

**ДВОЗОНДОВИЙ ВАРІАНТ НАДВИСОКОЧАСТОТНОЇ
ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ТА
ВИМІРЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ***Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: ifk56@ukr.net*

У статті наведено результати досліджень з мікрохвильових зондових вимірювань, що проводилися у відділі функціональних елементів систем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України на протязі останніх п'яти років. У результаті цих досліджень розроблено двозондовий варіант надвисокочастотної інтерферометрії, який дозволяє вимірювати як переміщення механічного об'єкта, так і комплексний коефіцієнт зразка матеріалу. Зменшення кількості зондів з трьох (загальноживаний випадок) до двох спрощує конструкцію та виготовлення хвилевідної секції та послаблює паразитний ефект перевідбиттів між зондами. Можливість використання тільки двох зондів показано шляхом аналізу коренів рівняння, яке пов'язує модуль невідомого комплексного коефіцієнта відбиття зі струмами з'єднаних із зондами напівпровідникових детекторів. Аналіз показує, що теоретично переміщення визначається точно для модуля коефіцієнта відбиття, що не перевищує $2^{-1/2}$, та з максимальною похибкою близько 4,4 % від довжини хвилі зондуючого електромагнітного випромінювання у вільному просторі в загальному випадку, і дає умови, за яких комплексний коефіцієнт відбиття однозначно визначається зі струмів детекторів. Як показали експерименти, при довжині хвилі електромагнітного випромінювання 3 см, подвійній амплітуді коливань об'єкта 10 і 15 см та частоті коливань об'єкта близько 2 Гц запропонований метод вимірювання переміщення дозволяє визначати миттєве значення переміщення об'єкта з максимальною похибкою близько 3 мм та середньою похибкою близько 1 мм без будь-якої попередньої обробки даних вимірювань, такої як фільтрація, згладжування, тощо. Результати, представлені в цій роботі, можуть бути використані при розробці надвисокочастотних датчиків переміщення та векторних рефлектометрів.

Ключові слова: комплексний коефіцієнт відбиття, переміщення, електричний зонд, надвисокочастотна інтерферометрія, напівпровідниковий детектор, хвилевідна секція.

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. *Structure 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., Доронін О. В., Коджеспирова І. 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., Горев Н. Б., Доронін О. В., Коджеспирова І. Ф., Привалов Е. 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-probe 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 комплексного коэффициента отражения интерференционным методом с использованием двух электрических зондов. *Техническая механика*. 2016. № 3. С. 43–50.

Отримано 18.05.2018,
в остаточному варіанті 25.09.2018