

07;12

© 1991

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛА  
СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ВИБРАЦИЙ

В.П. Рябухо, С.С. Ульянов

В лазерных интерферометрах для измерения параметров вибраций шероховатых поверхностей регистрируется сигнал интерференции или гладкого светового поля со спекл-модулированной волной, или двух спекл-полей, если используется диффузно отражающая опорная поверхность. В [1] показано, что амплитуда выходного сигнала имеет релеевское распределение, при котором среднее и наиболее вероятное значения сигнала при согласовании интерферирующих световых волн возрастает с увеличением числа спеклов, попадающих в апертуру фотоприемника. Аналогичная зависимость имеет место и в случае использования спекл-модулированной опорной волны в режиме больших амплитуд колебаний ( $> \frac{\lambda}{4}$ ). Однако для малых колебаний ( $< \frac{\lambda}{4}$ ) статистика амплитуды сигнала спекл-интерферометра изменяется и становится односторонней гауссовской (рис. 1) с нулевым наиболее вероятным значением. В обоих режимах энергетически выгодно формировать на приемной апертуре спеклы с максимально возможными размерами и использовать приемную апертуру с большим диаметром. Следуя [1], можно показать, что среднее значение амплитуды сигнала пропорционально не просто диаметру  $D$  приемной апертуры, а произведению  $D\epsilon_{\perp}$ , где  $\epsilon_{\perp}$  - поперечный размер спеклов в плоскости апертуры.

При достаточно больших амплитудах колебаний поверхности и при большом числе  $N$  спеклов, попадающих в приемную апертуру (в наших экспериментах  $100 \lesssim N \lesssim 900$ ), в интерферометре со спекл-модулированной опорной волной для некоторых реализаций интерферирующих спекл-полей наблюдалась паразитная амплитудная и фазовая модуляция выходного сигнала (рис. 2, а). Установлено, что эта модуляция обусловлена поперечным смещением предметного спекл-поля, вызванным локальным наклоном вибрирующей поверхности под лазерным пучком, относительно опорного, спекл-структура которого образует сложную по форме апертуру фотоприемника. Влияние такой синтезированной апертуры на модуляцию сигнала определяется в основном фазовыми соотношениями предметного и опорного спекл-полей. Действительно, пространственно-временное распределение интенсивности света в выходной плоскости  $\xi$ , спекл-интерферометр вибраций (например, типа Майкельсона) можно записать в виде

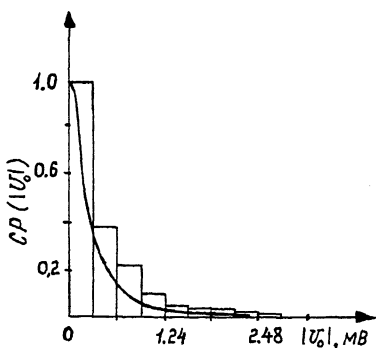


Рис. 1. Гистограмма и теоретический график нормированной на максимальное значение функции плотности распределения амплитуды сигнала спекл-интерферометра при малых амплитудах вибраций;  $C$  - коэффициент нормировки.

$$I(\vec{\xi}, t) = A_1^2(\vec{\xi}) + A_2^2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t)) + 2A_1(\vec{\xi})A_2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t)) \times \cos[\varphi_2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t)) - \varphi_1(\vec{\xi}) + \frac{4\pi}{\lambda}(\Delta z + l_0 \sin \Omega t)], \quad (1)$$

где  $A_1(\vec{\xi})$ ,  $\varphi_1(\vec{\xi})$  и  $A_2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t))$ ,  $\varphi_2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t))$  - амплитудные и фазовые случайные пространственные распределения соответственно опорного и предметного спекл-полей;  $2\Delta z$  - оптическая разность хода волн интерферометра;  $l_0$  и  $\Omega$  - амплитуда и частота вибраций данной точки поверхности;  $\delta\vec{\xi}(t)$  - поперечное смещение предметного спекл-поля. Величина этого смещения при нормальном направлении освещения равна [2]

$$\delta\vec{\xi}(t) = 2\alpha(\vec{x})z \sin \Omega t, \quad (2)$$

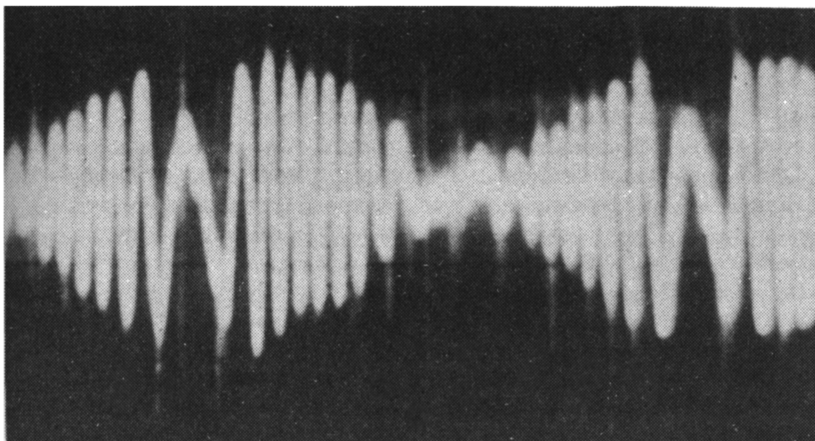
где  $\alpha(\vec{x})$  - угол локального наклона вибрирующей поверхности;  $\vec{x}$  - координата в плоскости поверхности;  $z$  - расстояние между поверхностью и плоскостью  $\vec{\xi}$  приемной апертуры.

Выражение для фотоэлектрического сигнала интерферометра получим путем интегрирования распределения интенсивности  $I(\vec{\xi})$  по приемной апертуре

$$U(t) = U_1 + U_2(t) + 2K \int \int_{S_\varphi} A_1(\vec{\xi})A_2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t)) \times \cos[\Delta\varphi(\vec{\xi}, t) + \frac{4\pi}{\lambda}(\Delta z + l_0 \sin \Omega t)] d\vec{\xi}, \quad (3)$$

$$U_1 = K \int \int_{S_\varphi} A_1^2(\vec{\xi}) d\vec{\xi}; \quad U_2(t) = K \int \int_{S_\varphi} A_2^2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t)) d\vec{\xi};$$

$K$  - коэффициент пропорциональности;  $\Delta\varphi(\vec{\xi}, t) = \varphi_2(\vec{\xi} - \delta\vec{\xi}(t)) - \varphi_1(\vec{\xi})$  - разность фаз интерферирующих спекл-полей. Эта разность



а



б

Рис. 2. Осциллограмма выходного сигнала спекл-интерферометра вибраций с амплитудной модуляцией (а) и с устраненной амплитудной модуляцией за счет введения блокирующего экрана в приемную апертуру (б).

фаз остается постоянной в пределах отдельного спекл-поля и меняется случайным образом при переходе от одного спекла к другому. Поэтому в третьем интерференционном слагаемом соотношении (3) можно перейти к суммированию по отдельным спеклам и записать его после несложных преобразований в виде

$$u_{12}(t) \cos \left[ \varphi(t) + \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta z + l_0 \sin \Omega P t) \right], \quad (4)$$

$$u_{12}(t) = 2K \left\{ \left[ \sum_{j=1}^N A_j \cos \Delta \varphi_j \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^N A_j \sin \Delta \varphi_j \right]^2 \right\}^{1/2}; \quad (5)$$

$$A_j(t) = \iint_{S_j} A_1(\vec{\xi}) A_2(\vec{\xi} - \delta \vec{\xi}(t)) d\vec{\xi}; \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \arctg \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N A_j \sin \Delta \varphi_j}{\sum_{j=1}^N A_j \cos \Delta \varphi_j} \right\}, \quad (7)$$

$\Delta \varphi_j = \varphi_{2j} - \varphi_{1j}$  — разность фаз полей в  $j$ -том спекле площади  $S_j$ ,  $N$  — полное число спеклов, попадающих в приемную апертуру. Из выражений (4)–(7) видно, что поперечное смещение предметного спекл-поля  $\delta \vec{\xi}$  вызывает амплитудную и фазовую модуляцию суммарного выходного сигнала интерферометра.

Таким образом, на выходе интерферометра формируется сигнал с переменными амплитудой  $u_{12}$  и начальной фазой  $\varphi$ . При использовании гладкой опорной волной такой модуляции не происходит, поскольку смещение предметного спекл-поля не приводит к изменению разности фаз интерферирующих полей в отдельных спеклах. Возможная модуляция за счет апертурных ограничений мала и ее не будем учитывать и в рассматриваемом интерферометре.

На рис. 2, а представлена фотография осциллограммы получаемого амплитудно-модулированного сигнала, из которой видно, что период модуляции совпадает с периодом колебаний  $\frac{2\pi}{\Omega}$  поверхности, что согласуется с (2) и (3). Для различных реализаций опорного спекл-поля при той же реализации предметного поля и неизменной амплитуде колебаний поверхности  $l_0$  глубина модуляции сигнала изменяется и может достигать 100%. Для некоторых же реализаций опорной волны она может практически отсутствовать. Основной вклад в модуляцию амплитуды сигнала вносит некоторая совокупность близкорасположенных спеклов — конгломерат спеклов, который выполняет доминирующую роль в формировании сигнала. Это подтверждается экспериментами по пространственной фильтрации результирующего интерференционного поля. При блокировании непрозрачным экраном некоторой небольшой области поля в пределах апертуры фотоприемника, амплитудная модуляция сигнала почти исчезает (рис. 2, б). Размеры этой области и ее положение изменяются при смене реализаций интерферирующих спекл-полей. Смещение блокирующего экрана по приемной апертуре сопровождается изменением глубины амплитудной модуляции сигнала.

В заключение отметим, что наблюдаемая модуляция сигнала может существенным образом сказаться при обработке электрического сигнала интерферометра и повлиять на результаты измерений, особенно при гомодинном режиме работы. С другой стороны, эта

модуляция может служить источником дополнительной измерительной информации, например, о частоте колебаний. Вместе с тем результаты настоящей работы вскрывают новые интересные особенности интерференционного взаимодействия спекл-полей.

Авторы выражают благодарность А.В. Ампилову за полезные обсуждения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А р а н ч у к В.М., З а ц е п и н Н.Н. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 10. С. 2060.
- [2] Ф р а н с о н М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.

Поступило в Редакцию  
1 марта 1991 г.