UDC 621.002.56

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

ДВУХЗОНДОВЫЙ ВАРИАНТ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

*Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: ifk56@ukr.net*

В данной статье приведены результаты исследований по микроволновым зондовым измерениям, которые проводились в отделе функциональных элементов систем управления Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины в течение последних пяти лет. В результате этих исследований разработан двухзондовый вариант сверхвысокочастотной интерферометрии, который позволяет измерять как перемещение механического объекта, так и комплексный коэффициент отражения образца материала. Уменьшение количества зондов с трех (общепринятый случай) до двух упрощает конструкцию и изготовление волноводной секции и ослабляет паразитный эффект переотражений между зондами. Возможность использования только двух зондов продемонстрирована с помощью анализа корней уравнения, связывающего модуль неизвестного комплексного коэффициента отражения с токами соединенных с зондами полупроводниковых детекторов. Этот анализ показывает, что теоретически перемещение определяется точно для модуля коэффициента отражения, не превышающего $2^{-1/2}$, и с максимальной погрешностью около 4,4 % от длины волны зондирующего электромагнитного излучения в свободном пространстве в общем случае, и дает условия, при которых комплексный коэффициент отражения однозначно определяется из токов детекторов. Как показали эксперименты, при длине волны электромагнитного излучения 3 см, двойной амплитуде колебаний объекта 10 и 15 см и частоте колебаний объекта около 2 Гц предложенный метод измерения перемещения позволяет определить мгновенное значение перемещения объекта с максимальной погрешностью около 3 мм и средней погрешностью около 1 мм без какой-либо предварительной обработки данных измерений, такой как фильтрация, сглаживание и т. п Результаты, приведенные в данной работе, могут быть использованы при разработке сверхвысокочастотных датчиков перемещения и векторных рефлектометров.

Ключевые слова: *комплексный коэффициент отражения, перемещение, электрический зонд, сверхвысокочастотная интерферометрия, полупроводниковый детектор, волноводная секция.*

1. *Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С.* Радиоволновые измерения параметров технологических процес сов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
2. *Cunha A., Caetano E.* Dynamic measurements on stay cables of stay-cable bridges using an interferometry laser system. Experimental Techniques. 1999. V. 23, No. 3. P. 38–43.
3. *Kaito K., Abe M., Fujino Y.* Development of a non-contact scanning vibration measurement system for real-scale structures. 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. Journal of Bridge Engineering. 2006. V. 11, No. 6. P. 716–724.
5. *Lee J. J., Shinozuka M.* A vision-based system for remote sensing of bridge displacement. NDT & E International. 2006. V. 39, No. 5. P. 425–431.
6. *Pieraccini M., Fratini M., Parrini F., Macaluso G., Atzeni C*. CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures. Electronics Letters. 2004. V. 40, No 14. P. 907–908.
7. *Gentile C.* Application of microwave remote sensing to dynamic testing of stay-cables. Remote Sensing. 2010. V. 2, No. 1. P. 36–51.
8. *Kim S., Nguyen C.* A displacement measurement technique using millimeter-wave interferometry. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2003. V. 51, No. 6. P. 1724–1728.
9. *Kim S., Nguyen C.* On the development of a multifunction millimeter–wave sensor for displacement sensing and low-velocity measurement. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2004. V. 52, No. 11. P. 2503–2512.
10. *Тишер Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 368 с.
11. *Cripps S. C.* VNA tales. IEEE Microwave Magazine. 2007. V. 8, No. 5. P. 28–44.
12. *Пилипенко О. В., Горев Н. Б., Доронин А. В., Коджеспирова И. Ф., Привалов Е. Н.*Двухзондовая реализация интерференционного метода измерения параметров движения механических объектов. Техническая механика. 2013. № 4. С. 112–122.
13. Спосіб вимірювання параметрів руху і вібрації. Патент на корисну модель 89602 Україна, МПК G01H 9/00. *Пилипенко О. В., Горєв М. Б., Доронін О. В., Коджеспірова І. Ф., Привалов Є. М.*; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. u 2013 13965; заявл. 02,12.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. №. 8 с.

14. *Пилипенко О. В., Горев Н. Б., Доронин А. В., Коджеспирова И. Ф.* Измерение параметров движения с использованием двухзондовой реализации интерференционного метода. Техническая механика. 2014. № 4. С. 85–93.
15. *Pylypenko O. V., Gorev N. B., Doronin A. V., Kodzhespirova I. F.* Phase ambiguity resolution in relative displacement measurement by microwave interferometry. Technical Mechanics. 2017. No. 2. P. 3–11.
16. *Silvia M. T., Robinson E. A.* Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas.. Amsterdam–Oxford–New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979. 447 p.
17. *Pylypenko O. V., Gorev N. B., Doronin A. V., Kodzhespirova I. F.* Experimental verification of a two-prove implementation of microwave interferometry for displacement measurement. Technical Mechanics. 2018. No. 1. P. 5–12.
18. *Okubo Y. Uebo T.* Experimental verification of measurement principle in standing wave radar capable of measuring distances down to zero meters. Electronics and Communication in Japan. Part 1. 2007. V. 90, No. 9. P. 25–33.
19. *Пилипенко О. В., Горев Н. Б., Доронин А. В., Коджеспирова И. Ф.* Определение комплексного коэффициента отражения с помощью зондовых измерений. Техническая механика. 2015. № 4. С. 139–147.
20. *Пилипенко О. В., Горев Н. Б., Доронин А. В., Коджеспирова И. Ф.* Определение копмплексного коэффициента отражения интерференционным методом с использованием двух электрических зондов. Техническая механика. 2016. № 3. С. 43–50.

Получено 18.05.2018,
в окончательном варианте 25.09.2018