

ДІАГНОСТИКА НАНОАМПЛІТУДНИХ ВІБРАЦІЙ НА ЗНАЧНИХ ВІДСТАНЯХ ЛАЗЕРНИМ ВІБРОМЕТРОМ З ЕФЕКТОМ АВТОФОТОЗМІШУВАННЯ

В. В. ЄМЕЛЬЯНОВ¹, К. В. ОТТО¹, Л. К. ЯРОВОЙ²

¹ЗАО «АЛЬТРОН», Харків,

kv_otto@mail.ru

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, механіко-математичний факультет 044-259-0542, 066-228-2414, yarovoi@univ.kiev.ua

Розглядається фізичні принципи, конструкція та характеристики лазерного доплерівського віброметра, який використовує метод гетеродинного прийому, що ґрунтується на автофотозмішуванні відбитого об'єктом випромінювання в напівпровідниковому лазері. Частотний діапазон віброметра складає від 300 Гц до 3 кГц, прилад дозволяє вимірювати механічні коливання та акустичні вібрації амплітудою від 1 нм на відстані до 100 метрів

Методи лазерної доплерівської віброметрії ефективно використовуються для діагностики акустичних хвиль в промисловості, медицині, наукових дослідженнях [1, 2]. Проблеми виникають при вимірюваннях на відстанях декількох десятків метрів та більше. Перша проблема – це потужність оптичного зондувального випромінювання, що має зростати з збільшенням відстані [3]. Щоб запобігти значному збільшенню потужності зондувального променя використовують спеціальну відбиваючу фольгу, що клеїться на об'єкт [4]. Це не завжди можливо, тому доречно запропонувати таку схему вимірювання, щоб не передбачує якісь попередні маніпуляції з об'єктом дослідження.

Інша проблема, що також пов'язана з властивостями лазерного джерела, – це довжина когерентності, яка має як мінімум вдвічі перевищувати відстань до об'єкта. На якість отриманого сигналу також впливають такі фактори, як турбулентність, температурний градієнт, оптичні перешкоди (пил, крап вологи, скло, т. і.) вздовж напрямку розповсюдження лазерного променя. Подолання цих впливів часткова можливо застосуванням засобів адаптивної оптики, або спеціальних методів обробки сигналів.

Перспективною альтернативою класичним лазерним доплерівським віброметрам (ЛДВ) можуть стати лазерні пристрої, які працюють за принципом автофотозмішування відбитого об'єктом випромінювання [5, 6]. В англійській літературі цей підхід має назву *self-mixing effect* [6]. Він є, по суті, вимірюванням частоти модуляції оптичної енергії лазера при зміні довжини зовнішнього резонатора. Термін “зовнішній резонатор” в даному випадку не слід розуміти, як віддалене додаткове дзеркало – його роль може використовувати будь-яка поверхня, що розсіює випромінювання. В віброметрах з автофотозмішуванням відбите об'єктом випромінювання потрапляє в лазер, де автоматично підсилюється лазерним середовищем та фазується з випромінюванням, що циркулює всередині лазерного джерела. Таким чином відтворюється гетеродинний прийом надслабких оптичних сигналів. Такі прилади в порівнянні зі звичайними ЛДВ дозволяють отримати надзвичайну чутливість [7].

На малюнках рис. 1, 2 представлені спрощені оптичні схеми класичного ЛДВ та ЛДВ з автофотозмішуванням. Схема класичного ЛДВ – це двохплечовий інтерферометр, який складається з двох оптичних відгалужувачів (2), та дзеркал (3). Як правило, в ЛДВ використовується випромінювання червоного лазера (1). Один канал інтерферометра є

опорним, інший – зондувальним. Саме в цьому каналі частота випромінювання отримує доплерівський зсув Δf_D , пропорційний миттєвій швидкості об'єкта $\Delta f(t) = 2kv(t)$, де k – хвиловий вектор випромінювання лазера. Важливим елементом конструкції ЛДВ є Бреггівська комірка (4) – елемент, що додає до оптичної частоти опорного (або зондувального) променя частоту гетеродина f_G .

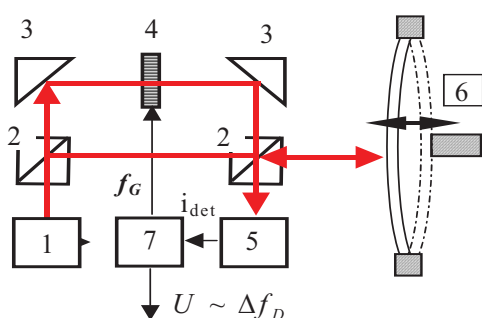


Рис.1

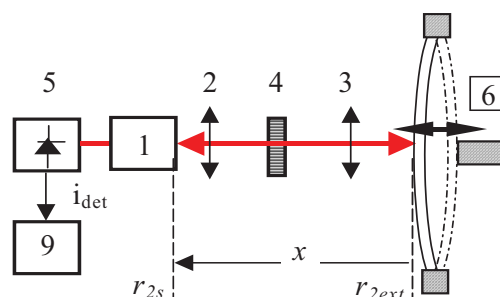


Рис.2

Струм фотодетектора (5) ЛДВ має складову i_G на частоті гетеродина, яка опрацьовується в процесорному блоці (7) для отримання миттєвого значення частоти Δf_D , що є пропорційним миттєвій швидкості:

$$i_{\text{det}G} \propto 2E_0E_1 \cos(\Phi(t) + 2\pi f_G \cdot t), \quad (1)$$

де $\Phi(t) = \int 2\pi \Delta f_D \cdot dt$ - фаза зондувального променя, що повертається в вібротметр після відбиття від об'єкта (6). Відмітимо, що саме наявність частоти гетеродина f_G в сигналі фотодетектора дозволяє визначити знак доплерівського зсуву Δf_D .

Оптична схема лазерних вібротметрів, що працюють на ефекті автофотозмішування (рис.2) складається фактично тільки з одного елемента - лазерного діода (1). Колімаційний об'єктив (2) та фотоприймач (5), як правило, конструктивно поєднані в єдиному блоці з лазерним напівпровідниковим діодом (1). Фокуруючий об'єктив (3) не є обов'язковим елементом вібротметра, а Бреггівська комірка (4) взагалі використовується вкрай рідко.

Розрахунок сигналу лазерних вимірювачів, що працюють на ефекті автофотозмішування, побудований на теорії лазерних джерел з зворотнім зв'язком через зовнішній резонатор [7] показують, що фазовій (частотній) складовій притаманна нелінійність, яка залежить від рівня зворотного зв'язку в зовнішньому резонаторі:

$$P = P_0 [1 + m \cdot \text{Cos}[\Phi(t) - C \cdot \text{Sin}(2k_F(x) \cdot x + \text{atg}(\alpha))]] \quad (2)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку C в свою чергу пов'язаний з коефіцієнтом відбиття вихідного дзеркала r_{2s} лазера, і коефіцієнтом відбиття зовнішнього дзеркала (об'єкту) r_{2ext} та параметрами лазера [2]:

$$C = \frac{\tau_{ext}}{\tau_L} r_{2ext} \frac{1 - |r_{2s}|^2}{r_{2s}} \varepsilon \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (3)$$

У формулі позначені τ_{ext} - час руху зондувальної хвилі до об'єкту та в зворотному напрямку, τ_L - час обертання хвилі в лазері, ε та α - параметри лазерного діода (зазвичай $\varepsilon \approx 0,5$ та $\alpha \approx 3$). При умові сильного або помірного зворотного зв'язку, тобто $C \leq 1$, спостерігається спотворення сигналу, пов'язане з впливом випромінювання, що

повертається з зовнішнього резонатора в лазер на частоту генерації. А при умові слабого зворотного зв'язку $C \ll 1$ цим впливом можна знехтувати:

$$P = P_0 [1 + m \cdot \text{Cos}(\Phi(t))] \quad (4)$$

Таким чином, при $C \ll 1$ роботу віброметра з автофотозмішуванням можна розглядати як процес, при якому випромінювання $e_1(t) = E_1 \exp(-i \cdot (\omega_{opt} t + \Phi(t)))$, що повертається в резонатор, підсилюється та разом з частиною сигналу первинного лазерного випромінювання $e_0(t) = E_0 \exp(-i \cdot (\omega_{opt} t))$, яке циркулює всередині лазера, потрапляє на фотодетектор, де відбувається їх фотозмішування (ω_{opt} - кругова оптична частота). Цей спрощений підхід дозволяє по аналогії з класичним ЛДВ розрахувати сигнал лазерного віброметра з автофотозмішуванням та коміркою Бреґґа на виході (рис.2).

Нехай об'єкт коливається за гармонічним законом, $x(t) = x_0 \cos(\Omega t)$. Тоді миттєва частота $\omega(t)$, як похідна від фази $\Phi(t)$ сигналу $e_1(t)$, дорівнює.

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \Phi(t) = 4\pi f_G - 2k\Omega x_0 \sin(\Omega t) \quad (5)$$

Член $v(t) = 2kv_0 \sin(\Omega t)$ (де $v_0 = \Omega x_0$ - амплітуда миттєвої швидкості) відповідає миттєвій швидкості об'єкта. Таким чином вимірюючи відхилення миттєвої частоти $\omega(t)$ від подвійної частоти гетеродина отримуємо інформацію про швидкість об'єкту.

КОНСТРУКЦІЯ ВІБРОМЕТРА

Оптична схема ЛДВ з автофотозмішуванням розроблена з урахуванням особливостей роботи на значних відстанях.

По перше, це надзвичайно слабкий. Послаблення сигналу, на яке розрахований прилад, може складати до 90 дБ відносно рівня зондувального променя.

Інший чинник – це можлива нелінійність характеристики віброметра, пов'язана з впливом відбитого об'єктом випромінювання на частоту лазера (див. формулу (2)).

Ще одна проблема - це завади, які можуть з'являтися при відбитті зондувального променя від елементів конструкції віброметра, або від перешкод (пил, краплі роси, "вікна", т.і.) вздовж траси зондувального променя.

Значна довжина зондувального променя, а особливо, ймовірні температурні градієнти вздовж траси його розповсюдження, передбачають значний вплив турбулентності повітря, яка найбільш сильно вражає широкі лазерні пучки. Особливо вразлива зона поблизу віброметра, там де розмір зондувального пучка має найширший переріз. З іншого боку, зменшення зондувального пучка веде до зменшення світлосили телескопічної системи і зменшенні щільності оптичної енергії на поверхні досліджуваного об'єкту.

Оптична система віброметра включає три основні блоки: блок лазерного випромінювача, оптичний гетеродина, телескопічний об'єктив. Конструктивною основою віброметра (дивись фото на рис.3) є металева пластина (1). В її нижній частині розташовані основні оптичні елементи, а зверху поворотне (7) та рухоме вихідне дзеркало (8) телескопу. Основний елемент віброметра – лазерний діод (2) з вмонтованим фотодетектором. До лазерного джерела пред'являється вимога генерації одночастотного випромінювання з значною довжиною когерентності. Для звуження лінії генерації використовується лазерний діод з зовнішнім резонатором, який утворений дифракційною

ґраткою, що працює в режимі Літтрова. Наявність ґратки Літтрова дозволяє також переналаштовувати частоту генерації в межах до 5%. Вихідна оптична потужність лазерного діода в одномодовому режимі складає до 30 мВт.

Лазерне джерело випромінює колімований пучок, що має в перерізі еліптичну форму з відношенням короткої та довгої вісі приблизно 1/6. Для надання форми перерізу близької до кола використовується анаморфний розширювач (3) з можливістю регулювання.

Для усунення розсіяного випромінювання від проміжних оптичних елементів, насамперед тих, що знаходяться після оптичного гетеродина, окуляр оптичної системи телескопу, виконаний у вигляді лінзи (4) розташовується перед коміркою Брегга (5). Крім цього плоскі поворотні дзеркала (6) та (7) розташовані під кутом близько 45° , що критично зменшує, розсіяне назад випромінювання, а вихідне дзеркало (8) також нахилене до оптичної вісі.

Щоб забезпечити роботу комірки Брегга в променях, що сходяться під кутами до 12° в вертикальній площині її конструкція була спеціально розрахована та створена для цієї моделі віброметра.

Дзеркало (8) розташоване на рухомій платформі, яка переміщується прецизійним двигуном. Загалом переміщення вихідного дзеркала дозволяє фокусувати пляму лазера на відстані від 10 м до нескінченності.

Розмір лазерної плями на вихідному дзеркалі був оптимізований з точки зору зменшення впливу турбулентності і складає приблизно 4 мм на відстані 50 м.

Електронна схема складається з резонансного підсилювача, змішувача ПЧ, проміжного підсилювача, гетеродина, фільтрів, вихідного НЧ підсилювача. Смуга частотного дискримінатора дорівнює 5 кГц. Демодульований сигнал з виходу частотного дискримінатора, фільтрується, підсилюється та досліджується як сигнал миттєвої швидкості. Діапазон вихідної напруги: ± 2 в. Такий діапазон відповідає максимальній амплітуді швидкості ± 2 мм/с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІБРОМЕТРА

Експериментальні дослідження макету віброметра виконувались як з телескопічною системою так і без неї. Деякі результати наведені на малюнках рис.4-6.

Для визначення діапазону вимірюваних амплітуд та лінійності відгуку віброметра від амплітуди вібрації вібратор (гучномовець) розташовувався на відстані 40 см, а

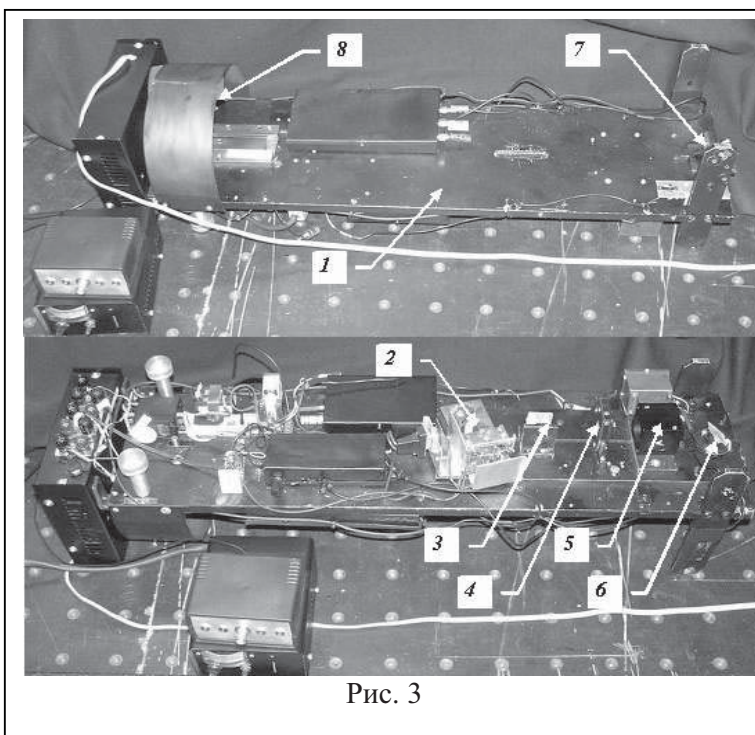


Рис. 3

телескопічна система прибиралась. На дифузорі гучномовця закріплювалась спеціальна фольга, що відбиває в зворотному напрямку 4% випромінювання.

Вимірювання, що виконувалися на частотах 300 Гц та 1,5 кГц, представлені на малюнку Рис. 2. Нижня межа діапазону знаходиться на рівні 1 нм для 1,5 кГц та 5 нм відповідно для 300 Гц і реально обмежується можливостями наявної реєстраційної апаратури.

Верхня межа також різна для частот 300 Гц та 1,5 кГц та складає відповідно 1,22 мкм та 0,21 мкм, ці значення відповідають амплітуді вихідного сигналу віброметра 2 в. Як вказувалось вище, це обмеження задається електронним процесором та може бути контрольовано змінено.

Нелінійність знаходиться в межах $\pm 5\%$ (за виключенням точки 0.2 мкм, 1,5 кГц).

На Рис. 5, 6 представлені спектри сигналів віброметра, які отримані на відстані 46 м від поверхні вкритого білим папером дифузора, що коливався на частоті 1.2 кГц з амплітудами відповідно 10 нм та 1 нм.

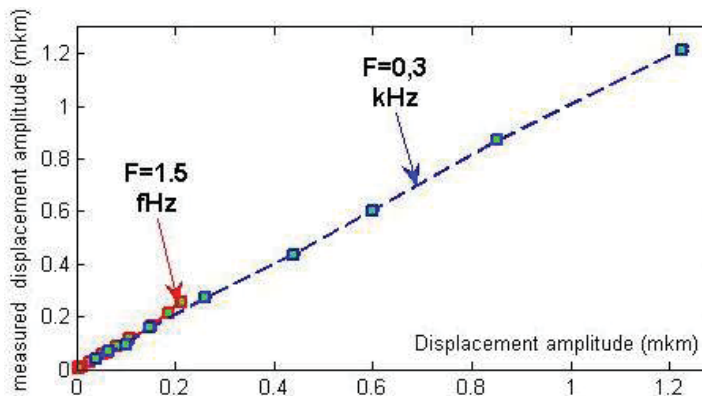


Рис 4

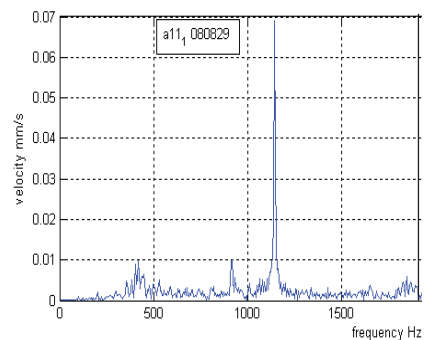


Рис. 5

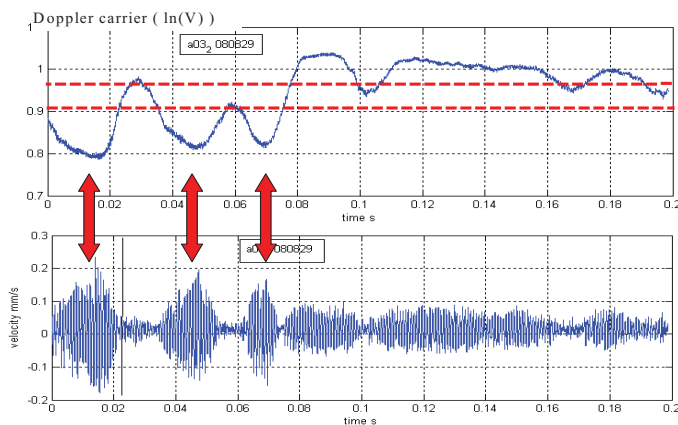


Рис 7

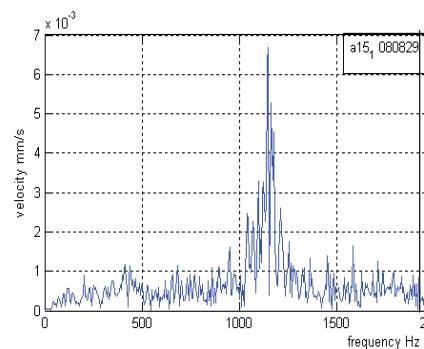


Рис. 6

Зі збільшенням відстані до об'єкту збільшується рівень завад та підвищується нестабільність демодульованого сигналу. При значних відстанях та/або малих рівнях відбиття спостерігається ефект аномального підсилення демодульованого сигналу (Рис.7 нижній графік) при зменшенні амплітуди високочастотної складової струму

фотодетектора (Рис.7 верхній графік). На наш погляд, це може бути пояснено складною взаємодією окремих складових зондувального променя, що повертаються в резонатор в протифазі. Це явище є аналогічним ефекту трьохвильового фотозмішування [8], що спостерігається в класичних ЛДВ при малих амплітудах коливань та наявності додаткової лазерної хвилі [9]. Непрямим підтвердженням цієї гіпотези є те, що аномальне підсилення часто спостерігалось при високій турбулентності, коли час від часу можна спостерігати роз'єднання зондувального променя на поверхні об'єкта спостереження на окремі плями.

Звичайно, наявність відмічених ефектів погіршують характеристики віброметра при граничних параметрах. Максимальна відстань, на якій був зареєстрований сигнал, видимий на рівні завод, склала 96 м.

ВИСНОВКИ

Створений лазерний доплерівський віброметр, який дозволяє вимірювати механічні коливання та акустичні вібрації на відстані до 100 метрів. Прилад використовує метод гетеродинного прийому, що ґрунтується на автофотозмішуванні відбитого об'єктом випромінювання в напівпровідниковому лазері. Частотний діапазон приладу від 300 Гц до 3 кГц. Нелінійність вимірювання миттєвої швидкості в цьому діапазоні в межах 5%. При відносно низькому рівні енергії зондувального випромінювання (30 мВт неперервного випромінювання) на відстані до 50 м впевнено діагностується сигнал миттєвої швидкості об'єкту з природною поверхнею, що коливається з амплітудою 1,0 нм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Drain L. E. The Laser Doppler Technique. - New York, 1980. – 452 p.
2. Koelink M. H., Slot M., de Mul F. F. M., etc. Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory. // *Appl. Optics.* – 1992. –**31**. - No. 18, – P. 3401-3408.
3. Bougard A. J., Ellis B. R. Laser measurement of Building vibration and displacement // *Proc. SPIE* – 1998.
4. Streaun R. F., Mitchell L. D.m Barker, A. J. Global noise characteristics of a laser Doppler vibrometer. Part II: Experiments using beam dynamics // *Proceedings of SPIE, ISSN 0277-786X.* -1997. - **3089 (2)**, - P. 1237-1243.
5. Guido Giuliani, Simone Bozzi-Pietra and Silvano Donati. Self-mixing laser diode vibrometer // *Meas. Sci. Technol.*, - 2003. - **14**, -N 1, - P. 24-32.
6. Guido Giuliani, Michel Nordia, Silvano Donati and Thierry Bosch. Laser diode self-mixing technique for sensinh application // *J. Opt. A.: Pure Appl Opt.* - 2002 . – **4**, - P.283-294.
7. Ryoji Kawai, Yusuke Asakawa, and Kenju Otsuka. Ultrahigh-Sensitivity Self-Mixing Laser Doppler Velocimetry with Laser-Diode-Pumped Microchip LiNdP O Lasers.// *IEEE Photonics Technology Letters.* - 1999. - **11**, - No. 6. – P. 706-708.
8. Yarovoi L., Siegmund G. The effect of three-wave interference in laser Doppler vibrometry // *Meas. Sci. Technol.* – 2004. –**15**, - P. 2150–2156.
9. Яровой Л. К. Застосування трьохвильового фотозмішення для підвищення чутливості лазерного доплерівського віброметра в субнанометровому діапазоні // Акустичний симпозиум “КОНСОНАНС-2009”, Київ, 29 вересня – 1 жовтня 2009 року. – Київ, - 2009.