УДК 621.002.56

О. В. ПИЛИПЕНКО, Н. Б. ГОРЕВ, А. В. ДОРОНИН,
И. Ф. КОДЖЕСПИРОВА

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЗОНДОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА

Изучена возможность измерения перемещения сверхвысокочастотным интерференционным методом при неизвестном коэффициенте отражения с использованием двух зондов, установленных в волноводной секции. Цель работы заключается в том, чтобы показать, что точность измерения перемещения может быть повышена, если использовать межзондовое расстояние, отличное от его общепринятого значения. Рассмотрен случай произвольного межзондового расстояния. Получена зависимость ошибки измерения от межзондового расстояния и коэффициента отражения с учетом отклонения токов полупроводниковых детекторов, соединенных с зондами, от их теоретических значений. Показано, что с уменьшением межзондового расстояния ошибка измерений проходит через минимум для коэффициентов отражения, близких к единице, и монотонно увеличивается для меньших коэффициентов отражения. Такое поведение ошибки связано с тем, что с уменьшением межзондового расстояния и/или коэффициента отражения собственная ошибка двухзондовых измерений уменьшается, в то время как ошибка, связанная с отклонением токов детекторов от их теоретических значений, увеличивается. Предложено использовать межзондовое расстояние, равное одной десятой длины волны зондирующего электромагнитного излучения в волноводе λ_g. По сравнению с общепринятым межзондовым расстоянием, равным $\lambda_g/8$, при предложенном значении межзондового расстояния ошибка измерения значительно уменьшается для коэффициентов отражения, близких к единице, и практически не увеличивается для меньших коэффициентов отражения. Это подтверждено экспериментально с использованием измерений как в свободном пространстве, так и в волноводе. Результаты данной работы могут быть использованы при разработке микроволновых измерителей перемещения для различных классов виброзащитных систем и систем управления технологическими процессами.

Досліджено можливість вимірювання переміщення надвисокочастотним інтерференційним методом при невідомому коефіцієнті відбиття з використанням двох зондів, встановлених в хвилевідній секції. Ціль роботи полягає в тому, щоб показати, що точність вимірювання переміщення можна підвищити, якщо використовувати міжзондову відстань, відмінну від її загальноприйнятого значення. Розглянуто випадок довільної міжзондової відстані. Отримано залежність похибки вимірювання від міжзондової відстані та коефіцієнта відбиття з урахуванням відхилення струмів напівпровідникових детекторів, з'єднаних із зондами, від їхніх теоретичних значень. Показано, що зі зменшенням міжзондової відстані похибка вимірювань проходить через мінімум для коефіцієнтів відбиття, близьких до одиниці, і монотонно збільшується для менших коефіцієнтів відбиття. Така поведінка похибки зумовлена тим, що зі зменшенням міжзондової відстані та/або коефіцієнта відбиття власна похибка двозондових вимірювань зменшується, на той час як похибка, пов'язана з відхиленням струмів детекторів від їхніх теоретичних значень, збільшується. Запропоновано використовувати міжзондову відстань, що дорівнює одній десятій довжини хвилі зондуючого електромагнітного випромінювання в хвилеводі λ_g. У порівнянні із загальноприйнятою міжзондовою відстанню, що дорівнює $\lambda_g/8$, при запропонованому значенні міжзондової відстані похибка вимірювання значно зменшується для коефіцієнтів відбиття, близьких до одиниці, і майже не збільшується для менших коефіцієнтів відбиття. Це підтверджено експериментально з використанням вимірювань як у вільному просторі, так і у хвилеводі. Результати цієї роботи можуть бути використані при розробці мікрохвильових вимірювачів переміщення для різних класів віброзахисних систем та систем керування технологічними процесами.

This paper addresses the possibility of displacement measurement by microwave interferometry at an unknown reflection coefficient with the use of two probes mounted in a waveguide section. The aim of this paper is to show that the displacement measurement accuracy can be improved by using an interprobe distance other than its conventional value. The case of an arbitrary interpobe distance is considered. The measurement error as a function of the interprobe distance and the reflection coefficient is analyzed with the inclusion of variations of the currents of the semiconductor detectors connected to the probes from their theoretical values. The analysis has shown that as the interprobe distance decreases, the measurement error passes through a minimum for reflection coefficients close to unity and increases monotonically for smaller reflection coefficients. This behavior of the error is due to the fact that with decreasing interprobe distance and/or reflection coefficient the inherent error of two-probe measurements decreases, while the error caused by variations of the detector currents from their theoretical values increases. The interprobe distance is suggested to be one tenth of the guided operating wavelength λ_g. In comparison with the conventional interprobe distance of $\lambda_g/8$, the suggested value offers a marked reduction in the measurement error for reflection coefficients close to unity, while for smaller ones this error increases only negligibly. This is verified by experiment using both free-space and waveguide measurements. The results reported in this paper may be used in the development of microwave displacement sensors for various classes of vibration protection and workflow control systems.

Ключевые слова: *Вибрация, перемещение, интерференционный метод, зонд, падающая волна, отраженная волна, полупроводниковый детектор, ток детектора*

Для построения измерителей параметров движения весьма привлекателен интерференционный метод [1]. Это обусловлено такими достоинствами этого метода, как безынерционость, отсутствие механического контакта с измеряемым объектом, возможность работы в условиях запыления или задымления (в отличие от доплеровских датчиков [2 – 4] или систем технического зрения, использующих цифровую обработку изображения [5]) и простота аппаратной реализации. В интерференционном 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 [6] или цифровой [7] квадратурный смеситель. При этом необходимо минимизировать нелинейность фазовой характеристики квадратурного смесителя, вызванную асимметрией фаз и амплитуд.

Ранее в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины была предложена методика измерения перемещения, в которой квадратурные сигналы, необходимые для определения сдвига фаз, извлекаются из выходных сигналов двух зондов, расположенных в волноводной секции на расстоянии $\lambda_g/8$ друг от друга, где λ_g – длина волны зондирующего электромагнитного излучения в волноводе [8, 9]. По аппаратной реализации эта методика намного проще измерений с использованием квадратурного смесителя [6, 7]. Отличительной особенностью этой методики является то, что она позволяет измерять перемещение при неизвестном коэффициенте отражения с помощью всего лишь двух зондов, в то время как со времени публикации классической работы Ф. Тишера [10] считалось, что для определения или исключения неизвестного коэффициента отражения необходимы по меньшей мере три зонда. Теоретически эта методика дает точное значение перемещения для коэффициента отражения (в месте расположения зондов), не превышающего $1/\sqrt{2}$, а в общем случае определяет его с точностью не хуже 4,4 % от длины волны зондирующего электромагнитного излучения. Цель данной статьи заключается в том, чтобы показать, что эта точность может быть повышена, если использовать межзондовое расстояние, отличное от его общепринятого значения $\lambda_g/8$. Эта цель достигается расширением подхода, предложенного в [8, 9], на случай произвольного межзондового расстояния.

Рассмотрим два зонда 1 и 2, соединенных с полупроводниковыми детекторами с квадратичной вольт-амперной характеристикой. Зонды расположены в волноводной секции между генератором электромагнитного излучения и контролируемым объектом на расстоянии l 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

$$J_1 = 1 + R^2 + 2R\cos\psi \quad , \qquad (1)$$

$$J_2 = 1 + R^2 + 2R\sin(\psi - \beta)\ , \tag{2}$$

$$\psi = \frac{4\pi x}{\lambda} + \phi\,, \qquad \beta = \frac{\pi}{2}\left(\frac{l - \lambda_g/8}{\lambda_g/8}\right),$$

где R, ψ – модуль и фаза коэффициента отражения в месте расположения зонда 1 (далее для простоты модуль коэффициента отражения будет именоваться коэффициентом отражения), λ – длина волны зондирующего электромагнитного излучения в свободном пространстве, ϕ – составляющая фазы, которая определяется геометрией волноводной секции и антенны и сдвигом фазы при отражении и не зависит от расстояния x.

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 $\cos\psi$ и $\sin\psi$. Из (1) и (2) имеем

$$\cos\psi = \frac{a_1 - R^2}{2R}\,, \tag{3}$$

$$\sin\psi = \frac{a_2 + a_1\sin\beta - R^2(1+\sin\beta)}{2R\cos\beta}\,, \tag{4}$$

где введены обозначения $a_1 = J_1 - 1$, $a_2 = J_2 - 1$.

Возведя выражения (3) и (4) в квадрат и сложив их, получим биквадратное уравнение относительно R

$$R^4 - \left[a_1 + a_2 + 2(1 - \sin\beta)\right] R^2 + \frac{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \sin\beta}{2(1 + \sin\beta)} = 0\,. \tag{5}$$

Это уравнение имеет два положительных корня. Обозначим больший положительный корень через R_1, а меньший – через R_2. Один из этих корней, очевидно, является посторонним.

Используя (3) и (4), приведем свободный член уравнения (5) к виду

$$\frac{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \sin\beta}{2(1 + \sin\beta)} = R^2\left\{R^2 + 2R\left[\cos\psi + \sin(\psi - \beta)\right] + 2(1 - \sin\beta)\right\}.$$

Поскольку свободный член биквадратного уравнения равен произведению его корней, для постороннего корня R_{ext} имеем

$$R_{ext} = \left\{R^2 + 2R\left[\cos\psi + \sin(\psi - \beta)\right] + 2(1 - \sin\beta)\right\}^{1/2}. \tag{6}$$

После преобразований выражение для R_{ext} принимает вид

$$R_{ext} = \left[R^2 + 4R_0 R\sin(\psi + \arcsin R_0) + 4R_0^2\right]^{1/2}, \tag{7}$$

где $R_0 = \sqrt{(1 - \sin\beta)/2}$.

Отсюда вытекает, что R_{ext} и R соотносятся следующим образом: $R_{ext} \geq R$ при $\sin(\psi + \arcsin R_0) \geq -R_0/R$ и $R_{ext} < R$ при $\sin(\psi + \arcsin R_0) < -R_0/R$. Поскольку по определению $R_1 \geq R_2$, для коэффициента отражения R будем иметь

$$R = \begin{cases} R_2, & \sin(\psi + \arcsin R_0) \geq -R_0/R, \\ R_1, & \sin(\psi + \arcsin R_0) < -R_0/R. \end{cases}$$

Рассмотрим вначале случай $R \leq R_0$. При этих значениях R условие $\sin(\psi + \arcsin R_0) \geq -R_0/R$ выполняется при любом ψ, и поэтому коэффициент отражения R однозначно определяется из уравнения (5) как его корень R_2, что в свою очередь позволяет однозначно определить $\cos\psi$ и $\sin\psi$ из (3), (4). Для определения перемещения объекта по известным $\cos\psi$ и $\sin\psi$ можно воспользоваться методом развертывания фазы, который является эффективным инструментом решения проблемы неоднозначности фазы в целом ряде приложений [11, 12]. Перемещение объекта Δx в момент времени t_n, $n = 0, 1, 2, ...,$ относительно его начального положения $x(t_0)$ можно найти с помощью следующего алгоритма развертывания фазы [13]

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

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

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

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

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

Рассмотрим теперь случай $R > R_0$. При этих значениях коэффициента отражения корень R_2 не всегда равен R, но, как будет показано ниже, перемещение тоже может быть определено с достаточной точностью, используя в качестве коэффициента отражения корень R_2. Как показано выше, корень R_2 будет посторонним при условии $\sin(\psi + \arcsin R_0) < -R_0/R$. В терминах неразвернутой фазы φ это условие принимает вид

$$\varphi_1 < \varphi < \varphi_2,$$

где $\varphi_1 = \pi + \arcsin \frac{R_0}{R} - \arcsin R_0$, $\varphi_2 = 2\pi - \arcsin \frac{R_0}{R} - \arcsin R_0$.

В случае $l \le \lambda_g/8$ $(1/\sqrt{2} \le R_0 < 1)$ имеем

$$\frac{\pi}{4} \le \arcsin R_0 \le \arcsin \frac{R_0}{R} < \frac{\pi}{2},$$

откуда следует, что углы φ_1 и φ_2 лежат в третьем квадранте.

Если в качестве коэффициента отражения берется посторонний корень R_{ext}, то выражения (3), (4) для $\cos\psi$ и $\sin\psi$ будут давать кажущиеся значения этих величин, для которых с учетом (6), (7) будем иметь

$$\cos\psi_{ap} = -\frac{1 + R\sin(\varphi - \beta) - \sin\beta}{R_{ext}},$$

$$\sin\psi_{ap} = -\frac{1 + R\cos\varphi - \sin\beta[\sin\beta - R\sin(\varphi - \beta)]}{R_{ext}\cos\beta}.$$

В формулу (8) для определения неразвернутой фазы входит арктангенс отношения $\sin\psi/\cos\psi$. Поэтому рассмотрим функцию $F(\varphi) = \sin\psi_{ap}/\cos\psi_{ap}$, $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$

$$F(\varphi) = \frac{1 + R\cos\varphi - \sin\beta[\sin\beta - R\sin(\varphi - \beta)]}{\cos\beta[1 + R\sin(\varphi - \beta) - \sin\beta]}.$$

Для производной этой функции по φ имеем

$$F'(\varphi) = \frac{R^2\left[-2\frac{R_0}{R}\sin(\varphi + \arcsin R_0) - 1\right]}{[1 + R\sin(\varphi - \beta) - \sin\beta]^2} > \frac{R^2\left[2R_0^2 - 1\right]}{[1 + R\sin(\varphi - \beta) - \sin\beta]^2} \ge 0.$$

Следовательно, кажущаяся неразвернутая фаза φ_{ap} является монотонно возрастающей функцией фактической неразвернутой фазы φ. Поскольку в точках $\varphi = \varphi_1$ и $\varphi = \varphi_2$ кажущаяся и фактическая фазы совпадают, это означает, что кажущаяся фаза тоже лежит между φ_1 и φ_2, т. е. в третьем квадранте. Поэтому для фазовой ошибки $\Delta\varphi_{er} = \varphi_{ap} - \varphi$ будем иметь

$$\Delta\varphi_{er}(\varphi) = \begin{cases} 0, \quad 0 \le \varphi \le \varphi_1, \quad \varphi_2 \le \varphi \le 2\pi \\ \mathrm{arctg}F(\varphi) + \pi - \varphi, \quad \varphi_1 < \varphi < \varphi_2. \end{cases} \tag{12}$$

Как видно из (9) – (11), ошибка в определении перемещения зависит только от фазовой ошибки 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

$$\Delta x_{er\max} = \frac{\lambda}{4\pi}\left(\Delta\varphi_{er\max} - \Delta\varphi_{er\min}\right), \tag{13}$$

где $\Delta\varphi_{er\max}$ и $\Delta\varphi_{er\min}$ – максимальное и минимальное значение функции $\Delta\varphi_{er}(\varphi)$ на интервале $0 \le \varphi < 2\pi$.

Прямой расчет по формулам (12) и (13) показывает, что ошибка $\Delta x_{er\,\max}$ быстро уменьшается с уменьшением межзондового расстояния. Однако в реальной практике это расстояние не может быть уменьшено ниже определенного предела. Дело в том, что с уменьшением межзондового расстояния значения токов детекторов сближаются, вследствие чего увеличивается вклад составляющей ошибки, связанной с отклонением токов от их теоретических значений, даваемых формулами (1) и (2) (эти отклонения могут быть вызваны влиянием формы и ориентации отражающей поверхности и диаграммы направленности антенны на отраженную волну, наличием электромагнитного шума и т. п.). В результате при некотором значении межзондового расстояния эта ошибка может пройти через минимум и начать увеличиваться.

Для определения рационального значения межзондового расстояния были проведены расчеты, в которых моделировалось определение относительного перемещения объекта, совершающего гармонические колебания. Отклонения токов детекторов от их теоретических значений моделировались случайным шумом. Расстояние x от объекта до зонда 1 и токи детекторов J_1 и J_2 моделировались следующим образом

$$x(t) = x_0 + A\sin(2\pi t/T),$$

$$\psi = \psi_0 + \frac{4\pi}{\lambda} A\sin(2\pi t/T), \qquad \psi_0 = \phi + \frac{4\pi x_0}{\lambda},$$

$$J_1 = \left(1 + R^2 + 2R\cos\psi\right)\left(1 + A_n r\right),$$

$$J_2 = [1 + R^2 + 2R\sin(\psi - \beta)]\,\left(1 + A_n r\right),$$

где t – время, A и T – амплитуда и период колебаний объекта, x_0 и ψ_0 – расстояние x и фаза ψ при $t = 0$, A_n – амплитуда шума, r – случайная переменная, равномерно распределенная между –1 и 1.

Расчеты были проведены для различных значений межзондового расстояния l и коэффициента отражения R при $A = 2{,}5\lambda$ и $A_n = 0{,}03$. Для получения максимально возможной ошибки начальная фаза ψ_0 должна быть такой, чтобы $\Delta\varphi_{er}(\psi_0) = \Delta\varphi_{er\,\min}$ или $\Delta\varphi_{er}(\psi_0) = \Delta\varphi_{er\,\max}$; для определенности фаза ψ_0 была выбрана из условия $\Delta\varphi_{er}(\psi_0) = \Delta\varphi_{er\,\min}$.

На рис. 1 приведены зависимости отношения $\Delta x_{er\,\max}(\lambda_g/8)/\Delta x_{er\,\max}$ для пяти периодов колебаний от межзондового расстояния l при различных значениях коэффициента отражения R. Как видно из рисунка, с уменьшением межзондового расстояния это отношение проходит через максимум (т. е. ошибка $\Delta x_{er\,\max}$ проходит через минимум) для коэффициентов отражения, близких к единице ($R = 1$; 0,95; 0,9), и монотонно уменьшается (т. е. ошибка $\Delta x_{er\,\max}$ монотонно увеличивается) для меньших коэффициентов отражения (R = 0,7; 0,3; 0,2; 0,1). Немонотонность ошибки обсуждалась выше. Ее монотонное увеличение связано с тем, что при $R < R_0$ (при $l \le \lambda_g/8$ $R_{0\min} = 1/\sqrt{2} = 0{,}707$) ошибка перемещения определяется только отклонениями токов детекторов от их теоретических значений. Как видно из рисунка, в качестве рационального значения межзондового расстояния может быть выбрано $l = 0{,}8(\lambda_g/8) = \lambda_g/10$, потому что при этом значении l ошибка $\Delta x_{er\,max}$ уменьшается более чем в два раза по сравнению с $l = \lambda_g/8$ для коэффициентов отражения, близких к единице, в то время как для меньших коэффициентов отражения она практически не увеличивается.

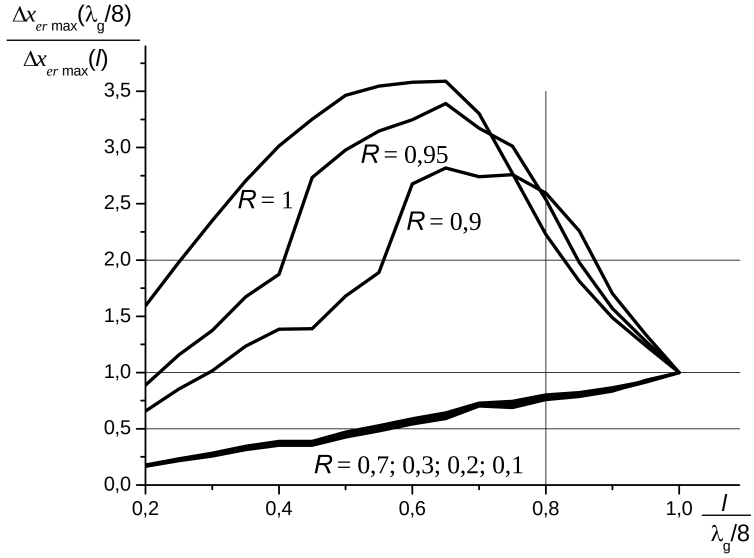

Рис. 1

При экспериментальной проверке для рассмотрения случаев как малых коэффициентов отражения, так и коэффициентов отражения, близких к единице, были проведены измерения как в свободном пространстве, так и волноводе с использованием двухзондовой измерительной установки, описанной в [8]. В экспериментах межзондовое расстояние оставалось фиксированным, а отношение l/λ_g варьировалось путем изменения частоты генератора электромагнитного излучения. Использовались две частоты: 9,7 ГГц ($l = \lambda_g/8$) и 8,7 ГГц ($l = \lambda_g/10$). Коэффициент отражения определялся как корень R_2 уравнения (5).

Измерения в свободном пространстве проводились для латунного диска диаметром 218 мм, приводимого в движение кривошипно-шатунным механизмом. Размах колебаний диска составлял 10 см, а минимальное расстояние между диском и антенной было 58 см. При частоте 9,7 Гц ($l = \lambda_g/8$) измеренный коэффициент отражения изменялся в диапазоне от 0,16 до 0,25, а при частоте 8,7 ГГц ($l = \lambda_g/10$) – в диапазоне от 0,18 до 0,3, т. е. в обоих случаях был меньше, чем $R_{0\,min} = 1/\sqrt{2} = 0{,}707$, и поэтому корень R_2 давал фактический коэффициент отражения. Для семи последовательных полных ходов диска ошибка определения размаха составила 0,23; 0,23; 0,18; 0,18; 0,18; 0,18; 0,19 мм при частоте 9,7 ГГц ($l = \lambda_g/8$) и 0,35; 0,39; 0,39; 0,39; 0,39; 0,39; 0,35 мм при частоте 8,7 ГГц ($l = \lambda_g/10$). Таким образом, для приведенных выше малых значений коэффициента отражения ошибка определения размаха при 8,7 ГГц ($l = \lambda_g/10$) лишь незначительно возрастает по сравнению с 9,7 ГГц ($l = \lambda_g/8$).

При измерениях в волноводе на конце волноводной секции с зондами вместо используемой при измерениях в свободном пространстве рупорной антенны устанавливался короткозамыкающий поршень, который перемещался с помощью микрометрического винта с шагом 1 мм (при определении перемещения поршня в формуле (11) вместо длины волны в свободном пространстве λ использовалась длина волны в волноводе λ_g). На рис. 2 приведены зависимости ошибки измерения перемещения Δx_{er} (а) и измеренного коэффициента отражения R_2 (б) от перемещения поршня Δx для 9,7 ГГц ($l = \lambda_g/8$) и 8,7 ГГц ($l = \lambda_g/10$). На графиках измеренного коэффициента отражения видны близкие к единице плато и впадины. Плато соответствуют фактическому коэффициенту отражения, а впадины возникают там, где корень R_2 становится посторонним, что также проявляется в виде роста ошибки измерения перемещения, наблюдаемого в месте расположения впадин. Как следует из (7), посторонний корень достигает минимума при $\sin(\psi + \arcsin R_0) = -1$, и этот минимум равен

$$R_{ext\ \min} = |R - 2R_0|.$$

При $l = \lambda_g/8$ $R_0 = 1/\sqrt{2}$ и $R_{ext\ \min} = |R - 2R_0| = 2\sqrt{2} - 1 = 0{,}41$. При $l = \lambda_g/10$ $R_0 = \sqrt{(1 + \sin 0{,}1\pi)/2} = 0{,}81$ и $R_{ext\ \min} = |R - 2R_0| = 2 \times 0{,}81 - 1 = 0{,}62$. Измеренные значения $R_{ext\ \min}$ при $l = \lambda_g/8$ и $l = \lambda_g/10$ равны 0,28 и 0,57 соответственно, т. е. находятся в удовлетворительном соответствии с рассчитанными.

Как видно из рисунка, максимальная ошибка измерения перемещения уменьшается от 1,8 мм при $l = \lambda_g/8$ (4,3 % от $\lambda_g = 4{,}18$ см) до 0,6 мм при $l = \lambda_g/10$ (1,2 % от $\lambda_g = 5{,}21$ см). Уменьшение ошибки измерения перемещения в данном случае (близкий к единице коэффициент отражения) намного больше, чем ее увеличение в рассмотренном выше случае малого коэффициента отражения.

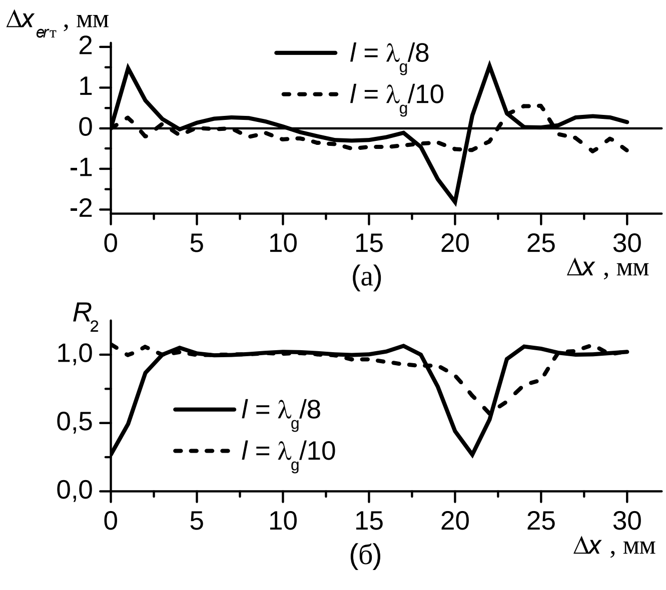

Рис. 2

Таким образом, при измерении перемещения объекта с неизвестным коэффициентом отражения интерференционным методом с использованием двух зондов ошибку измерения можно уменьшить путем перехода от общепринятого значения межзондового расстояния $\lambda_g/8$ к $\lambda_g/10$. 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. Совлуков.* – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
2. *Cunha A.* Dynamic measurements on stay cables of stay-cable bridges using an interferometry laser system / *A. Cunha, E. Caetano* // Experimental Techniques. – 1999. – V. 23, No 3. – P. 38 – 43.
3. *Kaito K.* Development of a non-contact scanning vibration measurement system for real-scale structures / *K. Kaito, M. Abe, Y. Fujino* // Stricture and Infrastructure Engineering. – 2005. – V. 1, No 3. – P. 189 – 205.
4. *Mehrabi A. B.* In-service evaluation of cable-stayed bridges, overview of available methods, and findings / *A. B. Mehrabi* // Journal of Bridge Engineering. – 2006. – V. 11, No 6. – P. 716 – 724.
5. *Lee J. J.* A vision-based system for remote sensing of bridge displacement / *J. J. Lee, M. Shinozuka* // NDT & E International. – 2006. – V. 39, No 5. – P. 425 – 431.
6. *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.
7. *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. – V. 52, No 11. – P. 2503 – 2512.
8. Двухзондовая реализация интерференционного метода измерения параметров движения механических объектов / *О. В. Пилипенко*, *Н. Б. Горев*, *А. В. Доронин*, *И. Ф. Коджеспирова*, *Е. Н. Привалов* // Техническая механика. – 2013. – № 4. – С. 112 – 122.
9. Патент на корисну модель 80300 Україна, МПК G01H 9/00. Спосіб вимірювання параметрів руху і вібрації / *Пилипенко О. В., Горєв М. Б., Доронін О. В., Коджеспірова І. Ф., Привалов Є. М.* ; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України. – u 2012 12694 ; заявл. 07.11.2012 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10. – 8 с.
10. *Тишер Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах / *Ф. Тишер*. – М. : Физматгиз, 1963. – 368 с.
11. *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.
12. 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.
13. *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.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 10.11.14,
в окончательном варианте 10.11.14