

О ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА ДОПЛЕРОВСКОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ОТ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗМЕРАМИ СПЕКЛОВ И ПРИЕМНОЙ АПЕРТУРЫ

В. М. Аранчук, Н. Н. Зацепин

При измерении параметров движения диффузно отражающих объектов методом лазерной доплеровской интерферометрии амплитуда и фаза выходного сигнала являются случайными величинами. Это обусловлено случайным распределением амплитуды и фазы рассеянного излучения, которое, как известно, представляет собой спекл-поле. Как следует из работ [1-3], чувствительность и отношение сигнал—шум падают по сравнению с зеркально отражающим объектом (причем отношение сигнал—шум может стать меньше 1) вследствие случайной компенсации фаз отдельных спеклов, находящихся в пределах апертуры фотоприемника, а соотношение между размерами апертуры и спеклов оказывает влияние на величину амплитуды доплеровского сигнала.

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследована зависимость амплитуды выходного сигнала лазерного доплеровского спекл-интерферометра от размера апертуры фотоприемника, или от числа спеклов, расположенных в пределах апертуры.

Для выходного тока i_{Φ} фотоприемника, обусловленного интерференцией опорного излучения с одним спеклом, можно записать [4]

$$i_{\Phi} = k \{ I_r + I_s + 2I_r^{1/2}I_s^{1/2} \cos [\omega_D t + (\varphi_r - \varphi_s)] \}, \quad (1)$$

где k — чувствительность фотоприемника, I_r , I_s — интенсивность опорного излучения и спекла соответственно, $\omega_D = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \mathbf{v}$ — доплеровский сдвиг частоты, \mathbf{v} — вектор скорости объекта, \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 — волновые векторы падающей и рассеянной волн, φ_r и φ_s — начальная фаза опорного излучения и спекла соответственно.

Статистические характеристики амплитуды $J_1 = 2kI_r^{1/2}I_s^{1/2}$ переменной составляющей тока фотоприемника (1) можно определить, исходя из статистических характеристик I_s и φ_s . Как известно [5], плотность вероятности интенсивности I_s и фазы φ_s спекл-картины определяются выражениями

$$p(I_s) = \frac{1}{\langle I_s \rangle} \exp\left(-\frac{I_s}{\langle I_s \rangle}\right), \quad (2)$$

$$p(\varphi_s) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{при } -\pi \leq \varphi_s \leq \pi, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

Исходя из (2) и воспользовавшись правилом замены переменной в функциях плотности вероятности [6], найдем плотность вероятности амплитуды J_1 .

$$p(J_1) = p(I_s) \frac{dI_s}{dJ_1}, \quad (4)$$

$$p(J_1) = \frac{J_1}{2k^2 I_r \langle I_s \rangle} \exp\left(-\frac{J_1^2}{4k^2 I_r \langle I_s \rangle}\right). \quad (5)$$

Из (5) видно, что амплитуда J_1 имеет распределение Рэлея [6]. Рассуждая аналогичным образом, нетрудно показать, что плотность вероятности фазы $[\omega_D t + (\varphi_r - \varphi_s)]$ определяется (3). Учитывая свойства гауссовских случайных процессов [7], из формул (1), (3), (5) можно заключить, что переменная составляющая фототока i_{Φ} , обусловленного интерференцией одного спекла, представляет собой узкополосный гауссовский случайный процесс с дисперсией $\sigma_s^2 = 2k^2 I_r \langle I_s \rangle$ и нулевым средним. Исходя из этого нетрудно получить некоторые статистические характеристики амплитуды J_1 .

Наивероятнейшее значение амплитуды

$$J_{1p} = \sigma_s = k \sqrt{2 I_r \langle I_s \rangle}. \quad (6)$$

Среднее значение амплитуды

$$\langle J_1 \rangle = \sqrt{\pi/2} \sigma_s = k \sqrt{\pi I_r \langle I_s \rangle}. \quad (7)$$

Когда в пределах апертуры фотоприемника расположено N спеклов, то переменная составляющая фототока равна сумме N переменных составляющих фототоков, даваемых каждым спеклом. Так как каждый сигнал имеет гауссово распределение с нулевым средним, то и суммарный сигнал будет распределен нормально с нулевым средним, а его дисперсия будет равна сумме дисперсий отдельных сигналов.

$$\sigma_{\Sigma}^2 = N\sigma_s^2 = 2Nk^2I_r \langle I_s \rangle. \quad (8)$$

Учитывая, что амплитуда гауссовского случайного сигнала распределена по Рэлею, определим некоторые статистические характеристики амплитуды J_{Σ} переменной составляющей суммарного фототока.

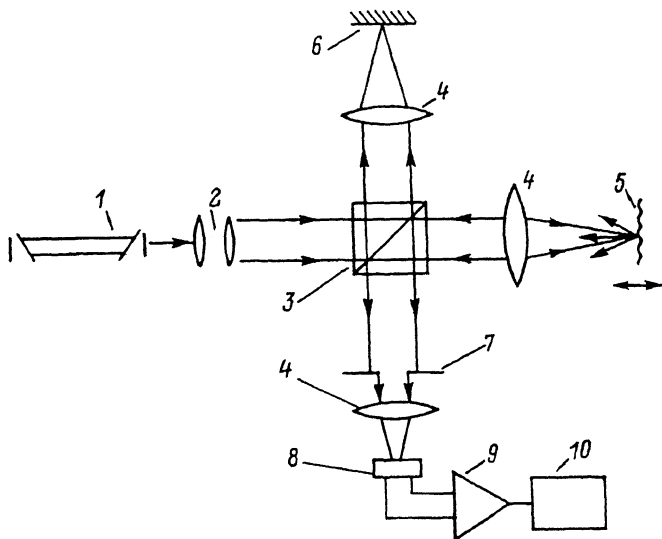


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — лазер, 2 — коллиматор, 3 — светоделительный кубик, 4 — линза, 5 — объект, 6 — зеркало, 7 — круговая диафрагма, 8 — фотодиод, 9 — усилитель, 10 — амплитудный вольтметр.

Наивероятнейшее значение амплитуды

$$J_{\Sigma p} = \sigma_{\Sigma} = \sqrt{N} \sigma_s = \sqrt{N} J_{1p}. \quad (9)$$

Среднее значение

$$\langle J_{\Sigma} \rangle = \sqrt{\pi/2} \sigma_{\Sigma} = k \sqrt{N\pi I_r \langle I_s \rangle} = \sqrt{N} \langle J_1 \rangle. \quad (10)$$

Из сравнения (6), (7) и (9), (10) видно, что наивероятнейшее и среднее значения амплитуды переменной составляющей фототока, обусловленного интерференцией опорного излучения с N спеклами, в \sqrt{N} раз превышают соответствующие характеристики амплитуды фототока, даваемого одним спеклом.

Понятно, что N определяется отношением площади апертуры к средней площади спекла. Например, для типичного случая круглой приемной апертуры радиуса R

$$N = \frac{\pi R^2}{\pi (\Delta x)^2} = \frac{R^2}{(\Delta x)^2}, \quad (11)$$

где Δx — средний размер спекла.

Откуда

$$\langle J_{\Sigma} \rangle = \sqrt{N} \langle J_1 \rangle = \frac{R}{\Delta x} \langle J_1 \rangle, \quad (12)$$

$$J_{\Sigma p} = \frac{R}{\Delta x} J_{1p}. \quad (13)$$

Из (12), (13) видно, что среднее и наивероятнейшее значения амплитуды сигнала линейно зависят от размера апертуры.

Экспериментальные исследования зависимости среднего значения амплитуды интерференционного сигнала $\langle U \rangle = K_y \langle J_E \rangle$, где K_y — коэффициент усиления усилителя, от диаметра круглой приемной апертуры проводились по схеме интерферометра Майкельсона

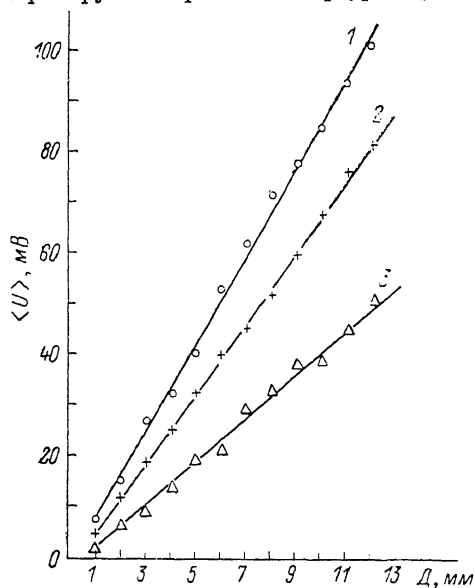


Рис. 2. Зависимость среднего значения амплитуды сигнала $\langle U \rangle$ от диаметра приемной апертуры D .

в лазерной доплеровской спекл-интерферометрии целесообразно увеличивать размер приемной апертуры, так как амплитуда сигнала при этом возрастает. Это может оказаться полезным при интерференционных измерениях параметров движения объектов с шероховатой поверхностью, например, при измерении амплитуды вибрации, когда рассеянное ими когерентное излучение представляет собой спекл-структуру.

Литература

- [1] Бесхлебный В. И., Бондаренко А. Н., Панин В. И. Измерительная техника, 1975, № 3, с. 53—55.
- [2] Tanaka K., Ohtsuka Y. Opt. Commun., 1975, v. 14, N 1, p. 110—114.
- [3] Крэггер. ТИИЭР, 1965, т. 53, № 2, с. 247—248.
- [4] Коронжевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.
- [5] Coodyman J. W. In: Laser Speckle and Related Phenomena / Ed. J. C. Dainty. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 286 p.
- [6] Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. М.: Наука, 1965. 464 с.
- [7] Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1977. 608 с.

Институт прикладной физики АН БССР
Минск

Поступило в Редакцию
12 января 1988 г.