

**Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.**

УДК 621.376.3: 519.233.2

Т. А. Хренникова

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: KhrennikovaTA@mpei.ru*

**МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ГОМОДИННОГО ЛАЗЕРНОГО
ДОПЛЕРОВСКОГО ВИБРОМЕТРА**

АННОТАЦИЯ

С использованием неравенства Рао-Крамера проведен расчет нижней границы дисперсии эффективной оценки индекса модуляции сигнала гомодинного лазерного доплеровского виброметра (ЛДВ). Предложены методы обработки сигнала гомодинного ЛДВ для различных видов оптических схем. Проведено численное моделирование и сравнение алгоритма обработки сигнала с оценкой индекса модуляции по ширине спектра для одноканальной схемы гомодинного ЛДВ и алгоритма обработки для схемы с оптическим квадратурным каналом.

**ГОМОДИННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ВИБРОМЕТР, НИЖНЯЯ ГРАНИЦА
ДИСПЕРСИИ ОЦЕНКИ, ИНДЕКС МОДУЛЯЦИИ, ГОМОДИННЫЙ ЛДВ С ОПТИЧЕСКИМ
КВАДРАТУРНЫМ КАНАЛОМ**

ВВЕДЕНИЕ

Своевременное выявление возможных разрушений в элементах инженерных сооружений, а также элементах конструкций машин и механизмов в процессе их эксплуатации необходимо для предотвращения аварийных ситуаций и техногенных катастроф. В процессе вибромониторинга основной задачей является получение максимально правдоподобных оценок уровней вибраций и их сравнение с допустимыми нормами. В связи с этим актуально широкое развитие дистанционных и бесконтактных способов измерения вибраций, а также разработка алгоритмов обработки и анализа полученных данных, обеспечивающих заданную точность результатов [1].

Осуществление таких методов возможно с помощью лазерных доплеровских виброметров (ЛДВ), позволяющих исследовать гармонические вибросмещения и производить оценку параметров процессов, которые являются причиной появления виброколебаний [2].

**ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА ГОМОДИННОГО ЛДВ И СВЯЗЬ ЕГО ПАРАМЕТРОВ
С НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕЙ ДИСПЕРСИИ ОЦЕНКИ ИНДЕКСА МОДУЛЯЦИИ**

Структурная схема гомодинного ЛДВ

В основе оптической схемы виброметра лежит схема интерферометра Майкельсона с лазерным источником излучения и одновременной регистрацией одним фотоприемником

результата интерференции двух оптических сигналов с меняющимся во времени взаимным фазовым сдвигом между ними.

На рис. 1 представлена упрощенная схема интерферометра Майкельсона с фотоэлектрической регистрацией [3]. Излучение лазера LS делится с помощью светоделительного куба BS на два пучка, направляемых на зеркало M1 и отражающую поверхность M2. Поверхность M2 совершает колебательные движения по гармоническому закону $z(t)$. Отразившиеся от M1 и M2 лучи снова объединяются BS и направляются на фотодетектор PD. Фотодетектор PD преобразует мощность интерференционного взаимодействия световых волн, пришедших из плеч интерферометра, в напряжение $U(t)$, зависимость которого от времени является выходным измерительным сигналом интерферометра.

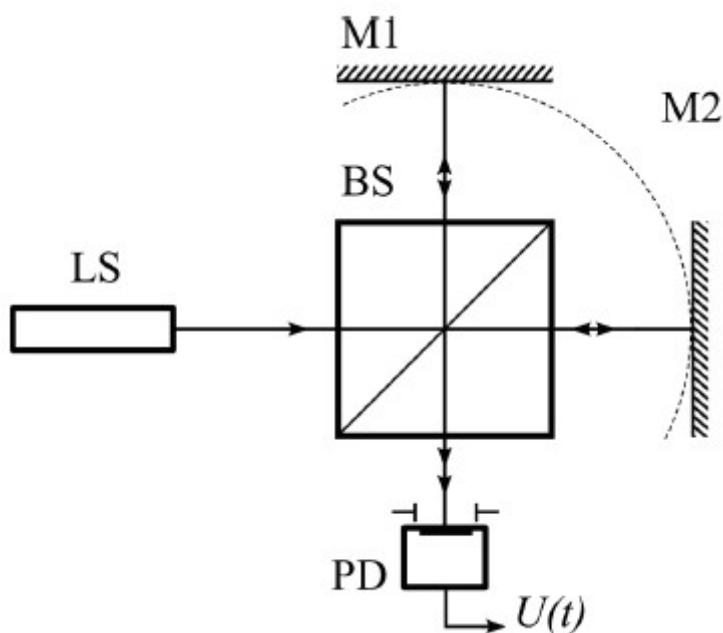


Рис. 1. Схема интерферометра Майкельсона (LS – лазерный источник света, BS – светоделительный куб, M1 – зеркало, M2 – поверхность, совершающая колебательные движения, PD – фотоприемник)

Математическая модель сигнала гомодинного ЛДВ

Модель идеального сигнала гомодинного ЛДВ [2] можно представить в виде:

$$u(t) = U \cos[m \cdot \sin(\Omega t + \Phi) + \varphi], \quad (1)$$

где U – амплитуда сигнала, m – индекс угловой модуляции, связанный с амплитудой выбросмещения L соотношением:

$$m = 2\pi L / \Lambda, \quad (2)$$

где Λ – период интерференционной картины в области измерительного объема ЛДВ, построенного по дифференциальной оптической схеме; Ω – частота виброколебаний; φ – начальная фаза регистрируемого сигнала, зависящая от разности оптических путей от светоделительного куба до зеркала M1 и поверхности M2, Φ – начальная фаза виброколебаний. Амплитуду выбросмещения L можно определить косвенным путем по результатам прямого измерения параметра Λ и оценки параметра m , полученной в ходе обработки сигнала ЛДВ.

Задача оценки информационного параметра m рассматривается в случае, когда на устройство оценивания с выхода фотоприемника на интервале времени $(0, T)$ поступает аддитивная смесь сигнала (1) и стационарного широкополосного гауссова шума $n(t)$:

$$x(t) = u(t) + n(t), \quad (3)$$

корреляционную функцию шума $n(t)$ можно описать выражением:

$$R(\tau) = (N_0/2)\delta(\tau), \quad (4)$$

где N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума, $\delta(\tau)$ – функция Дирака.

Нижняя граница дисперсии оценки индекса модуляции

Из [4] известно, что с использованием неравенства Рао-Крамера можно получить выражения для нижней границы дисперсии оценки информационного параметра сигнала, принимаемого в смеси с аддитивным гауссовым широкополосным шумом при известных и неизвестных неинформационных параметрах сигнала. Если неинформационные параметры сигнала точно известны, а отношение энергии сигнала на интервале наблюдения к спектральной плотности мощности шума достаточно велико, оценка информационного параметра m сигнала является оптимальной по критерию минимума среднеквадратической погрешности, нижняя граница дисперсии которой D_m определяется неравенством:

$$D_m \geq \left\langle \left(\frac{\partial \ln p(x(t)|m)}{\partial m} \right)^2 \right\rangle^{-1}, \quad (5)$$

где $\langle \rangle$ – знак математического ожидания, $p(x(t)|m)$ – функционал условной плотности вероятности наблюдаемой реализации $x(t)$.

Если же неинформационные параметры сигнала неизвестны, то решается задача совместного оценивания и формируется матрица Фишера, элементы которой определяются формулой [4]:

$$J_{\lambda_i \lambda_j} = \left\langle \frac{\partial \ln p(x|\Lambda)}{\partial \lambda_i} \frac{\partial \ln p(x|\Lambda)}{\partial \lambda_j} \right\rangle, \quad (6)$$

где $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots)$ – вектор параметров сигнала, который в рассматриваемом случае имеет вид $\Lambda = (U, m, \Omega, \Phi, \phi)$. Нижние границы дисперсий оценок параметров определяются при этом диагональными элементами корреляционной матрицы ошибок \mathbf{D} , которая вычисляется путем обращения информационной матрицы Фишера $\mathbf{D} = \mathbf{J}^{-1}$ [4].

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГОМОДИННЫХ ЛДВ

Численное моделирование алгоритма обработки сигнала гомодинного ЛДВ с оценкой индекса модуляции по ширине спектра

Обзор методов обработки сигналов гомодинных ЛДВ показал, что для выбранной модели смеси сигнала и шума может быть использован метод измерения по ширине спектра

частотно-модулированного сигнала, который дает неплохие результаты при больших значениях индекса модуляции и широкополосных процессах.

Алгоритм определения относительной амплитуды виброколебаний L/Λ спектральным методом заключается в следующем. Имеется определенный массив отсчетов сигнала U_k , предварительно дискретизированного. Первым шагом обработки является вычисление его спектра с помощью БПФ. Поскольку полученные значения спектральных составляющих являются комплексными, то необходимо рассчитать их модули.

Из [6] известно, что ширина спектра ЧМ сигнала зависит от индекса модуляции. Принимая за ширину спектра частоту, на которой модуль спектра принимает максимальное значение, можно оценить величину индекса модуляции. В рассматриваемом случае за ширину спектра принимается частота спектральной составляющей, модуль которой имеет наибольшее значение, при этом нас интересует не величина этой составляющей, а ее номер k . Величина индекса ЧМ как функция от номера модуля спектральной составляющей частоты имеет вид [6]:

$$m = k + \frac{0.8086k^{1/3}}{\left(1 - \frac{0.27}{k^{2/3}}\right)}, \quad (7)$$

В работе проводилось численное моделирование метода обработки сигнала гомодинного ЛДВ с оценкой индекса модуляции по ширине спектра. При моделировании использовались следующие значения параметров: число периодов виброколебаний на интервале времени наблюдения $T/T_\Omega \geq 1$, индекс модуляции $m = 100$, $\phi = 4\pi/3$, $\Phi = \pi$. Обработка результатов моделирования показала, что при отношении сигнал-шум $q = 55$ dB относительное СКО оценки $\sigma_m/m = 0,0286\%$.

Численное моделирование алгоритма обработки сигнала гомодинного ЛДВ с оптическим квадратурным каналом

Измеряемая величина $U(t)$ в рассматриваемой ранее системе (рис. 1) напрямую зависит от $\Delta\phi(t)$, где $\Delta\phi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$ – переменная во времени разность фаз между интерферирующими волнами, $\varphi_2(t)$ – фазовая задержка волны, отраженной от М2, $\varphi_1(t)$ – фазовая задержка волны, отраженной от М1. Закон изменения фазы волны, отраженной от М2, может быть представлен выражением [3]:

$$\varphi_2(t) = 2\frac{2\pi}{\lambda_0}z(t), \quad (8)$$

где λ_0 – центральная длина волны излучения лазера.

Зеркало М1 можно считать неподвижным, поэтому $\Delta\phi(t)$ с точностью до постоянного слагаемого определяет фазовую задержку волны, отраженной от М2. Если считать постоянную составляющую и амплитуду сигнала постоянными и не зависящими от времени, то $\Delta\phi(t)$ можно выразить как функцию арккосинуса от величины:

$$U_p(t) = (U(t) - U_o)/U_A, \quad (9)$$

нормировав ее на единицу; U_o – постоянная составляющая сигнала, U_A – амплитуда сигнала.

Однако однозначным образом определить величину угла по значениям косинуса оказывается в общем случае затруднительным.

Альтернативным является метод лазерной виброметрии, основанный на регистрации интерференционных сигналов в двух отдельных квадратурных каналах с последующей фазовой демодуляцией. В отличие от схемы рис. 1 в данном методе в схему добавляется канал приема квадратурного сигнала, имеющего сдвиг в $\pi/2$ радиан относительно основного сигнала (синфазного). На практике из этих сигналов исключают постоянные составляющие

путем аналоговой фильтрации, либо средствами численной обработки оцифрованных сигналов, и нормируют каждый из сигналов на амплитуду. После этого отношение сигналов принимает вид:

$$U_p(t) = \frac{U^{(2)}(t)}{U^{(1)}(t)} = \frac{\cos(\Delta\varphi(t) - \frac{\pi}{2})}{\cos(\Delta\varphi(t))} = \frac{\sin(\Delta\varphi(t))}{\cos(\Delta\varphi(t))} = \operatorname{tg}(\Delta\varphi(t)). \quad (10)$$

Из этого отношения можно восстановить значение $\Delta\varphi(t)$ в любой момент времени, в который будет известно $U_p(t)$:

$$\Delta\varphi(t) = \operatorname{arctg}(U_p(t)) + n\pi, \quad (11)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\dots$

Опять возникает неопределенность, вызванная периодичностью теперь уже тангенса. Однако характер этой периодичности позволяет с достаточной точностью определить момент начала следующего периода, поскольку начало каждого периода связано с разрывом функции $\operatorname{tg}(\varphi)$. Таким образом можно восстановить зависимость $\Delta\varphi(t)$, но в моменты времени, когда значение фазы будет кратным $\pm \pi/2$ радиан, функция будет испытывать разрыв.

Для исключения разрыва фазы применяется операция, называемая разверткой фазы. Суть операции заключается в том, что если при сравнении $\Delta\varphi(t_1)$ и $\Delta\varphi(t_2)$ разность $\delta\varphi = \Delta\varphi(t_2) - \Delta\varphi(t_1)$ по модулю превышает π , то от $\Delta\varphi(t_2)$ и всех последующих отсчетов отнимается π со знаком $\delta\varphi$, после чего действие повторяется для каждого разрыва, присущего в восстановленном сигнале. В отличие от схемы 1 при восстановлении закона изменения фазы во времени используется знание значений не одной, а двух функций: $\sin(\Delta\varphi(t))$ и $\cos(\Delta\varphi(t))$ в каждый момент времени, что позволяет восстановить произвольный закон изменения фазы $\Delta\varphi(t)$ во времени.

Схема модифицированного интерферометра Майкельсона представлена на рис. 2 [3]. В таком случае схема гомодинного ЛДВ усложняется, но алгоритм обработки становится проще и точнее по сравнению с методом обработки по ширине спектра сигнала.

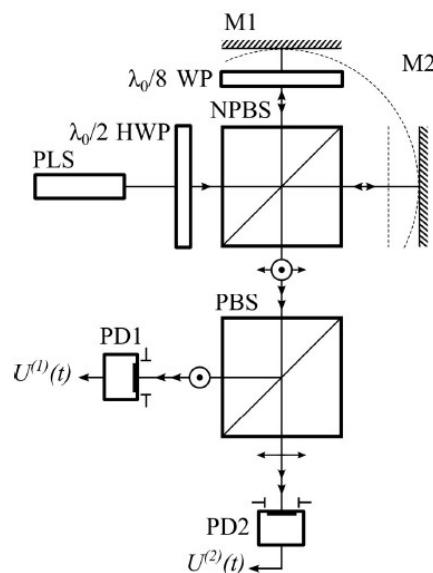


Рис. 2. Схема модифицированного интерферометра Майкельсона (PLS – лазер с линейно поляризованным излучением, NPBS – светоотделительный куб, нечувствительный к поляризации излучения, M1 – зеркало, M2 – исследуемый движущийся объект, WP, HWP – фазовые пластины, PBS – поляризационный светоотделительный куб, PD1, PD2 – фотоприемники)

В работе проводилось численное моделирование данного метода обработки сигнала гомодинного ЛДВ при тех же параметрах, что и при моделировании метода оценки индекса модуляции по ширине спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка потенциальной точности индекса модуляции показала, что при отношении сигнал-шум $q = 55$ dB при неизвестных неинформационных параметрах относительное СКО оценки $\sigma_m/m = 0,0025\%$. Полученные результаты моделирования для схемы с оптическим квадратурным каналом практически совпадают с потенциальной оценкой, что говорит о высокой точности метода. При том же самом q относительное СКО оценки $\sigma_m/m = 0,0034\%$. Также моделирование показало, что $q = 45$ dB является «пороговым» уровнем, поскольку при меньшем отношении сигнал-шум наблюдается проявление значительной отрицательной систематической погрешности.

Результаты сравнения двух методов обработки сигналов для одноканальной схемы гомодинного ЛДВ и для схемы с оптическим квадратурным каналом указывают на то, что при большом отношении сигнал-шум, как и ожидалось, второй метод оказался точнее.

Были подобраны условия проведения измерений для схемы с оптическим квадратурным каналом, при которых возможно получить наилучший результат с точки зрения минимизации погрешности и уменьшения времени измерений. На интервале времени наблюдения должно быть не менее двух периодов виброколебаний ($T/T_\Omega \geq 2$).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $U(t)$ – напряжение на выходе фотоприемника;
 $u(t)$ – модель сигнала гомодинного ЛДВ;
 U – амплитуда сигнала гомодинного ЛДВ;
 m – индекс модуляции;
 L – амплитуда вибросмещения;
 Λ – период интерференционной картины в области измерительного объема ЛДВ;
 Ω – частота виброколебаний;
 Φ – начальная фаза регистрируемого сигнала;
 Φ – начальная фаза виброколебаний;
 T – интервал времени наблюдения;
 $x(t)$ – смесь сигнала и стационарного широкополосного гауссова шума;
 $n(t)$ – стационарный широкополосный гауссов шум;
 $R(\tau)$ – корреляционная функция широкополосного гауссова шума;
 N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума;
 $\delta(\tau)$ – функция Дирака;
 $p(x(t)|m)$ – функционал условной плотности вероятности реализации $x(t)$;
 T_Ω – период виброколебаний;
 q – отношение сигнал-шум;
 J – информационная матрица Фишера;
 $J_{\lambda i \lambda j}$ – элементы информационной матрицы Фишера;
 D – корреляционная матрица ошибок;
 Λ – вектор параметров сигнала;
 k – номера модуля спектральной составляющей частоты;
 $\Delta\phi(t)$ – переменная во времени разность фаз между интерферирующими волнами;
 $\varphi_2(t)$ – фазовая задержка волны, отраженной от совершающей колебания поверхности;
 $\varphi_1(t)$ – фазовая задержка волны, отраженной от зеркала М1;

λ_0 – центральная длина волны излучения лазера;
 $z(t)$ – закон движения колеблющейся поверхности;
 U_O – постоянная составляющая сигнала;
 U_A – амплитуда сигнала;
 $U^{(2)}(t)$ – квадратурный сигнал;
 $U^{(1)}(t)$ – синфазный сигнал;
 σ_m – СКО оценки сигнала гомодинного ЛДВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глущенко А. В., Моргунов К. П. Методический подход к определению спектра вибраций инженерных конструкций с помощью прямого фотодетектирования рассеянного когерентного излучения // Журнал университета водных коммуникаций. 2009. Вып. 3. С. 42-45.
2. Застрогин Ю.Ф. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования. / Ю. Ф. Застрогин, О. Ю. Застрогин, А. З. Кулебякин. М.: Машиностроение, 1995. 320 с.
3. Лычагов В. В., Рябухо В. П. Лазерный интерференционный виброметр: уч.-метод. рук. Саратов: СГУ им. Н. Г. Чернышевского, 2011. 24 с.
4. Крамер Г. Математические методы статистики / Пер. с англ. Под ред. А. Н. Колмогорова, 2-е изд. – М.: ИЛ, 1975. 512 с.
5. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 398 с.
6. Павленко Ю.Ф., Шпаньон П.А. Измерение параметров частотно-модулированных колебаний. М.: Радио и связь, 1986 г. 208 с.

T.A. Khrennikova¹

¹ Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru

METHODS OF DIGITAL PROCESSING OF SIGNAL OF HOMODINE LASER DOPPLER VIBROMETER

Using the Rao-Cramer inequality, the lower bound of the dispersion of the effective estimate of the modulation index of the homodyne laser Doppler vibrometer (LDV) signal was calculated. Methods for processing the homodyne LDV signal for various types of optical circuits are proposed. Numerical simulation and comparison of the signal processing algorithm with a modulation index estimate on the spectrum width for a single-channel homodyne LDV scheme and a processing algorithm for a circuit with an optical quadrature channel are performed.

HOMODINE LASER DOPPLER VIBROMETER, LOWER BORDER OF DISPERSION OF EVALUATION, INDEX OF MODULATION, HOMODINE DRIVER WITH OPTICAL SQUARE CHANNEL