

УДК 621.375

А.В. Кочин

Метрологічний центр військових еталонів Збройних Сил України, Харків

ПРО РОЗМІР КУТОВИХ КОЛИВАНЬ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІДБИТОГО ВІД СВІТЛОПОВЕРТАЮЧОГО ПОКРИТТЯ

Стаття присвячена обґрунтуванню зв'язку куткових коливань, розсіяного лазерного випромінювання, з відповідними нахилами поверхні, що обладнане світлоповертаючим покриттям. Знайдено закономірність відбиття світла від віброуючої поверхні зі світлоповертаючим покриттям, які еквівалентні відбиттю світла від ешелону Майкельсона. Для розділення вібрації у взаємно ортогональних областях при аналізі розсіяного випромінювання запропоноване використання телевізійного приймача. Отримані результати можуть стати основою для розробки й створення різного виду лазерних вібродатчиків.

Ключові слова: вібродіагностика, дистанційний контроль, світлоповертаючі покриття, кутові коливання.

Вступ

Постановка завдання, аналіз літератури. Вібродіагностика як один з напрямків технічної діагностики широко використовується для визначення технічного стану найрізноманітнішого електромеханічного обладнання, а також і військового призначення. Вона використовується в авіації, у системах контролю турбоагрегатів і парових турбін на електростанціях, у виробництві й експлуатації різного обладнання з високими вимогами до якості виготовлення. Економічна ефективність застосування вібродіагностики обумовлюється можливістю виявлення дефектів на ранніх етапах їхнього розвитку з визначенням локалізації конкретних дефектних вузлів і деталей.

Лазерні прилади вібраційного контролю мають ряд переваг у порівнянні із традиційними контактними вібровимірюваннями [1]. Насамперед, це можливість дистанційного контролю вібрацій, локальність виміру, обумовлена можливістю фокусування лазерного променя, оперативність виміру, обмежений лише часом зміни напрямку випромінювання й т.д. Однак метод прямого фотодетектування, використовуваний для виміру куткових коливань об'єктів із шорсткватою поверхнею [2], має обмеження у дальності дії із зв'язком малої потужності прийнятого сигналу. Домогтися істотного підвищення відносин сигнал/шум можна за рахунок використання світлоповертаючих покриттів (СПП) на поверхні віброуючих об'єктів. Експериментальні макети, засновані на цьому принципі, описані в [3, 4]. Однак у сучасній літературі відсутнє теоретичне обґрунтування зв'язку куткових коливань розсіяного лазерного випромінювання з відповідними локальними нахилами поверхні. Розв'язування цього питання й присвячена дана стаття.

Основний матеріал

Як відомо, у цей час існує покриття засноване на використанні або мікросклокульок, або мікропризм [5]. Мікросклокульки мають випадкові роз-

міри й хаотично розташовані на поверхні. Діаграма другорядного розсіювання в цьому випадку має хаотичну («спекл») структуру й описується лише з використанням статистичних методів.

При використанні мікропризм (рис. 1) характер розташування їх на поверхні носить чітко детермінований регулярний характер відповідно до гексагональної симетрії. У цьому випадку для опису характеру розсіювання лазерного випромінювання на такій поверхні можливо використання апарата теорії дифракції.

Відповідно до [6, 7] картини дифракції світла на сукупності однакових елементів (рис. 2) описується добутком двох функцій $F(U)$ і $f(NW)$.

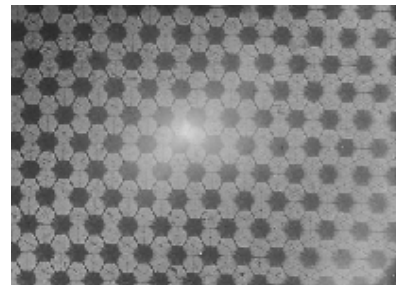


Рис. 1. Поверхня СПП з мікропризм

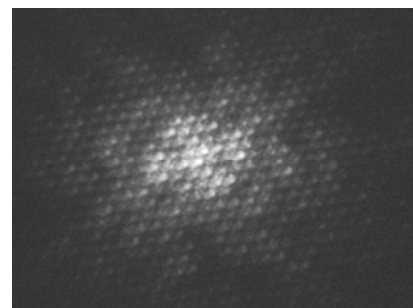


Рис. 2. Картина дифракції світла на СПП

Тут функція $F(U)$ відповідає картині дифракції на елементарному світлоповертателі у вигляді правильного шестикутника (за нормальним падінням світла), а вид функції $f(NW)$ визначається парамет-

рами просторової решітки (величиною її періоду, співвідношенням розмірів «прозорих» і «непрозорих» елементів решітки, а також числом висвітлених періодів решітки N). Відзначимо, що із класичної теорії дифракції треба, зокрема, що при збільшенні числа N відбувається звуження кожного локального максимуму, при цьому відстань між ними не змінюється, тому що визначається величиною просторового періоду решітки.

Поверхня СПП (рис. 1) можна розглядати як своєрідні двовимірні дифракційні ґрати з відповідним розташуванням «прозорих» і «непрозорих» елементів. Для простоти аналізу будемо розглядати одномірні ґрати, при цьому отримані результати можуть бути узагальнені на двовимірний випадок.

Розглянемо більш детально роботу одного світлоповертаючого елемента решітки (рис. 3) при довільному куті падіння світла на його поверхню.

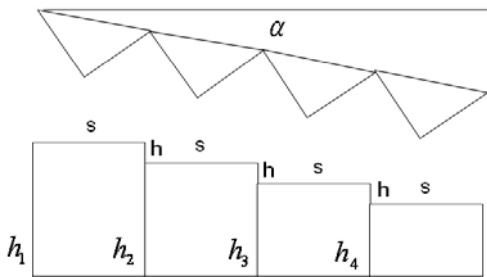


Рис. 3. Робота СПП при довільному куті падіння світла

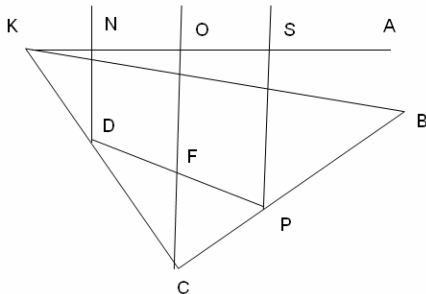


Рис. 4. Поширення променя світла в елементі покриття

Нехай діагональ прямокутного трикутника відхилена на деякий кут α від горизонтального напрямку ($\angle AKB = \alpha$). Покажемо, що промінь, спрямований вертикально й перебуває на довільній відстані ON від осевого променя OC проходить така ж відстань у дзеркальному світлоповертаючих елементі, що й осевий промінь, тобто

$$ND+DP+PS=2OC. \quad (1)$$

Будемо враховувати при цьому, що $\angle KCB$ є прямим кутом у рівнобедреному трикутнику. З урахуванням зроблених зауважень $\angle NKD = 45^\circ + \alpha$, а $\angle NDK = 45^\circ - \alpha$. Відповідно до законів дзеркального відбиття $\angle FDC = 45^\circ - \alpha$. Із прямокутного трикутника KOC виходить, що $\angle OCK = 45^\circ - \alpha$ й у

такий спосіб трикутник FDC - рівнобедрений ($CF=FD$). Аналогічно доводиться, що трикутник FCP також рівнобедрений, тобто $CF=FP$. Таким чином, $DF=FC$ і $FC=FP$, це означає

$$DP=2FC, \quad (2)$$

якщо промінь DN паралельний променю PS (кут KCB - прямий), то OF – середня лінія трапеції, що у свою чергу означає,

$$ND+SP=2OF. \quad (3)$$

Поєднуючи співвідношення (2) і (3), одержимо необхідну рівність (1). З отриманого співвідношення виходить досить важливий практичний висновок. Плаский фронт вертикально падаючої на ретрорефлектор світлової хвилі залишається також пласким після відбиття, з тією лише різницею, що його ділянки, розташовані з різних сторін від осевої лінії, дзеркально міняються місцями. Це відбувається поза залежністю від величини кута α .

Якщо ділянка вібруючої поверхні містить N світлоповертаючих елементів (рис. 4), то плаский хвильовий фронт розбивається на N фрагментів, у кожному з яких буде мати місце загальна для всіх паралельних променів затримка, величина якої визначається відстанню від конкретного елемента до вершини кута α .

Від одного елемента до іншого оптична довжина шляху змінюється дискретно на величину $2h$, де h - різниця відстаней від вершин прямокутного трикутника до горизонтальної лінії, прийнятої за положення поверхні у відсутності кутових коливань поверхні. Тоді можна думати, що сукупність світлоповертателів з погляду характеру й результату відбиття світла еквівалентна сукупності пласких дзеркальних відбивних елементів, просторове розташування яких показано в нижній частині рис. 4.

Аналізуючи цю обставину, можна звернути увагу, що оптичний блок на рис.4 є не що інше, як добре відомий у теорії дифракції відбиваючий ешелон Майкельсона [6, 7]. Використовуємо для опису закономірностей кутового розташування локальних максимумів підхід, описаний в [6].

Розглянемо нормальне падіння променів на ешелон (рис. 5). Оцінимо різницю ходу δ променів 1 і 2, відбитих від відповідних ділянок ешелону, і дифрагуючих під кутом θ до вертикалі.

З рис. 5 виходить, що

$$\delta = KO+OB.$$

Величина OB у свою чергу визначається очевидним співвідношенням

$$OB = OC - CB.$$

Тоді в обраних позначеннях

$$\delta = h + h \cos \theta - s \sin \theta.$$

Кутові положення локальних максимумів визначаються з умови $\delta = m\lambda$, де m визначає порядок дифракції; λ – довжина хвилі випромінювання.

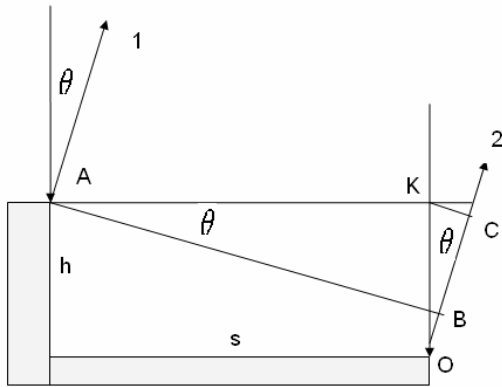


Рис. 5. Оцінка різниці ходу δ променів 1 і 2, відбитих від відповідних ділянок ешелону, і дифрагуючих під кутом θ до вертикалі

Кутове положення нульового максимуму визначається з умови $m=0$. У реальних умовах зондування спостережувальні локальні максимуми відбитого лазерного випромінювання зосереджені в межах одиниць градусів. Обмежуючись тому умовою $\theta \ll 1$, будемо зневажати додатки другого порядку малості й з обліком цього одержимо $2h = \theta_0 s$, де h – висота елемента ешелону, s – його довжина. Зважаючи на $h/s = \tan \alpha = \alpha$, остаточно одержимо

$$\theta_0 = 2\alpha. \quad (4)$$

Ця умова має простий фізичний зміст і говорить про те, що кутове положення локального максимуму у відхиленні вібруючої поверхні на кут α визначається законом дзеркального відбиття (4).

Кутове положення першого локального максимуму можна визначити з умови $m=1$ або $\lambda = 2h - s\theta_1$. Звідки $\theta_1 = 2\alpha - \lambda/s = 2\alpha(1 - \lambda/2h)$

І у випадку $h \gg \lambda$ маємо $\theta_1 = 2\alpha$

Міркуючи аналогічно можна одержати для довільного m

$$\theta_m = 2\alpha$$

Ця обставина може бути покладена в основу побудови різного виду датчиків кутових вібрацій об'єктів зі світлоповертаючими покриттями. Наприклад, виявлені закономірності використовувалися в датчиках, описаних в [3, 4]. Особливістю їхньої роботи було використання однаканального приймача випромінювання, що не дозволяло розділяти вібрації у взаємно ортогональних областях.

Усуненням цього недоліку в [8] було запропоноване використання телевізійного приймача для аналізу розсіяного випромінювання (тобто для аналізу характеру зміни зображення, показаного на рис. 2), який позбавлений зазначених недоліків. Очевидно, зазначені варіанти реалізації методу виміру кутових вібрацій об'єктів не є вичерпуючими й можливі також і інші варіанти їхньої побудови.

Необхідно відзначити, що відносно повільно змінююча функція $F(U)$ визначається дифракцією

на одному елементі СПП – правильному шестикутнику (рис. 1). У відносно невеликих кутових значеннях відхилень, які майже завжди мають місце на практиці, форма цього елемента і його розмірів практично не змінюються у часі, тому й зміни виду функції $F(U)$ під час вібрацій не спостерігаються, зміщуються лише локальні максимуми відносно швидко осцилюючі функції $f(NW)$.

Таку особливість дифракції лазерного випромінювання на поверхні, що складається із сукупності мікропризм (рис. 1), легко спостерігати експериментально. Для цього досить сфокусувати лазерне випромінювання на поверхню й одержати на екрані розподіл, показаний на рис. 2. Потім, змінюючи нахил поверхні щодо падаючого променя можна переконаватися, що зміщуються лише локальні максимуми (кутові розміри яких становлять величину близько 10 хвилин). При цьому просторове положення огинаючої (кутова ширина основного максимуму – 0,75град.) не змінюється. Для одержання розподілу на рис. 2 використовувався гелій-неоновий лазер, розмір кожної мікропризми складає близько 50 мкм, число освітлюваних елементів – приблизно 3 у лінію. Зсування локальних максимумів у взаємно – ортогональних напрямках повністю адекватне відповідним нахилам поверхні.

Висновки

1. У результаті аналізу умов розповсюдження світла в пласкому дзеркальному кутовому відбивачі показано, що плаский хвильовий фронт падаючої хвилі залишається пласким після виходу випромінювання зі світлоповертача. Показано, що закономірності відбиття світла на вібруючій поверхні зі світлоповертаючим покриттям еквівалентні відбиттю світла від ешелону Майкельсона.

2. Показано, що характер дифракції світла на СПП еквівалентний теорії дифракції відбиваючого ешелону Майкельсона й відповідає закономірностям дзеркального відбиття, яка характеризується простою лінійною залежністю кутового відхилення довільного локального максимуму від кутового положення нахилу вібруючої поверхні. Остання обставина є основою для розробки й створення різного виду лазерних вібродатчиків.

Список літератури

1. Застрогин Ю.Ф. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования / Ю.Ф. Застрогин и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 315 с.
2. Пресняков Ю.П. Использование спекл – эффекта для анализа колебаний шероховатой поверхности / Ю.П. Пресняков, В.П. Щетинов // Журнал технической физики. – 1997. – №8, т. 67. – С. 71-75.
3. Доля Г.Н. Измерение параметров вибраций объектов со светоотражающими покрытиями методом прямого фотодетектирования / Г.Н. Доля, А.В. Кочин, С.Н. Якименко, В.Л. Живчук // Сборник научных трудов ХВУ. – Х.: ХВУ, 2002. – Вып. 1(39). – С. 102-104.

4. Dolya G.N. The appreciation of the influence of exactness of focusing on the work of the laser homodyne method of measuring the parameters of vibration / G.N. Dolya, V. Zhyvchuk. – Proc. SPIE, Vol. 5582, Sep 2004. – P. 45-52.

5. Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 12. 4.026-2001. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная.

6. Дитчберн Р. Физическая оптика / Р. Дитчберн. – М.: Наука. 1965. – 631 с.

7. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука. – 1973. – 720 с.

8. Доля Г.Н. Оценка потенциальной точности изме-

рений двух лучевого лазерного виброметра телевизионного типа / Г.Н. Доля, В.Л. Живчук, М.В. Трикоз // Збірник наук. пр. «Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна». № 646. Серія «Радіофізика та електроніка». – 2004. – Вип. № 2. – С. 32-36.

Надійшла до редколегії 18.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

О ВЕЛИЧИНЕ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО ОТ СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ

А.В. Кочин

Статья посвящена обоснованию связи угловых колебаний, рассеянного лазерного излучения, с соответствующими наклонами поверхности, которое оборудовано световозвращающим покрытием. Найдена закономерность отражения света от вибрирующей поверхности со световозвращающим покрытием, которые эквивалентны отражению света от эшелона Майкельсона. Для разделения вибрации во взаимно ортогональных областях при анализе рассеянного излучения предложено использование телевизионного приемника. Полученные результаты могут стать основой для разработки и создания различного вида лазерных вибродатчиков.

Ключевые слова: вибродиагностика, дистанционный контроль, световозвращающие покрытия, угловые колебания.

ON THE SIZE OF THE ANGULAR OSCILLATIONS OF THE LASER EMISSION REFLECTED FROM THE RETROREFLECTIVE COVERING LYSIS OF RISKS WHEN ENSURING INFORMATION SAFETY

A. V. Kochin

The article is devoted to the substantiation of the connection between the angular oscillations, stray laser emission with the appropriate pitches which are supplied with the retroreflective covering. There has been found a regularity of the light reflecting from the vibrating surface with the retroreflective covering which is equivalent to the light reflecting from Michelson echelon. It is offered to use a television receiver for the division of the vibration in mutual – orthogonal fields when evaluating the stray emission. The findings can become the foundation for the development and establishment of the new laser vibrating detector equipment.

Keyword: vibrating detector equipment, the remote control, the retroreflective coverings, angular fluctuations.