

## Метод оптической фильтрации сигналов в трехкомпонентных лазерных доплеровских анемометрах

*В. В. Рахманов<sup>1\*</sup>, В. А. Павлов<sup>1</sup>, Г. В. Бакакин<sup>1</sup>, С. В. Двойнишников<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: rahmanov@inbox.ru

**Аннотация.** Рассмотрены методы фильтрации сигналов в трехкомпонентных лазерных доплеровских анемометрах для разделения сигналов в оптических трактах комплементарных приборов. Предложен метод подавления взаимного влияния сигналов на основе применения монохроматических источников оптического излучения с близкими значениями длин волн и узкополосными оптическими фильтрами. Показана возможность реализации предложенного метода оптической фильтрации сигналов в трехкомпонентных лазерных доплеровских анемометрах с использованием современных полупроводниковых лазерных диодов и полосовых оптических фильтров.

**Ключевые слова:** полосовой оптический фильтр, полупроводниковый лазерный диод, лазерный доплеровский анемометр

## Optical signal filtering method in three-component laser doppler anemometers

*V. V. Rakhmanov<sup>1</sup>, V. A. Pavlov<sup>1\*</sup>, G. V. Bakakin<sup>1</sup>, S. V. Dvoynishnikov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: rahmanov@inbox.ru

**Abstract.** Methods for filtering signals in three-component laser Doppler anemometers for separating signals in optical paths of complementary devices are considered. A method is proposed for suppressing the mutual influence of signals based on the use of monochromatic sources of optical radiation with close wavelengths and bandpass optical filters. The possibility of implementing the proposed method of signals optical filtering in three-component laser Doppler anemometers using modern semiconductor laser diodes and bandpass optical filters is shown.

**Keywords:** bandpass optical filter, semiconductor laser diode, laser Doppler anemometer

### *Введение*

Измерение полного вектора скорости в аэро- и гидродинамических экспериментах является актуальной задачей. Одним из методов, позволяющим измерить трехкомпонентный вектор скорости потока, является метод на основе лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) [1].

В данной работе использовался трехкомпонентный лазерный доплеровский анемометр ЛАД-056 на основе двух коммутационных полупроводниковых 2D ЛДА с адаптивным временным разделением сигналов в оптических каналах [2–3]. Каждый из приборов одновременно принимает рассеянный свет только от

своего источника излучения за счет использования оптической схемы с ортогональным расположением поляризации лазерного излучения и применения поляризационных фильтров с линейной поляризацией. Восстановление полного вектора скорости обеспечивается сведением в одну точку измерительных зон приборов, размещенных под углом друг к другу.

Такой метод построения трехкомпонентного ЛДА зарекомендовал себя как работоспособный и надежный. Однако в условиях слабой интенсивности приемного оптического сигнала (в средах в высоком светопоглощении) возникает необходимость работать с высоким коэффициентом усиления фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), используемого в качестве фотоприемника. В таких задачах усиление ФЭУ может достигать величины  $10^6$  [4]. Поляризационный фильтр, используемый в данных приборах, обеспечивает оптическую фильтрацию сигнала с ортогональной поляризацией на уровне  $10^4$ , что недостаточно для надежного подавления сигнала от комплементарного прибора при таких усилениях сигнала на ФЭУ. Кроме того, на светоотражающих частицах может возникнуть деполяризация отраженного сигнала [5], что еще больше ухудшит оптическую фильтрацию и снизит соотношение сигнал/шум в приемном тракте ЛДА.

В данной работе предложен метод улучшения оптической фильтрации трехкомпонентного лазерного доплеровского анемометра ЛАД-056 для подавления взаимного влияния сигналов комплементарных приборов на основе применения монохроматических источников оптического излучения с близкими значениями длин волн и узкополосными оптическими фильтрами.

### *Описание метода*

Метод основан на модернизации лазерного излучателя на одном из двухкомпонентных ЛДА с целью изменения длины волны и добавления узкополосной оптической фильтрации для большего подавления взаимного влияния сигналов комплементарных модулей.

Схематично внешний вид трехкомпонентного ЛДА ЛАД-056 представлен ниже (рис. 1).

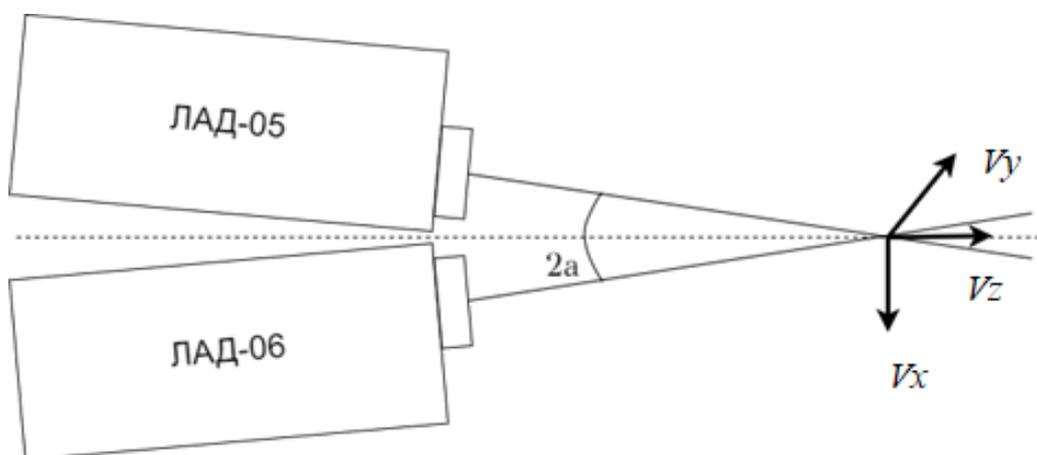


Рис. 1. Трехкомпонентный ЛДА ЛАД-056 (вид сверху)

Когда угол между оптическими осями приборов равен  $2\alpha$  компоненты вектора скорости  $V_x$  и  $V_z$  вычисляются по формулам:

$$V_x = \frac{V_2 + V_1}{2\cos\alpha} \quad (1)$$

$$V_z = \frac{V_2 - V_1}{2\sin\alpha}, \quad (2)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – компоненты вектора скорости  $V$ , измеренные приборами ЛАД-05 и ЛАД-06 соответственно.

При этом каждый прибор измеряет также компоненту скорости  $V_y$  (перпендикулярную плоскости рисунка) независимо от другого прибора, что позволяет верифицировать измерения. Таким образом, получается одновременное измерение сразу трех компонент скорости  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ .

Так как оптические схемы приборов изготовлены зеркально, то в те моменты, когда прибор принимает сигнал не от своего лазерного излучателя, на графике измеренной скорости появляются данные с обратным знаком (рис. 2).

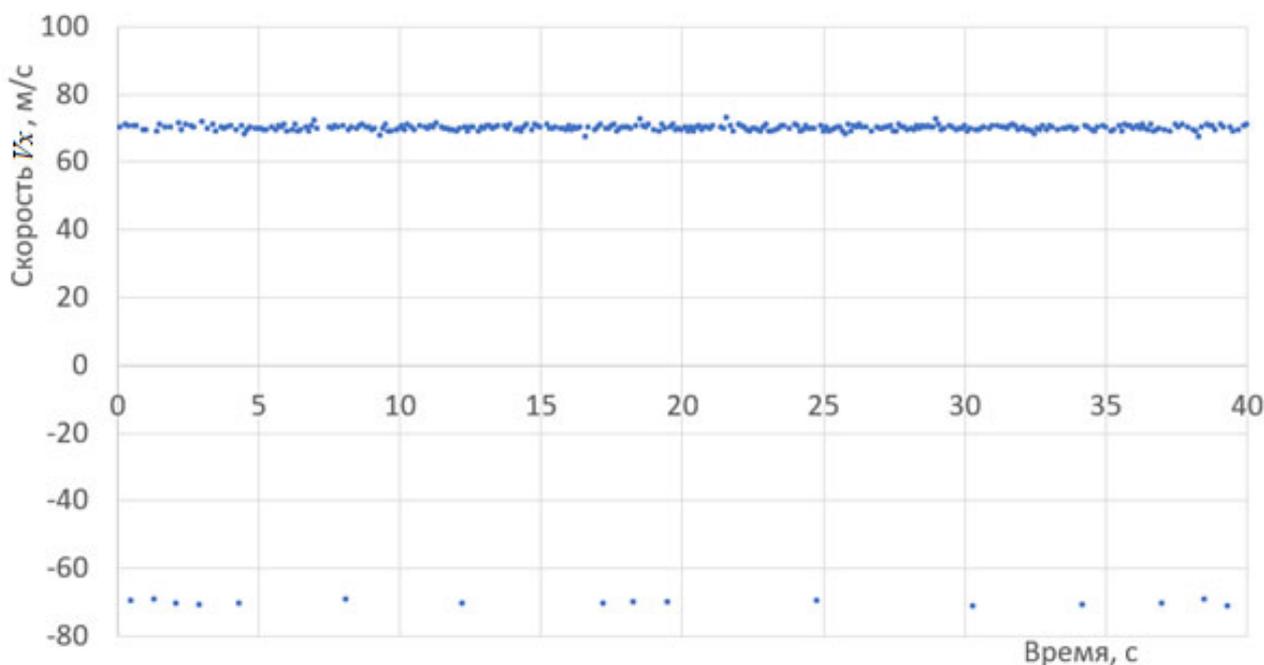


Рис. 2. Зависимость  $V_x$  компоненты скорости аэродинамического потока от времени

В результате появления данных о скорости с противоположным знаком происходит смещение оценки средней скорости потока в сторону меньших значений.

Для решения этой проблемы было предложено разнести длины волн двух двухкомпонентных ЛДА. Это позволит улучшить оптическую развязку двух приборов за счет полосовой оптической фильтрации в дополнение к поляризационной. Были выбраны лазерные диоды с номинальными длинами волн 638 и 660 нм. Такой выбор длин волн позволяет не перестраивать существенно оптические элементы приборов, оптимизированных на длину волны 660 нм. Кроме того, это позволит проводить измерения в средах с показателем преломления, отличным от единицы. Так для воды на этих длинах волн показатели преломления равны 1,332 и 1,331 соответственно. При заглублении в поток на 100 мм, расхождение точек измерения, вызванное разницей коэффициентов преломления, будет не более 0,1 мм, что является приемлемым для многих задач.

Так как в данных ЛДА используются полупроводниковые лазерные диоды, то для уменьшения температурных дрейфов длины волны излучения ( $\sim 0,2$  нм/°С) лазерные модули в ЛДА термостабилизированы на уровне  $40 \pm 0,5$  °С. При данной рабочей температуре были измерены длины волн излучения лазерных диодов при помощи спектрографа-монокроматора MSDD1000 со спектральным разрешением по длине волны 0,012 нм.

Характерный вид спектра лазерного излучения для диода на 660 нм показан на рис. 3.

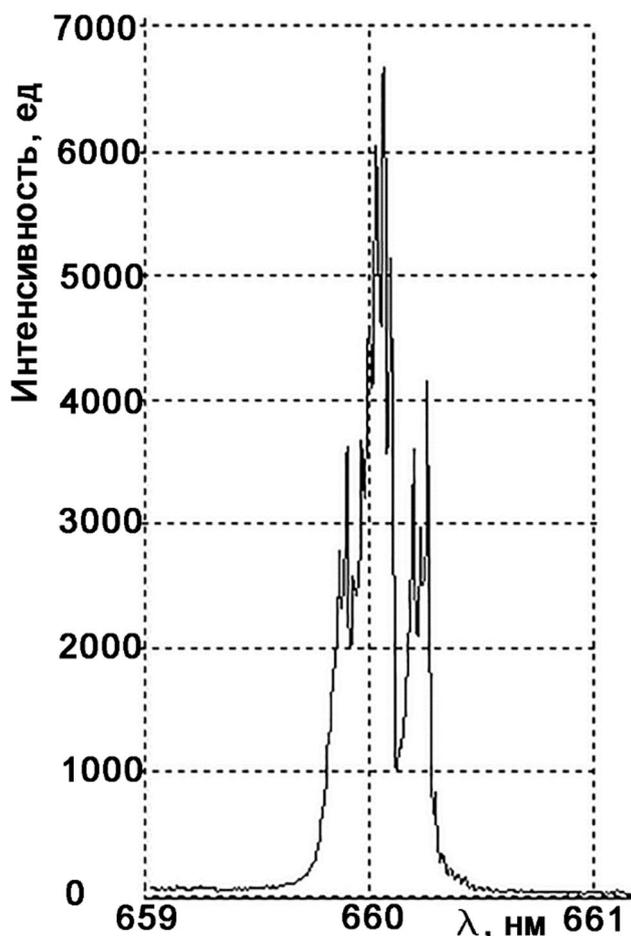


Рис. 3. Характерный спектр оптического излучения лазерного диода

При температуре 40°C и оптической мощности 120 мВт длины волн излучения составили 643 и 664 нм.

Использование оптических фильтров со сверхузкой полосой пропускания (полная ширина на полувысоте (FWHM) менее 1–2 нм) для полупроводниковых лазеров нецелесообразно. Такие фильтры имеют крутую характеристику спада коэффициента пропускания. Изменение длины волны излучения на 0,2 нм для фильтра с полосой пропускания 1 нм, приведет к потере до 20% интенсивности приемного сигнала, что существенно ухудшит соотношение сигнал/шум приемного тракта.

Так как разница между пиками излучения составляет 21 нм, то были выбраны коммерческие полосовые оптические фильтры с WNM 20 нм и центральными частотами 638 и 660 нм.

### *Результаты*

Были выполнены измерения характеристик пропускания оптического излучения обоих фильтров в зависимости от длины волны (рис. 4, 5).

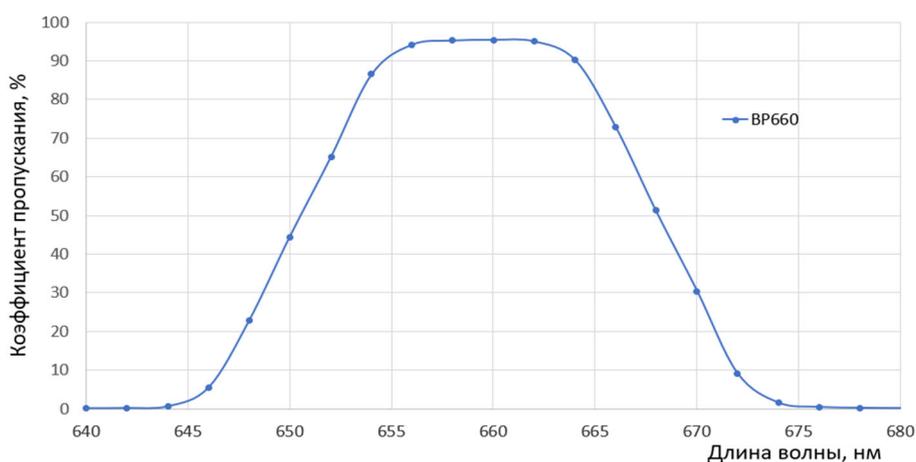


Рис. 4 Коэффициент пропускания фильтра ВР660

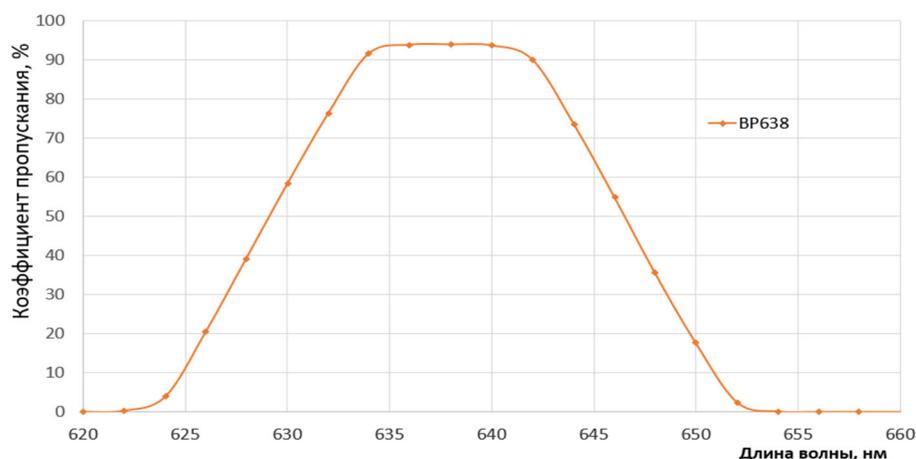


Рис. 5. Коэффициент пропускания фильтра ВР635

Из полученных данных можно сделать вывод, что фильтр на 660 нм будет ослаблять излучение лазера на длине волны 643 нм в 180 раз, а фильтр на 638 нм ослабит излучение от на длине волны 664 нм в более чем 1000 раз.

Такая фильтрация в дополнение к поляризационной обеспечит ослабление сигналов с комплиментарных ЛДА более чем  $10^6$  раз, что позволит решить проблемы взаимовлияния сигналов лазерного излучения.

### ***Заключение***

В работе предложен метод подавления взаимного влияния сигналов лазерного излучения комплементарных ЛДА в схеме получения трехкомпонентного анемометра. Метод основан на применении монохроматических источников оптического излучения с близкими значениями длин волн и узкополосными оптическими фильтрами.

Показано, что применение данного метода позволит обеспечить дополнительную фильтрацию сигналов в трехкомпонентных лазерных доплеровских анемометрах на 2–3 порядка. Также данный метод будет обеспечивать эффективную фильтрацию в случае деполяризации излучения от светорассеивающих частиц.

В данном методе оптической фильтрации сигналов ЛДА возможно улучшение характеристик подавления паразитного излучения за счет обеспечения более точной термостабилизации лазерного модуля на уровне  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  и применения сверхузкополосных оптических фильтров с внеполосным подавлением на уровне  $10^4 - 10^5$  раз. Однако для этого необходима дальнейшая работа по улучшению температурной стабилизации лазерных полупроводниковых диодов или замены их на более стабильные виды лазеров.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Дубнищев Ю. Т., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.
2. Dancey, C. L. A review of three component laser Doppler anemometry // J. Opt. Sensors., 1987. – № 2. – P. 437–469.
3. Рахманов В.В., Наумов И.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Способ измерения полного вектора скорости в гидропотоках с помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Патент РФ № 2612202, приоритет 10.11.2015, опубликовано 03.03.2017.
4. Hamamatsu Photonics K. K. (2017). PHOTOMULTIPLIER TUBES Basics and Applications, 4-th edition. [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT\\_handbook\\_v4E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v4E.pdf) (Дата обращения 10 апреля 2022 г.)
5. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961.

© В. В. Рахманов, В. А. Павлов, Г. В. Бакакин, С. В. Двойнишников, 2022