

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ СИГНАЛУ ЛАЗЕРНОГО ВИМІРЮВАЧА ШВИДКОСТІ ВІД НАПРЯМКУ ПРИЙОМУ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Dyvnych M.P., Maliuzhenko M.V. Study of the nature of the change in the signal of a laser velocity meter depending on the direction of radiation reception. The study of the nature of the change in the signal parameters of a laser Doppler velocity meter depending on the direction of scattered radiation reception was carried out. The features of the change in the parameters of the Doppler signal depending on the direction of scattered radiation reception were established for the case when the laser beams have a linearly coherent, linear mutually orthogonal, circularly coherent and circularly mutually orthogonal polarization state. The obtained results were experimentally verified. It was experimentally confirmed that due to the fact that the phase of the Doppler signal changes its sign to the opposite with linearly coherent polarization of the laser beams, mutual compensation of the signals can be observed. This can lead to the fact that the Doppler signal will have a low modulation depth and signal/noise ratio. The results of the study can be used in the design of differential-type laser Doppler velocity meters.

Keywords: laser, speed, measurement, intensity, polarization, phase

Дивнич М.П., Малюженко М.В. Дослідження характеру зміни сигналу лазерного вимірювача швидкості від напрямку прийому випромінювання. Проведено дослідження характеру зміни параметрів сигналу лазерного доплерівського вимірювача швидкості в залежності від напрямку прийому розсіяного випромінювання. Встановлені особливості зміни параметрів доплерівського сигналу від напрямку прийому розсіяного випромінювання для випадків коли лазерні промені мають лінійний узгоджений, лінійний взаємно ортогональний, круговий узгоджений та круговий взаємно ортогональний стан поляризації. Проведена експериментальна перевірка отриманих результатів. Експериментально підтверджено, що за рахунок того, що фаза доплерівського сигналу змінює свій знак на протилежний при лінійній узгодженій поляризації лазерних променів, може спостерігатись взаємна компенсація сигналів. Це може привести до того, що доплерівський сигнал буде мати низьку глибину модуляції та відношення сигнал/завада. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні лазерних доплерівських вимірювачів швидкості диференціального типу.

Ключові слова: лазер, швидкість, вимірювання, інтенсивність, поляризація, фаза

Вступ

Для визначення швидкості, висоти, дальності польоту, довжини розбігу та пробігу льотних якостей літального апарату (стійкості, керованості та інших характеристик) потрібно знати результуючі аеродинамічні сили та моменти, що діють на літальний апарат при різних швидкостях польоту. З цією метою проводять дослідження моделей літальних апаратів у аеродинамічних трубах.

Для визначення середніх та миттєвих швидкостей потоку навколо моделі літального апарату використовують методи, що засновані на вимірюванні швидкості мікрочастинок, що введені в потік: вимірювання швидкості шляхом трасування потоку іонами, вимірювання швидкості за допомогою мікрочастинок що світяться, PIV метод [1] а також лазерний доплерівський метод вимірювання швидкості [2,3].

Лазерні доплерівські вимірювачі швидкості (ЛДВШ) проводять вимірювання в локальній області аеродинамічного потоку тому для визначення поля швидкості навколо моделі їх встановлюють на три координатний пристрій, який переміщує прилад.

У ЛДВШ використовується не прямий метод – вимірюється не швидкість потоку, а швидкість мікрочастинок, що рухаються в ньому. Приймається, що швидкість мікрочастинок дорівнює швидкості потоку. Але при проходженні крізь скачки ущільнення, при сильно викривлених лініях течії потоку, за рахунок інерції та дії сили тертя, швидкість мікрочастинок навіть малого діаметру може відрізнятись від швидкості потоку.

Для зменшення методичної похибки, що викликана відставання мікрочастинок від потоку, в нього штучно вводять мікрочастинки заданого розміру за допомогою генераторів мікрочастинок [4]. Діаметр таких мікрочастинок зазвичай складає від 1 до 4 мкм.

В ЛДВШ використовуються аргонні лазери, які працюють на довжинах хвиль λ 0,4880 і 0,5145 мкм що мають потужність у декілька Вт. Мікрочастинки мають малий діаметр та рухаються у аеродинамічній трубці зі швидкостями від 30 до 70 м/с.

В приладі диференціального типу [5] зона вимірювання швидкості формується шляхом перетинання двох лазерних променів. Вона має форму еліпсоїда обертання та в залежності від кута між лазерними променями γ має діаметр від 50 до 200 мкм. Тому імпульсний доплерівський сигнал може має тривалість в діапазоні від 10 до 1 μ 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.

Аналіз останніх досліджень. Спрощена схема ЛДВШ диференціального типу зображена на рис. 1. Зона вимірювання швидкості потоку 5 формується двома лазерними променями, що перетинаються під кутом γ . Мікрочастинка перетинає зону вимірювання та розсіює лазерне випромінювання, яке збирається приймальною оптикою 8 в кутовій апертурі $\Delta\Omega$ та направляється на фотоприймач. Сигнал на виході фотоприймача має форму гаусового імпульсу, який заповнений високочастотною складовою f_d , що пропорційна швидкості, з якою рухається мікрочастинка:

$$f_d = \frac{2\bar{V}}{\lambda} \sin(\gamma/2) \cos \chi$$

де: χ - кут між вектором швидкості \bar{V} та віссю Ox .

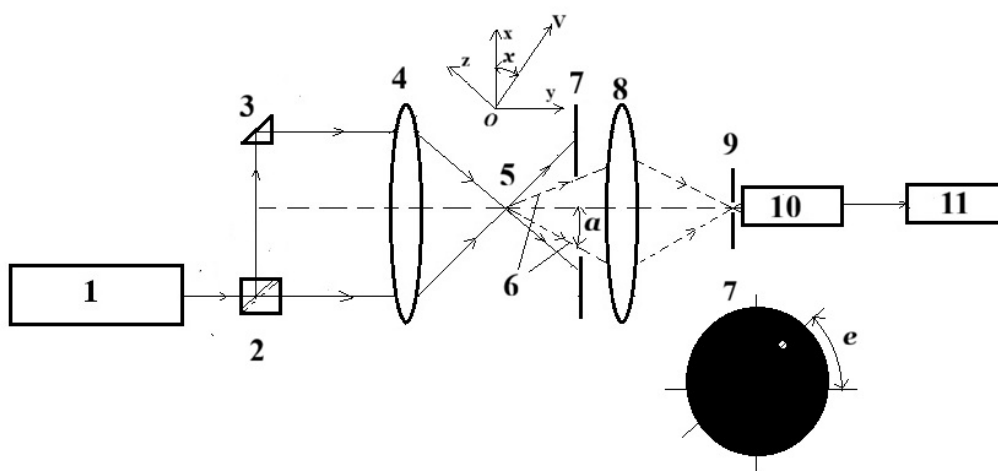


Рис. 1. Спрощена схема ЛДВШ диференціального типу: 1 – лазер; 2 – світло роздільний елемент; 3 – призма; 4,8 – об’єктиви; 5 – зона вимірювання; 6 – розсіяне мікрочастиною випромінювання; 7 – приймальна діафрагма; 9 – фоновіа діафрагма; 10 – фотоприймач; 11 – вимірювач частоти доплерівського сигналу.

Якщо в ЛДВШ диференціального типу приймати розсіяне випромінювання в межах кутової апертури $\Delta\Omega_i$, в якій інтенсивність та стан поляризації розсіяного випромінювання змінюються несуттєво, то амплітуда доплерівського сигналу на виході фотоприймача буде дорівнювати:

$$U_{di} = \frac{2e\eta k_1}{h\nu} R\Delta S_i \sqrt{I_{s1} I_{s2} k_{pi}} \cos(\omega_d t + \varphi_{di}).$$

де: e, h, ν – заряд електрону, постійна Планка та частота випромінювання лазера; η, k_1, R – квантова ефективність, коефіцієнт підсилення та опір навантаження фотоприймача, ΔS_i – площа, в межах якої збирається розсіяне випромінювання; $I_{s1i} I_{s2i}$ – інтенсивності розсіяного мікрочастинкою випромінювання від лазерних променів ЛДВШ; k_{pi} – коефіцієнт узгодження розсіяного випромінювання за станом поляризації; ω_d – кругова доплерівська частота; φ_{di} – фаза доплерівського сигналу.

Коефіцієнт узгодження розсіяного випромінювання за станом поляризації можна визначити як [6]:

$$k_{pi} = \rho'_{11}\rho''_{11} + \rho'_{12}\rho''_{21} + \rho'_{21}\rho''_{12} + \rho'_{22}\rho''_{22}$$

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

$$\rho'_{11} = \frac{CE_{\theta 1i}^2}{I_{s1i}}, \rho'_{21} = \frac{CE_{\theta 1i}E_{\varphi 1i}}{I_{s1i}}, \rho'_{12} = \frac{CE_{\theta 1i}E_{\varphi 1i}}{I_{s1i}}, \rho'_{22} = \frac{CE_{\varphi 1i}^2}{I_{s1i}}.$$

де: $[\rho''_{ij}]$ – відповідні елементи матриці когерентності другої розсіяної хвилі, які визначаються через $E_{\varphi 2i}, E_{\theta 2i}$; $E_{\varphi 1i}, E_{\theta 1i}$ та $E_{\varphi 2i}, E_{\theta 2i}$ – електричні вектори першої та другої розсіяних хвиль, що мають еліптичний стан поляризації, які розраховуються за формулами теорії розсіяння Г.А. Мі [7].

Фазу доплерівського сигналу можна визначити за наступною формулою:

$$\varphi_{di} = \text{Arctg}\left(\frac{E_{\varphi 1i}^2 E_{\varphi 2i}^2 \sin \Delta_{1i} + E_{\theta 1i}^2 E_{\theta 2i}^2 \sin \Delta_{2i}}{E_{\varphi 1i}^2 E_{\varphi 2i}^2 \cos \Delta_{1i} + E_{\theta 1i}^2 E_{\theta 2i}^2 \cos \Delta_{2i}}\right).$$

де: Δ_{1i}, Δ_{2i} – різниці фаз поміж φ -ми та θ -ми складовими першої та другої розсіяної хвилі.

Якщо прийом розсіяного випромінювання в ЛДВШ здійснювати в межах великого апертурного кута, то потрібно враховувати, що доплерівські сигнали, які утворюються при прийомі випромінювання під різними кутами будуть мати різні фази.

За рахунок «не сфазованості» окремих сигналів буде спостерігатись зменшення амплітуди доплерівського сигналу. Ступінь впливу фази окремих сигналів характеризується коефіцієнтом фазового узгодження, який визначається як [8]:

$$k_f = \frac{\left| \int_{\Delta\Omega} \sqrt{k_{pi} I_{s1i} I_{s2i}} e^{-j\varphi_{di}} d\Omega \right|}{\int_{\Delta\Omega} \sqrt{k_{pi} I_{s1i} I_{s2i}} d\Omega}.$$

Відношення сигнал/завада при прийомі розсіяного випромінювання у малій кутовій апертурі $\Delta\Omega_i$ можна визначати за наступною формулою:

$$S / N_i = \frac{\eta}{hv\Delta f} k_{ai} k_{pi} \sqrt{I_{s1i} I_{s2i}} \Delta S_i.$$

де: k_{ai} – коефіцієнт узгодження розсіяних хвиль за інтенсивністю [9]:

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

де I_{s1i} та I_{s2i} – інтенсивності розсіяних хвиль від першого та другого лазерного променя.

Коефіцієнт глибини модуляції або видність доплерівського сигналу при прийомі розсіяного випромінювання в малій кутовій апертурі $\Delta\Omega_i$ залежить від ступеня узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю та за станом поляризації:

$$V_i = k_{ai} k_{pi}$$

Якщо розсіяне випромінювання приймається в межах великої апертури $\Delta\Omega$ то на глибину модуляції та відношення сигнал/завада впливає також ступінь узгодження окремих доплерівських сигналів за фазою:

$$V = k_a k_p k_f; S/N = \frac{\eta}{h\nu\Delta f} k_a k_p^2 k_f^2 \int_{\Delta\Omega} \sqrt{I_{s1i} I_{s3i} r_i^2} d\Omega.$$

Ступень амплітудного та поляризаційного узгодження розсіяного випромінювання в цьому випадку дорівнюють:

$$k_a = \frac{2 \int_{\Delta\Omega} \sqrt{I_{s1i} I_{s2i}} d\Omega}{\int_{\Delta\Omega} I_{s1i} d\Omega + \int_{\Delta\Omega} I_{s2i} d\Omega}; k_p = \frac{\int_{\Delta\Omega} \sqrt{(E_{\phi 1i}^2 + E_{\theta 1i}^2)(E_{\phi 2i}^2 + E_{\theta 2i}^2)} k_{pi} d\Omega}{\int_{\Delta\Omega} \sqrt{(E_{\phi 1i}^2 + E_{\theta 1i}^2)(E_{\phi 2i}^2 + E_{\theta 2i}^2)} d\Omega}.$$

Постановка завдання. При проектуванні ЛДВШ потрібно враховувати вплив на характеристики доплерівського сигналу як ступеня узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю, станом поляризації та фазою.

Тому важливо визначити характер зміни цих параметрів доплерівського сигналу в залежності від напрямку прийому розсіяного випромінювання.

Метою роботи є дослідження особливості зміни параметрів доплерівського сигналу ЛДВШ диференціального типу в залежності від напрямку прийому розсіяного випромінювання.

Виклад основного матеріалу дослідження

В ЛДВШ диференціального типу приймальна (апертурна) діафрагма 7 встановлюється таким чином, що її центр знаходиться на бісектрисі кута між лазерними променями (див. рис. 1).

На основі теорії розсіяння Г.А. Мі були виконані розрахунки відносної амплітуди доплерівського сигналу U_{di}/U_{dimax} , коефіцієнтів поляризаційного k_{pi} та амплітудного узгодження k_{ai} для різних станів поляризації лазерних променів. Положення приймальної апертури $\Delta\Omega_i$ в межах діафрагми 7 задавалось кутами α та ε (див. рис. 1). Приклади таких розрахунків наведені на рис. 2.

Для ЛДВШ диференціального типу були встановлені особливості зміни параметрів доплерівського сигналу в залежності від напрямку прийому розсіяного випромінювання та стану поляризації лазерних променів:

1. Лазерні промені мають лінійний узгоджений стан поляризації.

В напрямках прийому розсіяного випромінювання, які дзеркально симетричні площині, що утворена лазерними променями (площина Oxy рис. 1) та в перпендикулярній до неї площині, що проходить через бісектрису кута γ , наступні параметри $U_{di}, k_{ai}, k_{pi}, S/N_i$ рівні. Фази сигналів також приймають однакове значення, але для напрямків прийому дзеркально симетричних відносно площині, що проходить через бісектрису кута γ фаза змінює свій знак на протилежний $\varphi_{di} = -\varphi_{di}$ (див. рис. 2 а та 4 а).

2. Лазерні промені мають лінійний взаємно ортогональний стан поляризації.

В напрямках прийому розсіяного випромінювання, які дзеркально симетричні відносно площині Oxy наступні параметри $U_{di}, k_{ai}, k_{pi}, S/N_i$ рівні. Фази доплерівських сигналів знаходяться у протилежній фазі φ_{di} та $\varphi_{di} + 180^\circ$ (див. рис. 2 б та 4 б).

Тому, якщо приймати розсіяне випромінювання у повній кутовій апертурі $\Delta\Omega$, то амплітуда доплерівського сигналу на виході фотоприймача буде дорівнювати нулю не в наслідок того, що лазерні промені мають взаємно ортогональний стан поляризації і в зоні вимірювання не утворюється інтерференційна картина, із-за того, що сигнали знаходяться в протилежній фазі.

Для того, щоб при такому стані поляризації отримати сигнал потрібно одну частину апертури діафрагмувати.

3. Лазерні промені мають круговий узгоджений стан поляризації.

В напрямках прийому розсіяного випромінювання, які центральне симетричні відносно бісектриси кута γ наступні параметри $U_{di}, k_{ai}, k_{pi}, S/N_i$ рівні, а фази сигналів для напрямків прийому які дзеркально симетричні відносно площині Oxy змінюють свій знак на протилежний $\varphi_{di} = -\varphi_{di}$ (див. рис. 3 а та 4 в).

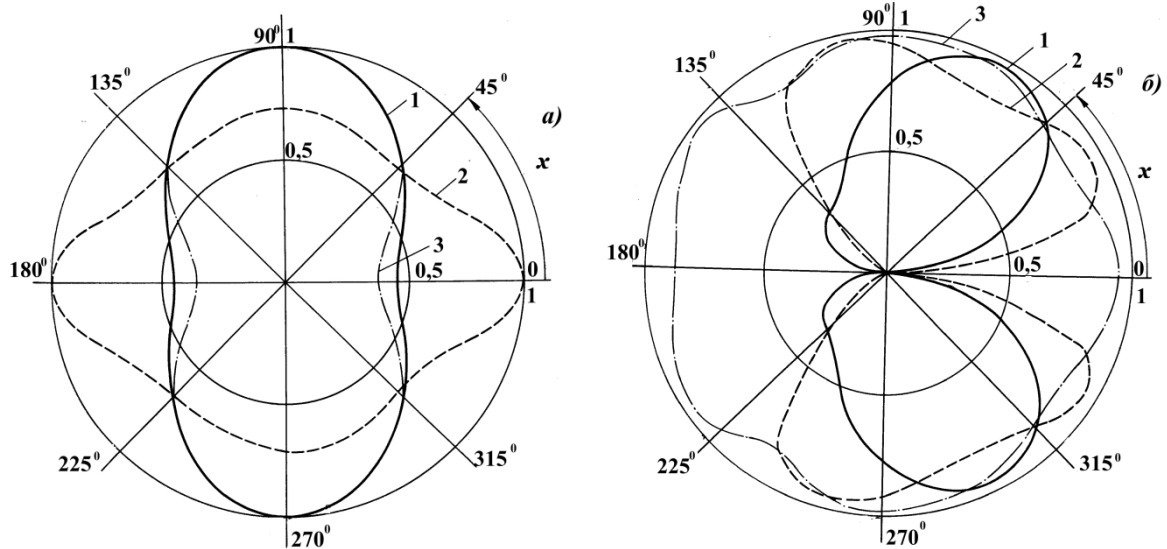


Рис. 2. Залежності $U_{di} / U_{dimax} = f(\varepsilon)$ (1); $k_{pi} = f(\varepsilon)$ (2); $k_{ai} = f(\varepsilon)$ (3) при $\alpha = 2^\circ$ для лінійного узгодженого стану поляризації лазерних променів (а) та лінійного взаємно ортогонального стану поляризації лазерних променів (б)

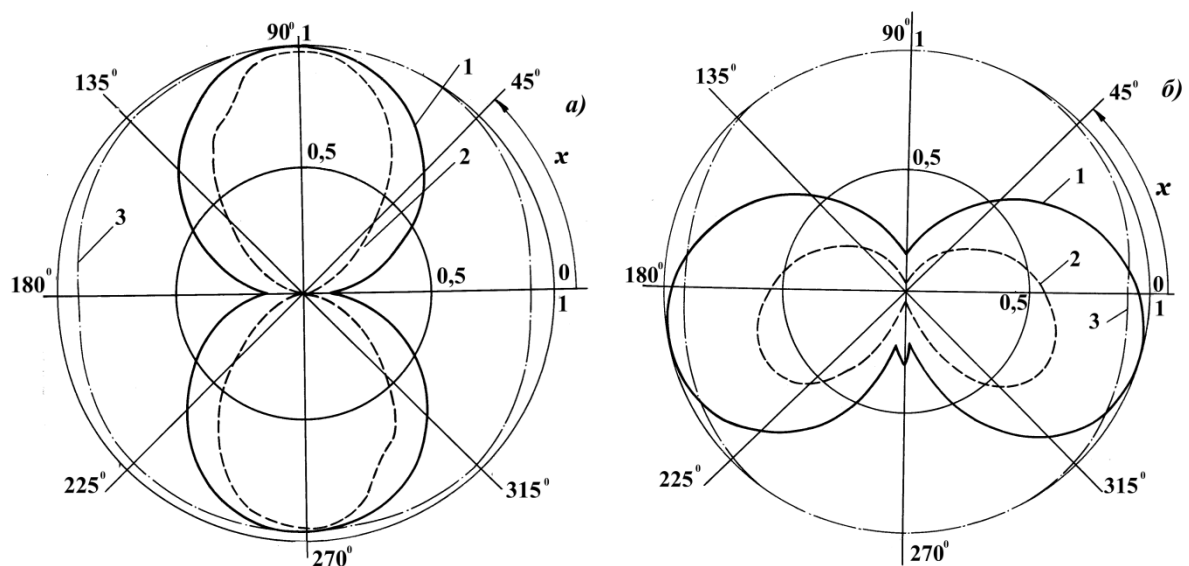


Рис. 3. Залежності $U_{di} / U_{dimax} = f(\varepsilon)$ (1); $k_{pi} = f(\varepsilon)$ (2); $k_{ai} = f(\varepsilon)$ (3) при $\alpha = 2^\circ$ для кругового узгодженого стану поляризації лазерних променів (а) та кругового взаємно ортогонального стану поляризації лазерних променів (б)

4. Лазерні промені мають круговий взаємно ортогональний стан поляризації.

В напрямках прийому розсіяного випромінювання, які дзеркально симетричні відносно площині, що проходить через бісектрису кута γ наступні параметри $U_{di}, k_{ai}, k_{pi}, S/N_i$ рівні. А фази сигналів рівні але змінюють свій знак на протилежний $\varphi_{di} = -\varphi_{di}$ (див. рис. 3 б та 4 г).

Для експериментальної перевірки отриманих результатів була створена установка ЛДВШ диференціального типу (рис. 5). В ній за допомогою об'єктивів 5 та 6 в зону вимірювання 7 під кутом $\gamma = 14^\circ$ направлялись два лазерних променя.

Промені лазера мали лінійний узгоджений стан поляризації. В зоні вимірювання 7 розміщувалось предметне скло мікроскопу. На предметному склі знаходились мікрочастинки полістиролу діаметром 4 мкм. Мікрочастинки були розміщені на предметному склі із водяного розчину шляхом випаровування. Предметне скло закріплювалось на штативі стілець, якого можна було переміщувати у горизонтальній площині.

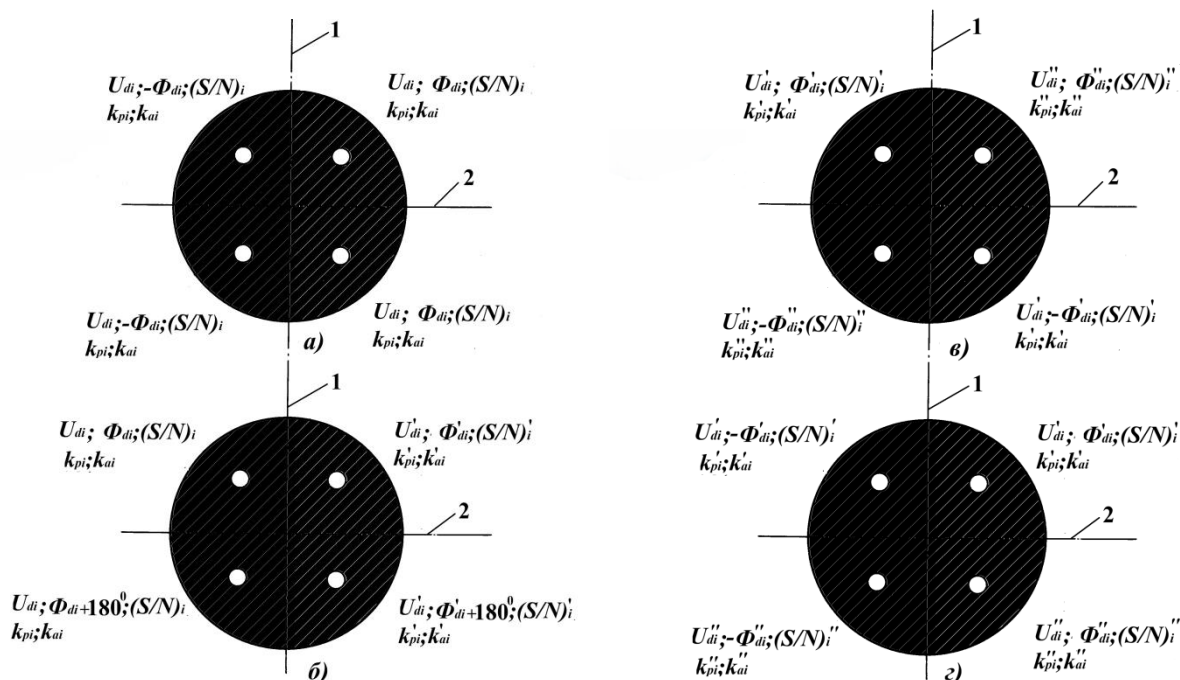


Рис. 4. Особливості зміни параметрів доплерівського сигналу в залежності від напрямку прийому розсіяного випромінювання для різних станів поляризації лазерних променів: а – лінійний узгоджений; б – лінійний взаємно ортогональний; в – круговий узгоджений; г – круговий взаємно ортогональний; 1 – площина, що проходить через бісектрису кута γ ; 2 – площина Oxy

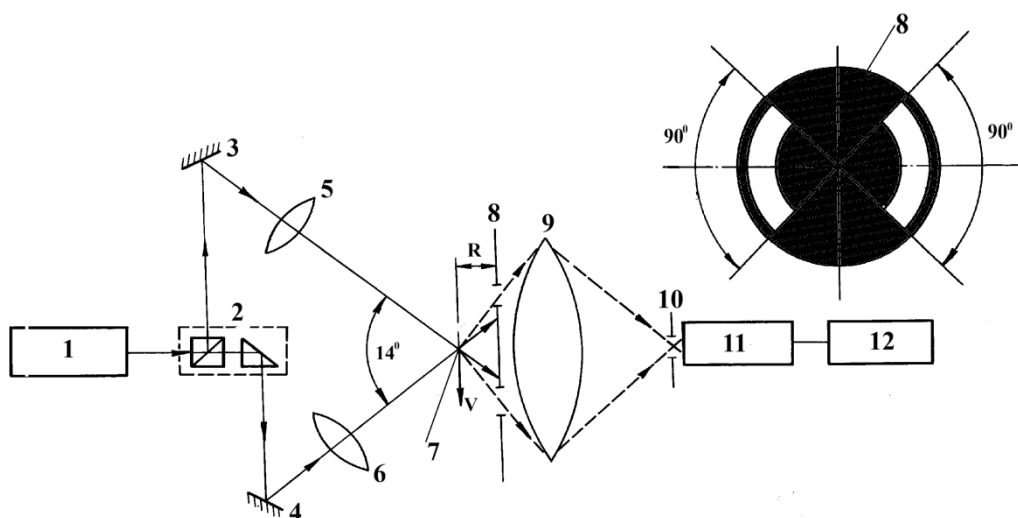


Рис. 5. Схема експериментального ЛДВШ: 1 – лазер; 2 – світло роздільний оптичний елемент; 3,4 – діелектричні дзеркала; 5,6 та 9 об'єктиви; 7 – зона вимірювання швидкості; 8 – приймальна діафрагма; 10 – фоновіа діафрагма; 11 – фотоелектронний помножувач; 12 – запам'ятовуючий осцилограф

Перед об'єктивом 9 знаходилась приймальна діафрагма 8 з двома отворами у вигляді частини кільця. Внутрішній діаметр отвору діафрагми дорівнював $8,75 \cdot 10^{-2} R$, зовнішній діаметр $1,75 \cdot 10^{-1} R$ (R – відстань від зони вимірювання 7 до діафрагми 8). Центральний кут кожного отвору дорівнював 90° .

За допомогою експериментальної установки були проведені вимірювання амплітуди доплерівського сигналу два двох випадків:

- на фотоприймач направляється розсіяне випромінювання від одного отвору приймальної діафрагми 9;
- на фотоприймач направляється розсіяне випромінювання від двох отворів приймальної діафрагми 9.

В першому випадку в результаті проведення багаторазових вимірювань амплітуда доплерівського сигналу дорівнювала $U_d^1 = (0,1 \pm 0,01)B, P = 0,95$.

В другому випадку коли на фотоелектронний помножувач направлялось розсіяне випромінювання від двох отворів, незважаючи на те, що інтенсивність розсіяного випромінювання збільшилась вдвічі, мало місце зменшення амплітуди доплерівського сигналу. Напряга такого сигналу в результаті багаторазових вимірювань дорівнювала $U_d^2 = (0,011 \pm 0,001)B, P = 0,95$.

Такий результат пояснюється наступним чином. Отвори діафрагми були дзеркально симетричні площині Oxy та площині, що проходить через бісектрису кута між променями лазера.

Тому амплітуди доплерівських сигналів при прийомі випромінювання від кожного отвору були рівні, а фази мали протилежні знаки. За допомогою розрахунків було визначено що фази доплерівських сигналів для першого і другого отвору відповідно дорівнюють $\varphi_d^1 = 88^{\circ}$ та $\varphi_d^2 = -88^{\circ}$. За цих обставин сигнали знаходяться майже в протифазі. Відношення амплітуди сигналу при прийомі випромінювання в межах двох отворів до амплітуди сигналу при прийомі в межах одного отвору повинно дорівнювати - $(U_d^1 + U_d^2) / U_d^1 = 0,09$. Співвідношення сигналів, яке отримано експериментально, склало - $(U_d^{1e} + U_d^{2e}) / U_d^{1e} = 0,11$.

Таким чином експериментальні результати показали прийнятне узгодження з теоретичними розрахунками. Отримано, що сигнали майже компенсують один одного. Розбіжність між теоретичними даними та експериментом можна пояснити тим, що реальні розміри отворів мали незначне відхилення від тих для яких проводились теоретичні розрахунки.

Висновки

Проведено дослідження характеру зміни параметрів доплерівського сигналу ЛДВШ диференціального типу в залежності від напрямку прийому розсіяного випромінювання.

Встановлені особливості зміни параметрів доплерівського сигналу від напрямку прийому розсіяного випромінювання для випадків коли лазерні промені мають лінійний узгоджений, лінійний взаємно ортогональний, круговий узгоджений та круговий взаємно ортогональний стан поляризації.

Проведена експериментальна перевірка отриманих результатів. Експериментально підтверджено, що за рахунок того, що фаза доплерівського сигналу змінює свій знак на протилежний при лінійній узгодженій поляризації лазерних променів, може спостерігатись взаємна компенсація сигналів. Це може привести до того, що доплерівський сигнал буде мати низьку глибину модуляції та відношення сигнал/завада.

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні лазерних доплерівських вимірювачів швидкості диференціального типу.

Список використаної літератури:

1. Arroyo M. P., Hinsch K. D. Recent Developments of PIV towards 3D Measurements/ M. P. Arroyo, Springer, - 2008. - pp. 127-154.

2. Merzkirch W., Rockwell D., Tropea C. Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics./W. Merzkirch - Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2010.- 274 p.
3. Durst F., Jovanovic J., Sender J. LDA measurements in the near-wall region of a turbulent pipe flow/ F. Durst // Journal of Fluid Mechanics. – 1995. – v. 29. – p. 305-335.
4. Seed Particles and Particle Generators 10091 <https://tsi.com/discontinued-products/seed-particles-and-particle-generators-10091>.
5. Albrecht H.-E., Borys M., Damaschke N., Tropea C. Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques/ Albrecht H.-E.- Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.- 274 p.
6. Азарсков В.М., Дивнич В.М. Зменшення впливу поляризації розсіяного випромінювання на сигнал лазерного анемометра/В.М. Азарсков, В.М. Дивнич//Вісник інженерної академії наук України. - 2018. - №4. – С. 153-157.
7. Gouesbet G. Grehan G. Generalized Lorenz-Mie Theories./ G. Gouesbet Berlin Heidelberg Springer-Verlag, 2011. - 376 p.
8. Azarskov V., Dyvnych V. Modeling of a signal generated by microparticles moving in the aerodynamic flow/V. Azarskov, V. Dyvnych//Mathematical modeling and computing. - 2019. - v.6.- № 2 - PP. 173 – 178.

Автори статті

Дивнич Микола – к.т.н, доцент, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

ORCID: 0009-0000-6260-0069

Малюженко Михайло – к.т.н., доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0005-2935-8334

Authors of the article

Dyvnych Mykola – Candidate of Science (technical), Associate Professor, Kyiv Aviation Institute National University, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0000-6260-0069

Maliuzhenko Mykhailo – Candidate of Science (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0005-2935-8334

Надійшла до редакції: 15.04.2026

Прийнята до друку: 06.05.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Дивнич М.П., Малюженко М.В.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>