

УДК 534+531.7+53.082.5

Л.К. Яровой¹, В.И. Розумнюк¹, И.В. Степахно², Т.В. Чунихина³¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев²Межрегиональная академия управления персоналом, Киев³Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАНОАМПЛИТУДНЫХ ВИБРАЦИЙ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ ВИБРОМЕТРОМ

Предложен метод снижения относительной погрешности измерений малых амплитуд механических колебаний лазерным доплеровским виброметром, выполняемых на значительном удалении от объекта в условиях высокого уровня помех. В основу метода положен принцип трехволнового фотодетектирования, который заключается в том, что к двум пучкам классического виброметра добавляется третья когерентная волна. Расчетами показано, что если эта волна распространяется совместно с волной зондирующего пучка, то при определенных условиях между их амплитудами и фазами возникает аномальное увеличение амплитуды сигнала виброметра. При этом, среднеквадратичная погрешность измерения остается практически неизменной. Уменьшение относительной погрешности рассчитано с помощью математической модели и продемонстрировано в эксперименте.

Ключевые слова: лазерная виброметрия, измерение механических колебаний, погрешности измерений, лазерное гетеродинамирование.

Введение

Бесконтактное измерение параметров вибраций, в том числе, удаленных объектов – актуальная задача акустики, метрологии, технической механики, машиностроения и других отраслей науки и техники. Наиболее эффективными средствами решения таких задач являются лазерные доплеровские виброметры (ЛДВ) [1, 2]. В специальных лабораторных условиях может быть достигнута экстремально высокая чувствительность и точность таких лазерных измерительных систем. В то же время, существует практическая необходимость выполнять измерения удаленных объектов вне лабораторных условий.

Если при лабораторных измерениях доплеровский сдвиг отраженной волны лазера обусловлен исключительно колебаниями объекта измерения, то при измерениях удаленных объектов, тем более вне помещения, флуктуации воздушной трассы распространения лазерного излучения также оказывает заметное влияние на параметры (фазу) лазерного пучка, вызывая, тем самым, значительную погрешность.

Для решения этой проблемы было предложено применить трехволновое фотодетектирование (ТВФ), которое реализуется в особой конфигурации ЛДВ [3] с тремя лазерными пучками, в отличие от двух пучков, зондирующего и опорного, в классическом ЛДВ [1].

Настоящая работа посвящена оценке влияния фазовых помех на погрешность измерения параметров вибрации сигнала лазерного виброметра с ТВФ и методу ослабления этого влияния.

1. Анализ сигналов лазерного виброметра с ТВФ при синхронном действии помехи на зондирующий и второй опорный каналы

В предложенном ЛДВ на поверхности фотодетектора интерферируют три когерентные волны: e_0 , e_1 и e_2 . Напомним, что опорная e_0 волна имеет смещение частоты на частоту гетеродина f_0 [1].

Ток фотодетектора i_{det} виброметра пропорционален суммарной интенсивности лазерного излучения. Как показано в [4], амплитуда $I(t)$ и фаза $\varphi(t)$ составляющей фототока детектора на частоте гетеродина

$$i_{det}(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t - \varphi(t))$$

в общем случае представляются, таким образом:

$$I(t) = \infty \sqrt{2E_2 E_1 \cos(\Phi_2(t) - \Phi_1(t)) + E_1^2 + E_2^2};$$

$$\varphi(t) = \arctan \left[\frac{E_1 \sin(\Phi_1(t)) + E_2 \sin(\Phi_2(t))}{E_1 \cos(\Phi_1(t)) + E_2 \cos(\Phi_2(t))} \right], \quad (1)$$

где $\Phi_1(t)$, $\Phi_2(t)$ – фазы, а E_1 , E_2 – амплитуды зондирующей e_1 и второй опорной e_2 волн.

Доплеровский сдвиг $\omega_D(t)$, определяемый формулой

$$\omega_D(t) = \frac{d}{dt} \varphi(t), \quad (2)$$

фактически является, с учетом некоторого постоянного коэффициента, выходным сигналом ЛДВ $u_D(t)$.

Для простоты далее будем считать, что этот коэффициент равен 1 вольт/герц, т.е.

$$u_D(t) = \omega(t) [V/Hz],$$

поэтому в дальнейшем при записи формул будем его опускать.

Рассмотрим общий случай, когда фаза зондирующего луча представлена в виде

$$\Phi_1(t) = 2kX_1 \cos(\Omega t) + \varphi_R(t) + \varphi_1.$$

Здесь первый член – это модуляция фазы связанная с исследуемым сигналом вибрации

$$x_1(t) = X_1 \cos(\Omega t),$$

X_1 – амплитуда смещения,

Ω – частота колебания,

функция $\varphi_R(t)$ может иметь как детерминированную так и стохастическую природу,

φ_1 – начальная фаза.

Сравним две конфигурации измерительной системы ЛДВ:

1. Дополнительный лазерный пучок отсутствует ($E_2 = 0$), на сигнал виброметра влияют вибрация объекта и фазовая помеха $\varphi_R(t)$.

Подставляя $\Phi_1(t)$ в (1) и далее в (2), получим в итоге:

$$u'_D(t) = 2k \cdot v(t) \cdot + \frac{d}{dt} \varphi_R(t), \quad (3)$$

где $v(t) = -v_{\max} \sin(\Omega t)$ – мгновенная скорость, а $v_{\max} = X_1 \cdot \Omega$ – ее амплитуда.

2. Фаза второй опорной волны Φ_2 также модулирована сигналом $\varphi_R(t)$:

$$\Phi_2(t) = +\varphi_R(t) + \varphi_2.$$

Для малых амплитуд колебаний $X_1 \ll \lambda/2$ и при условии

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \approx \pi$$

получим, опуская промежуточные выкладки, в итоге выходной сигнал:

$$u''_D(t) = -2kX_1\Omega \cdot \sin(\Omega t) \cdot \frac{\eta}{\eta-1} + \frac{d}{dt} \varphi_R(t). \quad (4)$$

Здесь $\eta = E_1/E_2$ – отношение амплитуд зондирующей и дополнительной опорной волн.

Сравнивая с (3) можно видеть, что эта формула отличается от "классического" случая параметром

$$\alpha = \frac{\eta}{\eta-1} [4],$$

который показывает аппаратный прирост амплитуды, поскольку при всех равных условиях сигнал на выходе частотного дискриминатора рассматриваемой конфигурации виброметра в α раз превышает такой же сигнал прототипа (в классической ЛДВ $\alpha = 1$).

Симуляция, выполненная средствами математического пакета MATLAB 6™, использует амплитуду колебаний объекта 0.3 нм, что соответствует индексу модуляции фазы 0.006. Частота колебаний 1 кГц.

Результат аддитивного влияния на сигнал фазового шума с СКО = 6.6e-005 радиан, имеющего равномерное распределение и занимающего полосу 0.5 МГц, приводит к появлению помехи, которая значительно затрудняет детектирование сигнала вибрации.

А именно, уровень помехи был выбран таким, чтобы амплитуда неискаженного доплеровского сигнала, равная $\omega = 2\pi \cdot 6$ Гц, примерно равнялась СКО доплеровского сигнала в присутствии помехи $S_2 = 5.96$ Гц (расчет по формуле (3)).

Сигнал виброметра с дополнительным лазерным пучком, рассчитан для значения параметра $\eta = 1.1$ и при $\Delta\varphi = \pi$.

Случай $\Delta\varphi = \pi$ является особенно важным, поскольку именно при этом условии происходит наиболее эффективное повышение уровня выходного сигнала в системе с ТВФ [4].

При подключении дополнительного пучка абсолютная среднеквадратичная погрешность измерения остается такой же $S_3 = 6.0$ Гц, однако уровень сигнала при этом возрастает в одиннадцать раз.

Это приводит к пропорциональному снижению относительной погрешности (расчет по формуле (4)).

Анализ этого явления показывает, что на рост амплитуды сигнала ЛДВ в предложенном виброметре влияют несколько параметров, в первую очередь разность фаз интерферирующих лазерных пучков $\Delta\varphi$ и отношение η их амплитуд.

На рис. 1 представлен расчетный график относительной ошибки измерения как функция параметра η .

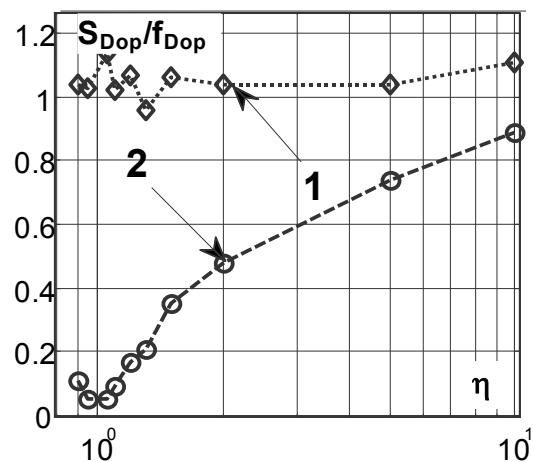


Рис. 1. Зависимости относительной погрешности измерения амплитуды вибрации от параметра η

Относительная погрешность классического виброметра не зависит от параметра η и в данном примере остается постоянной на уровне единицы; некоторый разброс значений вызван небольшой выборкой значений амплитуд).

Что касается относительной погрешности виброметра с тремя пучками, то она уменьшается при приближении η к единице. Снижение относительной погрешности при $\eta \rightarrow 1$ определяется исключительно ростом амплитуды выходного сигнала ЛДВ, который в таком приборе изменяется по закону $u_D''(\eta)/u_D = \eta / (\eta - 1)$ [4].

В то же время СКО этой величины остается неизменной.

Конкретно, при параметре $\eta = 1.1$ снижение относительной погрешности составляет 11 раз, а при $\eta = 1.05$ погрешность снижается в 21 раз.

Снижение погрешности измерения мгновенной скорости за счет выравнивания амплитуд зондирующего и второго опорного пучка ($\eta \rightarrow 1$) имеет ограничения. Прежде всего, при неограниченном росте амплитуды выходного сигнала возникают значительные нелинейные искажения. Здесь важно отметить, что чем меньше амплитуда колебания X_1 , тем большего усиления удастся достичь.

Как было показано в [4], при $X_1 < 0.2 \cdot (\eta - 1) / k$ нелинейные искажения выходного сигнала незначительны. Например, для амплитуд колебаний менее 1 нм может быть достигнуто снижение погрешности измерения в 20 раз и более ($1 < \eta < 1.05$). Именно поэтому предложенный метод наиболее перспективен для повышения точности колебаний с малыми ($X \ll \lambda$), нано- и субнанометровыми амплитудами.

2. Макет лазерного виброметра со сниженной погрешностью измерения параметров

Экспериментальную проверку изложенных теоретических результатов выполнено с помощью специально созданного стенда (рис. 2) на базе лазерного виброметра CLV-S фирмы (Polytec GmbH).

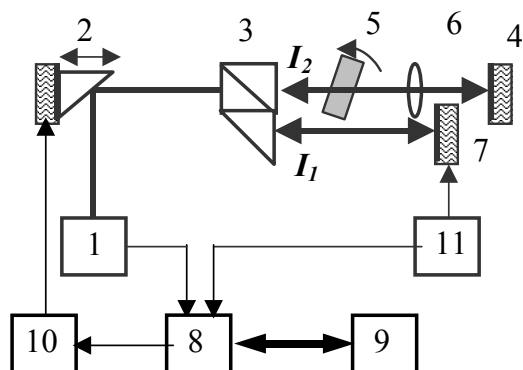


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки модернизированного ЛДВ с ТВФ

Цифрами на рис. 2 обозначено:

- 1 – лазерный виброметр CLV-S,
- 2 – пьезоэлемент, предназначенный для создания дополнительной фазовой модуляции,
- 3 – делитель первичного зондирующего пучка на зондирующий I_1 и дополнительный I_2 каналы.

В пучке I_2 размещены: зеркало 4, наклоняемая тонкая стеклянная пластина 5, предназначенная для регулировки разности фаз $\Delta\varphi$ и объектив 6, перемещая который можно изменять величину отражения и амплитуду пучка. Зеркало 7, закрепленное на пьезоэлементе, моделирует исследуемый объект.

Сигнал виброметра 1 поступает на АЦП – ЦАП 8, который связан с компьютером 9. Сигнал генератора 11 питает пьезоэлемент 7 и также поступает для синхронизации на второй вход АЦП 8. Сигнал помехи синтезировался программными средствами и через ЦАП 8 направлялся через усилитель 10 на имитатор фазовой помехи 2.

Сигналы виброметра 1 записывались и сохранялись на компьютере 9 для последующего анализа и компиляции при представлении рисунков.

На стенде был смоделирован случай, приближенный к реальным условиям, когда шум может быть произвольным.

Для этого на пьезоэлемент 2 подавался сигнал помехи с равномерной спектральной плотностью в диапазоне 0.5 kHz – 8 kHz.

Экспериментально полученные спектры выходного сигнала виброметра при различных конфигурациях оптической схемы приведены на рис. 3 для случая колебаний объекта 3 с амплитудой 2 нм и частотой 3.1 kHz.

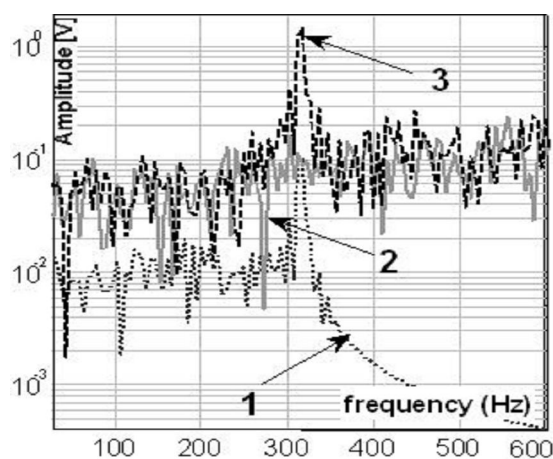


Рис. 3. Экспериментальные спектры сигналов ЛДВ

Точечная линия 1 – это сигнал классического ЛДВ с отсутствующим дополнительным каналом. Помеха также отсутствовала.

Можно видеть, что на частоте 3.1 kHz существует спектральный максимум, который соответствует измеряемому сигналу.

Наличие помехи в (единственном) зондирующем канале увеличивает уровень шума в выходном сигнале виброметра. Сигнал вибрации теряется в шумах (сплошная серая линия 2).

Подключение дополнительного канала I_2 с учетом тонкой настройке схемы, обеспечивающей условия

$$\Delta\varphi \approx \pi \text{ и } 0.5 < \eta < 2.0,$$

приводит к росту сигнала вибрации, который приблизительно на 10 dB превышает уровень шумов (пунктирная черная линия 3).

Заклучение

Предложен метод уменьшения погрешности измерения мгновенной скорости лазерным доплеровским виброметром в условиях малых уровней вибрации и воздействия значительных фазовых помех на тракт распространения зондирующего лазерного излучения. Схема измерения использует принцип трехволнового фотосмещения.

С помощью модели выполнена оценка среднеквадратичной и относительной погрешности измерения амплитуд сигнала вибрации.

Показано, что для малых амплитуд использование оптимальных настроенного ТВФ позволяет снизить относительную погрешность измерения в $\eta / (\eta - 1)$ раз, где η – соотношение амплитуд зондирующего и второго опорного лазерных пучков.

Для практической оценки возможностей метода, проведен эксперимент на модернизированном лазерном виброметре CLV-S.

В эксперименте было продемонстрировано увеличение отношения сигнал/шум 10 dB, что в кон-

кретном случае позволяло выявить, а также измерить сигнал вибрации на уровне шумов, которые скрывали сигнал классического ЛДВ ($\text{SNR} \approx 1$).

Предложенный метод уменьшения относительной погрешности может быть успешно использован в измерительной технике и метрологии, при измерениях наноамплитудных колебаний, как удаленных объектов, так и при значительном влиянии фазовых помех на тракт распространения лазерного пучка.

Список литературы

1. Drain L.E. *The Laser Doppler Technique [Текст]* / L.E. Drain. – New York: Wiley, 1980. – 450 p.
2. Johansmann M. *Targeting the limits of laser Doppler vibrometry [Текст]* / M. Johansmann, G. Siegmund, M. Pineda // *Proceedings of the International Disk Drive Equipment and Materials Association*. – 2005. – P. 1-12
3. Пат. 990558 UA, МКИ4 G01C 3/00, G01C 3/08, G01B 9/02. *Лазерний доплерівський вимірювач вібрації [Текст]* / Л.К. Яровой, Д.О. Іващенко, В.І. Розумнюк; заявник та патентовласник Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – № а 20110548; заявл. 09.04.12; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13 – 9 с.
4. Яровой Л.К. *Особливості роботи лазерного доплерівського віброметра з трихвильовим фотозмішуванням в нанометровому діапазоні [Текст]* / Л.К. Яровой // *Вісник Київського університету. Серія: Математика. Механіка*. – 2011. – Вип. 26. – С. 39-43.

Поступила в редколлегию 24.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ НАНОАМПЛІТУДНИХ ВИБРАЦІЙ ВІДДАЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ ЛАЗЕРНИМ ДОПЛЕРОВСЬКИМ ВІБРОМЕТРОМ

Л.К. Яровой, В.І. Розумнюк, І.В. Степахно, Т.В. Чуніхіна

Запропоновано метод зменшення відносної похибки вимірювання малих амплітуд механічних коливань лазерним доплерівським віброметром, які виникають на значному віддаленні від об'єкта в умовах високого рівня завод. В основу метода покладено принцип трихвильового фотодетектування, який полягає у тому, що до двох пучків класичного віброметра додається третя когерентна хвиля. Розрахунками показано, що якщо ця хвиля розповсюджується спільно з хвилею зондувального променя, тоді при певних співвідношеннях між їхніми фазами та амплітудами виникає аномальне підсилення доплерівського сигналу. При цьому, середньоквадратична похибка вимірювання залишається практично незмінною. Зменшення відносної похибки розраховано за допомогою математичної моделі та продемонстровано в експерименті.

Ключові слова: лазерна віброметрія, вимірювання механічних коливань, похибки вимірювань, лазерне гетеродинавання.

REDUCING MEASUREMENT UNCERTAINTY FOR NANO-SCALE VIBRATIONS OF REMOTE TARGET BY LASER DOPPLER VIBROMETER

L.K. Yarovoi, V.I. Rozumnuk, I.V. Stepakhno, T.V. Chuniuhina

A method of reducing the relative error of the laser Doppler vibrometer for measuring mechanical vibrations of small amplitudes at a considerable distance in a high noise level is proposed. The method is based on the principle of three-wave interference. It is shown that if the additional referent wave propagates together with the probe beam, so the output vibrometer signal may rise under certain conditions between their amplitudes and phases between the intervening laser waves. At the same time, and the rms measurement error remains practically at the initial level. Reducing the relative error estimated with the mathematical model and demonstrated experimentally.

Keywords: laser Doppler vibrometer, vibrometry, vibration measurements.