

Использование спектральных характеристик флуктуации интенсивности динамического спекл-поля для определения продольного смещения объекта

С. К. Дик

В последнее время интенсивно ведется разработка спеклооптических методов для измерения скоростей и смещений в реальном масштабе времени. Это обусловлено сочетанием традиционных достоинств оптических методов, таких как бесконтактность, дистанционность, высокая точность с возможностью определения параметров движения и координат объектов, значительно рассеивающих свет.

При освещении движущейся диффузно рассеивающей поверхности когерентным излучением образуется динамическое спеклполе, статистические свойства которого позволяют судить о параметрах движения рассеивающего объекта.

Основные результаты в теории спеклполей получены путем анализа корреляционных функций амплитуды и корреляционных функций флуктуации интенсивности, дающих возможность описать такие параметры спеклов как контраст, продольные и поперечные размеры, степень декорреляции, смещение, время жизни и т.д.

Известно, что характер дифракционной картины, т.е. спеклструктуры, полученной в результате диффузного рассеяния когерентного излучения, и изменение этой картины во времени, обусловленное движением рассеивающей поверхности, зависит как от вида движения, так и от геометрии освещения и наблюдения.

Время жизни спекла, которое определяет характер временной корреляционной функции флуктуации интенсивности, а, следовательно, связанный с ней согласно теореме Винера-Хинчина спектр мощности флуктуации интенсивности динамических спеклов, обратно пропорционально скорости движения объекта, и коэффициент пропорциональности зависит от продольных параметров схемы.

Анализ зависимости спектра флуктуации интенсивности динамического спеклполя от геометрических параметров схемы дает возможность обосновать методы и принципы устройств для определения продольной координаты по изменению амплитуды спектральных гармоник, которые будут обсуждаться, и сравниваться ниже.

При вращении диффузно-рассеивающего объекта также, как и при равномерном перемещении, движение спеклов представляет собой комбинацию перемещения и кипения. В то же время движение спеклов является периодическим, так как одни и те же рассеиватели появляются в освещаемой зоне с каждым оборотом диффузора.

Рассмотрим корреляционные и спектральные свойства динамического спеклполя, рассеянного вращающимся диффузором, при освещении его лазерным излучением, используя подход при исследовании спеклполя от вращающегося диффузного объекта.

Временная автокорреляционная функция в данном случае имеет вид (1):

$$C_i(\vec{P}, 0, \tau) = \exp\left(-\left(\frac{1}{\tau_{d_1}^2} + \frac{1}{\tau_{d_2}^2}\right) \cdot \tau^2\right), \quad (1)$$

где $\tau_{d_1} \approx \frac{W}{\omega d}$, где W – радиус $\frac{1}{e^2}$ интенсивности освещенного участка, $\omega d = V$ – значение линейной скорости перемещения рассеивателей,

$\tau_{d_2} \approx \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta x}{\sigma}$, где Δx – средний размер спекла, σ – параметр, определяющий условия дифракции.

τ_{d_1} и τ_{d_2} обратно пропорциональны временной автокорреляционной функции модуля скорости движущегося объекта, и константа пропорциональности связана со средним размером спеклов и условиями освещения гауссовым пучком через параметры W и μ .

Спектральная плотность мощности интенсивности динамического спекл-поля дается посредством Фурье-преобразования автокорреляционной функции (1) согласно теореме Винера-Хинчина

$$\phi_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} C_1(\vec{P}, O, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \frac{\tau_{d_1} \cdot \tau_{d_2}}{\sqrt{2(\tau_{d_1}^2 + \tau_{d_2}^2)}} \cdot \exp - \frac{\tau_{d_1}^2 \cdot \tau_{d_2}^2}{\sqrt{4(\tau_{d_1}^2 + \tau_{d_2}^2)}} \omega^2 \quad (2)$$

Полученное выражение свидетельствует о том, что основными параметрами, существенно влияющими на спектральные свойства флуктуации интенсивности динамического спекл-поля при вращении диффузно-рассеивающего объекта, являются: ширина освещаемой зоны W , расстояние от центра освещаемой зоны до центра оси вращения диска и поперечный размер спеклов в плоскости наблюдения.

Анализ зависимостей (1) и (2) показал, что в конечном итоге спектры флуктуации интенсивности динамического спекл-поля определяются расстоянием от вращающегося диффузора до положения перетяжки фокусирующей линзы и расстоянием от диффузора до плоскости регистрации. Определение зависимости амплитуд спектральных гармоник от этих параметров и является основной задачей данного исследования изменений спектра флуктуации интенсивности при продольном смещении элементов экспериментальной схемы.

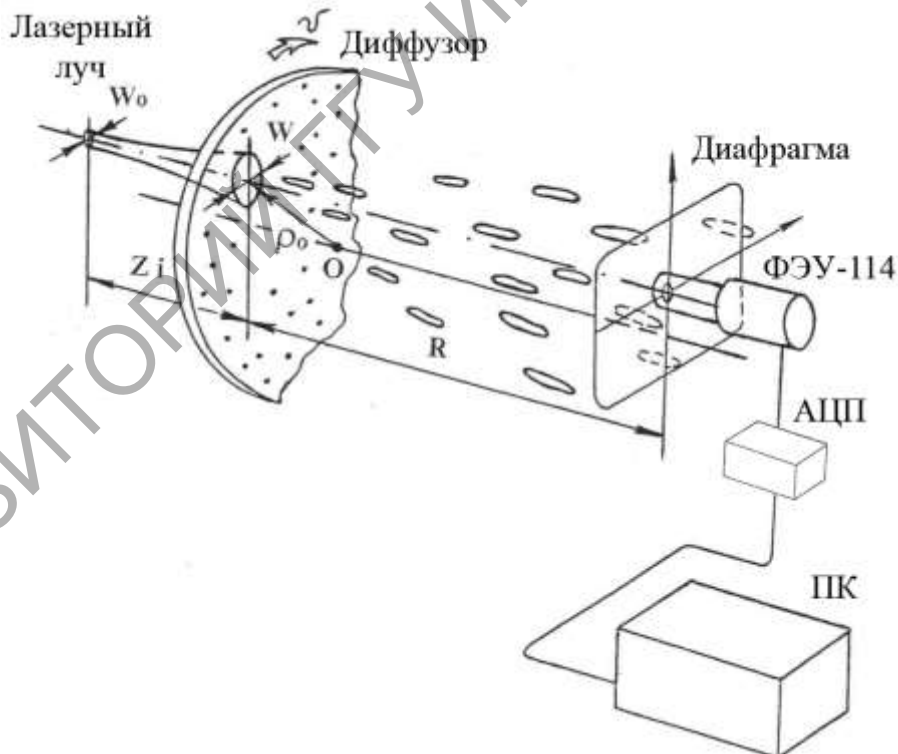


Рисунок 1 – Экспериментальная схема для исследования спектров флуктуации интенсивности динамического спекл-поля при продольном смещении диффузора и изменении условий наблюдения и освещения

Представленная на рис. 1 общая экспериментальная схема имеет несколько степеней свободы и на ее основе могут быть реализованы различные способы измерения продольного смещения.

Излучением He-Ne лазера с помощью линзы с фокусным расстоянием $f=45$ мм и шириной перетяжки $w_0=20$ мкм освещался с заданной степенью расходимости находящийся на расстоянии $r_0=80$ мм от перетяжки диффузно-пропускающий матовый диск, вращающийся с постоянной частотой $\nu=4.2$ Гц вокруг оси O , параллельной оптической оси системы.

Вращение диска приводило к изменению спекл-поля, образованного рассеянным от этого диффузора когерентным излучением. Через полевую диафрагму с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-114 на расстоянии E диффузора производилась регистрация и преобразование флуктуации интенсивности динамического спекл-поля в электрический сигнал, который затем обрабатывался с помощью ПК. Регистрировалась амплитуда первой спектральной гармоники в спектре флуктуации интенсивности динамического спекл-поля, полученном путем временного усреднения случайного сигнала по 16 реализациям данного спектра.

Рассматривались три самостоятельных случая продольного смещения элементов схемы:

1) смещение плоскости наблюдения при неизменном расстоянии от положения перетяжки пучка до диффузора: $z_i = \text{const}$;

2) перемещение вращающегося диффузора в продольном направлении при неизменном расстоянии между положением перетяжки пучка и плоскостью наблюдения: $z_i + R = N = \text{const}$;

3) изменение расстояния между положением пучка и диффузором при фиксированном расстоянии между диффузором и плоскостью наблюдения: $R = \text{const}$.

Для сопоставления результатов теоретической оценки и экспериментальных данных для каждого из вышеперечисленных случаев были произведены на ЭВМ, в соответствии с выражением (2) для спектральной плотности мощности флуктуации интенсивности динамического спекл-поля, численные расчеты и представлены графически зависимости амплитуды A_1 первой спектральной гармоники от продольного смещения элементов данной экспериментальной схемы.

Спектры флуктуации интенсивности рассеянного излучения при изменении расстояния между диффузором и плоскостью наблюдения.

Лазерным пучком с заданной степенью расходимости освещался диффузно пропускающий диск, вращающийся со скоростью в плоскости, перпендикулярной оси распространения пучка, и находящийся на некотором фиксируемом расстоянии z_i от фокуса линзы.

Регистрировалась амплитуда A_1 первой спектральной гармоники в спектре флуктуации интенсивности динамического спекл-поля от вращающегося диффузора при изменении расстояния R , за счет перемещения в продольном направлении относительно исследуемого объекта фотоприемника, для различных фиксированных значений z_i , таких как $z_i = 60, 120, 180, 240$ мм. Скорость декорреляции и, следовательно, изменение величины регистрируемых спектральных гармоник, в данном случае, обусловлено увеличением размеров спеклов Δx и значений дифракционного параметра σ .

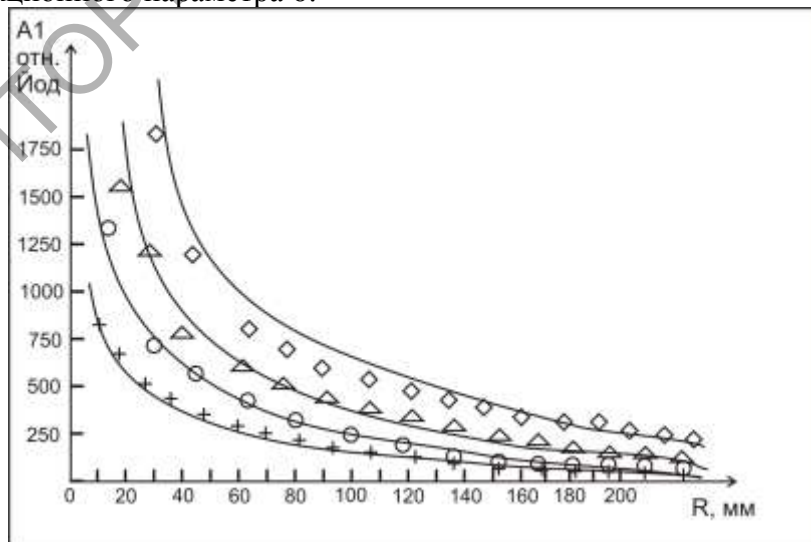


Рисунок 2 – Рассчитанные и экспериментальные зависимости амплитуды первой спектральной гармоники A_1 при изменении расстояния R между диффузором и фотоприемником в продольном направлении: 1 – $z_i = 30$ мм, 2 – $z_i = 50$ мм, 3 – $z_i = 70$ мм, 4 – $z_i = 100$ мм.

На рисунке 2 представлены результаты численного расчета и экспериментальных измерений установленной зависимости амплитуд первых спектральных гармоник A_1 спектра флуктуации интенсивности динамического спекл-поля от изменения расстояния R между диффузором и фотоприемником при фиксированных значениях z_i .

Расчеты и измерения показали наличие участков монотонности в графиках зависимости $A_1(R)$, наклон которых определяется величиной z_i . Чем больше значение $z_i = \text{const}$, тем меньше наклон кривых $A_1(R)$.

Тем самым, измеряя значения (или изменение) амплитуды первой спектральной гармоники A_1 спектра флуктуации интенсивности на участках монотонности для какого-либо выбранного $z_i = \text{const}$, можно определить координату (или смещение) объекта в продольном направлении.

Следует отметить, что при смещении исследуемого объекта с укрепленным на нем фотоприемником вдоль оптической оси происходит значительное ослабление средней интенсивности, значение которой изменяется обратно пропорционально R^2 . Это следует учитывать путем нормирования значений спектральной интенсивности.

Abstract. The paper presents the result of numerical calculations, the experimental data of studying the fluctuation spectra of speckle-field intensity at longitudinal displacement of diffuse objects. The method was developed for determining the longitudinal motion parameters of objects by measuring the amplitude of the first harmonic of the spectrum. The experimental results obtained are in good agreement with the data of numerical calculations.

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

Поступило 28.03.09