

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361650

УДК 681.78.621.378: 533.6

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ В ЛАЗЕРНОМУ ДОПЛЕРІВСЬКОМУ ВИМІРЮВАЧІ ШВИДКОСТІ ІЗ ЗУСТРІЧНИМИ ПРОМЕНЯМИ

*Дивнич М. П.**Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна**E-mail: [npdivn@gmail.com](mailto:npdivn@gmail.com)*

Для лазерного доплерівського вимірювача швидкості (ЛДВШ) із зустрічними променями на основі теорії розсіяння Г. А. Мі проведені розрахунки відносної амплітуди доплерівського сигналу, коефіцієнтів амплітудного та поляризаційного узгодження розсіяного випромінювання для лінійного узгодженого та взаємно ортогонального стану поляризації лазерних променів. Розрахунки поведені також для кругового узгодженого, кругового взаємно ортогонального стану поляризації променів і для випадку, коли кут між електричними векторами променів складає  $30^\circ$  та коли один промінь має лінійний, а другий круговий стан поляризації. Встановлено, що при взаємно ортогональній поляризації променів, коли в зоні вимірювання швидкості не утворюється інтерференційна картина, існують напрямки прийому, де має місце повне узгодження розсіяного випромінювання за станом поляризації. Теоретичні результати підтверджені на експериментальній установці ЛДВШ із зустрічними променями, в якій додатково встановлені перетворювачі поляризації. На основі отриманих результатів запропонована структура ЛДВШ із зустрічними променями, в якій постійна складова доплерівського сигналу компенсується. Рекомендовано при проектуванні лазерних доплерівських вимірювачів швидкості потрібно враховувати вплив на глибину модуляції та відношення сигнал/завада доплерівського сигналу як ступінь узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю, так і за станом поляризації. Для конкретної структури ЛДВШ та оптичних властивостей мікрочастинок, що вводяться у потік, необхідно розрахувати ступінь узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації. Потім потрібно визначити напрямки прийому розсіяного випромінювання або величину кутової апертури приймальної діафрагми з максимально можливим ступенем амплітудного та поляризаційного узгодження розсіяного випромінювання. Таким чином можна підвищити глибину модуляції та відношення сигнал/завада доплерівського сигналу, точність вимірювання його частоти та зменшити похибку вимірювання швидкості потоку.

**Ключові слова:** лазер, доплерівський, вимірювання, швидкість, поляризація, сигнал.

### Вступ

Лазерні доплерівські вимірювачі (ЛДВШ) призначені для безконтактного вимірювання швидкостей - в широкому діапазоні від порядку часток мікрометра в секунду до порядку 10 км/с [1].

Найбільше застосування такі прилади знайшли при вимірюванні швидкості потоків рідини або газу завдяки ряду переваг перед іншими методами дослідження потоків [2]. ЛДВШ не вносять в потік ніяких спотворень; для вимірювань характерна локальність: їх можна виконувати в межах області діаметром всього 10 мкм. Можливі температури потоку знаходяться в широкому інтервалі - від температур криогенних рідин до температур гарячої плазми. Лазерний доплерівський метод має високу швидкодію, що дозволяє досліджувати процеси в газах і рідинах, що швидко протікають [3, 4].

В таких приладах [5] використовується інтерференція монохроматичного випромінювання двох променів, що перетинаються у вимірювальному об'ємі, або інтерференція двох розсіяних хвиль, які падають на фотодетектор. Інформація про швидкість розсіювальних центрів, що руха-

ються одночасно з потоком рідини або газу, міститься в розсіяному випромінюванні завдяки ефекту Доплера.

Лазерний доплерівський метод є непрямим методом вимірювання, оскільки він вимірює швидкість неоднорідностей у потоці, зазвичай мікрочастинок. Швидкість мікрочастинок буде відповідати швидкості потоку лише за відсутності ковзання.

Ефект Доплера виникає два рази: один раз, коли лазерне випромінювання від передавальної системи приладу, яке має частоту  $f_0$ , падає на рухома мікрочастинку, та другий раз, коли розсіяне рухома мікрочастиною випромінювання частотою  $f_1$  приймається нерухомим фотодетектором.

Доплерівський зсув частоти для типових швидкостей потоку має порядок 1-100 МГц, що порівняно з частотою лазерного випромінювання  $10^{14}$  Гц дуже малий і тому може бути визначений безпосередньо із застосуванням інтерферометра [6].

Найбільше використання у вимірюваннях знайшли ЛДВШ, що побудовані за диференціальною структурою [7]. Такі прилади можуть бути

побудовані як з прийманням розсіяного випромінювання вперед, так і назад залежно від розташування об'єкта, на якому проводяться дослідження.

В приладі диференціального типу зона вимірювання швидкості формується внаслідок перетинання двох лазерних променів. Вона має форму еліпсоїда обертання та залежно від кута між лазерними променями  $\gamma$  має діаметр від 50 до 200 мкм. Тому імпульсний доплерівський сигнал може мати тривалість в діапазоні від 10 до 1  $\mu$ s та частоту  $f_d$  від 30 до 100 МГц. Задача вимірювання частоти такого сигналу досить складна. Тому потрібно забезпечити високу ступінь глибини модуляції та відношення сигнал/завада доплерівського сигналу на виході фотоприймача.

Оцінка частоти сигналу ЛДВШ проводиться методами спектрального аналізу [8], кореляційним [9] та вимірювання інтервалу часу, в якій вкладається певна кількість періодів сигналу [10].

#### Аналіз публікацій

Для вимірювання малих швидкостей може використовуватись ЛДВШ із зустрічними променями [1] (рис. 1). В такому приладі випромінювання лазера 1 поділяється оптичним елементом 2 на два променя, які за допомогою дзеркал 3, 4, 5, 11 та об'єктивів 7, 9 направляють на зустріч один одному до зони вимірювання 8. Розсіяне мікрочастинками випромінювання збирається в межах апертурної діафрагми 12 та об'єктивом 13 направляється на фотоприймач 15. Для зменшення впливу фонового освітлення перед фотоприймачем встановлюється діафрагма 14. Вихідний сигнал фотоприймача, який представляє собою імпульс, що заповнений височастотною складовою, поступає на вимірювач доплерівської частоти 16.

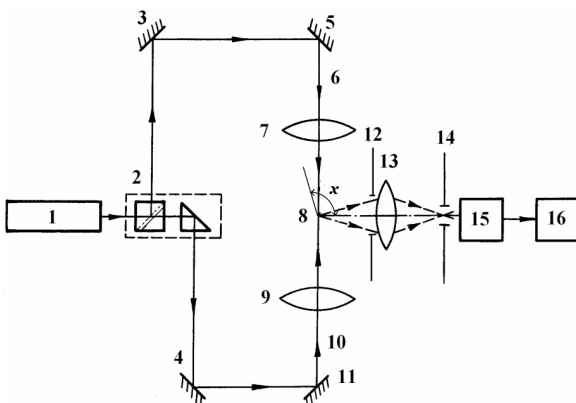


Рис. 1. Схема ЛДВШ із зустрічними променями [1]

Такий прилад має чутливість у більш ніж 20 разів вище порівняно з ЛДВШ, в якому кут між променями складає  $5^\circ$ . Такий ЛДВШ має також ряд особливостей порівняно з традиційними приладами:

- в зоні вимірювання спостерігається найбільш рівномірний просторовий розподіл інтенсивності лазерного випромінювання;
- діаметр зони вимірювання визначається збільшенням приймального об'єктиву 13, розміром діафрагми 11 та діаметром лазерних променів;
- форма імпульсу доплерівського сигналу відрізняється від гаусового, а його спектр вужче.

Для аналізу роботи ЛДВШ, з метою їх удосконалення, використовуються два теоретичні підходи:

- на використанні дифракційної теорії розсіяння випромінювання [12, 13];
- на застосуванні теорії розсіяння Г. А. Мі [14, 15].

Другий підхід дозволяє врахувати вплив поляризації та фази розсіяного випромінювання на формування доплерівського сигналу.

В ЛДВШ в результаті розсіяння на мікрочастинці лазерних променів в кожному напрямку розповсюджуються дві електромагнітні хвилі, що мають різну частоту, інтенсивність та стан поляризації:

1 – ша розсіяна хвиля:

$$\dot{E}_{\varphi_{1i}} = \frac{E_{10} e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1(\theta_{1i}) \sin \varphi_{1i} e^{-j\delta'_{1i}} e^{-j\nu_{1i} t},$$

$$\dot{E}_{\theta_{1i}} = \frac{E_{10} e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_2(\theta_{1i}) \cos \varphi_{1i} e^{-j\delta''_{1i}} e^{-j\nu_{1i} t}.$$

2 – га розсіяна хвиля:

$$\dot{E}_{\varphi_{2i}} = \frac{E_{20} e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1(\theta_{2i}) \sin \varphi_{2i} e^{-j\delta'_{2i}} e^{-j\nu_{2i} t},$$

$$\dot{E}_{\theta_{2i}} = \frac{E_{20} e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_2(\theta_{2i}) \cos \varphi_{2i} e^{-j\delta''_{2i}} e^{-j\nu_{2i} t}.$$

де:  $E_{10}, E_{20}$  – модулі напруженості електричного поля лазерних променів,  $E_1(\theta_{1i}), E_2(\theta_{1i}), E_1(\theta_{2i}), E_2(\theta_{2i})$  – модулі безрозмірних комплексних амплітуд, які розраховуються за формулами теорії розсіяння Г. А. Мі [15],  $\delta'_{1i}, \delta'_{2i}$  та  $\delta''_{1i}, \delta''_{2i}$  – початкові фази складових розсіяних хвиль, які дорівнюють:

$$\delta'_{1i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im} E_1(\theta_{1i})}{\text{Re} E_1(\theta_{1i})}, \quad \delta''_{1i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im} E_1(\theta_{2i})}{\text{Re} E_1(\theta_{2i})},$$

$$\delta'_{2i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im} E_2(\theta_{1i})}{\text{Re} E_2(\theta_{1i})}, \quad \delta''_{2i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im} E_2(\theta_{2i})}{\text{Re} E_2(\theta_{2i})}.$$

Частоти розсіяного випромінювання дорівнюють скалярному добутку вектора швидкості мікрочастинки  $\bar{V}$  на різницю хвильових векторів розсіяної хвилі  $\bar{k}_s$  двох лазерних променів ЛДВШ диференціального типу  $\bar{k}_1$  та  $\bar{k}_2$ :

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi} (\bar{k}_s - \bar{k}_1) \bar{V} \quad \nu_2 = \frac{1}{2\pi} (\bar{k}_s - \bar{k}_2) \bar{V}.$$

При прийомі випромінювання в  $i$ -му напрямку на виході фотоприймача утворюється сигнал змінна (доплерівська) складова якого дорівнює:

$$U_{di} = RC\Delta S_i \sqrt{[a^2 + b^2 + 2ab \cos(\Delta_{1i} - \Delta_{2i})]} \times \\ \times \frac{2e\eta k_1}{h\nu} \sqrt{\cos(\omega_d + \varphi_{di})},$$

де:  $e, h, \nu$  – заряд електрона, постійна Планка та частота випромінювання лазера;  $\eta, k_1, R$  – квантова ефективність, коефіцієнт підсилення та опір навантаження фотоприймача,  $\Delta S_i$  – площа, в межах якої збирається розсіяне випромінювання;  $E_{\varphi 1}, E_{\theta 1}$  – складові першої розсіяної хвилі;  $E_{\varphi 2}, E_{\theta 2}$  – складові другої розсіяної;  $\Delta_{1i}, \Delta_{2i}$  – різниці фаз поміж  $\varphi$ -ми та  $\theta$ -ми складовими розсіяних хвиль;  $\omega_d = 2(\nu_1 - \nu_2)$  – доплерівська частота;  $\varphi_{di}$  – фаза «елементарного» доплерівського сигналу;  $a = E_{\varphi 1} E_{\varphi 2}$ ;  $b = E_{\theta 1} E_{\theta 2}$ .

В роботі [16] проведено дослідження впливу характеристик розсіяного випромінювання на сигнал ЛДВШ. Показано, що на глибину модуляції доплерівського сигналу та його відношення сигнал/завада впливає ступінь узгодження розсіяних хвиль за інтенсивністю. Ступінь узгодження розсіяних хвиль за інтенсивністю визначається за допомогою коефіцієнта, що змінюється в межах від 0 до 1 та дорівнює:

$$k_{ai} = \sqrt{I_{s1i} I_{s2i} / (I_{s1i} + I_{s2i})},$$

де  $I_{s1i}$  та  $I_{s2i}$  – інтенсивності розсіяних хвиль від першого та другого лазерного променя при прийомі випромінювання в межах малої кутової апертури  $\Delta\Omega_i$ .

Запропоновано для підвищення глибини модуляції та відношення сигнал/завада доплерівського сигналу на місці приймальної діафрагми встановлювати фільтр. Цей фільтр повинен пропускати до фотоприймача тільки те розсіяне випромінювання, яке відповідає заданому значенню коефіцієнта амплітудного узгодження  $k_{ai} \geq k_{ai\text{зад}}$ .

### Постановка завдання

Для зменшення методичної похибки вимірювання, що викликана відставанням мікрочастинок від потоку, в нього вводять мікрочастинок, розмір та форма яких, а також коефіцієнт аеродинамічного опору відомі [17]. Розмір таких мікрочастинок при вимірюванні швидкості аеродинамічних потоків зазвичай складає  $(1-3)\mu$ . Інтенсивність розсіяного випромінювання мікрочастинок такого розміру мала, і вони рухаються з великою швидкістю, тому енергія імпульсного сигналу також незначна. Точність вимірювання частоти доплерівського сигналу, а отже і швидкості потоку, залежить також від його глибини модуляції та відношення сигнал/завада. В ЛДВШ необхідно забезпечити прийом розсіяного випромінювання, характеристики якого дозволяють отримати на виході фото-

приймача сигнал з максимально можливо більшим відношенням сигнал/завада.

Відомо, що видність інтерференційної картини залежить не тільки від співвідношення інтенсивності променів, а також від їх стану поляризації. Промені із взаємно ортогональним станом поляризації не інтерферують. Тому актуальною задачею є дослідження впливу стану поляризації випромінювання на характеристики сигналу ЛДВШ.

### Мета роботи

Для забезпечення заданої точності вимірювання швидкості потоку лазерним доплерівським приладом потрібно, щоб сигнал на виході вимірювача частоти мав високу ступінь глибини модуляції та відношення сигнал/завада. Тому важливо дослідити ступінь впливу стану поляризації лазерних променів та розсіяного мікрочастинок випромінювання на сигнал ЛДВШ. Таке дослідження дозволить оцінити, наскільки залежать характеристики сигналу від стану поляризації та визначити напрямки подальших кроків по вдосконаленню приладу.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Як було зазначено вище, в ЛДВШ диференціального типу, під час розсіяння на мікрочастинок в кожному напрямку розповсюджуються розсіяні хвилі, що відрізняються не тільки за інтенсивністю а також за станом поляризації. Це випромінювання інтерферує на поверхні фотоприймача.

Вплив стану поляризації розсіяного випромінювання на доплерівський сигнал можна характеризувати коефіцієнтом поляризаційного узгодження:

$$k_{pi} = \rho_{11} \rho_{11} + \rho_{12} \rho_{21} + \rho_{21} \rho_{12} + \rho_{22} \rho_{22}$$

де  $[\rho_{ij}]$  – елементи матриці когерентності першої розсіяної хвилі, які дорівнюють:

$$\rho_{11} = \frac{CE_{\theta 1i}^2}{I_{s1i}}, \quad \rho_{21} = \frac{CE_{\theta 1i} E_{\varphi 1i}}{I_{s1i}}, \\ \rho_{12} = \frac{CE_{\theta 1i} E_{\varphi 1i}}{I_{s1i}}, \quad \rho_{22} = \frac{CE_{\varphi 1i}^2}{I_{s1i}},$$

де  $[\rho_{ij}^{\prime\prime}]$  – відповідні елементи матриці когерентності другої розсіяної хвилі, які визначаються через  $E_{\varphi 2i}, E_{\theta 2i}$ .

Коефіцієнт поляризаційного узгодження може змінюватись у межах від 0 до 1 та дорівнює 1, коли дві розсіяні хвилі узгоджені за станом поляризації. Коефіцієнт поляризаційного узгодження при прийомі розсіяного випромінювання в межах малого апертурного кута  $\Delta\Omega_i$  дорівнює:

$$k_{pi} = \frac{E_{\varphi 1i}^2 E_{\varphi 2i}^2 + 2E_{\varphi 1i} E_{\varphi 2i} E_{\theta 1i} E_{\theta 2i} \cos(\Delta_{1i} - \Delta_{2i})}{(E_{\varphi 1i}^2 + E_{\theta 1i}^2)(E_{\varphi 2i}^2 + E_{\theta 2i}^2)} + \\ + \frac{E_{\theta 1i} E_{\theta 2i}}{(E_{\varphi 1i}^2 + E_{\theta 1i}^2)(E_{\varphi 2i}^2 + E_{\theta 2i}^2)},$$

де  $E_{\varphi 1i}E_{\theta 1i}$  та  $E_{\varphi 2i}E_{\theta 2i}$  – складові електричних векторів розсіяних мікрочастинкою хвиль від двох лазерних променів ЛДВШ.

В якості об'єкта дослідження використовувалася ЛДВШ на зустрічних променях. Для даного ЛДВШ на основі теорії розсіяння Г. А. Мі були проведені розрахунки параметрів доплерівського сигналу залежно від напрямку прийому розсіяного випромінювання. Напрямок прийому випромінювання знаходився в площині, що перпендикулярна зустрічним променям та задавався кутом ( $\chi$  – це кут між вертикаллю до площині, в якій розташовані лазерні промені ЛДВШ та віссю симетрії приймальної оптики див. рис. 1).

Для різних станів поляризації лазерних променів розраховані залежності від кута  $\chi$  відносної амплітуди сигналу  $U_{oi}/U_{dmax}$ , коефіцієнтів амплітудного  $k_{ai}$  та поляризаційного  $k_{pi}$  узгодження розсіяного випромінювання.

Так на рис. 2, а представлені результати розрахунків для узгодженого (кут між електричними векторами променів дорівнює нулю) лінійного стану поляризації променів, а на рис. 2, б – для лінійного взаємно ортогонального (кут між електричними векторами променів складає  $90^\circ$ ) стану поляризації променів.

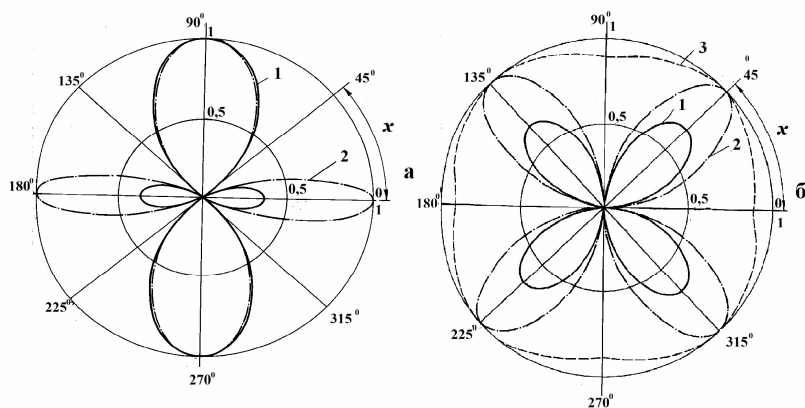


Рис. 2. Характер зміни параметрів сигналу при: а – лінійному узгодженому стані поляризації променів; б – лінійному взаємно ортогональному стані поляризації променів;

$$(U_{oi}/U_{dmax}) = f(\chi) \text{ (1); } k_{pi} = f(\chi) \text{ (2); } k_{ai} = f(\chi) \text{ (3)}$$

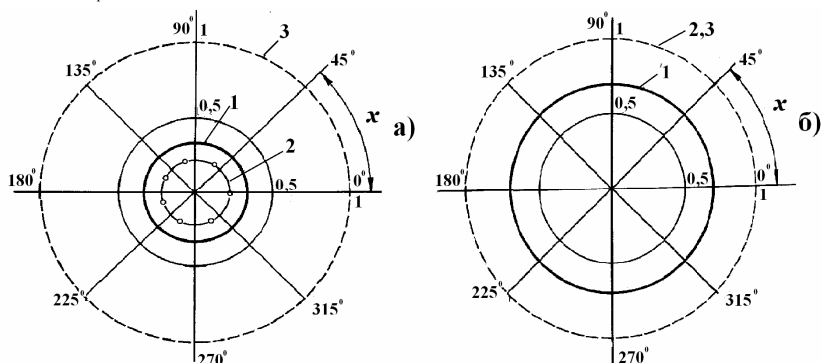


Рис. 3. Характер зміни параметрів сигналу при: а – круговому узгодженому стані поляризації променів; б – круговому взаємно ортогональному стані поляризації променів;  $(U_{oi}/U_{dmax}) = f(\chi)$  (1);  $k_{pi} = f(\chi)$  (2);  $k_{ai} = f(\chi)$  (3)

Незважаючи на те, що при узгодженому стані поляризації лазерних променів у зоні вимірювання утворюється інтерференційна картина, видність якої при рівній інтенсивності променів дорівнює 1, є напрямки прийому, в яких  $U_{oi}/U_{dmax} = 0$  та  $k_{pi} = 0$ .

В той же час розрахунки показали, що при взаємно ортогональній поляризації лазерних променів незважаючи на те, що в зоні вимірювання не утворюється інтерференційна картина, при кутах  $\chi = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$  має місце повне поляризаційне узгодження розсіяного випромінювання  $k_{pi} = 1$  та сигнал максимальний.

Як видно з представлених результатів, характер зміни амплітуди сигналу визначається ступенем поляризаційного узгодження розсіяного випромінювання.

Якщо лазерні промені мають круговий стан поляризації (рис. 3), то  $(U_{oi}/U_{dmax})$ ,  $k_{ai}$  та  $k_{pi}$  не залежать від кута  $\chi$ , як при узгодженому стані, так и при взаємно ортогональному. Коефіцієнт амплітудного узгодження  $k_{ai} = 1$  для любого напрямку прийому, а  $k_{pi} = 1$  тільки для взаємно ортогональній поляризації.

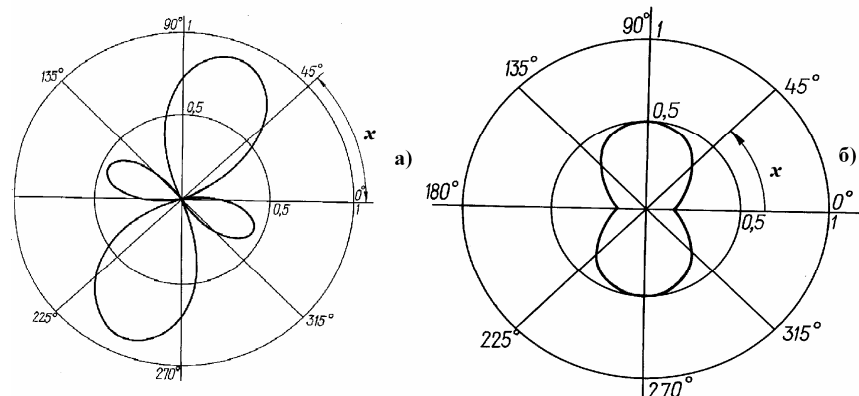


Рис. 4. Характер зміни відносної амплітуди сигналу  $(U_{oi} / U_{dmax}) = f(\chi)$  при: а – поляризації лазерних променів з кутом між електричними векторами  $45^\circ$ ; б – лінійної та кругової поляризації променів

Якщо кут між електричними векторами зустрічних променів складає  $45^\circ$ , то максимуми графіків відносної амплітуди зміщуються на  $22^\circ,5$ , а якщо один з променів має лінійну, а інший кругову поляризацію, то (рис. 4) відносна амплітуда досягає максимуму при  $\chi = 90^\circ, 270^\circ$ .

Для експериментальної перевірки отриманих результатів застосовувалась установка ЛДВШ на зустрічних променях, схема якої представлена на рис. 5. В установці використовувались два перетворювачі поляризації променів 7 та 11, які склалися з послідовно встановлених поляроїда та двох фазових пластинок  $\lambda/2$ . Перша фазова пластинка перетворювала лінійний стан поляризації лазерного променя у круговий, а друга – знов у лінійний. Поворотом другої фазової пластинки можна було обирати напрямок коливання вектору поляризації лазерного променя.

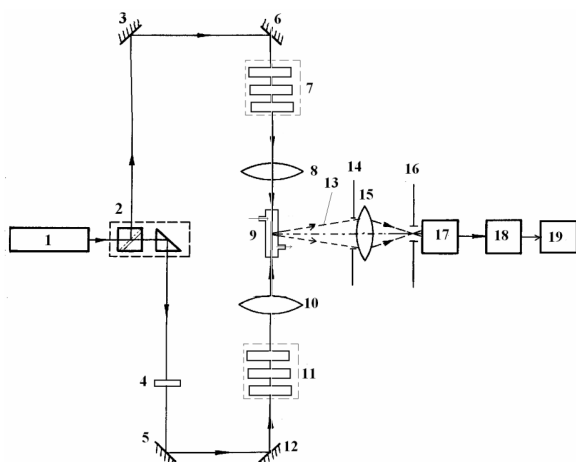


Рис. 5. Схема експериментальної установки: 1 – лазер; 2 – подільник променя; 3, 5, 6, 12 – дзеркала; 4 – нейтральний світлофільтр; 7, 11 – перетворювачі поляризації променів; 9 – кювета; 14, 16 – діафрагми; 15 – об’єктив; 17 – фотоелектронний помножувач; 18 – широко-смуговий підсилувач; 19 – аналізатор спектру

Через кювету зі швидкістю  $(V = (3 \pm 0,1) * 10^{-3} \text{ м/с})$  рухався потік дистильованої води, в яку були введені монодисперсні частинки полістиролу діаметром  $d = 1,5 \text{ мкм}$ . Концентрація мікрочастинок була підібрана такою, що в кожен момент часу у зоні вимірювання швидкості знаходилося не більше ніж одна мікрочастинка. Частота доплерівського сигналу дорівнювала  $f_d = (12,6 \pm 0,4) \text{ кГц}$ ,  $P = 0,95$ .

Розсіяне мікрочастинками випромінювання 13 збиралося в межах кутової апертури  $\Delta\Omega = 4^\circ * 7,5^\circ$  діафрагми 14 та об’єктивом 15 було спрямовано на фотоелектронний помножувач 17. Доплерівський сигнал з фотоелектронного помножувача підсилювався та поступав на аналізатор спектру 19.

Оскільки швидкість потоку води підтримувалась постійною, то частота сигналу на вході аналізатора спектру також була сталою. За допомогою аналізатора спектру проводилось 50 вимірювань амплітуди доплерівського сигналу для різних напрямків прийому випромінювання та знаходилося її середнє значення.

Дослідження були проведені для лінійного узгодженого (рис. 6, а), взаємно ортогонального стану поляризації (рис. 6, б) лазерних променів та, коли кут між електричними векторами променів складав  $30^\circ$  (рис. 7, а). Експеримент проводився також для випадку, коли один промінь мав круговий, а інший – лінійний стан поляризації (рис. 7, б).

Напрямок прийому розсіяного випромінювання залишався постійним, а змінювався тільки кут між електричними векторами лазерних променів та віссю симетрії – об’єктива 15. З цією метою з кроком у  $15^\circ$  повертались фазові пластинки, що встановлені на виходах перетворювачів поляризації 7 та 11. Поворот вектора поляризації променів був еквівалентним зміні напрямку приймання розсіяного випромінювання.

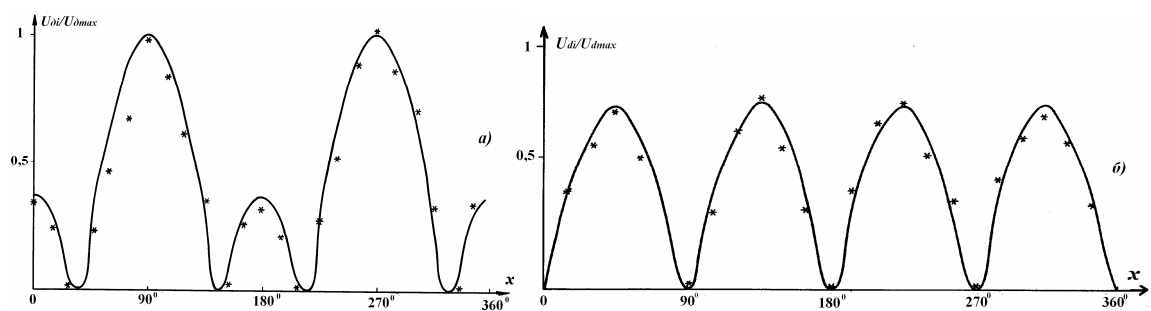


Рис. 6. Залежності  $(U_{oi} / U_{dmax}) = f(\chi)$ : а – при лінійній узгодженій поляризації лазерних променів; б – при взаємно ортогональній поляризації; \* – експериментальні результати

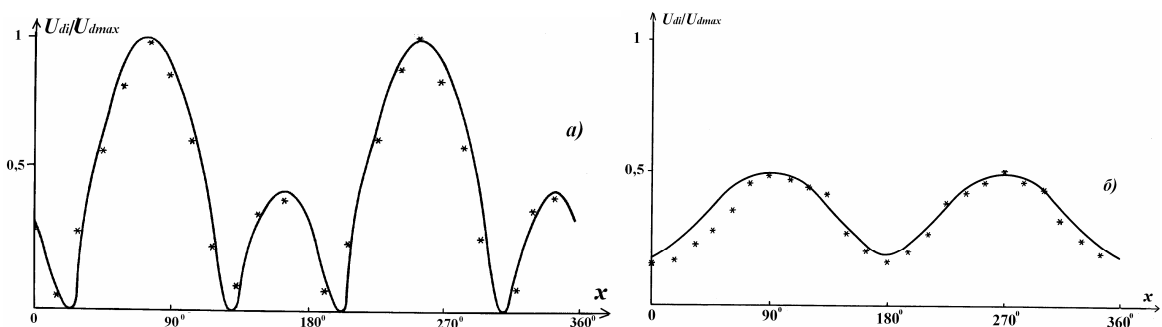


Рис. 7. Залежності  $(U_{oi} / U_{dmax}) = f(\chi)$ : а – при поляризації лазерних променів з кутом між електричними векторами  $30^\circ$ ; б – один промінь має лінійний стан поляризації, а інший – круговий; \* – експериментальні результати

Порівняння результатів експерименту з теоретичними залежностями показало їх добре узгодження. Розбіжності між теоретичними та експериментальними результатами пояснюються тим, що розрахунки були проведені для випадку приймання розсіяного випромінювання в малій кутовій апертурі  $\Delta\Omega_i = 1^\circ$ , в межах якої стан поляризації випромінювання змінюється несуттєво. В експерименті апертура прийому була суттєво більше  $\Delta\Omega = 4^\circ \times 7,5^\circ$ . Тому стан поляризації та інтенсивність розсіяних променів відрізнялись від розрахункових.

Було експериментально підтверджено, що при взаємно ортогональній поляризації лазерних променів за відсутності інтерференційної картини в зоні вимірювання, в певних напрямках прийому на виході фотоприймача утворюється доплерівський сигнал, амплітуда якого має такий самий порядок, як і при узгодженому стані поляризації променів.

Таким чином при проектуванні ЛДВШ потрібно враховувати вплив на характеристики доплерівського сигналу як ступеня узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю, так і станом поляризації.

На основі встановлених особливостей зміни сигналу у ЛДВШ на зустрічних променях можна побудувати схему приладу, в якій постійна складова доплерівського сигналу компенсується.

Компенсація постійної складової досягається рахунок наступного: незалежно від розміру мікрочастинки та її оптичних властивостей, для будь-яких напрямків приймання розсіяного випроміню-

вання, які відрізняються на  $90^\circ$ , доплерівські сигнали знаходяться у протифазі, а їх амплітуди рівні. Це має місце, коли лазерні промені мають круговий стан поляризації.

Схема такого ЛДВШ представлена на рис. 8.

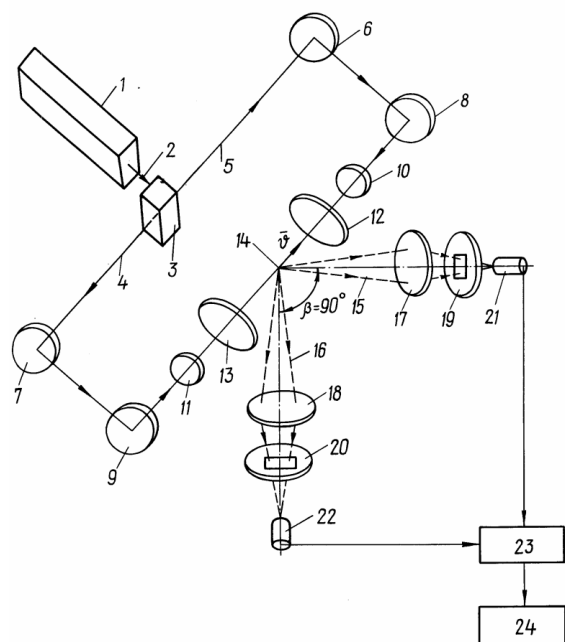


Рис. 8. Лазерний доплерівський вимірювач швидкості із зустрічними променями, в якому відбувається компенсація постійної складової сигналу

Випромінювання 2 лазера 1, яке лінійно поляризоване, поділяється оптичним елементом 3 на два променя 4 та 5. Ці промені за допомогою дзеркал 6, 7, 8, 9 та об'єктивів 12, 13 направляються назустріч один до одного. Фазові пластинки 10 та 11 орієнтовані таким чином, щоб у зоні вимірювання назустріч один одному розповсюджувалися два променя, що мають круговий взаємно ортогональний стан поляризації. Розсіяне випромінювання 15 та 16 збирається об'єктивами 12, 13 в межах діафрагм 17 та 18 та спрямовується на фотоприймачі 21 та 22. Доплерівські сигнали на виходах фотоприймачів рівні за амплітудою та знаходяться у протифазі. Ці сигнали надходять на диференціальний підсилювач 23, на виході якого утворюється тільки синфазна високочастотна складова. Далі відфільтрований від завад сигнал вимірюється вимірювачем доплерівської частоти 24. Випадкові дробові завади віднімаються у диференційному підсилювачі та будуть дорівнювати нулю.

#### Висновки

Результати досліджень показали, що характеристики доплерівського сигналу суттєво залежать як від стану поляризації лазерних променів, так і від напрямку прийому розсіяного випромінювання.

Крім того, при взаємно ортогональній поляризації лазерних променів в зоні вимірювання не утворюється інтерференційна картина. Незважаючи на це є напрямки прийому, в яких розсіяні хвилі повністю узгоджені за станом поляризації. Цей результат підтверджений експериментально.

Результати теоретичних досліджень підтверджені експериментально, причому експериментальні дані добре узгоджені з теоретичними розрахунками. Це дає можливість зробити наступний висновок.

При проектуванні лазерних доплерівських вимірювачів швидкості потрібно враховувати вплив на глибину модуляції та відношення сигнал/завада доплерівського сигналу як ступінь узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю, так і за станом поляризації. Для конкретної структури ЛДВШ та оптичних властивостей мікрочастинок, що вводяться у потік, необхідно розрахувати ступінь узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації. Потім потрібно визначити напрямок прийому розсіяного випромінювання або величину кутової апертури приймальної діафрагми з максимально можливим ступенем амплітудного та поляризаційного узгодження розсіяного випромінювання. Таким чином можна підвищити глибину модуляції та відношення сигнал/ завада доплерівського сигналу, точність вимірювання його частоти та зменшити похибку вимірювання швидкості потоку.

Подальший напрямок роботи полягає у визначенні шляхів зменшення впливу стану поляризації розсіяного випромінювання на характеристи-

ки сигналу. Важливо також розглянути вплив фази окремих сигналів, що утворюються при прийомі випромінювання в різних напрямках на глибину модуляції та відношення сигнал/завада.

#### Література

- [1] H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea, *Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] W. Merzkirch, D. Rockwell, C. Tropea, *Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [3] M. R. Yaacob, R. Slander, "A novel laser Doppler anemometer (LDA) for high-accuracy turbulence measurements", *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 256-274, 2019. DOI: [10.48550/arXiv.1905.08066](https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08066).
- [4] D. M. Liu, Y. Z. Zhao, Z. G. Zuo1, "Experimental research on flow field in the draft tube of pump turbines based on LDV", in *29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems/IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 240, 2010. DOI: [10.1088/1755-1315/12/1/012044](https://doi.org/10.1088/1755-1315/12/1/012044).
- [5] F. Durst, "Scattering phenomena and their application in optical anemometry", *J of Appl Math and Phys*, 24, pp. 619-643, 1973. DOI: [10.1007/BF01588163](https://doi.org/10.1007/BF01588163).
- [6] J. F. Meyers "Development of Doppler global velocimetry as a flow diagnostics tool". *Measurement Science and Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 769-783, 1995. DOI: [10.1615/JFlowVisImageProc.v11.i4.70](https://doi.org/10.1615/JFlowVisImageProc.v11.i4.70)
- [7] Laser Doppler Anemometry (LDA) System for Fluid Mechanics. Dantec Dynamics. [Online]. Available: <https://www.DantecDynamics.com>
- [8] L. Lading, "Spectrum analysis of LDA signals", in *Proc Int Specialists Meeting on the Use of Computers in Laser Velocimetry*, ISL, 1987, France: paper 20.
- [9] Y. Ikeda, M. Nishigaki, Ippommatsu, T. Hosokawa, "Optimum seeding particles for successful LDV measurements", in *Proc 6th Int Symp on Appl of Laser Techn to Fluid Mech*, 1992, Lisbon, Portugal: paper 32.2. DOI: [10.1243/PIME\\_PROC\\_1996\\_210\\_245\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1996_210_245_02).
- [10] F. Durst, C. Tropea, "Digital processing of LDA-signals by means of a transient recorder and a computer", in *Symp Long and Short Range Opt Vel Meas*, 1980, ISL, France: pp. 1-11.
- [11] D. M. Robinson, W. P. Chu, "Diffraction analysis of Doppler signal characteristics for a cross-beam laser Doppler velocimeter", *Appl. Opt.*, vol.2, no. 9, pp. 2177-2183, 1975.
- [12] W. M. Farmer, "Visibility of large spheres observed with a laser velocimeter: a simple model", *J. Appl. Opt.*, vol. 19, no. 21, pp. 3660 – 3667, 1980. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-19-21-3660>.

- [13] Takeo Takashi, Hattori Hajime, "Visibility analysis of laser Doppler anemometry for spherical particles smaller than several light wavelengths", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 29, no. 2, pp. 419 – 426, 1990.
- [14] J. D. Pendleton, "Mie and reflection theory comparison for particle sizing with the laser velocimeter", *J. Appl. Opt.*, vol. 21, no. 4, pp. 684 – 688, 1982. DOI: 10.1364/AO.21.000684.
- [15] G. Gouesbet G. Grehan, *Generalized Lorenz-Mie Theories*. Berlin Heidelberg Springer-Verlag, 2011.
- [16]. В.М. Дивнич, "Підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра узгодженням розсіяних хвиль за інтенсивністю," Вісник НТТУ «КПІ». Серія Приладобудування, Вип. 54(2), с. 40–44, 2017.
- [17]. Seed particle generators. Oil droplet generator Model 9307. [Online]. Available: <http://www.tsi.com>. Precisions measurement instruments.

UDC 681.78.621.378: 533.6

**M. P. Dyvnych***State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine***FEATURES OF SIGNAL FORMATION IN A LASER DOPPLER VELOCITY METER WITH INCIDENT BEAMS**

For a laser Doppler velocity meter (LDV) with incident beams, calculations of the relative amplitude of the Doppler signal, the coefficients of amplitude and polarization matching of scattered radiation for the linearly matched and mutually orthogonal polarization states of laser beams were performed based on the scattering theory of G.A. Mi. Calculations were also performed for the circularly matched, circularly mutually orthogonal polarization states of the beams and for the case when the angle between the electric vectors of the beams is 300 and when one beam has a linear and the other a circular polarization state. It was established that with mutually orthogonal polarization of the beams, when no interference pattern is formed in the velocity measurement zone, there are reception directions where there is complete matching of the scattered radiation by the polarization state. The theoretical results were confirmed on an experimental setup of a LDV with counter-beams, in which polarization converters were additionally installed. Based on the results obtained, a structure of a LDV with counter-beams was proposed, in which the constant component of the Doppler signal is compensated. It is recommended that when designing laser Doppler velocity meters, it is necessary to take into account the influence on the modulation depth and the signal/noise ratio of the Doppler signal of both the degree of matching of the scattered radiation by intensity and by the polarization state. For a specific LDV structure and optical properties of microparticles introduced into the flow, it is necessary to calculate the degree of matching of the scattered radiation by intensity and polarization state. Then it is necessary to determine the direction of reception of scattered radiation or the value of the angular aperture of the receiving diaphragm with the maximum possible degree of amplitude and polarization matching of scattered radiation. In this way, it is possible to increase the modulation depth and signal-to-noise ratio of the Doppler signal, the accuracy of its frequency measurement and reduce the error of flow velocity measurement.

**Keywords:** laser, Doppler, measurement, velocity, polarization, signal.

*Надійшла до редакції  
07 січня 2026 року*

*Рецензовано  
14 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).