

---

УДК 623.004.67

В.Б. Кононов<sup>1</sup>, С.С. Котляр<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> Генеральний Штаб Збройних Сил України, Київ

## ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРІ-ПЕРО ПРИ ЗДІЙСНЕННІ ПОВІРКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*В статті розглянута можливість використання волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо при здійсненні повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил) метрологічними групами в складі пересувних лабораторій вимірювальної техніки баз вимірювальної техніки озброєння Збройних Сил України.*

**Ключові слова:** волоконно-оптичний інтерферометр, спектр випромінювання.

### Вступ

**Постановка задачі.** Питання повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил), що здійснюють вимірювання напруги, температури, тиску, виїзними метрологічними групами в складі пересувних лабораторій вимірювальної техніки (ПЛВТ) баз вимірювальної техніки озброєння Збройних Сил України є одним із важливих при здійсненні забезпечення єдності вимірювань параметрів озброєння та військової техніки (ОВТ).

Актуальність даної науково-прикладної задачі обумовлюється постійним підвищенням вимог до точного вимірювання напруги, температури, тиску ОВТ військ (сил), що забезпечує їх високу бойову готовність.

**Аналіз літератури.** Дослідження методів повірки (калібрування) радіотехнічних величин розглядаються в [1 – 5]. В [1, 2] розглянуті загальні відомості про волоконно-оптичні датчики. В [3] викладаються принципи цифрової обробки сигналів у вимірювальних приладах та системах. В [3] розгля-

нуті мультиплексовані системи волоконно-оптичних датчиків.

В [4] розглядаються питання організації та порядку експлуатації вимірювальної техніки у ЗС України. В [5] встановлюються правила експлуатації вимірювальної техніки військового призначення. Разом з цим лишаються відкритими питання, які пов'язані з визначенням можливості використання волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо при здійсненні повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил).

**Метою статті** є розгляд можливості використання волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо при здійсненні повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил).

### Основний матеріал

Оптичне волокно може бути використане як датчик для вимірювання напруги, температури, тиску й інших параметрів. Малий розмір і фактична відсутність необхідності в електричній енергії дає волоконно-оптичним датчикам перевагу перед тра-

диційними електричними. В основі багатьох датчиків переміщення лежить явище інтерференції світла [1, 2]. Використання оптичних волокон дозволяє зробити датчики для вимірювання напруги, температури, тиску надзвичайно компактними й економічними. Відомі дві основні схеми волоконно-оптичних інтерферометрів: Маха-Цендера і Фабрі-Перо [3]. Розглянемо більш детально можливість використання волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо при здійсненні повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил), що здійснюють вимірювання напруги, температури, тиску, виїзними метрологічними групами в складі пересувних лабораторій вимірювальної техніки (ПЛВТ) баз вимірювальної техніки озброєння Збройних Сил України.

У волоконно-оптичному інтерферометрі Фабрі-Перо інтерференція відбувається на частково відбиваючому відколі волокна і зовнішньому відбивачі.

Розглянемо принцип дії торцевого волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо, схема якого зображена на рис. 1.

Випромінювання лазерного діода 1 вводиться у волоконний світловод 2 та через розгалужувач 3 передається на волокно 4. При цьому частина випромінювання відбивається від торця волоконного світловода 4, а інша його частина висвічується в повітря, відбивається від дзеркала 5 і повертається назад у волоконний світловод 4.

Промінь, що відбитий від торця волоконного світловода, здійснює інтерференцію із променем, відбитим від дзеркала, і на фотоприймачі 5 реєструється інтенсивність випромінювання, що змінюється періодично в залежності від відстані  $x_0$  між торцем світловода і дзеркалом:

$$I = 2 \cdot I_0 \cdot \left( 1 + \cos \left( \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x_0 + \varphi_0 \right) \right). \quad (1)$$

При цьому зсув дзеркала на половину довжини хвилі світла змінює різницю фаз, які променів, які

здійснюють інтерференцію, на  $2\pi$ , що відповідає одному періодові варіації інтенсивності випромінювання на фотоприймачі.

З іншої сторони ніяке реальне джерело оптичного випромінювання не є ідеально монохроматичним, а отже він має обмежену довжину когерентності. У випромінюванні лазерного діода звичайно присутні кілька мод, а сумарна ширина спектральної лінії дорівнює приблизно 3 – 5 нм. Довжина когерентності  $l_c$  зв'язана із шириною спектра  $\Delta\nu$  наступним виразом:

$$l_c = \frac{c}{2\Delta\nu}.$$

Із шириною спектра випромінювання (і довжиною когерентності  $l_c$ ) пов'язана видимість (контрастність) інтерференційної картини. При збільшенні різниці ходу променів, які здійснюють інтерференцію, видимість інтерференційної картини зменшується. При досягненні різниці ходу, що дорівнюється довжині когерентності, видимість перетворюється в 0.

На рис. 2 показана залежність інтенсивності інтерференції двох здійснюючих інтерференції від їхньої різниці ходу  $l$ . Ця залежність описується наступною формулою:

$$I = 2 \cdot I_0 \cdot \left\{ 1 + \frac{\sin \xi}{\xi} \cdot \cos \left( 2 \cdot \frac{l_c}{\lambda} \cdot \xi \right) \right\}; \quad (2)$$

$$\xi = \pi(l/l_c),$$

де  $I_0$  – інтенсивність кожного з променів, які здійснюють інтерференцію;  $l$  – довжина хвилі світла.

Приведена вище формула описує повну інтерференцію двох променів однакової інтенсивності. У загальному випадку їх інтенсивності можуть бути істотно різними (наприклад, у волоконно-оптичному інтерферометрі, де промінь, відбитий від торця, виявляється на порядок більш слабким, чим промінь, відбитий від дзеркала і потрапив назад у волокно.

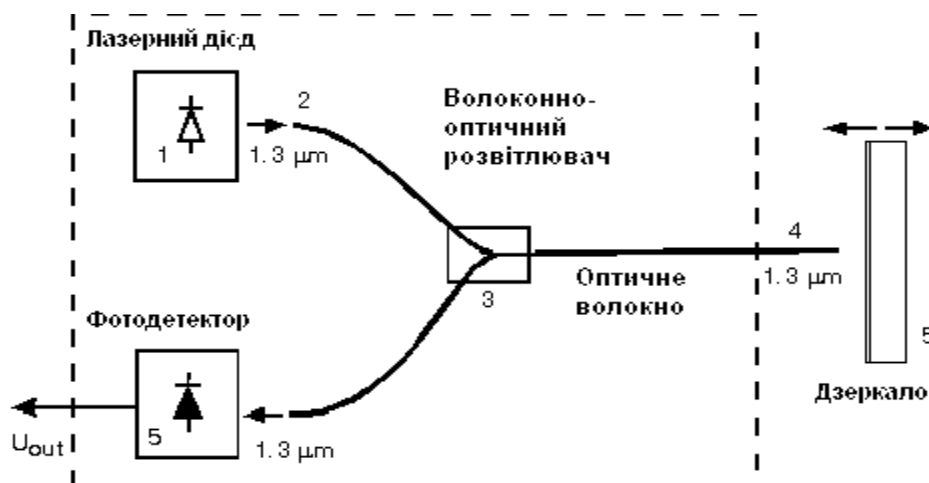


Рис. 1. Схема торцевого волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо

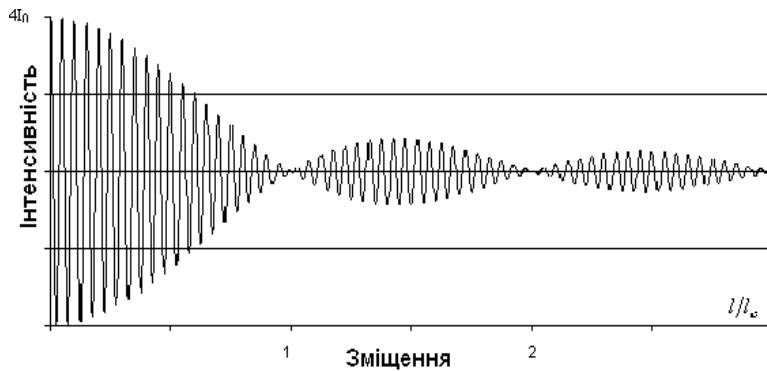


Рис. 2. Залежність інтенсивності інтерференції двох здійснюючих інтерференцій від їхньої різниці ходу  $l$

У цьому випадку 100% видимість інтерференції не досягається навіть при нульовій різниці ходу променів, які здійснюють інтерференцію.

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

де  $\varphi$  – різниця фаз променів, які здійснюють інтерференцію;  $I_1$  і  $I_2$  – їх інтенсивності,  $\gamma$  – ступінь когерентності.

У випадку волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо:

$I_1 = R_1 I_0$  – інтенсивність світла, відбитого від відколу волокна;

$I_2 = (1 - R_2)^2 R I_0$  – інтенсивність світла, відбитого від дзеркала і повернутого у волокно ( $R_1$  і  $R$  – коефіцієнти відображення торця волокна і дзеркала відповідно).

У випадку кварцового волокна:

$R_1 = 0,04$  – френелівський коефіцієнт відображення границі розділу кварц-повітря.

Таким чином, інтенсивність світла, що реєструється фотоприймачем, дорівнює:

$$I = I_0 \cdot \left\{ R_1 + (1 - R_1)^2 \cdot R + 2 \cdot (1 - R_1) \cdot \sqrt{R \cdot R_1} \cdot \frac{\sin \xi}{\xi} \cdot \cos \left( 4 \cdot \pi \cdot \frac{x_0}{\lambda} \right) \right\}. \quad (4)$$

У загальному випадку відсоток випромінювання, відбитого від дзеркала і повернутого у волокно, залежить від відстані між відбивачами. Це пов'язано з тим, що світло, що виходить з волокна, розходить під деяким кутом і лише частина його, будучи відбитою від дзеркала, попадає назад у волокно і бере участь в інтерференції. Типова залежність оптичної потужності, що реєструється фотоприймачем, від відстані між відбивачами інтерферометра приведена на рис. 3.

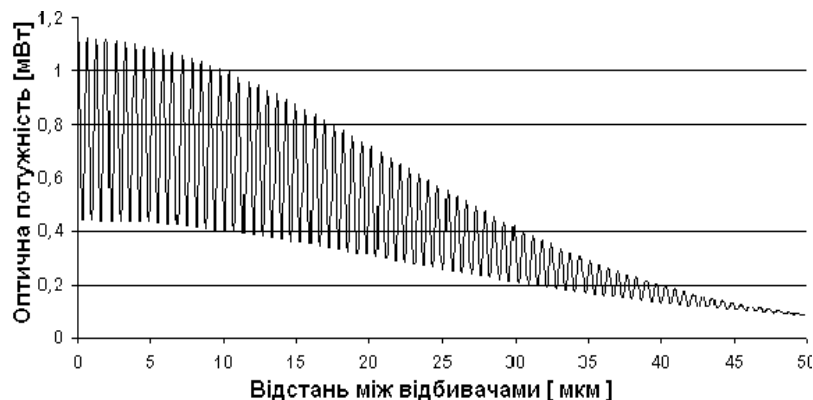


Рис. 3. Залежність оптичної потужності, що реєструється фотоприймачем, від відстані між відбивачами інтерферометра

Розглянемо сигнал інтерферометра, який виникає в результаті відображення світла від вібруючої поверхні (резонатора). У результаті коливання резонатора, різниця фаз променів, що здійснюють інтерференцію, змінюється наступним чином:

$$\Delta \varphi(t) = \left( \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \right) \cdot x_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \eta) = \varphi_{\omega} \sin(\omega \cdot t - \eta), \quad (5)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла;  $x_0$  – амплітуда коливань резонатора. Це приводить до наступного виразу для інтенсивності світла, відбитого резонатором і торцем волокна:

$$I(t) \cong \cos \left\{ \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \eta) + \varphi_0 \right\}, \quad (6)$$

де  $\varphi_0$  – різниця фаз променів, що здійснюють інте-

рференцію, коли резонатор знаходиться в незбуреному стані.

Розкладаючи  $I(t)$  у ряд Фур'є знайдемо відповідні члени модуляції світла:

$$I(t) \cong J_1(\varphi_\omega) \cdot \sin(\omega \cdot t - \eta) \cdot \sin \varphi_0 - J_2(\varphi_\omega) \cdot \cos(\omega \cdot t - \eta) \cdot \cos \varphi_0 + \dots, \quad (7)$$

де  $J_1(\varphi_\omega)$  – функції Бесселя.

Коли

$$\varphi_\omega \ll 1 \quad \text{та} \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{2} + \pi k,$$

де  $k$  – ціле число,  $J_1(\varphi_\omega)$  дорівнює приблизно  $\frac{\varphi_\omega}{2}$  і, тому, змінна компонент  $I(t)$  буде пропорційна зсувові резонатора з положення рівноваги:  $I_w \sim \sin(\omega t)$ .

Розглянемо ще випадок збудження резонатора зовнішньою силою (подібно випадку порушення коливань дифузатора динаміка під дією змінного струму, що протікає по його котушці). У цьому випадку коливання резонатора будуть залежати від частоти прикладеного впливу відповідно до таких виразів:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{1}{Q} \cdot \frac{p}{1-p^2}; \quad p = \frac{\omega}{\omega_{\text{res}}}; \quad (8)$$

$$\varphi_\omega = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{Q^2 \cdot (1-p^2)^2 + p^2}}, \quad (9)$$

де  $Q$  – добротність резонатора;  $\varepsilon_0$  – амплітуда резонансних коливань;  $\eta$  – залежний від частоти зсуву фаз між прикладеним збудливим впливом і коливаннями резонатора ( $\eta$  змінюється від 0 до  $\pi$ , коли  $\omega$  змінюється від 0 до  $\infty$ ).

З цього рівняння видно, що амплітуда резонансних коливань у  $Q$  раз більше, ніж амплітуда коливань на низьких частотах (або при квазістатичному зсуві резонатора тією же силою).

## Висновки

1. В статті розглянуто можливість використання волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо при здійсненні повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил).

2. Розглянуто принцип дії та схему волоконно-оптичного інтерферометра Фабрі-Перо.

3. Волоконно-оптичний інтерферометр Фабрі-Перо дозволяє вимірювати напругу, температуру, тиск, виїзними метрологічними групами в складі пересувних лабораторій вимірювальної техніки (ПЛВТ) баз вимірювальної техніки озброєння Збройних Сил України.

## Список літератури

1. Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон. / Т. Окоши и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Бусурін Б.І. Волоконно-оптичні датчики / Б.І. Бусурін, Ю.Р. Носов. – Энергоатомиздат, 1990. – 226 с.
3. Міровіцькій Д.І. Мультиплексовані системи волоконно-оптичних датчиків / Д.І. Міровіцькій // Вимірювальна техніка. – 1992. – № 1. – С. 40-42.
4. Войтенко С.С. Нормативні та організаційні основи метрологічного забезпечення військ (сил): навч.-метод. посіб. / С.С. Войтенко, С.В. Герасимов. – Х.: ХУПС, 2012. – 292 с.
5. Наказ заступника Міністра оборони з озброєння – начальника озброєння ЗС України «Про затвердження Керівництва з організації та порядку експлуатації вимірювальної техніки у ЗС України» від 1.06.2001.

Надійшла до редколегії 3.12.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.І. Кондрашов, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.Б. Кононов, С.С. Котляр

*В статье рассмотрена возможность использования волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо при осуществлении поверки средств измерительной техники военного назначения войск (сил) метрологическими группами в составе подвижных лабораторий измерительной техники баз измерительной техники Вооружения Вооружённых Сил Украины.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптический интерферометр, спектр излучения.

## USING OF FIBER-OPTIC INTERFEROMETER FABRY-PERO DURING REALIZATION OF CHECK OF FACILITIES MEASURING TECHNIQUE OF MILITARY-ORIENTED

V.B. Kononov, S.S. Kotlyar

*In the article possibility of the use of fiber-optic interferometer is considered Fabry-PERO during realization of check of facilities of measuring technique of military-oriented of troops (forces) metrology groups in composition the mobile laboratories of measuring technique of bases of Armament of Military Powers of Ukraine.*

**Keywords:** fiber-optic interferometer, spectrum of radiation.