

УДК ?

## МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ГЕТЕРОДИННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ\*

Г. Б. ЭШОНКУЛОВ, Р. Р. ВИЛЬДАНОВ, Ф. К. ТУРОТОВ

*Национальный университет Узбекистана,  
Узбекистан, Ташкент, 100174, Вузгородок*

**Аннотация.** Представлена лазерная гетеродинная система для регистрации малых смещений и вибраций удаленных объектов. Использование дополнительного компенсационного интерферометра позволило компенсировать влияние флуктуаций состояния окружающей среды на результаты измерений. Приведены результаты регистрации сейсмических колебаний при разных вариантах работы установки. Эксперименты продемонстрировали эффект устранения возмущений показателя преломления воздуха и частотной нестабильности лазеров путем аппаратной и программной компенсации нестабильностей.

**Ключевые слова:** гетеродинный интерферометр; оптическая фаза; биения; сейсмические колебания

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерные интерферометрические системы широко используются для бесконтактного дистанционного контроля и измерения смещений, деформаций и вибраций различных объектов в промышленном производстве, сейсмометрии и научных исследованиях [1]. В гетеродинных интерферометрах используются два лазерных излучения с различной частотой, и высокоточные измерения производятся путем обработки сигналов биений на разностной частоте [2–5].

При измерениях в открытых атмосферных условиях возникает необходимость учитывать вариации показателя преломления воздушной среды, которые возникают в процессе измерений из-за изменения окружающей температу-

ры и/или давления [6]. Эти флуктуации вызывают изменения оптической длины пути, прямо влияющие на результат измерения [7].

Существуют различные способы компенсации этих возмущений. Один из вариантов заключается в построении строго идентичных плеч интерферометра, чтобы воздействие на них флуктуаций окружающей среды было одинаковым [8]. Однако для деформографов с длинными базами порядка 10 м и более иногда невозможно построить строго симметричную оптическую схему. В таких случаях, как вариант, применяется зондирование трассы на двух длинах волн [9], что становится эффективным только для достаточно длинных трасс.

Для улучшения показателей лазерных интерферометров при проведении измерений с высокой точностью при различных состояниях

---

\* Данная работа выполнялась в Национальном университете Узбекистана в рамках научно-исследовательской темы № 01910000928.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. G. Berkovic, E. Shafir, "Optical methods for distance and displacement measurements," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 4, no. 4, p. 441, 2012, doi: [10.1364/AOP.4.000441](https://doi.org/10.1364/AOP.4.000441).
2. P. Chien, "Two-frequency displacement measurement interferometer based on a double-heterodyne technique," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 62, no. 1, pp. 254–255, 1991, doi: [10.1063/1.1142275](https://doi.org/10.1063/1.1142275).
3. S. Topcu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli, P. Juncar, "Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometric scale," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 74, no. 11, pp. 4876–4880, 2003, doi: [10.1063/1.1614858](https://doi.org/10.1063/1.1614858).
4. H. J. van Elburg, J. J. J. Dirckx, W. F. Decraemer, "Design and performance of a high-resolution dual-channel heterodyne laser velocimeter," *Optik*, vol. 118, no. 7, pp. 345–349, 2007, doi: [10.1016/j.ijleo.2006.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2006.04.004).
5. H. Tabatabai, D. E. Oliver, J. W. Rohrbaugh, C. Papadopoulos, "Novel applications of laser doppler vibration measurements to medical imaging," *Sens. Imaging An Int. J.*, vol. 14, no. 1–2, pp. 13–28, 2013, doi: [10.1007/s11220-013-0077-1](https://doi.org/10.1007/s11220-013-0077-1).
6. Y.-S. Jang, S.-W. Kim, "Compensation of the refractive index of air in laser interferometer for distance measurement: a review," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 18, no. 12, pp. 1881–1890, 2017, doi: [10.1007/s12541-017-0217-y](https://doi.org/10.1007/s12541-017-0217-y).
7. K. D. Ridley, S. M. Watson, E. Jakeman, M. Harris, "Heterodyne measurements of laser light scattering by a turbulent phase screen," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 3, p. 532, 2002, doi: [10.1364/AO.41.000532](https://doi.org/10.1364/AO.41.000532).
8. H. Yan, H.-Z. Duan, L.-T. Li, Y.-R. Liang, J. Luo, H.-C. Yeh, "A dual-heterodyne laser interferometer for simultaneous measurement of linear and angular displacements," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 86, no. 12, p. 123102, 2015, doi: [10.1063/1.4936771](https://doi.org/10.1063/1.4936771).
9. В.А. Орлов, Ю.Н. Фомин, В.М. Семибаламут, Д.О. Терешкин, В.А. Жмудь, "Комплекс для измерения сверхмалых приливных деформаций скальных пород на основе He-Ne-лазера," *Автоматика и программная инженерия*, vol. 3, no. 9, pp. 54–65, 2014, uri: [http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/АИПИ-3-2014-6\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/АИПИ-3-2014-6_0.pdf).
10. C.-C. Hsu, C.-C. Wu, J.-Y. Lee, H.-Y. Chen, H.-F. Weng, "Reflection type heterodyne grating interferometry for in-plane displacement measurement," *Opt. Commun.*, vol. 281, no. 9, pp. 2582–2589, 2008, doi: [10.1016/j.optcom.2007.12.098](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.12.098).
11. K. Meiners-Hagen, T. Meyer, G. Prellinger, W. Pöschel, D. Dontsov, F. Pollinger, "Overcoming the refractivity limit in manufacturing environment," *Opt. Express*, vol. 24, no. 21, p. 24092, 2016, doi: [10.1364/OE.24.024092](https://doi.org/10.1364/OE.24.024092).
12. C. S. Chin, B. K. A. Ngoi, "Self-compensated heterodyne laser interferometer," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 217–219, 2000, doi: [10.1007/s001700050030](https://doi.org/10.1007/s001700050030).
- [13] H. J. Kang, B. J. Chun, Y.-S. Jang, Y.-J. Kim, S.-W. Kim, "Real-time compensation of the refractive index of air in distance measurement," *Opt. Express*, vol. 23, no. 20, p. 26377, 2015, doi: [10.1364/OE.23.026377](https://doi.org/10.1364/OE.23.026377).
14. H. Wu, F. Zhang, T. Liu, J. Li, X. Qu, "Absolute distance measurement with correction of air refractive index by using two-color dispersive interferometry," *Opt. Express*, vol. 24, no. 21, p. 24361, 2016, doi: [10.1364/OE.24.024361](https://doi.org/10.1364/OE.24.024361).
15. R. Vildanov, G. Eshonqulov, "Application of a heterodyne laser system to determine parameters of turbulent atmosphere," *Ukr. J. Phys.*, vol. 56, no. 1, pp. 18–20, 2011.

Поступила в редакцию 17.03.2019

После доработки 16.02.2020

Принята к публикации 12.11.2020