

К. С. Зубанов^{1,2}✉, И. К. Кабардин¹, В. В. Рахманов¹, А. М. Оборин¹

Оптимизация оптической схемы дифференциального оптического ЛДА

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Аннотация. В работе представлена компактная оптическая схема лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), в которой традиционные акустооптические модуляторы заменены светоделительным кубом, а для детектирования сигналов использован микропиксельный кремниевый фотоумножитель. Исследование направлено на адаптацию данной конструкции для реальных экспериментов, где ключевыми вызовами стали уменьшение амплитуды доплеровского сигнала на расстоянии, несовпадение лазерных пучков в измерительной области, а также зависимость интенсивности разделенных пучков от светоделительного куба. Эксперименты проводились с дымовыми частицами, что позволило оценить соотношение сигнал-шум (SNR). Результаты показали резкое снижение SNR на расстояниях до 500 мм, при этом замена транзисторов на операционные усилители в схеме фотоприемника повысила качество сигнала, сохранив достаточный диапазон измеряемых скоростей. Анализ точности сведения лазерных пучков выявил отклонения, вызванные несовершенством куба, расщепляющего луч, что потребовало коррекции с помощью плоскопараллельных пластин. Было исследовано влияние поляризации входного лазерного пучка на соотношение интенсивностей расщепленного пучка, которое варьировалось от 1:10 до 2:3 в зависимости от типа куба. На основе полученных данных предложен выбор оптимального расстояния до измерительной области, равного 400 мм. Предложен метод компенсации геометрических погрешностей. Разработанная схема сочетает компактность и экономическую эффективность, расширяя возможности применения ЛДА в образовательных и промышленных задачах, где критически важны мобильность и адаптивность измерительных систем.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, светоделительный куб, микропиксельный кремниевый фотоумножитель

K. S. Zubanov^{1,2}✉, I. K. Kabardin¹, V. V. Rakhmanov¹, A. M. Oborin¹

Optimization of the optical circuit of the differential optical LDA

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Abstract. This study presents a compact optical design of a laser Doppler anemometer (LDA), where traditional acousto-optic modulators are replaced by a beam-splitting cube, and a micro-pixel silicon photomultiplier is employed for signal detection. The research focuses on adapting this design for practical applications, addressing key challenges such as Doppler signal attenuation over distance, misalignment of laser beams in the measurement volume, and the dependency of split-beam intensity ratios on the beam-splitting cube's properties. Experiments conducted with smoke particles enabled evaluation of the signal-to-noise ratio (SNR), revealing a sharp decline in SNR at distances up to 500

mm. Replacing transistors with operational amplifiers in the photodetector circuit improved signal quality while preserving a sufficient measurable velocity range. Analysis of beam alignment accuracy highlighted deviations caused by beam-splitting cube imperfections, necessitating correction via plane-parallel plates. The influence of input laser polarization on split-beam intensity ratios was investigated, demonstrating variations from 1:10 to 2:3 depending on the cube type. Based on the findings, an optimal measurement distance of 400 mm is proposed, alongside a method to compensate for geometric inaccuracies. The developed system combines compactness and cost-effectiveness, expanding the applicability of LDA in educational and industrial settings where mobility and adaptability of measurement systems are critical.

Keywords: laser Doppler anemometry, beam-splitting cube, micro-pixel silicon photomultiplier

Введение

С момента своего появления в 1964 году [1], лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) заняла центральное место в экспериментальных исследованиях гидродинамических процессов. Данная технология, основанная на анализе доплеровского смещения частоты света, рассеянного движущимися частицами, обеспечивает неинвазивное измерение скоростей с пространственным разрешением на микронном масштабе и погрешностью ниже 0,1% [2]. Широкий динамический диапазон и высокая временная точность метода обусловили его применение в задачах аэродинамики, изучения турбулентности и контроля промышленных потоков [3, 4], где традиционные контактные методы демонстрируют ограниченную эффективность.

Современные тенденции развития ЛДА связаны с миниатюризацией систем и снижением их стоимости без ущерба для метрологических характеристик [5]. Классические схемы, использующие акустооптические модуляторы (ячейки Брэгга) и громоздкую оптику, постепенно уступают место компактным решениям. В данной работе представлена оптимизированная конструкция лазерного доплеровского анемометра, в которой роль ключевых компонентов выполняют светоделительный кубик – замена ячейки Брэгга, формирующий интерференционную картину, и микропиксельный кремниевый фотоумножитель, обеспечивающий высокочувствительное детектирование.

Основной целью работы исследования является адаптация данной оптической схемы для работы в условиях реальных экспериментов. Однако замена традиционных элементов выявила новые вызовы. К ним относятся:

- ограничение дальности измерений из-за падения амплитуды сигнала при увеличении расстояния до измерительной области;
- несовпадение лазерных пучков, разделенных светоделительным кубиком, в точке пересечения – измерительной области.

Для исследования системы проведены эксперименты с дымовыми частицами. Особое внимание уделено анализу соотношения сигнал-шум (SNR) и эффектам, возникающим при использовании светоделительного куба для деления лазерного луча на два когерентных пучка.

Данное исследование позволяет понять ограничения и возможности использования представленной в работе оптической схемы для применения ЛДА в об-

разовательных и промышленных сценариях, где критически важны мобильность и экономическая эффективность.

Методы и материалы

Оптическая схема прототипа лазерного доплеровского анемометра, использованного в данной работе и основанного на кубическом делителе пучка, представлена на рис. 1. Лазерный пучок от лазера (1) ($\lambda = 660$ нм, 150 мВт) направлялся на фокусирующую линзу (2), которая формировала перетяжку пучка в пространстве. Путем замены линзы и использования комбинаций рассеивающих и собирающих линз можно было регулировать положение перетяжки пучка вдоль лазерного луча, что необходимо для правильной юстировки прибора.

После прохождения через кубический делитель пучка (3) ($20 \times 20 \times 20$ мм) лазерный пучок разделялся на два когерентных пучка с соотношением интенсивностей 1:3. Кубический делитель пучка задавал точку пересечения двух лазерных пучков. Затем разделенные пучки направлялись в исследуемую область потока. При пересечении в потоке лазерные пучки формировали интерференционную картину с известной пространственно-временной периодической структурой. Свет, рассеянный частицами, собирался объективом (4) и фокусировался через оптический фильтр (5) и апертуру (6) на фотодетектор (7) (микروпиксельный лавинный кремниевый фотодетектор).

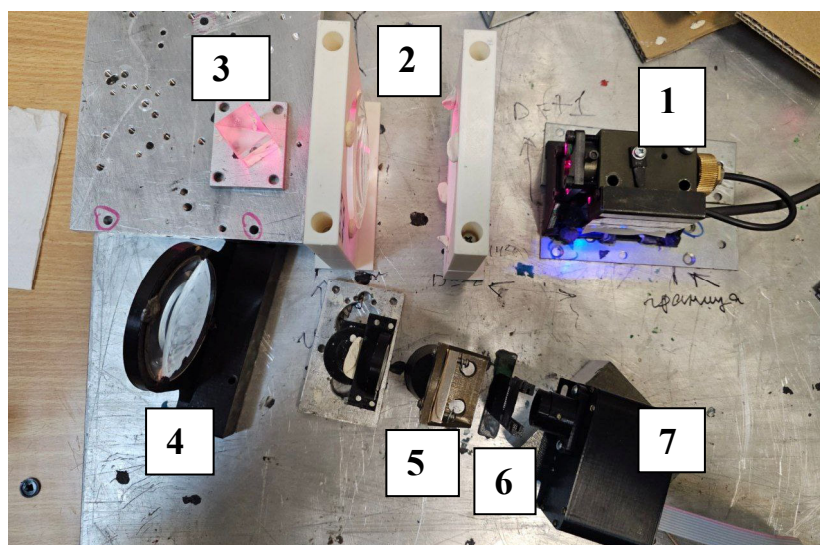


Рис. 1. Фотография оптической схемы ЛДА

Для исследования сведения в точку двух лазерных пучков, которые получаются на выходе из светоделительного куба, использовалась схема, представленная на рис. 2. Устанавливался He-Ne лазер, перед которым располагался светоделительный куб. Лазерный луч, попадающий на куб, делился на два когерентных пучка, которые сводились на экране в точку путем поворота светоделительного куба.



Рис. 2. Схема исследования сведения двух лазерных пучков в точку

Результаты

Было исследовано отношение полезного доплеровского сигнала к шуму на различных расстояниях между светоделительным кубом и измерительной областью (рис. 3, 4). Для перемещения перетяжки лазерного луча в измерительную область каждый раз подбиралась комбинация двух линз (рис. 1).

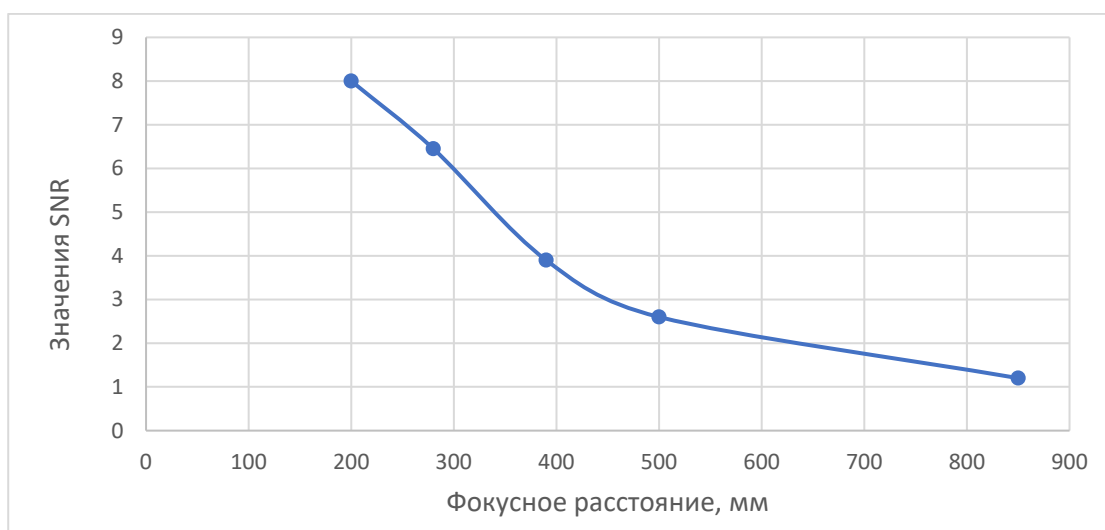


Рис. 3. Зависимость SNR от дальности измерительной области для схемы фотоприемника на основе транзисторов

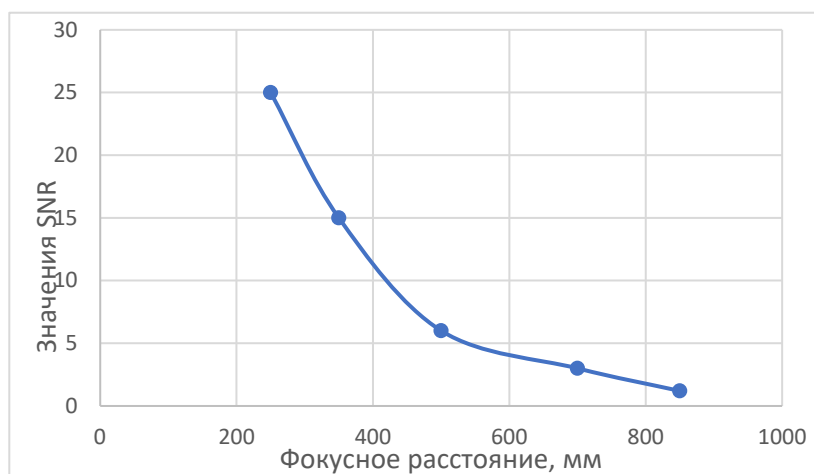


Рис. 4. Зависимость SNR от дальности измерительной области для схемы фотоприемника на основе операционных усилителей

Представленные выше зависимости отношения доплеровского сигнала к шуму имеют схожую зависимость от расстояния между светоделительным кубом и измерительной областью. При этом, SNR для фотоприемника на основе операционных усилителей имеет значения больше, чем для схемы на транзисторах. Связано это с тем, что ширина полосы пропускания оказывается меньше. При этом диапазон значений скорости, которые возможно измерить, используя фотоприемник с операционными усилителями в схеме, оказывается также меньше, но все еще достаточным для большинства физических экспериментов.

Полученные данные говорят о том, что отношение сигнала к шуму для данной оптической схемы (рис. 1), резко уменьшается в диапазоне от 200 мм до 500 мм. Затем наступает область, где спад продолжается, но он уже является более плавным. Для настройки оптической схемы расстояние между светоделительным кубом и измерительной областью свыше 500 мм является неоптимальным.

Также была проверена точность сведения двух разделенных пучков светоделительным кубом в одну точку. Данный фактор является очень важным, так как напрямую влияет на построение измерительной области и интерференционной картины.

Были проверены три различных светоделительных куба. Один из них сводил пучки точно в точку. Для остальных двух было замечено расхождение пучков в точке пересечения. Как можно заметить на фотографиях (рис 5.), один из лучей находится чуть выше другого, что может сильно сказываться на создании интерференционной картины в измерительной области. Чтобы это исправить, необходимо использовать плоскопараллельные пластины для изменения направления одного из лучей.

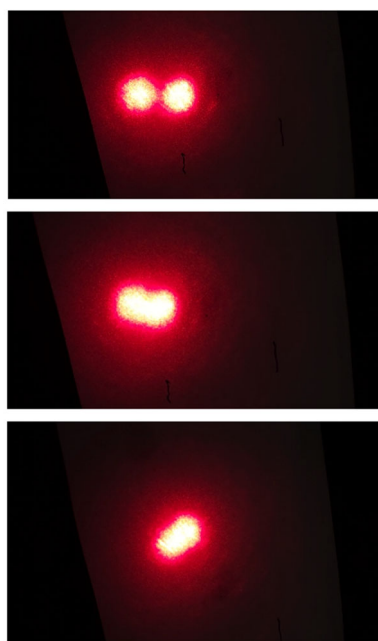


Рис. 5. Изменения положение лучей друг относительно друга в пределах измерительной области (на фотографиях и значально левая точка движется в правую сторону)

Также было проверено то, как различные светоделительные кубы делят исходный луч на два по интенсивности. Данные эксперименты были выполнены на

He-Ne лазере с использованием светоделительных кубов (рис. 2), с поставленными поляризаторами до и после куба.

Изначально задавалась либо вертикальная, либо горизонтальная поляризация относительно куба (рис. 6), а на выходе, путем поворота поляризатора, проверялась выходная поляризация. Было необходимо, чтобы поляризация на выходе совпадала у обоих лучей. Как оказалось, для различных светоделительных кубов, входная поляризация определяет интенсивности выходных лучей по-разному. На одном кубе горизонтальная поляризация позволяет добиться отношения интенсивности двух лучей, равного $2/3$, тогда как вертикальная поляризация на входе может сделать данное отношение $1/10$ или еще меньше.



Рис. 6. Положение поляризации лазерного луча на входе в светоделительный куб

Обсуждение

Переход с транзисторов на операционные усилители в схеме фотоприемника позволил значительно увеличить отношение доплеровского сигнала к шуму. В связи с этим было решено: для того, чтобы выстраивать в дальнейшем оптическую схему, расстояние 400 мм между точкой пересечения лучей и светоделительным кубом является оптимальным.

Как оказалось, различные светоделительные кубы могут сводить два пучка в точку неидеально. Данный фактор зависит от самого светоделительного куба, и может лишь быть нивелирован путем добавления в схему плоскопараллельных пластин. Либо необходимо подбирать такие кубы, которые идеально сводят лучи в точку, что, в свою очередь, может стать проблемой при создании ЛДА с использованием подобной схемы.

Также необходимо производить проверку каждого нового светоделительного куба на деление исходного луча по интенсивностям. Отношение 1 к 1 является самым лучшим. В свою очередь, такой результат можно получить при использовании дополнительного поляризатора в схеме, но при этом общая интенсивность окажется меньше.

Заключение

Было исследовано отношение полезного доплеровского сигнала к шуму (SNR) для представленной оптической схемы дифференциального лазерного доплеровского анемометра на основе светоделительного куба. Замечен резкий спад данного значения в области до 500 мм, тогда как после спад более плавный.

Для различных светоделительных кубов была проверена возможность сводить два разделенных пучка ровно в точку в области пересечения лучей. Необходимо закладывать возможность для компенсации неточного пересечения лучей в измерительной области путем наклона плоскопараллельных пластин на выходе из светоделительного куба.

Было проверено деление одного луча на два пучка по интенсивностям для различных светоделительных кубов. Отношение интенсивностей двух лучей, образующих измерительную область, зависит от самого светоделительного куба. Необходимо выбрать какую поляризацию луча на входе куба использовать – вертикальную или горизонтальную. Таким образом, необходимо анализировать каждый светоделительный куб и выбирать наилучший случай, когда отношение интенсивностей выходных лучей максимально.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yeh Y and Cummins H Z 1964 Localized fluid flow measurements with a HeNe laser spectrometer Appl. Phys. Lett. 4 176–8.
2. Drain L E 1980 The Laser Doppler Technique (Chichester: Wiley).
3. Durst F, Melling A and Whitelaw J H 1976 Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry (London: Academic).
4. Tropea C 1995 Laser Doppler anemometry: recent developments and future challenges Meas. Sci. Technol. 6 605–19.
5. Czarske J 2006 Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources Meas. Sci. Technol. 17 R71–91.

© К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, В. В. Рахманов, А. М. Оборин, 2025