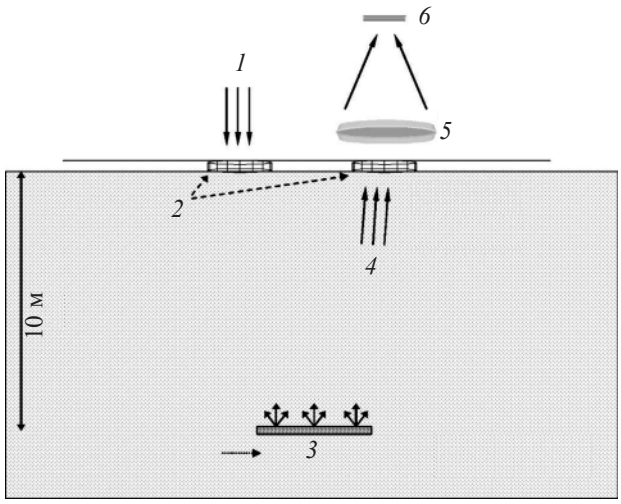


Рис. 1. Схема эксперимента по определению скорости движения объекта методом цифровой спекл-фотографии. Вид сверху. *1* – лазерный пучок, *2* – иллюминаторы, *3* – тест-объект, *4* – рассеяное излучение, *5* – объектив, *6* – ПЗС-матрица.

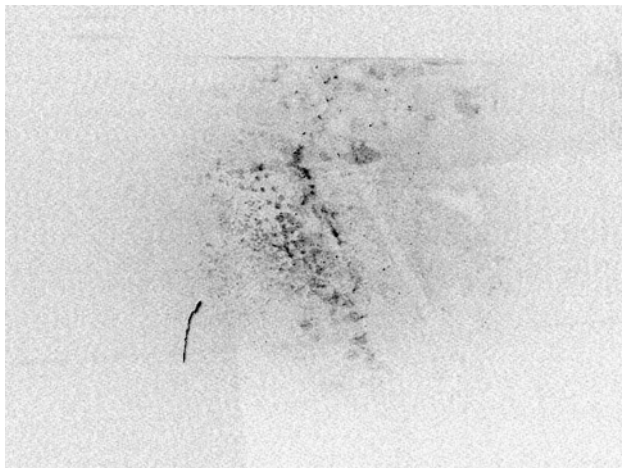


Рис. 2. Одна из фотографий спекл-структуры, полученная в результате эксперимента. Яркость инвертирована.

В ходе эксперимента были получены серии из 5 фотографий с интервалом между экспозициями $t = 0{,}2$ с. На рис. 2 в качестве примера приведена одна из фотографий такой серии. Для наглядности

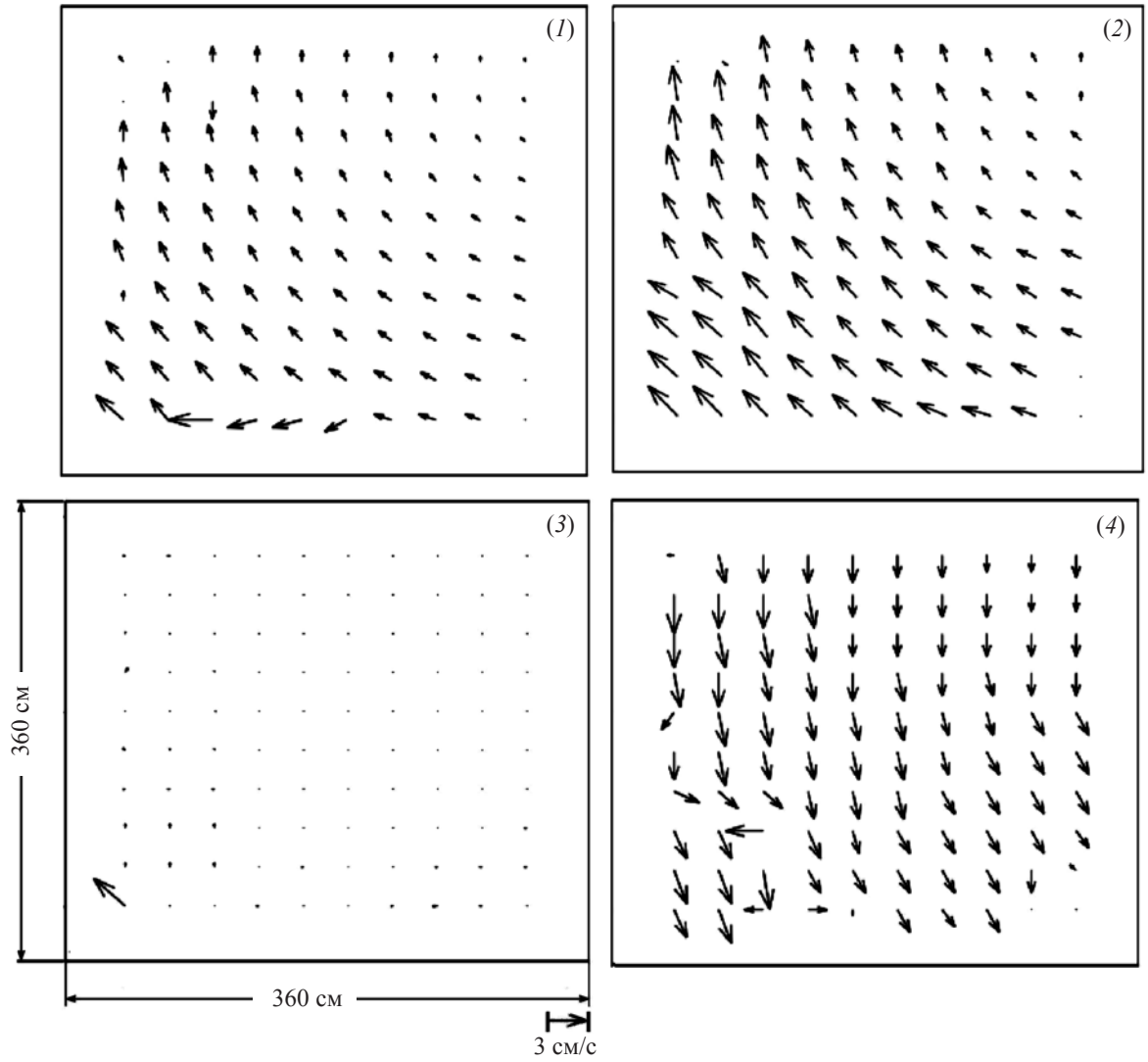


Рис. 3. Четыре векторные диаграммы скоростей объекта, построенные в результате обработки по методу цифровой спекл-фотографии одной серии из 5 фотографий. *1* – результат обработки первой и второй фотографии, *2* – второй и третьей и т. д.

иллюстрации инвертирована яркость и повышен уровень контраста.

В каждой спекл-картине выбирались квадратные фрагменты изображения объекта размерами 128×128, 64×64 или 32×32 пикселов, где измерялась скорость движения. Соответствующие пары квадратных фрагментов из последовательных картин анализировались с использованием алгоритма Хантли [6], модифицированного Сьодалом и Бенкертом [4]. По полученной функции корреляции вычислялось перемещение объекта в координатах $(\tilde{m}, \tilde{n})$ и строились векторные диаграммы, отображающие средние скорости, которые были присущи объекту между экспозициями. Пример таких скоростей приведен на рис. 3. В приведенной иллюстрации максимальные из скоростей составляли порядка 3 см/с.

На поле скоростей, построенном по результатам обработки первых двух фотографии серии, видно, что объект совершал поворот по часовой стрелке. На диаграмме, отображающей результаты обработки 2- и 3-й фотографий видно, что объект продолжал вращение в том же направлении, при этом его скорость вращения немного возросла. Во время экспозиции 3- и 4-й фотографий объект практически оставался на месте. И, наконец, из анализа последних двух снимков видно, что объект начал поступательное движение вниз, при котором, однако, левый его край двигался немного быстрее правого, т. е. присутствовало небольшое вращение вокруг точки, находящейся в той же плоскости.

Обсуждение результатов

Как было выявлено в ходе эксперимента, спекл-картины, сформировавшиеся в результате прохождения когерентного лазерного излучения через вод-

ную рассеивающую среду без тест-объекта, обладают иной пространственной частотой, нежели спекл-картины, полученные в результате рассеяния света на поверхности тестируемого объекта. Масштаб фазовых неоднородностей в воде, по нашим оценкам, составлял от 30 до 100 см, тогда как фазовые неоднородности на поверхности тестируемого объекта имели размер порядка 0,3–1 мм. Вклад рассеянного водной средой излучения учитывался следующим образом: нами был проведен расчет функций взаимной корреляции для бассейна в отсутствие тестируемого объекта. Расчет показал, что результирующие спекл-картины представляли чисто шумовое поле и не давали ярко выраженного корреляционного пика.

Подробно аналитическая погрешность алгоритма рассмотрена в [4]. Результаты проведенных нами экспериментов показали, что фактически в нашей реализации алгоритма цифровой спекловой фотографии положение главного максимума корреляционной функции может быть определено с точностью ± 1 пиксел, что соответствует погрешности $\Delta V = 3$ мм/с при значениях V порядка единиц сантиметров. Используя более новые ПЗС-матрицы с меньшим размером пикселов можно увеличить точность. В зависимости от скорости движения объекта, интервала между экспозициями и коэффициента увеличения процентное отношение длины векторов скорости к экспериментальной погрешности может меняться. В проведенной реализации эксперимента коэффициент увеличения $K \approx 100$ и смещение поверхности объекта между экспозициями было порядка 5–6 мм. Используя оптическую систему с переменным фокусным расстоянием, можно добиваться одинакового коэффициента увеличения на различных дистанциях наблюдения. Меняя интервал между экспозициями, можно обеспечить один и тот же порядок смещения изображения спекл-структуры, и, следовательно, получать результаты с одинаковой точностью.

Заключение

Согласно результатам проведенных в данной работе исследований установлено, что метод цифровой спекл-фотографии может эффективно применяться для определения направления и скорости перемещения рассеивающих объектов в водной среде. Его эффективность особенно проявляется в высокой точности регистрации малых скоростей (порядка единиц сантиметров в секунду) и направления перемещения движущихся в воде тел.

В дальнейшем мы планируем использовать для регистрации цифровых спекл-картин ПЗС-матрицы с временным стробированием, что позволит регистрировать лишь рассеянное от объекта излучение и исключить световой шум, возникающий в результате рассеивания на частицах, взвешенных в воде, по пути следования лазерного импульса.

Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ № 06-02-17303-а и 06-02-08317-офи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Т. 1. // Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
2. *Гудмен Дж.* Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 528 с.
3. *Франсон М.* Оптика спеклов / Пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.
4. *Sjodahl M., Benckert L.R.* Electronic speckle photography: analysis of algorithm giving the displacement with subpixel accuracy // Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 2278–2284.
5. *Synnergen P., Larsson L., Lundstom T.S.* Digital speckle photography: visualization of mesoflow through clustered fiber networks // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 7. P. 1368–1373.
6. *Huntley J.M.* Speckle Photography Fringe Analysis: Assessment of Current Algorithms // Appl. Opt. 1989. V. 28. P. 4316–4322.
7. *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир, 1981. 285 с.