

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20150110>

УДК 534.647:621.035.08

Б 95

VIDEO SIGNAL PROCESSING FOR MEASURING VIBRATION PARAMETERS OF OBJECTS LOCATED AT DIFFERENT DISTANCES FROM THE OBSERVER

ОБРАБОТКА ВИДЕОСИГНАЛА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ОБЪЕКТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА РАЗНЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Yurii M. Bykovskiy

y.bykovsky@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1442-5053

Volodymyr A. Nurzai

Mengsk777@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-6807-7907

Ю. М. Быковский,

канд. техн. наук, доц.;

В. А. Нурзай,

асп.

Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, г. Севастополь

Abstract. The implementation of the photomodulation method of measuring the vibration parameters of the spatially distributed objects has been discussed. The aim of the studies is to consider the option of measuring the vibration parameters using a video camera mounted coaxially to the direction of the vibration. In this case the greatest problems in the interpretation of data take place. A method of processing video data for the identification of the frequencies of vibration of the objects located within the area which the camera captures is developed. The possibility of using the optical zoom for monitoring the distant objects is studied experimentally. The possibility of using a stroboscope for measuring the frequencies of vibration exceeding the frequency of shooting is studied. The experiment on the simultaneous identification of different frequencies of two independent objects was carried out. It proved possible to measure the frequency of vibration of the object located at a distance of 5.5 meters from the camera. The use of the stroboscopic lighting allowed detecting the frequencies of vibration by many times exceeding the shooting speed of the camera. The software for the identification of the frequencies of vibration of multiple objects was developed. The undertaken studies showed that the developed method is applicable in the industrial environment and serves as an urgent alternative to the existing methods of measuring vibration. The results obtained in the work give evidence of the efficiency of the suggested optical method for measuring the vibration parameters of extended objects.

Keywords: vibration; optical methods; video signal processing; vibration parameters; source of acoustic signal.

Аннотация. Разработан оптический способ определения параметров вибрации объектов путем интерпретации информации видеофайла, показана возможность применения оптического увеличения видеокамеры для наблюдения расположенных на разном расстоянии объектов и использование стробоскопического освещения для регистрации высоких частот вибрации. Представлена методика разделения кадра для одновременного измерения вибрации от различных источников.

Ключевые слова: вибрация; оптические методы; обработка видеосигнала; вибрационные параметры; источник акустического сигнала.

Анотація. Розроблено оптичний спосіб визначення параметрів вібрації об'єктів шляхом інтерпретації інформації відеофайла, показано можливість застосування оптичного наближення відеокамери для спостереження об'єктів на різній відстані, використання стробоскопічного освітлення для реєстрації високих частот вібрації. Подано методику розбиття кадру для одночасного вимірювання вібрації від різних джерел.

Ключові слова: вібрація; оптичні методи; обробка видеосигналу; вібраційні параметри; джерело акустичного сигналу.

REFERENCES

- [1] Bykovskiy Yu.M. Razrabotka fizicheskikh modeley etalonnnykh istochnikov vibratsii dlya eksperimentalnogo issledovaniya kolebaniy opticheskimi metodami [Development of the physical models of the standard sources of vibration for the experimental study of vibrations with the optical methods]. *Sbornik nauchnykh trudov Akademii voenno-morskikh sil imeni P.S. Nakhimova* [Collection of Scientific Publications of NHNI], 2012, no. 4, issue 12, pp. 70–76.

- [2] Marpl S.P. *Tsifrovoy spektralnyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow, Mir Publ., 1990.
- [3] Klyuev V.V. *Pribory i sistemy dlya izmereniya vibratsii, shuma i udara* [Devices and systems for measuring vibration, noise and blast]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 448 p.
- [4] *SanPiN № 5804-91 Sanitarnye normy i pravila ustroystva i ekspluatatsii lazerov* [Sanitary norms and rules № 5804-91. Sanitary norms and rules of the construction and operation of lasers]. Moscow, Research institute of labor protection publ., 1991. 61 p.
- [5] Sait studii vysokoskorostnoy semki (Studio of High-speed shooting). Katalog vysokoskorostnykh kamer – *Catalogue of high-speed cameras*. Available at: <http://www.highspeedimaging.ru>.
- [6] Niezrecki Christopher. *A Review of Digital Image Correlation Applied to Structural Dynamics*. New York, American Institute of Physics Publishing LLC, 2010.
- [7] PCE Instruments UK Ltd. Measuring instruments. Meters stroboscope. Available at: <http://www.pce-instruments.com>.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Производственный технологический процесс неизбежно сопровождается вибрацией оборудования, опор, конструкций и инженерных сооружений. Различные типы вибрационного воздействия могут оказывать вредное влияние на оборудование и персонал и быть опасным фактором, приводящим к аварийным последствиям. Таким образом, определение вибрационных признаков и тенденций их изменений в технологическом оборудовании и конструкциях является важным и востребованным направлением научного исследования [3].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Широкое распространение получили оптические лазерные методы измерения параметров вибрации. Однако опасное воздействие лазерного излучения на органы зрения человека [4] является существенным препятствием для использования данных методов в рабочих зонах предприятия. Решение проблемы может быть найдено при использовании нелазерных оптических методов. Так, в работе [6] обсуждаются результаты наблюдения за вибрирующим объектом при помощи стереопары из разнесенных в пространстве видеокамер, находящихся под углом к направлению вибрации. Такое решение применительно к нашей задаче – измерению параметров вибрации поверхности объекта наблюдения, перпендикулярной оптической оси камеры, представляется достаточно сложным и непроработанным для получения адекватного результата.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – рассмотрение альтернативного варианта измерения вибрационных параметров с помощью одной видеокамеры, установленной соосно направлению вибрации, при котором, как следует из [6], имеют место наибольшие проблемы в интерпретации данных.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для выявления параметров вибрации и для оценки характера их изменений для совокупности объектов использовалась видеокамера, визирующая

область пространства с расположенными в нем объектами – источниками колебаний с открытой для света поверхностью.

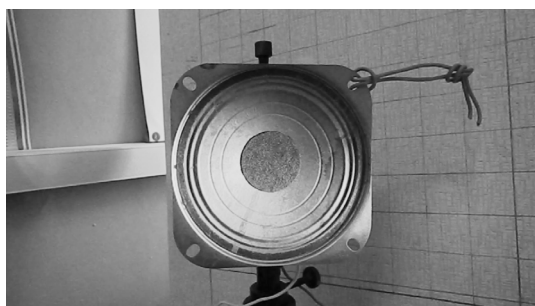
В качестве видеокамеры был применен фотоаппарат Nikon Coolpix L310 с широкоугольным объективом Nikkor 21X Wide Optical Zoom VR. Функцию вибрирующей поверхности выполняли диффузоры громкоговорителей [1], частота вибрации которых задавалась от программного генератора. В проведенных опытах ось излучателя акустического сигнала совпадала с оптической осью камеры.

Фотоаппарат позволяет снимать видео с фиксированной частотой 30 кадров в секунду. Видеофрагменты разбиваются по кадрам BMP формата, удобным для дальнейшего анализа.

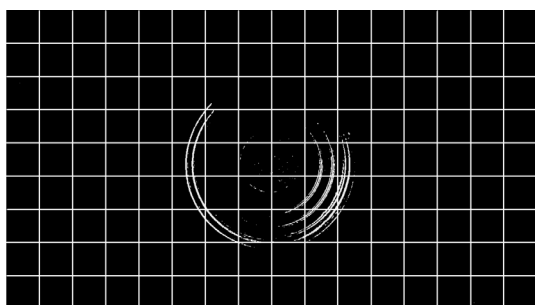
Определен значащий параметр кадра – псевдояркость как сумма битов составляющих цвета каждого пикселя изображения. На рис. 1,*а* показан кадр видеосъемки работающего динамика. Разностный кадр (рис. 1,*б*) является результатом абсолютной разности значений битов пикселей из двух последовательных кадров видеофрагмента. После наложения программного фильтра по значениям битов пикселей четко очерченными остались гофры динамика, что свидетельствует о наибольшем изменении интенсивности яркости в этих областях. Сетка, наложенная на кадр, разделяет его на отдельные фрагменты, в которых вычисления производятся независимо. Пространственное распределение ячеек сетки в пределах видеокадра позволяет говорить о многомерном поле вибрационного контроля как характеристике протяженного объекта.

В реальных условиях съемки в поле визирования могут оказаться объекты на разном удалении от камеры. Это требует вариации параметров оптической системы фокусировки. Анализ данной ситуации был выполнен с использованием трансфокатора камеры, обладающей 21-кратным оптическим увеличением. На рис. 2,*а* приведен фотоснимок объекта, вибрирующего с частотой $f = 10$ Гц и удаленного от камеры на расстояние 5,5 м. Рис. 2,*б* иллюстрирует этот же

объект после максимального (21-кратного) приближения, позволяющего детально рассмотреть вибрирующий объект и провести частотный анализ.



a



б

Рис. 1. Фотосъемка излучателя акустического сигнала: *a* – кадр видеосъемки динамика, вибрирующего с частотой 10 Гц; *б* – результат попиксельного сравнения межкадрового изменения интенсивности после фильтрации и наложения сетки



a



б

Рис. 2. Применение оптического увеличения

В результате обработки рассматриваемым методом полученной видеoinформации был создан массив межкадровых разностно-яркостных значений, график которого представлен на рис. 3. Здесь значения по оси абсцисс соответствуют номерам кадров, а ось ординат определяет соответствующие им межкадровые яркостные разности, фактически измеряемые в битах:

$$Y = \left\{ \sum_{i=1}^N [(R_i - R_{i+1}) + (G_i - G_{i+1}) + (B_i - B_{i+1})] \right\}_{m=1}^M \cdot \quad (1)$$

В выражении (1) обозначено: N – число пикселей в кадре; M – число кадров в видеофрагменте; R , G , B – красная, зеленая и синяя составляющие цвета пикселя.

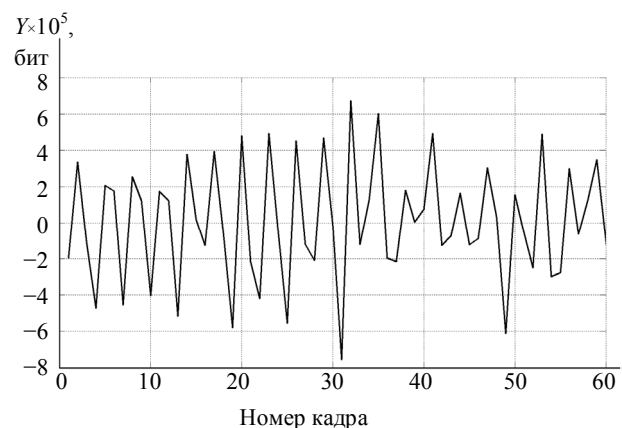


Рис. 3. Графическое представление покадровой разностно-яркостной информации

Фурье-анализ полученного массива данных, приведенный на рис. 4, однозначно вывел доминирующую частоту 10 Гц колебаний акустического динамика.

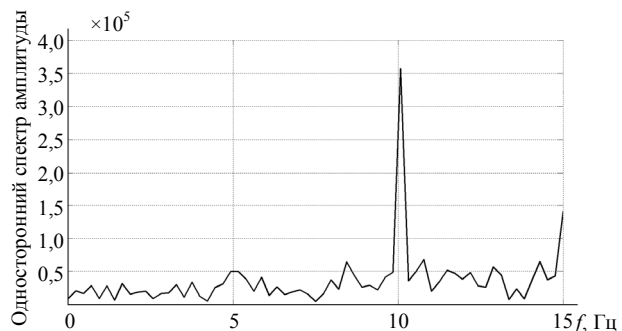


Рис. 4. Результат Фурье-анализа совокупности кадров

Фурье-анализ выявил частоту вибрации акустического динамика 10 Гц, о чем свидетельствует соответствующий пик на графике.

Применяемая в опытах неспециализированная видеокамера позволяет осуществлять видеосъемку на фиксированной частоте 30 Гц, при этом, в соответствии с теоремой Найквиста–Шеннона [2], измерение возможно только в пределах половины частоты дискретизации, т. е. в диапазоне 15 Гц. Однако реальные

частоты вибрации объектов производства могут быть значительно выше.

В этом случае полезным оказывается стробоскопический метод измерений, который находит широкое применение в технике. Существует множество промышленных стробоскопов для измерения скорости вращения и частоты вибрации [7]. Их работа, как правило, основывается на ручной настройке частоты стробирования и визуальной фиксации стробэффекта оператором.

Для проведения экспериментов был собран стробоскоп с возможностью двухканального независимого управления от ПК (рис. 5). Оптроны служат для гальванического разделения управляющей цепи и нагрузки. Управление выполняется по двум независимым каналам $U_{ВХ1}$ и $U_{ВХ2}$ от аудиокарты ПК с использованием разработанного специализированного программного обеспечения.

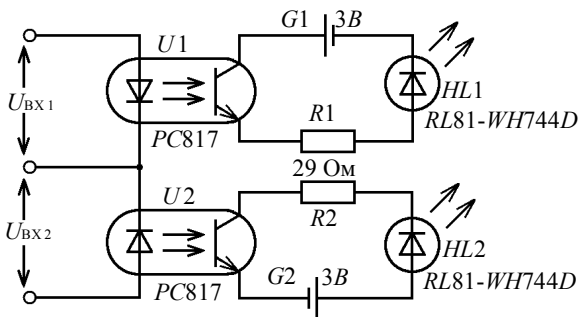


Рис. 5. Двухканальный стробоскоп

Была проведена серия экспериментов по определению частоты вибрации динамика стробоскопическим методом.

Внешний вид экспериментальной установки, состоящей из излучателя (динамика), стробоскопа и видеокамеры, приведен на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид экспериментальной установки

С приближением частоты импульсов стробоскопа к частоте вибрации объекта появляется возможность визуальной фиксации стробэффекта. Возникает иллюзия замедления движущегося

объекта вплоть до полной его остановки при совпадении частот вибрации и световых импульсов. Поскольку видеокамера обладает собственной частотой съемки, возникает сложное взаимодействие трех периодических процессов. Замедленное стробэффектом движение воспринимается видеокамерой как реальное. Обозначим воспринимаемую камерой частоту вибрации Δf , тогда реальная частота вибрации будет равна сумме частоты стробирования и фиксируемой видеокамерой, т. е. частоты биений:

$$f_{\text{ВИБР}} = f_{\text{СТР}} + \Delta f_{\text{БИЕН}} \quad (2)$$

где $f_{\text{ВИБР}}$ – частота вибрации измеряемого объекта; $f_{\text{СТР}}$ – частота стробоскопа; $\Delta f_{\text{БИЕН}}$ – частота, фиксируемая программно (частота биений).

Рассмотрим проведенный эксперимент. Искомая частота вибрации динамика составляла 100 Гц, частота стробоскопа 92 Гц, частота съемки камеры 30 Гц. В соответствии с выражением (2) камерой должна быть зафиксирована частота биений в 8 Гц. График Фурье-анализа полученного массива межкадровых разностно-яркостных значений приведен на рис. 7.

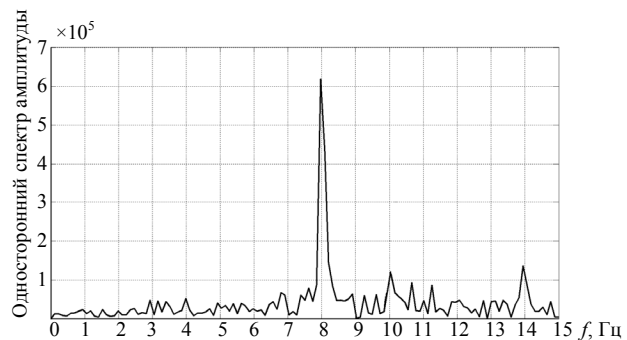
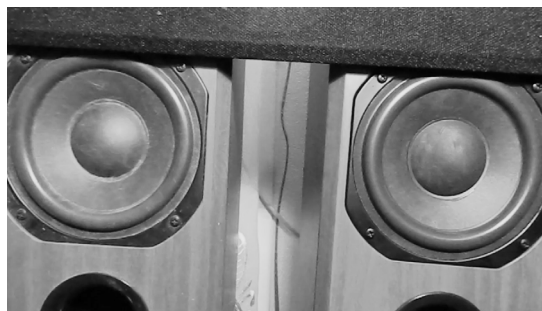


Рис. 7. Обработка результатов эксперимента по выявлению высоких частот вибрации

Максимальная определяемая частота вибрации ограничивается скоростью съемки. В проведенных экспериментах использовалась камера с частотой съемки 30 кадров в секунду, однако существуют специализированные высокоскоростные видеокамеры [5], позволяющие снимать видео высокой четкости на скорости до 5000 кадров в секунду. Использование таких видеокамер позволит существенно расширить диапазон измеряемых частот.

Определение частот разрозненных вибрирующих объектов. Одной из основных задач настоящего исследования является разработка системы измерения вибрации объектов, разнесенных в пространстве, что характерно для производственных помещений.

В связи с этим был проведен эксперимент, в котором производилась фронтальная съемка двух идентичных акустических динамиков (рис. 8,а), вибрирующих с частотой 5 и 10 Гц соответственно.



a

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	10	10	10	10	0
5	5	5	5	5	5	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10
5	5	5	5	5	5	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10
0	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10
0	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

б

Рис. 8. Определение частот вибрации множественных объектов: *a* – динамики, вибрирующие с частотой 5 и 10 Гц соответственно; *б* – результат определения частоты вибрации в ячейках кадра

Поле видеокadra было программно разбито на области в соответствии с геометрией кадра – 16×9 ячеек. Для каждой ячейки яркостная информация записывалась отдельно и выполнялся собственный Фурье-анализ (рис. 8,б). Данное разбиение занимает большое программное время выполнения, однако оно позволило зафиксировать независимые вибрационные параметры разнесенных в пространстве очагов вибрации.

ВЫВОД

Результаты исследования подтверждают, что предлагаемый оптический способ измерения параметров вибрации является альтернативой существующим, и свидетельствуют о его работоспособности в промышленных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Быковский, Ю. М.** Разработка физических моделей эталонных источников вибрации для экспериментального исследования колебаний оптическими методами [Текст] / Ю. М. Быковский, В. А. Нурзай // Сб. науч. трудов Академии военно-морских сил имени П.С. Нахимова. – Севастополь : АВМС им. П.С. Нахимова, 2012. – Вып. 4(12). – С. 70–76.
- [2] **Марпл, С. П.** Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С. П. Марпл ; под ред. И. С. Рыжака [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1990.
- [3] Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара [Текст] : справочник : в 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1978. – 448 с.
- [4] СанПиН № 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров [Текст]. – М. : НИИ охраны труда, 1991. – 61 с.
- [5] Сайт студии высокоскоростной съемки [Электронный ресурс] / Каталог высокоскоростных камер. – Режим доступа: <http://www.highspeedimaging.ru>.
- [6] A Review of Digital Image Correlation Applied to Structural Dynamics [Text] / Niezrecki Christopher // American Institute of Physics Publishing LLC. – New York, 2010.
- [7] PCE Instruments UK Ltd [Электронный ресурс] / Measuring instruments / Meters stroboscope. – Режим доступа: <http://www.pce-instruments.com>.

© Ю. М. Быковский, В. А. Нурзай

Надійшла до редколегії 10.11.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Г. В. Павлов*