

УДК 396.373

Г.Н. Доля<sup>1</sup>, А.Н. Катунин<sup>2</sup>, О.А. Надь<sup>1</sup>, А.Н. Булай<sup>3</sup><sup>1</sup> Харьковський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків<sup>2</sup> Національний університет громадянської захисту України, Харків<sup>3</sup> Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ЛАЗЕРНАЯ СПЕКЛ-ВЕЛОСИМЕТРИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ СО СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований метода лазерной спекл-велоиметрии вращающихся объектов со световозвращающей поверхностью. Сделан анализ зависимостей частоты изменения фототока на выходе от условий наблюдения: скорости вращения объекта, его геометрических размеров.

**Ключевые слова:** спекл-велоиметрия, лазер, световозвращающее покрытие.

### Введение

#### Постановка проблемы, анализ публикаций.

Одним из методов измерения скорости движения объектов является метод лазерной спекл-велоиметрии. В этом случае движущийся объект облучается лазерным лучом, при отражении от шероховатой поверхности которого формируется спелкартина [1, 2]. В соответствии с закономерностями изменения пространственной либо временной структуры оценивается скорость движения объекта [3]. Точность измерения скорости существенно зависит от отношения сигнал/шум в принимаемом сигнале. Существенного увеличения отношения сигнал/шум (а значит и дальности, на которой производится измерения) можно добиться путем нанесения на поверхность объекта световозвращающего покрытия (СВП), представляющего собой совокупность либо хаотически расположенных микростеклошариков (МСШ), либо регулярную совокупность микропризм.

В работе [4] описана работа лазерного спекл-велоиметра (ЛСВ), основанного на прямом фотодетектировании отраженного лазерного излучения от движущегося объекта с СВП и последующем спектральном анализе закономерностей изменения фототока на выходе фотоприемника. Показано, что ширина спектра сигнала в низкочастотной области

является мерой тангенциальной составляющей скорости движения объекта. Данное исследование проводилось для случая, когда диаметр светового пучка существенно больше размера отдельного световозвращателя (МСШ). Однако в случае, когда средний размер МСШ сопоставим с диаметром светового пучка, закономерности изменения фототока существенно изменяются, что обусловлено качественно другим характером формирования интерференционной картины совокупностью ограниченного числа элементарных световозвращателей.

Таким образом, актуально проведение экспериментальных исследований возможностей применения метода лазерной спекл-велоиметрии при размерах световозвращателя, сопоставимых с диаметром зондирующего светового пучка.

**Целью статьи** является анализ возможностей применения метода лазерной спекл-велоиметрии при размерах световозвращателя (МСШ), сопоставимых с диаметром зондирующего светового пучка.

### Основная часть

Для исследования закономерностей работы ЛСВ был создан экспериментальный макет, схема которого изображена на рис. 1, где цифрами обозначены: 1 – твердотельный лазерный неодимовый лазер на ортованадате иттрия с удвоением частоты

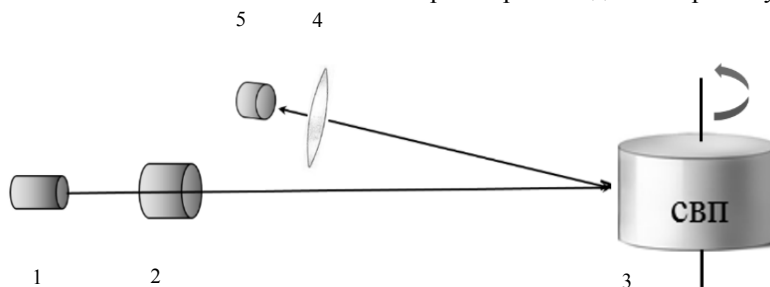


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ЛСВ

(длина волны – 0,53 мкм), 2 – коллиматор, 3 – вращающийся цилиндр, на поверхность которого нанесено СВП в виде МСШ, 4 – линза, выполняющая роль коллектора рассеянного излучения, 5 – фотоприемник, сигнал с выхода которого поступал на вход цифровой карты ПК и затем обрабатывался с помощью программы Cool Edit. Частота оборотов цилиндра  $\omega = 2\pi\nu$  плавно изменялась за счет изменения напряжения на электродвигателе.

На рис. 2 приведен вид мгновенного спектра изменения фототока во времени при дискретном изменении линейной скорости движения поверхности за счет изменения частоты оборотов цилиндра. При этом диаметр светового пучка  $w$  значительно превышал размер отдельного световозвращателя  $d$ :  $w \gg d$ . На рис. 3 показаны усредненные за время наблюдения (около 30 сек) соответствующие спектральные распределения, где по оси абсцисс отложены значения частот в Гц, а по оси ординат – амплитуды частотных составляющих в логарифмическом масштабе.

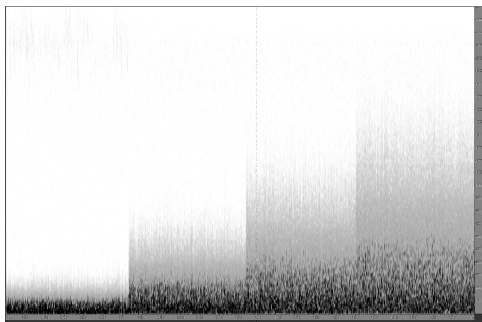


Рис. 2. Вид мгновенного спектра изменения фототока во времени

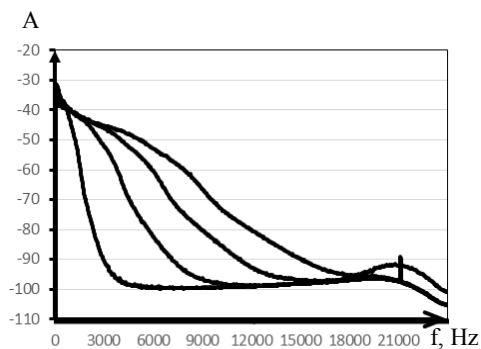


Рис. 3. Частотная зависимость амплитуды спектральных составляющих

На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что ширина спектра флуктуаций фототока монотонно возрастает по мере увеличения скорости движения объекта. Ширина спектра в области низких частот определяется временем прохождения светового пучка отдельным световозвращателем.

Необходимо отметить, что характер изменения во времени распределения интенсивности в плоскости наблюдения сильно зависит от соотношения размеров отдельного световозвращателя  $d$  и диаметра лазерного луча  $w$ . При выполнении условия  $w \gg d$  средний размер отдельного спекла достаточно мал (рис. 4), тогда при движении объекта картина дифракции смещается как единое целое, сливаясь при достаточно больших скоростях в треки, вытянутые вдоль направления движения объекта (рис. 5).

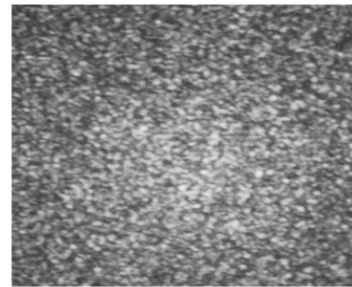


Рис. 4. Вид спеклов при  $w \gg d$



Рис. 5. Дифракционная картина при  $w \gg d$

В случае  $w \approx 2...3 d$  (рис. 6) при движении объекта спекл-картина изменяется радикально, при этом каждый раз формируется совершенно новая интерференционная картина, вид которой определяется расположением ограниченного числа световозвращателей в лазерном пятне подсвета (рис. 7).

Полученные результаты свидетельствуют, что колебания, обусловленные изменением интерференционной картины, имеют частотную составляющую в области 7 кГц, периодически изменяющуюся в пределах 500 Гц. Спектральное распределение в этом случае будет иметь вид, представленный на рис. 8.

Закономерности, описывающие влияние отдельных параметров на значение частоты, можно получить в предположении, что группа освещенных световозвращателей смещается в поле лазерного луча на такой угол  $\varphi$ , при котором оптическая длина пути отраженного луча, формирующего спекл-картину в плоскости наблюдения, изменится на целое число полуволн (рис. 9).

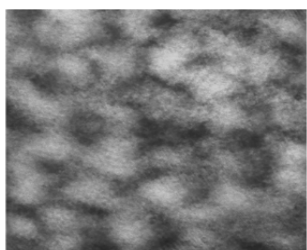


Рис. 6. Вид спеклов при  $w \approx 2...3 d$

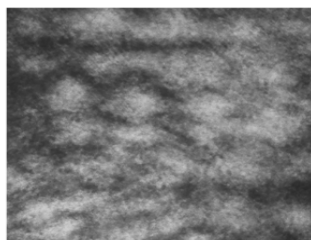


Рис. 7. Дифракционная картина при  $w \approx 2...3 d$

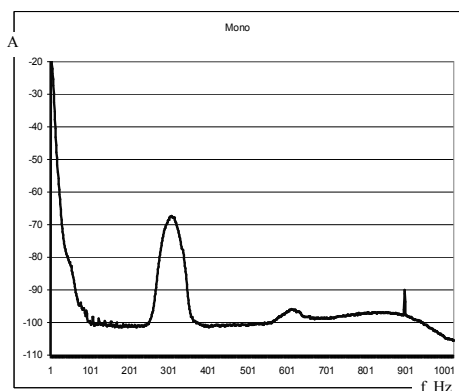


Рис. 8. Спектральное распределение при  $w \approx 2...3 d$

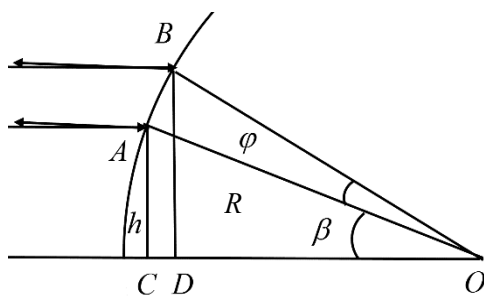


Рис. 9. Схема прохождения луча

Таким образом

$$\Delta = 2CD = \lambda. \quad (1)$$

Из рис. 9 следует, что

$$\begin{aligned} CD &= R \cos \beta - R \cos(\beta + \varphi) = \\ &= -2R \sin\left(\beta + \frac{\varphi}{2}\right) \sin \frac{\varphi}{2} \approx \\ &\approx -R\varphi \sin \beta = \frac{\lambda}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Угол  $\varphi$  связан с частотой оборотов диска  $\nu$  отношением

$$\varphi = 2\pi\nu t. \quad (3)$$

Если предположить, что каждый раз при смещении на угол  $\varphi$  спекл-картина будет периодически повторяться, то время  $t$ , входящее в соотношение (3), будет иметь смысл характерного периода изменения наблюдаемой интерференционной картины, а величина  $f$ , обратная этому периоду, будет определять частоту изменения фототока на выходе ЛСВ. Её величина может быть определена из соотношений (2) и (3):

$$f = \frac{4\pi h}{\lambda} \nu, \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{t} = \frac{2\pi}{\varphi} \nu. \quad (5)$$

При получении соотношения (4) было учтено, что

$$\sin \beta = \frac{h}{R}.$$

Полученное соотношение (4) находится в соответствии с результатами экспериментальных исследований. Например, из него следует, что частота  $f$  растет линейно с ростом частоты оборотов диска  $\nu$ . Экспериментально полученный результат представлен на рис. 10, где по оси абсцисс отложены значения частоты оборотов цилиндра  $\nu$  в мГц, а по оси ординат значения частоты  $f$  кГц.

Как видно из рис. 10, данная зависимость имеет линейный характер, что соответствует (5). Из (4) следует, что  $f \gg \nu$ , т.к.  $\varphi \ll 2\pi$ .

Непосредственное вычисление отношения  $f/\nu$  при  $h = 2,5$  см дает значение  $f/\nu = 1,2 \times 10^5$ . В то же время тангенс угла наклона прямой на рис. 10 соответствует  $f/\nu = 7,3 \times 10^5$ .

Таким образом, экспериментально полученное значение  $f/\nu$  в 6 раз превосходит результат теоретической оценки.

Из (4) следует, что значение частоты  $f$  не зависит от величины радиуса диска  $R$ . Экспериментальные исследования с дисками радиусами от 4,5 см до 14,5 см подтвердили эту закономерность. В то же время (4) позволяет предположить, что при постоянном  $R$  следует ожидать линейного роста частоты  $f$  по мере увеличения параметра  $h$ , характеризующего степень отклонения луча направления, при котором луч проходит через ось вращения цилиндра. Это предположение было проверено экспериментально, в результате чего получена зависимость, представленная на рис. 11.

Для получения этих зависимостей при неизменном положении луча осуществлялось перемещение цилиндра в направлении, перпендикулярном направлению распространения луча.

Измерения производились при использовании диска радиусом 13,5 см, диапазон изменения  $h$  составил 10 см.

Линейная зависимость в точности соответствует результатам теоретического анализа.

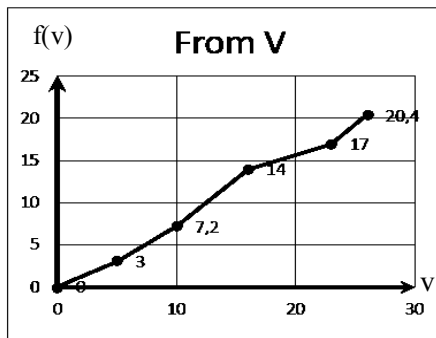


Рис. 10. Вид зависимости  $f(v)$

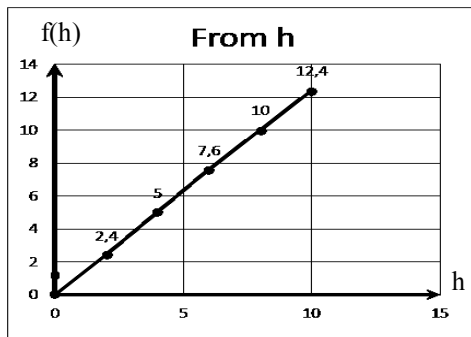


Рис. 11. Вид зависимости  $f(h)$

## Выводы

В работе проведены экспериментальные исследования метода лазерной спекл-велоиметрии для случая, когда средний размер МСШ сопоставим с диаметром светового пучка подсвета.

Экспериментально обнаружено появление регулярной составляющей изменений фотока спекл-велоиметра при условии незначительного превы-

шения размера освещенной области по сравнению с размером отдельного МСШ. На основе экспериментальных данных получены зависимости частоты изменения фототока на выходе от условий наблюдения: скорости вращения объекта, его геометрических размеров.

Получено выражение для оценивания частоты изменения фототока на выходе ЛСВ. При этом показано, что полученное соотношение находится в соответствии с результатами проведенных экспериментальных исследований.

В целом, полученные результаты могут служить методологической основой для построения нового класса относительно простых спекл-велоиметров на основе однолучевого лазерного зондирования движущихся объектов с применением прямого фотодетектирования рассеянного излучения и спектрального анализа закономерностей изменения фототока.

## Список литературы

1. Лазерная локация / И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов, И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов; под ред. чл.-кор. АН СССР Н.Д. Устинова. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
2. Джоунс Р. Голографическая и спекл-интерферометрия: Пер. с англ. / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
3. Аливердиев А. Разработка спекл-велоиметра для самодвижущейся установки / А. Аливердиев, М. Капонеро, К. Морикони // ЖТФ. – 2002. – № 72. – С. 116-121.
4. Доля Г.Н. Измерение тангенциальной скорости движения объекта со световозвращающим покрытием при однолучевом зондировании / Г.Н. Доля, А.Н. Катунин, В.Г. Мазанов, А.Н. Булай // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вып. 1(117). – С. 18-21.

Поступила в редколлегию 1.12.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ЛАЗЕРНА СПЕКЛ-ВЕЛОСИМЕТРІЯ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ ІЗ СВІТЛОПОВЕРТАЮЧОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Г.М. Доля, А.М. Катунін, О.А. Надь, А.М. Булай

У роботі приводяться результати експериментальних досліджень методу лазерної спекл-велоиметрії обертових об'єктів із світлоповертаючою поверхнею. Зроблений аналіз залежностей частоти зміни фотоструму на виході від умов спостереження: швидкості обертання об'єкта, його геометричних розмірів.

**Ключові слова:** спекл-велоиметрія, лазер, світлоповертаюча поверхня.

## LASER SPECLE VELOCIMETRY FOR RUNNING OBJECTS WITH LIGHT REFLECTIVE SURFACE

G.N. Dolya, A.N. Katunin, O.A. Nad, A.N. Bulay

In this paper analyzes experimental researches of laser speckle velocimetry method for running objects with light reflective surface. The analysis of dependences frequency of photoelectric change is done on an exit from the terms of supervision: speeds of object rotation, sizes.

**Keywords:** speckle velocimetry, laser, light reflective surface.