

УДК 621.396.96

**ВИБРОМЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МЕТОДАМИ
СВЕРХКОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ ЭХОЛОКАЦИИ****Будагян И.Ф.**, д.ф.-м.н., профессор, E-mail: budif@yandex.ru**Костин М.С.**, аспирант, E-mail: mihaikos@mail.ru

МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается задача виброакустических исследований элементов конструкций радиоволновыми методами на предмет виброметрологической оценки кинематических схем. Сформулированы принципы сверхкороткоимпульсной эхолокации. Приведена реализация аналитической модели радиосенсорного локатора с использованием двух дифференциальных масштабов времени. Произведена оптимизация численной обработки последовательности эхосигналов методом кепстрального анализа как одного из наиболее эффективных при исследовании механических вибраций. В заключении изложены перспективы исследований.

Ключевые слова. Аналитическая модель, радиоволновая виброметрия, радиосенсорный локатор, фазовая модуляция, сверхкороткий радиоимпульс, преобразование Габора, кепстральный анализ, дифференциальный масштаб времени, взаимная корреляция.

**VIBROMETROLOGICAL ESTIMATION OF PARAMETERS
VIBROACOUSTIC FLUCTUATIONS BY METHODS
OF ULTRASHORT PULSE ECHOLOCATION****Budagyan I.F.**, D.of Sci., the professor, E-mail: budif@yandex.ru**Kostin M.S.**, the postgraduate student, E-mail: mihaikos@mail.ru

MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. In this paper the problem of vibroacoustic investigations of designs elements of radio wave methods on the subject of vibrometrology estimation kinematic schemes is considered. The principles of ultrashort pulse echolocation are formulated. The mathematical realization of analytical model of a radiosensory locator with use of two differentials the time scales are presented. The optimization of numerical processing of sequence echo-signal by method cepstral analysis as one of the most effective in the study of mechanical vibrations is produced. In conclusion perspectives researches are outlined.

Keywords. Analytical model, radiowave vibrometric, radiosensory locator, phase modulation, ultrashort radiopulse, the conversion Gabor, cepstral analysis, differential time-scale, cross-correlation.

Исследование виброакустических характеристик конструктивных элементов динамических и статических функциональных узлов кинематических схем технических устройств точной радио- и микромеханики требует применение специальных методов, обеспечивающих бесконтактный сбор виброметрических данных, описывающих закон колебательного процесса зондируемой поверхности объекта. Аппаратная реализация

бесконтактной диагностики достигается с применением различных средств сенсорного сканирования. Среди бесконтактных методов съема и регистрации вибрационных параметров классифицируют три основных принципа косвенного преобразования акустомеханических колебаний в сигнал: оптический, акустический (ультразвуковой) и радиоволновый.

Ввиду актуализации развития перспективных направлений по части применения специальных средств радиометрологической диагностики, особое внимание в этой области сосредоточено на системах радиоволнового мониторинга, построенных по принципу однопозиционных сверхкороткоимпульсных локаторов – радиосенсорных радаров. С появлением высокоскоростных АЦП, задача обнаружения, приема и преобразования СВЧ сигнала фактически сводится к численному алгоритму обработки данных накапливаемой выборки, минимизируя аналоговую обработку. При этом показателем воспроизводимости данных, реализуемых системой, является спланированный эксперимент, реализацией которого служит аналитическая модель.

Проектирование и анализ высокочувствительных приборов и комплексов в области бесконтактных метрологических измерений характеристик механических вибраций требует применения наиболее оптимальных технических решений и численных методов обеспечения процесса зондирования, регистрации и обработки виброметрических параметров. Решение задачи приема отраженного от цели сигнала обеспечивается классическими методами оптимального обнаружения, например критерием максимального отношения правдоподобия, в то время как оптимизация обработки принимаемых эхосигналов в модели достигается с применением оконного преобразования Фурье и кепстрального анализа. В работе предлагается реализация численного метода с использованием двух дифференциальных масштабов времени для медленно и мгновенно изменяющихся колебаний относительно оси времени, что существенно повышает эффективность процессорных вычислений.

Система радиосенсорной виброметрической локации представляет собой радиоволновый программно-аппаратный комплекс на базе однокристалльного приемопередатчика NVA6100 норвежской компании Novelda AS. Этот комплекс предназначен для бесконтактного дистанционного зондирования поверхности динамических и статических элементов функциональных узлов технических устройств точной радио- и микромеханики, генерирующих собственные механические колебания или промодулированных внешними виброакустическими возмущениями среды с целью регистрации динамических характеристик. Приемопередатчик снабжен высокоскоростным АЦП с частотой дискретизации 40 Гвыб/с, что соответствует 40 точкам на 1 нс или шагу дискретизации 25 пс [1]. Получение абсолютных и статистических информационных данных о

вибрационных характеристиках (виброперемещении, виброскорости, виброускорении, резонансах) микроэлектромеханических устройств, радиоэлементов и конструкций также представляет одну из задач испытаний аппаратуры на виброустойчивость и надежность при неразрушающем контроле и диагностике.

1. Сверхкороткоимпульсная радиосенсорная эхолокация

Среди применяемых радиоволновых методов измерения вибраций классифицируют следующие: резонаторные, интерференционные и фазовые. Для этих методов можно в основном выделить следующие недостатки в обеспечении генерации зондируемого сигнала и регистрации фиксируемых параметров. К ним относятся: необходимость сохранения высокой стабильности частоты зондирующего радиосигнала с целью уменьшения его флуктуации, повышения чувствительности и качества работы системы; увеличение глубины проникающей способности радиоимпульсов при реализации подповерхностной локации и обеспечение достаточно удаленного от цели съема виброакустических параметров с требуемым разрешением [2]. Перечисленные недостатки в работе радиоволновых систем могут компенсироваться за счет применения технологий, построенных на принципах сверхкороткоимпульсной радиолокации, что в рамках современной науки способно решить многие радиотехнические задачи с перспективой дальнейшей модернизации. Так, с применением радиоимпульсов наносекундной длительности исключается необходимость генерирования СВЧ сигнала заданной частоты, как это принято в локаторах с непрерывным и моноимпульсным действием, что кардинально исключает необходимость обеспечения частотной стабилизации в высокочастотной области.

Сверхкороткий широкополосный радиоимпульс формируется как результат дифференцирования видеоимпульса наносекундной длительности при его воздействии на сверхширокополосную антенну и не имеет несущей частоты, а характеризуется длительностью, центральной частотой и полосой спектра. Причем обязательным условием в выборе длительности радиоимпульса (следовательно, и приемо-передающей антенны) является то, что амплитуда вибраций не должна превышать его фактической длины волны, иначе это осложняется нелинейными искажениями принимаемого сигнала. В таком случае остается лишь стабилизировать частоту дискретизации зондирования, которую для регистрации механических колебаний достаточно взять в диапазоне от сотен кГц до десятков МГц, что не составляет особых затрат в техническом смысле реализации. Кроме того, сверхширокополосность радиоимпульса улучшает энергетику сигнала, обеспечивает требуемую проникающую способность и делает систему более помехоустойчивой к воздействию внешних электромагнитных помех. Распределение во

временной последовательности выборки отраженных радиоимпульсов от вибрирующей цели описывается законом фазовой модуляции, девиация которой отражает характеристику плоскопараллельных колебаний вдоль линии визирования. Импульсное зондирование, построенное на временном оконном стробировании, позволяет четким образом локализовать координатную привязку к цели, тем самым максимальным образом исключив помехи от пространственно распределенных поверхностей, генерирующих ложные эхосигналы, и восстановить в более явном виде кривую колебательного закона исследуемой поверхности.

2. Аналитическая модель системы

Инженерные исследования многопараметрических процессов и сложных устройств априори предполагают планирование эксперимента с описанием математической модели системы в целом. Одним из весовых критериев воспроизводимости ожидаемых результатов при радиоизмерениях, является аналитическая модель системы, посредством которой можно с достоверной точностью произвести корреляционную оценку измерений при сравнении с теоретическими – численными результатами программного моделирования. Основными требованиями, предъявляемыми к модели системы, являются ее адекватность, однозначность по отношению к регламентируемым условиям эксперимента и минимальные затраты ресурсов вычислительной микропроцессорной техники [3].

Прием сигнала радиосенсорным локатором устанавливается с заданной частотой зондирования (стробирования) по задержке, определяющей расстояние до потенциально расположенной цели. Обнаружение отраженных от цели импульсов производится по критерию максимального отношения правдоподобия из расчета известной частоты следования радиоимпульсов и времени задержки. Фильтрация принимаемых эхосигналов в устройстве осуществляется программным способом на базе оконного одномерного преобразования Габора путем накопления выборки радиоимпульсов, прошедших предварительное усиление через пороговое устройство и высокоскоростное АЦП. При этом выделение низкочастотной компоненты механического колебания, содержащегося в фазораспределенной последовательности отраженных радиоимпульсов, производится путем кепстрального анализа реперного и преобразованного одиночного эхосигнала, либо очередной соседней пары аналогично принятых радиоимпульсов [4].

При одновременном моделировании быстроизменяющихся (сверхкороткий импульс, нано- и пикосекундное колебание) и медленно протекающих (механические вибрации – от миллисекундного до секундного цикла) процессов на одной временной оси возникают трудности вычислений, которые фактически сводят в предел оперативные ресурсы ПЭВМ. Это обусловлено тем, что шаг дискретизации времени приходится

выбирать из расчета минимального, т.е. для радиоимпульса, в то время как конечная точка исследуемого процесса будет определяться низкочастотным колебанием. Для решения подобного рода вычислительных задач существует ряд способов: параллельные вычисления с применением специальных средств суперпроцессорной техники или применение иных аналитических методов и алгоритмов. В работе предлагается реализация модели с использованием двух дифференциальных масштабов времени для каждого из колебательных процессов в отдельности относительно оси выборки.

Программный код скрипта функциональной модели радиосенсорного виброметрического радара реализован в среде MatLab и оформлен в виде m-файла, работа которого описывается наглядным графическим представлением процессов приема и обработки эхосигнала. Аналитическая модель предполагает рассмотрение частного случая радиоимпульсного эхоприема сигнала от поверхности вибрирующей цели при наличии гауссовых коррелируемых шумов от подстилающей поверхности и элементов ограниченного пространства. Численный алгоритм приема и обработки данных основаны на принципе определения дальности относительно изменения фазы отраженного сигнала [1]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = -\frac{4\pi}{c} f(R_1 - R_2) = -\frac{4\pi}{c} f_c \nu_s T_{\Pi}. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ – разности фаз при смещении поверхности объекта с расстояния R_1 до R_2 ; f_c – центральная частота спектра радиоимпульса; c – скорость света; $\nu_s = \nu_m \sin(\omega_s t + \varphi)$ – виброскорость, где $\nu_m = 2\pi F A_0$, а F, A_0 – частота и амплитуда вибрации; $T_{\Pi} = 1/F_{\Pi}$ – период следования зондируемых импульсов.

При этом закон девиации частоты следования отраженных импульсов имеет следующий вид [1]:

$$F_s = \frac{1}{T_s} = \frac{c}{d - T_{\Pi} \nu_m \sin(\omega_s t)} = \frac{F_{\Pi}}{1 - \nu_m \sin(\omega_s t)/c}, \quad (2)$$

где d – пространственное расстояние между импульсами вдоль линии визирования, $\omega_s = 2\pi F$ – угловая частота механических колебаний.

3. Селективная обработка эхосигнала

Задача оптимальной фильтрации сверхкороткоимпульсного радиосигнала, описанного несколькими периодами колебаний с гауссовой огибающей, решается в работе с применением оконного преобразования Фурье. Причем результатом этого преобразования является не спектр исходного сигнала, а спектр от произведения сигнала и окон-

ной функции (рис.1). Идея такого преобразования заключается в том, что весь временной интервал сигнала разделяется на подинтервалы – оконные стробы, и преобразование проводится последовательно для каждого окна в отдельности. Тем самым осуществляется переход к частотно-временному представлению, что позволяет анализировать особенности нестационарных сигналов. В качестве оконного строба выбрана функция Гаусса. Это практически исключает эффект Гиббса, поскольку известно, что применение окон, отличных от прямоугольных, уменьшает влияние боковых лепестков в спектре за счет увеличения ширины главного, и определяет данный вид фильтрации как преобразование Габора. Однако спектр, полученный путем оконного преобразования Фурье, является оценкой спектра исходного сигнала и допускает искажения. Преобразование можно записать следующим образом [4]:

$$S(\omega, b_k) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi(t - b_k) \exp(-j\omega t) dt, \quad (3)$$

где $\psi(t - b_k)$ есть функция окна сдвига преобразования по координате времени t на фиксированные значения параметра b_k . В случае преобразования Габора $\psi(t - b_k)$ описывается кривой Гаусса [4]:

$$\psi(t - b_k) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - b_k)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4)$$

Таким образом, оконное преобразование состоит в умножении исследуемого сигнала $s(t)$ на функцию окна $\psi(t - b_k)$, распределенную в окрестности $t = b_k$, и вычислении коэффициентов Фурье подынтегрального произведения (3). Представим $\psi_{\omega, b}(t) = \psi(t - b_k) \exp(-j\omega t)$, в этом случае выражение (3) принимает вид:

$$S(\omega, b_k) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi_{\omega, b}(t) dt, \quad (5)$$

как можно заметить, из формулы (5) следует, что фактически оконное преобразование представляет собой взаимную корреляционную функцию двух сигналов. При этом сигнал $\psi_{\omega, b}(t)$ есть произведение гармонического сигнала и огибающей $\psi(t - b_k)$.

Для каждого состояния окна на временной оси сигнала вычисляется свой комплексный спектр (рисунок 1). Однако в данном случае преобразование осуществляется с заданной периодичностью относительно частоты зондирования.

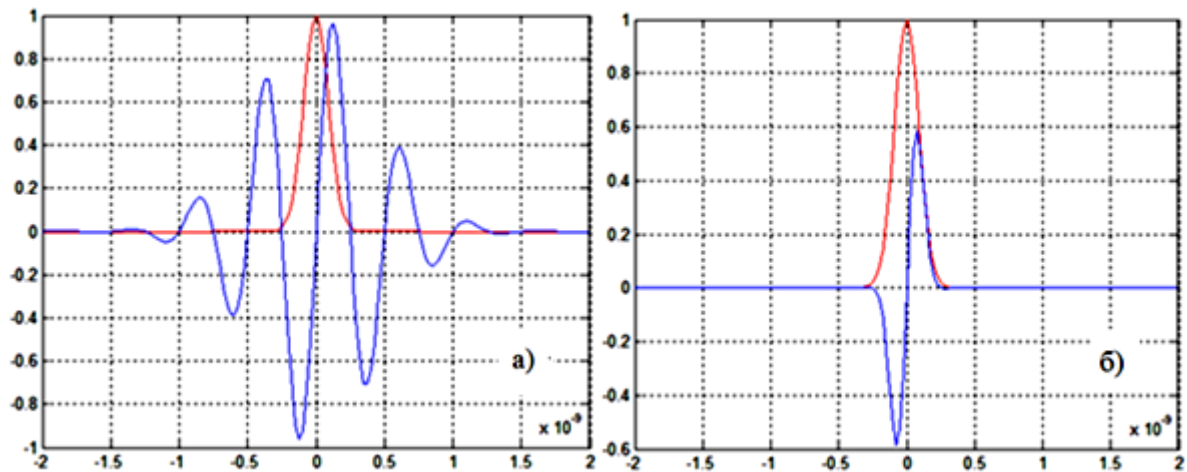


Рисунок 1 - Графическое представление принципа частотно-временной селекции: а) нормированный радиоимпульс и строб импульс; б) строб импульс и результат преобразования Габора

Таким образом, оптимальная длительность окна определяется из расчета максимально выделяемой мощности и определяется выражением [3]:

$$\tau_{opt} = T_c \tau \frac{\sqrt{(\pi\tau)^2 - T_c^2}}{T_c^2 - (\pi\tau)^2}, \tag{6}$$

где T_c – период заполнения, соответствующий центральной частоте f_c радиоимпульса; τ – длительность принимаемого радиоимпульса.

4. Кепстральный анализ выборочной последовательности

Кепстральный анализ применяют для сигналов, представляющих собой свертку двух временных функций, причем таких, что после преобразования их в спектр они образуют неперекрывающиеся на оси кепстрального времени q импульсы. Кепстральное преобразование можно представить следующим образом [4]:

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln[S(\omega)]^2 \exp(j\omega q) d\omega, \tag{7}$$

где $S(\omega)$ – амплитудный спектр непрерывного сигнала $s(t)$.

Поскольку $S^2(\omega)$ имеет смысл спектральной плотности энергии сигнала $s(t)$, то $C_s(q)$ определяется как энергетический спектр функции $\ln[S(\omega)]^2$, поэтому выражение (7) принято называть кепстром мощности. Очевидно, что аргумент q имеет размерность времени. Также следует отметить, что выражение (7) имеет смысл не для любого сигнала $s(t)$. Действительно, для сигнала с конечной энергией выполняется условие

$\int_{-\infty}^{\infty} S^2(\omega) d\omega < \infty$, из которого следует, что при $|\omega| \rightarrow \infty$ $S^2(\omega) \rightarrow 0$. Но тогда при

$|\omega| \rightarrow \infty$ обращается в бесконечность $|\ln S(\omega)|$ и интеграл $\int_{-\infty}^{\infty} \ln S^2(\omega) d\omega$ расходится. Такое противоречие при решении практических задач снимается путем замены пределов интегрирования $\pm\infty$ на граничные частоты $\pm\omega_{gp}$, в пределах которых заключена основная часть энергии сигнала и значение функции $\ln S^2(\omega)$ ограничено. Таким образом, определение кепстра мощности свертки сигналов решается для двух соседних отраженных импульсов или опорного и очередного принимаемого эхосигнала (рисунок 2). В случае цифровой обработки сигналов в задаче используется алгоритм БПФ-ОБПФ. Для надежного определения опережения (запаздывания) эхосигнала, вызванного возвратно-поступательными колебаниями цели вдоль линии визирования, используется первый импульс кепстра. Координатное (номер первого максимума выборки) положение первого максимума относительно нуля времени будет определять мгновенное значение амплитуды колебания, а его высота – коэффициент отражения зондируемой поверхности. Поэтому важно, чтобы кепстр концентрировался вблизи начала отсчета кепстрального времени. Кроме того, амплитудный кепстр должен быть свободен от ложных всплесков, что зависит от структуры спектра $S(\omega)$ исходного сигнала, а следовательно, и предварительной фильтрации.

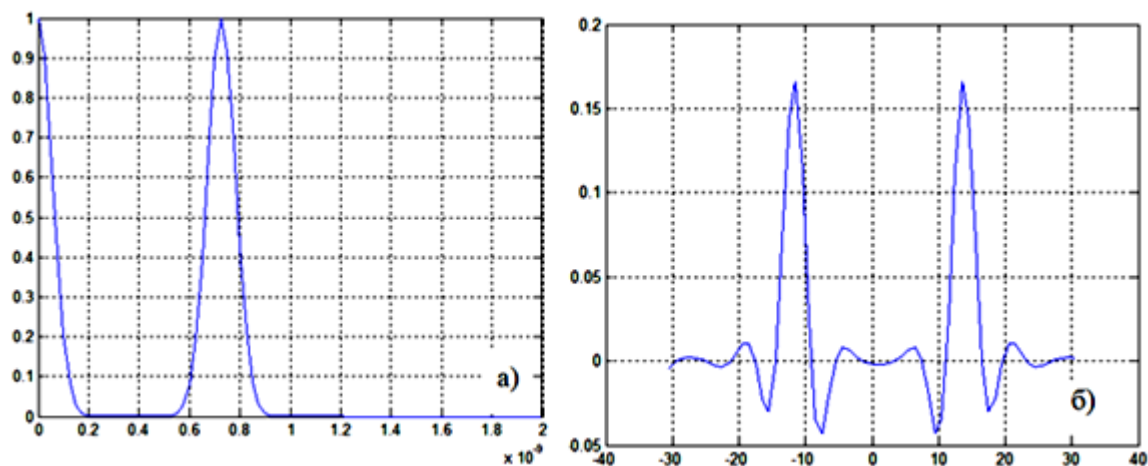


Рисунок 2 - Графическое представление кепстральной обработки сигнала: а) временное представление выборки опорного импульса и очередного принятого; б) кепстр

Достоверность принятого и обработанного эхосигнала в модели определяется коэффициентом корреляции по отношению к заранее известному реперному механическому колебанию с амплитудой виброперемещения $0,1 \dots 0,5$ мм (рисунок 3) [1,5].

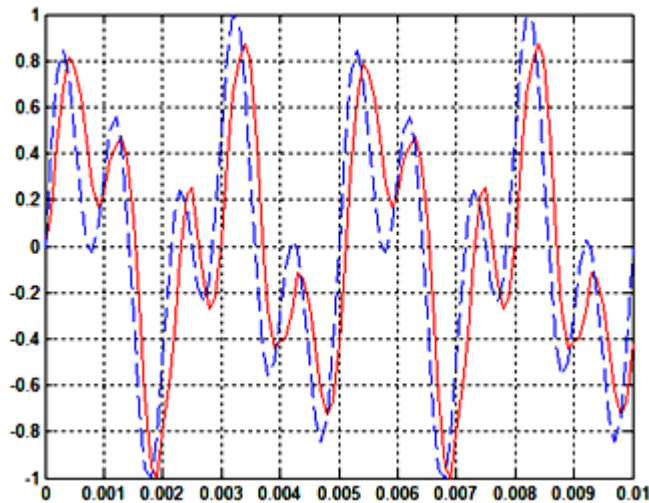


Рисунок 3 - Графическое представление реализации эхосигнала от заданной цели (пунктиром указан реперный сигнал механического колебания). Коэффициент корреляции $K_r = 0,905$

Заключение

Радиосенсорный метод сбора параметров виброметрических данных способен существенно расширить информативные возможности проведения научных и инженерных теоретических и практических исследований в области бесконтактных радиометрологических измерений виброакустических колебаний методами сверхкороткоимпульсной эхолокации. Предложенный метод кепстральной обработки сигнала и его масштабно-дифференциального преобразования во времени, реализованные на базе аналитической модели радиосенсорного радара, представленной системой мгновенно и медленно протекающих процессов, позволяет повысить эффективность программных вычислений, что может быть полезным при отладке и тестировании численных методов обработки сигналов в нелабораторных условиях. В перспективе планируется дальнейшее совершенствование программной модели, поиск и реализация оптимальных радиотехнических параметров, способов фильтрации и алгоритмов обработки сигнала с целью повышения чувствительности системы к механическим колебаниям с амплитудой виброперемещения менее 100 мкм.

Список литературы

1. Будагян И.Ф., Костин М.С. Радиосенсорный виброметрический локатор // *Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Wykształcenie i nauka bez granic - 2013»*. Techniczne nauki. – Przemysł.: Nauka i studia, 2013. – Vol. 46. – p. 31 – 35.
2. Костин М.С. Технологические аспекты радиоволновой виброметрии при неразрушающем контроле несущих конструкций и механизмов радиоэлектронных средств // *Сборник трудов 62-й научно-технической конференции МГТУ МИРЭА*. – М.: МИРЭА, 2013. – с. 111 – 116.

3. Mahafza, Bassem R. Radar systems & analysis and design using Matlab. – USA.: CHAPMAN & HALL/CRC, 2009. – 533 p.
4. В. П. Дьяконов. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 975 с.
5. Костин М.С. Моделирование виброметрического СШП радара // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем: Сб. научн. тр.– М.: РАДИОИНФОКОМ, 2013. – Ч.1. – с. 246 – 249.