

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ**

Предложен двухзондовый интерференционный метод измерения как величины, так и направления перемещения элементов механических систем при неизвестном коэффициенте отражения. Метод применим, если величина коэффициента отражения не превышает $1/\sqrt{2}$, что практически всегда выполняется при измерениях в свободном пространстве. Экспериментальная проверка показала достаточную точность измерения для перемещений, в несколько раз превышающих длину волны зондирующего электромагнитного излучения.

Запропоновано двозондовий інтерференційний метод вимірювання як величини, так і напрямку переміщення елементів механічних систем при невідомому коефіцієнті відбиття. Метод є застосовним, коли величина коефіцієнта відбиття не перевищує $1/\sqrt{2}$, що майже завжди має місце при вимірюваннях у вільному просторі. Експериментальна перевірка продемонструвала достатню точність вимірювання для переміщень, що в декілька разів перевищують довжину хвилі зондуємого електромагнітного випромінювання.

A two-probe implementation of the microwave interference method is proposed to measure both the magnitude and the direction of the displacement of mechanical elements at an unknown reflection coefficient. The proposed technique is applicable if the magnitude of the reflection coefficient is no greater than $1/\sqrt{2}$, which is true almost without exception for free-space measurements. Its experimental verification has demonstrated reasonable measurement accuracy for displacements that are several times as great as the wavelength of sensing electromagnetic radiation.

Для контроля относительного перемещения элементов механических систем широко применяется интерференционный метод измерения, что обусловлено его безынерционностью и отсутствием механического контакта с контролируемым объектом [1]. В этом методе контролируемый объект зондируется электромагнитной волной, с помощью зонда и соединенного с ним полупроводникового детектора регистрируется электрическое поле стоячей волны, образующейся между излучателем и объектом, и перемещение объекта определяется по измеренному току детектора. Однако непосредственное определение величины перемещения по току детектора возможно только для перемещений, не превышающих $\lambda/4$, где λ – длина волны электромагнитного излучения. Это связано с множественностью решений тригонометрического уравнения, связывающего расстояние от зонда до объекта с током детектора. В работе [2] неопределенность в нахождении перемещения устраняется за счет проведения зондовых измерений в двух точках, находящихся на расстоянии $\lambda/8$ друг от друга, однако при этом необходимо знать коэффициент отражения электромагнитной волны от объекта, что требует проведения предварительной калибровки. В методике, предложенной в работе [3], коэффициент отражения исключается с помощью двойного дифференцирования токов детекторов, однако при этом он считается постоянным, что в реальной практике выполняется далеко не всегда. Кроме того, токи детекторов могут иметь значительную шумовую составляющую, вследствие чего дифференцирование может приводить к появлению большой погрешности. Со времени публикации классической работы Ф. Тишера [4] считается, что для определения или исключения неизвестного коэффициента отражения необходимы по меньшей мере три зонда. Увеличение числа зондов приводит к усложнению конструкции измерительной волноводной секции и необходимости соответствующего увеличения числа каналов аналого-цифрового преобразователя

© О.В. Пилипенко, Н.Б. Горев, А.В. Дорнин,
И.Ф. Коджеспилова, Е.Н. Привалов, 2012

(АЦП), что ограничивает частоту дискретизации. Однако, как будет показано ниже, в таком практически важном случае, как измерения в свободном пространстве, число зондов может быть уменьшено до двух.

Целью данной работы является разработка двухзондового метода измерения, позволяющего определить как величину, так и направление относительного перемещения для случая произвольного соотношения между амплитудой перемещения и длиной волны электромагнитного излучения при неизвестном коэффициенте отражения без предположения о его постоянстве.

Рассмотрим два зонда 1 и 2, соединенных с полупроводниковыми детекторами с квадратичной вольт-амперной характеристикой. Зонды расположены между излучателем и контролируемым объектом на расстоянии $\lambda/8$ друг от друга, причем ближе к объекту расположен зонд 2. Токи детекторов J_1, J_2 , нормированные на их значения в режиме согласованной нагрузки, следующим образом выражаются через расстояние x между контролируемым объектом и зондом 1

$$J_1 = 1 + r^2 + 2r \cos(4\pi x/\lambda + \phi), \quad (1)$$

$$J_2 = 1 + r^2 + 2r \sin(4\pi x/\lambda + \phi), \quad (2)$$

где r, ϕ – модуль и фаза коэффициента отражения.

Задача заключается в том, чтобы найти перемещение объекта $\Delta x(t)$ в момент времени t относительно его положения в начальный момент времени t_0 по измеренным токам $J_1(t)$ и $J_2(t)$. При известных $\cos(4\pi x/\lambda + \phi)$ и $\sin(4\pi x/\lambda + \phi)$ это относительное перемещение однозначно находится по алгоритму, предложенному в [5]. Из (1) и (2) имеем

$$\cos \psi = \frac{a_1 - r^2}{2r}, \quad (3)$$

$$\sin \psi = \frac{a_2 - r^2}{2r}, \quad (4)$$

где

$$\psi = 4\pi x/\lambda + \phi, \quad a_1 = J_1 - 1, \quad a_2 = J_2 - 1.$$

Возведя выражения (3) и (4) в квадрат и сложив их, получим квадратное уравнение относительно r^2

$$r^4 - (a_1 + a_2 + 2)r^2 + \frac{a_1^2 + a_2^2}{2} = 0, \quad (5)$$

решение которого имеет вид

$$r^2 = \frac{a_1 + a_2 + 2}{2} \pm \sqrt{\frac{(a_1 + a_2 + 2)^2}{4} - \frac{a_1^2 + a_2^2}{2}}. \quad (6)$$

Поскольку при выводе уравнения (5) выражения (3) и (4) возводились в квадрат, могут появиться посторонние корни. Поэтому необходимо произвести проверку решения (6). Из (3), (4) получим

$$a_1 + a_2 + 2 = 2r^2 - 2r(\sin \psi + \cos \psi) + 2,$$

$$a_1^2 + a_2^2 = 2r^4 + 4r^2 - 4r^3(\sin \psi + \cos \psi).$$

Следовательно, для подкоренного выражения в (6) имеем

$$\frac{(a_1 + a_2 + 2)^2}{4} - \frac{a_1^2 + a_2^2}{2} = [1 - r(\sin \psi + \cos \psi)]^2.$$

Поэтому (6) принимает вид

$$r^2 = r^2 + 1 - r(\sin \psi + \cos \psi) \pm |1 - r(\sin \psi + \cos \psi)|.$$

Таким образом, формула (6) дает правильное решение r^2 , когда знак перед корнем противоположен знаку величины $1 - r(\sin \psi + \cos \psi) = 1 - \sqrt{2}r \sin(\psi + \pi/4)$. Эта величина неизвестна, поскольку в нее входят неизвестные r и ψ , однако она будет заведомо неотрицательной при выполнении условия

$$r \leq 1/\sqrt{2} \approx 0,707, \quad (7)$$

которое практически всегда выполняется при измерениях в свободном пространстве. Поэтому при выполнении условия (7) для модуля коэффициента отражения имеем

$$r = \left[\frac{a_1 + a_2 + 2}{2} - \sqrt{\frac{(a_1 + a_2 + 2)^2}{4} - \frac{a_1^2 + a_2^2}{2}} \right]^{1/2}.$$

При известном модуле коэффициента отражения из формул (3), (4) находятся $\sin \psi$ и $\cos \psi$, после чего по алгоритму [5] определяется перемещение объекта $\Delta x(t_n)$ в момент времени t_n относительно его положения в начальный момент времени t_0

$$\varphi(t_n) = \begin{cases} \arctg \frac{\sin \psi(t_n)}{\cos \psi(t_n)}, & \sin \psi(t_n) \geq 0, \cos \psi(t_n) \geq 0, \\ \arctg \frac{\sin \psi(t_n)}{\cos \psi(t_n)} + \pi, & \cos \psi(t_n) < 0, \\ \arctg \frac{\sin \psi(t_n)}{\cos \psi(t_n)} + 2\pi, & \sin \psi(t_n) < 0, \cos \psi(t_n) \geq 0, \end{cases}$$

$$\theta(t_n) = \begin{cases} 0, & n=0, \\ \theta(t_{n-1}) + \varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1}), & |\varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1})| \leq \pi, \quad n=1, 2, \dots, \\ \theta(t_{n-1}) + \varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1}) - 2\pi \operatorname{sgn}[\varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1})], & |\varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1})| > \pi, \quad n=1, 2, \dots, \end{cases}$$

$$\Delta x(t_n) = \frac{\lambda}{4\pi} \theta(t_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

где φ – неразвернутая фаза; θ – развернутая фаза; $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$, – моменты измерения; $n = 0, 1, 2, \dots$, – номер измерения.

Данный алгоритм применим при условии, что абсолютная величина изменения фазы между двумя последовательными измерениями $|\psi(t_n) - \psi(t_{n-1})| = 4\pi|x(t_n) - x(t_{n-1})|/\lambda$ не превосходит π . Найдем, какой должна быть частота дискретизации АЦП f_{ADC} , чтобы это условие выполнялось. Если объект совершает колебательное движение с максимальной амплитудой A_{max} и максимальной частотой f_{max} , то его максимальная скорость может быть оценена как $v_{\text{max}} = 2\pi A_{\text{max}} f_{\text{max}}$. Поэтому за время между двумя последовательными измерениями $\Delta t = 1/f_{\text{ADC}}$ объект переместится на максимальное расстояние $v_{\text{max}} \Delta t = 2\pi A_{\text{max}} f_{\text{max}} / f_{\text{ADC}}$, чему соответствует максимальное изменение фазы $4\pi v_{\text{max}} \Delta t / \lambda = 8\pi^2 A_{\text{max}} f_{\text{max}} / (f_{\text{ADC}} \lambda)$. В соответствии с вышесказанным, это изменение не должно превышать π , откуда имеем

$$f_{\text{ADC}} > \frac{8\pi A_{\text{max}} f_{\text{max}}}{\lambda}.$$

Даже в случае весьма быстрых движений объекта это условие легко реализуется при использовании современных АЦП с частотой дискретизации порядка 1 ГГц.

Экспериментальная проверка данного метода проведена на стенде, состоящем из измерительного преобразователя, включающего волноводную измерительную линию с установленным в ней детекторным блоком и рупорную антенну; СВЧ-генератора; компьютера с аналого-цифровым преобразователем и кривошипно-шатунного механизма с приводом от электродвигателя, приводящего отражательную поверхность (металлический диск) в возвратно-поступательное движение соосно направлению распространения электромагнитной волны генератора по рупору. Частота колебаний диска f (частота вращения электродвигателя) регулировалась величиной напряжения на электродвигателе. Схематический вид кривошипно-шатунного механизма приведен на рис. 1. Как следует из рисунка, перемещение диска Δx в момент времени t относительно его положения в начальный момент времени t_0 дается формулой

$$x(t) = \sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \varphi_0} - \sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \varphi(t)} - R[\cos \varphi_0 - \cos \varphi(t)], \quad (8)$$

где R, L – радиус и длина плеча кривошипа, φ, φ_0 – угол поворота кривошипа относительно горизонтальной плоскости и его значение в начальный момент времени:

$$\varphi(t) = 2\pi f(t - t_0) + \varphi_0, \quad \varphi_0 = \varphi(t_0).$$

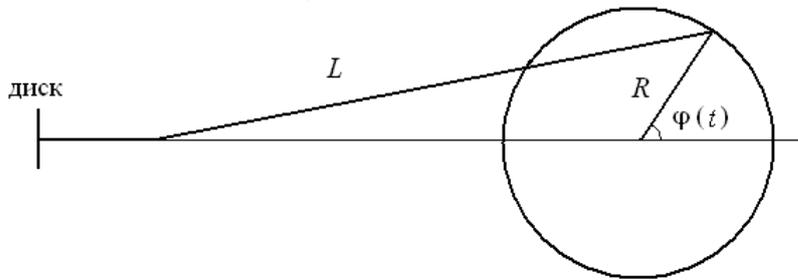


Рис. 1

Создаваемое генератором электромагнитное излучение проходило через волноводную линию, излучалось рупорной антенной, достигало колеблющегося металлического диска и отражалось от него, в результате чего в волноводной линии образовывалась стоячая волна, амплитуда которой регистрировалась детекторным блоком. Длина волны электромагнитного излучения в свободном пространстве составляла $\lambda = 3,0$ см. Диаметр диска был равен $d = 30$ см, т.е. выполнялось соотношение $d/\lambda_0 \gg 1$, обеспечивающее практическое отсутствие дифракционных эффектов. Размах колебаний диска (удвоенный радиус кривошипа) был равен 15,0 см, что в пять раз больше длины волны в свободном пространстве. Токи детекторов регистрировались с помощью аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 2 кГц.

На рис. 2 приведена временная зависимость фактического перемещения диска, найденного по формуле (8) (сплошная линия), и перемещения диска, найденного по измеренным токам детекторов (штриховая линия). Как видно из рисунка, штриховая и сплошная линии практически неразличимы, что свидетельствует о высокой точности измерения. Для приведенных на рисунке данных ошибка измерения размаха составляет 0,7 мм (0,47%). Следует отметить, что приведенное на рисунке перемещение получено из измеренных токов детекторов без какой-либо предварительной обработки данных измерений, такой как фильтрация, сглаживание и т.п.

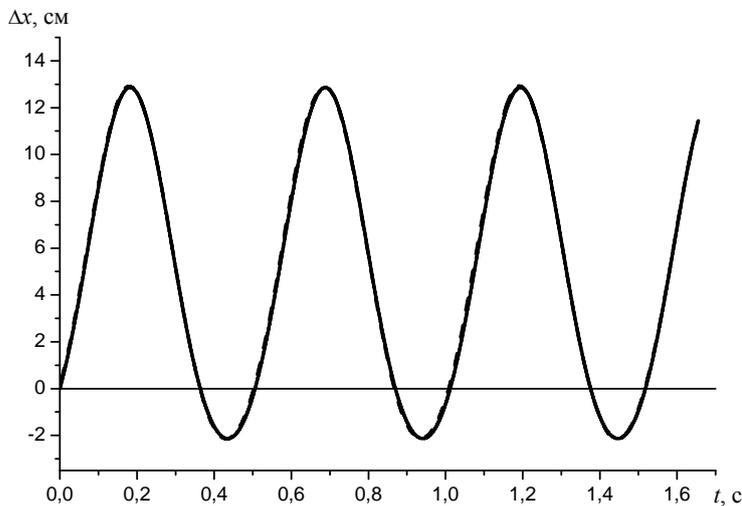


Рис. 2

Таким образом, установлено, что при проведении измерений в свободном пространстве для однозначного определения параметров движения интерференционным методом при неизвестном коэффициенте отражения достаточно использования двух зондов. Предложенный двухзондовый метод измерения параметров движения механических систем позволяет определять как величину, так и направление перемещения и обеспечивает достаточную точность измерения в случае перемещений, в несколько раз превышающих длину волны зондирующего электромагнитного излучения. Данный метод может быть использован при разработке микроволновых измерителей перемещения для различных классов виброзащитных систем и систем управления технологическими процессами.

1. *Викторов В. А.* Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / *В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков.* – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
2. *Пилипенко О. В.* Измерение параметров движения механических объектов интерференционным методом с использованием двух зондов / *О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, М. М. Жечев, Л. Г. Запольский, П. И. Заболотный, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов* // *Техническая механика.* – 2009. – № 1. – С. 111 – 117.
3. *Пилипенко О. В.* Двухзондовый метод измерения параметров движения механических объектов / *В. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, А. В. Доронин, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов* // *Техническая механика.* – 2011. – № 2. – С. 3 – 7.
4. *Тишер Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах / *Ф. Тишер.* – М. : Физматгиз, 1963. – 368 с.
5. *Сильвия М. Т.* Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ / *М. Т. Сильвия, Э. А. Робинсон.* – М. : Недра, 1983. – 447 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 11.06.12,
в окончательном варианте 18.06.12