

УДК 681.787.7  
PACS number(s): 42.62.Be

## ЛАЗЕРНА ГЕТЕРОДИННА ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ У ДОСЛІДЖЕННІ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ СИСТЕМИ

О. Серьожкіна, Г. Тимчик

Національний технічний університет України “КПІ”  
просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна  
e-mail: [lena\\_serezhkina@ukr.net](mailto:lena_serezhkina@ukr.net)  
e-mail: [deanpb@users.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:deanpb@users.ntu-kpi.kiev.ua)

У статті запропоновано вимірювання коливань поверхні шкіри над периферичними кровоносними судинами верхніх кінцівок – променевою артерією (a. radialis) та медіальною підшкірною веною (v. basilica). Для проведення досліджень ми використовували гетеродинний приймач розсіяного лазерного випромінювання із такими параметрами: довжина хвилі випромінювання – 0,63 мкм; потужність зондуючого випромінювання – 1 мВт; чутливість –  $3 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц. У ході проведених експериментів були одержані спектри сигналів від поверхні шкіри над судинами верхньої кінцівки людини.

*Ключові слова:* лазерна гетеродинна інтерферометрія, вимірювання коливань, кровоносні судини.

Багато процесів у природі, в тому числі у біологічних системах, мають коливальний характер. Тому не дивно, що в медико-біологічних дослідженнях широкого розповсюдження набули методи, які полягають у визначенні параметрів коливальних процесів та їх аналізі. Серед них можна виділити лазерну гетеродинну інтерферометрію, як один із найбільш інформативних методів безпосереднього визначення динамічних характеристик біологічних об'єктів *in vivo*. Лазерні віброметри, побудовані за гетеродинним принципом, широко застосовуються у сфері медико-біологічних досліджень. Серед основних наукових напрямів застосування цього методу зазначимо:

- оптична віброкардіографія [6, 7];
- дослідження штучних клапанів серця;
- вивчення механічних властивостей зв'язок;
- дослідження стану барабанної перетинки, середнього та внутрішнього вуха [2, 3, 4, 5];
- дослідження комунікаційних процесів між комахами, а також механізмів слуху комах [1] та земноводних тощо.

Сучасні інтерферометричні методи дають змогу детектувати нанометрові коливання поверхні нерву під час потенціалу дії [8], а також досліджувати мікроорганізми *in vivo* [9, 10].

Неконтактний та неруйнівний характер, а також велика чутливість лазерної гетеродинної інтерферометрії відкриває широкі можливості для використання цього

методу в медико-біологічних дослідженнях, у тому числі в дослідженні серцево-судинної системи.

Метою статті є розробка методики вимірювання коливань поверхні шкіри людини над периферичними кровоносними судинами для оцінювання стану серцево-судинної системи.

В основу гетеродинного детектування покладено явище інтерференції двох хвиль на чутливому майданчику фотодетектора. При цьому складова фотоструму, що зумовлена інтерференцією сигнального та опорного полів, є сигнал проміжної частоти  $|\omega_1 - \omega_2|$ , що дорівнює різниці частот сигнального та опорного полів.

Аналіз чутливості проведено на основі роботи [13]. У ній автори не враховували вплив спеклової структури розсіяного випромінювання, розузгодження хвилевих фронтів випромінювання оптичного гетеродина і розсіяного випромінювання, шуми гетеродина і підсилювального тракту.

Відношення сигнал/шум гетеродинного приймача розсіяного випромінювання збільшується у разі збільшення потужності гетеродина і перевищення деякого рівня потужності гетеродина відношення сигнал/шум починає визначатися шумом дробу фотоприймача і не залежить від потужності гетеродина. В цьому випадку відношення сигнал/шум визначається таким виразом [11]:

$$\frac{S}{N} \gg \frac{\eta P_s}{h\nu\Delta F} \quad (1)$$

де  $P_s$  – потужність сигналу, що приймається,  $h$  – стала Планка,  $\nu$  – частота випромінювання,  $\eta$  – квантова ефективність приймача,  $\Delta F$  – смуга пропускання приймального тракту.

Вираз для мінімальної порогової потужності сигналу (відношення сигнал/шум дорівнює 1), що приймається, матиме вигляд:

$$P_{s,\min} \approx \frac{h\nu}{\eta} \Delta F, \quad (2)$$

де  $P_{s,\min}$  – мінімальна порогова потужність сигналу, що приймається.

У разі використання лазерного випромінювання з довжиною хвилі 0,6328 мкм, фотоприймача з квантовою ефективністю 0,5 і приймального тракту із смугою пропускання 10 кГц отримаємо:

$$P_{s,\min} \gg 3 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}.$$

З урахуванням втрат в оптичній системі (до 40%) можна сказати, що мінімальна порогова потужність сигналу, що приймається, сформує значення:

$$P_{s,\min} \gg 5 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}.$$

У випадку, коли вхідна апертура визначається поперечним перетином пучка гетеродина ( $\sim 1 \text{ см}^2$ ), за потужності зонduючого випромінювання 1 мВт і відстані до розсіювальної поверхні 50 см, на вхід приймача потраплятиме приблизно  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}$  (у припущенні ізотропно розсіювальної поверхні з альбедо 0,2).

Оцінимо відношення сигнал/шум за умови реєстрації коливань поверхні за допомогою лазерного гетеродинного прийому розсіяного випромінювання. Змінна складова струму фотоприймача при оптичному гетеродинуванні випромінювання, розсіяного рухомою поверхнею, визначається виразом [12]:

$$i_s = 2S_a \sqrt{P_h P_s} \cos \frac{2\pi}{\lambda} \omega_i t + \frac{4\pi}{\lambda} a \sin \Omega t \quad (3)$$

де  $S_a$  – струмова чутливість фотоприймача (А/Вт),  $P_h, P_s$  – потужність випромінювання гетеродина і сигналу, що приймається,  $\omega_i$  – різниця частот гетеродина і зондуємого випромінювання,  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання лазера,  $a$  – амплітуда коливань розсіювальної поверхні,  $\Omega$  – кругова частота коливань поверхні.

Для малих амплітуд коливань поверхні, що задовольняють умову  $\frac{4\pi a}{\lambda} \ll 1$  вираз

(3) можна записати у вигляді:

$$i_s = 2S_a \sqrt{P_h P_s} \cos \omega_i t + \frac{2\pi}{\lambda} a \cos(\omega_i + \Omega)t - \frac{2\pi}{\lambda} a \cos(\omega_i - \Omega)t \quad (4)$$

Амплітуда складових фотоструму, що містять частоту модуляції, пропорційна до  $\frac{2\pi}{\lambda} a$ . Можна показати, що відношення сигнал/шум на частотах  $\omega_i \pm \Omega$  для випадку, коли рівень шумів визначається дробовим шумом фотоприймача, матиме такий вигляд

$$\frac{S}{N} \gg \frac{2\pi}{\lambda} a^2 \frac{\eta P_s}{h\nu \Delta F} \quad (5)$$

Підставивши в цей вираз значення  $P_{s,\min}$ , визначене формулою (2), отримаємо:

$$\frac{S}{N} \gg \frac{2\pi}{\lambda} a^2 \frac{P_s}{P_{s,\min}} \quad (6)$$

З цього виразу бачимо, що відношення сигнал/шум дорівнює 1 при  $P_s \approx P_{s,\min}$  і амплітуді коливань  $a \approx \lambda/2\pi$ . У разі довжини хвилі 0,63 мкм  $a \approx 100$  нм.

Для описаного вище випадку (розсіяння від поверхні з альбедо 0,2 на відстані 0,5 м, смуга приймання 10 кГц,  $P_s \approx 1,5 \cdot 10^{-8}$  Вт,  $P_{s,\min} \approx 5 \cdot 10^{-14}$  Вт) відношення сигнал/шум буде дорівнюватиме 1 при амплітуді коливань  $a \approx 0,2$  нм.

Для проведення досліджень ми використовували гетеродинний приймач розсіяного лазерного випромінювання із такими параметрами [13]:

- довжина хвилі випромінювання – 0,63 мкм;
- потужність зондуємого випромінювання – 1 мВт;
- чутливість –  $3 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц.

Схему експериментальної установки наведено на рис. 1.

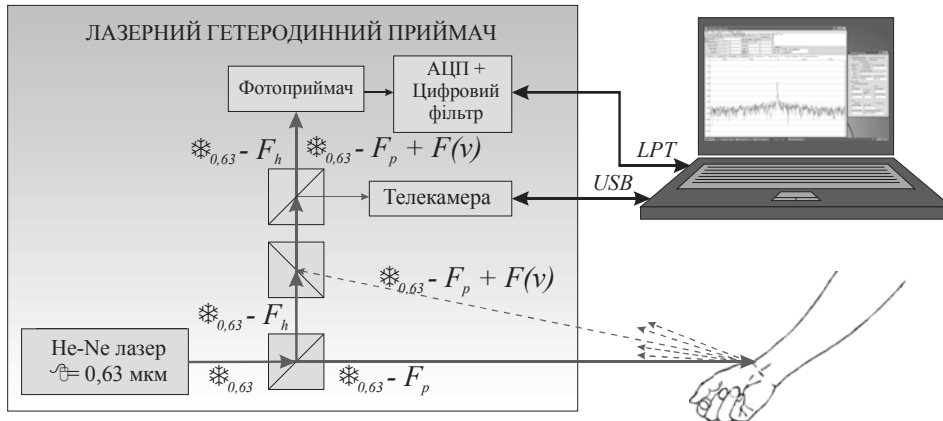


Рис. 1. Схема експериментальної установки

He-Ne лазер генерує випромінювання з довжиною хвилі 0,63 мкм, яке падає на світлоподільний кубик. З випромінювання, що пройшло крізь кубик, формується зондуєчий промінь, а з відбитого випромінювання – промінь гетеродина. Проходячи через акустооптичні модулятори, зондуєче випромінювання і випромінювання гетеродина зрушуються за частотою на 80 і 70 МГц, відповідно.

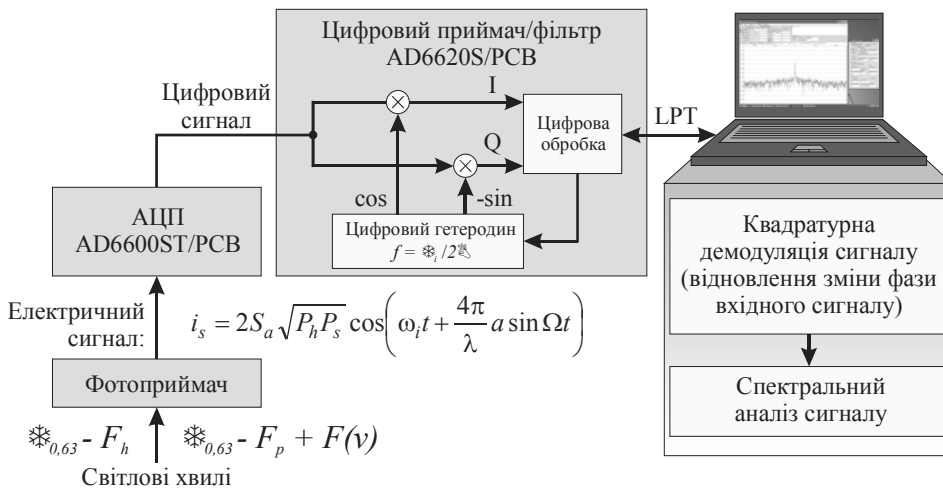


Рис. 2. Схема цифрової обробки сигналів

Випромінювання гетеродина і розсіяне випромінювання перетинаються на світлоподільному кубуку. Відбите кубуком розсіяне випромінювання і випромінювання гетеродина, що пройшло крізь кубуку, надходять на об'єктив, у фокальній площині якого є фотоприймач. Вибір точки спостереження на поверхні об'єкта здійснюється за допомогою телекамери Logitech QuickCam for Notebooks Pro, що входить до складу віброметра. Сигнал з виходу фотоприймача посилюється і надходить на вхід АЦП AD6600, що входить до складу плати AD6600PSB. Інформаційним сигналом є змінна

складова струму фотоприймача, що утворюється при інтерференції випромінювання лазерного гетеродина і розсіяного випромінювання. Цей сигнал є фазомодульованим сигналом. Модуляція фази залежить від параметрів руху поверхні. Результати вимірювання рухів поверхні представляються у вигляді спектрограми сигнала проміжної частоти, отриманого за допомогою програми “AD6620 Monitor”.

Отримані спектри сигналів показані на рис. 3.

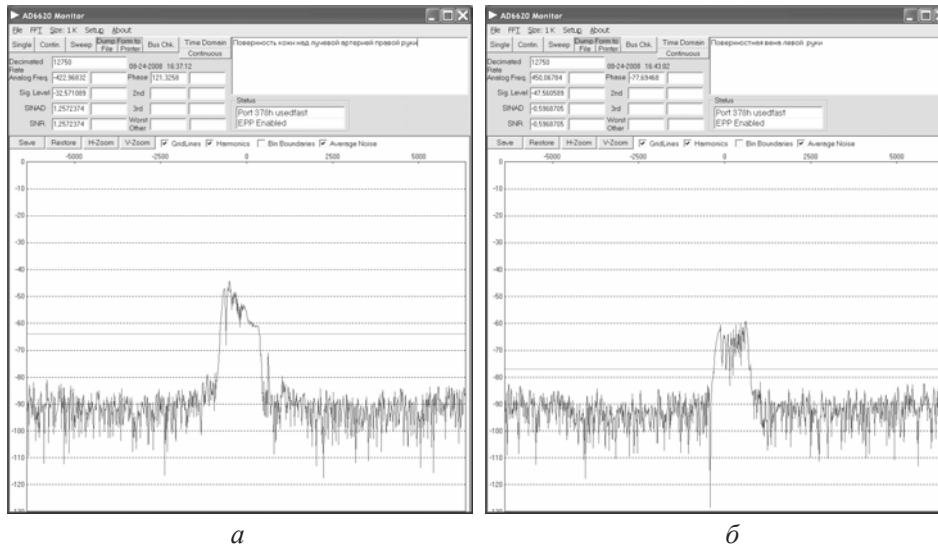


Рис. 3. Спектрограми сигнала проміжної частоти (тестова програма “AD6620 Monitor”): *а* – від поверхні шкіри над *a. radialis*, *б* – від поверхні шкіри над *v. basilica*

Унаслідок проведених експериментів були отримані та проаналізовані спектри сигналів від поверхні шкіри над судинами верхньої кінцівки людини. Отримані сигнали є досить складними, оскільки містять у собі багато складових різного походження. Серед них можна відокремити коливання, спричинені серцевою, респіраторною, міогенною, нейрогенною, ендотеліальною активністю тощо [14]. Для отримання із зареєстрованих сигналів діагностично корисної інформації доцільно провести складний та різноплановий аналіз усіх параметрів сигналу.

Отримані результати свідчать про перспективність використання лазерної гетеродинної інтерферометрії у дослідженні стану серцево-судинної системи. На цьому етапі роботи перед нами стоїть завдання щодо створення програмного забезпечення для вимірювання амплітуди коливань на окремих частотах в режимі реального часу при широкому спектрі коливань з низькими частотами і великою амплітудою, адже саме такі коливання мають місце у дослідженні біологічних об’єктів, в тому числі кровоносних судин. Окрім цього, необхідна розробка ефективних методів обробки та аналізу сигналів від біологічних об’єктів, а також вдосконалення контролю положення зондуючого променя та вибору досліджуваної ділянки.

1. *Sueur J., Windmill J.F.C., Robert D.* Tuning the drum: the mechanical basis for frequency discrimination in a Mediterranean cicada // *J. Exper. Biol.* 2006. Vol. 209. P. 4115–4128.
2. *Ulfendahl M., Khanna S.M., Flock A.* The vibration pattern of the hearing organ in the waltzing guinea-pig measured using laser heterodyne interferometry // *Neuroscience.* 1996. Vol. 72. N 1. P. 199–212.
3. *Cooper N.P.* An improved heterodyne laser interferometer for use in studies of cochlear mechanics // *J. Neurosc. Meth.* 1999. Vol. 88. P. 93–102.
4. *Rosowski J.J., Mehta R.P., Merchant S.N.* Diagnostic utility of laser-doppler vibrometry in conductive hearing loss with normal tympanic membrane // *Otol. & Neurotol.* 2004. Vol. 25. N 3. P. 323–332.
5. *Dirckx J.J.J., Buytaert J.A.N., Decraemer W.F.* Quasi-static transfer function of the rabbit middle ear, measured with a heterodyne interferometer with high-resolution position decoder // *J. Associat. Res. Otolaryng.* 2006. Vol. 7. N 4. P. 339–351.
6. *Morbiducci U., Scalise L., De Melis M., Grigioni M.* Optical Vibrocardiography: A Novel Tool for the Optical Monitoring of Cardiac Activity // *Ann. Biomed. Engin.* 2007. Vol. 35. N 1. P. 45–58.
7. *Scalise L., Morbiducci U.* Non-contact cardiac monitoring from carotid artery using optical vibrocardiography // *Med. Engin. & Phys.* 2007. Vol. 30. N 4. P. 490–497.
8. *Fang-Yen C., Chu M.C., Seung S., Dasari R.R., Feld M.S.* Noncontact measurement of nerve displacement during action potential with a dual-beam low-coherence interferometer // *Opt. Lett.* 2004. Vol. 29. N 17. P. 2028–2030.
9. *Sudo S., Miyasaka Y., Otsuka K., Takahashi Y., Ko J.-Y.* Quick and Easy Measurement of Particle Size of Brownian Particles and Plankton in Water Using a Self-Mixing Laser // *Opt. Expr.* 2006. Vol. 14. N 3. P. 1044–1054.
10. *Davila A.P., Jang J., Gupta A.K., Walter T., Aronson A., Bashir R.* Microresonator mass sensors for detection of *Bacillus anthracis* Sterne spores in air and water // *Biosens. and Bioelectr.* 2007. Vol. 22. P. 3028–3035.
11. *Oliver B.M.* Signal-to-noise ratio in photoelectric mixing // *Proc. IEEE.* 1961. Vol. 49. N 12. P. 1960–1961.
12. *Протопопов В.В., Устинов Н.Д.* Лазерное гетеродинирование. М: Наука, 1985. 288 с.
13. *Serozhkin Yu., Kollyukh O., Venger Ye.* Detection of dust grains vibrations with a laser heterodyne receiver of scattered light // *J. Quantit. Spectr. and Radiat. Transf.* 2008. Vol. 109. N 8. P. 1517–1526.
14. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови / Под ред. А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова: Руководство для врачей. М.: Медицина, 2005. 256 с.

**LASER HETERODYNE INTERFEROMETRY IN THE INVESTIGATION OF THE  
CARDIOVASCULAR SYSTEM****E. Seryozhkina, G. Tymchyk***National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"**Prospect Peremohy, 37, 03056 Kyiv, Ukraine**e-mail: [lena\\_serezhkina@ukr.net](mailto:lena_serezhkina@ukr.net)**e-mail: [deanpb@users.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:deanpb@users.ntu-kpi.kiev.ua)*

This paper presents the measurements of the vibrations of the skin surface over blood vessels of upper extremities (a. radialis, v. basilica). We used the laser heterodyne receiver of scattered radiation with laser radiation wavelength – 0,63  $\mu\text{m}$ ; probing radiation power – 1mW; energy sensitivity –  $3 \cdot 10^{-17}$  W/Hz. The spectrums of the signals from the skin surface over blood vessels was obtained.

*Key words:* laser heterodyne interferometry, vibration measurements, blood vessels.

**ЛАЗЕРНАЯ ГЕТЕРОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ  
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ****О. Серьожкина, Г. Тымчик***Национальный технический университет Украины "КПИ"**просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина**e-mail: [lena\\_serezhkina@ukr.net](mailto:lena_serezhkina@ukr.net)**e-mail: [deanpb@users.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:deanpb@users.ntu-kpi.kiev.ua)*

В статье представлены измерения колебаний поверхности кожи над периферическими кровеносными сосудами верхних конечностей – лучевой артерией (a. radialis) и медиальной подкожной веной (v. basilica). Для проведения исследований использовался гетеродинный приемник рассеянного лазерного излучения с такими параметрами: длина волны излучения – 0,63 мкм; мощность зондирующего излучения – 1 мВт; чувствительность –  $3 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц. В результате проведенных экспериментов были получены спектры сигналов от поверхности кожи над сосудами верхней конечности человека.

*Ключевые слова:* лазерная гетеродинная интерферометрия, измерение колебаний, кровеносные сосуды.

Стаття надійшла до редколегії 09.10.2008

Прийнята до друку 20.07.2009