

T. Hural, M. Kyryliuk, M. Ovchar, V. Nastich*SDP SE «Arsenal», Kyiv, Ukraine***RESEARCH OF QUASIDYNAMIC CHARACTERISTICS OF RING LASER MIRROR WITH PIEZOCORRECTOR USING WHITE LIGHT INTERFEROMETER “RELIEF”**

The object of investigation are spherical mirrors of one- and two-membrane design, which are elements of ring lasers. Such lasers are used for various metrological purposes. Change in a shape or position of the laser cavity mirror substantially affects the stability of the frequency of the emergent radiation.

The aim of this work is researching of the dynamic characteristics of the membrane mirror using white light interferometer. Dynamic characteristics are meant as linear and angular displacements of a reflecting surface and its shape deformation. These characteristics make it possible to carry out an objective analysis of the different variants of membrane mirror design and optimize it.

There were two mirrors design have been researched: one-membrane and two-membrane type.

The results of prototypes parameters measurement have shown that reflecting surface undergoes linear and angular displacements and changes its radius of curvature.

Keywords: laser mirrors, ring laser, white light interferometer.

*Надійшла до редакції
03 липня 2017 року*

*Рецензовано
17 липня 2017 року*

© Гураль Т. І., Кирилюк М. Є., Овчар М. І., Настіч В. Н., 2017

УДК 621.378.5:525.:535.8

**ПІДВИЩЕННЯ ГЛИБИНИ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛУ ЛАЗЕРНОГО
ДОППЛЕРІВСЬКОГО АНЕМОМЕТРА УЗГОДЖЕННЯМ РОЗСІЯНИХ
ХВИЛЬ ЗА ІНТЕНСИВНІСТЮ**

Дивнич В. М.

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

E-mail: divnym@gmail.com

В роботі підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра (ЛДА) та точності вимірювання швидкості пропонується проводити за рахунок забезпечення узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю.

Для цього замість апертурної діафрагми пропонується встановлювати фільтр, що не пропускає до фотоприймача розсіяне випромінювання з низької ступеню узгодження.

Для визначення форми фільтру складена програма за допомогою якої можна за теорією Лоренца-Мі розрахувати складові розсіяних хвиль, значення коефіцієнта амплітудного узгодження та відності доплерівського сигналу.

Представлені форми фільтрів для ЛДА, що випускаються фірмами TSI Inc. та Intelligent Laser Application GmbH ILA GmbH.

Ключові слова: *лазер, анемометр, доплерівський, фільтр, інтенсивність.*

Вступ

В авіаційній, суднобудівній, космічній та інших галузях науки і техніки для дослідження потоків газів та рідин знайшли застосування лазерні доплерівські анемометри (ЛДА), які порівняно із традиційними засобами виміральної техніки мають вищу точність, швидкість дії та чутливість. ЛДА застосовуються для вимірювання швидкості дозвукових та надзвукових аеродинамічних потоків під час дослідження нових типів літальних апаратів та елементів їхньої конструкції, для дослідження

характеристик газових турбін, ударних хвиль, характеру течії рідини у пристінній області та в інших сферах [1].

ЛДА виготовляються рядом фірм, до яких відносяться TSI Inc. [2] (США) та Intelligent Laser Application GmbH ILA GmbH [3] (Німеччина).

Прилади, що пропонується виробниками, призначені для різноманітних застосувань в науці та техніці.

Особливістю роботи ЛДА є те що він безпосередньо вимірює не швидкість потоку, а швидкість мікрочастинки, що рухається одночасно

з потоком. Тому для забезпечення необхідної точності вимірювань одночасно з ЛДА застосовуються генератори однорідних мікрочастинок. Так фірма TSI Inc. випускає декілька моделей генераторів, що формують мікрочастилки нейлону, полістиролу, пустотілі скляні мікрочастилки різного діаметру.

Точність вимірювання швидкості за допомогою ЛДА залежить також і від точності вимірювання частоти доплерівського сигналу [4]. В свою чергу на точність вимірювання частоти сигналу впливає відношення сигнал/завада та коефіцієнт глибини модуляції (видність) сигналу. Для підвищення ступеня узгодження розсіяних хвиль за інтенсивністю в ЛДА лазерний промінь поділяють на дві рівні частини. Але забезпечити узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю таким чином не вдається. Це пояснюється тим, що мікрочастинка, яка знаходиться в вимірювальному об'ємі ЛДА, опромінюється двома лазерними променями під різними кутами і індикатриси розсіяння [5] від них не співпадають.

Постановка задачі

В ЛДА розсіяне мікрочастиною випромінювання збирається приймальною оптикою та перетворюється фотоприймачем в електричний сигнал, форма якого показана на рис. 1.

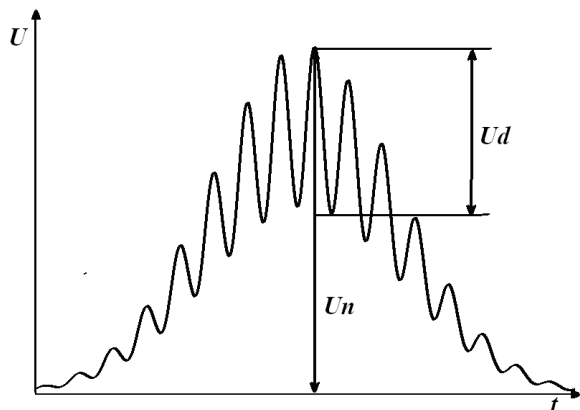


Рис. 1. Форма доплерівського сигналу при проходженні крізь вимірювальний об'єм однієї мікрочастинок; U_d – високо частотна доплерівська складова; U_n – постійна складова сигналу

Видність доплерівського сигналу визначається відношенням амплітуди змінної складової до амплітуди його постійної складової $V = U_d / U_n$.

Для визначення змінної та постійної складової доплерівського сигналу необхідно розрахувати інтенсивності розсіяного випромінювання від двох лазерних променів.

В роботі [6], теоретично та експериментально показано, що видність доплерівського сигналу залежить від співвідношення інтенсивності розсіяних мікрочастиною лазерних променів.

Ступень узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю, що приймається в межах апертурної діафрагми, характеризується коефіцієнтом, який може змінюватись від 0 до 1 [6]:

$$k_a = 2\sqrt{I_{s1}I_{s2}} / (I_{s1} + I_{s2}),$$

де: I_{s1}, I_{s2} – інтенсивності розсіяних хвиль від першого та другого лазерного променя.

Але в ЛДА диференціального типу [6] в кожному напрямку розповсюджуються дві розсіяні хвилі, що мають різну інтенсивність. Завдяки цьому значення k_a буде змінюватись в залежності від напрямку приймання розсіяного випромінювання. Діаметр сферичних мікрочастинок, які використовуються в ЛДА, становить 2 – 10 мкм. Тому розрахувати інтенсивність розсіяних хвиль можна за допомогою теорії розсіяння Лоренца-Мі.

Для забезпечення узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю пропонується визначити зони апертурної діафрагми ЛДА, в межах яких має місце низьке значення коефіцієнта амплітудного узгодження. Потім для підвищення видності доплерівського сигналу цю частину розсіяного випромінювання потрібно не пропускати до фотоприймача за допомогою фільтра, що встановлюється замість апертурної діафрагми ЛДА.

Розрахунок форми фільтра

Будемо вважати, що у вимірювальному об'ємі ЛДА в кожен момент часу знаходиться не більше однієї мікрочастинок (одночастинковий режим роботи ЛДА). Для розрахунку інтенсивності розсіяних хвиль використовуємо дві системи координат, які пов'язані з зондуючими променями ЛДА (рис. 2). Лінійно поляризовані лазерні промені розповсюджуються вдовж осей Oz_1 та Oz_2 . Положення апертурної діафрагми задається кутами θ_0 та φ_0 , а напрямки, в для яких визначаються складові розсіяних хвиль в межах апертурної діафрагми, задаються кутами ε та α . Приводимо дві системи координат до однієї. Для цього здійснюємо послідовно повороти системи координат Ox_2y_2 на кути φ_0 та θ_0 . Потім визначаємо кути під якими розповсюджуються розсіяні хвилі θ_{1i} , φ_{1i} та θ_{2i} , φ_{2i} .

Після цього можна визначити складові розсіяних хвиль, які при $r_i \gg \lambda$ дорівнюють:

$$\dot{E}_{\varphi_{ki}} = \frac{E_{k0} e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_1(\theta_{ki}) \sin e^{-j\delta_{ki}^k} e^{-j\nu_{ki} t},$$

$$\dot{E}_{\theta_{ki}} = \frac{E_{k0} e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_2(\theta_{ki}) \cos e^{-j\delta_{2i}^k} e^{-jv_k t},$$

де: $k = 1, 2$; E_{k0} – модулі напруженості електричного поля зондуючих променів; $E_1(\theta_{ki})$, $E_2(\theta_{ki})$ – модулі комплексних амплітуд розсіяних хвиль, які розраховуються по рекурентним формулам [6]; v_k – частоти розсіяних хвиль; δ_{1i}^k , δ_{2i}^k – початкові фази розсіяних хвиль які дорівнюють:

$$\delta_{1i}^k = \arctg \frac{\text{Im} E_1(\theta_{ki})}{\text{Re} E_1(\theta_{ki})}, \quad \delta_{2i}^k = \arctg \frac{\text{Im} E_2(\theta_{ki})}{\text{Re} E_2(\theta_{ki})}.$$

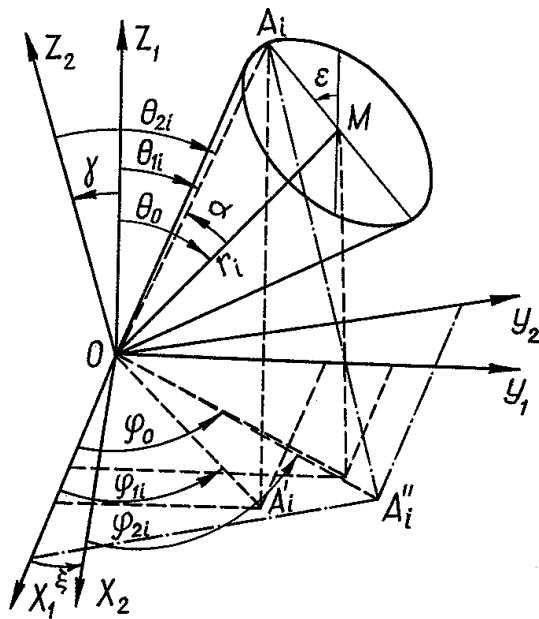


Рис. 2. Системи координат, в яких визначаються складові розсіяних хвиль

В результаті перетворення систем координат, що пов'язані із зондуючими променями, електричні вектори розсіяних хвиль $\dot{E}_{\varphi_{1i}}$, $\dot{E}_{\theta_{1i}}$, $\dot{E}_{\varphi_{2i}}$, $\dot{E}_{\theta_{2i}}$ знаходяться в одній площині але розвернути відносно один одного на деякий кут. Для подальших розрахунків необхідно привести складові другої розсіяної хвилі до першої за допомогою матриці:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{\varphi_3} \\ \dot{E}_{\theta_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{\varphi_2} \\ \dot{E}_{\theta_2} \end{bmatrix}.$$

Були визначені елементи матриці приведення:

$$\begin{aligned} b_{11} &= c_{21} a_{12} + c_{22} a_{22} + c_{23} a_{32}, \\ b_{12} &= c_{21} a_{13} + c_{22} a_{23}, \\ b_{21} &= c_{31} a_{12} + c_{32} a_{22} + c_{33} a_{32}, \\ b_{22} &= c_{31} a_{13} + c_{32} a_{23}, \end{aligned}$$

де:

$$\begin{aligned} a_{12} &= \cos \theta_2 \cos \varphi_2, \\ c_{21} &= c_1 \cos \xi + c_2 \sin \gamma \sin \xi + c_3 \sin \gamma \cos \xi, \\ a_{22} &= \sin \theta_2 \sin \varphi_2, \\ c_{22} &= -c_1 \sin \xi + c_2 \cos \gamma \cos \xi + c_3 \cos \gamma, \\ a_{32} &= \sin \varphi_2, \quad c_{23} = -c_2 \sin \gamma + c_3 \cos \gamma, \\ a_{13} &= -\sin \theta_2, \quad c_{31} = -c_4 \sin \gamma + c_5 \cos \gamma \cos \xi, \\ a_{23} &= \cos \varphi_2, \quad c_{32} = -c_4 \sin \xi, \quad c_{33} = -c_5 \sin \gamma, \end{aligned}$$

де:

$$\begin{aligned} c_1 &= \cos \theta_1 \cos \varphi_1, \quad c_4 = -\sin \varphi_1, \\ c_2 &= \sin \theta_1 \sin \varphi_1, \quad c_5 = \cos \varphi_1, \\ c_3 &= -\sin \theta_1, \end{aligned}$$

Після цього можна визначити коефіцієнт амплітудного узгодження розсіяних хвиль у випадку приймання розсіяного випромінювання в межах кутової апертури $\Delta\alpha$ [7]:

$$k_{ai} = 2\sqrt{I_{s1i} I_{s3i}} / (I_{s1i} + I_{s3i}),$$

де: $I_{s1i} = (E_{\varphi_{1i}}^2 + E_{\theta_{1i}}^2)$, $I_{s3i} = (E_{\varphi_{3i}}^2 + E_{\theta_{3i}}^2)$ – інтенсивність розсіяних хвиль при прийомі їх в кутовій апертурі $\Delta\alpha$ в межах якої можна вважати, що вони не змінюються. Розрахунки показали, що для мікрочастинок діаметром 1 – 10 мкм $\Delta\alpha$ можна прийняти рівним $7' 30''$.

Для визначення форми фільтра була написана програма (числове вирішення задачі розсіяння Лоренца-Мі можливо тільки за допомогою ЕОМ). За допомогою цієї програми можна розрахувати складові розсіяних хвиль, а також значення k_{ai} та відності доплерівського сигналу V . Розрахунки форми фільтра для конкретної схеми диференційного ЛДА можна проводити встановлюючи обмеження на ступінь узгодження розсіяних хвиль за інтенсивністю.

В якості прикладу на рис. 3 представлені форми фільтрів, що розраховані за допомогою написаної програми для однокомпонентних ЛДА типу Power Sight TR-SS-1D-561[2] (рис. 3а) та LDV-Profile Sensor [3] (рис. 3б).

Форма фільтрів розрахована за умови, що на фотоприймач направляються тільки ті розсіяні хвилі, для яких забезпечується значення коефіцієнту узгодження за інтенсивністю $k_{ai} \geq 0,3$.

Розрахунки показали, якщо прийом розсіяного випромінювання здійснюється в повній кутовій апертурі, то відноість доплерівського сигналу буде дорівнювати $V = 0,04$ для ЛДА [2] та $V = 0,45$ для ЛДА [3], що не дозволяє точно виміряти частоту сигналу із-за впливу завад. Якщо встановити фільтри, форма яких показана на рис. 3, то коефіцієнт глибини модуляції збільшується до $V = 0,3$ для ЛДА [2] та $V = 0,76$ для ЛДА [3]. При цьому зростає коефіцієнт узгодження розсіяного випромінювання за

інтенсивністю відповідно з $k_a = 0,35$ для [2] та $k_a = 0,58$ для [3], коли апертурна діафрагма

повністю відкрита, до $k_a = 0,80$ для [2] та $k_a = 0,83$ для [3] при використанні фільтрів.

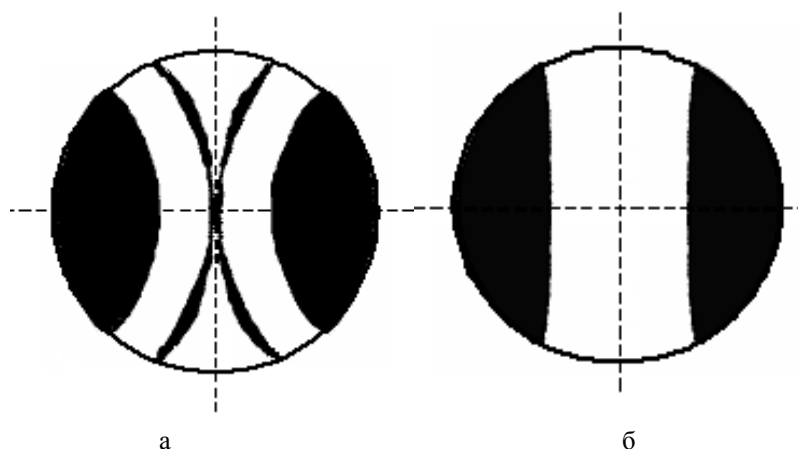


Рис. 3. Форми фільтрів, що розраховані за умови забезпечення коефіцієнта узгодження за інтенсивністю $k_{ai} \geq 0,3$; а – фільтр для ЛДА типу Power Sight TR-SS-1D-561 (розсіяння на мікрочастинці оливи $d = 7$ мкм); б – фільтр для ЛДА типу LDV-Profile Sensor (розсіяння на мікрочастинці оливи $d = 3$ мкм)

Висновки

Таким чином можна вважати доцільним розрахувати фільтр в залежності від умов проведення вимірювань, параметрів ЛДА та характеристик мікрочастинок. Це дозволить підвищити коефіцієнт глибини модуляції доплерівського сигналу та точність вимірювання швидкості потоку.

Але в ЛДА диференціального типу в кожному напрямку розповсюджуються дві розсіяні хвилі, що відрізняються не тільки за інтенсивністю але і за станом поляризації. Тому в подальшій роботі пропонується дослідити вплив стану поляризації розсіяного випромінювання на сигнал ЛДА.

Література

1. 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. 295. – P. 305-335.

2. Power sight Solid state Laser-based Ldv/pdpa Systems [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.tsi.com>. Precisions measurement instruments.

3. ILA DATA sheet. LDV-Profile Sensor [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.ila.de> Intelligent Laser Application GmbH.

4. Shinpaugh K., Simpson R. Wicks A., Ha S., Fleming J. Signal-processing techniques for low signal-to-noise ratio laser Doppler velocimetry signals / K. Shinpaugh/ / Experiments in Fluids. – 1992. – v. 12. – pp. 319-328.

5. Gouesbet G. Generalized Lorenz-Mie/ Gouesbet G. - Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. - 247 p.

6. Дубнищев Ю. Н. Методы лазерной доплеровской анемометрии / Ю. Дубнищев, Б. Ринкевичюс. – Москва: Наука, 1985. – 346 с.

7. Землянский В. М. Измерение скорости потока лазерным доплеровским методом / В. М. Землянский. – Киев: Вища школа, 1987. – 177 с.

УДК 621.378.5:525.:535.8

В. Н. Дивнич

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ГЛУБИНЫ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА СОГЛАСОВАНИЕМ РАССЕЙАННЫХ ВОЛН ПО ИНТЕНСИВНОСТИ

Лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) применяются для измерения скорости дозвуковых и сверхзвуковых аэродинамических потоков при исследовании новых типов летательных аппаратов и других областях.

Для уменьшения погрешности ЛДА, которая вызывается не соответствием скорости микрочастицы и скорости потока в поток вводят микрочастицы заданного размера.

Точность измерения ЛДА также существенно зависит от отношения сигнал/шум и коэффициента глубины модуляции доплеровского сигнала.

На отношении сигнал/шум влияет соотношение интенсивности рассеянных микрочастиц волн от двух лазерных лучей.

Для обеспечения высокой степени согласования по интенсивности рассеянных волн предлагается вместо апертурной диафрагмы использовать фильтр. С помощью фильтра можно не пропускать на фотоприемник рассеянные волны с низким согласованием по интенсивности.

Для определения формы фильтра составлена программа, позволяющая рассчитать по теории Лоренца-Ми составляющие рассеянных волн, коэффициент их амплитудного согласования и видность сигнала.

В качестве примера рассчитаны формы фильтров для ЛДА, выпускаемые фирмами TSI Inc. (США) и Intelligent Laser Application GmbH (Германия).

Целесообразно вместо апертурной диафрагмы в ЛДА устанавливать амплитудный фильтр. Это позволит повысить коэффициент глубины модуляции доплеровского сигнала и точность измерения скорости потока.

Ключевые слова: лазер, анемометр, Доплер, фильтр, интенсивность.

V. M. Divnich

National aviation university, Kyiv, Ukraine

INCREASING THE DEPTH MODULATION OF THE LASER DOPPLER ANEMOMETER SIGNAL BY MATCHING THE SCATTERED WAVES BY THEIR INTENSITY

Introduction

Laser Doppler Anemometers (LDA) are used to measure the velocity of subsonic and supersonic aerodynamic streams during testing of new types of aircraft, to study the characteristics of gas turbines, shock waves, the nature of fluid flow and in other areas.

Formulation of the problem

The accuracy of the LDA measurement also depends significantly on the signal to noise ratio and the Doppler signal modulation depth factor.

The signal to noise is also affected by the intensity ratio of two laser beams waves scattered by micro particle.

Generators of homogeneous micro particles are used to reduce the error of the LDA caused by the mismatching micro particle velocity and the velocity of the investigated stream. With the help of these generators, micro particles of a given size are introduced into the stream.

The separation of laser radiation in the differential LDA into two equal parts, which is currently used, does not ensure the coordination of scattered radiation by intensity.

Calculating the shape of aperture filter

In order to ensure a high degree of amplitude coordination, instead of aperture diaphragm, it is proposed to use an aperture filter that does not allow the photo detector to receive scattered waves with low amplitude coordination.

The method of calculating the intensity of scattered waves received within the aperture diaphragm is presented.

To determine the shape of the filter a program was made which allows calculation of components of scattered waves, the values of the amplitude matching coefficient and the Doppler modulation coefficient using Lorenz-Mie scattering theory.

Calculated forms of filters for LDA manufactured by TSI Inc. (USA) and Intelligent Laser Application GmbH (Germany) are presented.

It is advantageous to calculate aperture filter, depending on the parameters of the LDA and characteristics of the micro particles, and install it instead of the aperture diaphragm. This will increase the Doppler signal modulation depth and the accuracy of the measured flow rate.

Summary

In the subsequent work it is necessary to investigate the effect of scattered radiation polarization on the LDA signal proposed.

Keywords: laser, anemometry, Doppler, filter, intensity.

*Надійшла до редакції
20 жовтня 2017 року*

*Рецензовано
03 листопада 2017 року*

© Дивнич В. М., 2017