

**ДВУХЗОНДОВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Приведен обзор результатов исследований по измерению перемещения сверхвысокочастотным интерференционным методом, проведенных в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины за последние пять лет. Сформулирована задача разработки зондовой реализации интерференционного метода, позволяющей проводить измерения в широком диапазоне перемещений при неизвестном коэффициенте отражения с минимальным количеством зондов. Эта задача решается путем аналитического рассмотрения в сочетании с экспериментальной проверкой. Для случая двух зондов получено биквадратное уравнение, связывающее неизвестный коэффициент отражения с токами полупроводниковых детекторов, соединенных с зондами. Показано, что если определять коэффициент отражения как меньший положительный корень этого уравнения, то теоретически перемещение объекта определяется по токам детекторов точно для коэффициентов отражения, не превышающих $1/\sqrt{2}$, и с точностью не хуже 4,4% от длины волны зондирующего электромагнитного излучения в общем случае. Предложена двухзондовая методика измерения перемещения. Ее экспериментальная проверка показала удовлетворительную точность измерения для перемещений, в несколько раз превышающих длину волны зондирующего электромагнитного излучения. Таким образом, впервые показано, что для измерения перемещения достаточно двух зондов. Это позволяет упростить конструкцию измерительной волноводной секции, ослабить помехи от переотражений между зондами и повысить частоту выборки аналого-цифрового преобразователя, что открывает путь к разработке нового класса датчиков перемещения, в частности для измерения вибрации.

Наведено огляд результатів досліджень з вимірювання переміщення надвисокочастотним інтерференційним методом, проведених в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України за останні п'ять років. Сформульовано задачу розробки зондової реалізації інтерференційного метода, що дозволяє проводити вимірювання в широкому діапазоні переміщень при невідомому коефіцієнті відбиття з мінімальною кількістю зондів. Ця задача вирішується шляхом аналітичного розгляду у комбінації з експериментальною перевіркою. Для випадку двох зондів отримано биквадратне рівняння, що пов'язує невідомий коефіцієнт відбиття зі струмами з'єднаних із зондами напівпровідникових детекторів. Показано, що якщо визначати коефіцієнт відбиття як менший додатний корінь цього рівняння, то теоретично переміщення об'єкта визначається із струмів детекторів точно для коефіцієнтів відбиття, що не перевищують $1/\sqrt{2}$, і з точністю не гірше 4,4% від довжини хвилі зондуючого електромагнітного випромінювання в загальному випадку. Запропоновано двозондову методику вимірювання переміщення. Її експериментальна перевірка показала задовільну точність вимірювання для переміщень, що в декілька разів перевищують довжину хвилі зондуючого електромагнітного випромінювання. Таким чином, вперше показано, що для вимірювання переміщення достатньо двох зондів. Це дозволяє спростити конструкцію вимірювальної хвилевідної секції, послабити перешкоди від перевідбиттів між зондами та підвищити частоту дискретизації аналого-цифрового перетворювача, що відкриває шлях до розробки нового класу датчиків переміщення, зокрема для вібрацій.

This paper overviews the results of the investigations into displacement measurement by microwave interferometry which have been conducted at the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine over the past five years. The paper formulates the problem of development of a probe implementation of microwave interferometry that would allow one to make measurements over a wide displacement range at an unknown reflection coefficient with a minimum of probes. This problem is solved using analytical treatment in combination with experimental verification. For the case of two probes, a biquadratic equation that relates the unknown reflection coefficient to the currents of the semiconductor detectors connected to the probes is derived. It is shown that if the reflection coefficient is determined as the smaller positive root of that equation, then, theoretically, the target displacement can be found from the detector currents exactly for reflection coefficients no greater than $1/\sqrt{2}$ and to a worst-case accuracy of 4.4% of the operating wavelength in the general case. A two-probe displacement measurement technique is proposed. Its experimental verification has demonstrated reasonable measurement accuracy for displacements that are several times as great as the operating wavelength. Thus it is shown for the first time that two probes are sufficient for free-space displacement measurement. This simplifies the design of the measuring waveguide section, alleviates the problem of interprobe interference, and offers a higher sampling frequency of the analog-to-digital converter, thus opening up the way to the development of a new class of displacement sensors, in particular for vibration measurements.

Для построения измерителей параметров движения, в частности вибра-

© О.В. Пилипенко, Н.Б. Горев, А.В. Доронин,
И.Ф. Коджеспирова, Е.Н. Привалов, 2013

ций весьма привлекательно применение микроволновых методов. Это обусловлено целым рядом причин, наиболее весомыми из которых являются безынерционность и отсутствие механического контакта с испытываемым объектом. Одним из распространенных микроволновых методов, применяемых для измерения параметров движения, является интерференционный метод [1]. В этом методе перемещение объекта находится по сдвигу фаз между электромагнитной волной, отраженной от объекта, и падающей электромагнитной волной. В настоящее время для определения этого сдвига фаз обычно используются специальные устройства, включающие делитель мощности и фазовый детектор, в качестве которого выступает аналоговый [2] или цифровой [3] квадратурный смеситель. При этом необходимо минимизировать нелинейность фазовой характеристики квадратурного смесителя, вызванную асимметрией фаз и амплитуд. Однако информация о сдвиге фаз содержится также в амплитуде напряженности электрического поля стоячей волны между излучателем и объектом, которая может быть измерена с помощью электрического зонда и соединенного с ним полупроводникового детектора. Очевидно, аппаратная реализация зондовых измерений намного проще, но непосредственное определение величины перемещения по току детектора без применения специальных методов обработки сигнала возможно только для перемещений, не превышающих $\lambda/4$, где λ – длина волны зондирующего электромагнитного излучения. Это связано с тем, что тригонометрическое уравнение, связывающее расстояние между зондом и объектом с током детектора, имеет множество решений. Кроме того, в выражение, связывающее координату объекта с током детектора, также входит коэффициент отражения объекта, который заранее неизвестен и может изменяться в ходе измерений. Целью данной работы является разработка зондовой реализации интерференционного метода, позволяющей проводить измерения в широком диапазоне перемещений при неизвестном коэффициенте отражения с минимальным количеством зондов.

Исследования по зондовым методам определения перемещения проводятся в отделе функциональных элементов систем управления Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины в течение ряда лет [4 – 10]. В [4] предложен однозондовый метод, позволяющий существенно расширить диапазон измеряемых перемещений. Полученное выражение для координаты движущегося объекта x имеет вид

$$x(t) = \pm \frac{\lambda}{4\pi} \arccos \frac{1}{2r} \left[J(t) - 1 - r^2 \right] + \frac{\lambda}{4} (2n + 1), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

где t – время, r – модуль коэффициента отражения объекта, J – ток соединенного с зондом полупроводникового детектора, нормированный на его значение в режиме согласованной нагрузки.

При определении относительного перемещения объекта за начальное значение $x(0)$ можно принять любое значение x , даваемое формулой (1) при $t = 0$. Для однозначного определения $x(t)$ из тригонометрического соотношения (1) в последующие моменты времени, т. е. для выбора знака первого слагаемого и числа n во втором слагаемом, используется тот факт, что координата движущегося объекта $x(t)$ и его скорость $\dot{x}(t)$ (здесь и далее точка обозначает дифференцирование по t) являются непрерывными функ-

циями времени. Однако этот метод, позволяя определить величину относительного перемещения объекта, не позволяет определить направление перемещения. Метод, позволяющий определить как величину, так и направление перемещения, предложен в [5]. Он основан на использовании двух зондов, отстоящих друг от друга на расстоянии $\lambda/8$ (здесь и далее зонд, расположенный дальше от объекта, будет именоваться зонд 1, а зонд, расположенный ближе к объекту – зонд 2). В этом методе вначале определяется скорость объекта \dot{x} , а затем интегрированием скорости находится его относительное перемещение. Скорость \dot{x} следующим образом выражается через токи детекторов и их производные по времени

$$\dot{x} = \begin{cases} \frac{\lambda(1+r)^2 J_1}{4\pi[1+r^2 - J_2(1+r)^2]}, & |1+r^2 - J_2(1+r)^2| \geq |1+r^2 - J_1(1+r)^2| \\ -\frac{\lambda(1+r)^2 J_2}{4\pi[1+r^2 - J_1(1+r)^2]}, & |1+r^2 - J_2(1+r)^2| < |1+r^2 - J_1(1+r)^2|, \end{cases} \quad (2)$$

где J_1 – нормированный ток детектора, соединенного с зондом 1 (детектора 1); J_2 – нормированный ток детектора, соединенного с зондом 2 (детектора 2).

Входящий в (2) модуль коэффициента отражения r должен быть определен заранее. Поскольку коэффициент отражения различен для различных объектов и зависит от состояния поверхности объекта, то его необходимо определять перед каждым измерением. В методе, предложенном в [6, 7], коэффициент отражения исключается с помощью двойного дифференцирования токов детекторов, что дает следующее выражение для скорости объекта \dot{x}

$$\dot{x} = \begin{cases} 0, & J_1^2 + J_2^2 = 0, \\ \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\ddot{J}_2 J_1 - \ddot{J}_1 J_2}{kJ_1^2 + J_2^2/k}, & J_1^2 + J_2^2 \neq 0, \end{cases}$$

где k – отношение токов детекторов 2 и 1 в режиме согласованной нагрузки.

Однако в этом методе коэффициент отражения считается постоянным, что в реальной практике выполняется далеко не всегда. Кроме того, токи детекторов могут иметь значительную шумовую составляющую, вследствие чего дифференцирование, тем более двойное, может приводить к появлению большой погрешности. Со времени публикации классической работы Ф. Тишера [11] считалось, что для определения или исключения неизвестного коэффициента отражения без дифференцирования токов детекторов 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 (АЦП), что ограничивает частоту дискретизации. В работах же [8, 9] предложен подход, позволяющий определить перемещение с помощью двух зондов при условии, что модуль коэффициента отражения не превышает $1/\sqrt{2}$. Рассмотрим этот подход более подробно и покажем, что он позволяет найти перемещение с хорошей точностью и в случае произвольного коэффициента отражения.

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

$$J_1 = 1 + r^2 + 2r \cos(4\pi x/\lambda + \phi), \quad (3)$$

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

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 $J_2(t)$. Как будет показано ниже, это перемещение однозначно определяется по квадратурным сигналам $\cos(4\pi x/\lambda + \phi)$ и $\sin(4\pi x/\lambda + \phi)$. Из (3) и (4) имеем

$$\cos \psi = \frac{a_1 - r^2}{2r}, \quad (5)$$

$$\sin \psi = \frac{a_2 - r^2}{2r}, \quad (6)$$

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

Возведя выражения (5) и (6) в квадрат и сложив их, получим биквадратное уравнение относительно r

$$r^4 - (a_1 + a_2 + 2)r^2 + \frac{a_1^2 + a_2^2}{2} = 0. \quad (7)$$

Это уравнение имеет два положительных корня («плюс» перед квадратным корнем соответствует корню r_1 , а «минус» – корню r_2)

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

один из которых, очевидно, является посторонним.

Обозначим посторонний корень через r_{ext} . Используя (5) and (6), приведем свободный член уравнения (7) к виду

$$\frac{a_1^2 + a_2^2}{2} = r^2 \left[r^2 + 2\sqrt{2}r \sin(\psi + \pi/4) + 2 \right],$$

откуда $r_{ext} = \left[r^2 + 2\sqrt{2}r \sin(\psi + \pi/4) + 2 \right]^{1/2}$.

При $r \leq 1/\sqrt{2}$ посторонний корень r_{ext} всегда будет не меньше r и поэтому модуль коэффициента отражения r всегда будет даваться корнем r_2 , так как $r_2 \leq r_1$. В случае же $r > 1/\sqrt{2}$ посторонний корень r_{ext} будет меньше r при $\sin(\psi + \pi/4) < -1/\sqrt{2} r$, и поэтому модуль коэффициента отражения будет даваться корнем r_1 , если $\sin(\psi + \pi/4) < -1/\sqrt{2} r$, в противном же случае он будет даваться корнем r_2 . Для ясности все эти случаи сведены в табл. 1.

Таблица 1

$r \leq 1/\sqrt{2}$	$r > 1/\sqrt{2}$	
	$\sin(\psi + \pi/4) < -1/\sqrt{2} r$	$\sin(\psi + \pi/4) \geq -1/\sqrt{2} r$
$r_1 = r_{ext}$	$r_1 = r$	$r_1 = r_{ext}$
$r_2 = r$	$r_2 = r_{ext}$	$r_2 = r$

Рассмотрим вначале случай $r \leq 1/\sqrt{2}$ [8, 9]. В этом случае модуль коэффициента отражения r однозначно определяется из уравнения (7) как его корень r_2 и, следовательно, $\cos\psi$ и $\sin\psi$ однозначно определяются из (5). (6). Для определения перемещения объекта по $\cos\psi$ и $\sin\psi$ можно воспользоваться методом развертывания фазы, который является эффективным инструментом решения проблемы неоднозначности фазы в целом ряде приложений [12, 13]. Перемещение объекта Δx в момент времени t_n , $n=0,1,2,\dots$, относительно его начального положения $x(t_0)$ можно найти с помощью следующего алгоритма развертывания фазы [14]

$$\varphi(t_n) = \begin{cases} \arctg \frac{\sin\psi(t_n)}{\cos\psi(t_n)}, & \sin\psi(t_n) \geq 0, \cos\psi(t_n) \geq 0, \\ \arctg \frac{\sin\psi(t_n)}{\cos\psi(t_n)} + \pi, & \cos\psi(t_n) < 0, \\ \arctg \frac{\sin\psi(t_n)}{\cos\psi(t_n)} + 2\pi, & \sin\psi(t_n) < 0, \cos\psi(t_n) \geq 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta\varphi(t_n) = \varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1}), \quad (9)$$

$$\theta(t_n) = \begin{cases} 0, & n = 0, \\ \theta(t_{n-1}) + \Delta\varphi(t_n), & |\Delta\varphi(t_n)| \leq \pi, \quad n = 1, 2, \dots, \\ \theta(t_{n-1}) + \Delta\varphi(t_n) - 2\pi \operatorname{sgn}[\Delta\varphi(t_n)], & |\Delta\varphi(t_n)| > \pi, \quad n = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta x(t_n) = \frac{\lambda}{4\pi} \theta(t_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

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.

Рассмотрим теперь случай $r > 1/\sqrt{2}$. В этом случае, как видно из табл. 1, r_2 не всегда равен r , но, как будет показано ниже, перемещение тоже может быть определено с достаточной точностью, используя корень r_2 в качестве модуля коэффициента отражения. Как показано выше, корень r_2 будет посторонним при условии $\sin(\psi + \pi/4) < -1/\sqrt{2}r$. В терминах неразвернутой фазы φ это условие принимает вид

$$\frac{3\pi}{4} + \arcsin \frac{1}{\sqrt{2}r} < \varphi < \frac{7\pi}{4} - \arcsin \frac{1}{\sqrt{2}r},$$

откуда следует, что неразвернутая фаза, соответствующая условию $\sin(\psi + \pi/4) < -1/\sqrt{2}r$, лежит в третьем квадранте. С использованием (5), (6) можно показать, что если r_2 взят в качестве модуля коэффициента отражения тогда, когда он является посторонним, то возникающая при этом фазовая ошибка $\Delta\varphi_{er}$ дается выражением

$$\Delta\varphi_{er} = \arctg \frac{1 + r \cos \varphi}{1 + r \sin \varphi} + \pi - \varphi.$$

Функция $\Delta\varphi_{er}(\varphi)$ обращается в ноль при $\varphi = \frac{3\pi}{4} + \arcsin \frac{1}{\sqrt{2}r}$ и $\varphi = \frac{7\pi}{4} - \arcsin \frac{1}{\sqrt{2}r}$ и имеет отрицательный минимум при $\varphi_1 = \frac{3\pi}{4} + \arcsin \frac{\sqrt{2}(1+r^2)}{3r}$ и положительный максимум при $\varphi_2 = \frac{7\pi}{4} - \arcsin \frac{\sqrt{2}(1+r^2)}{3r}$, причем минимум и максимум равны по абсолютной величине. Как видно из алгоритма (8) – (11), ошибка в нахождении перемещения определяется только фазовой ошибкой в начальной и текущей точках измерения, поскольку фазовые ошибки в промежуточных точках взаимно уничтожаются. Поэтому при фиксированном r для максимально возможной ошибки определения перемещения будем иметь

$$\Delta x_{er \max} = \frac{\lambda}{4\pi} [|\Delta\varphi_{er}(\varphi_1)| + \Delta\varphi_{er}(\varphi_2)] = \frac{\lambda}{2\pi} |\Delta\varphi_{er}(\varphi_1)|.$$

На рис. 1 приведена зависимость отношения $\Delta x_{er \max}/\lambda = |\Delta\varphi_{er}(\varphi_1)|/2\pi$ от r для $1/\sqrt{2} < r \leq 1$ (для $0 < r \leq 1/\sqrt{2}$ ошибка $\Delta x_{er \max}$ будет равна нулю, так как r_2 точно равен r). Как видно из графика, максимальное значение $\Delta x_{er \max}/\lambda$ достигается при $r = 1$ и составляет около 0,044, то есть максимальное значение ошибки $\Delta x_{er \max}$ составляет около 4,4% от длины волны зондирующего электромагнитного излучения λ (заметим, что это ошибка в наихудшем случае, когда коэффициент отражения равен единице, что весьма маловероятно при измерениях в свободном пространстве, начальная точка измерения соответствует одному экстремуму функции $\Delta\varphi_{er}(\varphi)$, а текущая

точка измерения – другому). Таким образом, перемещение может быть определено с достаточной точностью при любом значении коэффициента отражения, если считать, что он дается корнем r_2 уравнения (7).

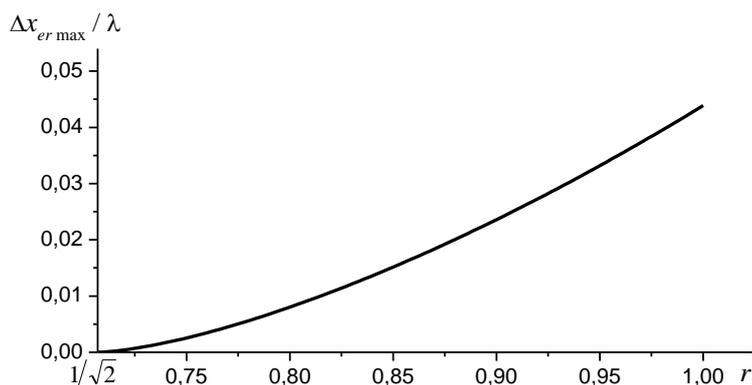


Рис. 1

В качестве экспериментальной проверки предложенной методики было измерено перемещение объекта (латунного диска или квадрата), приводимого в колебательное движение кривошипно-шатунным механизмом. Коэффициент отражения определялся как корень r_2 уравнения (7). Эксперименты проводились при значениях частоты зондирующего электромагнитного излучения f , размаха колебаний объекта $2A$ и минимального расстояния от объекта до рупорной антенны L_{\min} , приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Номер эксперимента	Объект	f (ГГц) / λ (см)	$2A$ (см)	L_{\min} (см)
1	Диск \varnothing 128 мм	10 / 3,00	15	100
2	Диск \varnothing 128 мм	9,7 / 3,09	10	15
3	Квадрат 70×70 мм	9,7 / 3,09	10	5

Схема измерительной установки с персональным компьютером (ПК) для управления измерениями и обработки данных приведена на рис. 2. Для сравнения на рис. 3 приведена схема датчика перемещения на основе квадратурного смесителя [2]. Как видно из рисунков, аппаратная реализация двухзондовых измерений намного проще. Общий вид размещения экспериментального оборудования (измерительной установки и кривошипно-шатунного механизма) при измерениях показан на рис. 4.

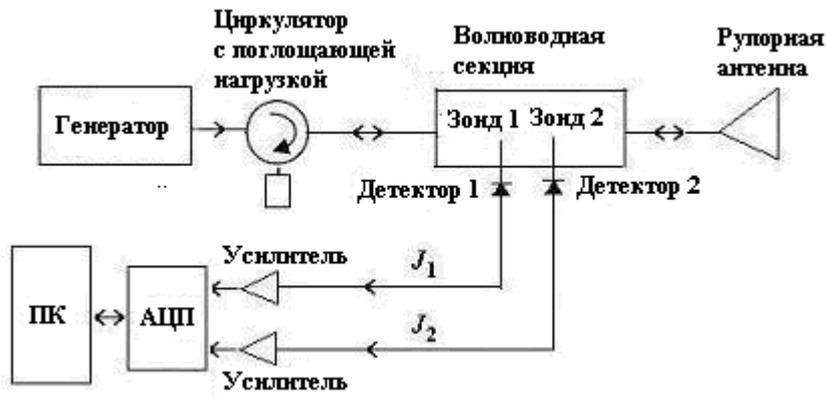


Рис. 2

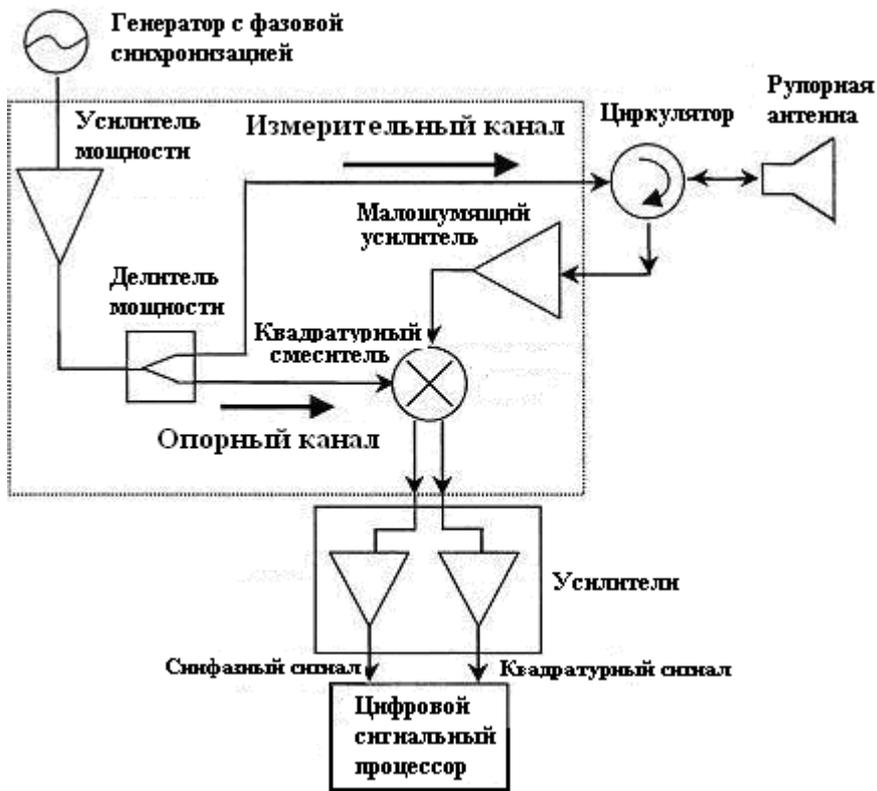


Рис. 3

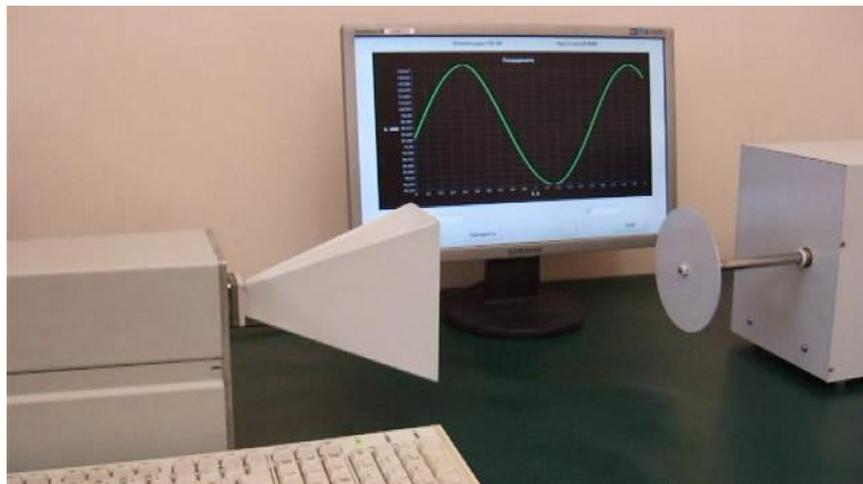


Рис. 4

На рис. 5 – рис. 7 приведена временная зависимость фактического перемещения объекта, найденного по параметрам кривошипно-шатунного механизма [9] (сплошная линия), и перемещения объекта, найденного по измеренным токам детекторов (штриховая линия), для экспериментов 1 – 3 соответственно.

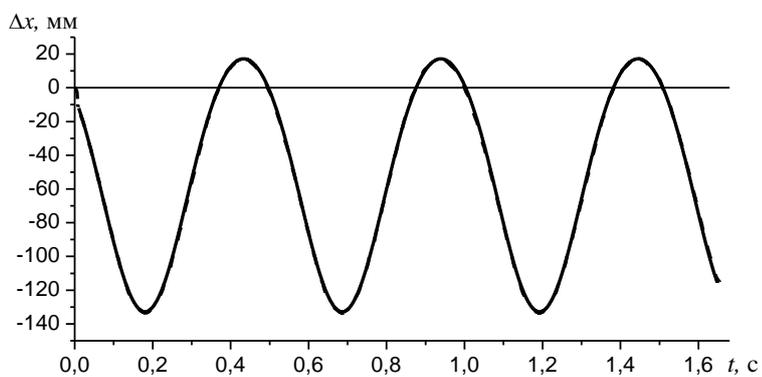


Рис. 5

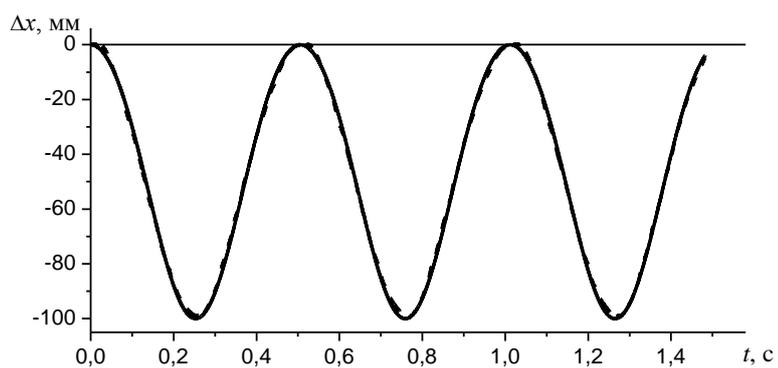


Рис. 6

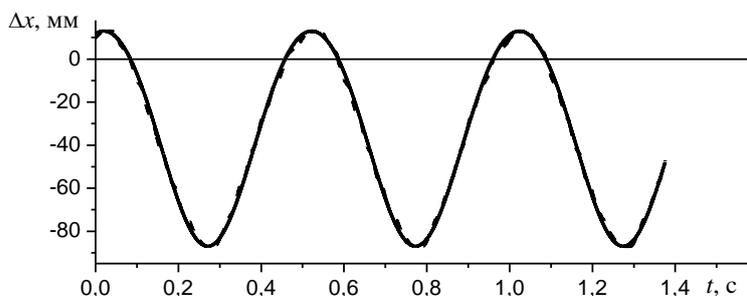


Рис. 7

Как видно из рисунков, штриховые и сплошные линии практически неразличимы, что свидетельствует о высокой точности измерения (типичная временная зависимость погрешности измерения Δx_{er} приведена на рис. 8). Следует отметить, что приведенное на рисунках перемещение получено из измеренных токов детекторов в реальном времени без какой-либо предварительной обработки данных измерений, такой как фильтрация, сглаживание и т. п.

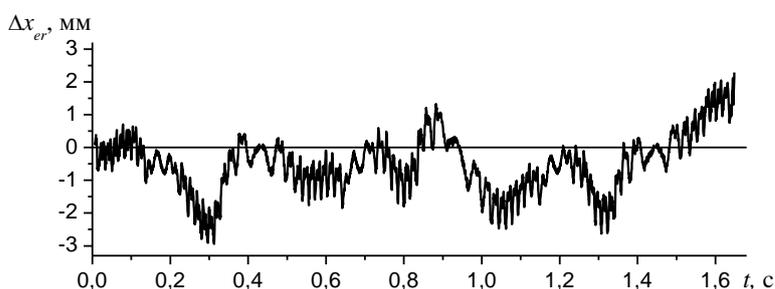


Рис. 8

Размах колебаний определялся с точностью до 0,7 мм в эксперименте 1, 1,1 мм в эксперименте 2 и 0,2 мм в эксперименте 3. В экспериментах 1 и 2 измеренный коэффициент отражения изменялся соответственно от 0,04 до 0,056 и от 0,12 до 0,62, т. е. был меньше $1/\sqrt{2} \approx 0.707$. Поэтому в этих экспериментах корень r_2 уравнения (7) давал фактический коэффициент отражения и, следовательно, погрешность измерения была связана с другими факторами, такими как отклонение отраженной волны от плоской формы, отражения от антенны и т. п. В эксперименте 3 измеренный коэффициент отражения изменялся от 0,2 до 0,76, т. е. в некоторых точках измерения корень r_2 мог быть посторонним. Однако, как видно из приведенных выше данных, это не привело к увеличению ошибки по сравнению с экспериментами 1 и 2. Как видно из рис. 7 (эксперимент 3), предложенная двухзондовая методика хорошо работает и при минимальном расстоянии между объектом и антенной $L_{\min} = 5$ см, в то время как радар на стоячей волне, предложенный в [15], не может работать на расстояниях меньше 14 см из-за интерференции между объектом и антенной.

Таким образом, установлено, что для определения параметров движения интерференционным методом при неизвестном произвольном коэффициенте отражения достаточно использования двух зондов. Предложенная двухзондовая методика измерения параметров движения механических систем поз-

воляет определять как величину, так и направление перемещения и обеспечивает достаточную точность измерения в случае перемещений, в несколько раз превышающих длину волны зондирующего электромагнитного излучения. С точки зрения аппаратной реализации предложенная методика намного проще методик, основанных на квадратурном смещении [2, 3]. В частности, она не требует квадратурного смесителя, нелинейная фазовая характеристика которого может представлять проблему. По сравнению с общепринятыми трехзондовыми измерениями [16], уменьшение количества зондов упрощает конструкцию волноводной секции, уменьшает проблему взаимовлияния зондов и позволяет повысить частоту дискретизации за счет соответствующего уменьшения числа каналов АЦП. Предложенная методика может быть использована 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. Совдуков.* – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
2. *Kim S.* A displacement measurement technique using millimeter-wave interferometry / *S. Kim, C. Nguyen* // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2003. – Vol. 51, No. 6. – P. 1724 – 1728.
3. *Kim S.* On the development of a multifunction millimeter-wave sensor for displacement sensing and low-velocity measurement / *S. Kim, C. Nguyen* // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2004. – Vol. 52, No 11. – P. 2503 – 2512.
4. Измерение параметров движения интерференционным методом в широком диапазоне амплитуд перемещений / *О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, Л. Г. Запольский, П. И. Заболотный, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов* // *Техническая механика.* – 2008. – № 1. – С. 100 – 107.
5. Измерение параметров движения механических объектов интерференционным методом с использованием двух зондов / *О. В. Пилипенко, М. М. Жечев, Л. Г. Запольский, П. И. Заболотный, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов* // *Техническая механика.* – 2009. – № 1. – С. 111 – 117.
6. Патент на корисну модель 55873 Україна, МПК G01H 9/00. Спосіб вимірювання параметрів руху і вібрації / *Пилипенко О. В., Горев М. Б., Коджеспирова І. Ф., Привалов С. М.*; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – u 2010 08039; заявл. 29.06.2010; опубл. 27.12.2010. Бюл. № 24. – 9 с.
7. Двухзондовый метод измерения параметров движения механических объектов / *О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, А. В. Доронин, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов* // *Техническая механика.* – 2011. – № 2. – С. 3 – 7.
8. Патент на корисну модель 63184 Україна, МПК G01H 9/00. Спосіб вимірювання параметрів руху і вібрації / *Пилипенко О. В., Горев М. Б., Доронін О. В., Коджеспирова І. Ф., Привалов С. М.*; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – u201105816; заявл. 10.05.2011; опубл. 26.09.2011. Бюл. № 18. – 7 с.
9. Измерение параметров движения механических объектов с использованием двух электрических зондов / *О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, А. В. Доронин, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов* // *Техническая механика.* – 2012. – № 3. – С. 3 – 8.
10. Патент на корисну модель 80300 Україна, МПК G01H 9/00. Спосіб вимірювання параметрів руху і вібрації / *О. В. Пилипенко, М. Б. Горев, О. В. Доронін, І. Ф. Коджеспирова, С. М. Привалов*; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – u 2012 12694; заявл. 07.11.2012; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 10. – 8 с.
11. *Тузнер Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах / *Ф. Тузнер.* – М. : Физматгиз, 1963. – 368 с.
12. *Chavez S.* Understanding phase maps in MRI: A new cutline phase unwrapping method / *S. Chavez, Q. S. Xiang, L. An* // *IEEE Transactions on Medical Imaging.* – 2002. – V. 21, No 8. – P. 966 – 977.
13. Resolving phase ambiguity in the inverse problem of reflection-only measurement methods / *U. S. Hasar, J. J. Barroso, C. Sabah, Y. Kaya* // *Progress in Electromagnetics Research.* – 2012. – V. 129. – P. 405 – 420.
14. *Сильвиа М. Т.* Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ / *М. Т. Сильвиа, Э. А. Робинсон.* – М. : Недра, 1983. – 447 с.
15. *Okubo Y.* Experimental verification of measurement principle in standing wave radar capable of measuring distances down to zero meters / *Y. Okubo, T. Uebo* // *Electronics and Communications in Japan. Part 1.* – 2007. – V. 90, No. 9. – P. 25 – 33.
16. *Cripps S. C.* VNA tales / *S. C. Cripps* // *IEEE Microwave Magazine.* – 2007. – V. 8, No 5. – P. 28 – 44.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 30.09.13,
в окончательном варианте 24.10.13